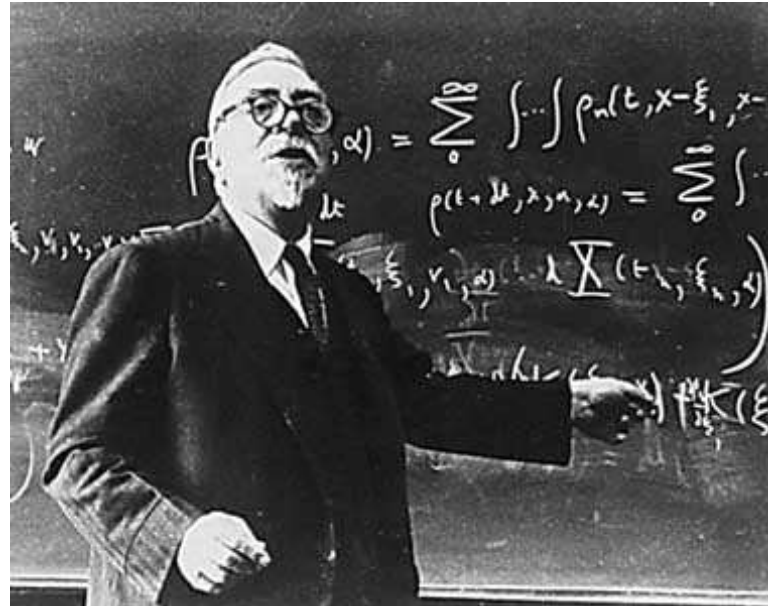


# Přednášky z lékařské biofyziky

Masarykova univerzita v Brně



Norbert Wiener 26.11.1894 - 18.03.1964

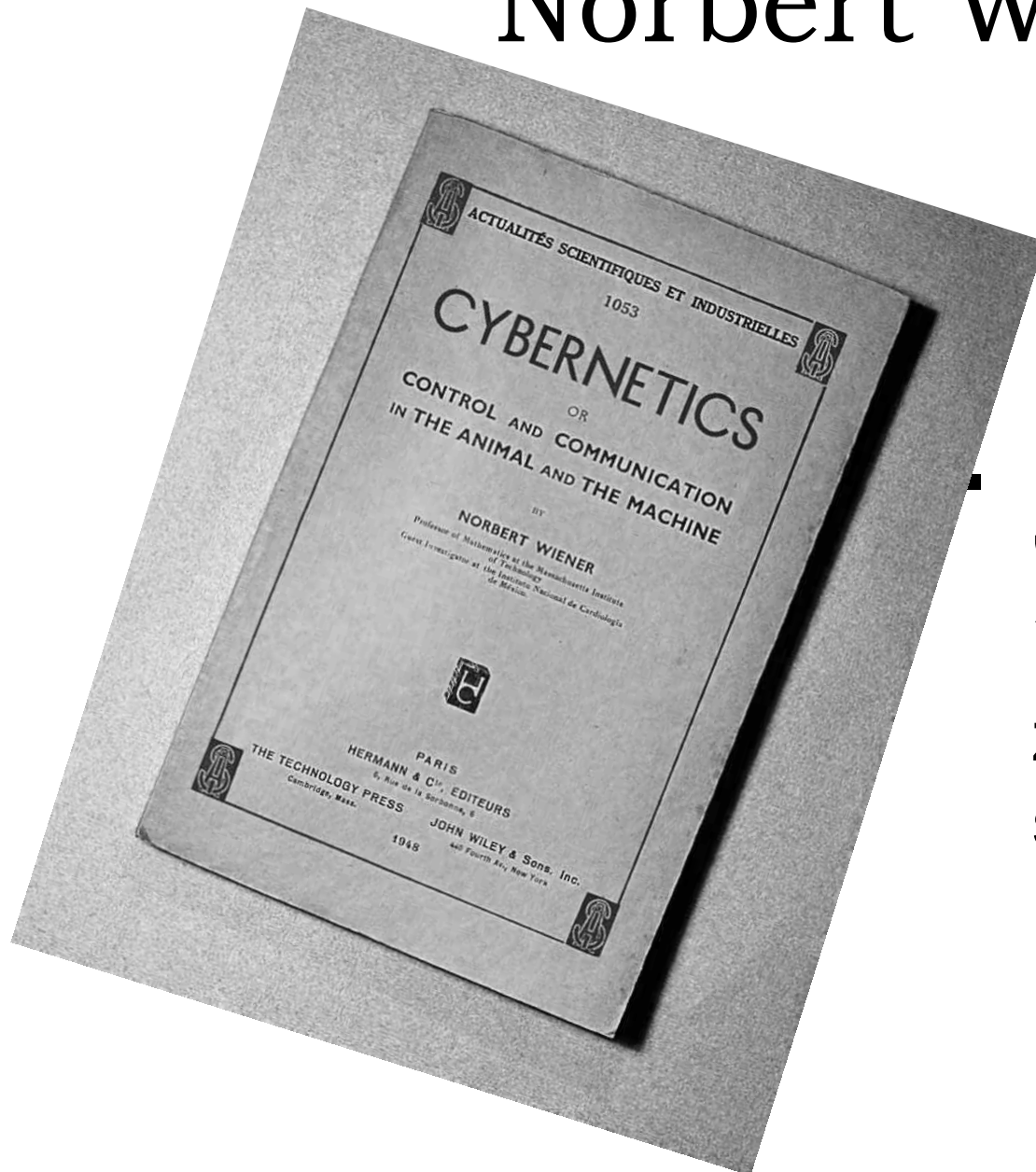
## **Biokybernetika**

# Kybernetika

Vznik po 2. světové válce - důsledek integračních snah ve vědě

- **základy:**
  - matematická logika
  - teorie pravděpodobnosti
- **metody:**
  - jednotlivé formy matematické analýzy

# Norbert Wiener



• *N. Wiener:*

"Kybernetika neboli řízení a sdělování v živých organismech a strojích", (1948)

# Jaká je a co studuje

- Kybernetika je (systémová) věda zabývající se obecnými rysy a zákonitostmi informačních a řídicích procesů v organizovaných systémech, vymezených na objektech technického, živého či společenského charakteru.
- Jejím předmětem jsou systémy, v nichž probíhají procesy řízení, regulace, přenosu a zpracování informace.

# Jak se člení

- **Hlavní součásti:**
- teorie systémů
- teorie her
- teorie algorytmů
- teorie samočinných počítačů
- teorie informace
- teorie regulace a řízení



# Jak se člení

## **Lze rozlišit:**

- Teoretická kybernetika - matematický popis systémů
- Experimentální kybernetika - modelování a simulace
- Aplikovaná kybernetika - v konkrétních oblastech lidské činnosti, např. technická kybernetika, biokybernetika a společenská kybernetika

# Biokybernetika a lékařská kybernetika

- **Hlavní cíl:**
- analýza a modelování regulačních a řídicích systémů živého organismu za fyziologických i patologických podmínek (patologický proces - narušení regulačních mechanismů)
- **Lékařská kybernetika:**
  - aplikace kybernetiky a jejích technických prostředků na lidský organismus za fyziologických i patologických podmínek.
  - Podpora lékařského rozhodování při diagnostice i při plánování terapie
  - Využívání kybernetických principů při řízení zdravotnictví = zdravotnická kybernetika.

# KYBERNETICKÉ SYSTÉMY

- **Charakteristické znaky systému**
  - **System** - soubor nebo množina prvků, mezi nimiž existují určité vztahy
  - prvek / subsystem
  - reálné a abstraktní systémy
- **Znaky kybernetického systému:**
  - Vyjádření objektivní skutečnosti. Chápeme jako soubor vztahů mezi prvky
  - Zjednodušené vyjádření skutečnosti
  - Volba systému musí odpovídat určenému cíli.
  - Pro jeho správné posouzení je třeba znát jeho strukturu i funkci



# Analýza a syntéza systému

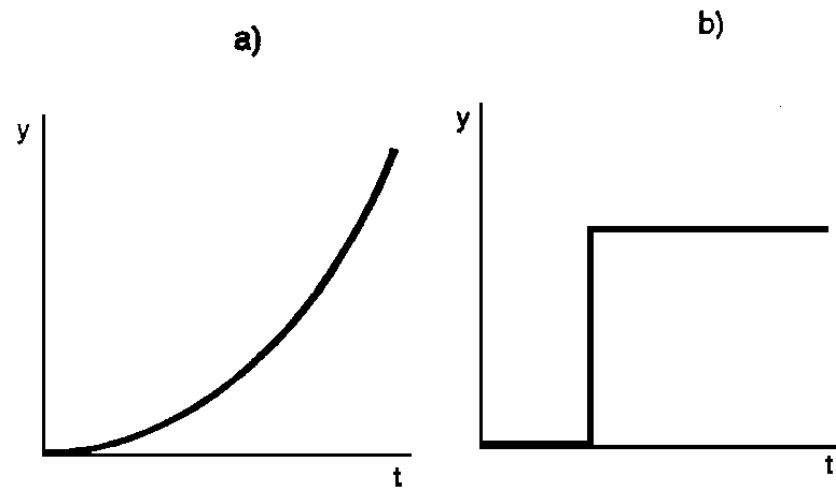
- **Analýza systému** - známe strukturu - máme určit jeho chování
- **Syntéza systému** - určujeme strukturu - známe chování
- **System** o neznámé struktuře a chování = černá skříňka. Jeho **identifikaci** provádíme na základě souvislostí mezi souborem vstupních a výstupních veličin.

# Členění systémů

- **Podle vztahů mezi prvky dělíme systémy na**
  - Statické - z pasivních (neovlivňujících se) prvků
  - Dynamické - z aktivních prvků se vstupem a výstupem, které jsou ve vzájemných funkčních vztazích (látkové, energetické nebo informační vazby)
- **Systémy lze dělíme dle jejich vztahů k okolí na**
  - absolutně uzavřené (interakce s okolím neexistuje)
  - relativně uzavřené (interakce s okolím je omezená)
  - otevřené (interakce s okolím je mnohočetná)

# Charakteristika systému

- Závislost hodnot výstupní veličiny na změnách hodnot veličiny vstupní =
- = statická charakteristika systému.
- Podle této charakteristiky rozlišujeme systémy na:
  - lineární (přímka, ideální případ)
  - nelineární
- linearizace nelineárního systému - aproximace přímkou

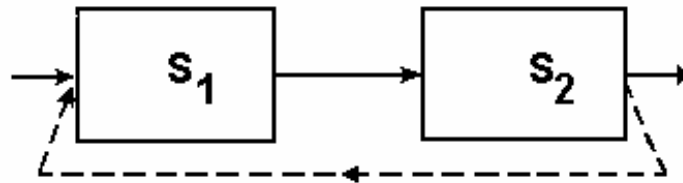


Časový průběh změn výstupní veličiny určuje chování systému - spojitý nebo nespojitý

# DYNAMICKÉ SYSTÉMY A JEJICH VLASTNOSTI

- Základní vlastnost: mnohočetná interakce s okolím.
- Souhrn vlivů, kterými okolí působí na systém:  
**vstup**
- Souhrn vlivů, kterými systém působí na okolí:  
**výstup**
- Vstupní veličiny jsou nezávislé. Výstupní veličiny jsou závislé (na veličinách vstupních a na vnitřních veličinách daného systému)
- **Příklad:** ucho
- Vztah mezi výstupem a vstupem dvou či více subsystémů: vazba (sériová, paralelní nebo zpětná)

# Zpětná vazba



- **Zpětná vazba:** působení výstupní veličiny systému na vlastní vstup
- U **kladné zpětné vazby** působí odchylka výstupní veličiny tak, že veličina vstupní je trvale zesilována nebo zeslabována (kumulační účinek - nežádoucí pro řízení dynamických systémů)
- U **záporné zpětné vazby** působí změna výstupní veličiny proti směru veličiny vstupní a tím změnu vstupní veličiny minimalizuje (účinek kompenzační - umožňuje regulaci)

# Transformace

- **Transformace:** množina přechodů stavů vstupních veličin do stavů veličin výstupních (jednoznačná, víceznačná)
- U víceznačných transformací: chování systému **nahodilé** nebo **determinované**
- **Základní formy transformací:**
  1. Zesílení nebo zeslabení vstupních hodnot
  2. Zpoždění jejich průběhu
  3. Provádění jednoduchých logických operací
  4. Selektivní propustnost
  5. Generování určitých průběhů aj. (též deformace vstupních hodnot)
- Všechny uvedené formy transformací se výrazně projevují v biologických systémech
- Vztahy mezi průběhem vstupních a výstupních veličin daného dyn. systému nemusí být neměnné. Dynamické systémy mohou být schopny adaptace i učení.

# Principy teorie informace

## Náhodný jev

- **Informace:** jakýkoliv údaj o jevech a procesech probíhajících v systému i v jeho okolí. Informace vyjadřuje **vztah** mezi systémy i mezi prvky téhož systému.
- **Náhodný jev:** takový jev, který v daných časových a prostorových podmínkách může, ale také nemusí nastat

Četnost výskytu jevu  $F_A$ :

$$F_A = n/N$$

$n$  - počet případů, v nichž jev nastal

$N$  - celkový počet „pokusů“

# Pravděpodobnost a informační entropie

- **Pravděpodobnost**  $P(A)$  - střední hodnota četnosti dané události
- Pravděpodobnost může nabývat hodnot od 1 do 0 čili ( $1 > P(A) > 0$ )
- Událost nemožná a jistá
- Pokus, jehož výsledkem může být hodnota  $A_1 \dots A_n$  se stejnou  $P(A)$ : S rostoucím  $n$  roste stupeň neurčitosti (daný počtem dílčích neurčitostí) - označuje se jako **informační entropie**
- $n$  vzájemně se vylučujících jevů s  $P(A_1), P(A_2) \dots P(A_n) \Rightarrow$  **stupeň neurčitosti**  $N_i$  jednoho možného výsledku je:
  - $N_i = -P(A_i) \cdot \log_2 P(A_i)$
  - Informační entropie celého pokusu: (součet dílčích neurčitostí)
  - $H = \sum -P(A_i) \cdot \log_2 P(A_i)$



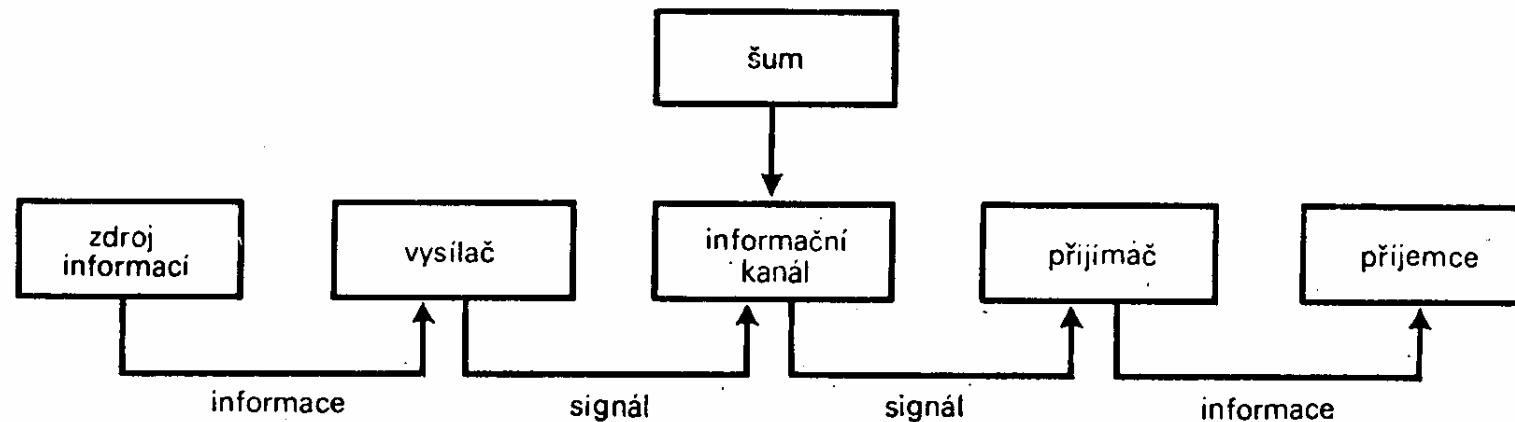
# Pravděpodobnost a informační entropie

- Intuitivně: nejistota může být odstraněna dodáním odpovídajícího množství informace
- Poslední výraz je tedy i kvantitativním vyjádřením množství (objemu) informace.
- Informace zvyšuje uspořádanost systému
- $P(A)$  velké - malé množství informace a naopak
- Pokus poskytuje dva alternativní výsledky se stejnými  $P(A) = 0.5 \Rightarrow$
- $H = - (0,5 \cdot \log_2 0,5 + 0,5 \cdot \log_2 0,5) = 1$
- 1 bit (*binary digit*)

# Informační systém

- **Tři části:**
  - zdroj informace
  - měnič-vysílač (kódování)
  - informační kanál (šum)
  - přijímač (dekódování)
  - příjemce informace
- Materiálním nosičem informace je **signál**.
- **Informační kanál** = prostředí, v němž se uskutečňuje předávání signálu
- **Symboly** - bezrozměrné veličiny kvalitativně zobrazující daný jev
- **Poloha** - prostorové a časové rozmístění symbolů v procesu kódování
- Elementární signál nese jeden bit informace
- Max. množství informace, které může informační kanál přenést za časovou jednotku = **kapacita informačního kanálu**

# Redundance



- **Šum** = vlivy snižující původní množství přenášené informace
- nadbytečná informace eliminující šum -
- - informace redundantní.
- **Redundance** R je dána vzorcem:
- $R = 1 - H/H_{MAX}$
- Jazyky - redundance relativně vysoká (Č.J. asi 70 %), přírodní vědy - nízká.

# Informační pochody v živém organismu

- Lidský organismus může zpracovat při optimální nabídce informací tok o hodnotě asi  $35 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$ .
- Přenos a zpracování informace v živém organismu: **humorální a nervový**
- Tři úrovně:
  - základní biochemické reakce (řízení syntézy bílkovin – humorální mechanismus)
  - autonomní systémy (regulace např. srdeční činnosti - humorální i nervové mechanismy)
  - centrálním nervový systém

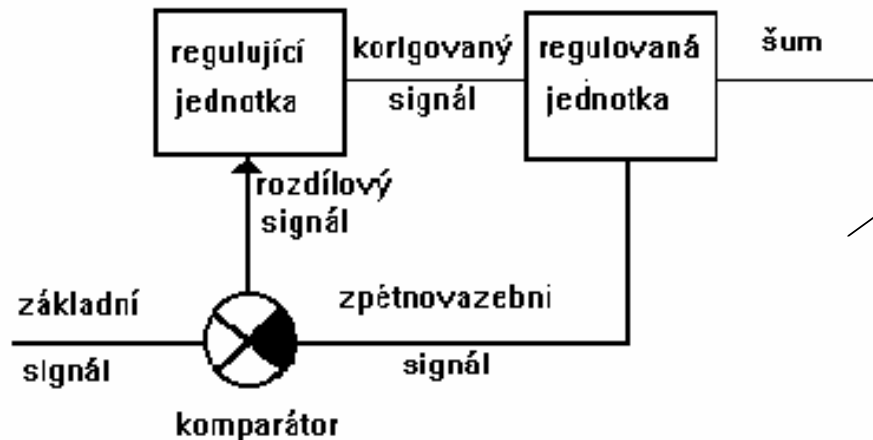
# Příklady informačních procesů v lidském organismu:

- CNS: Zpracování informace ve zrakovém analyzátoru, ve žluté skvrně je asi  $10^7$  receptorů, každý může rozlišit 120 úrovní intenzity světla čili 7 bitů informace. Oko dovede rozlišit 10 obrazů/s, takže kapacita zrakového analyzátoru na úrovni sítnice je asi  $7 \cdot 10^8$  bit/s. Zrakový nerv obsahuje asi  $10^6$  nervových vláken. Každým může být převedeno asi 300 činnostních potenciálů za sekundu, takže kapacita *n. opticus* je asi  $3 \cdot 10^8$  bit/s. Ve srovnání s televizním kanálem ( $10^7$  bit/s) tato kapacita asi o řád vyšší.

# Příklady informačních procesů v lidském organismu:

- **DNA:** DNA obsahuje čtyři dusíkaté báze: A, G, C a T. Kterýkoli nukleotid může obsahovat jen jednu z nich. Informace nesená jedním nukleotidem bude tedy 2 bity. DNA lidské spermie obsahuje  $10^9$  nukleotidů, čili informaci  $2 \cdot 10^9$  bitů.
- **Bílkovina:** 20 různých AK - informace nesená jednou AK je tedy přibližně 4 bity. Molekula bílkoviny obsahuje cca  $10^3$  AK zbytků, takže její inf. kapacita je cca  $4 \cdot 10^3$  bitů. Podíl celkové informace molekuly DNA a informace nesené bílkovinou určuje počet bílkovinných molekul schopných syntézy -  $5 \cdot 10^5$ .
- Předpoklad: 1 bílkovina = 1 enzym, 1 enzym kódován 1-ním genem  $\Rightarrow$  DNA chromozómů lidské spermie obsahuje asi  $5 \cdot 10^5$  genů.

# Řízení a regulace



- Řízení - změny v chování systému vyvolané informací předanou tomuto systému z řídicí části.
- Podle složitosti procesu řízení:
  - systémy ovládané - bez zpětné vazby
  - regulované - se zpětnou vazbou.
- Regulace - proces minimalizace rozdílů mezi skutečnými hodnotami regulovaných veličin a jejich požadovanou hodnotou
- Regulace automatická - znaky:
  - Přímé spojení (inf. kanál) mezi částí řídicí a řízenou
  - Zpětná vazba (záporná, krátká nebo dlouhá) mezi řízenou a řídicí částí
  - Automatická přeměna informací přijímaných kanálem zpětné vazby v příkazy řízení

# Formy řízení v živých organismech:

- 1. Přímé řízení - příkazy řízení jsou z řídicí části předávány přímo části řízené.
- 2. Řízení s autonomní odezvou. Příkazy řízení jsou jen spouštěcím mechanismem pro přechod z jednoho stavu do druhého (humorální řízení).
- 3. Diferencované řízení - zahrnuje obě předešlé formy. Uskutečňuje se řídicím systémem se složitou zpětnovazební sítí (řízení CNS)



# Automaty

- Technická zařízení využívající principů řízení a kontroly a do určité míry schopná pracovat samostatně - **automaty**:
  - 1. Bez zpětné vazby - provádějí jen programově řízený úkon, nemohou svoji činnost upravovat.
  - 2. Se zpětnou vazbou - mají schopnost autoregulace, v určitých mezích udržují svoji funkci.
  - 3. Schopné určitých logických operací, samočinné adaptace a učení. Mají-li vazbu s vnějším prostředním a jsou-li vybavena manipulační schopností, nazýváme je **roboty**.
- V lékařství se automaty používají k automatické laboratorní analýze biochemických a hematologických veličin nebo k monitorování a analýze základních životních funkcí.

# Principy modelování

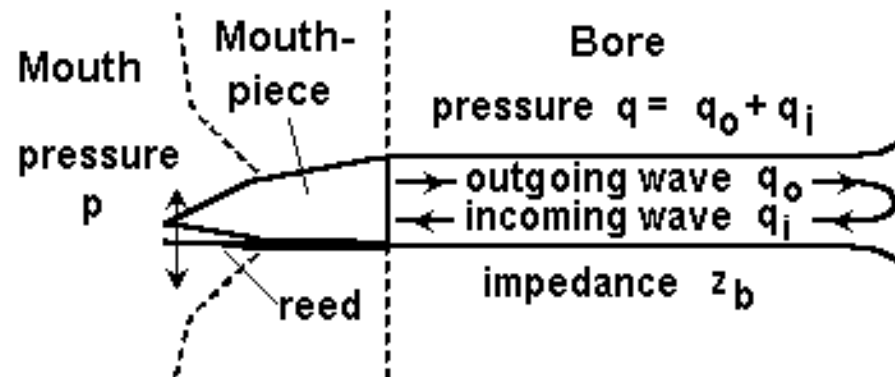
- Teoretický poznávací proces, jehož cílem je na základě zobrazení určité předlohy (originálu) poznání jejích vlastností. Záměru modelu je podřízen i způsob zobrazení.
- Základ modelování: **abstrakce ztotožnění**. U předmětů bereme v úvahu jen ty vlastnosti, v nichž se shodují. Model dostatečně zobrazující vlastnosti originálu může být využit jako zdroj informací o něm samotném i o jeho interakcích.
- **Analogie** - strukturní nebo funkční podobnost mezi předměty, procesy a jevy. Strukturní analogie spočívá v částečné nebo úplné shodě struktury dvou systémů.
- **Analogie funkční** (důležitější) - shoda funkčních vlastností dvou systémů, přičemž povaha prvků obou systémů může být značně rozdílná (např. funkční analogie mezi přirozenou a umělou ledvinou).
- Zvláštním druhem analogie je **isomorfie** - uvažované systémy vyhovují stejnému matematickému popisu.

# Způsoby třídění modelů:

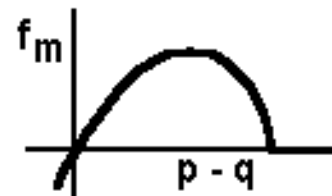
- **Formálně:** reálné (fyzikální, chemické) a abstraktní (matematické). Tyto lze dle obsahu náhodných prvků dělit na stochastické a deterministické.
- **Podle způsobu tvorby:** induktivní (z empiricky získaných informací) a deduktivní (na základě předpokládaných vztahů).
- **Podle účelu:** deskriptivní, sloužící k popisu vlastností originálu, a explanatorní, které slouží k ověření hypotéz. Výběr modelovaných vlastností musí být **reprezentativní** vlastnosti, které model nezobrazuje, nesmí znemožnit vyvození obecných závěrů.

# Fyzikální model klarinetu

## Clarinet Model -- Pressures and Flows



Mouthpiece: volume flow rate  $f_m$



Bore: flow rate  $f_b = (q_o - q_i)/z_b$  (1)

Flow continuity:  $f_m = f_b$  (2)

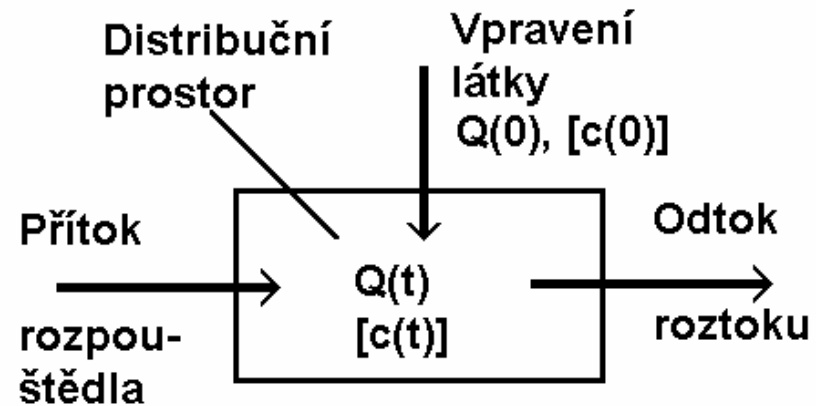
[http://home.earthlink.net/~ijfritz/clar\\_dia.gif&imgrefurl=http://home.earthlink.net/~ijfritz/pm\\_close.htm&h=369&w=374&sz=5&tbnid=rJd5rIvfAbQJ:&tbnh=116&tbnw=117&start=15&prev=/images%3Fq%3Dmodel%2Bphysical%2Bflow%26hl%3Dcs%26lr%3D](http://home.earthlink.net/~ijfritz/clar_dia.gif&imgrefurl=http://home.earthlink.net/~ijfritz/pm_close.htm&h=369&w=374&sz=5&tbnid=rJd5rIvfAbQJ:&tbnh=116&tbnw=117&start=15&prev=/images%3Fq%3Dmodel%2Bphysical%2Bflow%26hl%3Dcs%26lr%3D)

# Postup tvorby modelu a jeho využití:

- pozorování určitého jevu
- jeho experimentální ověření a pokud možno i kvantifikace
- sestavení modelu
- srovnání modelu s experimentálními výsledky
- Specifický druh modelování - **simulace** systémů.  
Principem je nahrazení originálního systému simulačním modelem a zpětné ověření poznatků získaných pomocí simulačního modelu na původním systému. K simulaci se často využívají počítače.
- Matematické modelování biologických a fyziologických procesů (stimulováno např. rozvojem radionuklidových metod - kinetika, distribuce látek v organismu)

# Složkové a integrální modely

## Kompartmentový model



$Q$  - množství látky  
 $t$  - čas  
 $c$  - koncentrace

Kompartiment: veškeré množství dané látky v určitém (distribučním) prostoru, ve kterém se chová vždy stejně

### Dva základní typy matematických modelů živých systémů:

- **Složkový** (kompartimentový) model - používáme k popisu systémů, u nichž známe strukturu nebo složení. Je matematicky popsán soustavou lineárních diferenciálních rovnic. Jejich řešením jsou funkce popisující časový průběh proměnné veličiny v jednotlivých složkách modelu.
- **Integrální model** - používá se tam, kde neznáme složení nebo strukturu studovaného systému. Je založen na analýze vztahu vstupu a výstupu studovaného systému.

# Dobrou chut!



*See you later. Yours sincerely,*

*alligator*