



# Elektro- és magnetoreológiai folyadékok mechatronikai alkalmazásai

DR. MEDVEGY TIBOR

PANNON EGYETEM, MÉRNÖKI KAR

FIZIKA ÉS MECHATRONIKA INTÉZET

# ER és MR fluidumok

- ▶ Az elektroreológiai (ER) és magnetoreológiai (MR) fluidumok
  - ▶ összetett folyadékok
  - ▶ szerkezetük átrendeződik külső elektromos- illetve mágneses terek jelenlétében (szilárd testekben elektro- illetve magnetostrikció, pl: piezoelektromos jelenség)
- ▶ Az ER és MR fluidumokban e szerkezeti változások hatására akár több nagyságrenddel is megnőhet a folyadék viszkozitása.
- ▶ Innen ered az elnevezésük, hiszen a reológia tudományága az anyagok alakváltozásaival, illetve az alakváltozások és az azokat kiváltó hatások közötti törvényszerűségek vizsgálatával foglalkozik.

# Reológia\*

- ▶ XVI. század - Pascal, Hooke, Newton
- ▶ XVII-XIX.század - Hagen, Stokes, Hagenbach, Poiseuille
- ▶ 1916. Eugene C. Bingham: “Rheology is the study of deformation and flow of matter.”
  - ▶ Makroreológia - Fenomenologikus szemléletű, matematikai modelleket állít fel
  - ▶ Mikroreológia - Molekuláris szinten vizsgálja a szerkezetet

\*„rheo” - a görög „rheos” szóból: folyam, folyás, áramlás

# Deformációk - nyújtás

Felületre merőleges (normális) nyomó, vagy nyújtó feszültség:

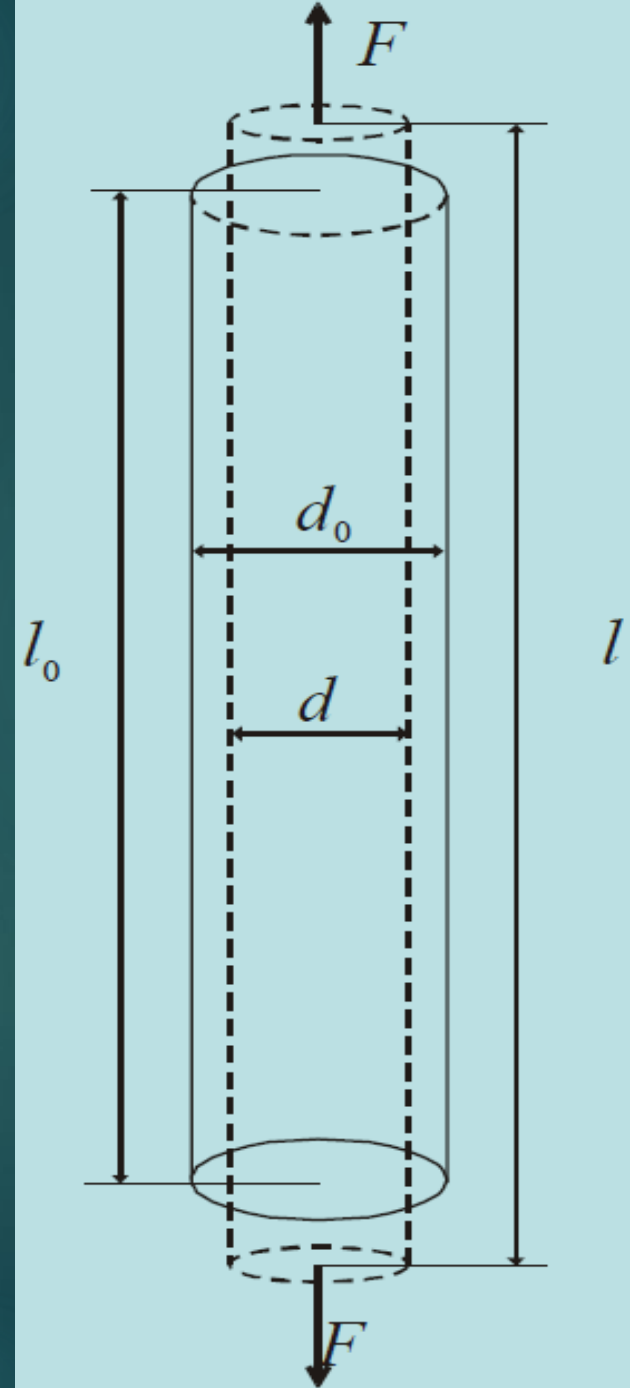
$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Relatív deformáció:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Hooke törvénye:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$



# Deformációk - nyírás

- ▶ Felülettel párhuzamos csúsztató, vagy nyíró feszültség:

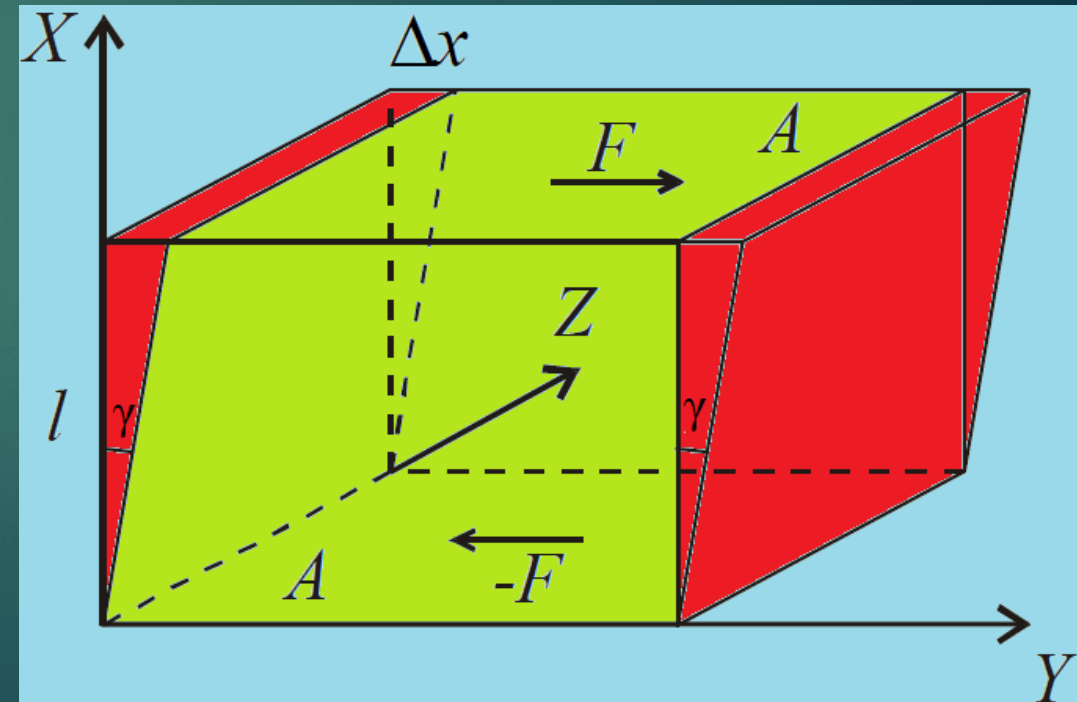
$$\tau = \frac{F}{A}$$

- ▶ A nyírási deformáció:

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{\Delta x}{l}$$

- ▶ A nyírási modulus:

$$G = \frac{F / A}{\Delta x / l} = \frac{\tau}{\operatorname{tg}\gamma}$$



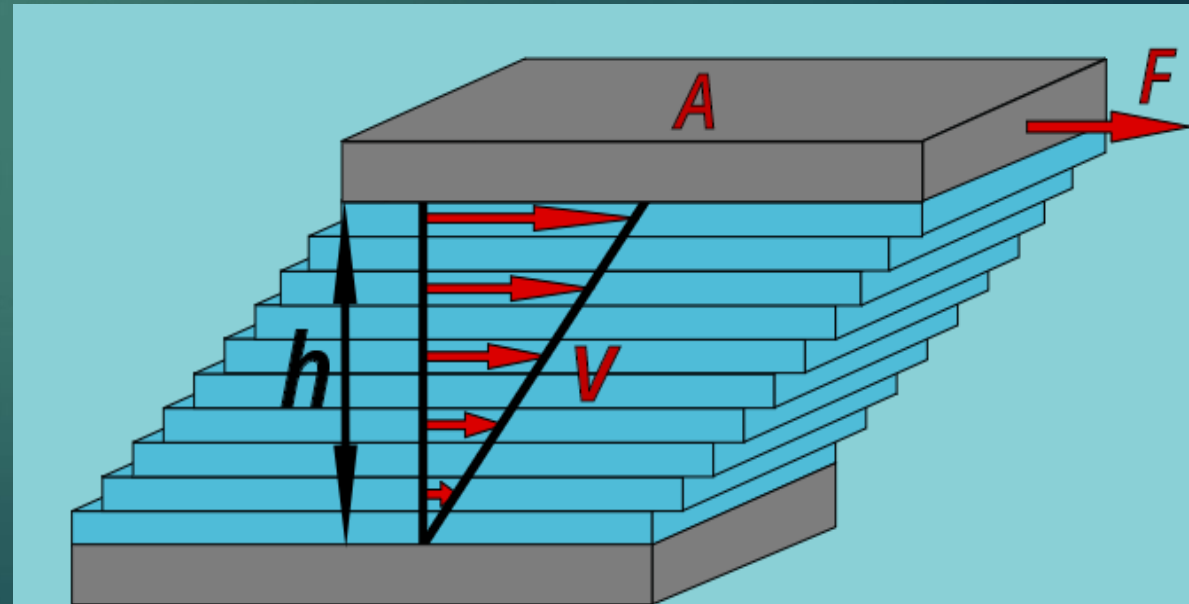
# Newton-féle viszkozitási törvény

- ▶ A jól ismert Newton-féle viszkozitási törvény szerint a folyadékrétegek közötti  $\tau$  nyírófeszültség egyenesen arányos a  $\dot{\gamma}$  nyírási sebességgel (sebességgradiens):

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \dot{\gamma} = \frac{dv}{dy}$$

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

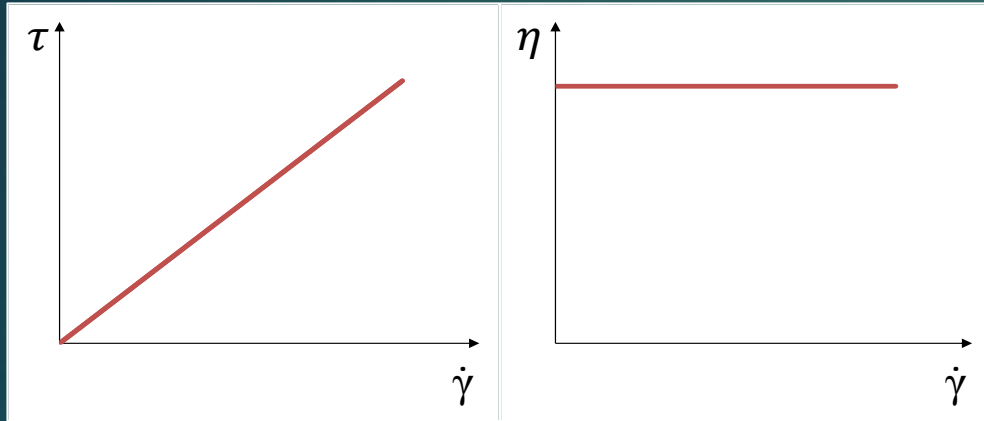
$$F = \eta A \frac{dv}{dy}$$



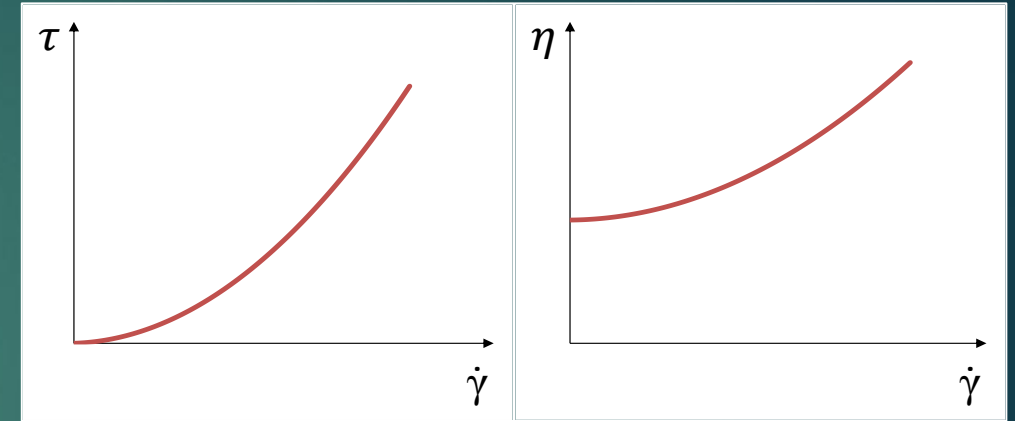
# Viszkozitás

	<b>Viszkozitás (Pas)</b>
levegő	$1,71 \times 10^{-5}$
etil-alkohol	$0,248 \times 10^{-3}$
benzol	$0,64 \times 10^{-3}$
víz	$10^{-3}$
vér	$[4 \times 10^{-3} \dots 25 \times 10^{-3}]$
kávétejszín	$10^{-2}$
méz	$10^1$
bitumen	$10^8$
üveg	$10^{40}$

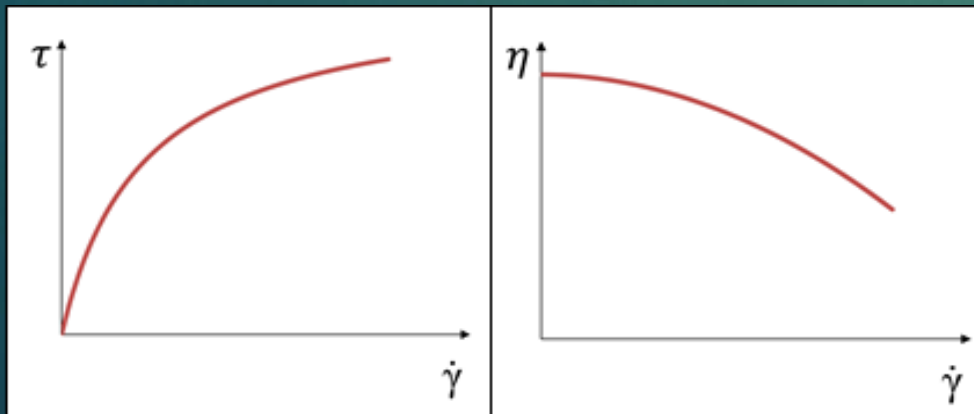
# Nem-Newtoni folyadékok



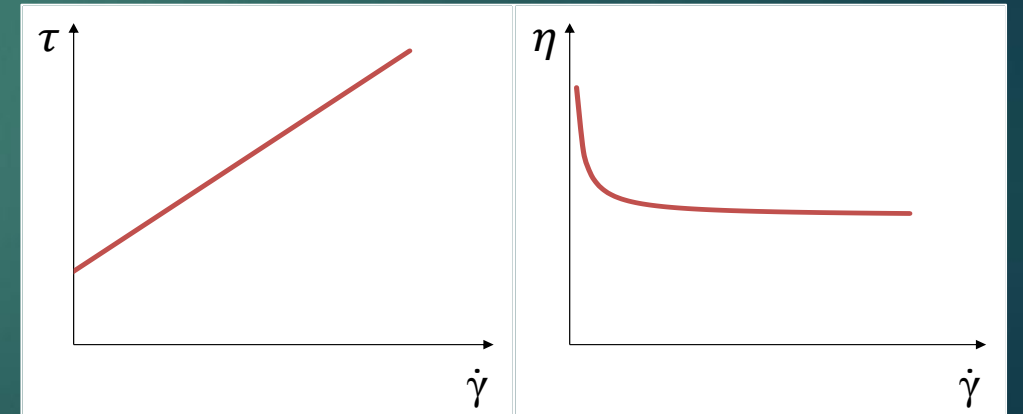
- ▶ Newtoni folyadék
- ▶ Pl. víz



- ▶ Nyírásra keményedő - shear thickening
- ▶ Pl. keményítő + víz



- ▶ Nyírásra lágyuló - shear thinning
- ▶ Pl. kechup

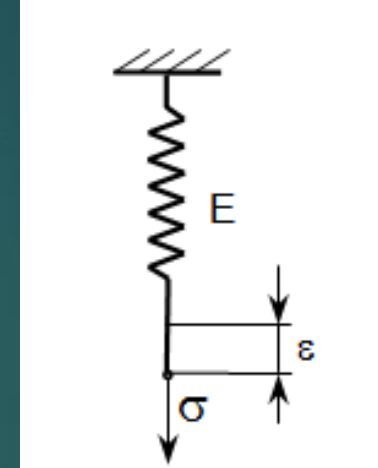


- ▶ Bingham pasztikus
- ▶ Pl. keményítő + olaj

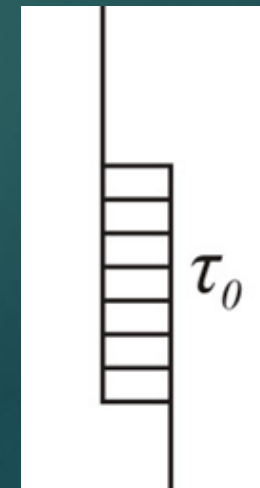


# Reológiai modellek

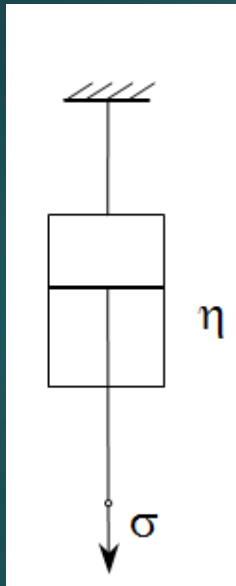
- ▶ Ideálisan rugalmas: rugó
  - ▶ A feszültség arányos a deformáció mértékével



- ▶ Viszkózus: dugattyú
  - ▶ Összenyomhatatlan folyadékkal töltött hengerben mozgó dugattyú

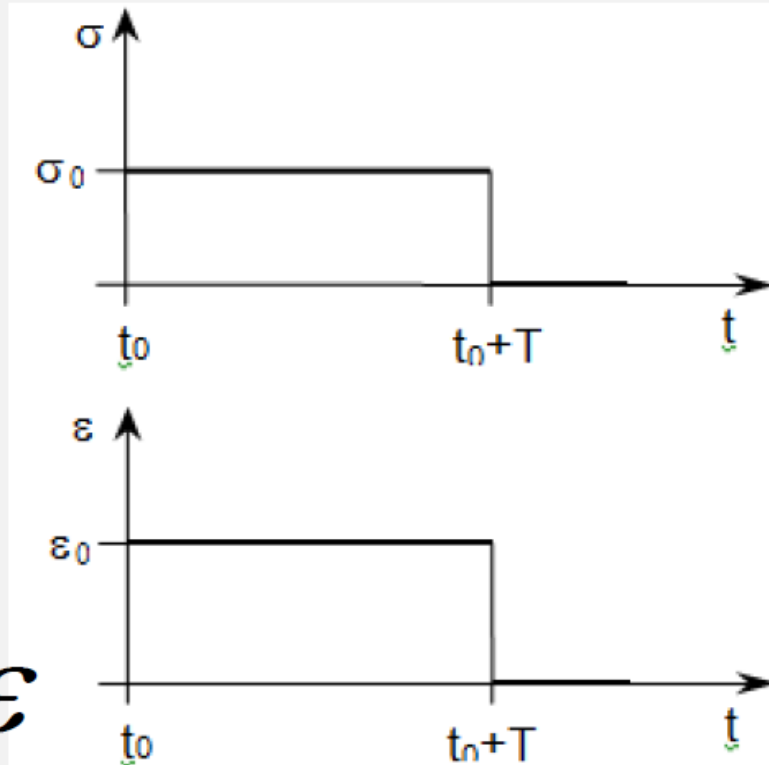
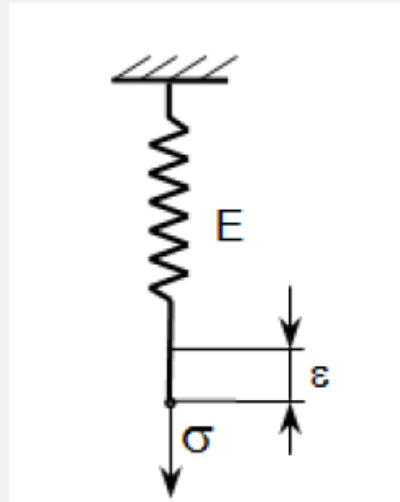


- ▶ Súrlódó (plasztikus)



# Hooke-test (ideálisan rugalmas)

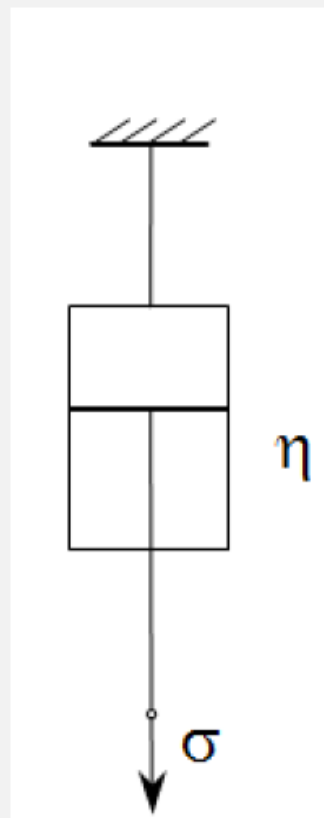
- Ideálisan rugalmas viselkedés



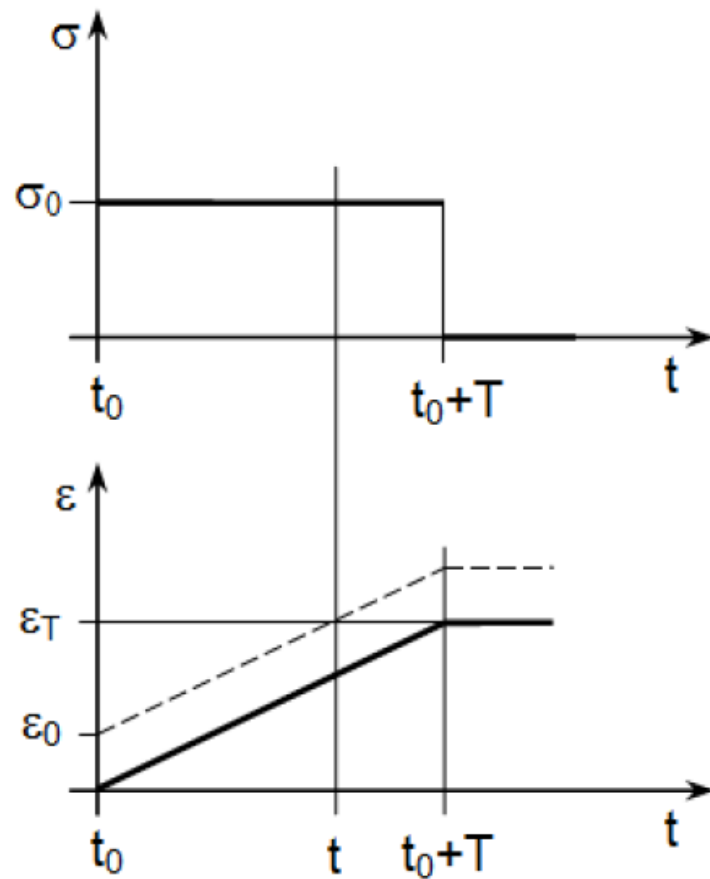
$$\sigma = E \varepsilon$$

# Newtoni test (ideálisan viszkózus)

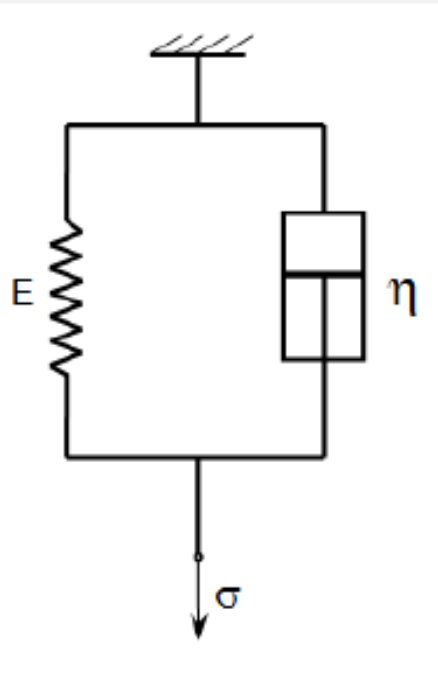
Egyszerű folyadék (viszkózus) modell



$$\sigma = \eta_0 \dot{\varepsilon}$$



# Kelvin-Voight modell (késleltetett rugalmas)



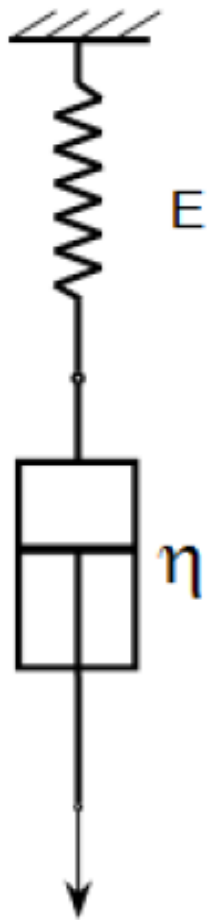
$$\varepsilon_{\ddot{o}} = \varepsilon_E = \varepsilon_{\eta}$$

$$\sigma_{\ddot{o}} = \sigma_E + \sigma_{\eta}$$

$$\sigma(t) = E \cdot \varepsilon(t) + \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}$$

$$\sigma = E\varepsilon + \eta_0 \dot{\varepsilon}$$

# Maxwell modell (rugalmas folyadék)

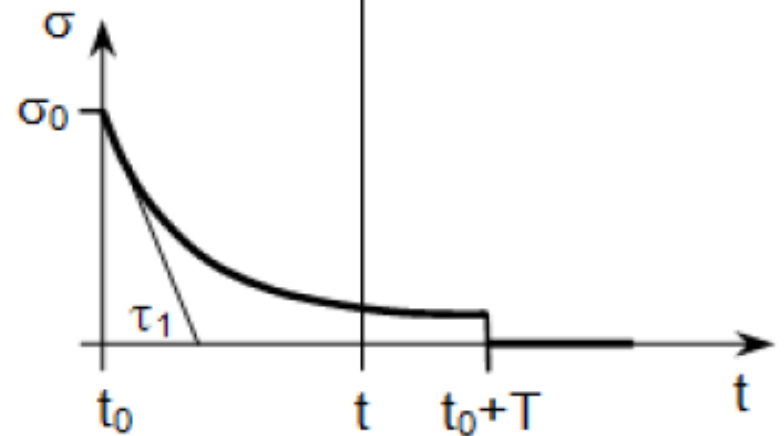
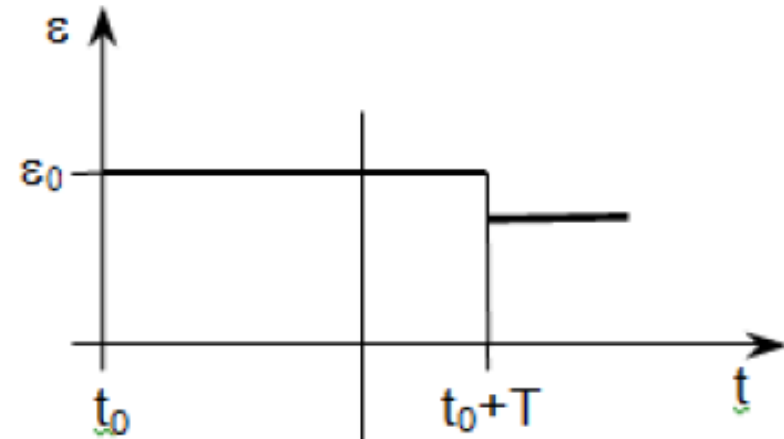


$$\sigma_{\ddot{o}} = \sigma_E = \sigma_{\eta}$$

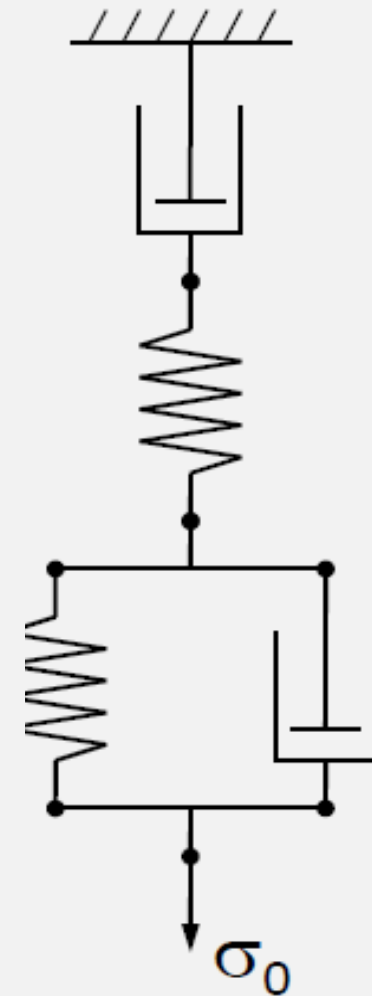
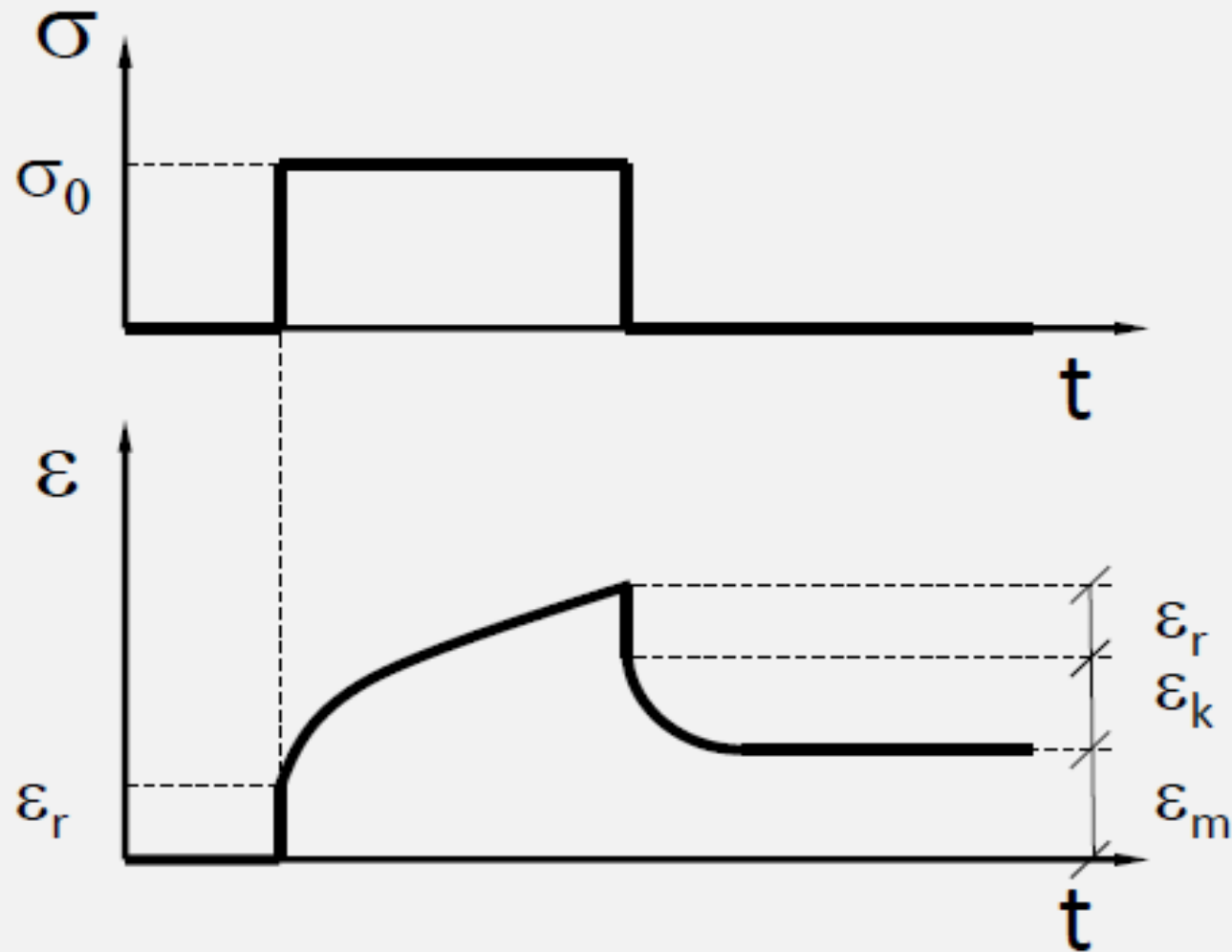
$$\varepsilon_{\ddot{o}} = \varepsilon_E + \varepsilon_{\eta}$$

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{\eta} \int \sigma(t) dt$$

$$\sigma(t) = E \cdot \varepsilon_0 \cdot e^{-\frac{E}{\eta} t}$$



# Burgers modell (viszkoelasztikus)

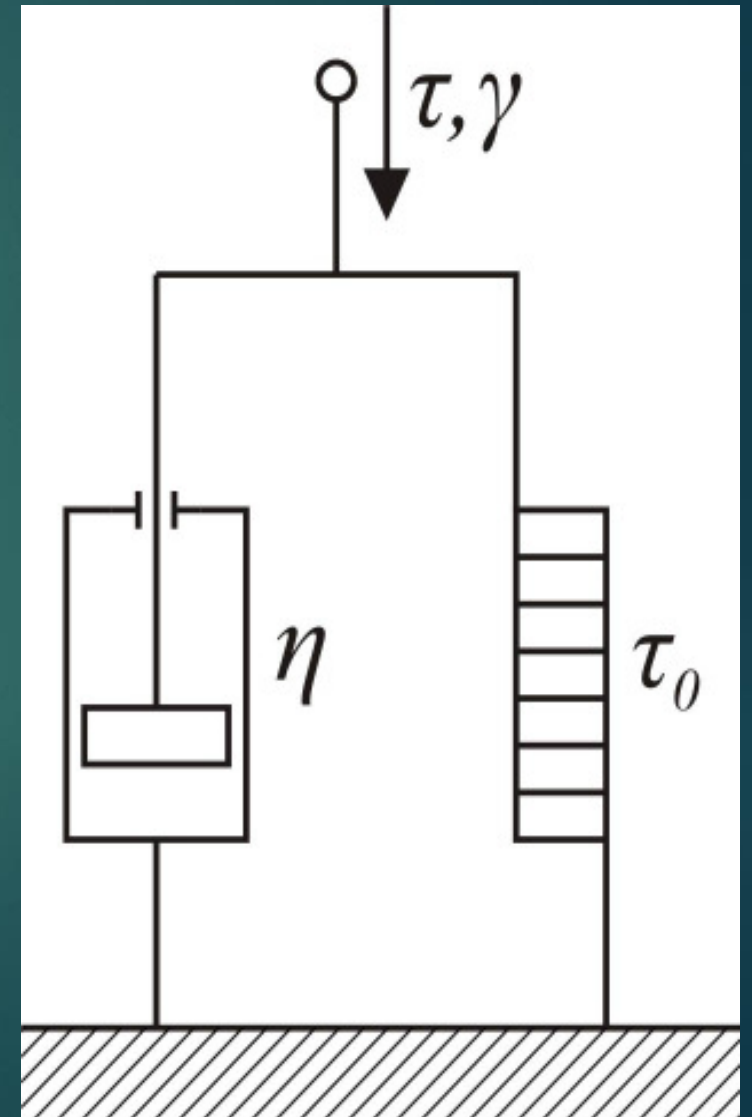


# Bingham modell (képlékeny-rugalmatlan)

- Egy minimum nyírési stressz szükséges a folyáshoz. Mechanikai analóg csúszás egy lejtőn, addig nincs mozgás amíg egy értéket (súrlódás) meg nem halad.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_0$$

- A folyadékban az alakváltozás csak egy bizonyos határfeszültség elérése után indul meg, majd utána a newtoni folyadékokhoz hasonlóan ideálisan viszkózus jelleget mutatva folytatódik.



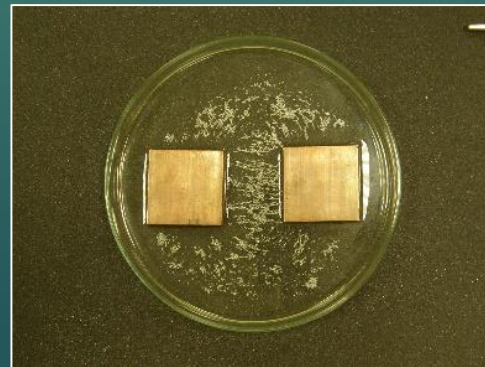
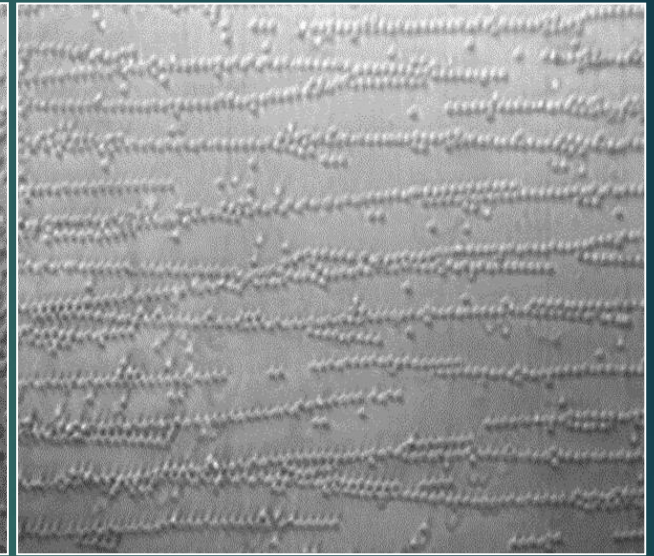
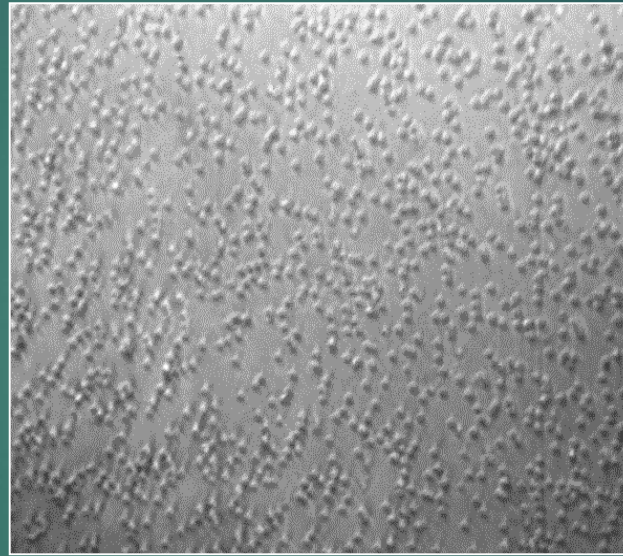
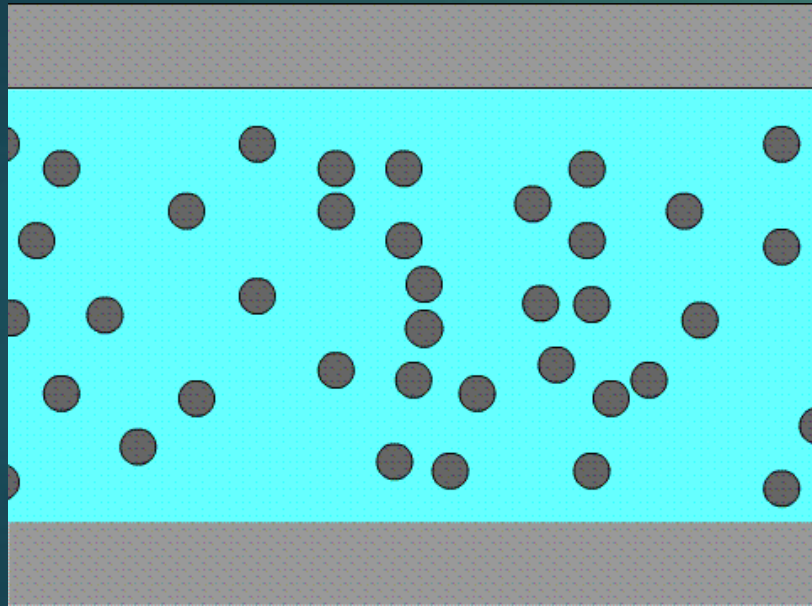
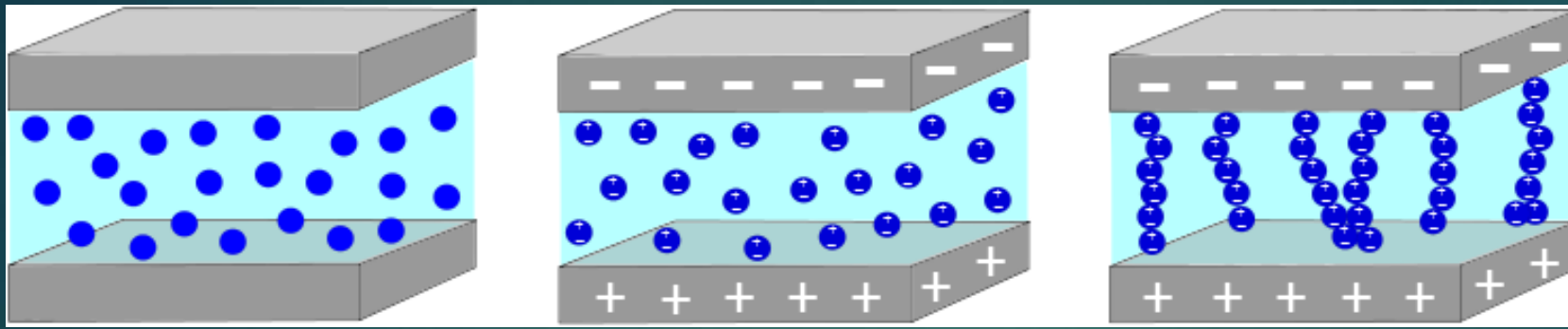
# Intelligens anyagok

- ▶ Nehéz megfelelő definíciót találni arra, hogy mi tesz egy anyagot “intelligensé”, ugyanis sok esetben a felhasználás mikéntje teszi őket azzá.
- ▶ Olyan komplex anyagok, amelyek a felhasználó számára előnyösen képesek reagálni a környezetükből származó fizikai és/vagy kémiai hatásokra.



# Elektroreológiai folyadékok

- ▶  $\epsilon_p$  dielektromos permittivitású részecskéket  $\epsilon_f$  dielektromos permittivitású folyadékban diszpergálunk ( $\epsilon_p > \epsilon_f$ )
- ▶ A részecskék elektromos térben igyekeznek olyan pozíciót felvenni, hogy egyik részecske indukált pozitív töltése a másik részecske indukált negatív töltése közelében helyezkedjék el.
- ▶ A részecskék elmozdulnak, és először párokba, láncokba majd oszlopokba szerveződnek.

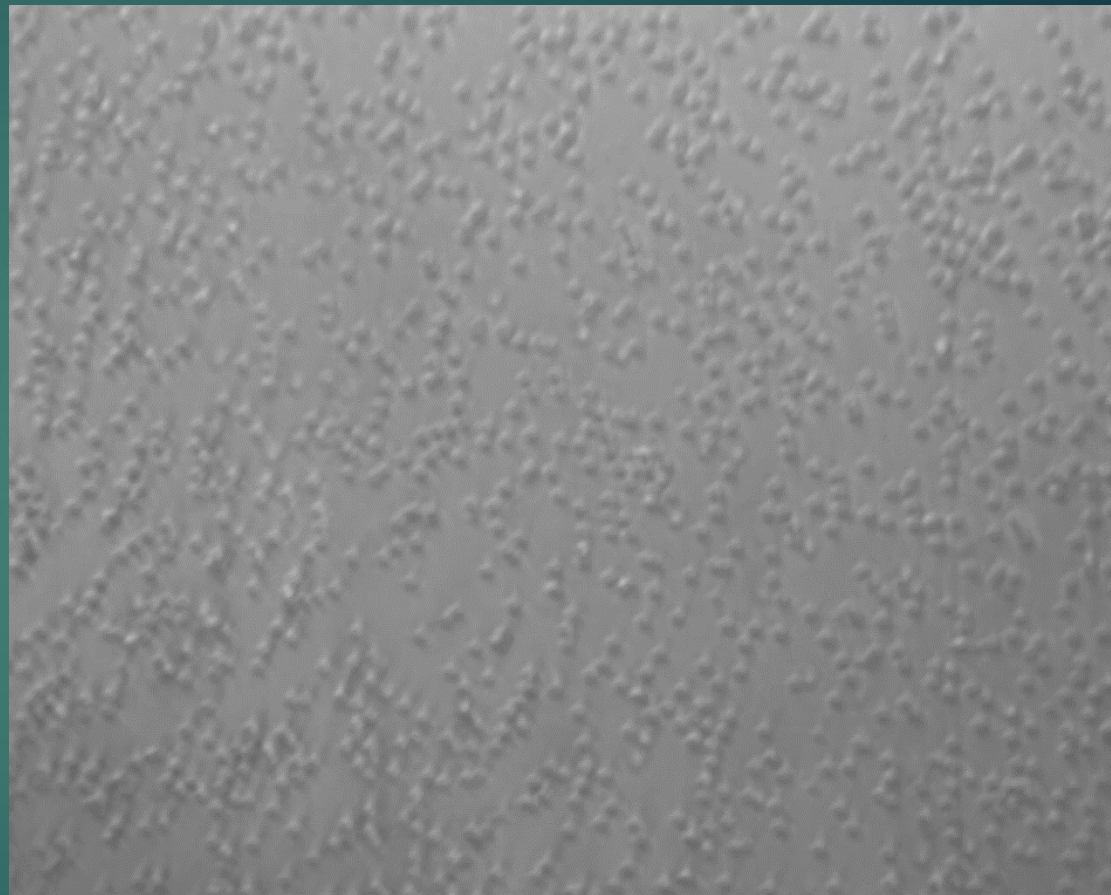




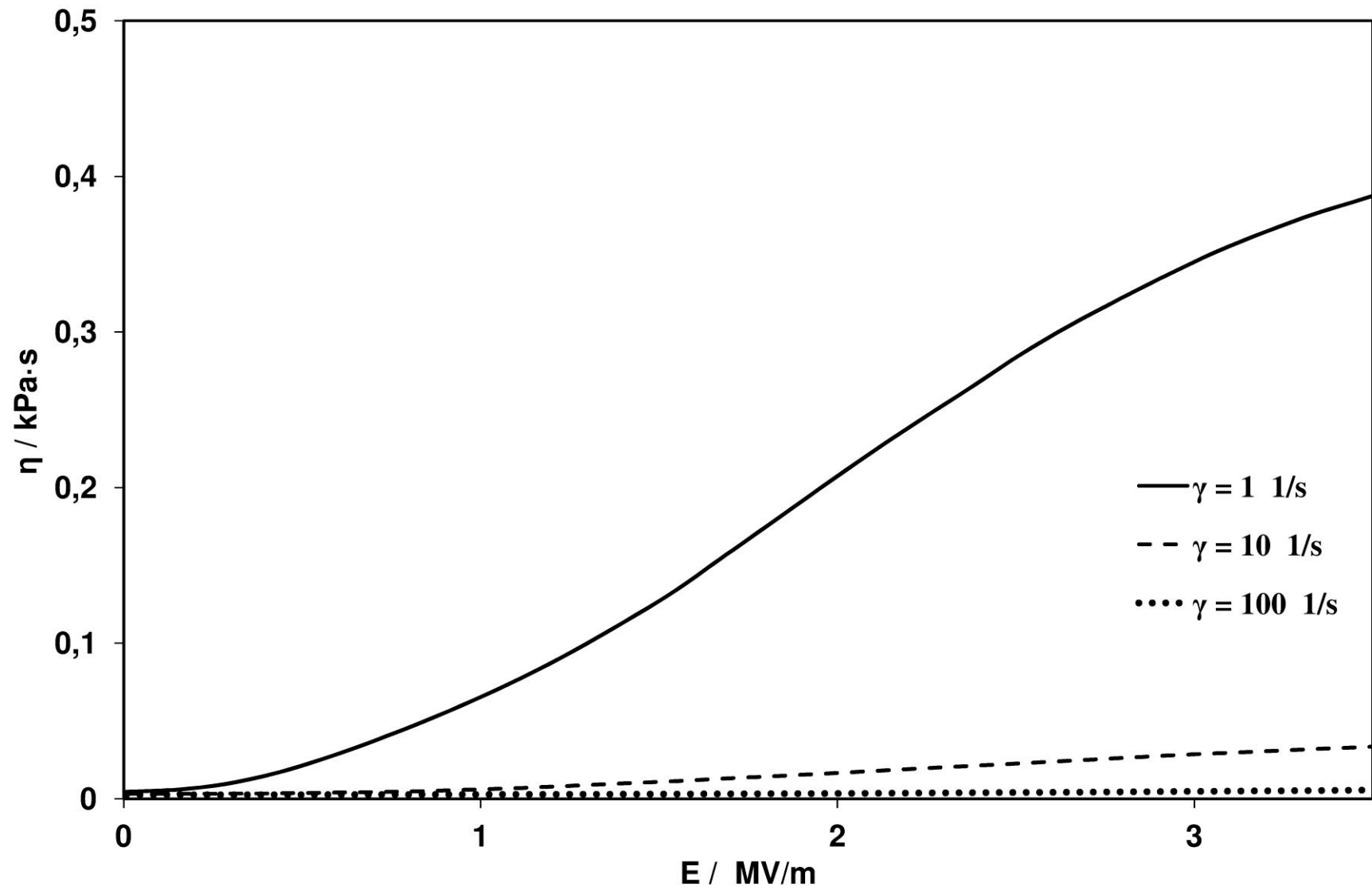
# Elektroreológiai folyadékok

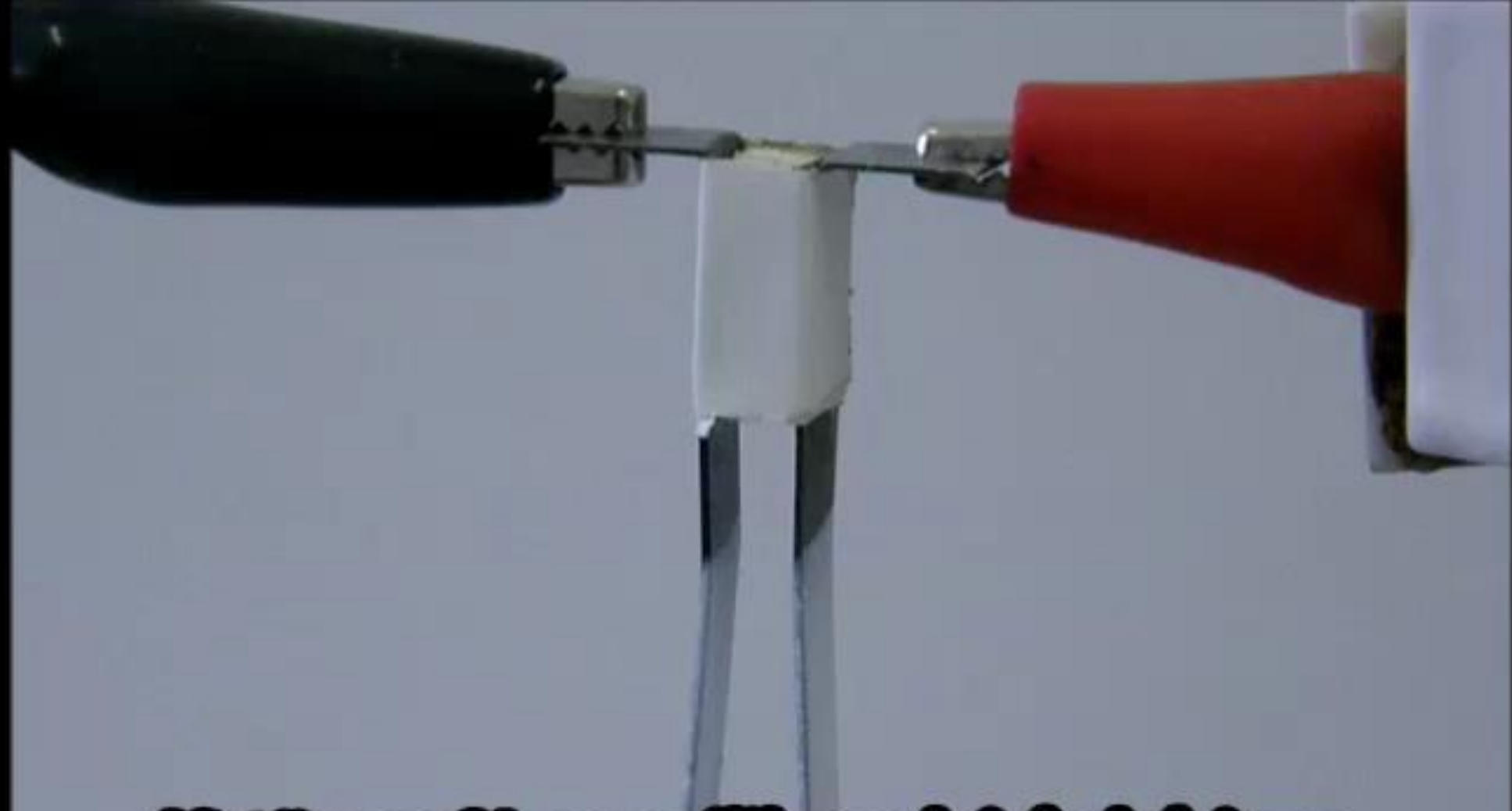


- ▶ Olajból és keményítőből készített ER folyadék feltöltött műanyagrúd mellett



Szilikonolajban diszpergált monodiszperz szilícium-dioxid golyók először elektromos tér jelenléte nélkül, majd 2500 V/mm-es tér jelentésében





**40 tömeg%-os szilikonolaj és bárium-titanát ER folyadék 5000 V-os feszültség mellett**

# Bingham modell ER fluidumra

- ▶ Az ER folyadékok esetében a  $\tau_0$  tag helyettesíthető egy változó nyírófeszültség-értékkel, amely a folyadékra ható elektromos tér függvénye.

$$\tau = \eta\dot{\gamma} + \tau_0(E)$$

- ▶ A nyírófeszültség-elektromos tér függvény felírható a következő alakban:

$$\tau = \eta\dot{\gamma} + \alpha E^\beta$$

# Mágneses folyadékok

- ▶ Hogyan készíthetünk mágneses folyadékokat?



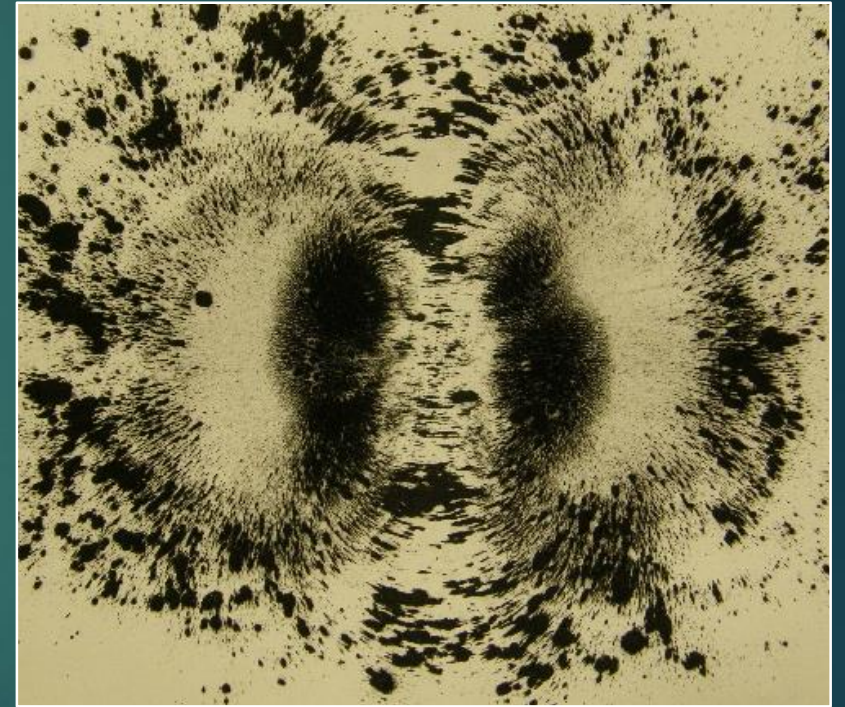
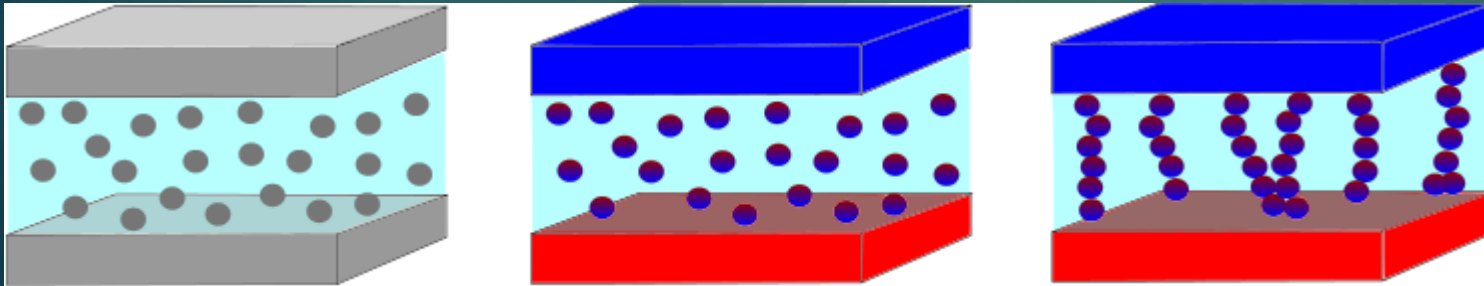
# Magnetoreológiai folyadékok

- ▶ Amennyiben egy  $\mu_f$  mágneses permeabilitású fluidumban  $\mu_p > \mu_f$  mágneses permeabilitású ferromágneses részecskéket diszpergálunk, úgy magnetoreológiai folyadékhoz juthatunk.
- ▶ A diszpergált részecskék ferromágnesesek, de méretüknél fogva több mágneses domént is tartalmaznak, így külső mágneses tér hiányában nincs eredő mágneses dipólusmomentumuk.



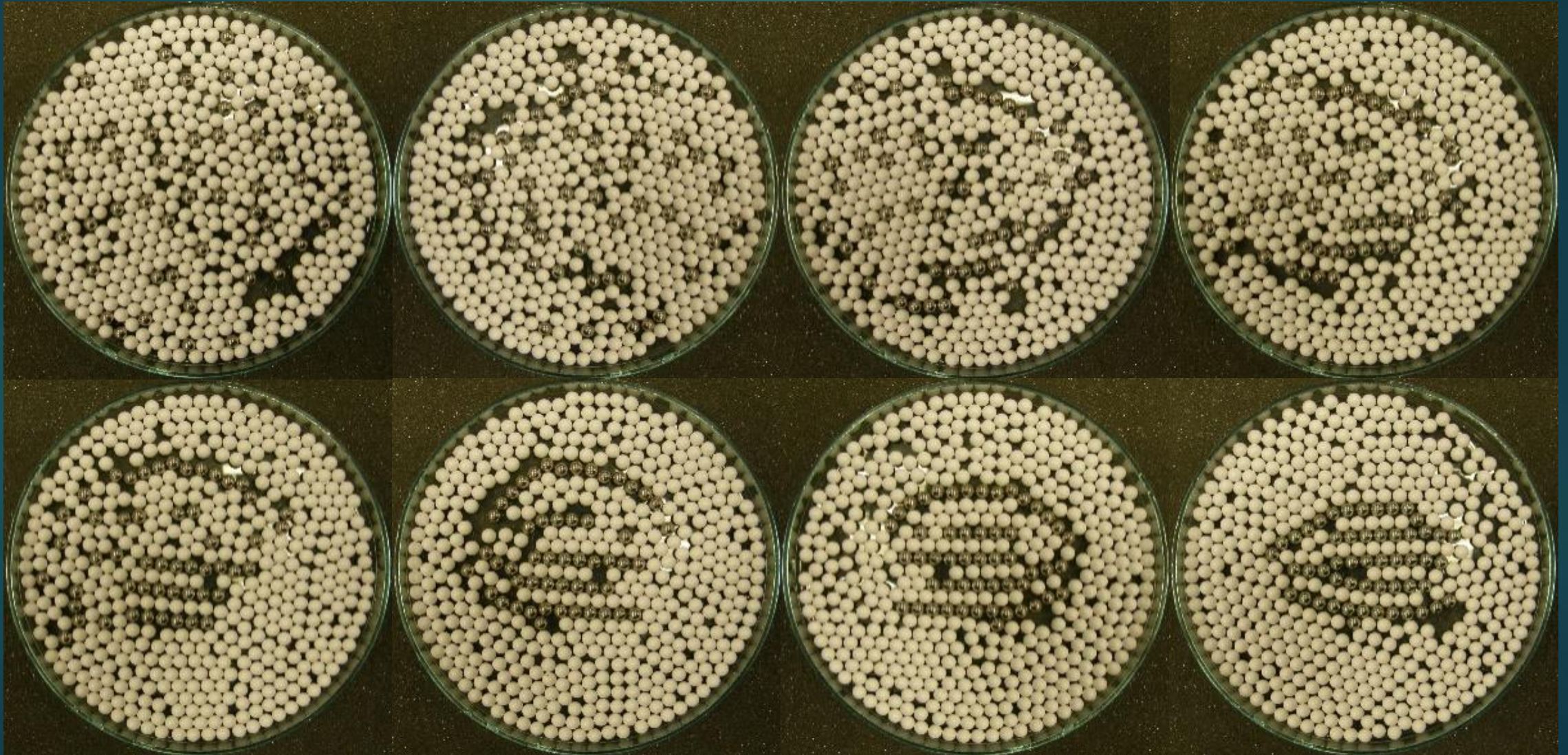
# Magnetoreológiai folyadékok

- ▶ Magnetoreológiai folyadékokat külső mágneses térbe helyezve a részecskének mágneses dipólusmomentuma indukálódik.
- ▶ Külső mágneses tér hatására az előzőekhez hasonló módon értelmezhető dipólus párok, láncok és oszlopokba tömörült láncok alakulnak ki a magnetoreológiai fluidumokban is.



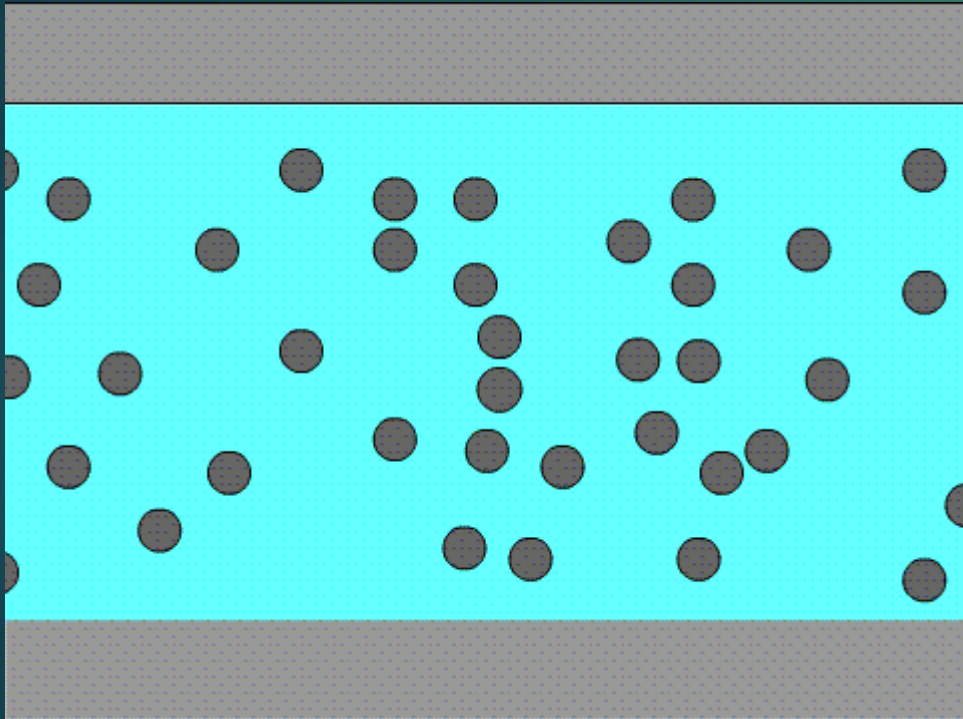


# Magnetoreológiai folyadékok

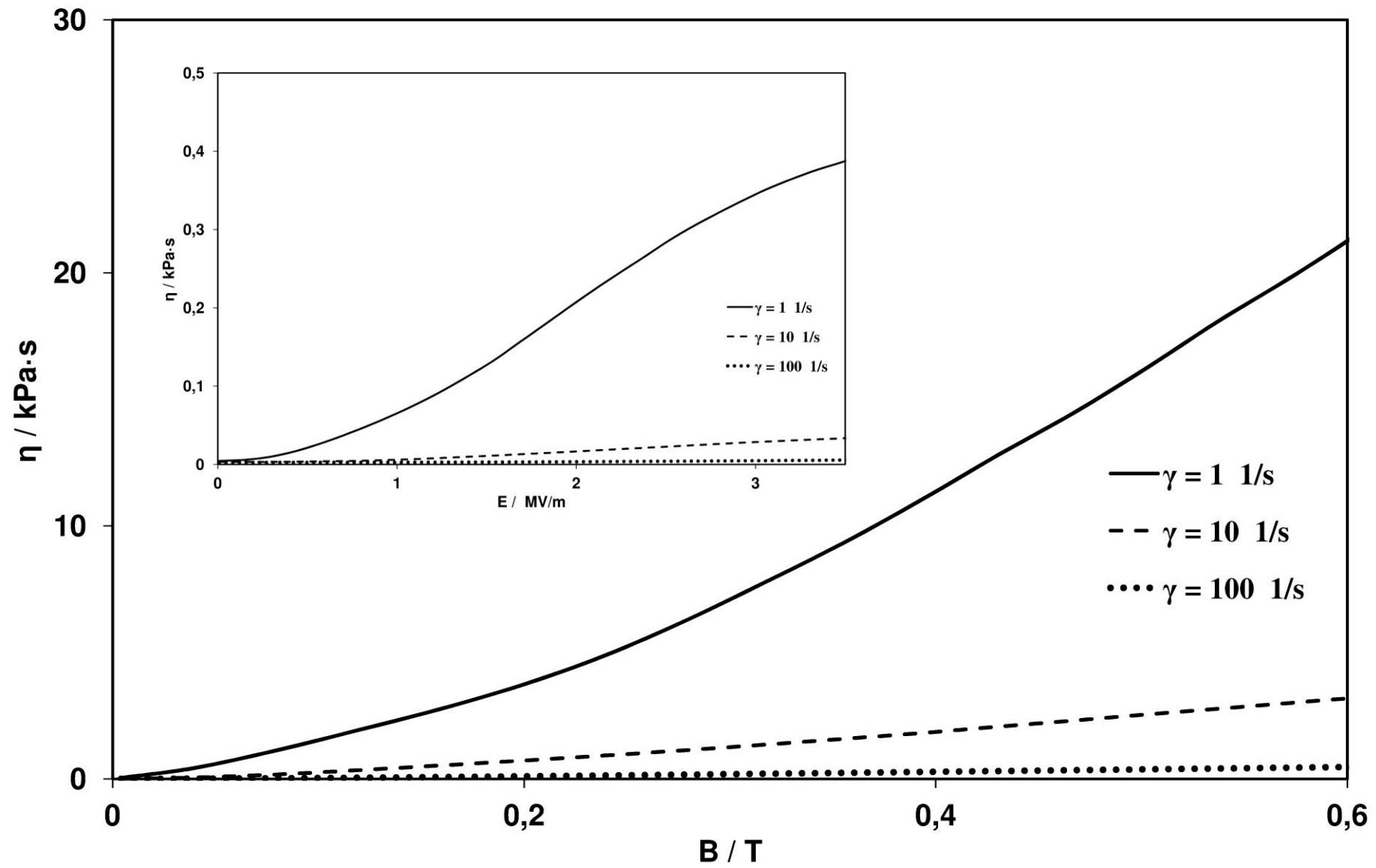




# Magnetoreológiai folyadékok

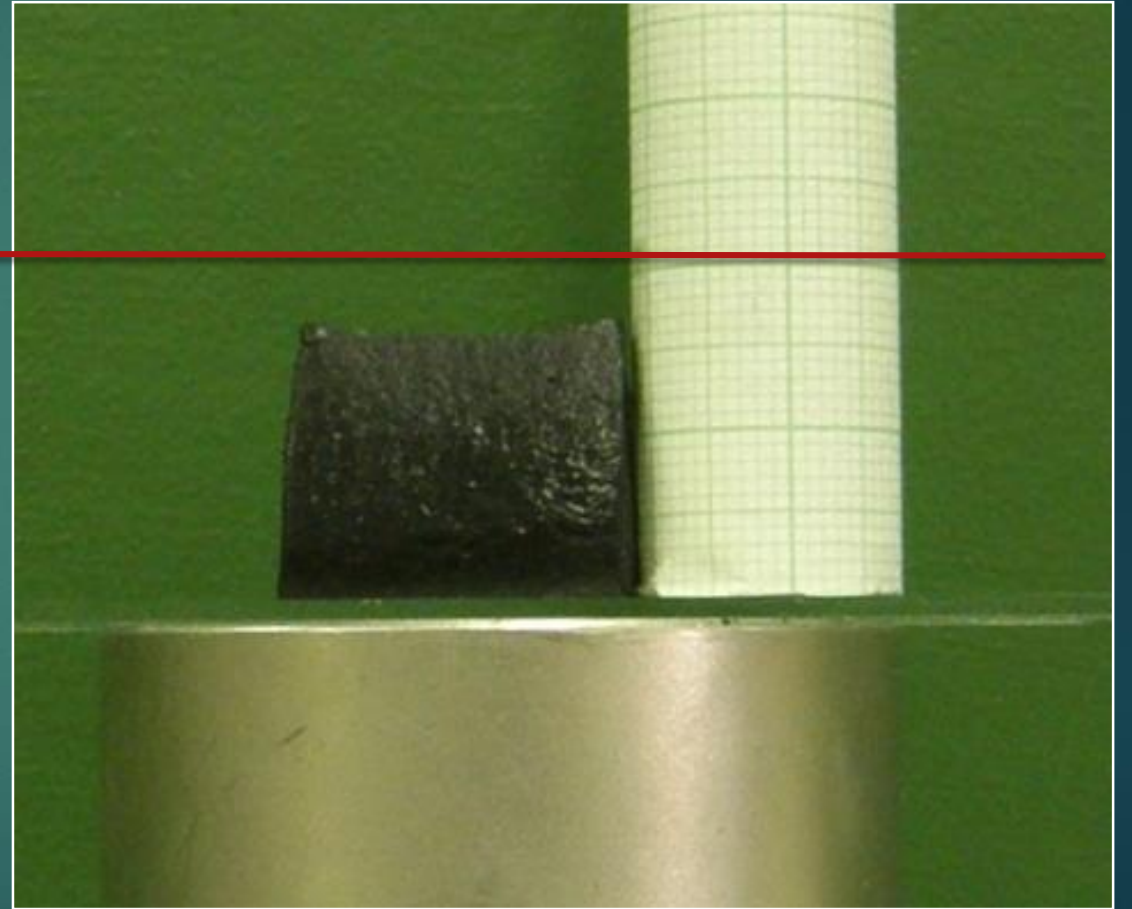
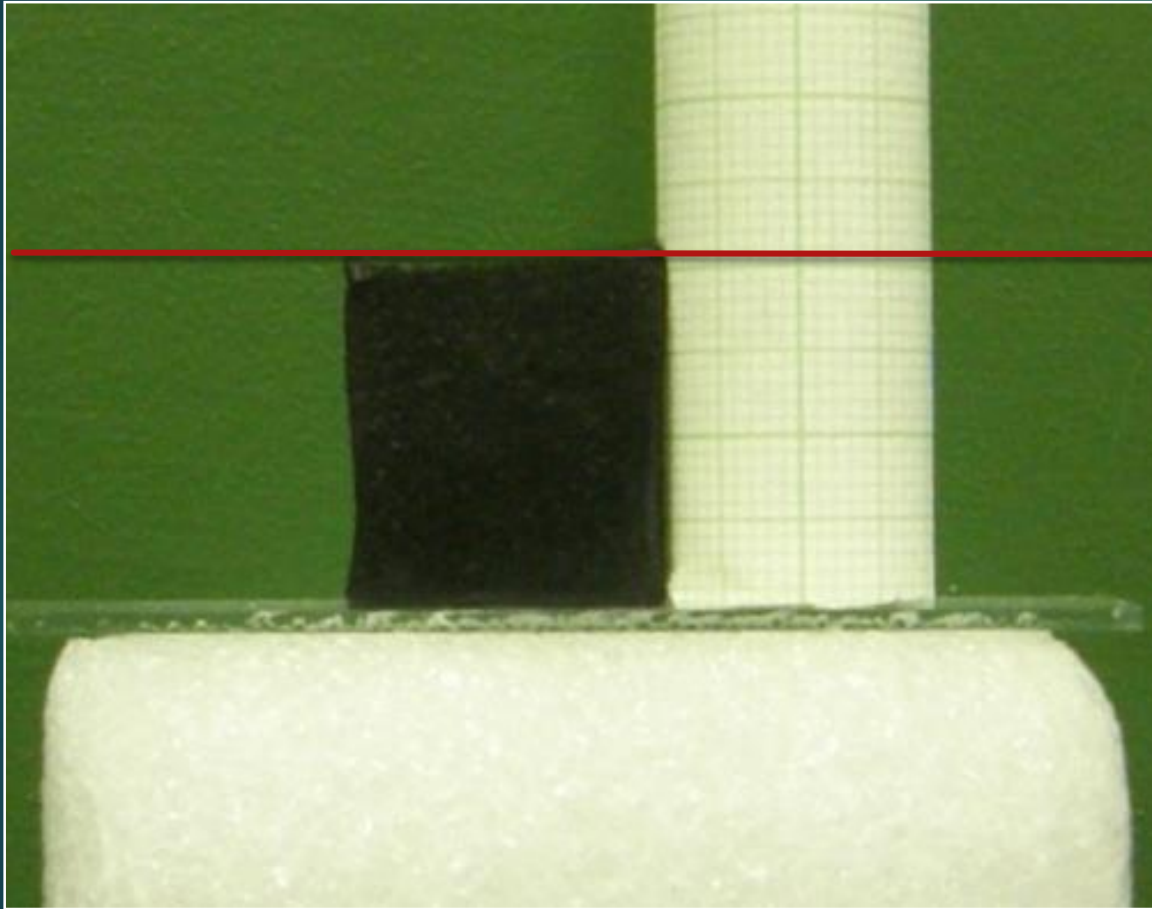




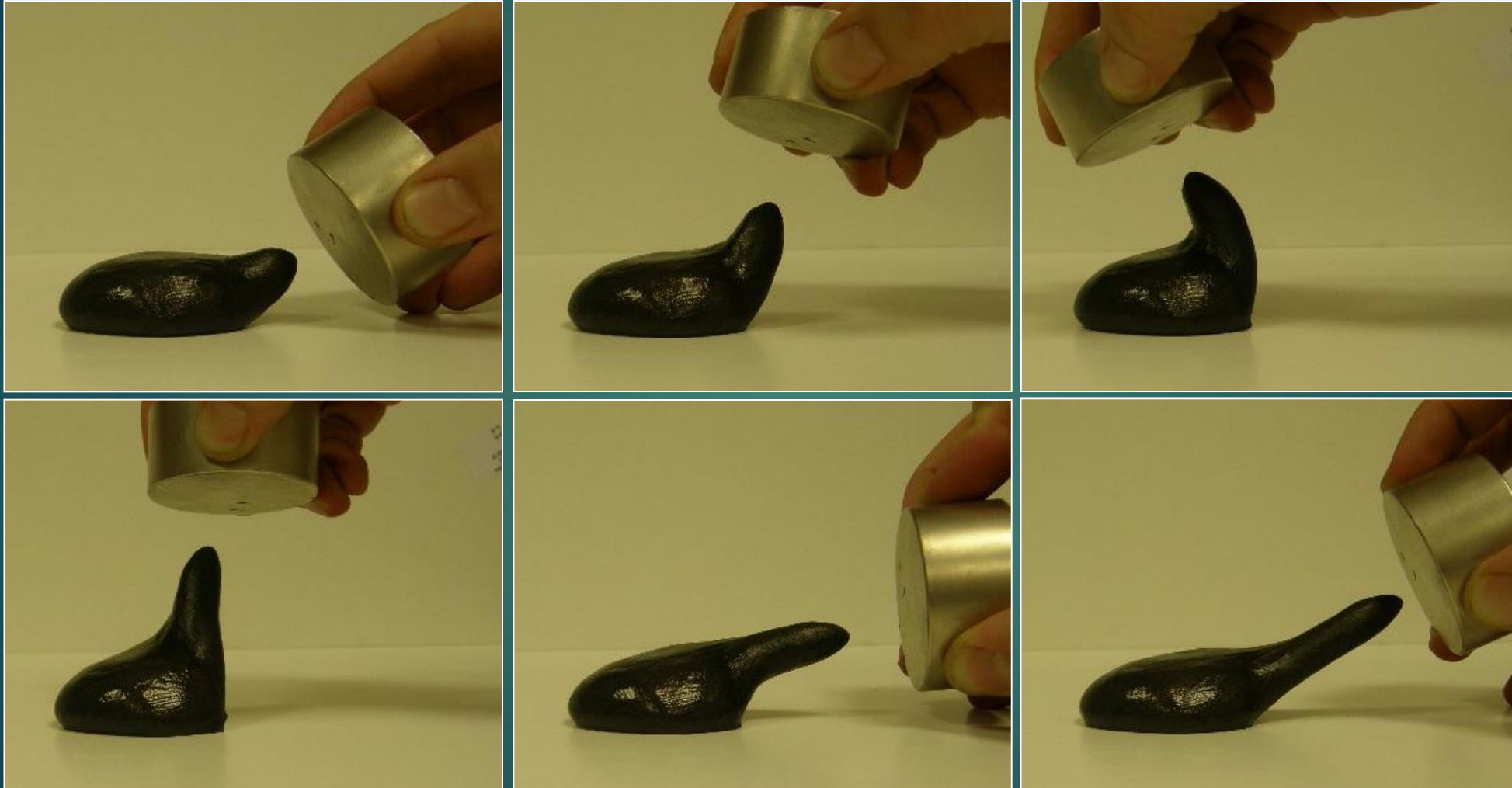




# Mágneses gélek, elasztomerek



# Mágneses gélek, elasztomerek



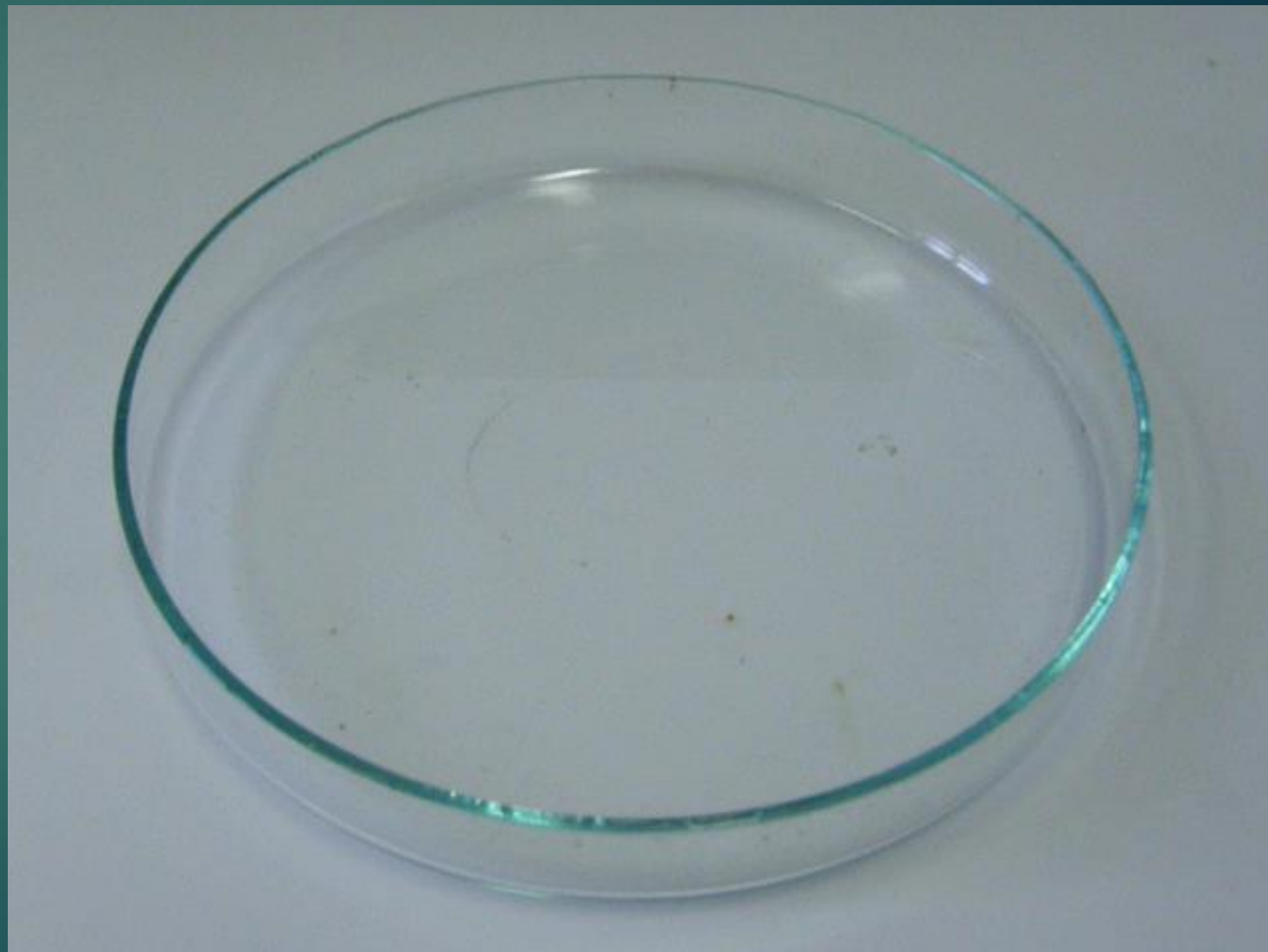
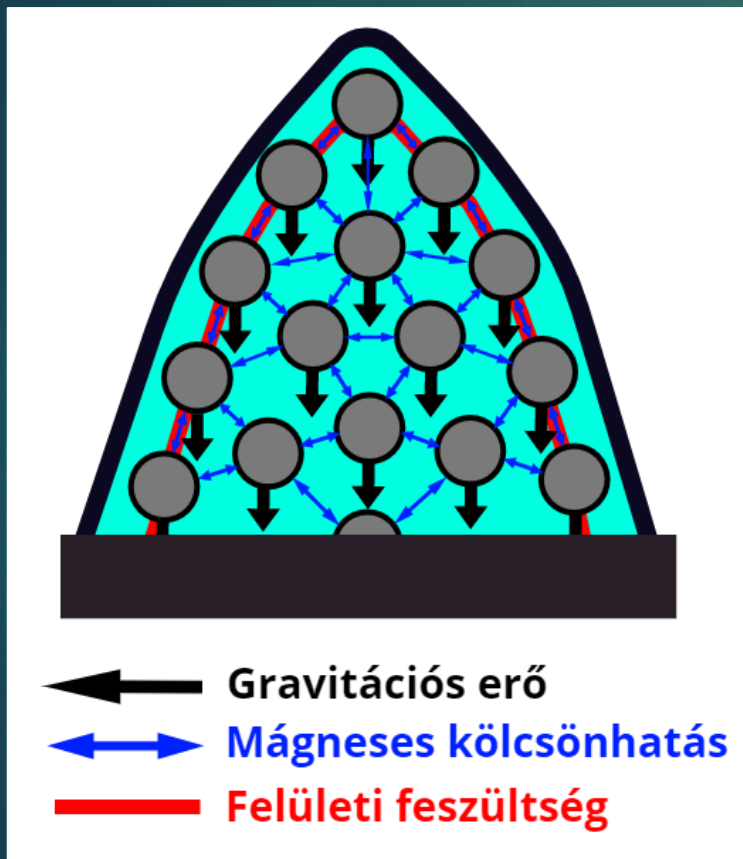
# A ferrofluidum története

- ▶ Steven Papell, a NASA kutatómérnöke 1963-ban folyékony rakéta üzemanyagok mikrogravitációs körülmények közötti kontrollálásának problémájának megoldását kapta feladatul.
- ▶ Papell a ferrofluidumok első stabil változatát, amely kerozin alapú volt, 1964-ben szintetizálta (S.S. Papell, 1964), azonban az ötletét sosem valósították meg, mivel a NASA a szilárd üzemanyagok alkalmazása mellett döntött.

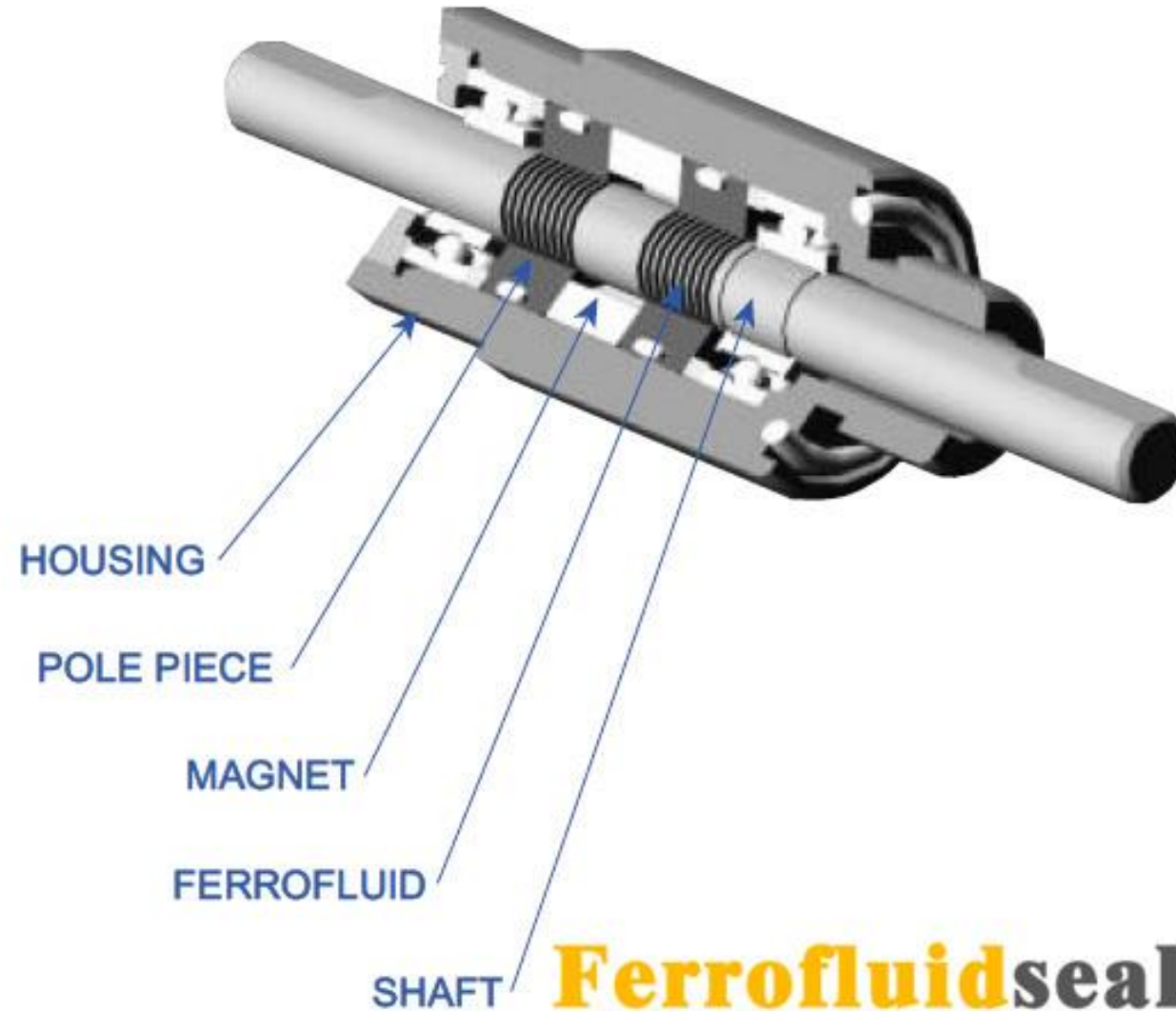




# Ferrofluidum



# Magnetic Fluid Sealing Technology



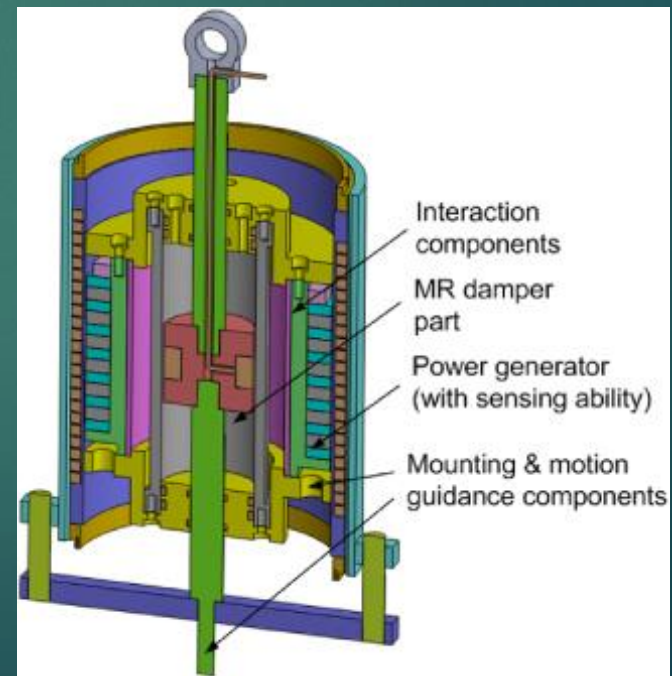
**Ferrofluidseal**

FERROFLUID VACUUM SEALING DEVICE

[www.ferrofluidseal.com](http://www.ferrofluidseal.com)

# Felhasználási lehetőségek

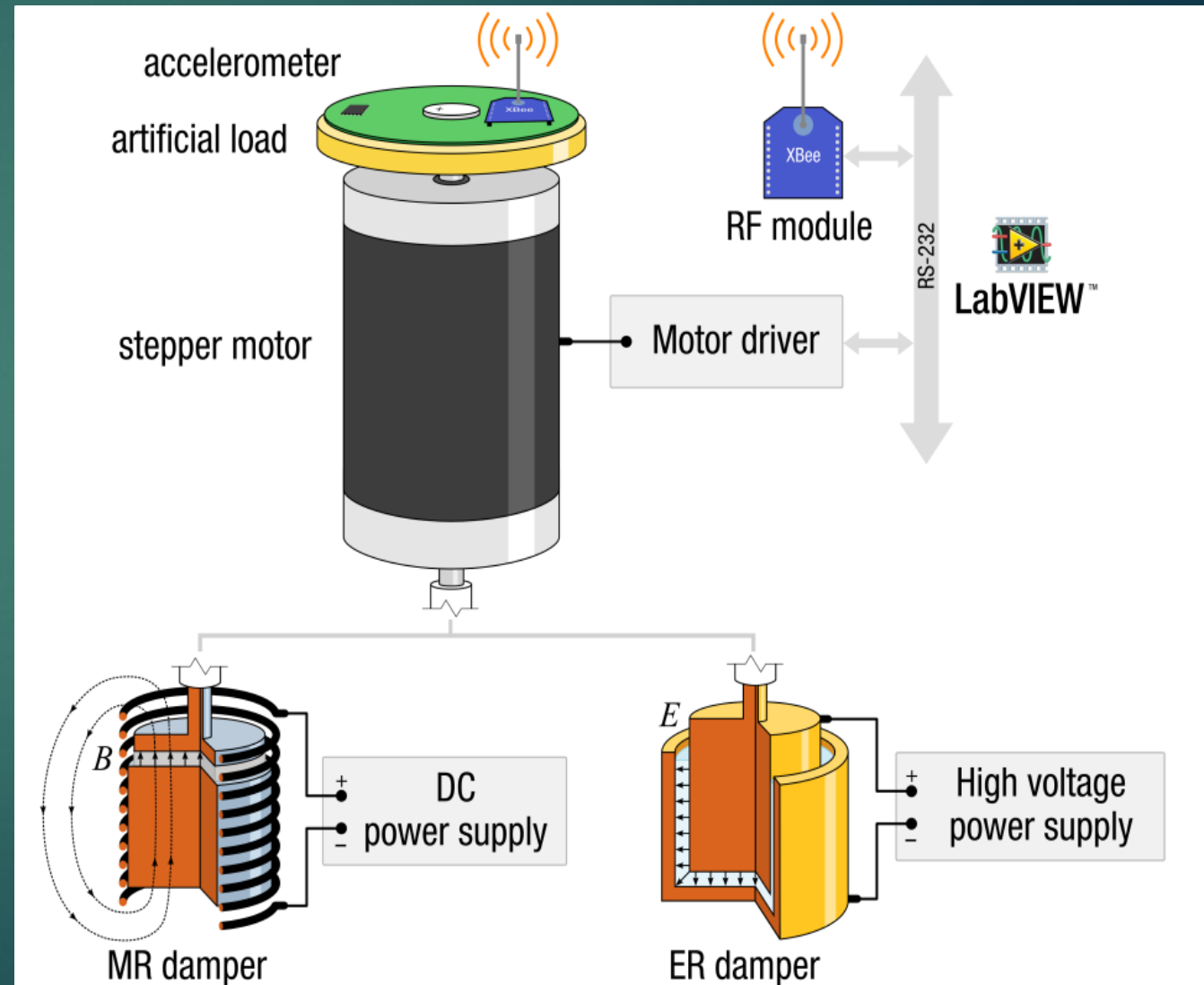
- ▶ Lengéscsillapítás
  - ▶ Autókban (pl. HMMWV, Cadillac Seville STS, Audi TT és R8, Camaro ZL1, Ferrari 458 Italia...)
    - ▶ 20-30%-al nagyobb sebesség érhető el nehéz terepen
  - ▶ Ülésekben
  - ▶ Mosógépekben



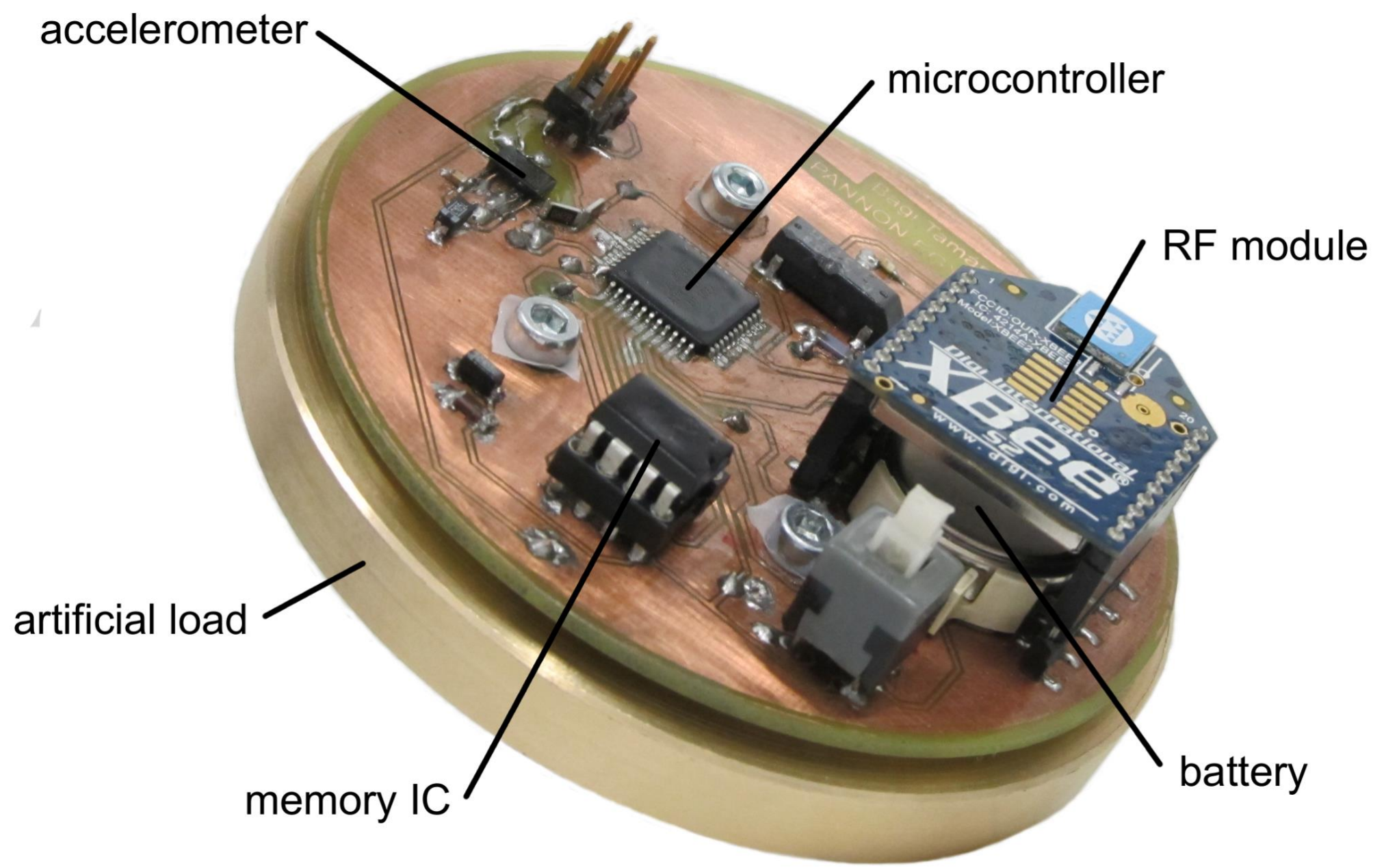
# Felhasználási lehetőségek

## ▶ Rezgés csillapítás

- ▶ Földrengésvédelem
- ▶ Hidak, épületek
- ▶ Léptetőmotor belengésének redukálása







accelerometer

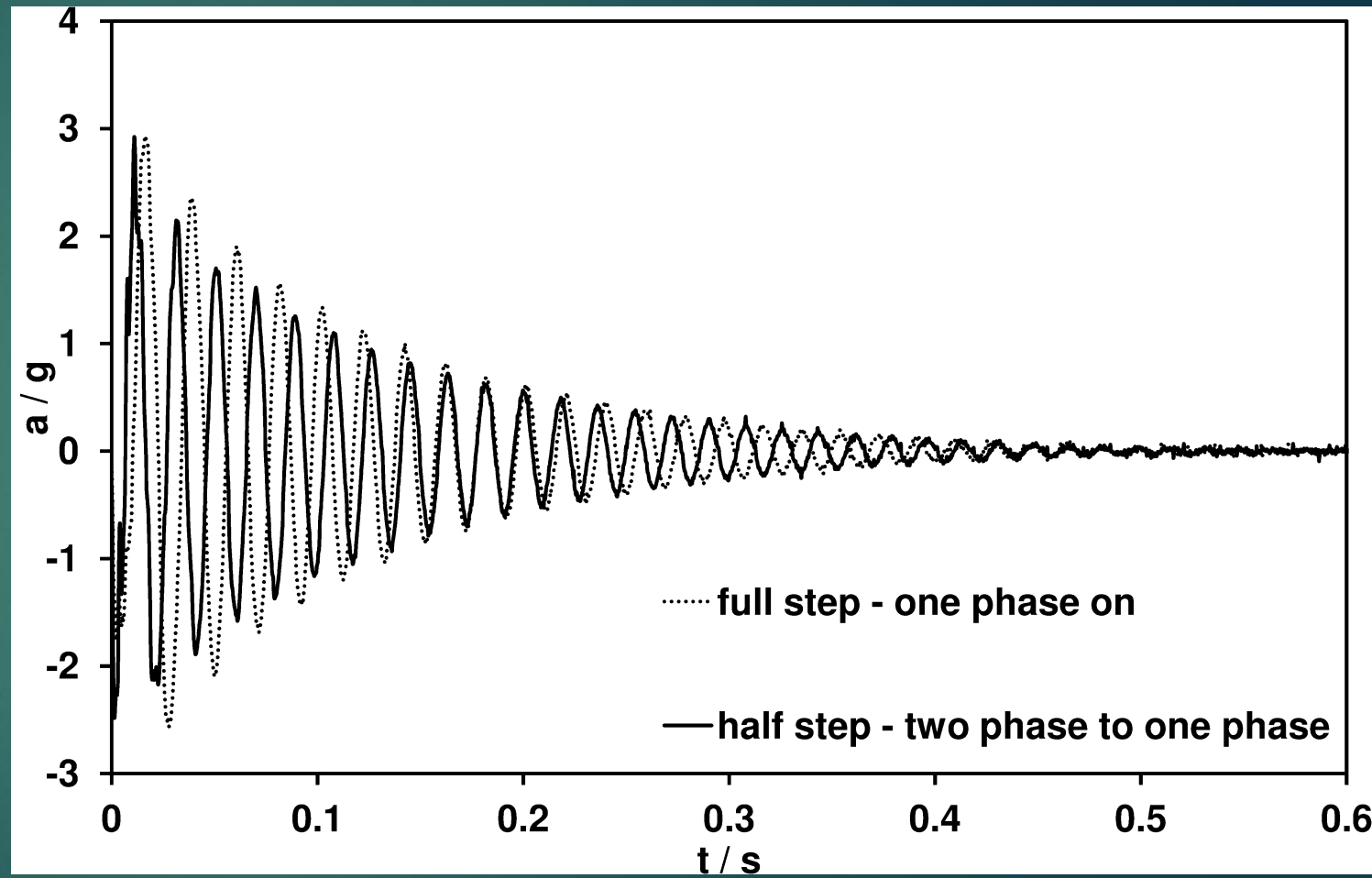
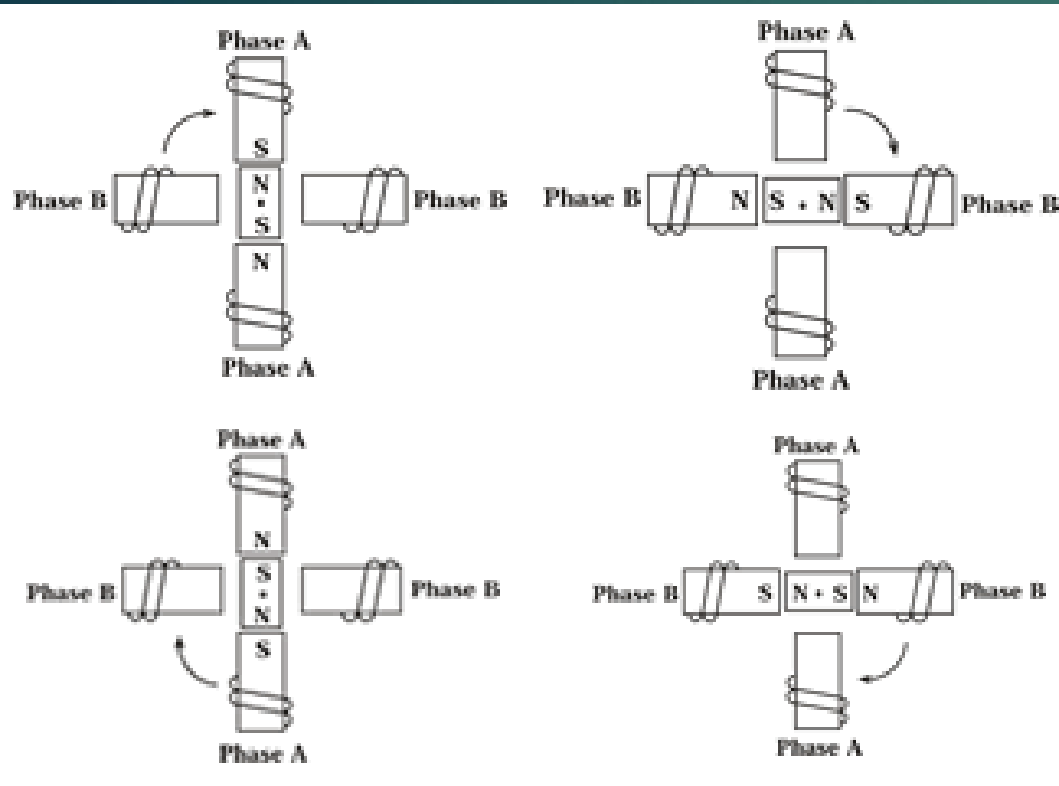
microcontroller

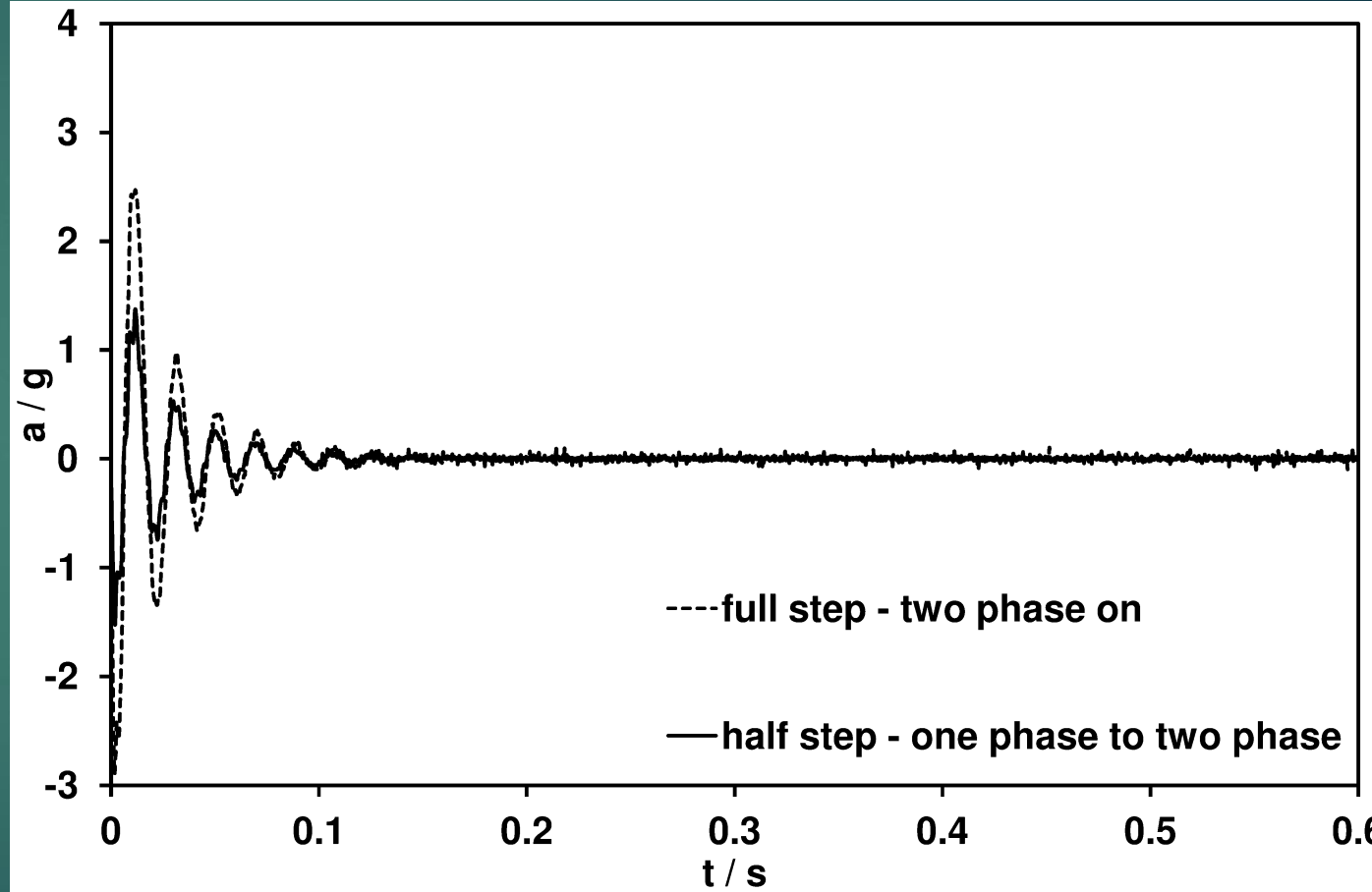
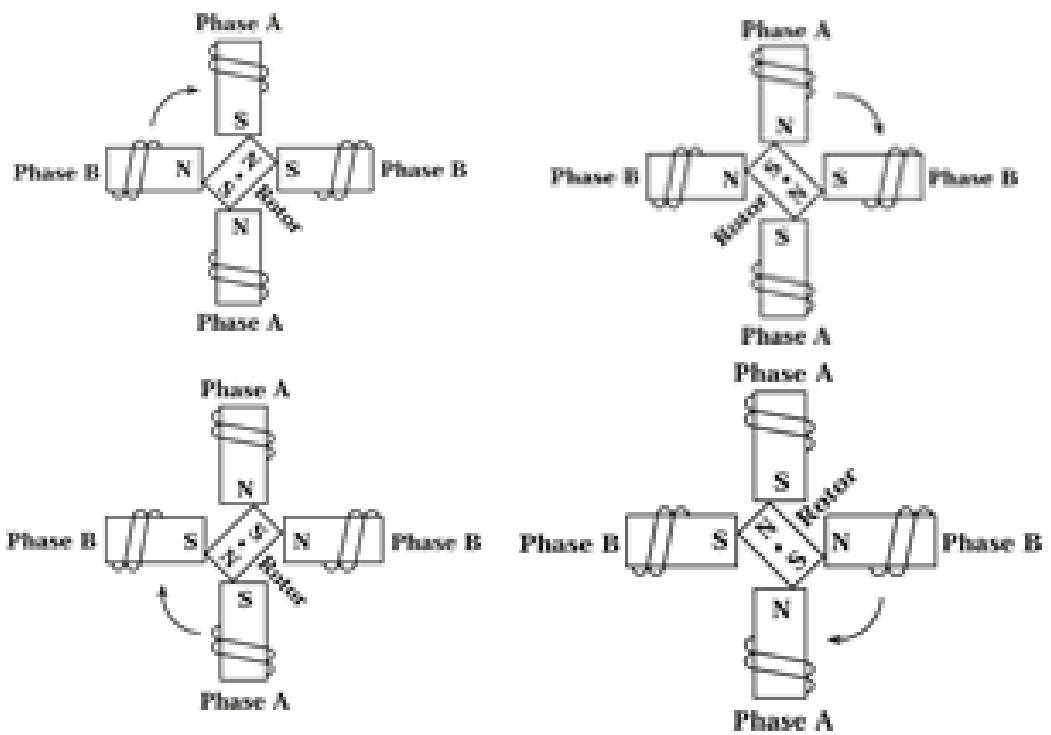
RF module

artificial load

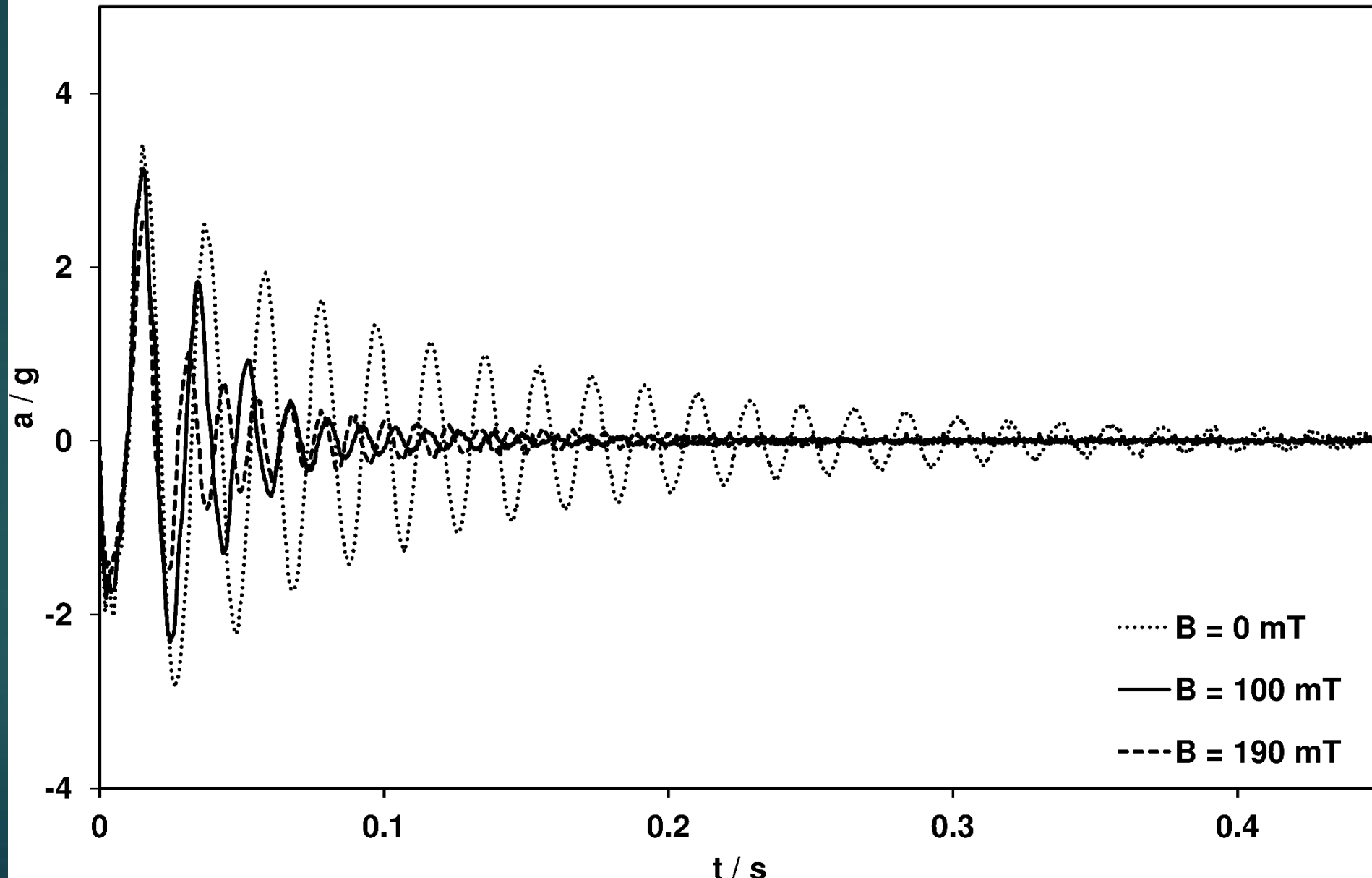
memory IC

battery



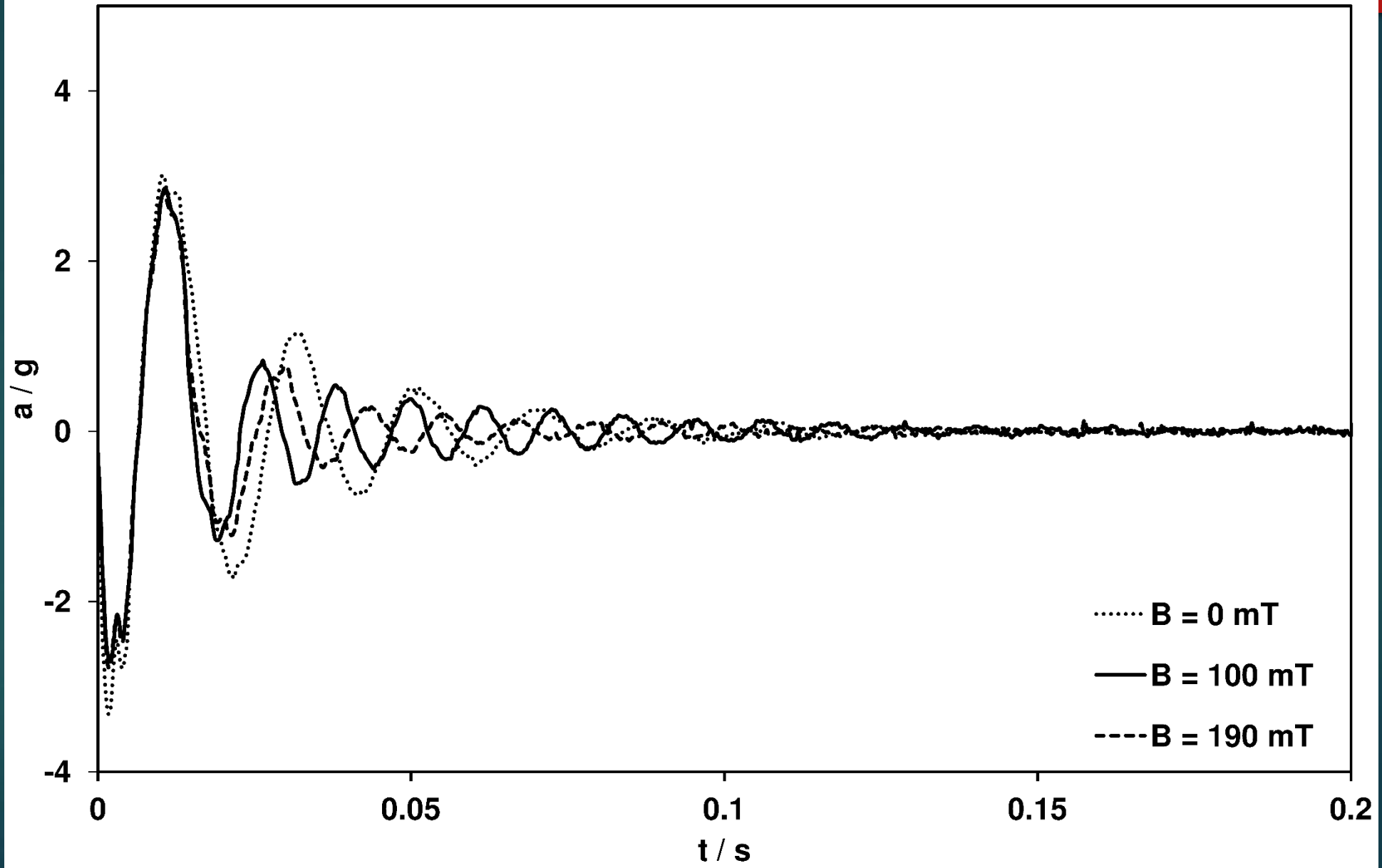


# Oscillations of stepper motor rotor damped by MR fluid (one phase on)

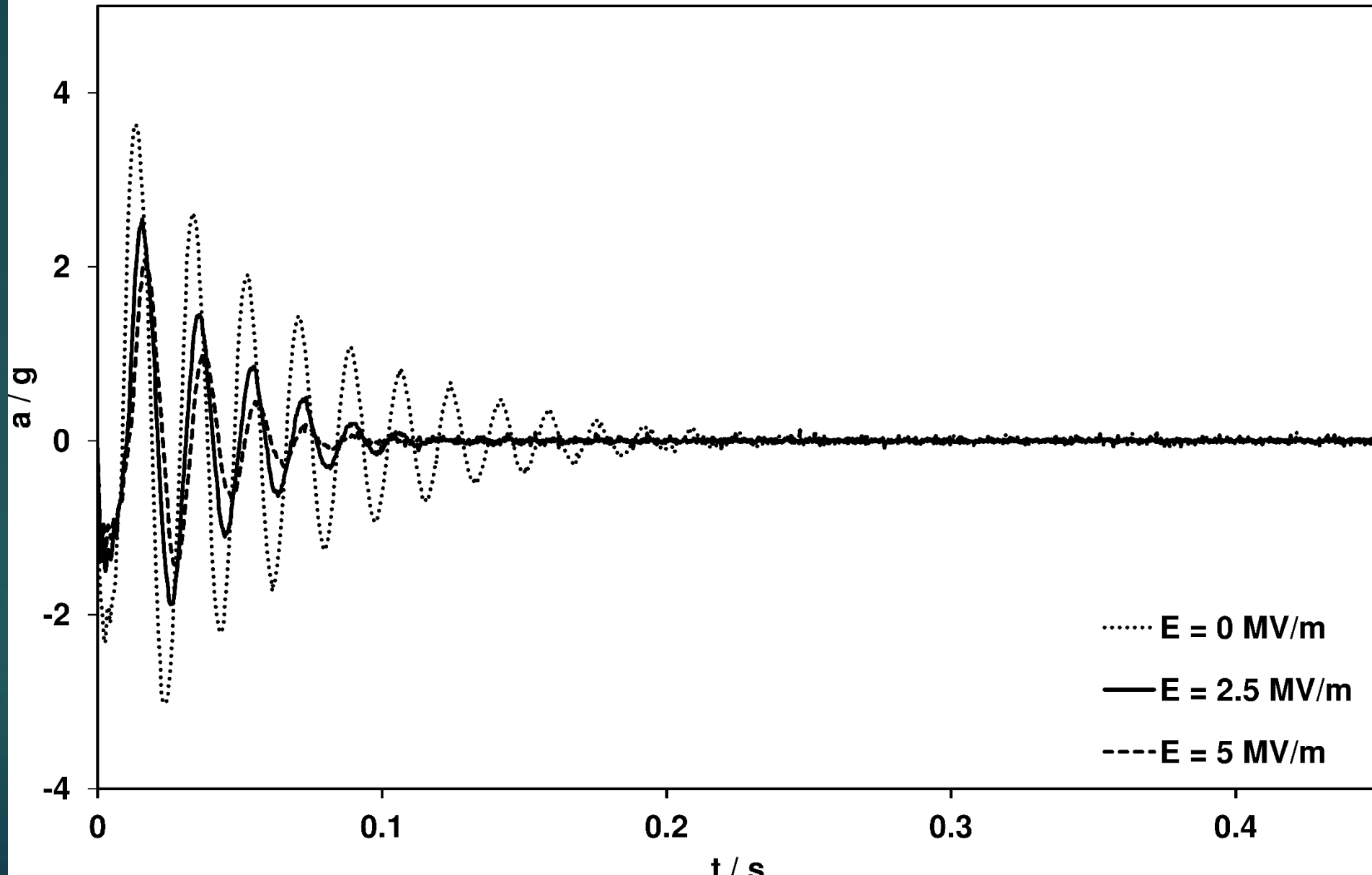




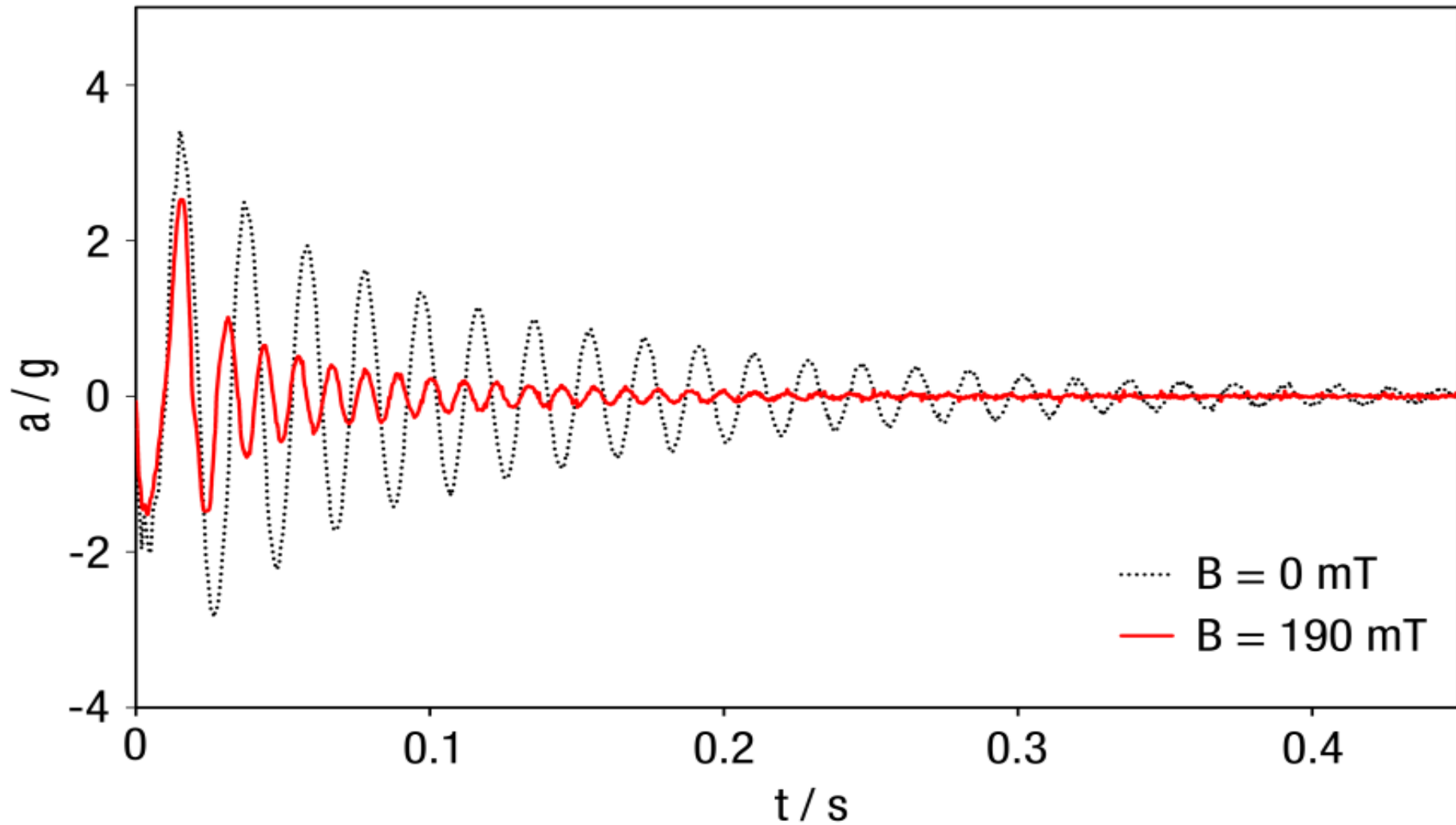
# Oscillations of stepper motor rotor damped by MR fluid (two phase on)



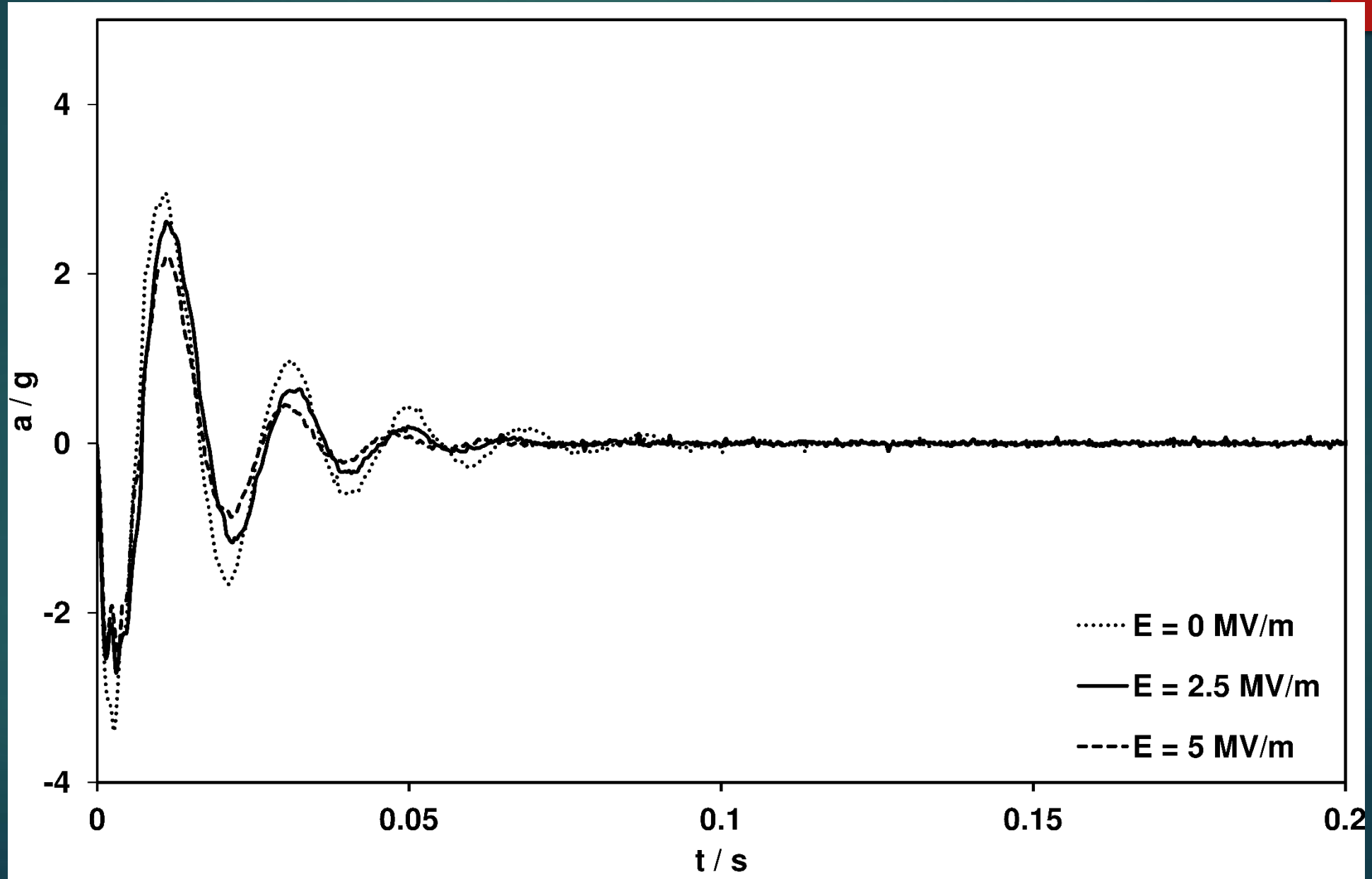
# Oscillations of stepper motor rotor damped by ER fluid (one phase on)



# Oscillations of stepper motor rotor damped by ER fluid (one phase on)

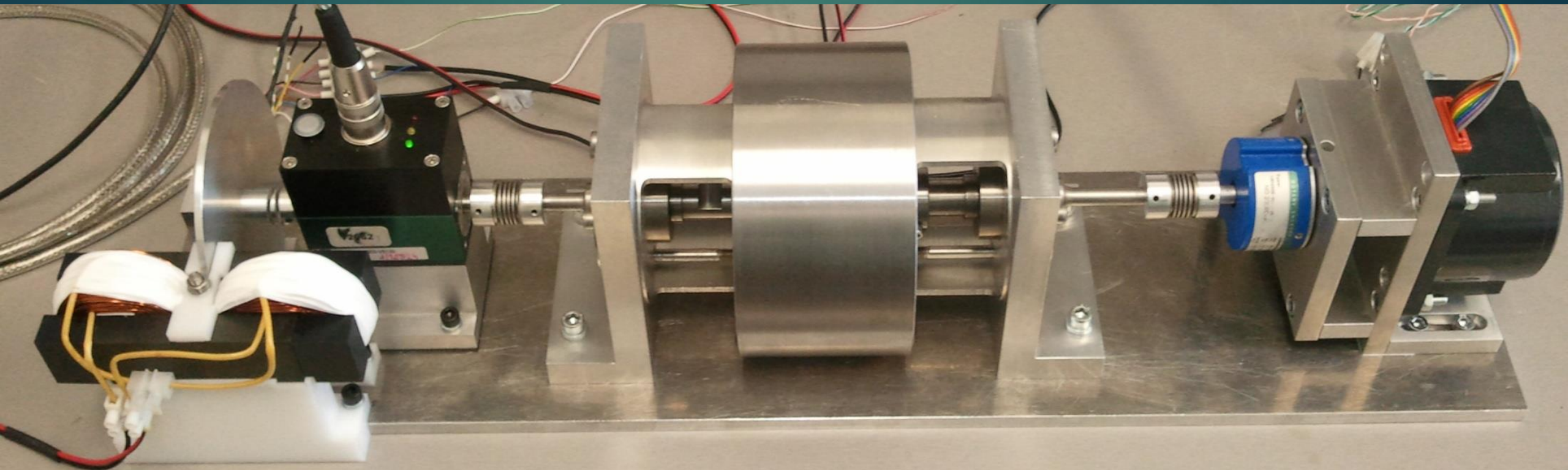


# Oscillations of stepper motor rotor damped by ER fluid (two phase on)



# Felhasználási lehetőségek

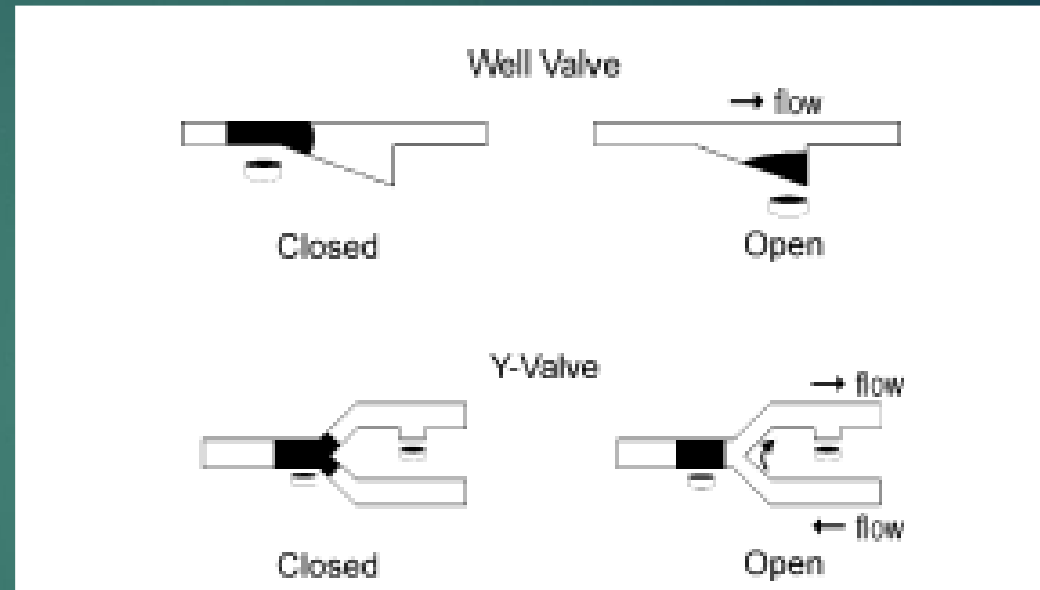
- ▶ Kopásmentes erőátvitel
  - ▶ Kuplungok
  - ▶ Fékek



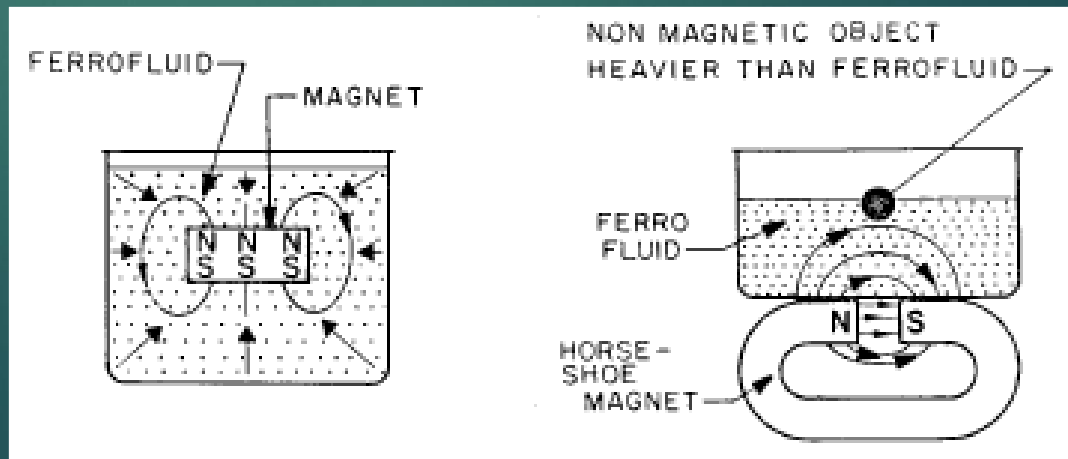


# Felhasználási lehetőségek

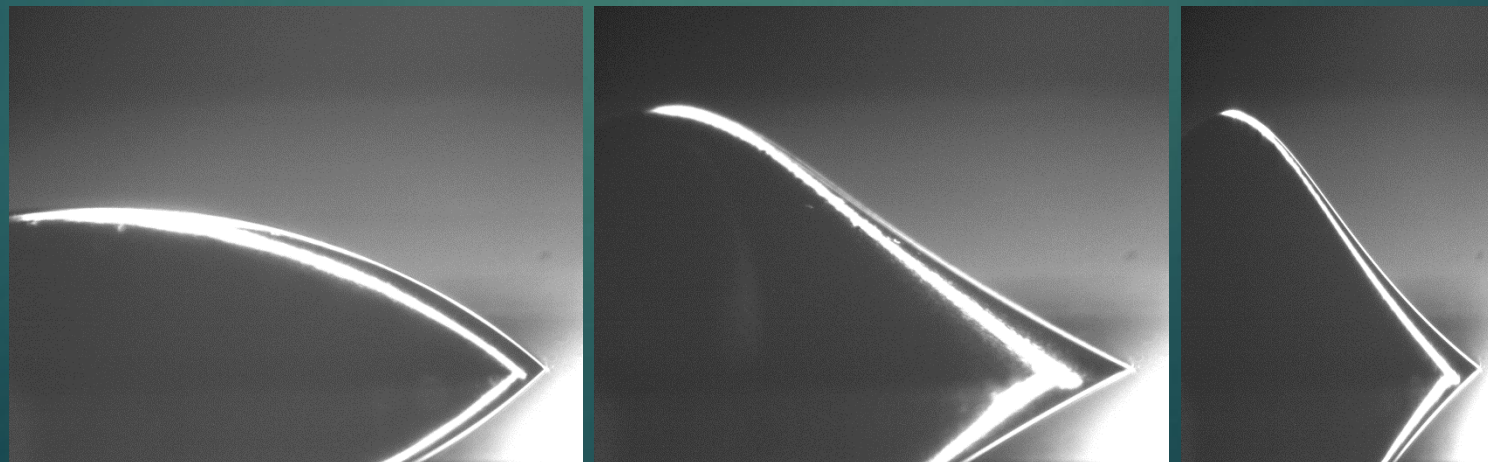
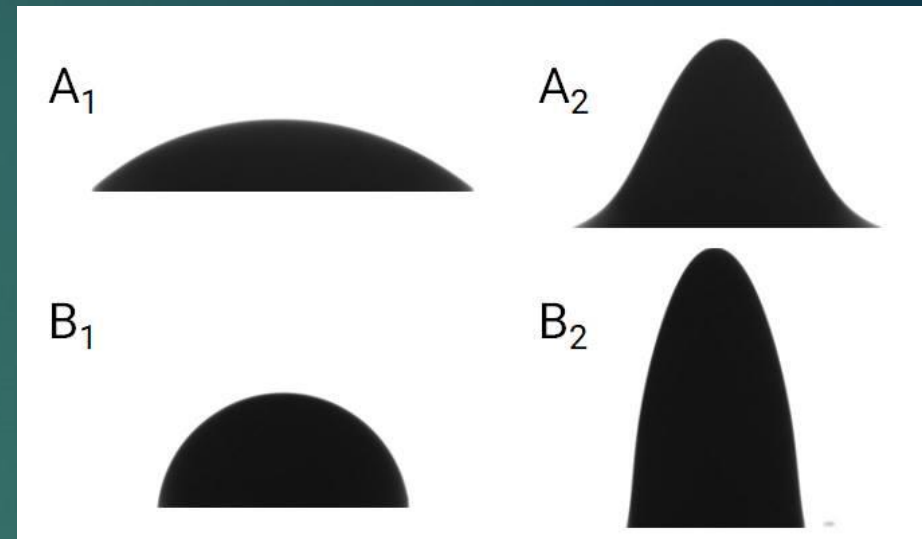
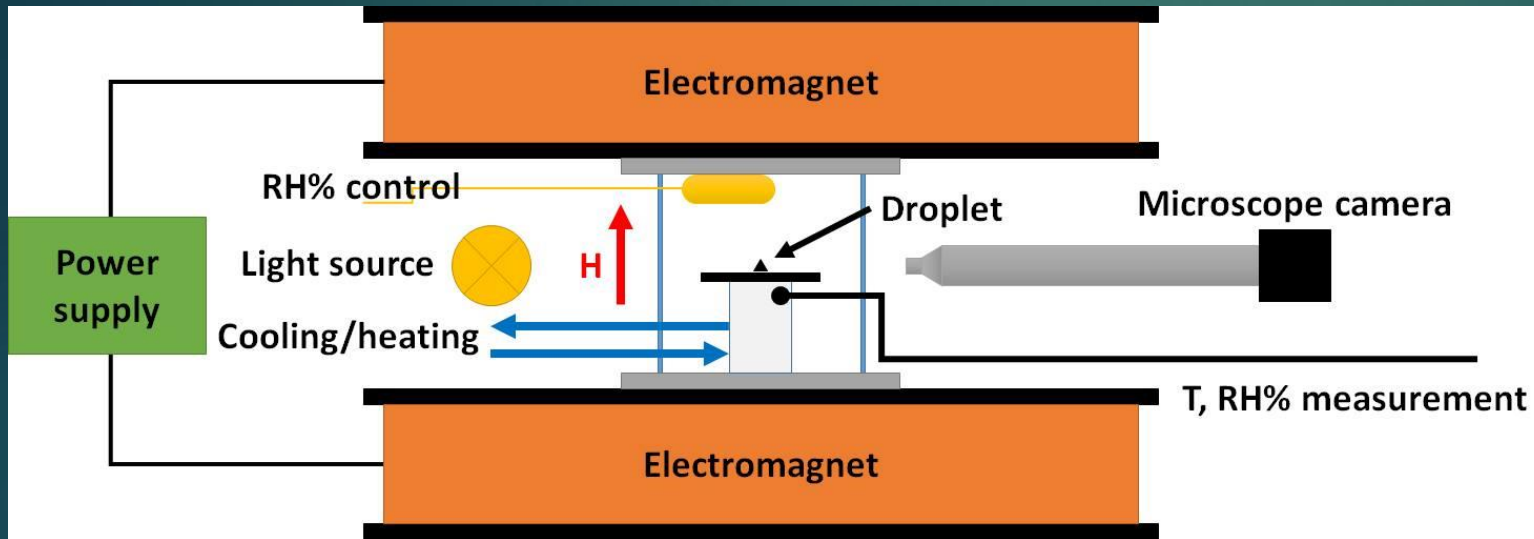
- Mikrofuidika



- Mágneses lebegés

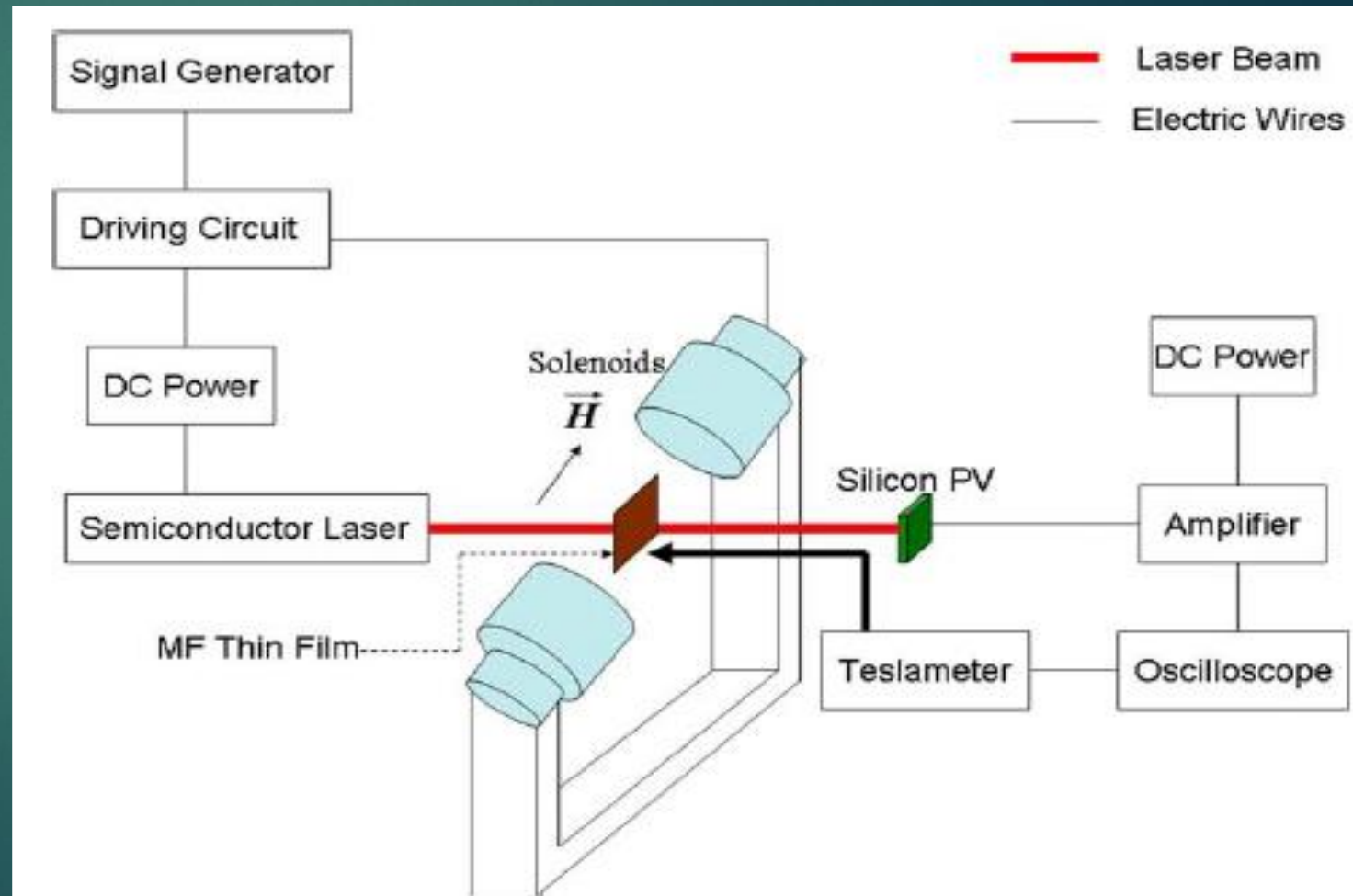


# Mikrofluidika



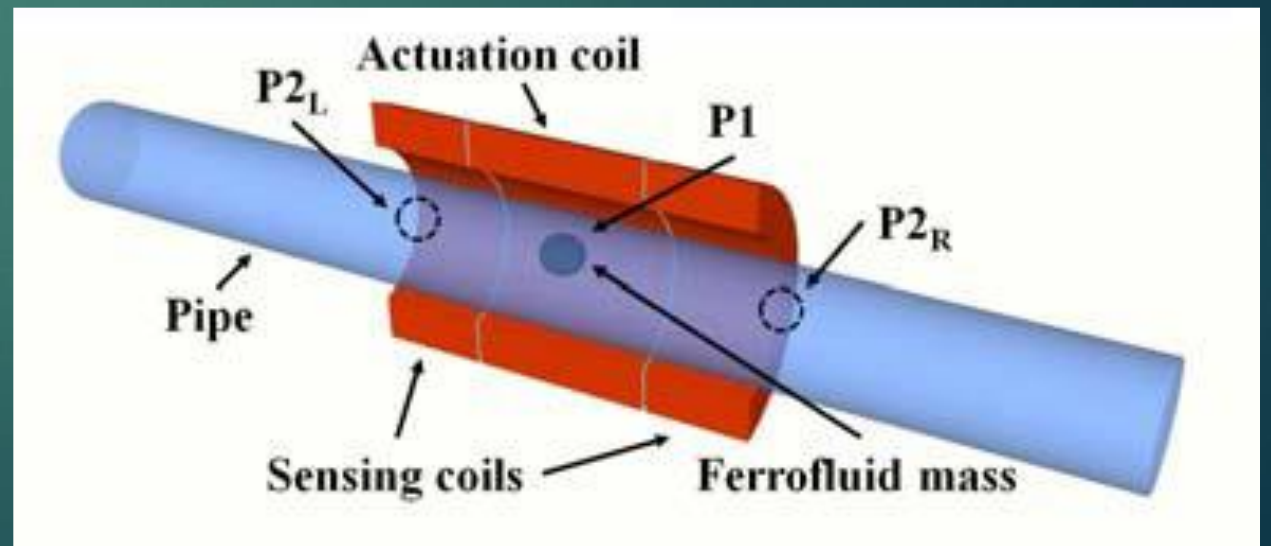
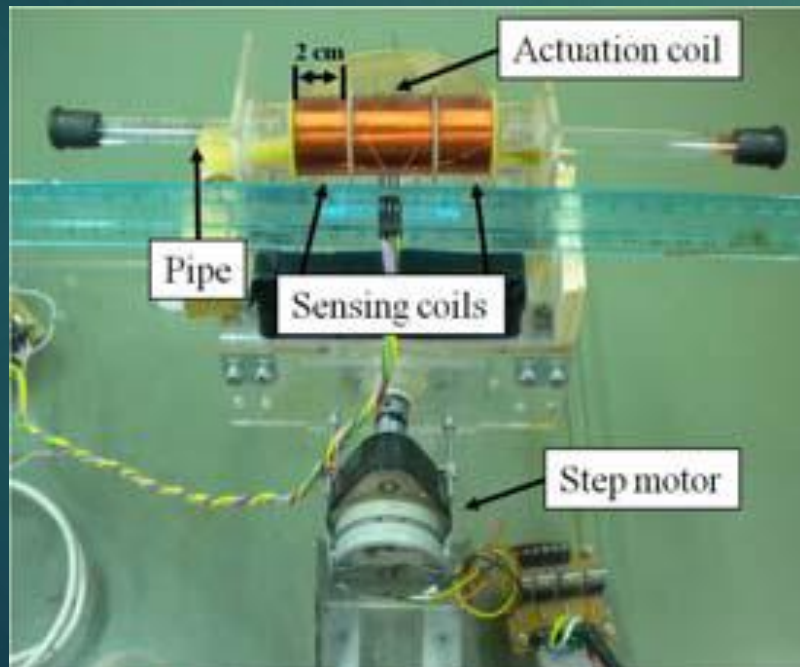
# Ferrofluidum alkalmazása érzékelőkben

- Szenzorok
  - Dőlésszög
  - Gyorsulás
  - Hőmérséklet



# Ferrofluidum alkalmazása dőlésszög érzékelőkben

- ▶ B. Andó és munkatársai egy vízzel töltött csőben elhelyezett egyetlen csöppnyi ferrofluid mozgásidejét mérték a cső fix pontjai között a cső különböző szögű döntöttségei esetén. Az általuk készített szenzor szögfelontását 0,25 fokra becsülték.



# Ferrofluidum alkalmazása dőlésszög érzékelőkben

- ▶ Később R. Olaru egy másik munkatársával egy ferrofluidumban lebegő permanens mágnes helyzetét mérte külső tekercsek segítségével, amely helyzet a dőlésszög függvényében változott.

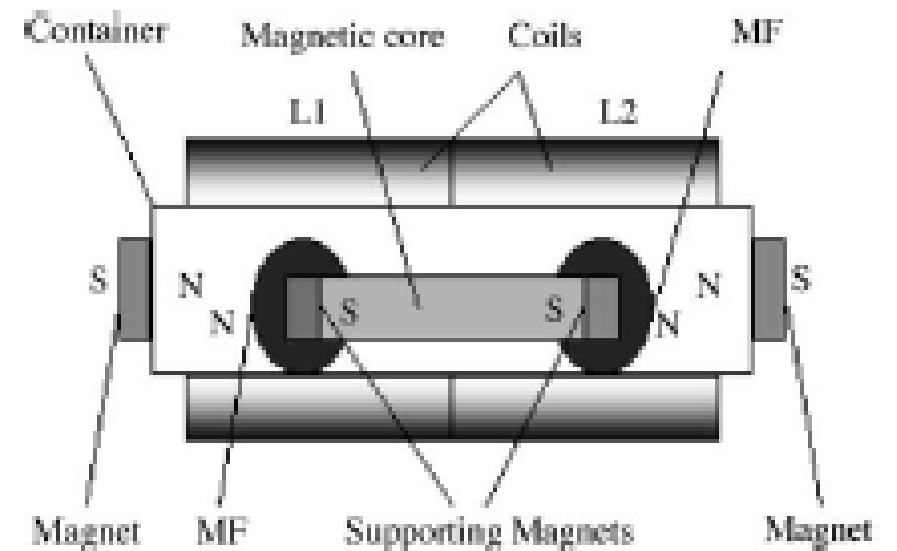
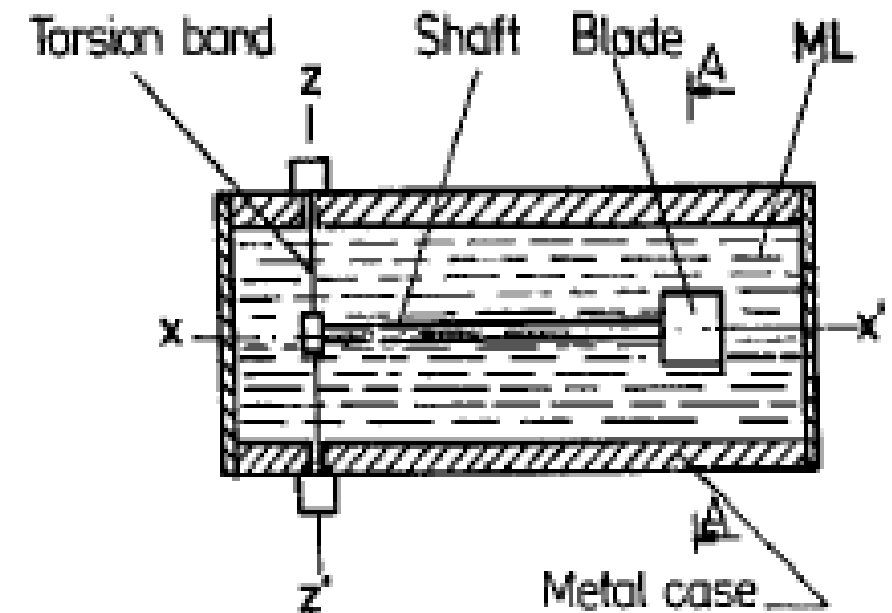


Fig. 1. Schematic diagram of the tilt inductive sensor.



# Ferrofluidum alkalmazása dőlésszög érzékelőkben

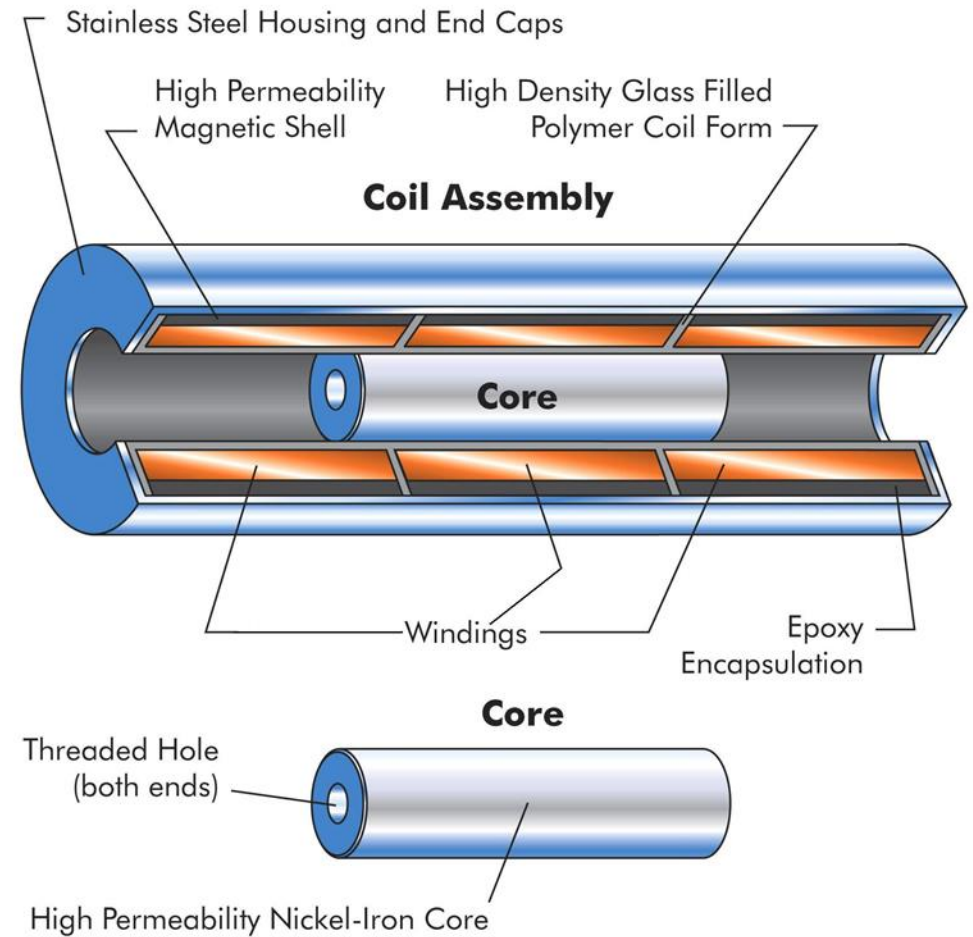
- ▶ R. Olaru és munkatársa ferrofluidumban helyeztek el egy ingát, amit egy külső, tekercsek által létrehozott mágneses tér segítségével tartottak egyensúlyban, majd a tekercsáram méréséből következtettek a szenzor dőlésszögére. Az általuk készített szenzor szögfelontását századfok nagyságrendűre becsülték.



# LVDT

## Linear Variable Differential Transformer

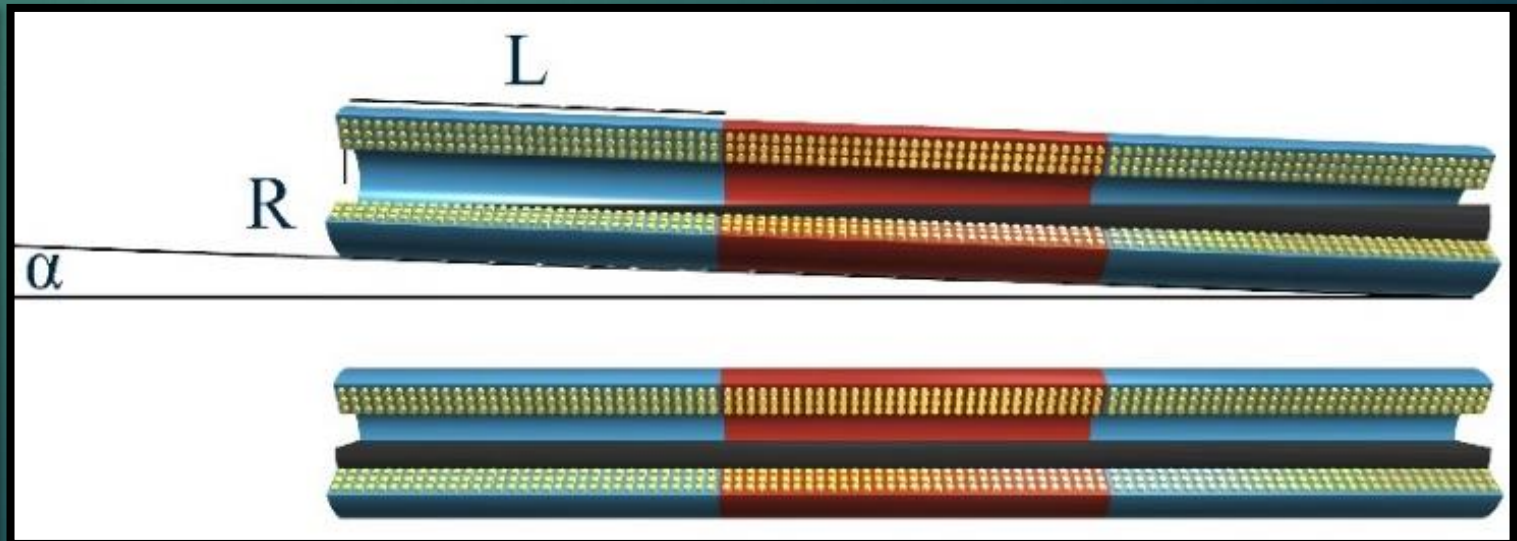
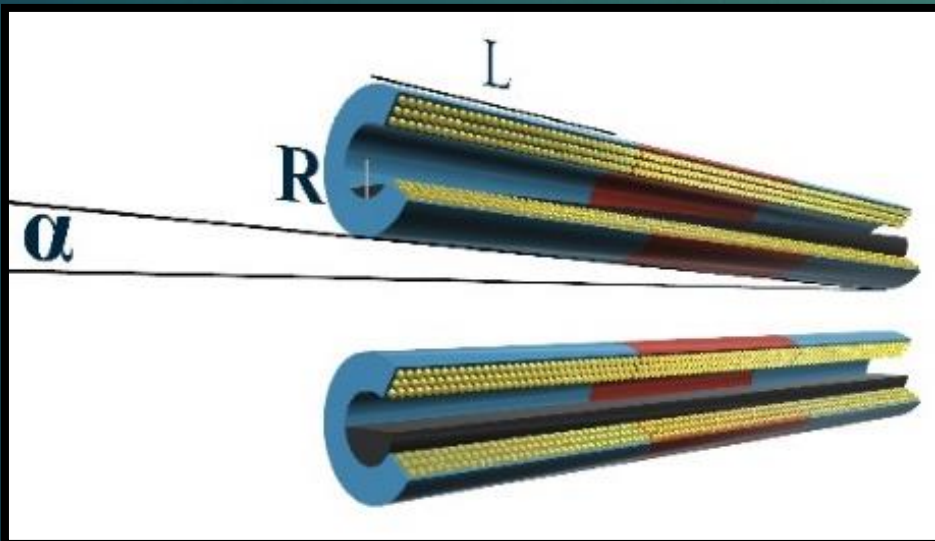
- ▶ A primer tekercset 1 és 20  $kHz$  közötti frekvenciájú, 1–24  $V$ -os effektív feszültségű szinusz jellel gerjesztik.
- ▶ A vasmag pozíciójától függően különböző feszültségek indukálódnak a szekunder tekercsekben, amely feszültségek különbsége adja a szenzor kimeneti jelét.



# FCDT

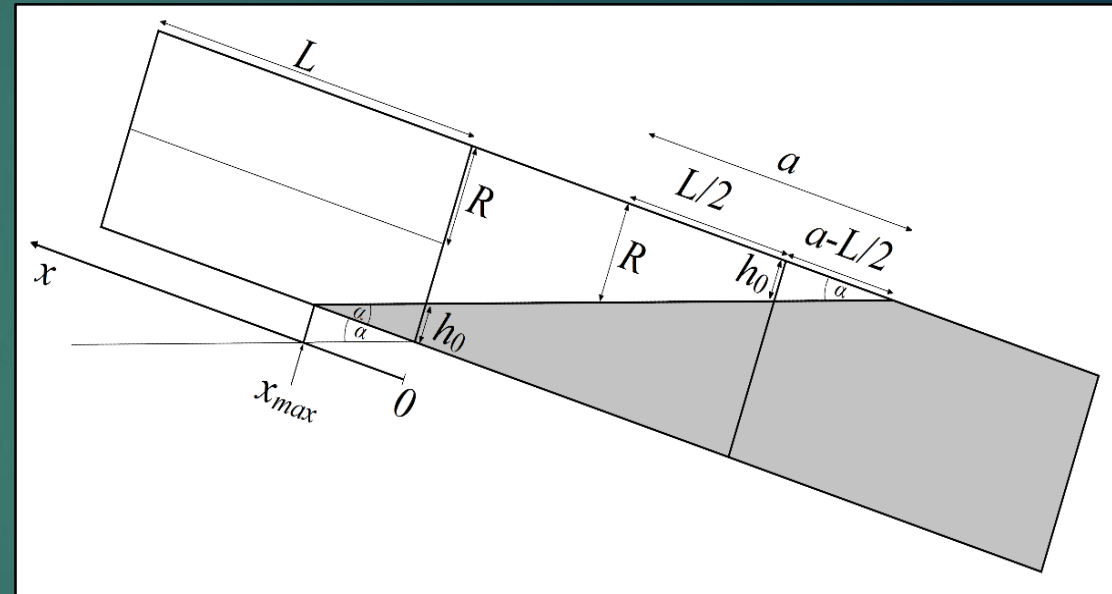
## Ferrofluid Core Differential Transformer

- ▶ Az általunk kifejlesztett megoldásban a vasmagot egy ferrofluiddal félig megtöltött cellával helyettesítettük.
- ▶ Az így kapott eszköz egy ferrofluidum maggal ellátott differenciál transzformátor.



# FCDT

- ▶ A három tekercs belsejében elhelyezkedő cellát pontosan félig töltjük ferrofluiddal, ekkor a cellában  $V_{pri} + V_{sec} = 3LR^2\pi/2$  folyadék található.
- ▶ Belátható, hogy a szenzor bármely mértékű megdőntése esetén a középső tekercsben mindig  $V_{pri} = LR^2\pi/2$  térfogatnyi ferrofluidum található.
- ▶ A két szélső szekunder tekercs a dőlésszögtől függően osztozik a maradék  $V_{sec} = V_{sec1} + V_{sec2} = LR^2\pi$  térfogatnyi ferrofluidumon.



# Eredmények

- ▶  $\alpha < \arctan \frac{2R}{3L}$  szögek esetén az egyik szekunder tekercsben található ferrofluidum mennyisége:

$$V_{sec1} = \int_0^L \frac{R^2}{2} \left[ 2 \cdot \arccos \left( \frac{(L + 2x) \operatorname{tg} \alpha}{2R} \right) - \sin \left( 2 \cdot \arccos \left( \frac{(L + 2x) \operatorname{tg} \alpha}{2R} \right) \right) \right] dx$$

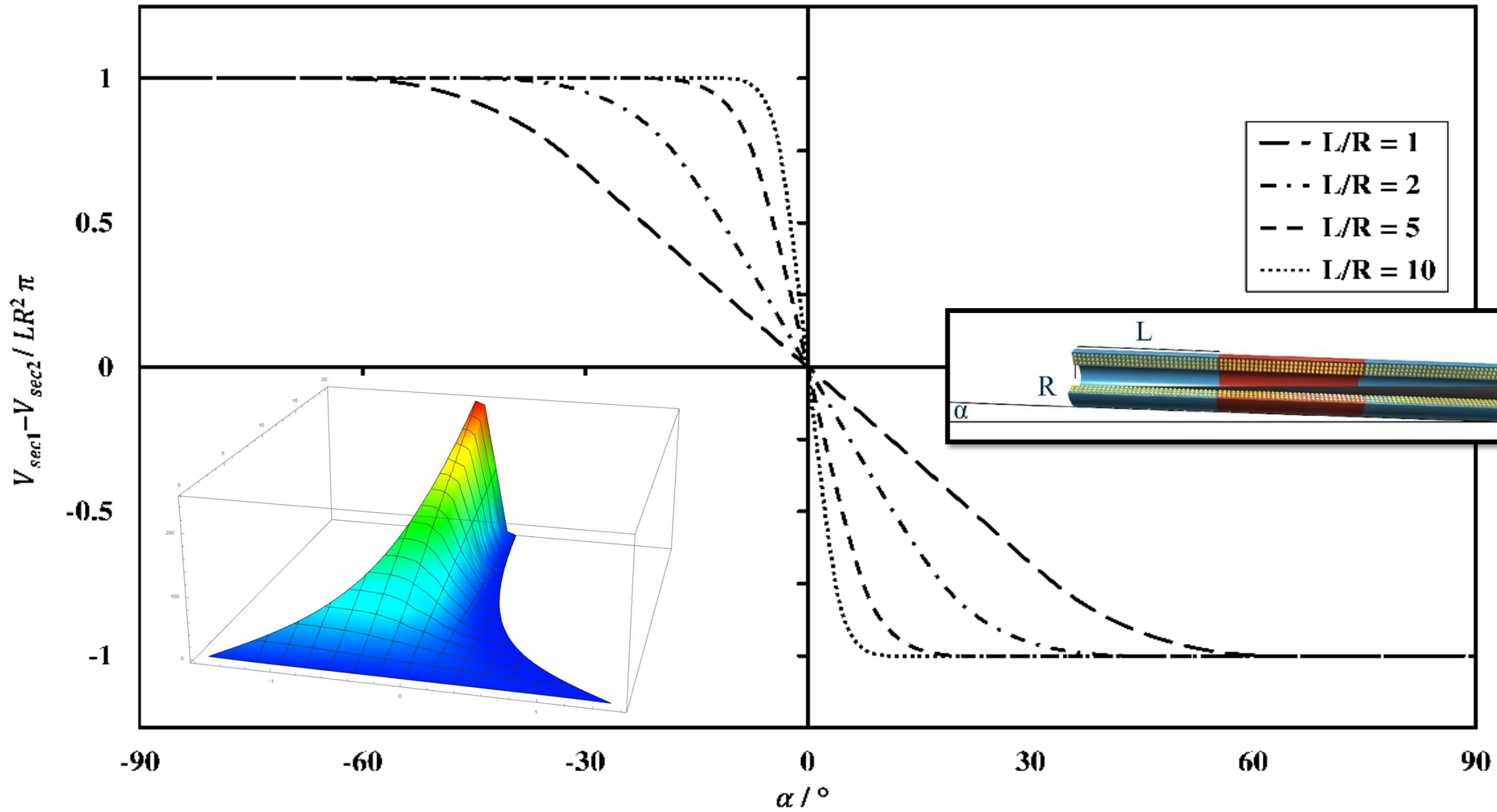
- ▶  $\alpha \geq \arctan \frac{2R}{3L}$  szögek esetén:

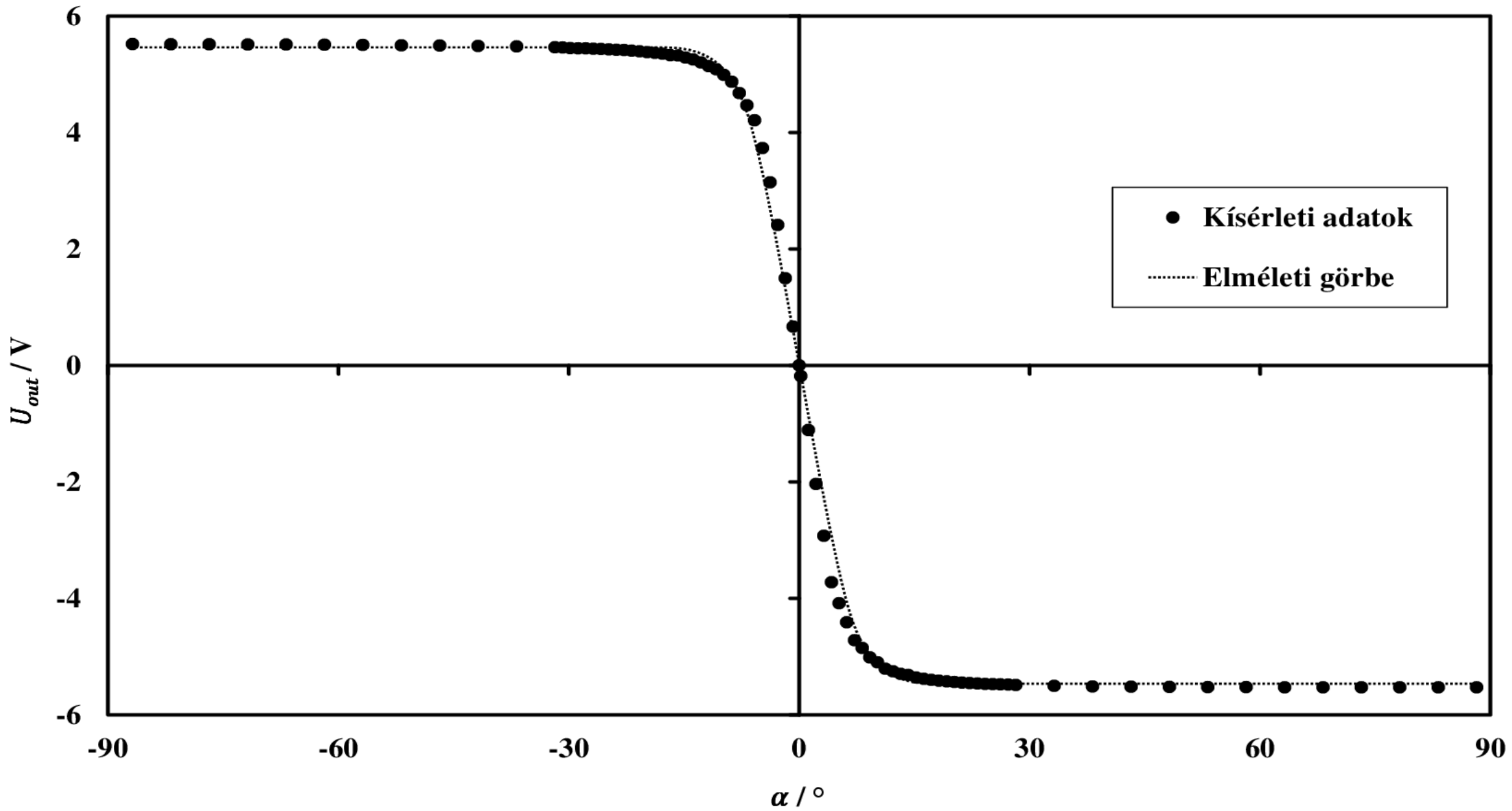
$$V_{sec1} = \int_0^{R \operatorname{ctg} \alpha - \frac{L}{2}} \frac{R^2}{2} \left[ 2 \cdot \arccos \left( \frac{(L + 2x) \operatorname{tg} \alpha}{2R} \right) - \sin \left( 2 \cdot \arccos \left( \frac{(L + 2x) \operatorname{tg} \alpha}{2R} \right) \right) \right] dx$$

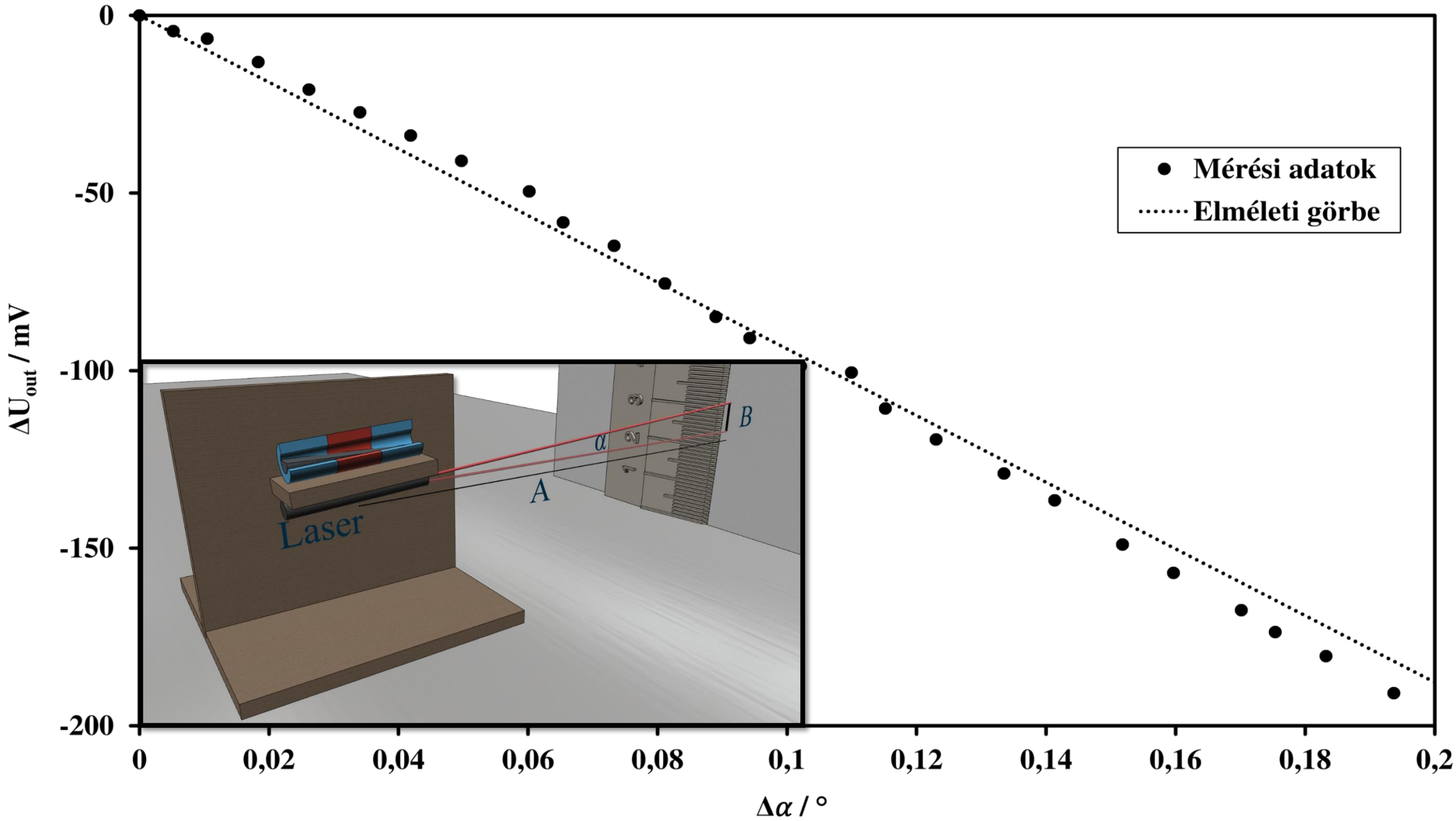
- ▶ A kimeneti jel a két szekunder tekercsben indukálódott váltófeszültségek különbsége ( $M$  a cellaállandó):

$$U_{out} = M(V_{sec1} - V_{sec2}) = M(2V_{sec1} - LR^2\pi)$$



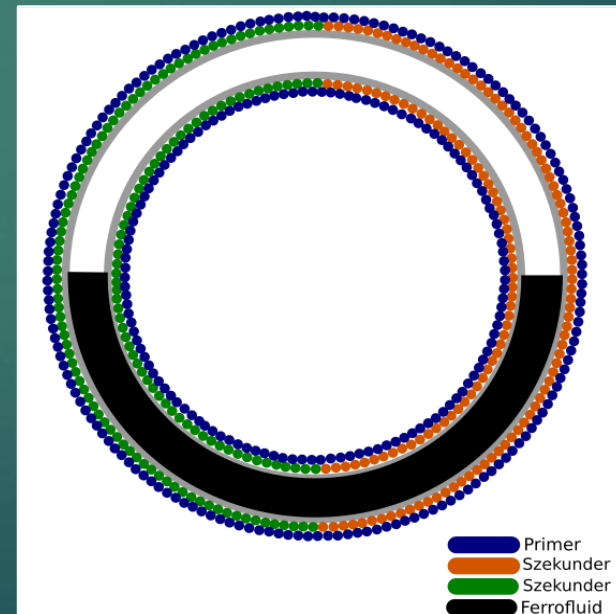
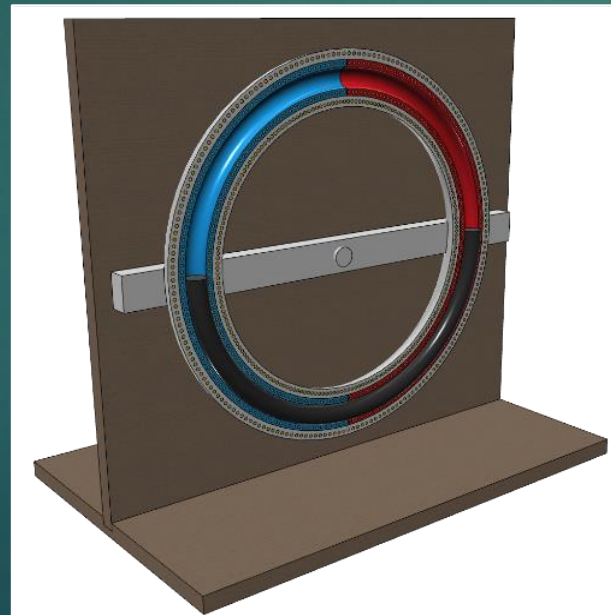


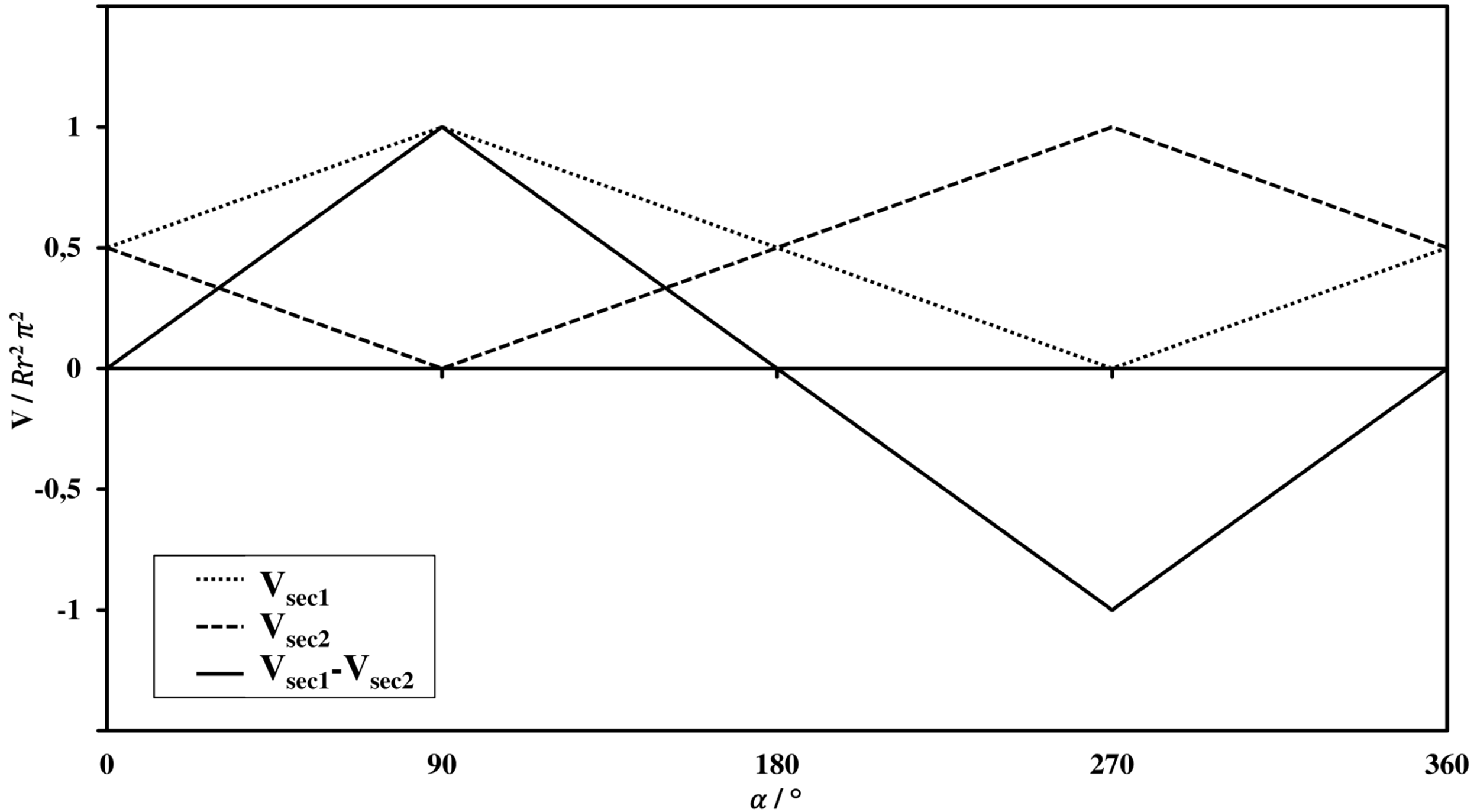




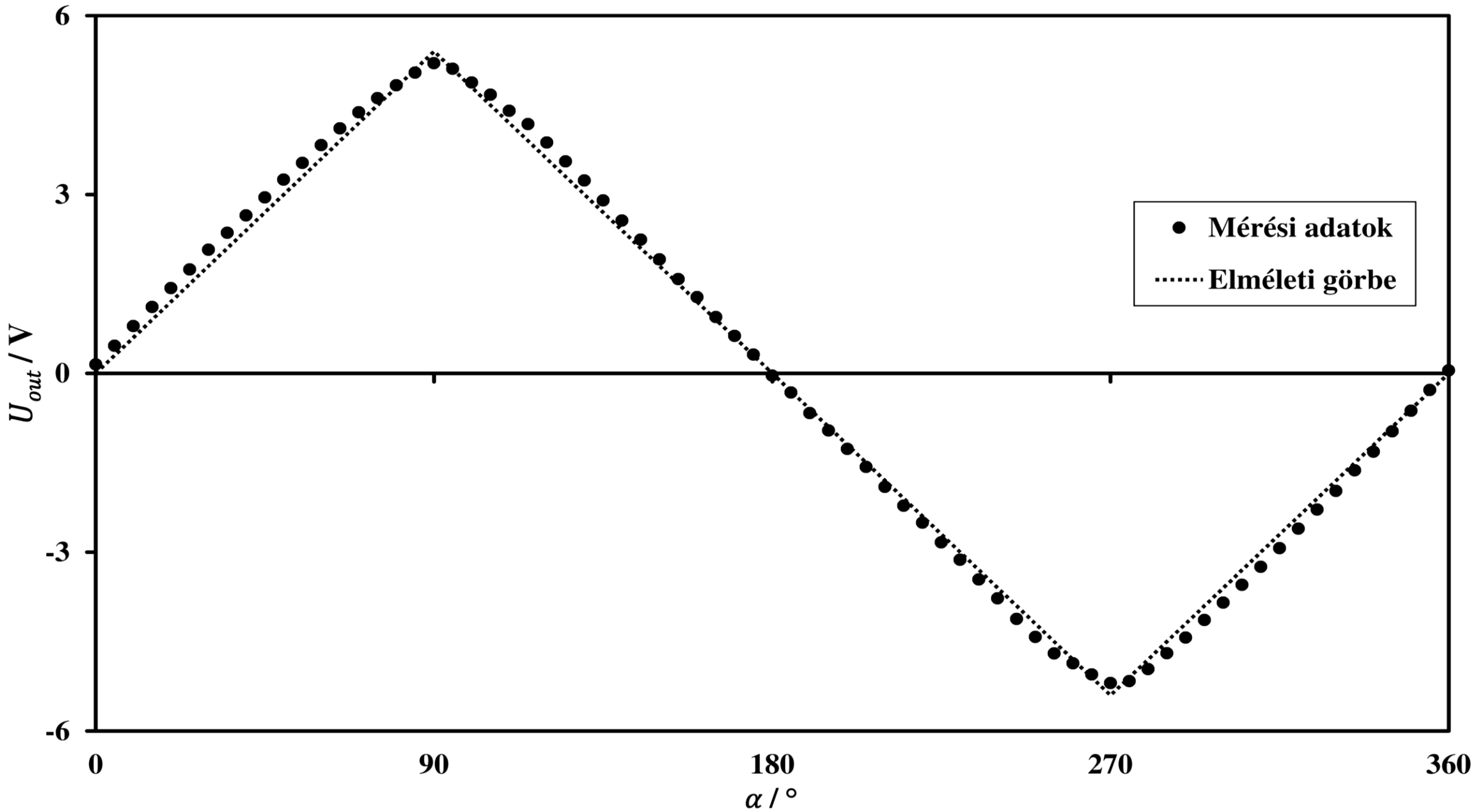
# Toroidális elrendezés

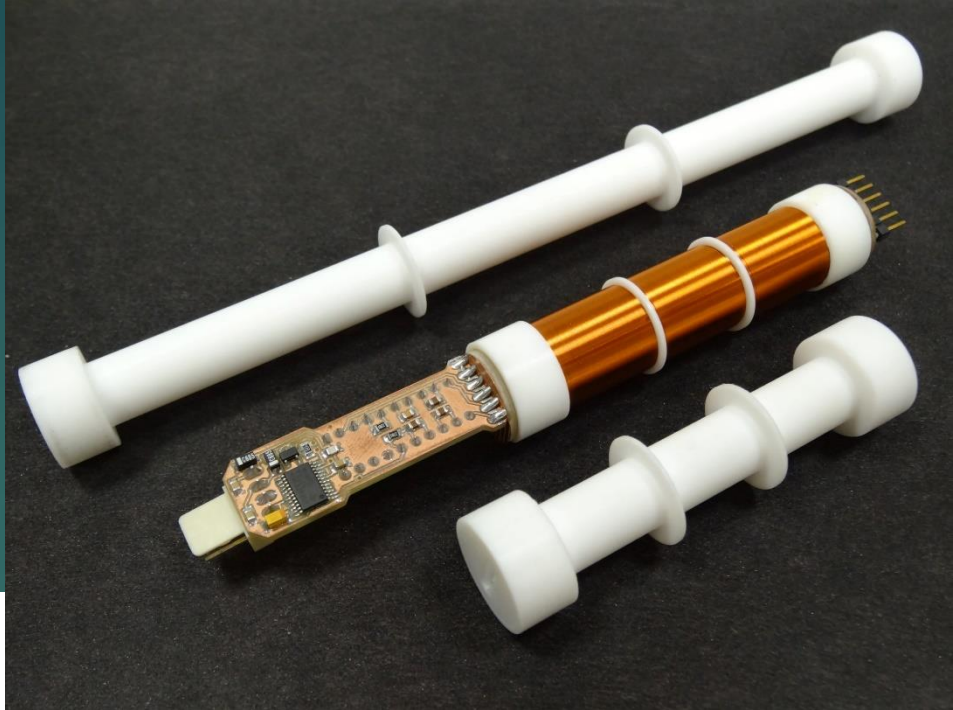
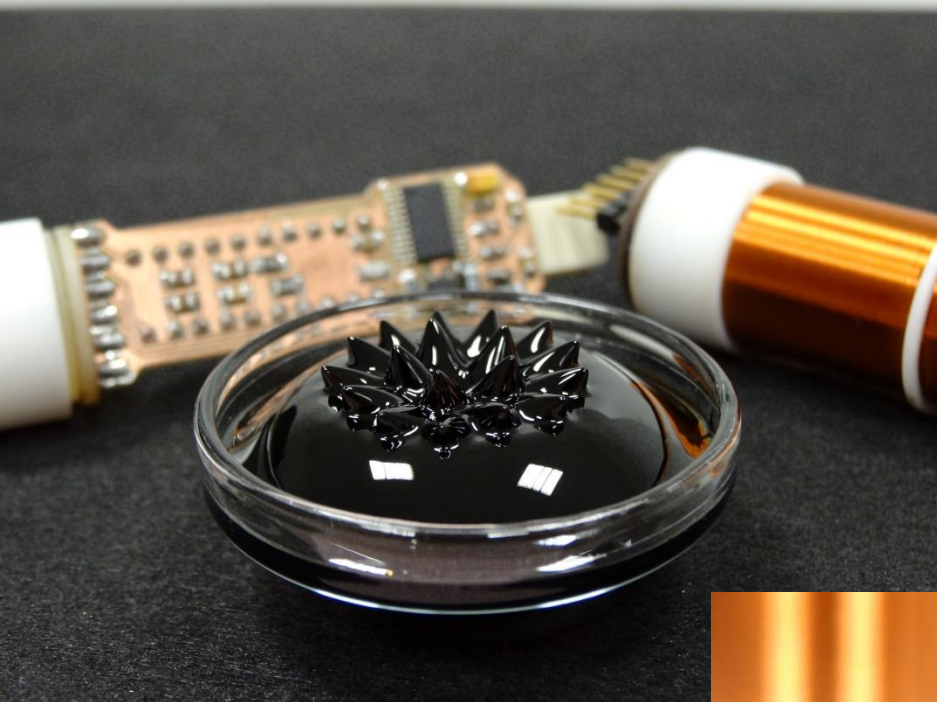
- ▶ A szenzor egy másik elrendezésében egy gyűrű alakban hajlított cső köré toroidálisan tekercseltük fel a három tekercset. A primer tekercs, amely a tórusz alak teljes hosszán található, 1600 menetes volt. A szekunderek a tórusz két felét borították és 800-800 menettel rendelkeztek





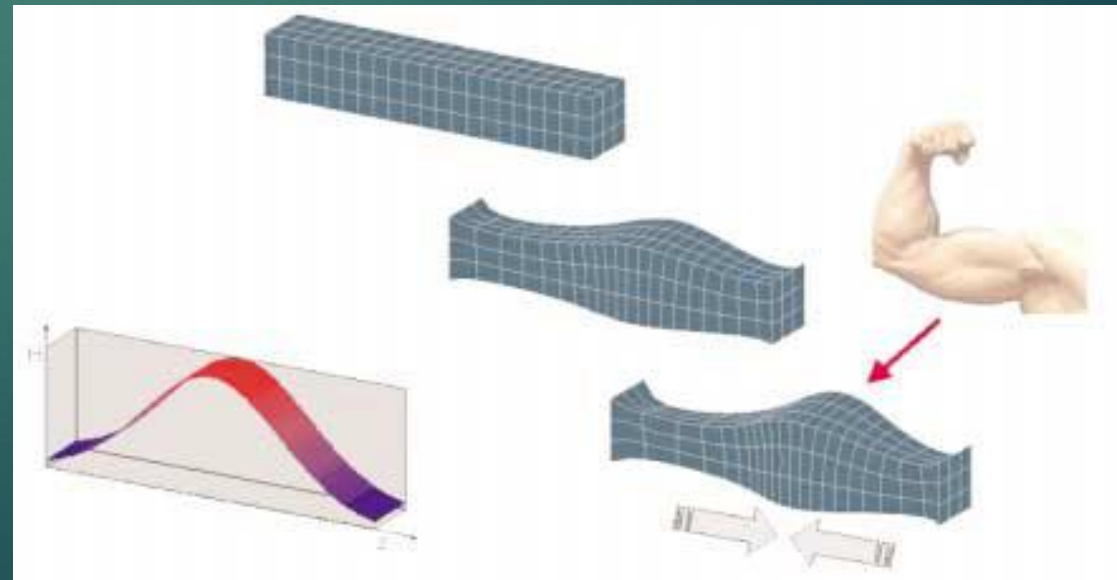






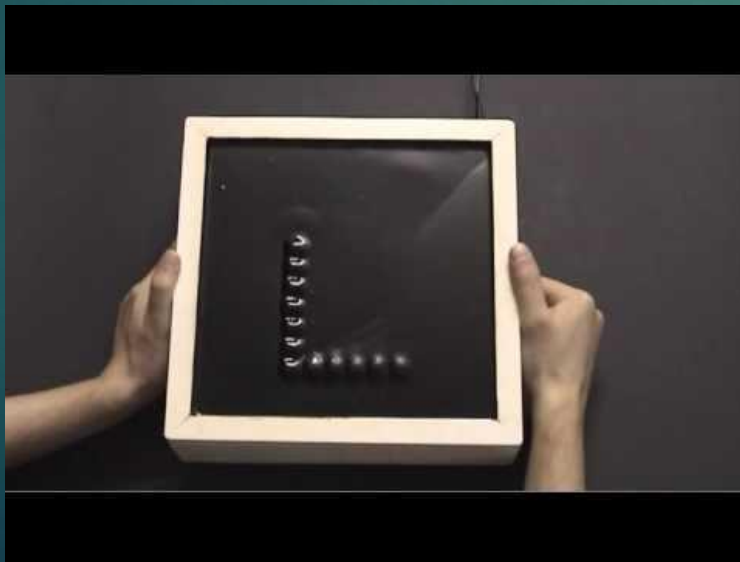
# Felhasználási lehetőségek

- ▶ Orvosi felhasználás
  - ▶ Víz bázisú, stabilizált biokompatibilis folyadékok
  - ▶ Mágneses hipertermiás kezelések
  - ▶ Festékek, hatóanyagok mágneses térrel való célbajuttatása
  - ▶ MR Elasztomerek – mesterséges izom
  - ▶ Kontrasztanyagként



# Felhasználási lehetőségek

- ▶ Tapintható kijelzők (3D kijelző)
- ▶ Változtatható alakú optikai lencse
- ▶ Hangszóró membrán felfüggesztése
- ▶ CD-DVD lézerfejében
- ▶ Merevlemez tengelytömítése



# Felhasználási lehetőségek





# Felhasználási lehetőségek

