

Mottó: „A kísérletek nélküli fizika nem több
egy érthetetlen képletgyűjteménynél”

ROMÂNIA
MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE
NEMZETI OKTATÁSI MINISZTERIUM
LICEUL TEORETIC ADY ENDRE ELŐRETELT LICEUM
ORADEA - NAGYVÁRAD
JUDEȚUL BIHOR BIHAR MEGYE

Nagyvárad – Ady Endre Líceum – Fizikum

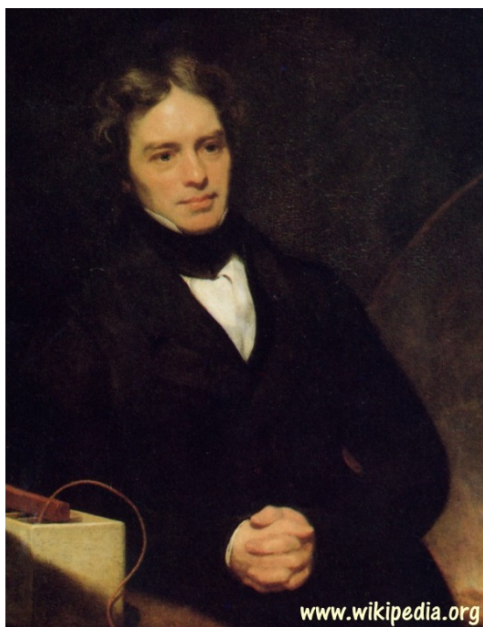
Fedezzük fel az elektromágneses indukciót!

A jelenség törvényeinek oknyomozó magyarázata

dr. Bartos-Elekes István, kísérletező diák Munkácsi Enikő

Fedezzük fel az elektromágneses indukciót!

Bartos-Elekes István,
nyugalmazott fizika-, informatika- és elektronikatanár
Ady Endre Líceum, Nagyvárad



Michael Faraday (1791-1867)

Szeretném megmutatni azt az általam elképzelt gondolkodási utat, amelyet **Michael Faraday** járhatott be (*mintegy 10 év alatt*) az elektromágneses indukció felfedezéséig (1831), majd a jelenség nagyon mély tanulmányozásáig. A kor tudományos gondolkodására jellemző volt a görögöktől származó reciprocitási elv, amely fel-tételezte, hogy minden jelenség **ok-okozat rendszere** fordítva is igaz. Ebből a nem mindenre alkalmazható elvből kiindulva, majd azt kijavítva, jutott el Faraday az elektromágneses indukció felfedezéséig. A bemutatásra kerülő elemi kísérletek egyre tágítják az **ok** fogalmi körét, de mindig ugyanazt a jelenséget, **okozatot** hoz-zák létre. Természetesen megpróbálom korrigálni az utóbbi há-rom évtized romániai fizikatankönyveinek azt a tévedését, hogy a mágneses tér (**H**) fogalmát kihagyják, ami nem lenne nagyon nagy

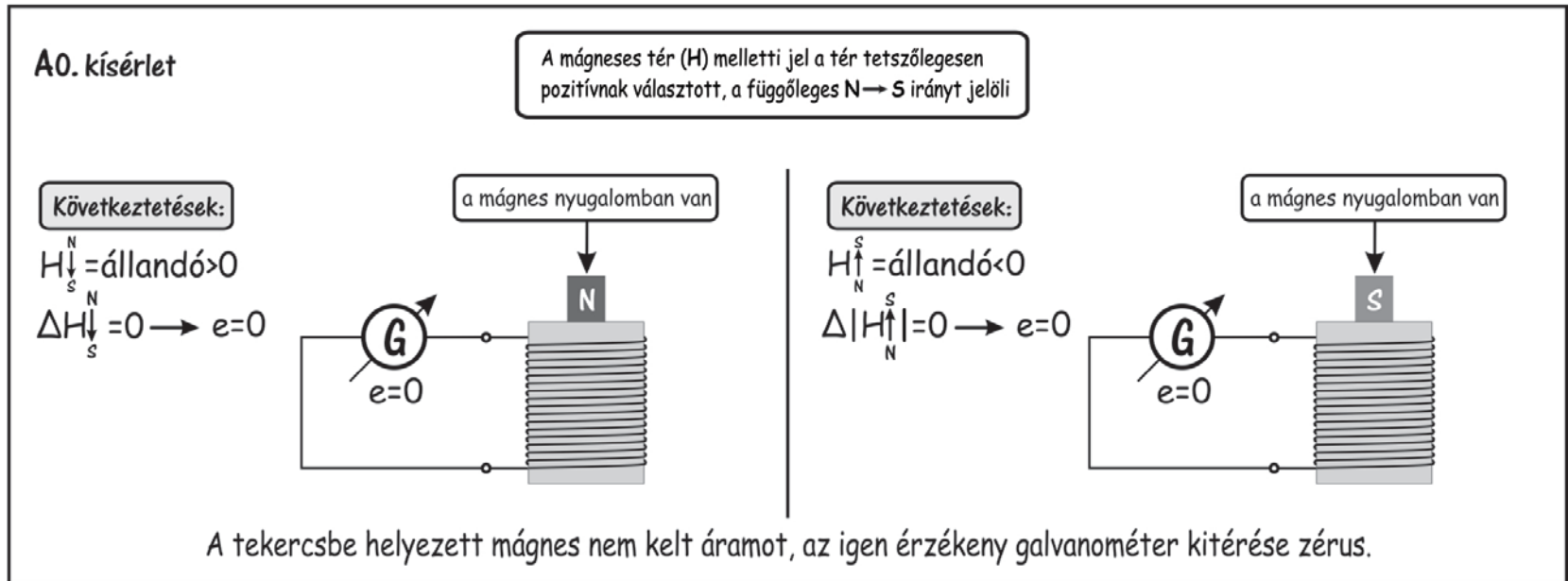
baj, de összemoszák a mágneses indukció (**B**) fogalmával, ami megengedhetetlen tévedés. A rövid dolgozat végére magunk is felfedezhetjük az elektromágneses indukció jelenségét. Nyi-tott kérdés marad azonban a kísérletekből levezetett képlet arányossági állandója, amely az **SI**-ben egy egyszerű **-1**, de ennek „kikaparása”, az ok-okozati rendszer további tágítása egészen az energetikai összefüggésekig, már nem fér bele ebbe a dolgozatba.

1821. A kor tudósai tudták: az elektromos áramnak van mágneses tere (Oersted, 1820). Mi sem látszott egyszerűbbnek, mint az ok-okozat megfordítása. A viszonylag gyenge áramok már erős mágneses teret hoztak létre, de a legerősebb mágnesek sem voltak képesek elektromos áramot kelteni. Faraday mintegy tíz évig kereste a megoldást. Hiába! Egy véletlen mozdulat azonban meghozta a várva várt sikert... *(A felesége hívta vacsorázni, ő megijedt, és elejtette a mágnest. Ez csak poén, én találtam ki, de hihető).*

A mindenkori, a témával kapcsolatos fizikaóráimhoz hasonlóan, **hat kísérletsorozat**ban fogjuk tanulmányozni a mágneses tér és egy kis tekercs fizikai szempontból lehetséges kölcsönös helyzeteiből adódó jelenségeket. Egyre bővítve a jelenséget létrehozó fizikai mennyiségek körét (**okok**), az addig már „felfedezetteket” állandó értéken tartva, megvizsgáljuk az újabb mennyiség változásának hatását a jelenségre (**okozat**). Mindig abból a helyzetből indulunk ki, hogy a jelenséget okozó újabb mennyiség nem változik, értéke állandó, és természetesen, nem észlelünk semmit, pedig megváltoztatjuk a mágneses tér irányát is *(Faraday első tíz éve)*. Ezután az új mennyiség nagyságát növelve és csökkentve, majd irányát is megváltoztatva (ezek vektoriális mágneses terek) még négy elemi kísérletet végzünk el. Minden esetben megfigyeljük a tekercsben keltett feszültség nagyságát és polaritását, illetve a fizikai mennyiség változási sebességének hatását a keltett feszültségre. Egy sorozathoz tartozó öt elemi kísérlet így lesz „teljes”, hiszen az értelmetlennek tűnő „nem változik” mellett, a változásból és az irányváltásból még négy kísérlet végezhető el *(informatikusi nyelven szólva: két bit négy állapotot határoz meg)*. Az [interneten megtalálható és le is tölthető](#) a kísérletsorozat PowerPointos, valódi kísérletek fényképeiből összeállított bemutatója, ahol a mintegy harminc, egyre komplexebb elemi kísérlet látszólagos hasonlóságából származó egyhangúságot a mindig nagyon hasonlóan megszólaló, de mindig más **Bolero**-val igyekeztem feloldani-növelni.

A. Kísérletsorozat

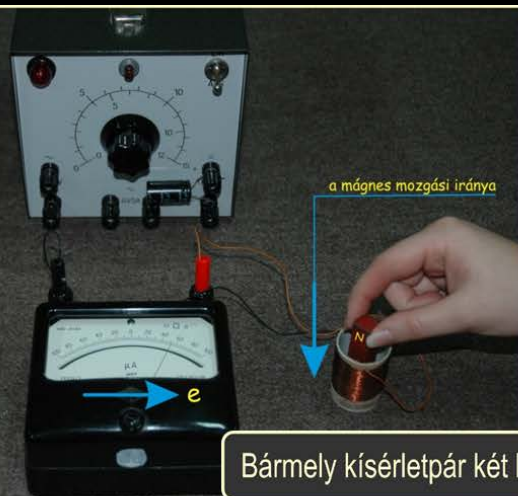
Megvizsgáljuk a legklasszikusabb esetet, „az elektromos áramnak van mágneses tere” logikai fordítottját. Egy tekercsbe mágnest helyezünk, a mágnes nyugalomban van.



Bár a mágneses tér elég erős, a galvanométer nem jelez áramot (**A0. kísérlet**). Ha megmozdítjuk a mágnest, akkor a galvanométer kitér, hol jobbra, hol balra, majd a mágnes irányát megfordítva, ugyanannak a mozgásnak az előbbivel ellentétes kitérés felel meg.

A kísérletekből (**A1. kísérlet**, **A2. kísérlet**, **A3. kísérlet** és **A4. kísérlet**) levonható következtetéseket az alábbiakban foglaljuk össze:

A1



A2

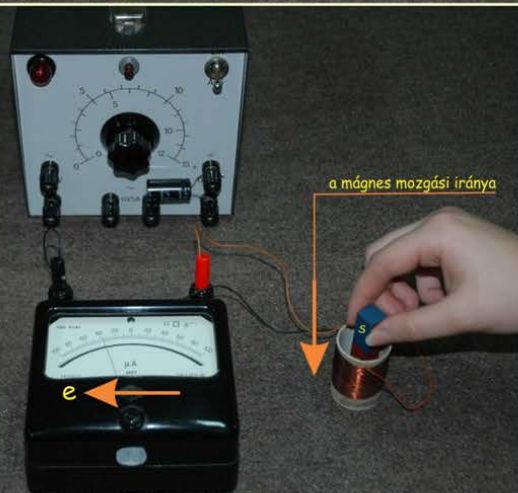


Bármely kísérletpár két logikai negációt tartalmaz

$$\Delta H_{\downarrow} > 0 \rightarrow e > 0$$

$$\Delta H_{\downarrow} < 0 \rightarrow e < 0$$

A3



$$\Delta |H_{\uparrow}| > 0 \rightarrow e < 0$$

A4



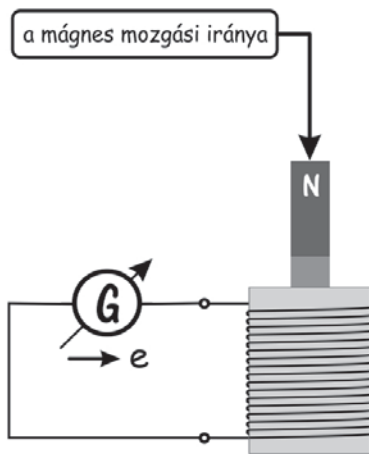
$$\Delta |H_{\uparrow}| < 0 \rightarrow e > 0$$

A1. kísérlet

Következtetések:

$$H_{S \downarrow N}^N > 0$$

$$\Delta H_{S \downarrow N}^N > 0 \rightarrow e > 0$$



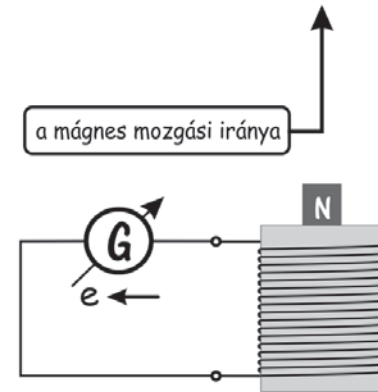
A mágnest déli pólusával (S) betoljuk a tekercsbe.
A galvanométer jobbra tér ki.

A2. kísérlet

Következtetések:

$$H_{S \uparrow N}^N > 0$$

$$\Delta H_{S \uparrow N}^N < 0 \rightarrow e < 0$$



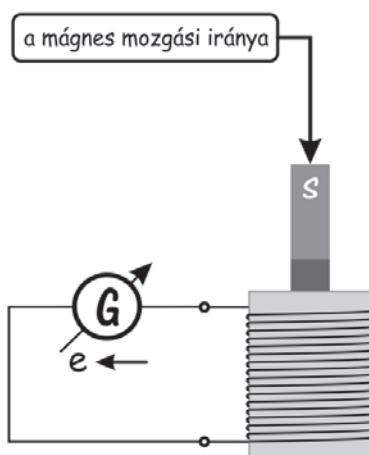
A mágnest ezután kihúzzuk a tekercsből.
A galvanométer ellenkező irányba tér ki.

A3. kísérlet

Következtetések:

$$H_{S \downarrow N}^S < 0$$

$$\Delta |H_{S \downarrow N}^S| > 0 \rightarrow e < 0$$



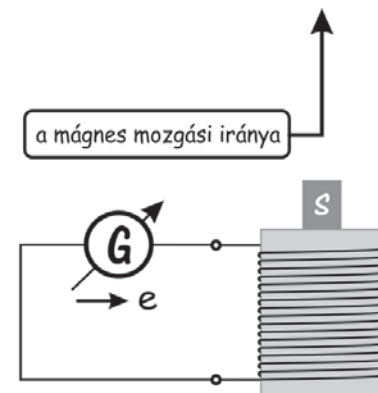
A mágnest északi pólusával (N) betoljuk a tekercsbe.
A galvanométer balra tér ki.

A4. kísérlet

Következtetések:

$$H_{S \uparrow N}^S < 0$$

$$\Delta |H_{S \uparrow N}^S| < 0 \rightarrow e > 0$$



A mágnest ezután kihúzzuk a tekercsből.
A galvanométer ellenkező irányba tér ki.

Okkereső köztes összefoglaló

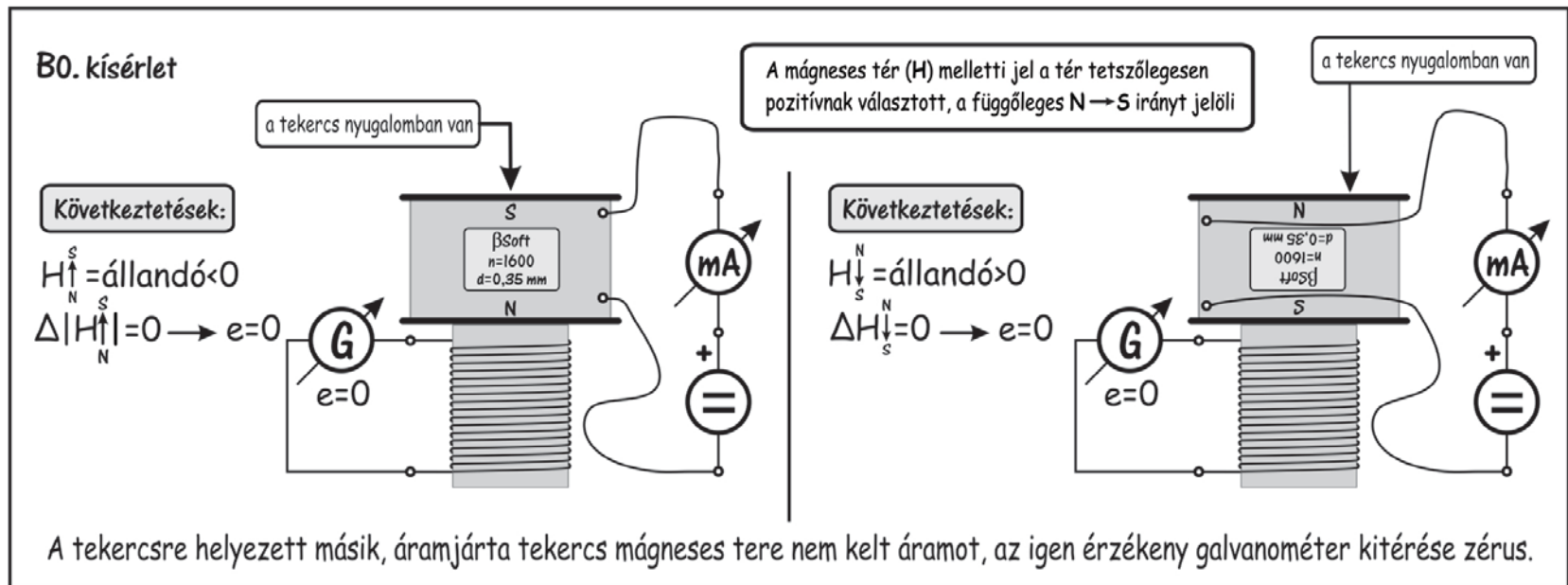
Az **A. kísérletsorozat**ot összegezve megállapíthatjuk:

- Ha nem mozgatjuk a mágnesset, nem keletkezik feszültség.
- A mágnesset ki-be mozgatva a mágneses tér változása (ΔH) a tekercsben feszültséget indukált, ezt jól kimutatta a galvanométer.
- A galvanométer kitérési iránya összefüggésben áll a mágneses tér polaritásával és mozgási irányával.
- Az e indukált feszültség arányos a mágnes mozgási sebességével. Az e legnagyobb értéke **30 mV** nagyságrendű.

Összegezve: az indukált feszültséget csak a mágneses tér (H) változásával hozhatjuk létre, az **ok a mágneses tér változása**, az **okozat** az e indukált feszültség. Felírhatjuk, hogy a ΔH -nak következménye az e indukált feszültség: $\Delta H \rightarrow e$.

B. Kísérletsorozat

Tényleg a ΔH az **ok**? Vajon, nem a mágnesünk valamilyen más fizikai tulajdonsága az oka a jelenségnek? Egy újabb kísérletsorozatban a biztosra megyünk: egy áramjárta tekercs mágneses terével járjuk végig az előbbi elemi kísérletsorozatot.



Mindenekelőtt a be sem kapcsolt tekercset is „meglóbáltuk” a kis tekercs felett, s mivel a galvanométer semmit sem mutatott, a majdani jelenségeket csakis az áramjárta tekercs mágneses terének tulajdoníthatjuk. Itt is a biztosan sikertelen változattal kezdtük (**B0. kísérlet**), vagyis a tekercsre helyezett másik, áramjárta tekercs, nem indukál feszültséget, nem kelt áramot. A továbbiakban, az áramjárta tekercssel eltérítettük egy oszcilloszkóp idővonalát, majd a Lorentz-erő biztos képlete segítségével beállítottuk, és a tekercsre fel is írtuk a mágneses pólusait. Az áramjárta tekercs pólusai biztos ismeretében, a tekercssel megismételtük az előbbi sorozat elemi kísérleteit (**B1. kísérlet**, **B2. kísérlet**, **B3. kísérlet és B4. kísérlet**). A levonható következtetéseket az alábbiakban foglaljuk össze:

B1



B2

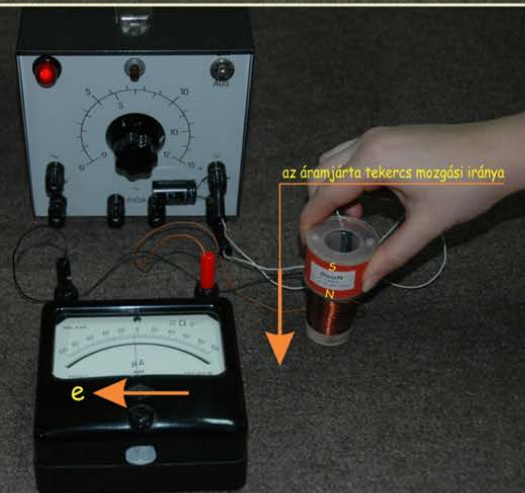


Bármely kísérletpár két logikai negációt tartalmaz

$$\Delta H_{\downarrow} > 0 \rightarrow e > 0$$

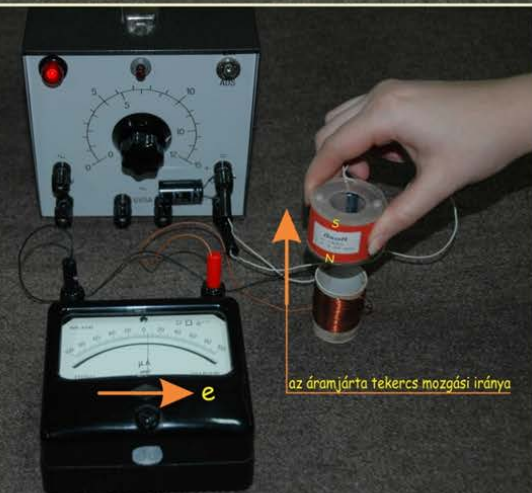
$$\Delta H_{\downarrow} < 0 \rightarrow e < 0$$

B3



$$\Delta |H_{\uparrow}| > 0 \rightarrow e < 0$$

B4



$$\Delta |H_{\uparrow}| < 0 \rightarrow e > 0$$

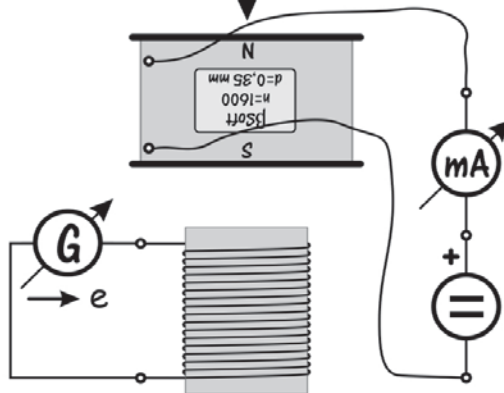
B1. kísérlet

a tekercs mozgási iránya

Következtetések:

$$H_{S \downarrow N}^N > 0$$

$$\Delta H_{S \downarrow N}^N > 0 \rightarrow e > 0$$



Az áramjárta tekercset déli pólusával (S) közelítjük a másik tekercshez. A galvanométer jobbra tér ki.

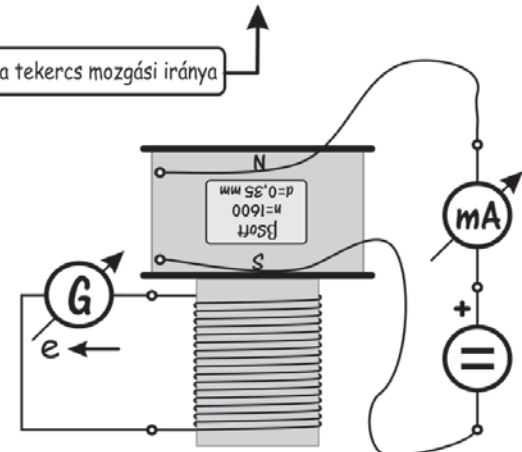
B2. kísérlet

a tekercs mozgási iránya

Következtetések:

$$H_{S \uparrow N}^N > 0$$

$$\Delta H_{S \uparrow N}^N < 0 \rightarrow e < 0$$



Az áramjárta tekercset déli pólusával (S) eltávolítjuk a másik tekercstől. A galvanométer balra tér ki.

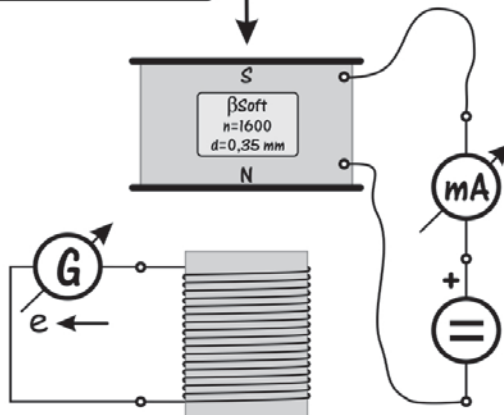
B3. kísérlet

a tekercs mozgási iránya

Következtetések:

$$H_{N \downarrow S}^S < 0$$

$$\Delta H_{N \downarrow S}^S > 0 \rightarrow e < 0$$



Az áramjárta tekercset északi pólusával (N) közelítjük a másik tekercshez. A galvanométer balra tér ki.

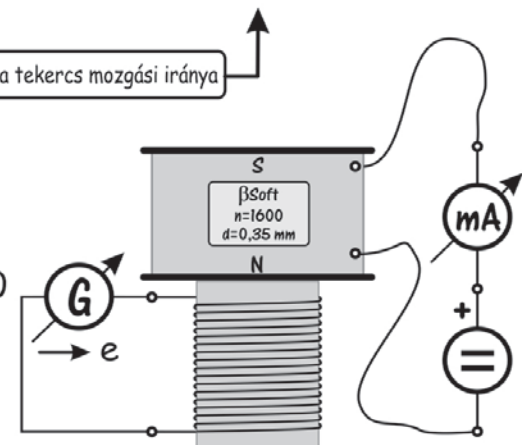
B4. kísérlet

a tekercs mozgási iránya

Következtetések:

$$H_{N \uparrow S}^S < 0$$

$$\Delta H_{N \uparrow S}^S < 0 \rightarrow e > 0$$



Az áramjárta tekercset északi pólusával (N) eltávolítjuk a másik tekercstől. A galvanométer jobbra tér ki.

Okkereső köztes összefoglaló

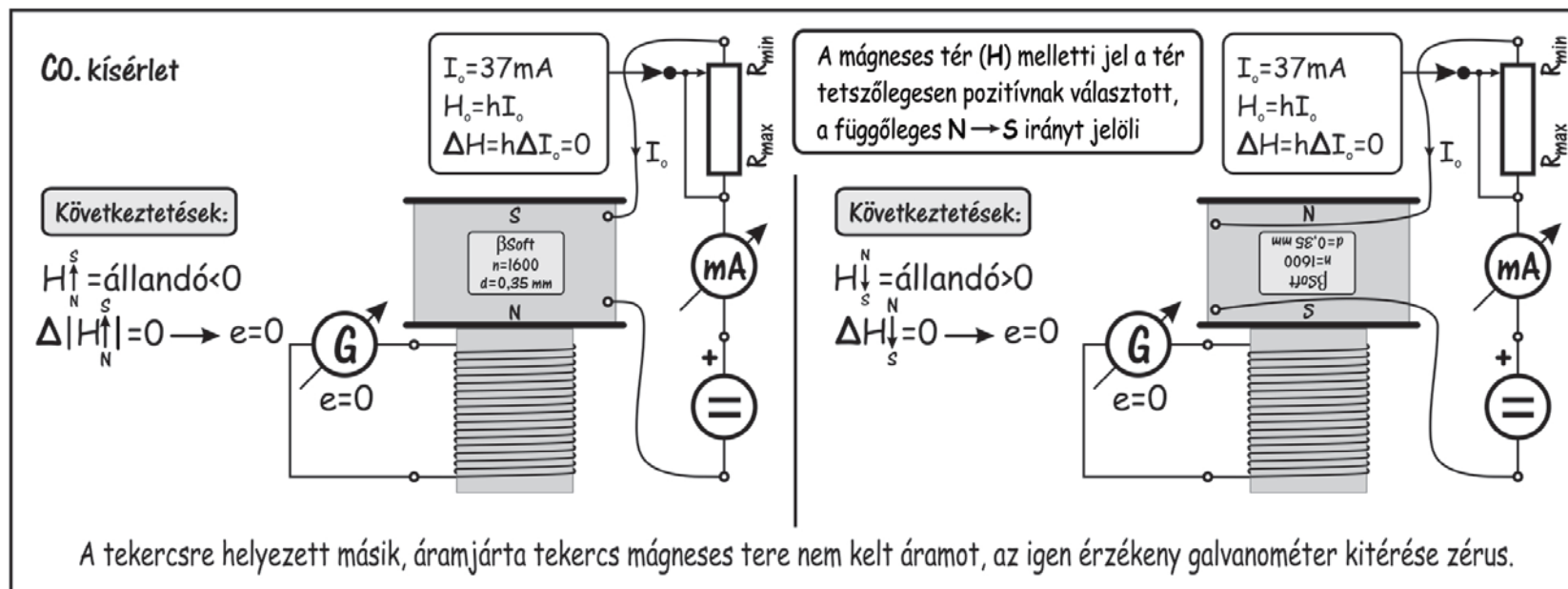
A **B. kísérletsorozat**ot összegezve megállapíthatjuk:

- Ha nem mozgatjuk az áramjárta tekercset, nem keletkezik feszültség.
- Az áramjárta tekercset le-fel mozgatva a mágneses tér változása (ΔH) a tekercsben feszültséget indukált, ezt jól kimutatta a galvanométer.
- A galvanométer kitérési iránya összefüggésben áll a mágneses tér polaritásával és mozgási irányával.
- Az **e** indukált feszültség arányos az áramjárta tekercs mozgási sebességével. A nagyobb tömegű tekercset lassabban mozgattuk, de a mágneses tér is gyengébb volt. Az **e** legnagyobb értéke **3 mV** nagyságrendű.

Összegezve: az indukált feszültséget csak a mágneses tér (**H**) változásával hozhatjuk létre, az ok a **mágneses tér változása**, az okozat az **e** indukált feszültség: $\Delta H \rightarrow e$.

C. Kísérletsorozat

Vajon, nem a mozgatáshoz tartozó valamilyen más jelenség az ok? Mivel 1820-30-ban vagyunk, a műszerek még kezdetlegesek, ezért újabb bizonyítékokat keresünk. Egyszerűnek tűnik a tekercsen átfolyó áram megváltoztatása, ezzel együtt a mágneses tér is változik, tehát mechanikai mozgás nélkül hozhatjuk létre a mágneses tér változását.



Az előbbi kísérletekben már megszokott módon először igazoljuk, hogy változás nélkül nincs indukált feszültség (**C0. kísérlet**), majd igazoljuk, hogy a tekercsen átfolyó áram megváltozása a közelében levő másik tekercsben áramot indukál (**C1. kísérlet**, **C2. kísérlet**, **C3. kísérlet** és **C4. kísérlet**). *Elkerültük a mechanikai mozgást.* Csak a tekercsen átfolyó áramot változtattuk. Pontosan ugyanarra az eredményre jutottunk, mint az **A. sorozatban**. Egy különbség azért mégis van, a keltett feszültség sokkal kisebb az előbbieknél, hiszen nagyon lassan tudtuk forgatni az áramszabályozó gombot. $H = hI_0$, a $\Delta H = h\Delta I_0$, vagyis látszólag biztosak vagyunk az okban: a mágneses tér változása az egyetlen oka a keltett feszültségnek. A h egy konstrukciós arányossági tényező. A levonható következtetéseket az alábbiakban foglaljuk össze:

C1



$$\Delta H_{\downarrow} > 0 \rightarrow e > 0$$

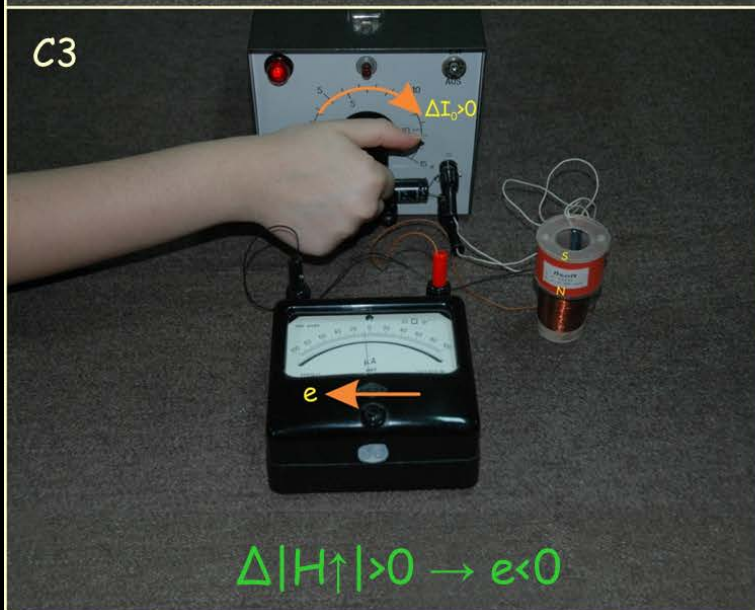
C2



$$\Delta H_{\downarrow} < 0 \rightarrow e < 0$$

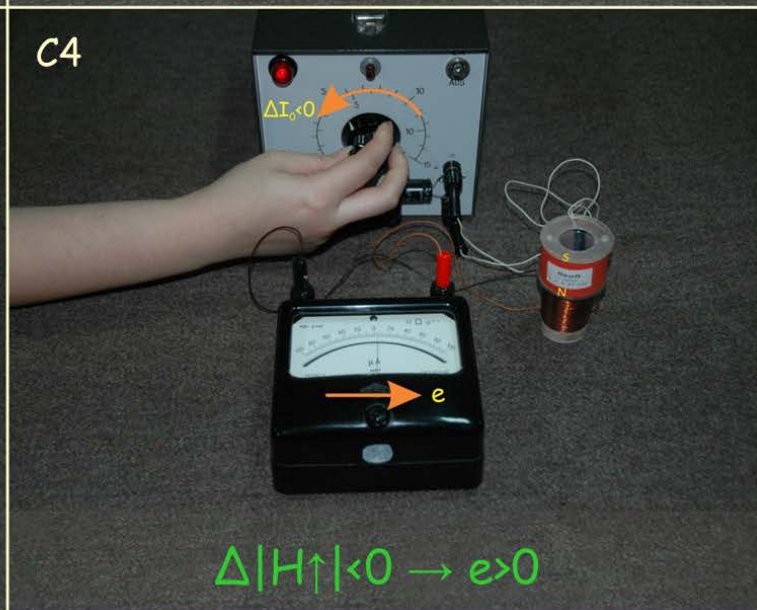
Bármely kísérletpár két logikai negációt tartalmaz

C3



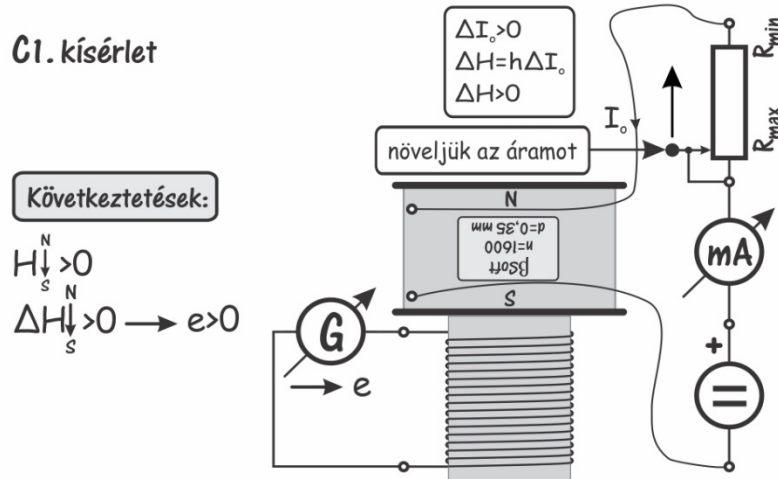
$$\Delta |H_{\uparrow}| > 0 \rightarrow e < 0$$

C4



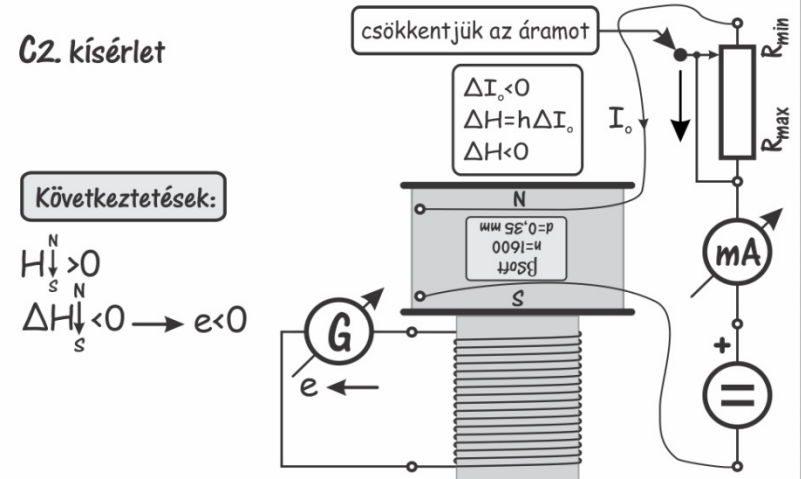
$$\Delta |H_{\uparrow}| < 0 \rightarrow e > 0$$

C1. kísérlet



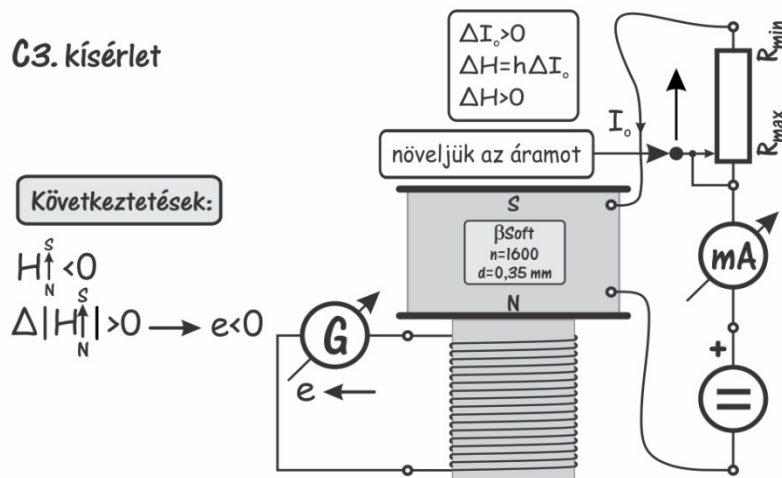
Az áramjárta tekercs déli pólusa (S) van közelebb a tekercshez.
Ha növeljük az áramot, a galvanométer jobbra tér ki.

C2. kísérlet



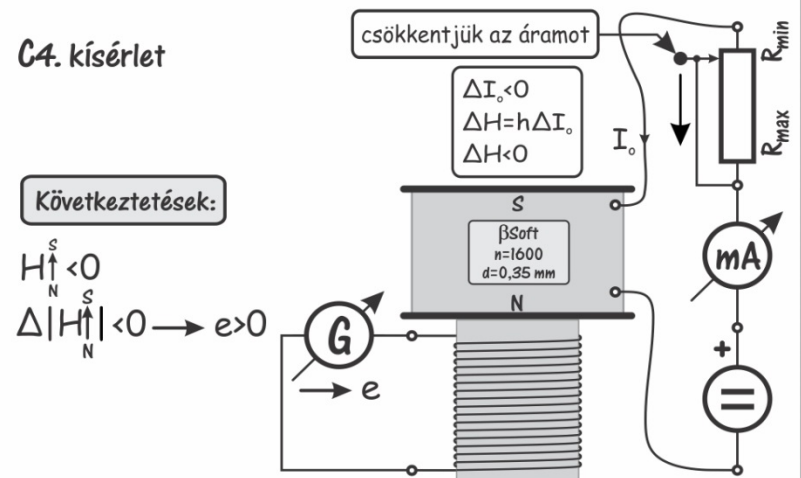
Az áramjárta tekercs déli pólusa (S) van közelebb a tekercshez.
Ha csökkentjük az áramot, a galvanométer balra tér ki.

C3. kísérlet



Az áramjárta tekercs északi pólusa (N) van közelebb a tekercshez.
Ha növeljük az áramot, a galvanométer balra tér ki.

C4. kísérlet



Az áramjárta tekercs északi pólusa (N) van közelebb a tekercshez.
Ha csökkentjük az áramot, a galvanométer jobbra tér ki.

Okkereső köztes összefoglaló

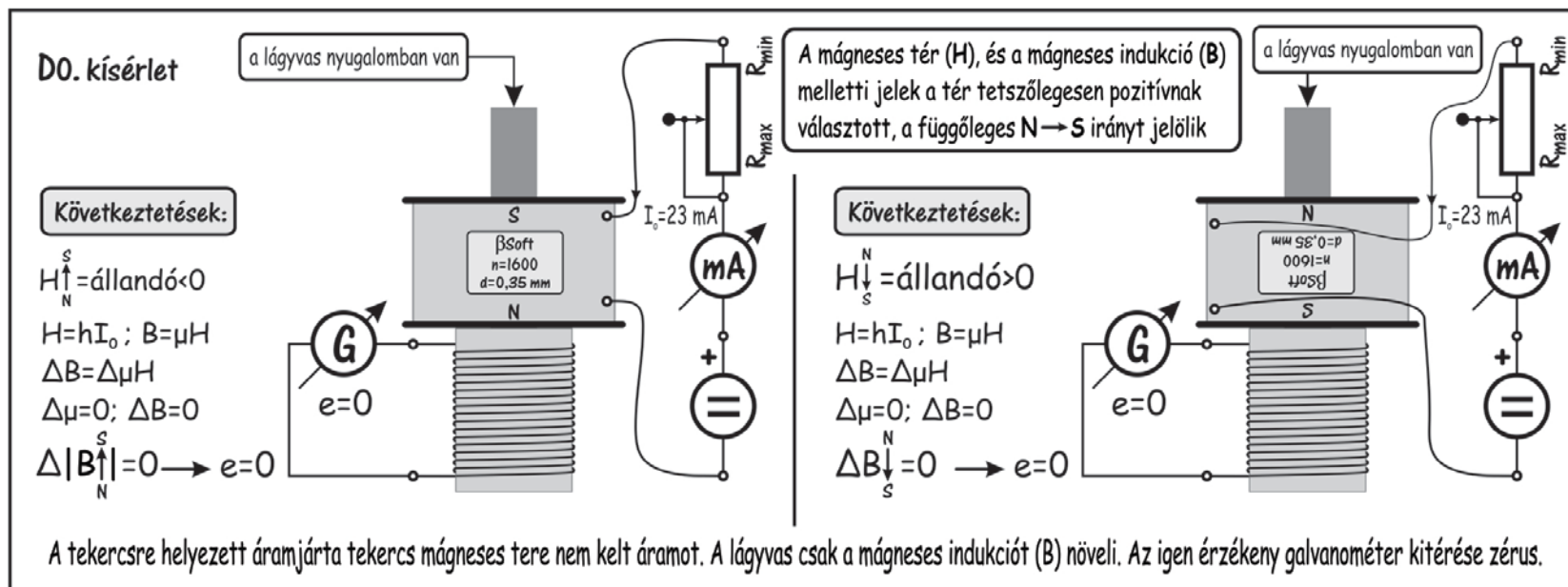
A **C. kísérletsorozat**ot összegezve megállapíthatjuk:

- Ha nem változtatjuk az áramerősséget a tekercsben, nem keletkezik feszültség.
- Az áramerősséget változtatva a mágneses tér változása (ΔH) a tekercsben feszültséget indukált, ezt jól kimutatta a galvanométer.
- A galvanométer kitérési iránya összefüggésben áll a mágneses tér polaritásával és az áram növekedésével, vagy csökkenésével, vagyis a ΔH -val.
- Az e indukált feszültség arányos az áramváltozás, azaz a mágneses tér változási sebességével. Az áram értékét csak lassan változtathattuk, de a mágneses tér is gyenge volt. Az e legnagyobb értéke itt is **3 mV** nagyságrendű.

Összegezve: az indukált feszültséget csak a mágneses tér (H) változásával hozhatjuk létre, az ok a **mágneses tér változása**, az **okozat** az e indukált feszültség: $\Delta H \rightarrow e$.

D. Kísérletsorozat

Megnyugodhatunk: ha egy tekercs változó mágneses térben van, a tekercsben feszültség keletkezik! Vajon csak a mágneses tér változása az egyetlen ok? Mi történik, ha a mágneses közeget változtatjuk? Állandó értéken (kicsi) tartottuk a tekercsen átfolyó áramot, és egy lágyvasat (ez nem mágnesesődik meg) helyeztünk az áramjárta tekercsbe. Felhívom a kezdő kísérletezők figyelmét arra, hogy csak a lágyvas behelyezése után kössék össze a kis tekercset a galvanométerrel, különben az áram bekapcsolásakor keletkező igen nagy feszültség a galvanométert tönkretelheti. Ugyancsak a sikeres kísérlet egy másik feltétele az, hogy a tekercset tápláló áramforrást igen jól meg kell szűrni (a kísérletnél egy külső elektrolitikus kondenzátort is használtam.



Most is az értelmetlennek tűnő, változás nélküli kísérlettel kezdtük (**D0. kísérlet**). Természetesen semmilyen feszültség sem keletkezett. Megtartottuk az áramjárta tekercset, állandó árammal ($\Delta I_0 = 0$, vagyis $\Delta H = 0$), de változtattuk a közeget. (**D1. kísérlet**, **D2. kísérlet**, **D3. kísérlet** és **D4. kísérlet**). Az eredmények hasonlóak, de sokkal nagyobb feszültségek keletkeztek, pedig a mágneses tér szigorúan állandó volt. Ha a lágyvasrudat megfordítottuk, nem változott az e iránya, ami egyértelműen csak a közeg mágneses tulajdonságainak megváltozását jelenti. *Nem a ΔH lenne az ok?* A mágneses közeg váltásával a H marad, de a tér mágneses indukciója (B) megváltozik: $B = \mu H$, $\Delta B = \Delta \mu H$, tehát az eddig megtalált három **ok** közül bármelyik megváltozhatott, mindig a B változását okozta (mozgatás $\rightarrow \Delta B$, $\Delta \mu \rightarrow \Delta B$, $\Delta I_0 \rightarrow \Delta B$). Az eddigi kísérleteknél a jelenség oka valójában a ΔB volt, csak mi összekevertük a ΔH -val (*akarattal tettük*). Biztosan leírhatjuk: $\Delta B \rightarrow e$? Vajon az **ok**ba nem fér be még valami más is? Kezdünk elbizonytalanodni? A levonható következtetéseket az alábbiakban foglaljuk össze:

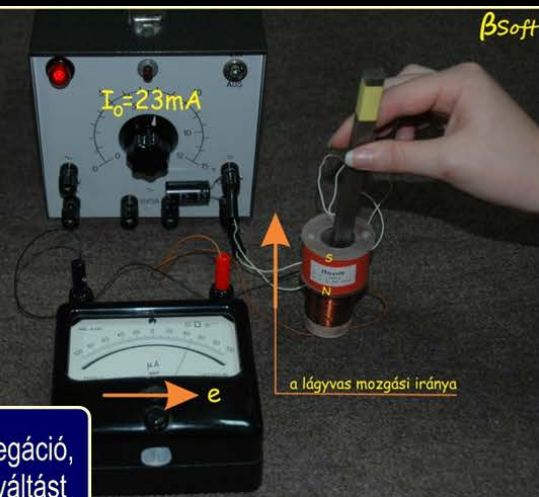
D1



Csak vízszintesen jön létre a kettős logikai negáció,
a lággyvas megfordítása nem hoz létre pólusváltást

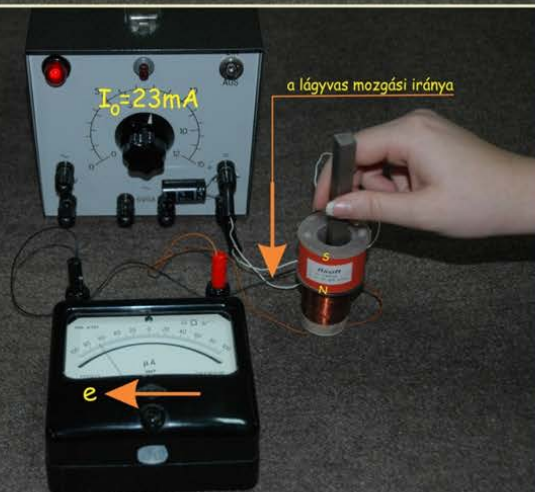
$$\Delta H \uparrow = 0; \Delta |B \uparrow| > 0 \rightarrow e < 0$$

D2



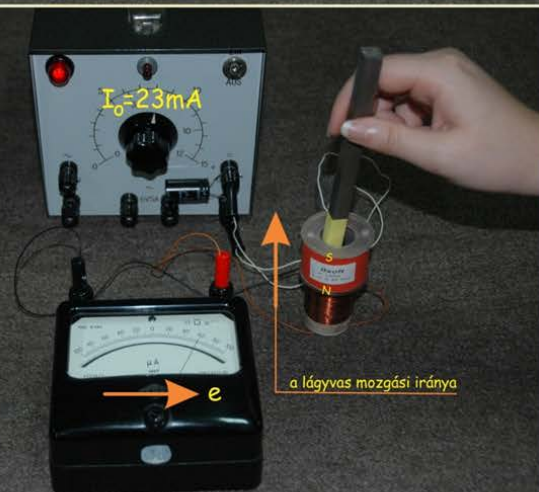
$$\Delta H \uparrow = 0; \Delta |B \uparrow| < 0 \rightarrow e > 0$$

D3



$$\Delta H \uparrow = 0; \Delta |B \uparrow| > 0 \rightarrow e < 0$$

D4



$$\Delta H \uparrow = 0; \Delta |B \uparrow| < 0 \rightarrow e > 0$$

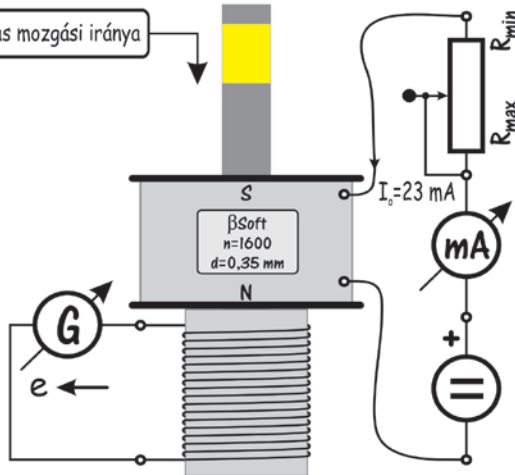
D1. kísérlet

a lágyvas mozgási iránya

Következtetések:

$$\begin{aligned} H_N^S &= \text{állandó} < 0 \\ H &= hI_0; B = \mu H \\ \Delta B &= \Delta \mu H \\ \Delta \mu &> 0; \Delta B > 0 \\ \Delta |B_N^S| > 0 &\rightarrow e < 0 \end{aligned}$$

A lágyvas betolása tekercsbe ($\Delta \mu$) a mágneses indukciót növeli (ΔB), a H értéke állandó marad. A galvanométer balra tér ki.



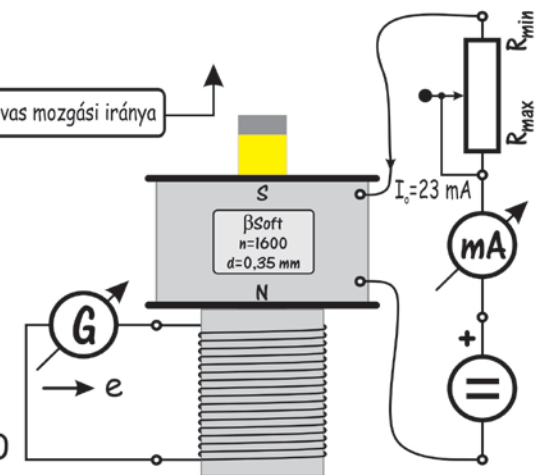
D2. kísérlet

a lágyvas mozgási iránya

Következtetések:

$$\begin{aligned} H_N^S &= \text{állandó} < 0 \\ H &= hI_0; B = \mu H \\ \Delta B &= \Delta \mu H \\ \Delta \mu &< 0; \Delta B < 0 \\ \Delta |B_N^S| < 0 &\rightarrow e > 0 \end{aligned}$$

A lágyvas kihúzása a tekercsből ($\Delta \mu$) a mágneses indukciót csökkenti (ΔB), a H értéke állandó marad. A galvanométer jobbra tér ki.



D3. kísérlet

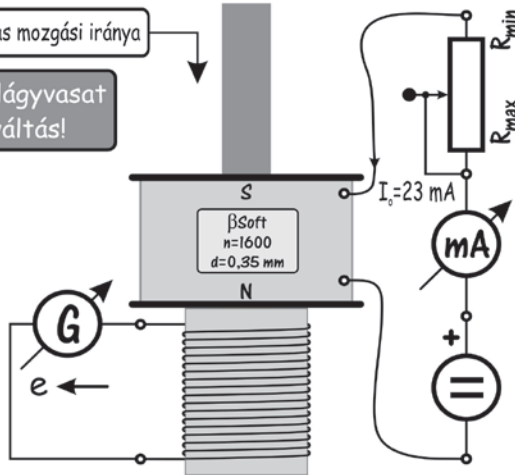
a lágyvas mozgási iránya

Ha megfordítjuk a lágyvasat nem történik pólusváltás!

Következtetések:

$$\begin{aligned} H_N^S &= \text{állandó} < 0 \\ H &= hI_0; B = \mu H \\ \Delta B &= \Delta \mu H \\ \Delta \mu &> 0; \Delta B > 0 \\ \Delta |B_N^S| > 0 &\rightarrow e < 0 \end{aligned}$$

A lágyvas betolása tekercsbe ($\Delta \mu$) a mágneses indukciót növeli (ΔB), a H értéke állandó marad. A galvanométer balra tér ki.



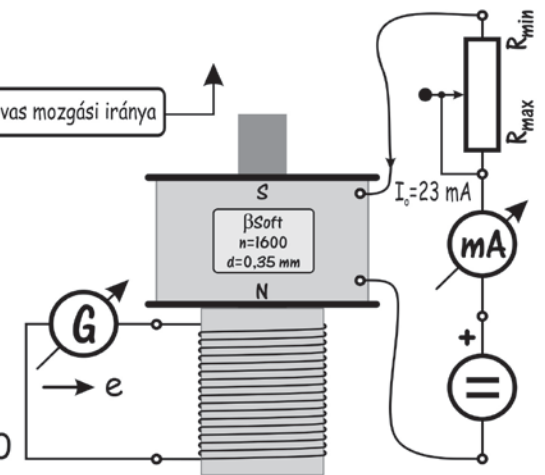
D4. kísérlet

a lágyvas mozgási iránya

Következtetések:

$$\begin{aligned} H_N^S &= \text{állandó} < 0 \\ H &= hI_0; B = \mu H \\ \Delta B &= \Delta \mu H \\ \Delta \mu &< 0; \Delta B < 0 \\ \Delta |B_N^S| < 0 &\rightarrow e > 0 \end{aligned}$$

A lágyvas kihúzása a tekercsből ($\Delta \mu$) a mágneses indukciót csökkenti (ΔB), a H értéke állandó marad. A galvanométer jobbra tér ki.



Okkereső köztes összefoglaló

A D. kísérletsorozatot összegezve megállapíthatjuk:

- Az áramjárta tekercsben levő lágyvas, mozgatás nélkül nem kelt feszültséget.
- A lágyvasat mozgatva a mágneses tér nem változik ($\Delta H = 0$), a tekercsben mégis keletkezik feszültség, ezt jól kimutatta a galvanométer (*vigyáznunk kellett, ne égjen*).
- A $\Delta \mu$ valójában a mágneses indukció változását jelenti.
- A lágyvas megfordítása nem változtatott feszültség polaritást, vagyis csak a közeg tulajdonságainak megváltozásáról lehet szó.
- A galvanométer kitérési iránya összefüggésben áll a mágneses tér polaritásával és a lágyvas mozgatási irányával, vagyis a $\Delta \mu$ -vel.
- Az e indukált feszültség arányos a mozgatás sebességével. Az e legnagyobb értéke **100 mV** nagyságrendű (*lassú mozgatás és kis tekercsáram mellett*).

Összegezve: az indukált feszültséget **nem** csak a mágneses tér (H) változásával hozhatjuk létre, hanem a mágneses közeg megváltoztatásával is ($\Delta \mu$). Az eddigi kísérleteinkben valójában mindig a mágneses indukció (B) változott, az **ok** a **mágneses indukció változása**, az **okozat** az e indukált feszültség: $\Delta B \rightarrow e$.

E. Kísérletsorozat

A diákjaim tudják, hogyha a tanárunk valami olyan kísérletet mutat, olyasvalamiről beszél, aminek látszólag semmi köze sincs ahhoz, amiről épp tanulnak, de nem nagyon értik, akkor jól kell figyelni, mert valahol itt lesz a dolog megfejtése, a kulcsa. Ha egy műanyagpoharat színültig

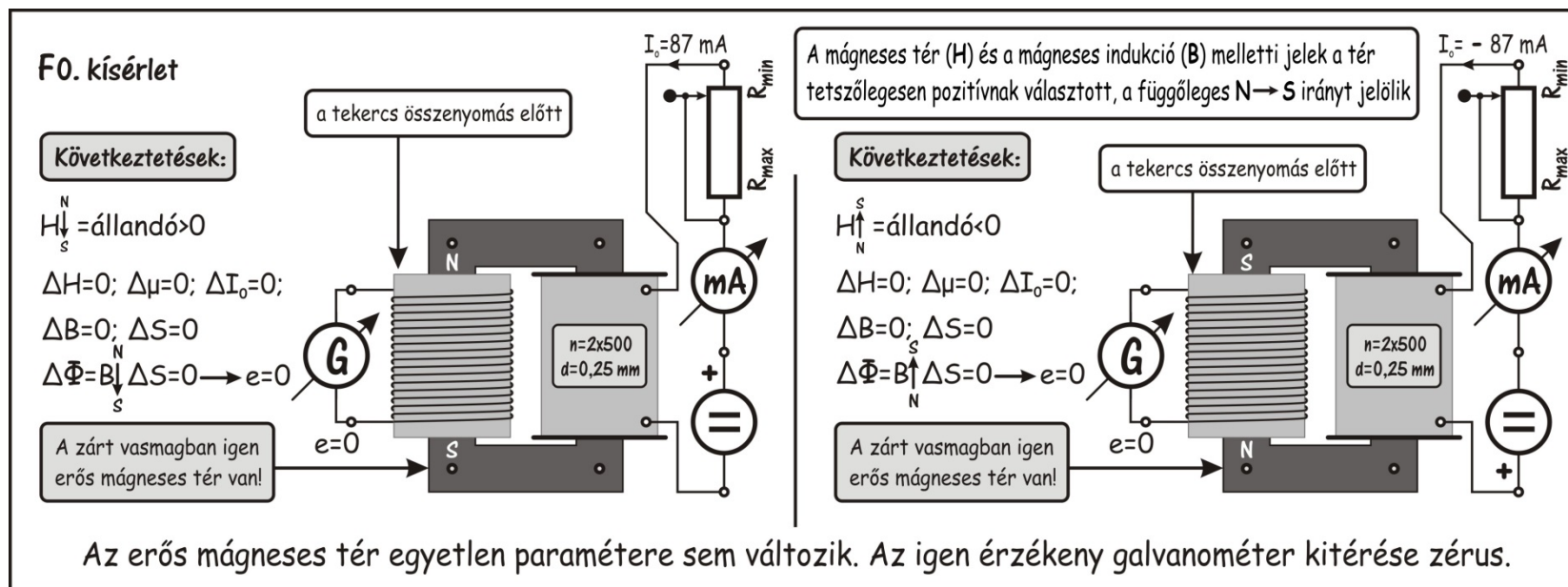


megtöltünk vízzel, majd felemeljük, hogy igyunk belőle, a víz kicsordul a pohárból. Az egyetlen magyarázat csak az lehet, hogy kisebb lett a pohár térfogata, ennek pedig csak a keresztmetszet csökkenése lehet az oka, hiszen a magasság nem változott. *Az eredmény egyértelmű: az összes zárt, azonos hosszúságú görbe közül a kör zárja be a legnagyobb területet.* Ha sikerül a ΔS -sel, akár csak egy nagyon kis feszültséget is kelteni, akkor az eddig elfogadott $\Delta B \rightarrow e$ helyett a fluxusváltozás léphet be alapokként. $\Phi = BS = \mu h I_0 S$, $\Delta \Phi = \Delta BS$, vagy $\Delta \Phi = B \Delta S$. Bizonyára, majd felírhatjuk: $\Delta \Phi \rightarrow e$, ebbe „beleférnek” az eddigi kísérletek részeredményei!

F. Kísérletsorozat

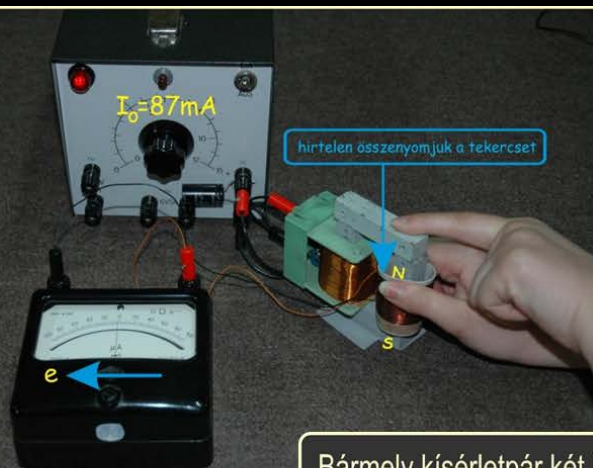
A kis tekercset, mintegy négy évtizeddel ezelőtt, úgy képeztem ki, hogy a keresztmetszetét megváltoztathassam. Mivel igen kis felületváltozásra számíthatunk, ráadásul az eddigi változá-

sokhoz képest jóval lassúbbakra is, tehát igen erős mágneses teret, mágneses indukciót hoztunk létre egy zárt vasmagban. Az állandó mágneses tér, illetve az állandó mágneses indukció itt sem kelt feszültséget (**F0. kísérlet**).



A tekercs gyors összenyomásával a körből más alakú görbe lett, az általa bezárt terület kisebb ($\Delta S < 0$), és egy igen kis feszültség keletkezik a kis tekercsben. Visszaengedéskor ($\Delta S > 0$) ugyancsak kicsi, de ellentétes irányú feszültség jön létre. Mivel $\Delta \Phi = \mu h I_0 \Delta S$, ha **S** keresztmetszet változik, akkor változik a mágneses fluxus is. A mágneses teret létrehozó áram irányának megváltoztatásával, az eddigiekkel ellentétes polaritású feszültségeket kapunk (**F1. kísérlet**, **F2. kísérlet**, **F3. kísérlet** és **F4. kísérlet**). A levonható következtetéseket az alábbiakban foglaljuk össze:

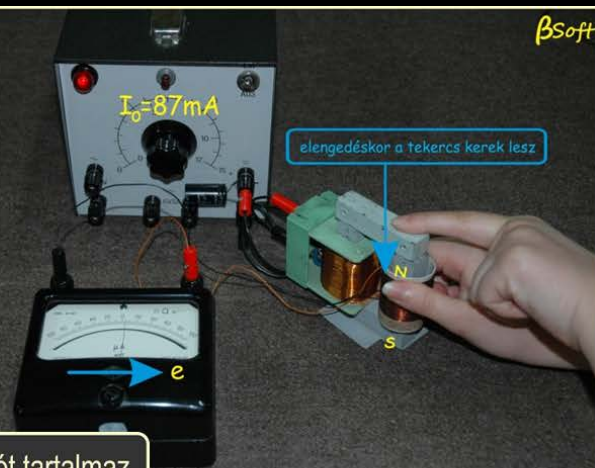
F1



Bármely kísérletpár két logikai negációt tartalmaz

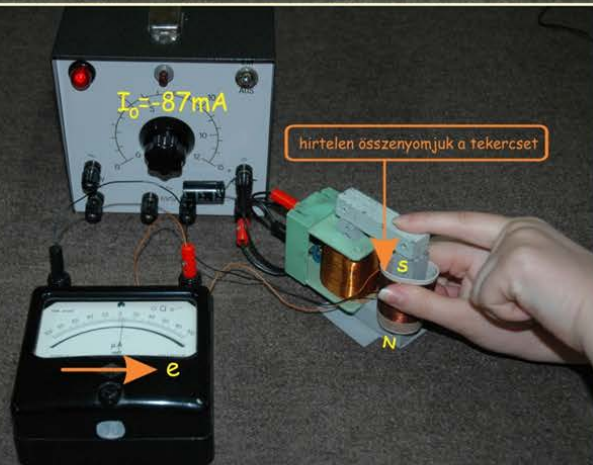
$$B \downarrow > 0; \Delta S < 0; \Delta \Phi < 0 \rightarrow e < 0$$

F2



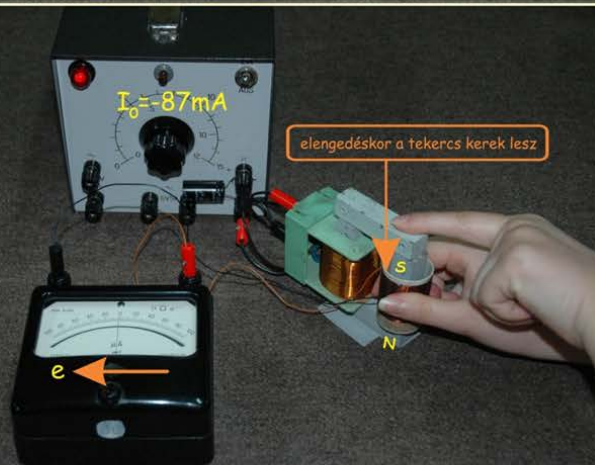
$$B \downarrow > 0; \Delta S > 0; \Delta \Phi > 0 \rightarrow e > 0$$

F3



$$B \uparrow < 0; \Delta S < 0; \Delta |\Phi| < 0 \rightarrow e > 0$$

F4



$$B \uparrow < 0; \Delta S > 0; \Delta |\Phi| > 0 \rightarrow e < 0$$

F1. kísérlet

Következtetések:

$$B_s^N = \text{állandó} > 0$$

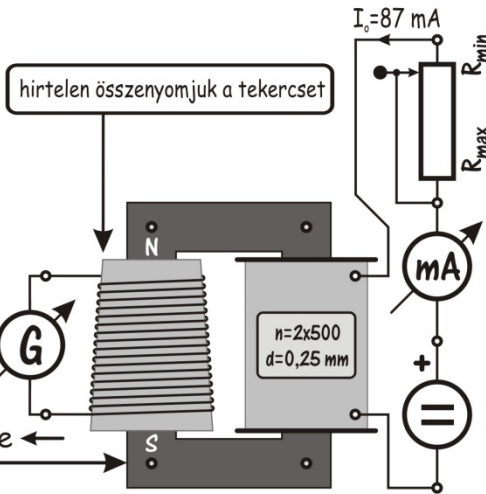
$$\Delta H = 0; \Delta \mu = 0; \Delta I_0 = 0;$$

$$\Delta B = 0; \Delta S < 0$$

$$\Delta \Phi = B_s^N \Delta S < 0 \rightarrow e < 0$$

A zárt vasmagban igen erős mágneses tér van!

Az erős mágneses tér egyetlen paramétere sem változik. Ha hirtelen összenyomjuk a tekercset ($\Delta S < 0$), a galvanométer balra tér ki.



F2. kísérlet

Következtetések:

$$B_s^N = \text{állandó} > 0$$

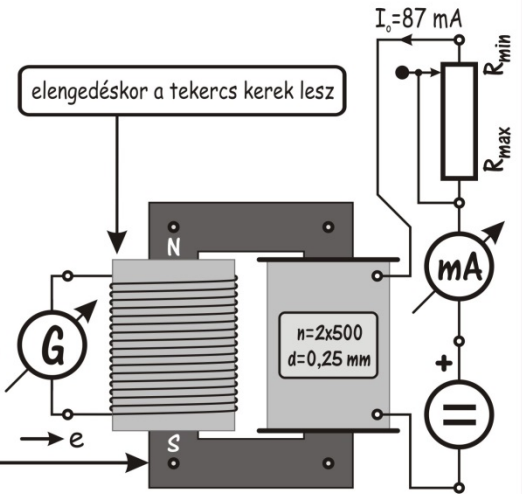
$$\Delta H = 0; \Delta \mu = 0; \Delta I_0 = 0;$$

$$\Delta B = 0; \Delta S > 0$$

$$\Delta \Phi = B_s^N \Delta S > 0 \rightarrow e > 0$$

A zárt vasmagban igen erős mágneses tér van!

Az erős mágneses tér egyetlen paramétere sem változik. Ha megszüntetjük az összenyomást ($\Delta S > 0$), a galvanométer jobbra tér ki.



F3. kísérlet

Következtetések:

$$B_N^S = \text{állandó} < 0$$

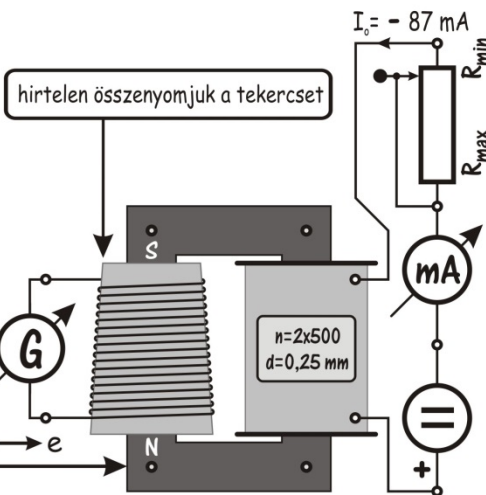
$$\Delta H = 0; \Delta \mu = 0; \Delta I_0 = 0;$$

$$\Delta B = 0; \Delta S < 0$$

$$\Delta \Phi = B_N^S \Delta S > 0 \rightarrow e > 0$$

A zárt vasmagban igen erős mágneses tér van!

Az erős mágneses tér egyetlen paramétere sem változik. Ha hirtelen összenyomjuk a tekercset ($\Delta S < 0$), a galvanométer jobbra tér ki.



F4. kísérlet

Következtetések:

$$B_N^S = \text{állandó} < 0$$

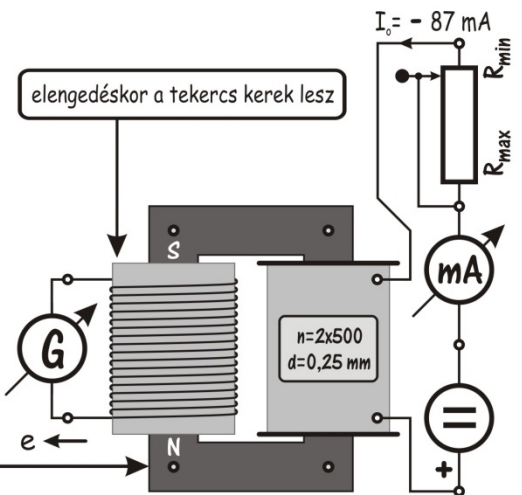
$$\Delta H = 0; \Delta \mu = 0; \Delta I_0 = 0;$$

$$\Delta B = 0; \Delta S > 0$$

$$\Delta \Phi = B_N^S \Delta S < 0 \rightarrow e < 0$$

A zárt vasmagban igen erős mágneses tér van!

Az erős mágneses tér egyetlen paramétere sem változik. Ha megszüntetjük az összenyomást ($\Delta S > 0$), a galvanométer balra tér ki.



Okkereső köztes összefoglaló

Az **F. kísérletsorozat**ot összegezve megállapíthatjuk:

- Az igen erős mágneses tér egyetlen paramétere sem változik ($\Delta \mathbf{B} = \mathbf{0}$). A kis tekercsben nem keletkezik feszültség.
- Ha hirtelen összenyomjuk a tekercset ($\Delta S < 0$), majd elengedjük ($\Delta S > 0$) a kis tekercsben alig észlelhető feszültség keletkezik. Ilyenkor a mágneses indukció nem változik ($\Delta \mathbf{B} = \mathbf{0}$), csak a mágneses fluxust változtatjuk meg ($|\Delta \Phi| > 0$).
- A galvanométer kitérési iránya összefüggésben áll a mágneses tér polaritásával és a tekercs keresztmetszet-változásával (ΔS).
- Az e indukált feszültség arányos a felületváltozás sebességével. Az e legnagyobb értéke **tized mV** nagyságrendű (*a nagyon lassú és kismértékű változás miatt*).

Összegezve: az indukált feszültséget **nem** csak a mágneses indukció ($\mathbf{B}$) változásával hozhatjuk létre, hanem a kis tekercs felületének változásával is (ΔS). $\Phi = \mathbf{B}S$; $\Delta \Phi = \Delta \mathbf{B}S$, vagy $\Delta \Phi = \mathbf{B}\Delta S$. Az eddigi kísérleteinkben mindig a mágneses fluxus változott ($\Delta \Phi$), a legtágabb **ok-rendszer a mágneses fluxus változása, az okozat az e indukált feszültség: $\Delta \Phi \rightarrow e$.**

Végső összefoglaló

Lezárult a beígért hat kísérletsorozat. Az egyes sorozatokat a vélt történelmi sorrendben állítottuk össze, egyre tágítva az ok-rendszer fogalmi körét. A köztes összefoglalókat is „összegezve”, a végső következtetéseket az alábbiakban foglaljuk össze:

- A kis tekercsben csak akkor keletkezik feszültség, ha valamilyen módon megváltozik a mágneses fluxus (*Faraday első tíz éve*).

- A keletkezett feszültség nagysága arányos a mágneses fluxus változási sebességével.
- A keletkezett feszültség polaritása egyértelmű összefüggésben áll a változás irányával és a mágneses tér polaritásával. *A pontos összefüggés ezekből a kísérletekből még nem adható meg. Talán abból kellene kiindulnunk, hogy nem csak elektromos feszültséget keltettünk, hanem elektromos munkavégzésre is alkalmas energiaforrást hoztunk létre, az energia pedig csak munkából származhat...*

Összegezve: Felfedeztük az elektromágneses indukciót! Nagyjából megfogalmaztuk a törvényeit. A fenti kísérletsorozatokban megfigyelt jelenséget **elektromágneses indukciónak** nevezzük. Az elektromágneses indukció során egy változó fluxus az őt körülölelő menetben egy **$\mathbf{e}$** feszültséget kelt (a bemutatott néhány kísérlet alapján csak ennyit mondhatunk). A hat kísérletsorozat harmincnál is több elemi kísérletét összefoglalva felírhatjuk az elektromágneses indukció alapképletét: **$\mathbf{e} = k\Delta\Phi/\Delta t$** , vagyis az indukált feszültség nagysága arányos a mágneses fluxus változási sebességével. Amikor az órán ezt kijelentettem, sokszor akadtak olyan diákok, akik közbeszóltak (nálam ezt szabad, egyenesen ajánlott), hogy a galvanométeren áram folyt keresztül, vagyis munkavégzés történt, honnan volt az energia? Megdicsérem, és bejelentem a következő óra témáját: A **k** arányossági tényező meghatározása, az **ok** és az **okozat** köreinek további bővítése. Kapnak egy házi feladatot is: a bolhapiacon megvételre ajánlanak egy kerékpárdinamót. Hogyan próbálsz ki, ha semmi sincs nálad, csak némi aprópénz? A kérdésre számítva, „teljesen véletlenül” van az asztalon egy kis mágnesrúd, meg egy alumíniumcső. Elmagyarázom nekik, hogy az alumínium szigeteli a gravitációs teret, és ezért a mágnesrúd benne kisebb sebességgel esik, mint kívül. Kipróbáljuk, az alumínium tényleg szigeteli a gravitációs teret! Nem hiszik, mert tudják, hogy az egész csak átverés. Majd holnap meglátjuk!

Bartos-Elekes István, beistvan@yahoo.com
kísérletező diák: Munkácsi Enikő, enci_m@yahoo.com