Reakciókinetika és katalízis

7. előadás: Oszcillációs kémiai reakciók

Cím

Oszcillációs reakciók

Bevezetés

Oszcilláció zárt rendszerben

A BZ-reakció FKN-mechanizmusa

Az Oregonátor-modell és dinamikája

Káosz

A káosz kialakulása

Példa 1.

Példa 2.

Példa 3.

Összefoglalás

Bevezetés

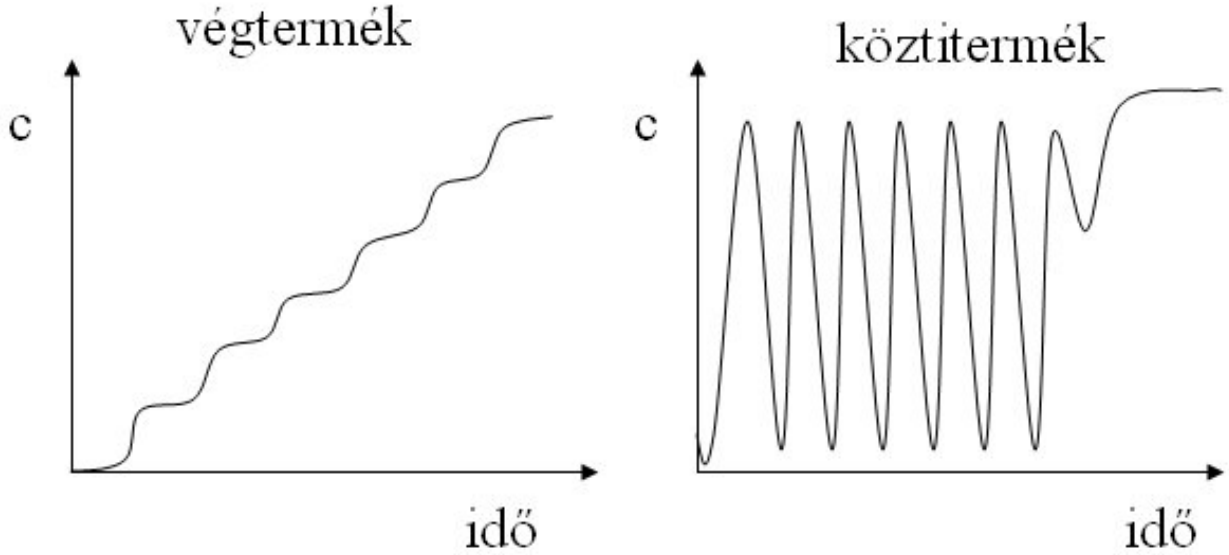
Az oszcilláció fogalma

- A kémiában akkor beszélünk oszcillációról, ha *egy kémiai jelenség periodikus*.
- Egy kémiai jelenség periodicitása azt jelzi, hogy *bizonyos részecskék koncentrációja időben periodikusan változik*.
- A megfelelő *koncentráció-idő görbéken* - szabályos időközönként - *minimumok és maximumok* váltják egymást.
- A koncentrációoszcillációt bonyolult berendezések nélkül is érzékelhetjük, ha például egy oldat színe periodikusan változik: piros-kék-piros-kék-stb.

Cím
Oszcillációs reakciók
Bevezetés
Oszcilláció zárt rendszerben
A BZ-reakció FKN-mechanizmusa
Az Oregonátor-modell és dinamikája
Káosz
A káosz kialakulása
Példa 1.
Példa 2.
Példa 3.
Összefoglalás

NAGYON FONTOS

- A rendszer **NEM** a kezdeti és végállapot között "ingadozik".
- Miközben a reakció a termodinamikai egyensúly felé halad, a *köztitermékek koncentrációja változik periodikusan.*



Végtermék és köztitermék koncentrációjának sematikus változása periodikus kémia reakcióban.

- **Legnevezetesebb példa**: A Belouszov-Zsabotyinszkij (BZ) reakció a malonsav cérium-ionok katalizálta oxidációja bromáttal kénsavas közegben (1959, 1967).

Cím
Oszcillációs reakciók
Bevezetés
Oszcilláció zárt rendszerben
A BZ-reakció FKN-mechanizmusa
Az Oregonátor-modell és dinamikája
Káosz
A káosz kialakulása
Példa 1.
Példa 2.
Példa 3.
Összefoglalás

Oszcillációs kémai reakciók zárt rendszerben

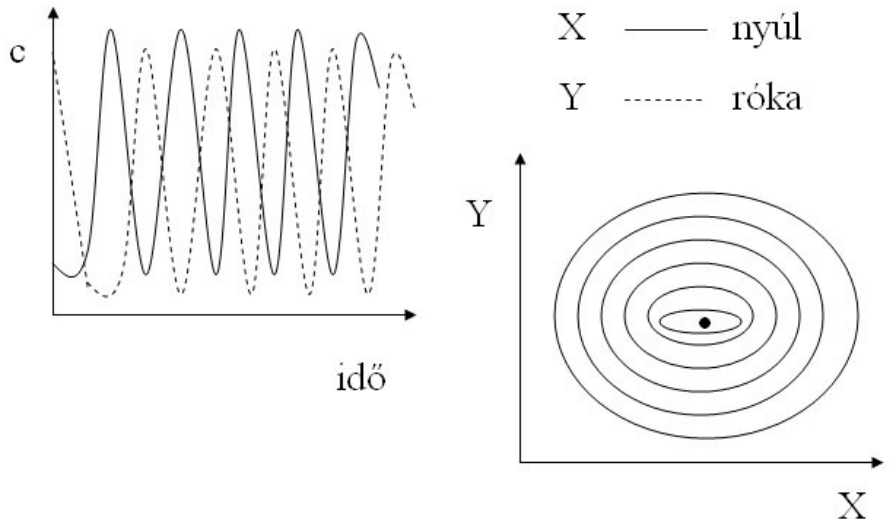
1. *Az oszcilláció kialakulásának feltételei:*
   - termodinamikai egyensúlytól távoli rendszer
   - instabilitást előidéző kémiai reakciók a mechanizmusban:
     - pozitív visszacsatolás (közvetlen vagy közvetett autokatalízis)
     - negatív visszacsatolás (inhibíció)
2. *Klasszikus példa:a Lotka-Volterra (LV) modell*

   (Lotka, 1920; Volterra, 1931)

   [A] + X→2X (LV1)

   X + Y → 2Y (LV2)

   Y → /P/ (LV3)



A köztitermékek, X és Y koncentrációjának periodikus változása csak a kezdeti feltételektől függ.

Az ilyen dinamikai rendszereket konzervatív oszcillátoroknak nevezzük.

Cím

Oszcillációs reakciók

Bevezetés

Oszcilláció zárt rendszerben

A BZ-reakció FKN-mechanizmusa

Az Oregonátor-modell és dinamikája

Káosz

A káosz kialakulása

Példa 1.

Példa 2.

Példa 3.

Összefoglalás

A BZ-reakció FKN-mechanizmusa

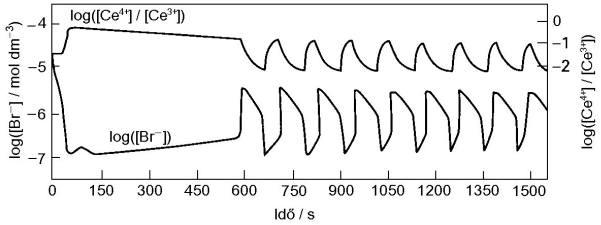
B. P. BELOUSOV
ca. 1950
(Courtesy of S. E. Scholl and A. Panfilov)

A. M. ZHABOTINSKII
Summer 1983
(Photo by A. T. Winfree)

A BZ-reakció rövid története

- B.P. Belousov, Sb. Ref. Radiat. Med. (Moscow), **1959**, 1958, 145-147.
- Egy korábbi, 1951-es kézirat angol változata: R.J. Field, M. Burger: Oscillations and Traveling Waves in Chemical Systems Wiley, N.Y., 1985, 605-613.

A jelenség:



A $[Ce^{4+}]/[Ce^{3+}]$ koncentrációarány és a $[Br^{-}]$ koncentráció periodikus változása a BZ-reakcióban kb. egy órányi indukciós periódus után.

Cím
Oszcillációs reakciók
Bevezetés
Oszcilláció zárt rendszerben
A BZ-reakció FKN-mechanizmusa
Az Oregonátor-modell és dinamikája
Káosz
A káosz kialakulása
Példa 1.
Példa 2.
Példa 3.
Összefoglalás

A BZ-reakció FKN-mechanizmusa

R. J. Field, E. Kőrös, R. M. Noyes:
J. Am. Chem. Soc., **1972**, 94, 1394-1395
J. Am. Chem. Soc., **1972**, 94, 8649-8664*

* Current Contents, 1984. február 20., This Week's Citation Classic, az első 12 év alatt több mint 280, a megjelenés óta közel 40 év alatt pedig 1029 független hivatkozás

A reakciók furcsa sorrendű számozásának történelmi okai vannak!

"A" folyamat:

Kénsavas közegben lejátszódó bromátion-bromidion reakció, melyben a brómtartalmú reakciópartnerek sorozatos, kételektronos oxidációs-redukciós lépésekben oxigént cserélnek. *A folyamat végterméke az elemi bróm.*

$\mathrm{BrO_3^- + Br^- + 2H^+ \rightarrow HBrO_2 + HOBr}$ [R3]
$\mathrm{HBrO_2 + Br^- + H^+ \rightarrow 2HOBr}$ [R2]
$\mathrm{HOBr + Br^- + H^+ \rightarrow Br_2 + H_2O}$ [R1]

Bruttó folyamat ([R3]+[R2]+3[R1]):

$\mathrm{BrO_3^- + 5Br^- + 6H^+ \rightarrow 3Br_2 + 3H_2O}$

A részreakciók kinetikája ismert, a sebességi állandók könnyen becsülhetők.

Cím
Oszcillációs reakciók
Bevezetés
Oszcilláció zárt rendszerben
A BZ-reakció FKN-mechanizmusa
Az Oregonátor-modell és dinamikája
Káosz
A káosz kialakulása
Példa 1.
Példa 2.
Példa 3.
Összefoglalás

"B" folyamat:

a Ce^{3+}-ion bromátion általi oxidációja kénsavas közegben. A folyamat végterméke a hipobrómossav.

A reakció **autokatalitikus** jellegű. A kísérleti sebességi egyenlet:

$$-\mathrm{d}[\mathrm{BrO_3^-}]/\mathrm{d}t = k_{\mathrm{exp}}[\mathrm{BrO_3^-}]^2 \qquad (1)$$

Az eredményekkel összhangban lévő reakciólépéseket *Noyes, Field és Thompson* (NFT-mechanizmus) a következőképpen adta meg:

$\mathrm{BrO_3^- + HBrO_2 + H^+ \rightarrow 2 \cdot BrO_2 + H_2O}$ [R5]

$\mathrm{\cdot BrO_2 + Ce^{3+} + H^+ \rightarrow HBrO_2 + Ce^{4+}}$ [R6]

$\mathrm{2HBrO_2 \rightarrow BrO_3^- + HOBr + H^+}$ [R4]

Bruttó folyamat (2[R5]+4[R6]+[R4]):

$\mathrm{BrO_3^- + 4Ce^{3+} + 5H^+ \rightarrow HOBr + 4Ce^{4+} + 2H_2O}$

A brómossav ($HBrO_2$) képződése *autokatalitikus* ([R5]+2[R6]):

$\mathrm{BrO_3^- + HBrO_2 + 2Ce^{3+} + 3H^+ \rightarrow 2HBrO_2 + 2Ce^{4+} + H_2O}$

A bruttó reakció sebességének másodrendű bromátfüggése a lassú, sebességmeghatározó [R5] lépés kinetikájából következik.

Cím
Oszcillációs reakciók
Bevezetés
Oszcilláció zárt rendszerben
A BZ-reakció FKN-mechanizmusa
Az Oregonátor-modell és dinamikája
Káosz
A káosz kialakulása
Példa 1.
Példa 2.
Példa 3.
Összefoglalás

Kvázistacionárius közelítést alkalmazva a $\cdot BrO_2$-gyök és brómossav koncentrációjára az adódik, hogy

$$[HBrO_2]_s = (k_5/2k_4)[BrO_3^-][H^+] \qquad (2)$$

s így a bruttó folyamat sebességi egyenlete a következő:

$$-d[BrO_3^-]/dt = (k_5^2/4k_4[BrO_3^-]^2[H^+]^2 \qquad (3)$$

ami teljesen összhangban van a kísérletileg talált (1) sebességi egyenlettel.

Az "A" és "B" folyamatok eredménye a bromátion átalakítása hatékony brómozó reagensekké:

- az "A" folyamat végterméke Br_2
- a "B" folyamat végterméke HOBr

Cím
Oszcillációs reakciók
Bevezetés
Oszcilláció zárt rendszerben
A BZ-reakció FKN-mechanizmusa
Az Oregonátor-modell és dinamikája
Káosz
A káosz kialakulása
Példa 1.
Példa 2.
Példa 3.
Összefoglalás

"C" folyamat:

A brómozó reagensek a malonsavat (MA) bróm-malonsavvá (BrMA) alakítja át:

$$\mathrm{Br_2 + MA \rightarrow BrMA + Br^- + H^+} \qquad \text{(R8a)}$$

$$\mathrm{HOBr + MA \rightarrow BrMA + Br^- + H_2O} \qquad \text{(R8b)}$$

A Ce^{4+}-ion (hipobrómossav jelenlétében) oxidálja a szerves savakat és brómozott származékaikat :

$$\mathrm{6Ce^{4+} + MA + 2H_2O + HOBr \rightarrow 6Ce^{3+} + 3CO_2 + 7H^+ + Br^-} \text{[R9]}$$

$$\mathrm{4Ce^{4+} + BrMA + 2H_2O + HOBr \rightarrow 4Ce^{3+} + 3CO_2 + 6H^+ + 2Br^-} \text{[R10]}$$

A "C" folyamat hatása összetett:

- fogyasztja az "A" és "B" folyamatok végtermékeit
- bromidion forrás (**késleltetett negatív visszacsatolás**)
- redukálja a Ce^{4+} iont (a "B" folyamat másik végtermékét)

Cím

Oszcillációs reakciók

Bevezetés

Oszcilláció zárt rendszerben

A BZ-reakció FKN-mechanizmusa

Az Oregonátor-modell és dinamikája

Káosz

A káosz kialakulása

Példa 1.

Példa 2.

Példa 3.

Összefoglalás

Összefoglalás:

Az FKN-mechanizmus szerint a BZ-reakció oszcillációs viselkedésének okai:

- autokatalízis + késleltetett negatív visszacsatolás
- az "A" és "B" folyamatok kompetíciója
  - a bromidion és a brómossav (a köztitermékek) "versengenek" a bromátionnal való reakcióért,
  - mivel az R2 reakció szerint egy nagyon gyors reakcióban reagálnak egymással, ezért egyszerre nem lehetnek nagy mennyiségben jelen.

Sok bromid, kevés brómossav: "A" folyamat domináns
Kevés bromid, sok brómossav: "B" folyamat domináns
A "C" folyamat szerepe a "B" folyamat "kikapcsolása" és az "A" folyamat bekapcsolása.
Az FKN-mechanizmusban "benne" van az oszcilláció lehetősége! Bizonyítsuk be, hogy a modell alkalmas körülmények között oszcillációs viselkedést eredményezhet!

Cím
Oszcillációs reakciók
Bevezetés
Oszcilláció zárt rendszerben
A BZ-reakció FKN-mechanizmusa
Az Oregonátor-modell és dinamikája
Káosz
A káosz kialakulása
Példa 1.
Példa 2.
Példa 3.
Összefoglalás

Az Oregonátor-modell és dinamikája

Legfontosabb reakciók:

"A" : R3, R2

"B" : R4, R5 + 2R6

"C" : R9 + R10

Jelölések:

- reaktánsok: [A]≡BrO_3^-, [B]≡(MA + BrMA),
- köztitermékek: X≡$HBrO_2$, Y≡Br^-, Z≡Ce^{4+}
- végtermékek: (P)≡HOBr, (Q)≡(CO_2+HCOOH)

Modell:

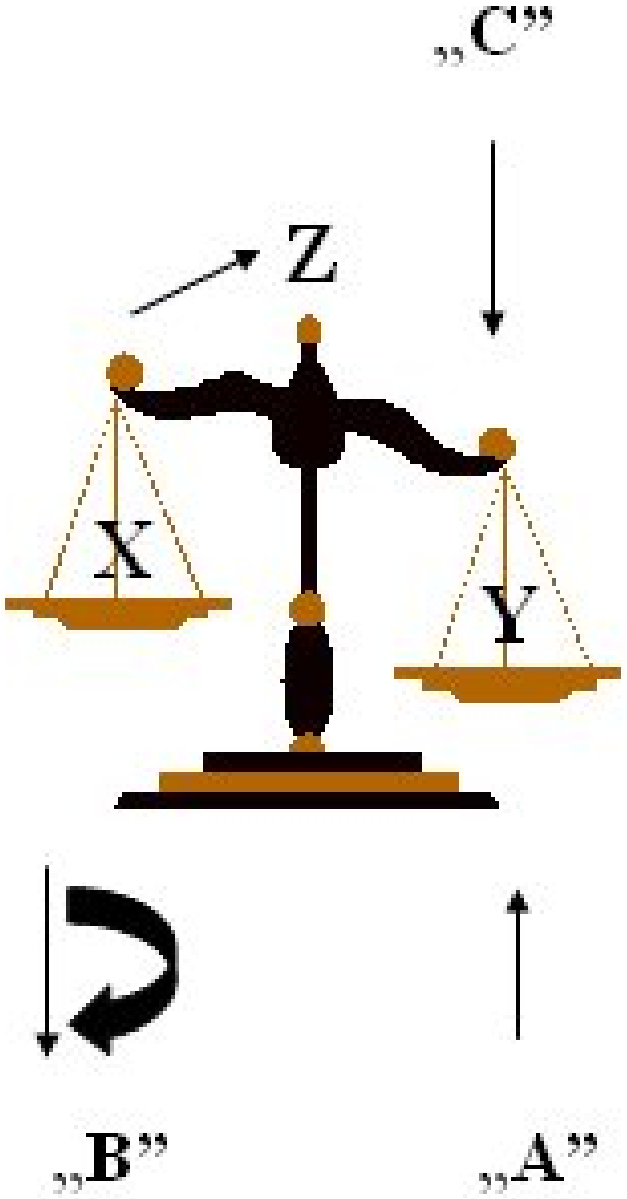
$$[A]+Y \xrightarrow{k_1} X+(P) \qquad (O1)$$

$$X+Y \xrightarrow{k_2} (2P) \qquad (O2)$$

$$A+X \xrightarrow{k_3} 2X+2Z \qquad (O3)$$

$$2X \xrightarrow{k_4} [A]+(P) \qquad (O4)$$

$$[B]+Z \xrightarrow{k_5} hY+(Q) \qquad (O5)$$



Cím

Oszcillációs reakciók

Bevezetés

Oszcilláció zárt rendszerben

A BZ-reakció FKN-mechanizmusa

Az Oregonátor-modell és dinamikája

Káosz

A káosz kialakulása

Példa 1.

Példa 2.

Példa 3.

Összefoglalás

Az Oregonátor-modell alapján (a kinetikai tömeghatástörvény alkalmazásával) egy háromváltozós közönséges differenciálegyenlet-rendszer írható fel,

$$\frac{\mathrm{d}X}{\mathrm{d}t} = k_1\mathrm{A}X - k_2XY - k_3\mathrm{A}X - 2k_4X^2$$

$$\frac{\mathrm{d}Y}{\mathrm{d}t} = -k_1\mathrm{A}X - k_2XY + hk_5\mathrm{B}Z$$

$$\frac{\mathrm{d}Z}{\mathrm{d}t} = 2k_3\mathrm{A}X - k_5\mathrm{B}Z$$

Dinamikailag azonos tulajdonságú, de matematikailag sokkal könnyebben kezelhető egyenletrendszert kapunk ún. dimenziómentes mennyiségek bevezetésével és alkalmazásával. Legyen:

$$x=\frac{2k_4}{k_3\mathrm{A}}X \qquad y=\frac{k_2}{k_3\mathrm{A}}Y \qquad z=\frac{k_4k_5\mathrm{B}}{(k_3\mathrm{A})^2}Z \qquad \tau=k_5\mathrm{B}t$$

$$\varepsilon=\frac{k_3\mathrm{B}}{k_5\mathrm{A}}=8\times10^{-3} \qquad \varepsilon'=\frac{2k_4k_5\mathrm{B}}{k_2k_3\mathrm{A}}=2\times10^{-5} \qquad \mathrm{q}=\frac{2k_1k_4}{k_2k_3}=10^{-4} \qquad \mathrm{f}=2h$$

Cím
Oszcillációs reakciók
Bevezetés
Oszcilláció zárt rendszerben
A BZ-reakció FKN-mechanizmusa
Az Oregonátor-modell és dinamikája
Káosz
A káosz kialakulása
Példa 1.
Példa 2.
Példa 3.
Összefoglalás

Ekkor a következő, csak dimenziómentes mennyiségeket tartalmazó differenciálegyenlet-rendszerhez jutunk:

$$\varepsilon \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}\tau} = \mathrm{q}y - xy + x(1 - x)$$

$$\varepsilon' \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}\tau} = -\mathrm{q}y - xy + \mathrm{f}z$$

$$\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}\tau} = x - z$$

ahol x, y és z a megfelelő X, Y és Z komponensek ún. dimenziómentes koncentrációja, τ a dimenziómentes idő, ε, ε', q és f pedig dimenziómentes állandók. Egy háromdimenziós térben még mindig nehéz a változások ábrázolása, ezért további egyszerűsítést teszünk. Mivel $\varepsilon' < \varepsilon \ll 1$, az y az x-hez és z-hez képest sokkal "gyorsabban" változónak tekinthető, így mennyiségének kiszámítására az ismert módon kvázistacionárius közelítést alkalmazhatunk, melynek eredménye:

Cím
Oszcillációs reakciók
Bevezetés
Oszcilláció zárt rendszerben
A BZ-reakció FKN-mechanizmusa
Az Oregonátor-modell és dinamikája
Káosz
A káosz kialakulása
Példa 1.
Példa 2.
Példa 3.
Összefoglalás

$$y_{\mathrm{s}} = \frac{\mathrm{f}z}{x + \mathrm{q}}$$

Ennek alapján a háromdimenziós egyenletrendszer kétdimenzióssá alakítható:

$$\varepsilon \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}\tau} = x(1 - x) - \mathrm{f}z \frac{x - \mathrm{q}}{x + \mathrm{q}} \qquad (4)$$

$$\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}\tau} = x - z \qquad (5)$$

amelyet *Tyson-Fife-modellnek* nevezünk (Tyson, 1980). Jelentősége az, hogy lehetővé teszi az Oregonátor-modell (és közvetve a BZ-rendszer) dinamikai állapotainak egyszerű és egyben szemléletes jellemzését a z és x változók koordinátarendszerében (ún. *fázissík*).

Cím

Oszcillációs reakciók

Bevezetés

Oszcilláció zárt rendszerben

A BZ-reakció FKN-mechanizmusa

Az Oregonátor-modell és dinamikája

Káosz

A káosz kialakulása

Példa 1.

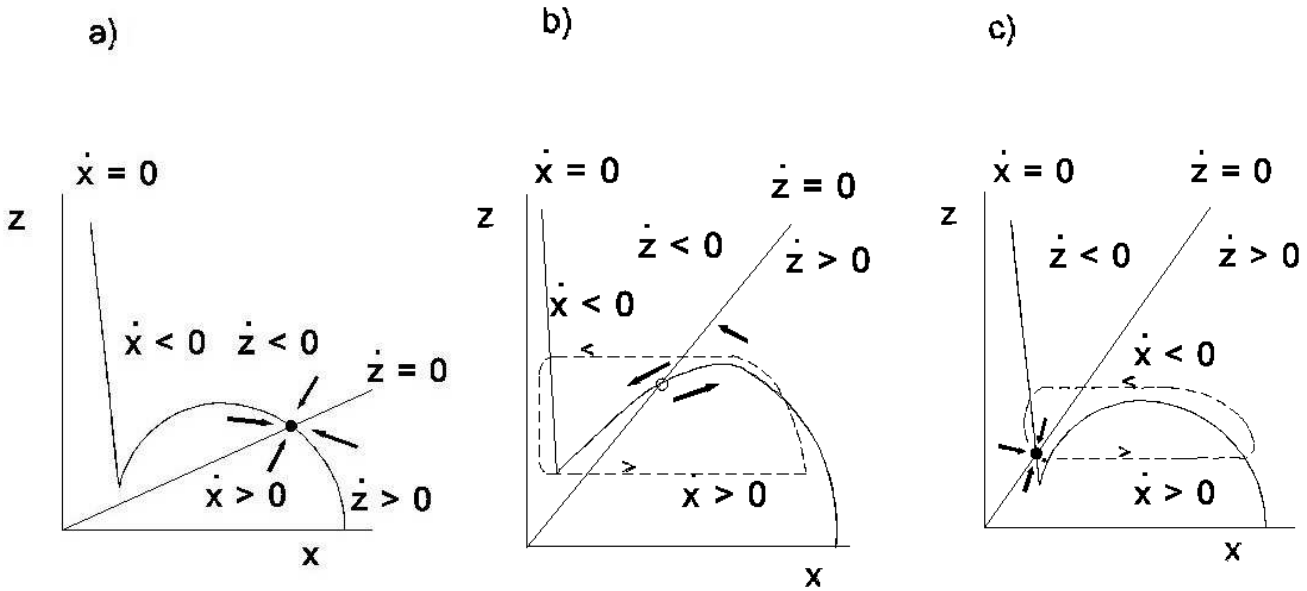
Példa 2.

Példa 3.

Összefoglalás

Eredmények:

Az f sztöchiometriai állandó értékének függvényében a rendszernek háromféle stacionárius állapota lehet (Tyson, 1980):



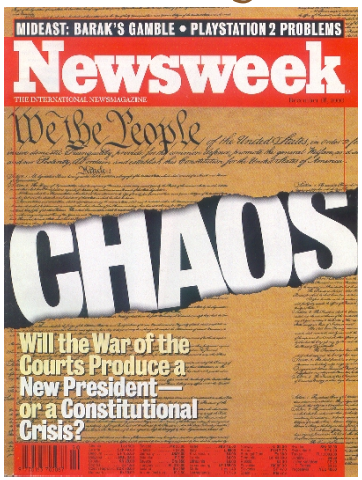
a) A 0<f<0,5 tartományban a rendszer állapota stabilis úgy, hogy x és z stacionárius értékei nagyok.
b) A 0,5<f<2,414 tartományban a stacionárius állapot instabilis, a rendszer oszcillál.
c) A 2,414<f tartományban a rendszer állapota stabilis úgy, hogy x és z stacionárius értékei jóval kisebbek

Az FKN-mechanizmus volt az első sikeres és részletes mechanizmus, amellyel egy periodikus reakció "működését" értelmezni lehetett. A BZ-reakció az oszcillációs reakciók prototípusa.

Cím
Oszcillációs reakciók
Bevezetés
Oszcilláció zárt rendszerben
A BZ-reakció FKN-mechanizmusa
Az Oregonátor-modell és dinamikája
Káosz
A káosz kialakulása
Példa 1.
Példa 2.
Példa 3.
Összefoglalás

Káosz

Káosz fogalma:



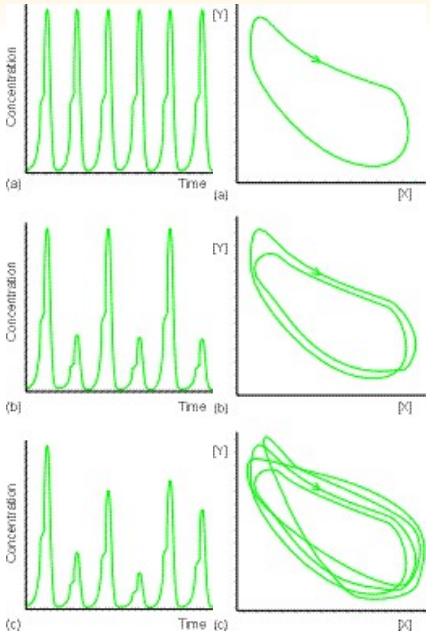
Magyar Értelmező Kéziszótár (1972), 644. oldal
káosz fn. 1. Zűrzavar. 2. Mit Hitregékben: a világ keletkezését megelőző rendezetlen ősállapot.
Royal Society (1986, London)
chaos *Math* Stochastic behaviour occuring in a deterministic system
káosz *Mat* A determinisztikus rendszerek sztochasztikus (véletlenszerű) viselkedése.

- A káosz olyan szabálytalannak látszó viselkedés, amelyet teljes egészében szabályok, determinisztikus törvények irányítanak.
- A véletlenszerűség abban nyilvánul meg, hogy az ismert (egyszerű) törvények ellenére sem tudjuk egy kaotikus rendszer viselkedését hosszú távon előrejelezni,
- Az előrejelzés pontatlansága abból származik, hogy a kezdeti állapot leírására használt adatokat mindig csak véges pontossággal ismerjük.
- A káosz állandósult instabilitás, amelyhez a változók fázisterében egy végtelen periódusidejű határciklus (kaotikus attraktor) rendelhető.
- A kaotikus mozgás önmagát sohasem ismétlő, aperiodikus mozgás.

Ez különbözteti meg a káoszt a véletlenszerű zajtól.

Cím
Oszcillációs reakciók
Bevezetés
Oszcilláció zárt rendszerben
A BZ-reakció FKN-mechanizmusa
Az Oregonátor-modell és dinamikája
Káosz
A káosz kialakulása
Példa 1.
Példa 2.
Példa 3.
Összefoglalás

A káosz kialakulása:



Ma már több lehetőséget ismerünk arra, hogy egy kémiai reakció viselkedését kaotikussá tegyük.

Bizonyos paraméterek (pl. a reaktánsok betáplálási sebessége, hőmérséklet, stb.) változtatása gyakran az oszcilláció periódusának kettőződéséhez vezet. Ez azt jelenti, hogy az egyszerű oszcillációhoz rendelhető határciklus "megkettőződik", majd újból "megkettőződik", ahogy azt az ábra illusztrálja. Ennek során a periódusidő gyakorlatilag változatlan marad, de kis és nagy amplitudójú oszcillációk váltogatják egymást . Az egymást követő periódus-kettőződés a paraméter egyre kisebb és kisebb megváltoztatásával érhető el.

A perióduskettőződés torlódási pontjában végtelen periódusú, aperiodikus, azaz kaotikus oszcilláció jelenik meg, s az így kialakuló objektumot nevezzük kaotikus attraktornak.

A kaotikus oszcilláció véletlenszerű, mert hosszú távon nem megjósolható a koncentrációk időbeli változása, de determinisztikus, mert a rendszer mindig az attraktoron "mozog".

Cím

Oszcillációs reakciók

Bevezetés

Oszcilláció zárt rendszerben

A BZ-reakció FKN-mechanizmusa

Az Oregonátor-modell és dinamikája

Káosz

A káosz kialakulása

Példa 1.

Példa 2.

Példa 3.

Összefoglalás

Kaotikus kémiai rendszerek, példák

1. A BZ-reakció kevert, átáramlásos tankreaktorban (CSTR)

Ha a Belouszov-Zsabotyinszkij reakciót CSTR-ben játszatjuk le, akkor pl. a Br^- betáplálási sebességének függvényében -perióduskettőződéssel- kaotikus koncentrációoszcilláció alakulhat ki.

Az ábra egy Br^--szelektív-elektród jeléből "rekonstruált" kaotikus attraktor képét mutatja, amely topológiailag azonos a rendszer valódi attraktorával.

Az attraktor tulajdonságainak megismerése és jellemzése alapozta meg az első sikeres káoszszabályozási kísérleteket.[1]

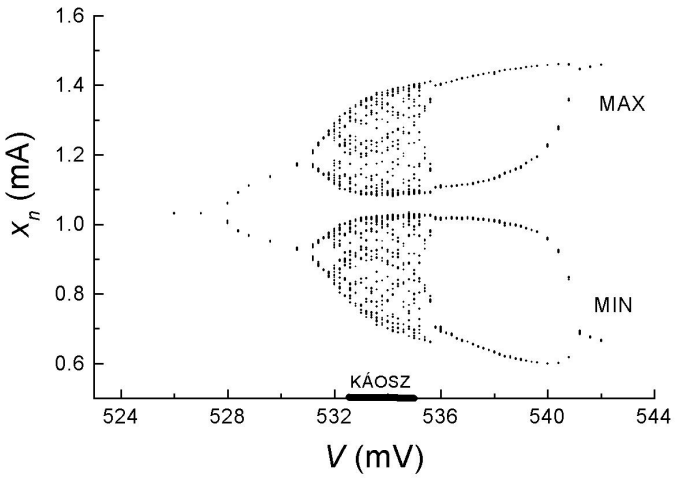
Az ábrán lila színnel van jelölve a kaotikus attraktor belsejében található kétperiódusú határciklus, amelyet egy visszacsatolási eljárással sikerült szabályozni.

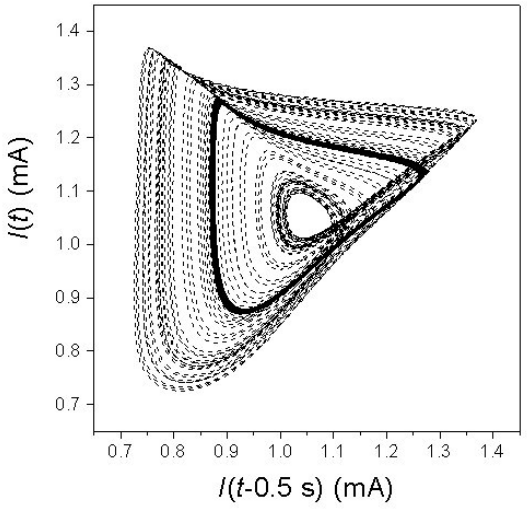
A kaotikus koncentrációoszcilláció nem jósolható meg, de alkalmas módszerrel szabályozható!

[1] Petrov, V.; Gáspár, V.; Masere, J.; Showalter, K.: Controlling Chaos in the Belousov-Zhabotinsky Reaction, Nature, 1993, 361, 240-243.

Cím
Oszcillációs reakciók
Bevezetés
Oszcilláció zárt rendszerben
A BZ-reakció FKN-mechanizmusa
Az Oregonátor-modell és dinamikája
Káosz
A káosz kialakulása
Példa 1.
Példa 2.
Példa 3.
Összefoglalás

2. Kaotikus áramoszcilláció a forgó rézkorong-elektród ortofoszforsav elektrolitban történő anódos oldódásakor elektrokémiai rendszerben



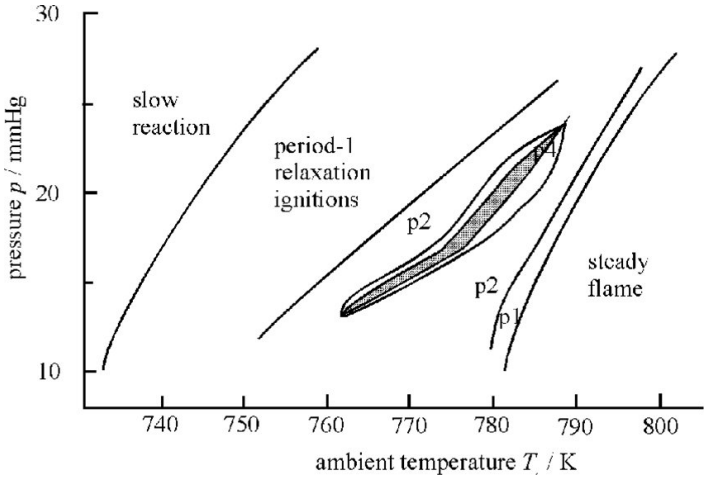


A réz-ortofoszforsav kaotikus elektrokémiai rendszer bifurkációs diagramja és az áramoszcillációkból rekonstruált kaotikus attraktor.[2] Vastag vonallal a káoszszabályozási algoritmussal stabilizált egyszerű periodikus oszcillációhoz rendelhető határciklus.

[2] Kiss, I. Z.; Gáspár, V.; Nyikos, L.; Parmananda, P.: Controlling Electrochemical Chaos in the Copper-Phosphoric Acid System, J. Phys. Chem. A, **1997**, 101, 8668-8674.

Cím
Oszcillációs reakciók
Bevezetés
Oszcilláció zárt rendszerben
A BZ-reakció FKN-mechanizmusa
Az Oregonátor-modell és dinamikája
Káosz
A káosz kialakulása
Példa 1.
Példa 2.
Példa 3.
Összefoglalás

3. A szén-monoxid oxidációja átáramlásos reaktorban.[3]



Kísérleti körülmények:

gömb alakú reakcióedény (jet-stirring), V=0,57 dm^3
számítógépvezérelt szelepek a gázok adagolására.
levegőcirkulációs kályha
hőmérsékletszabályozás lokális fűtőelemekkel (ą 0,5K)
Pt-ellenállás hőmérő
a gerjesztett CO_2 kemilumineszcenciás felvillanásainak detektálása fotoelektronsokszorozó segítségével.
$(CO+1\%H_2):O_2=7,2:5,6$

Perióduskettőződés, melynek eredményeként a $CO+O_2=2CO_2$ gázreakció kaotikusan játszódik le.

[3] Davies,M.L.; Halford-Maw,P.A.; Hill, J.; Tinsley,M.R.; Johnson,B.R.; Scott,S.K.; Kiss,I.Z.; Gáspár,V.: Control of Chaos in Combustion Reactions, J. Phys. Chem. A, **2000**, 104, 9944-9952.

Cím
Oszcillációs reakciók
Bevezetés
Oszcilláció zárt rendszerben
A BZ-reakció FKN-mechanizmusa
Az Oregonátor-modell és dinamikája
Káosz
A káosz kialakulása
Példa 1.
Példa 2.
Példa 3.
Összefoglalás

Összefoglalás

A nemlineáris dinamikai kutatások eredményei gyökeresen átalakították tudományos gondolkodásunkat. A kémiai oszcilláció és káosz vizsgálata ebben úttörő szerepet játszott.

Kitekintés: Az égitestek mozgása, az időjárás, mechanikai rendszerek (pl. inga), elektromos áramkörök, lézersugárzás, kémiai és elektrokémiai rendszerek, az emberi szív és agy, stb. mind mutathat periodikus ill. kaotikus mozgást, melyek lényegi jelenségei világunknak.

A különböző rendszerek közül megtanultuk, hogyan lehet a kisméretű rendszereket szabályozni. A nagyméretű, univerzális rendszerek szabályozása (időjárás, bolygómozgás) képességeinket meghaladó feladat marad.

A periodikus és kaotikus kémia rendszerek vizsgálata, a jelenségek kémiai mechanizmusának megértése továbbra is jelentős kihívás a reakciókinetikával foglalkozó kutatók számára.

Cím
Oszcillációs reakciók
Bevezetés
Oszcilláció zárt rendszerben
A BZ-reakció FKN-mechanizmusa
Az Oregonátor-modell és dinamikája
Káosz
A káosz kialakulása
Példa 1.
Példa 2.
Példa 3.
Összefoglalás