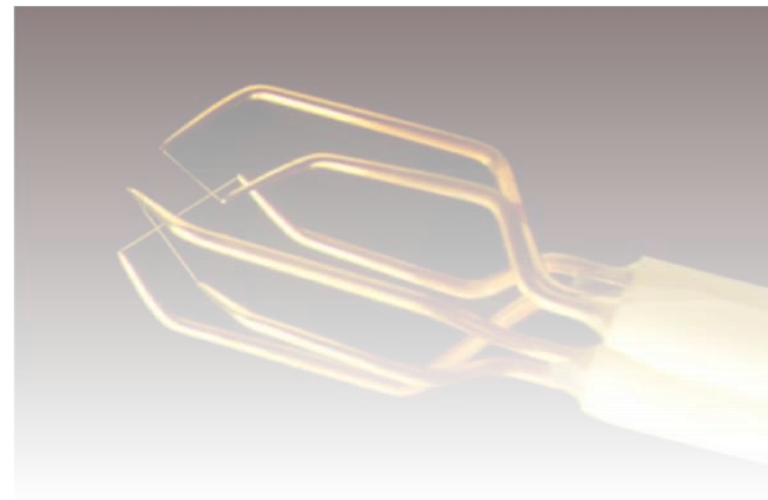
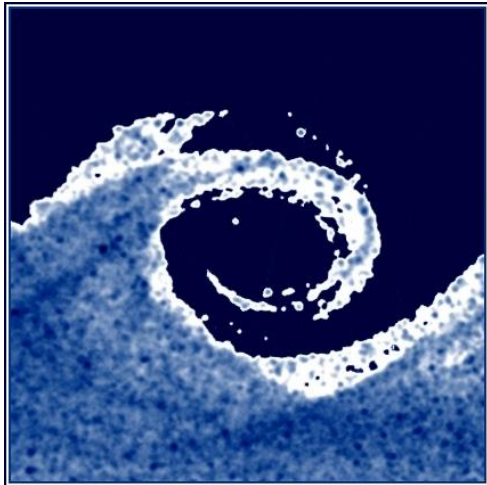


# Hődrót Anemometria

Horváth Csaba



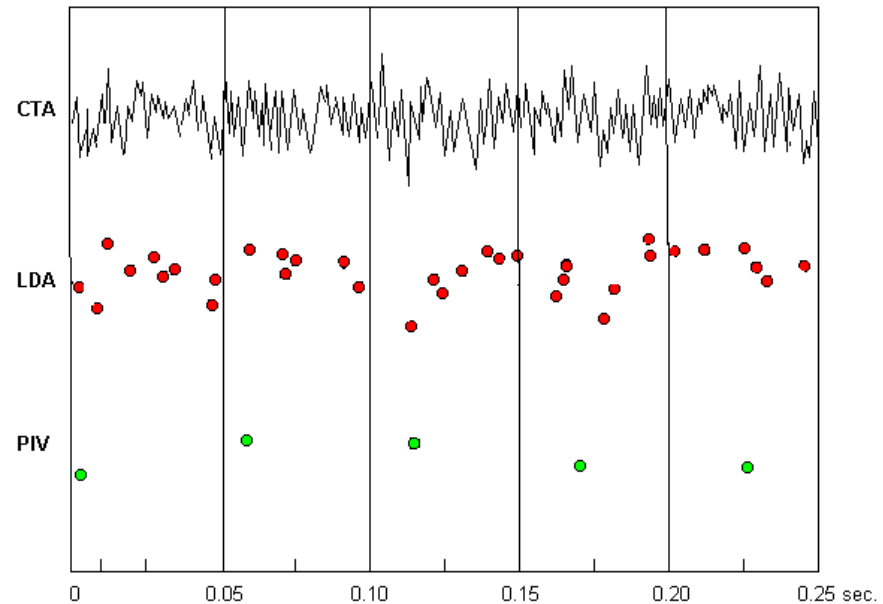
# Anemometria

- Anemometria: Áramlások sebességmérése
- Milyen anemométerek léteznek?
- Történelmi háttér:
  - 20. század első felében lett bemutatva
  - Kereskedelmileg kapható, jelen formájában, az ötvenes évek óta.
  - Áramlások átlagos és ingadozó értékeit lehet mérni vele (sebesség, hőmérséklet, stb.). Leggyakrabban az áramlás átlag sebességét és a turbulencia jellemzőit mérik ezzel a módszerrel.
- A mérési módszer egy fűtött huzal és a környező, relatív hideg, folyadék közötti hőátadáson alapul.
  - E hőátadás az áramlási sebesség függvényében változik.
  - Kapcsolat létezik az áramlási sebesség és a kimeneti feszültség között.

# Anemométer kimeneti jele

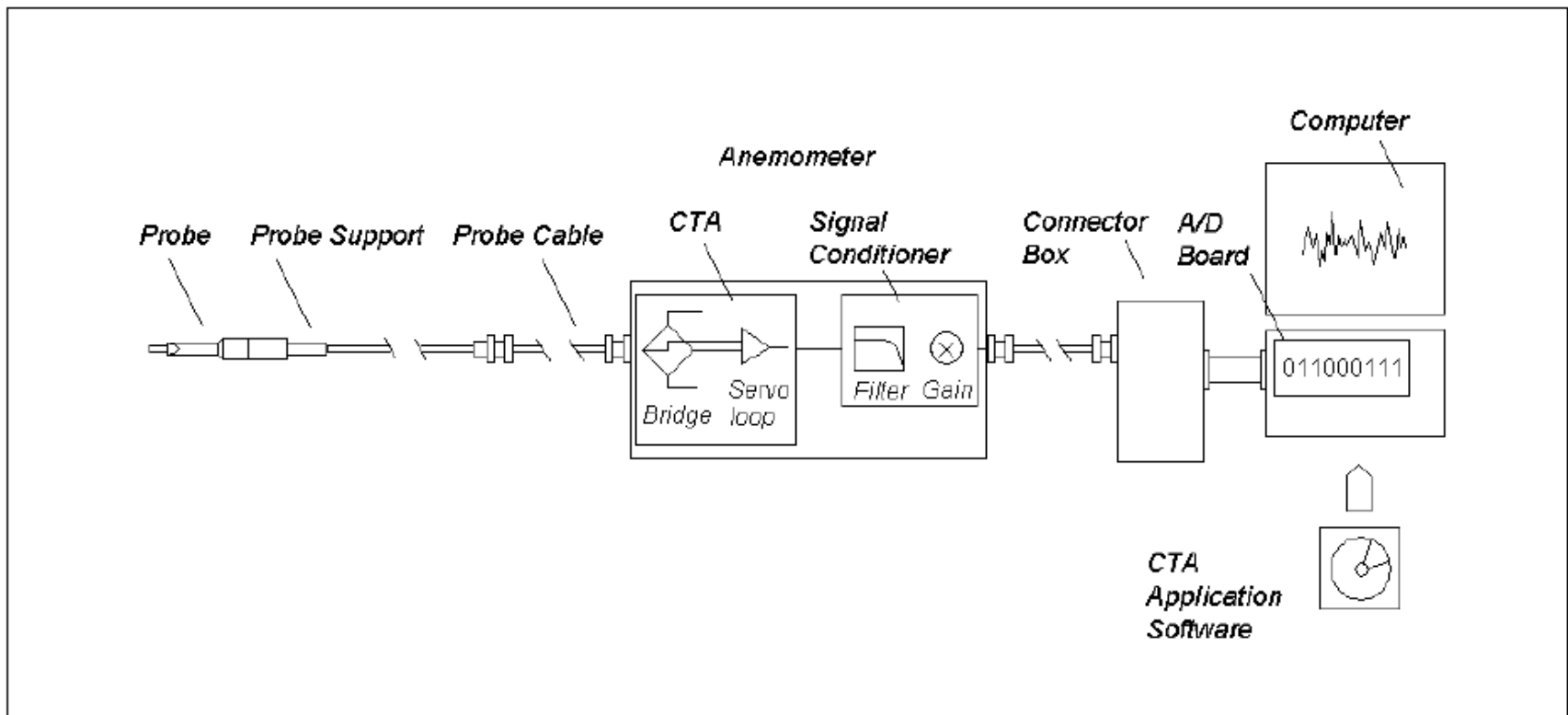
A termikus anemométer egy analóg jelet ad, amelyből kifejezhető egy pontban a sebesség. Ez által a sebesség folyamatosan ismert.

Megjegyezendő, hogy az LDA csak véletlenszerűen ad jelet, míg a PIV adott időközönként ad jelet.

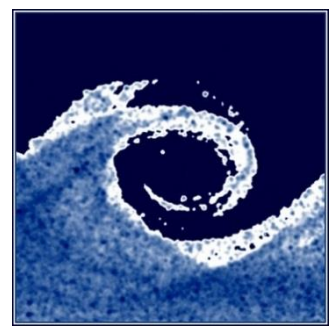
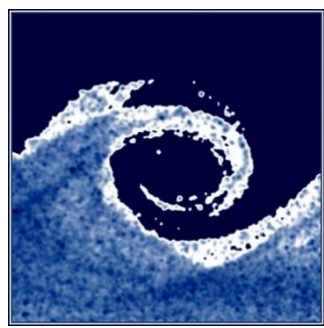


# Mérőlánc

- Szonda, kábel, híd (CTA esetén Wheatstone híd), jel kondicionáló (szűrés, erősítés), A/D átalakító, számítógép, számítógép program



# Szonda típus I



- **Miniatúra hődrót szonda  
(Miniature wire probe)**

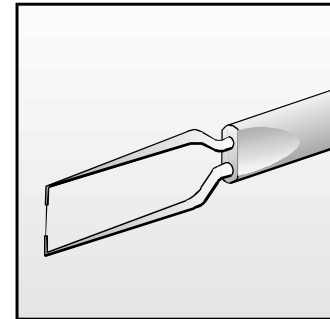
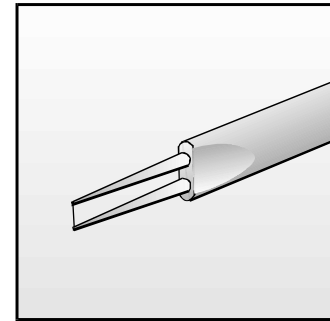
Platina-bevonatú wolfram (tungsten),  
5  $\mu\text{m}$  átmérő, 1.2 mm hossz

- **Arany-bevonatú szonda  
(Gold-plated probe)**

3 mm teljes huzal hossz,  
1.25 mm aktív szonda hossz  
arany-bevonatú réz tartó (prong)

Előnyök:

- Pontosán definiált aktív szonda hossz
- csökkentett hődisszipáció a tartók által
- egyenletesebb hőeloszlás a huzal mentén
- szonda zavaró hatása csökkentve van



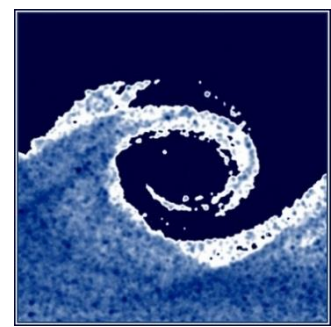
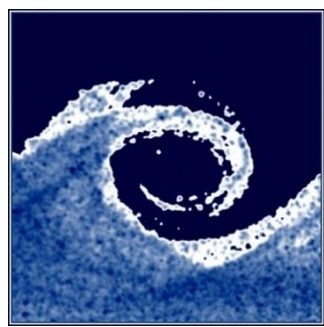
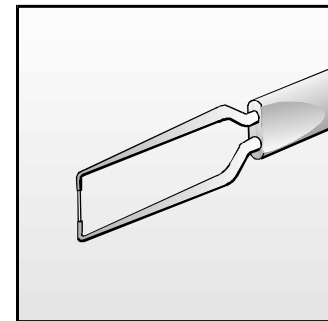
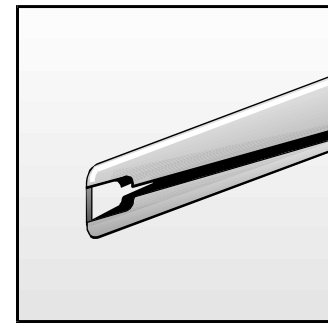
# Szonda típus II

- Hőfilm szonda  
(Film probes)

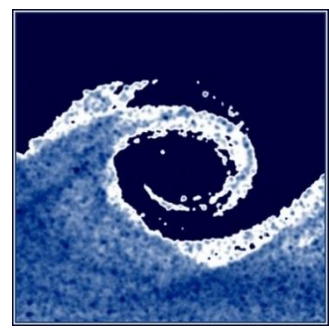
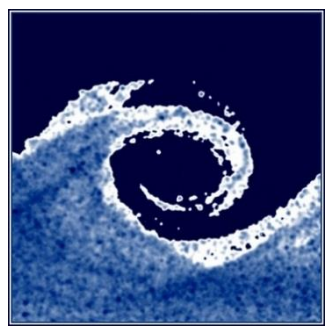
Vékony fém film réteg (nikkel) egy kvarc testen.  
Vékony kvarc réteg védi a fém réteget korróziótól,  
kopástól, fizikai károsodástól,  
és szigeteli (elektromos áram)

- Hődrót-hőfilm szonda  
(Fiber-Film probes)

„Hibrid” – film réteg egy vékony  
drót-szerű kvarc rúdon (huzal)  
„hasított hődrót-hőfilm szonda” („split fiber-film probes.”)

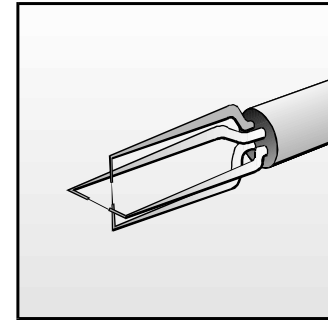


# Szonda típus III



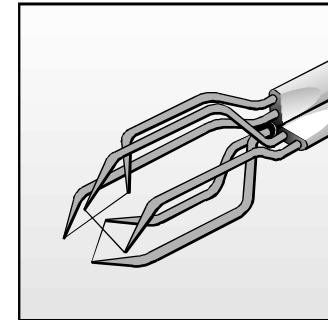
- X-szonda 2D áramlásra (X-probes)

2 szonda amely egymásra merőleges.  
 $\pm 45^\circ$  tartományban lehet vele mérni



- Hasított hődrót-hőfilm szonda 2D áramlásra (Split fiber-film probes)

2 hőfilm szonda amely egy kvarc henger ellentétes oldalán található. Mérési tartomány  $\pm 90^\circ$ .

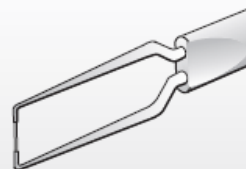
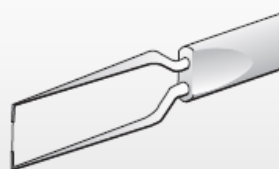
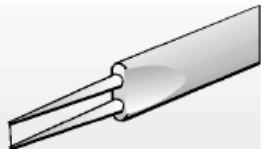
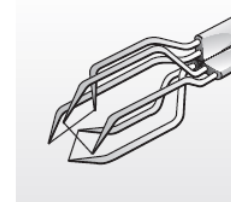
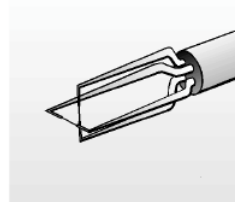
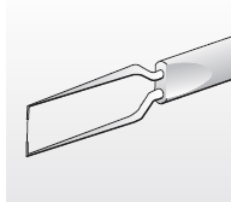


- Három tengelyű szonda 3D áramlásra (Tri-axial probes)

3 szonda derékszögű rendszerben.  $70^\circ$  kúpon belül mér.

# Szonda típus: haladó I

- 1d, 2d, 3d
- Hot-wire, hot-film
- The supports are called prongs, needles or stems
- Wire is the measurement material
- Stubs or wire ends are the parts of the wire near the prongs
- Hot-wire probe (normal and miniature probe)
  - Wire length: 1-3 mm ( other source says 0.5-2 mm)
  - Wire diameter is typically  $5\ \mu\text{m}$  (between 1-10  $\mu\text{m}$ , other source says 0.5-5  $\mu\text{m}$ )
- Hot-film probe
  - Layer of about  $0.1\ \mu\text{m}$  thick deposited of substrate
  - Substrate
    - Fine cylinders of quartz, about 25-50  $\mu\text{m}$  in diameter
    - Quartz wedges
    - Thin acetate or kapton foils.
  - Very thin quartz coating deposited on the sensor provides both protection against a hostile environment and isolation when operating in a conductive medium







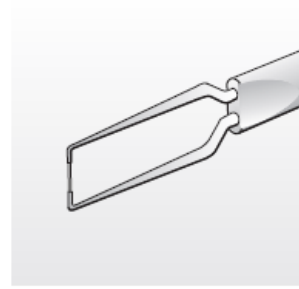
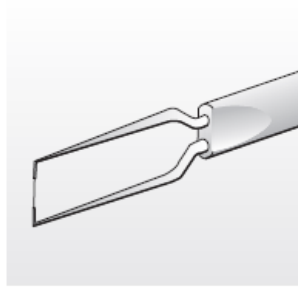
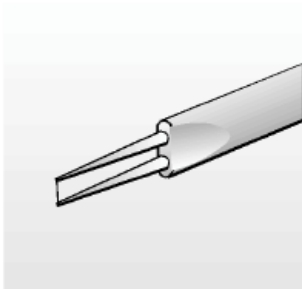
# Szonda típus: haladó 2

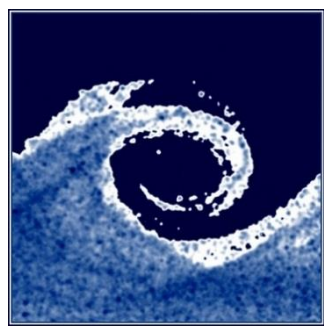


- The small dimensions give a small measurement volume
- The material for sensors should have the following properties
  - High value of the temperature coefficient of resistance,
    - Increased sensitivity to velocity variations
  - Electrical resistance such that it can be easily heated with an electrical current at practical voltage and current levels
  - Possibility of being available as wire of very small diameter
  - High enough tensile strength
    - To withstand the aerodynamic stresses at high flow velocities
- Common materials: Tungsten, platinum, platinum-iridium alloys
  - Tungsten:
    - Mechanically strong,
    - High temperature coefficient of resistance ( $0.004/^{\circ}\text{C}$ )
    - Poor resistance to oxidation at high temperatures in many gases
    - Most popular
    - When coated with a thin platinum layer, it becomes more resistive to oxidation, changes temperature coefficient to  $0.0032/^{\circ}\text{C}$  and soldering is eased.
  - Platinum:
    - Good oxidation resistance
    - Good temperature coefficient of resistance ( $0.003/^{\circ}\text{C}$ ), mechanically weak (particularly at high temperatures)
  - Platinum-iridium alloy:
    - compromise between the other two
    - Good oxidation resistance
    - Higher tensile strength than platinum
    - Low temperature coefficient of resistance ( $0.00085/^{\circ}\text{C}$ )
  - Platinum-rhodium alloy:
    - Higher temperature coefficient than platinum-iridium
    - Not as strong mechanically as platinum-iridium

# Szonda típus: haladó 3

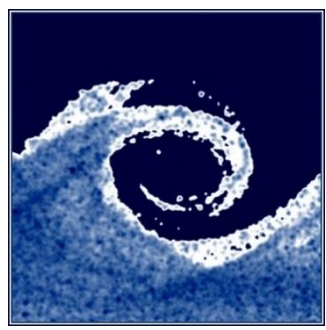
- Coated wire ends/stubs
  - Gold or copper material
  - Results in better mechanical and aerodynamic properties
  - Reduced heat transfer to the prongs
  - Smaller, better defined measurement length
- Miniaturized hot-wire probes are recommended for low subsonic flows. This helps to make the probes as non-intrusive as possible.
- Film vs. Wire
  - Hot-wire sensors provide superior performance in many applications
  - Hot-film typically has a larger diameter, and therefore a lower spatial resolution
  - In applications requiring maximum frequency response, minimum noise level and very close proximity to a surface, the platinum-coated tungsten hot wire sensor is superior
  - Hot-film is more robust than hot-wire
  - Hot-film is less sensitive to dirt and is easier to clean
  - Hot-film has a more complex material and also a lower frequency response



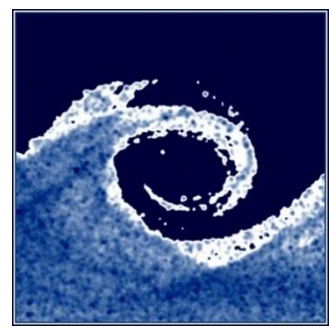


# Szonda típus: haladó 4

Free and Confined Flows		
Type of flow	Medium	Recommended Probes
<b>1-Dimensional</b>		
Uni-directional	Gas	Single sensor Wire Single sensor Fiber, thin coat. Wedge-shaped Film, thin coat. Conical Film, thin coat.
	Liquid	Single sensor Fiber, heavy coat. Wedge-shaped Film, heavy coat. Conical Film, heavy coat.
Bi-directional	Gas	Split-fibers, thin coat.
	Liquid	Split-fibers, heavy coat.
<b>2-Dimensional</b>		
One Quadrant	Gas	X-array Wires X-array Fibers, thin coat. V-wedge Film, thin coat.
	Liquids	X-array Fibers, heavy coat. V-wedge Film, heavy coat.
Half Plane	Gas	Split-fibers, thin coat.
	Liquids	Split-fibers, heavy coat.
Full Plane	Gas	Triple-split Fibers, thin coat. X-array Wire, flying hot-wire
	Liquids	Triple-split Fibers, <i>special</i>
<b>3-Dimensional</b>		
One Octant (70° Cone)	Gas	Tri-axial Wire Tri-axial Fiber, thin coat.
	Liquids	Tri-axial Fiber, <i>Special</i>
90° Cone	Gas	Slanted Wire, rotated probe
	Liquids	Slanted Fiber, heavy coat.
Full Space	Gas	Omnidirectional Film
<b>Wall Flows (Shear Stress)</b>		
Type of flow	Medium	Recommended Probes
<b>1-Dimensional</b>		
Unidirectional	Gas	Flush-mounting Film, thin coat. Glue-on Film, thin coat.
	Liquids	Flush-mounting Film, heavy coat. Glue-on Film, <i>special</i>



# Híd: áramkör



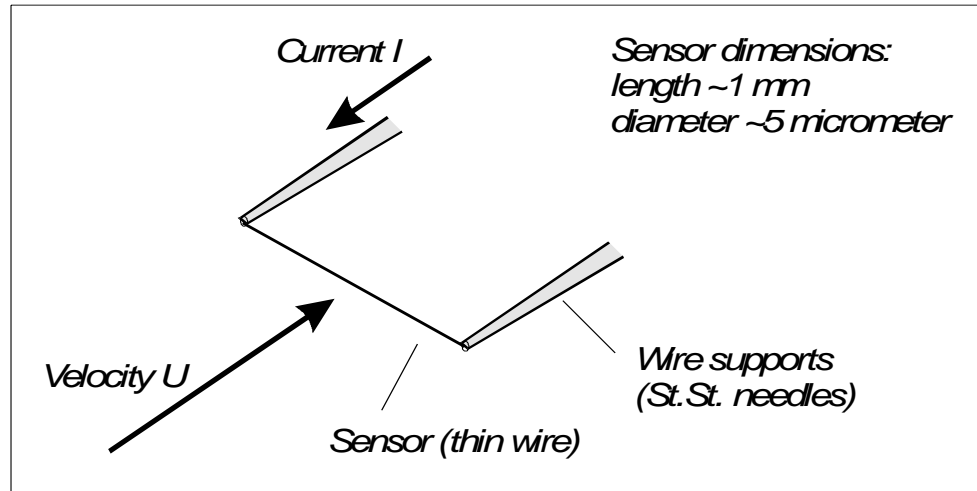
- A hődrót szonda a híd által egy szabályozott mennyiségű elektromos árammal van ellátva

# Működési Elv

- Vegyünk egy vékony drótot amely két tartó között van kifeszítve, és egy  $U$  sebességnek van kitéve.

Ha elektromos áramot vezetünk a drótbba, hő keletkezik ( $I^2 R_w$ ). Ha egyensúlyban van a rendszer, a hőveszteség (leginkább konvektív hőátadás) a környezet felé egyensúlyban kell legyen evvel.

- Ha a sebesség változik, a konvektív hőátadási tényező változik, és a huzal hőmérséklete is változik, amíg egy újabb egyensúlyi helyzetbe nem kerül a rendszer.



# Egyenletek

- Egyenletek:

$$\frac{dE}{dt} = W - H$$

$E$  = huzalban tárolt hőenergia

$$E = CwTw$$

$Cw$  = huzal hőkapacitás

$W$  = Joule-hő

$$W = I^2 R w$$

ne feledjük,  $Rw = R w(Tw)$

$H$  = hő amely át van adva a környezetnek

# Egyszerűsített statikus elemzés I

- Ha egyensúlyban van a rendszer, akkor nincs hőátadás:

$$\frac{dE}{dt} = 0 \qquad W = H$$

Így a Joule-hő ( $W$ ) egyenlő a konvektív hőátadással ( $H$ )

- Feltételezések

- Hősugárzási veszteségek elhanyagolhatóan kicsik
- Hővezetés a tartókba elhanyagolhatóan kicsi
- $T_w$  egyenletes a huzal mentén
- A sebesség normál irányból fújja a huzalt, egyenletes, és kis amplitúdójú szónikus sebességhez képest.
- Áramlás hőmérséklete és sűrűsége állandó

# Egyszerűsített statikus Elemzés II

Statikus hőátadás:

$$W = H \Rightarrow I^2 R w = h A (T_w - T_a) \Rightarrow I^2 R w = Nu k_f / d A (T_w - T_a)$$

$h$  = hőátadási tényező

$A$  = hőátadási felület

$d$  = huzal átmérő

$k_f$  = áramlás hővezetőképessége

$Nu$  = dimenzióatlan hőátadási tényező

Kényszerített konvekciós tartomány, i.e.  $Re > Gr^{1/3}$  (0.02 levegő esetén) és  $Re < 140 \Rightarrow$

$$Nu = A_1 + B_1 \cdot Re^n = A_2 + B_2 \cdot U^n$$

$$I^2 R w^2 = E^2 = (T_w - T_a)(A + B \cdot U^n)$$

“King’s law”

A feszültség változás által mérhetünk sebességet  $\Rightarrow$  adatgyűjtés, adatfeldolgozás

**A, B, n: KALIBRÁLNI KELL**





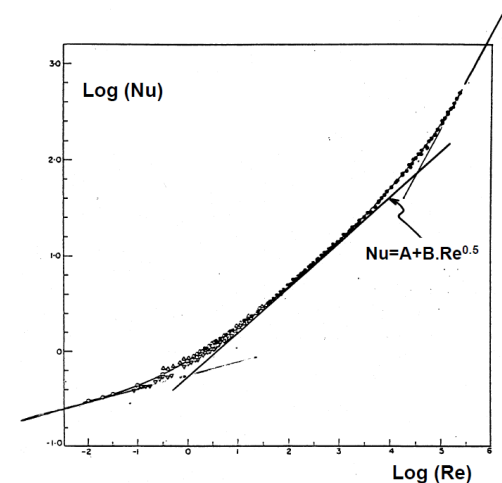
# Haladó Működési Elv I



- Supply =  $I^2 R_w = \pi D l h (T_w - T_a) = \text{Dissipation}$ 
  - $I$  = heating current flowing in the wire [A]
  - $R_w$  = resistance in the wire at the operating temperature [ $\Omega$ ]
  - $D$  = diameter of the wire [m]
  - $l$  = length of wire [m]
  - $h$  = heat transfer coefficient [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ]
  - $T_w$  = wire temperature [ $^\circ\text{C}$ ]
  - $T_a$  = fluid (air) temperature [ $^\circ\text{C}$ ]
- The Nusselt number is a dimensionless number relating the convective and the conductive heat transfer across (normal to) the boundary:
  - $Nu$  = Convective heat transfer coefficient / Conductive heat transfer coefficient
  - $Nu = hD/k$
- $I^2 R_w = \pi l k (T_w - T_a) Nu$
- $I^2 R_w = |A + BU^n| (T_w - T_a)$ 
  - $A$  = represents the natural convection term
  - $BU^n$  = represents the forced convection term
  - $U$  = flow velocity [m/s]

# Haladó Működési Elv II

- If one wants to increase the resolution of the measurements, the influence of the natural convection term should be minimized.
- Good working conditions are reached when:
  - $(l/D)(Gr^{1/2}) < 1$  (or alternatively,  $Re > Gr^{1/3}$ )
    - $Gr$  being the Grashof number
    - $Gr = (g(T_w - T_a)D^3)/(T_m \nu^2)$
- The resistance of a wire is a function of its temperature.
  - For a metallic conductor:  $R_w = R_a[1 + b_1(T_w - T_a) + b_2(T_w - T_a)^2 + \dots]$ .
  - This can be linearized for a temperature range of up to 200°C
    - $R_w = R_a[1 + b_1(T_w - T_a)]$
  - This results in the following expression:
    - $b_1(l^2 R_w R_a)/(R_w - R_a) = A + BU^n$
- Thus the actual value of the heat transfer could be obtained either as...
  - ... the value of  $R_w$  if  $l$  is kept constant. Constant Current Anemometry method
  - ... the value of  $l$  if  $R_w$  is kept constant. Constant Temperature Anemometry method
- Since the frequency response of the sensors are mostly flat (linear) in a large range (order of 100 Hz- order of 10000 Hz)
  - This allows the instantaneous response of the hot-wire to be written, even for unsteady flows, in an algebraic form as :
    - $E^2 = A + B(U)^n$ . King's law
    - $E^2 = A + BU^n + CU$ : Gaulier's modified law
    - $U = k_1 + k_2 E + k_3 E^2 + k_4 E^3 + \dots + k_{i+1} E^i$  : polynomial fit





# Haladó Működési Elv III



- Control circuits

- The main difference between the operating modes is linked to the handling of thermal inertia of the sensor.
- In usual applications, the frequencies of the flow fluctuations to be measured are much higher than the natural frequency of the sensor
- Therefore electronic compensation is needed
- In a CCA and CVA, this is achieved by a first-order high-pass filter integrated in the amplifying unit.
  - In a typical CCA application, the filter's response is tuned to compensate exactly the thermal lag of the sensor. The overall bandwidth is then only limited by the amplifier's characteristics, mainly its gain-bandwidth product.
  - With a CVA, the thermal lag is partially compensated during measurements and is fully compensated when post-processing the data. This permits high productivity for large-bandwidth applications because no adjustment is required when the experiment is running.
  - In a CTA, the temperature of the sensor is maintained constant by a feedback loop, so that its thermal inertia is, in principle, automatically compensated. In this case, the maximum bandwidth is limited by the amplifier's properties and some characteristics of the practical setup. Full compensation can be made after carefully tuning the circuit.



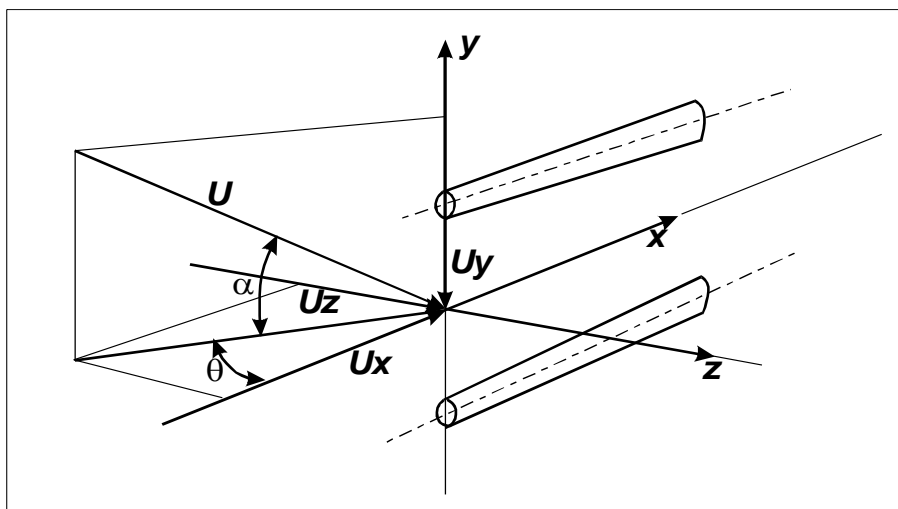
# Haladó Működési Elv IV



- Constant current anemometry (CCA):
  - In its basic form, the control circuit may be reduced to a source of constant current feeding a calibration and measurement bridge.
  - The two resistors are chosen to be equal and the value of  $R$  is chosen to be equal to the hot resistance of the wire ( usually 1.8 times the cold wire resistance) and the supply current is increased until, for zero wind velocity, a balance is obtained at the bridge output.
  - Any change in wind velocity will change the heat transfer, and thus the wire temperature and resistance and cause an unbalanced voltage to appear at the bridge output.
  - This can be calibrated against flow velocity to obtain the wire calibration curve.
  - Has a slow frequency response due to the circuits own thermal inertia.
  - $R_w = \text{const.}, I = I(U)$
- Constant temperature anemometry (CTA):
  - The output from the bridge is amplified and used to control the supply voltage such as to maintain the wire temperature constant.
  - The amplifier output  $E$ , required to maintain the wire at a constant temperature is a function of the flow velocity.
  - The temperature is again fixed by the choice of the resistance  $R$  of the bridge (usually 1.8 times the cold wire resistance).
  - All coefficients can be considered constants.
  - Because the changes in temperature are now much smaller, the thermal inertia of the wire can be expected to play a minor role in determining the frequency response.
  - Because the temperature of the wire remains almost constant, all nonlinearities introduced by the thermal lag effect are substantially smaller and in most cases negligible.
  - The new frequencies to be considered are so high that the reactive phenomena taking place in the wire connection cables and in the amplifier must be taken into account and these increase the order of the response equation.
  - Accounting for a change in  $T_a$ , the temperature of the measured fluid, is important.
  - $I = \text{const.}, R_w = R_w(U)$
- Constant voltage anemometry (CVA) (new)

# Írány Érzékenység

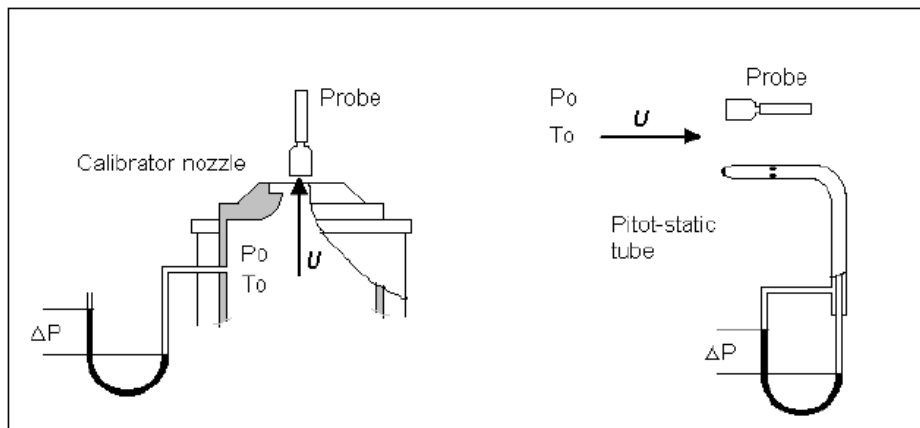
Szonda koordináta rendszer



Sebesség vektor  $U$  komponensei: normál  $U_x$ ,  
tangenciális  $U_y$  és binormális  $U_z$ .

# Kalibráció

- Sebesség kalibráció:
  - Sebesség kalibráció tartománya:  $0.1 \cdot U_{\min} \rightarrow 1.5 \cdot U_{\max}$
  - Több komponensű szonda esetén az áramlási irány függvényében is muszáj kalibrálni.
    - A mérési szög tartományán belül kell kalibrálni
- Dinamikus kalibráció (Híd):
  - Négyszög jel vizsgálat
    - Egy négyszögjel van küldve a szondára, és annak a válaszát vizsgáljuk oszcilloszkóppal
  - Optimalizáljuk az állításokat
  - Az optimalizált szonda/anemométer rendszer optimalizált sáv szélességen (a frekvencia válasz optimalizálva van, és ez által a lehető legnagyobb frekvenciával mintavételezhetünk) vagyis határfrekvenciával mintavételezhetünk
  - Mivel a frekvencia válasz az áramlás sebességének függvénye...
    - Az áramlási sebesség várható átlag értékénél kalibrálunk
    - Ha gerjesztő áramlásokat mérnénk, akkor az áramlás átlagos sebességénél kalibrálunk





# Előnyök és Hátrányok I



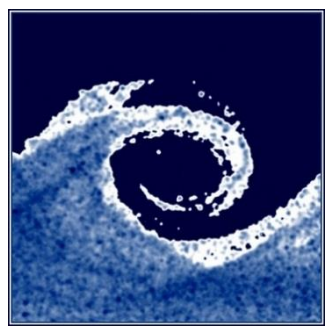
- Hődrót anemométerek előnyei:
  - Olcsó (költség kímélő)
  - Gyors a frekvencia válasz
  - Méret: Kicsi mérési térfogat
  - Jó a térbeli felbontás és időfelbontás
  - Turbulens áramlás könnyen mérhető ezzel a módszerrel
  - Többkomponensű mérés lehetséges
  - Folyamatos hőmérséklet mérés: Többkomponensű szondával lehetséges
  - Két-fázisú áramlásban is lehet mérni
  - Ugyan olyan pontos mint az LDA
  - Kevés a zaj a mért jelen
  - Szonda és jelfeldolgozási módszer kiválasztása: Könnyen lehet összeállítani egy mérőrendszert egy adott feladat megoldására
  - Jelfeldolgozás: Az analóg jel lehetőséget biztosít hogy mind az idő függvényében, mind a frekvencia függvényében megvizsgálhassuk a kondicionált jelet
  - Térbeli eloszlás: Többkomponensű szondával lehetőség adódik, hogy többkomponensű áramlást vizsgáljunk
  - Egyedi szondákat könnyen lehet gyártani
  - Gázokban, transzparens, átlátszatlan és akár áramot vezető folyadékokban is lehet mérni.
  - Lehet mérni pillanatnyi fali csúsztatófeszültséget falba beépített szenzorokkal amelyek a fallal egy síkba esnek.

# Előnyök és Hátrányok II

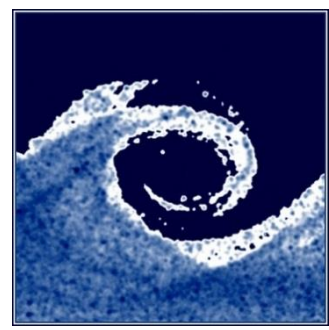
- Hődrót anemométer hátrányai

- Erősen turbulens áramlások
  - Csak enyhe, vagy mérsékelt turbulens intenzitású áramlásokat lehet mérni
  - Ha a mérési tartományon kívülről éri a szondát egy zavarás, akkor az eredményeket módosítja
- Cseppfolyós közeg áramlása
  - Könnyebben piszkítja be a szondát
  - Mivel a túlhevítés értéke mérsékelt cseppfolyós közegek esetén (smaller overheat ratio), az áramló közegben fellépő hőmérséklet változások jobban befolyásolják az eredményeket
- Szonda eltörés
- Szennyezés
- Intruzív módszer
- Hőátadás a huzal és a tartók között
- Zaj a mért jelen
  - Rádiófrekvencia zaj
  - Áramkőr zaj (hálózati zaj)
- Hőátadási problémák
  - Mivel a tartók tömege nagyobb mint a huzalé, a hőmérsékletük alacsonyabb, és ezáltal hőelnyelő felületekként viselkednek. A huzal végei ezáltal hűtve vannak, és az aktív mérési hossz rövidebb mint az egész huzal hossza. Ezt a kalibráció figyelembe veszi, és így CTA esetén kevésbé befolyásolja az eredményeket mint CCA esetén.
  - Többkomponensű szonda esetén, az egyik komponens nyoma befolyásolja a másikon értékeket.
  - Hődrótok mind hőmérsékletre és sebességre is érzékenyek, és így ha mind a kettő egyszerre változik, akkor az eredmények meghamisítódnak. (e.g. Geofizikai áramlások, nagy sebességű, akár szónikus és transzszónikus áramlások)
- Aerodinamikai problémák
  - Szondák nem érzékenyek áramlási irányra (visszaáramlás)
  - A tartók megváltoztatják az áramlást amely a többi szonda komponensre áramlik (többkomponensű szondák, több szondás mérés (mint például térbeli korreláció mérések esetén))





Stb.



- Traverz rendszer
- Számítógépes program
- Kalibráció egység
- Alkalmazási lehetőségek
- Turbulens tulajdonságok