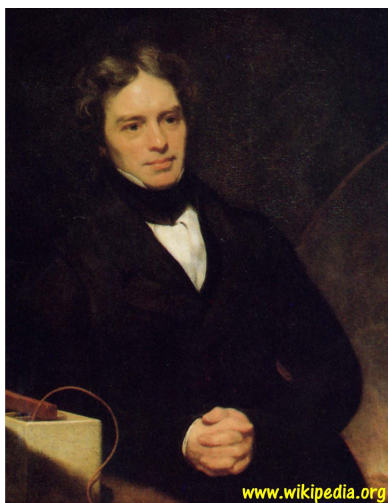


Fedezzük fel az elektromágneses indukciót! dr. Bartos-Elekes István



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 feltételezte, hogy minden jelenség **ok-okozat rendszere** fordítva is igaz. Ebből a nem mindenre alkalmazható elvből kiindulva, majd azt kiegészítve, jutott el Faraday az elektromágneses indukció felfedezéséig. A bemutatásra kerülő elemi kísérletek egyre tágítják az **ok** fogalmi körét, de mindig ugyanazt a jelenséget, **okozatot** hozták létre. Természetesen megpróbálom korrigálni az utóbbi 30 év 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. Nyitott 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.

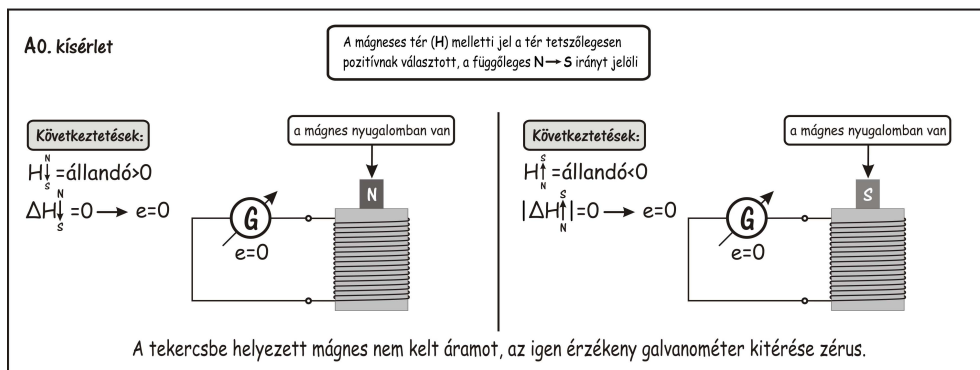
Michael Faraday-t a mindenkori kísérleti fizika egyik legnagyszerűbb tudósának tartják. Néhány tudománytörténész úgy emlegeti őt, mint a természettudomány-történet legnagyobb kísérletezőjét.

1821. A kor tudósai tudták: az elektromos áramnak van mágneses tere. 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...

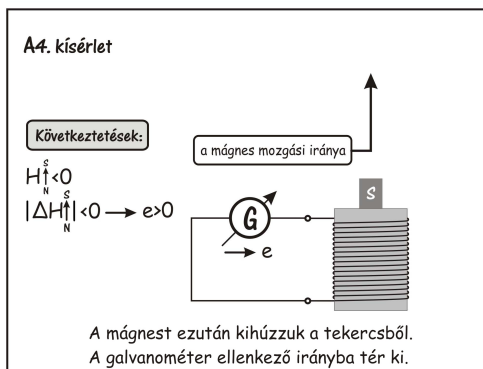
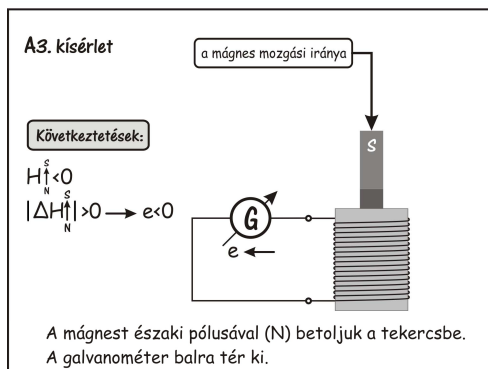
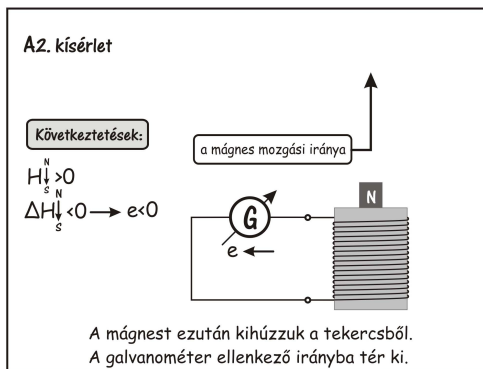
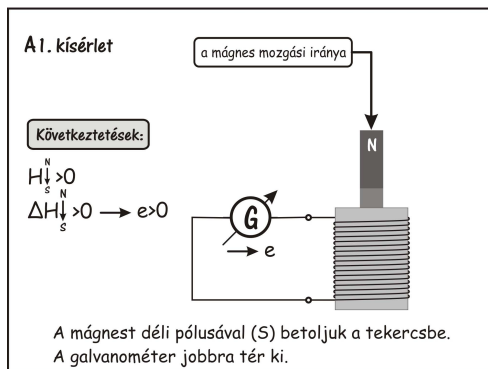
A mindenkori, a témával kapcsolatos fizikaóráimhoz hasonlóan, **hat kísérletsorozatban** fogjuk tanulmányozni a mágneses tér és egy kis tekercs fizikai szempontból lehetséges kölcsönös helyzeteiből adódó jelenségeket. Egyre bővítve a jelenséget létrehozó fizikai mennyiségek körét (**okok**), az addig már „felfedezettek” 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 (*informatikus nyelven szólva: két bit négy állapotot határoz meg*). A mellékelt DVD-n megtalálható a kísérletsorozat Power Point-os, valódi kísérletek fényképeiből összeállított bemutatója, ahol a mintegy harminc elemi kísérlet látszólagos hasonlóságából származó egyhangúságot, a mindig nagyon hasonlóan megszólaló, de mindig más **Bolero**-val igyekeztem feloldani.

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



ban 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



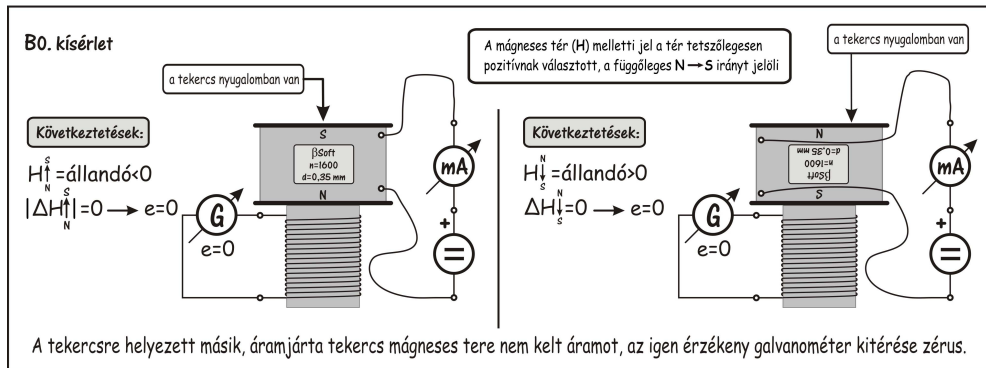
kísérletekből (A1. kísérlet, A2. kísérlet, A3. kísérlet és A4. kísérlet) levonható következtetéseket az alábbiakban foglaljuk össze:

Okkereső, köztes összefoglaló. Az A. kísérletsorozatot összegezve megállapíthatjuk:

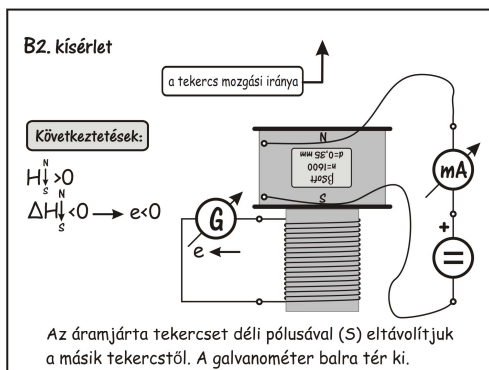
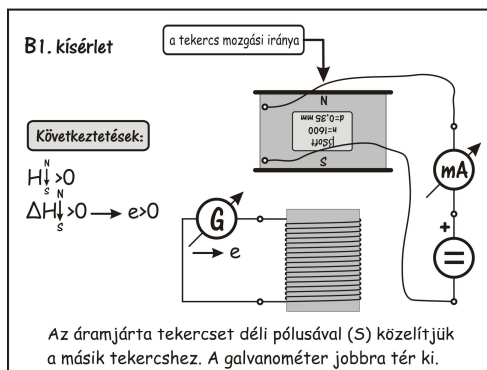
- Ha nem mozgatjuk a mágneset, nem keletkezik feszültség.
- A mágneset ki-be mozgatva a mágneses tér változása (ΔH) a tekercsben feszültséget indukált, ezt jól kimutatta a galvanométer.
- A galvanométer kitérés iránya összefüggésben áll a mágneses tér polaritásával és mozgatási irányával.
- Az e indukált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

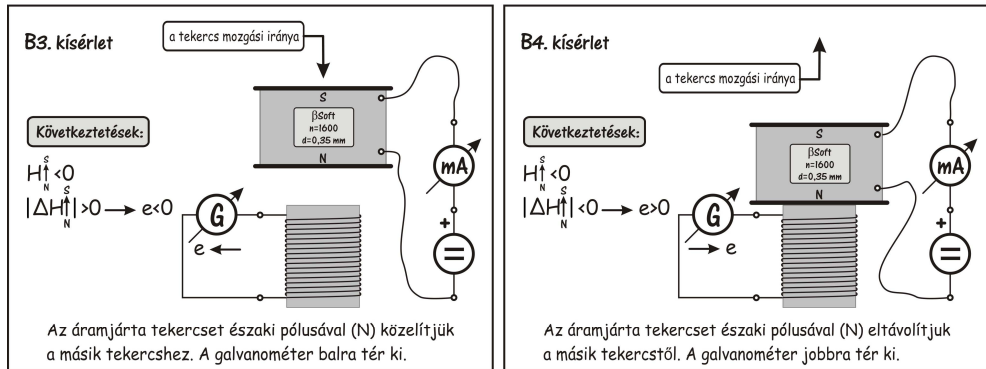
Összegezve: az indukált feszültséget csak a mágneses tér (H) változásával hozhatjuk létre, az ok a mágneses tér változása, az okozat az e indukált feszültség. Felírhatjuk, hogy a ΔH -nak következménye az e indukált feszültség: $\Delta H \rightarrow e$.

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. Mindezekelőtt 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





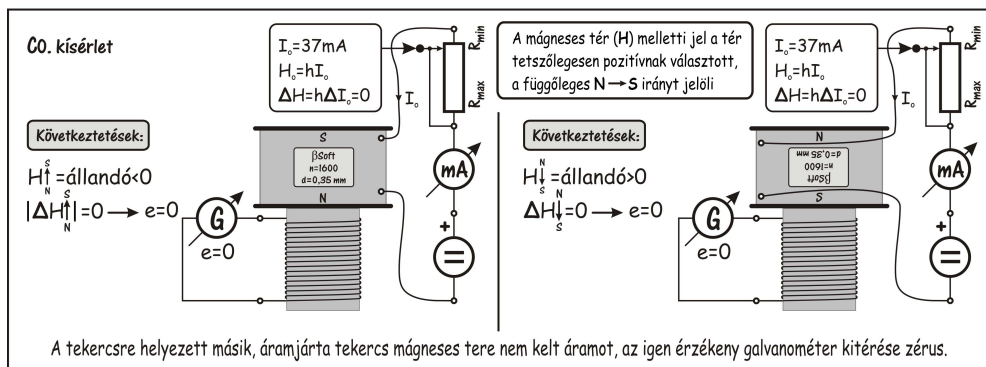
továbbiakban, az áramjárta tekercssel eltérítettük egy oszcilloszkóp idővonalát, majd a Lorentz-erő biztos képlete segítségével beállítottuk, és a tekercsre fel is írtuk a mágneses pólusait. Az áramjárta tekercs pólusai biztos ismeretében, a tekercsrel megismételtük az előbbi sorozat elemi kísérleteit (**B1. kísérlet**, **B2. kísérlet**, **B3. kísérlet** és **B4. kísérlet**). A levonható következtetéseket az alábbiakban foglaljuk össze:

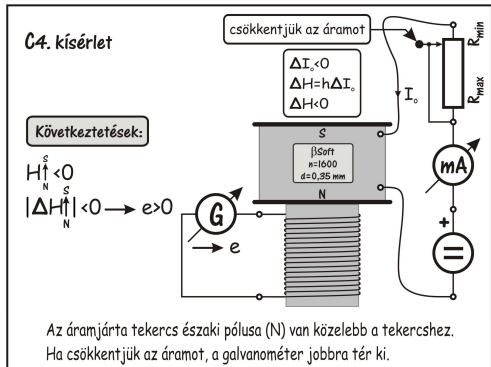
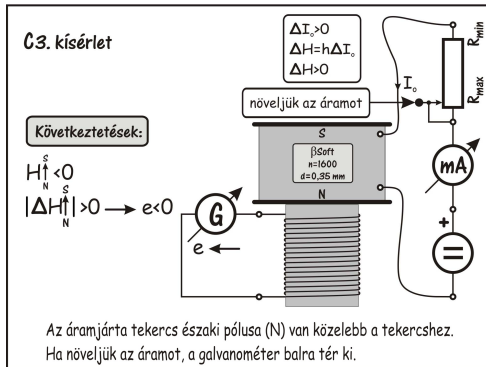
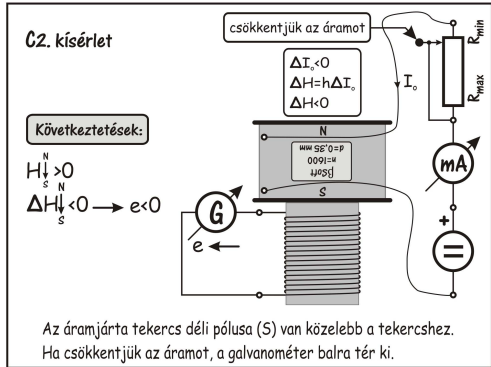
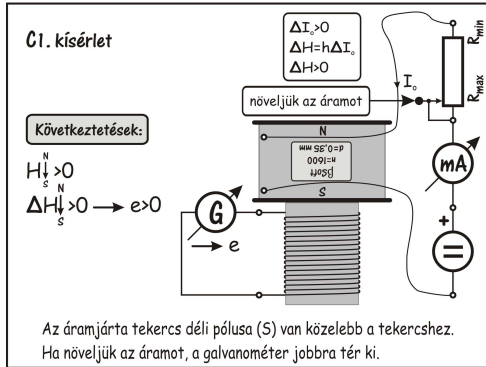
Okkereső, köztes összefoglaló. A **B. kísérletsorozat**ot összegezve megállapíthatjuk:

- 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 kitérés iránya összefüggésben áll a mágneses tér polaritásával és mozgatási 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





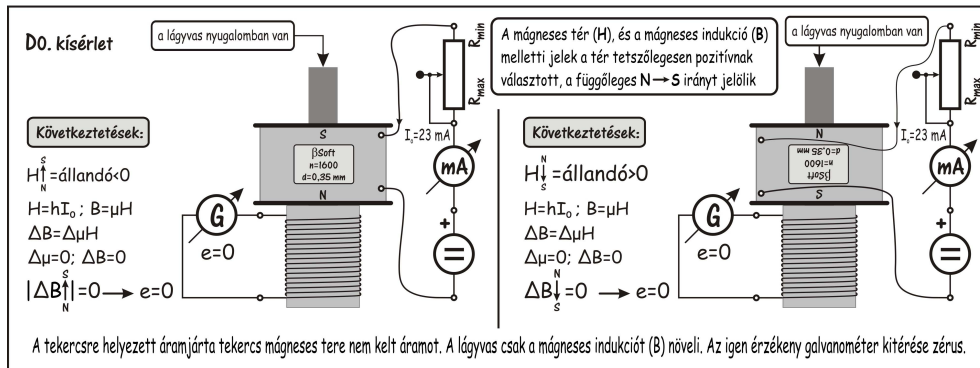
nincs indukált feszültség (**C0. kísérlet**), majd igazoljuk, hogy a tekercsen átfolyó áram megváltozása a közelében levő másik tekercsben áramot indukál (**C1. kísérlet**, **C2. kísérlet**, **C3. kísérlet** és **C4. kísérlet**). *Elkerültük a mechanikai mozgást.* Csak a tekercsen átfolyó áramot változtattuk. 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 foglalkozunk össze:

Okkereső, köztes összefoglaló. A **C. kísérletsorozat**ot összegezve megállapíthatjuk:

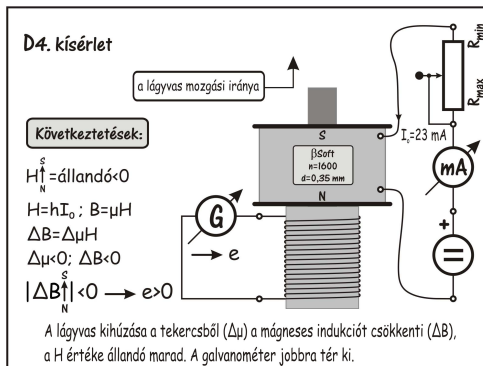
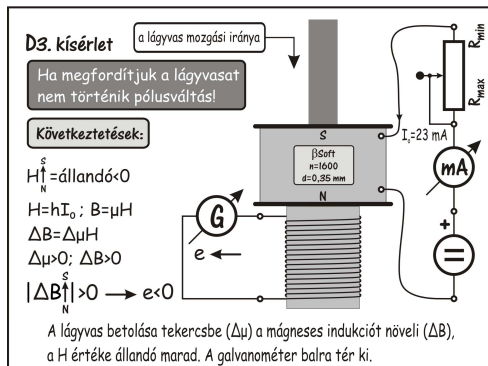
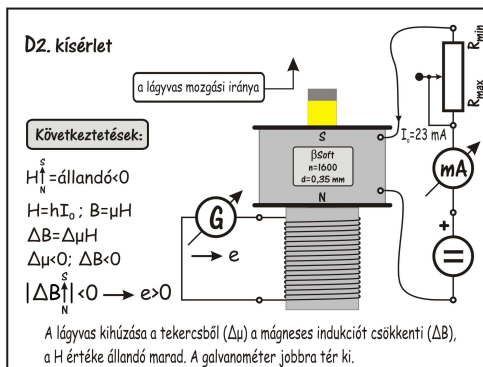
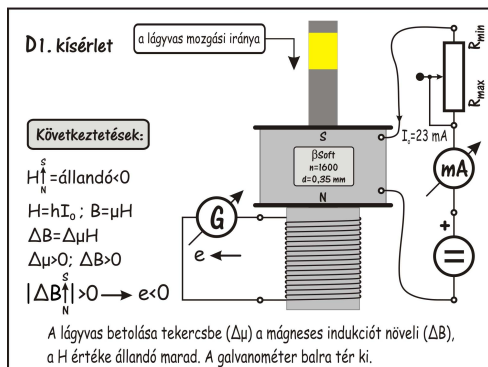
- Ha nem változtatjuk az áramerősséget a tekercsben, nem keletkezik feszültség.
- Az áramerősséget változtatva a mágneses tér változása (ΔH) a tekercsben feszültséget indukált, ezt jól kimutatta a galvanométer.
- A galvanométer kitérés iránya összefüggésben áll a mágneses tér polaritásával és az áram 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 lágtyvasat (ez nem mágneseződik meg) helyeztünk az áramjárta tekercsbe. Felhívom a kezdő kísérletezők figyelmét arra, hogy csak a lágtyvas 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: $B=\mu H$, $\Delta B=\Delta\mu H_0$, tehát az eddigi három **ok** közül bármelyik megváltozhatott (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:

Okkereső, köztes összefoglaló. A **D. kísérletsorozat**ot 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 ki 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, $\Delta B \rightarrow e$.

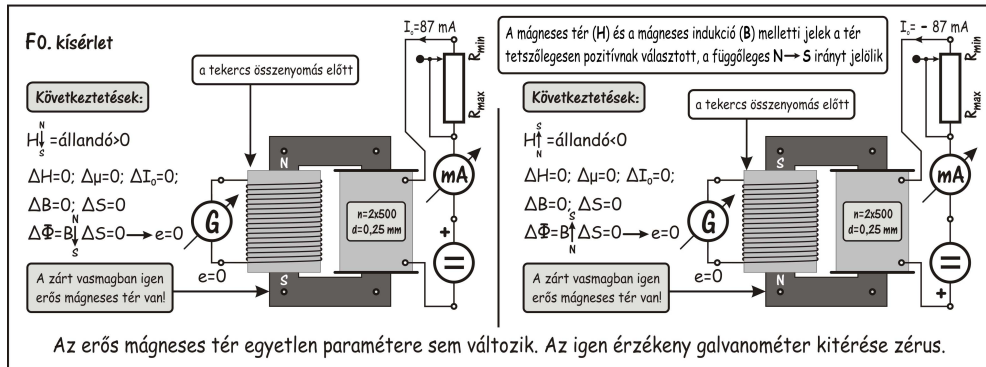
E. kísérletsorozat. A diákjaim tudják, hogyha a tanárunk valami olyan kísérletet mutat, olyasvalamiről beszél, aminek látszólag semmi köze sincs ahhoz, amiről épp tanulnak, de nem nagyon értik, akkor jól kell figyelni, mert valahol itt lesz a dolog megfjtése, a kulcsa. Ha



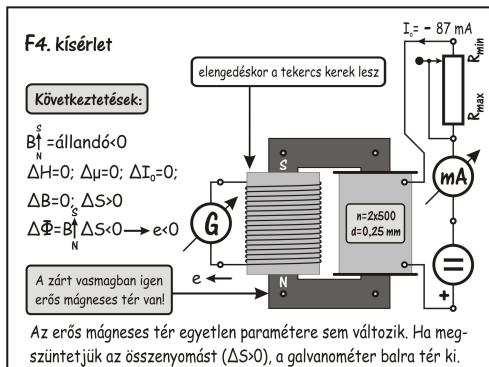
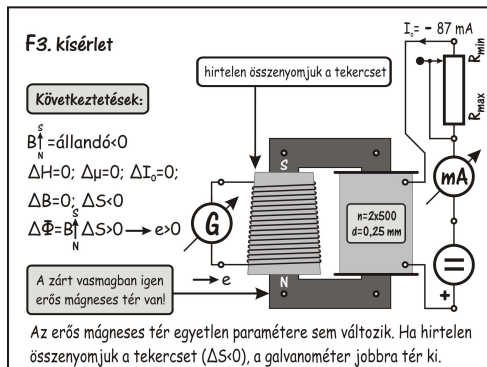
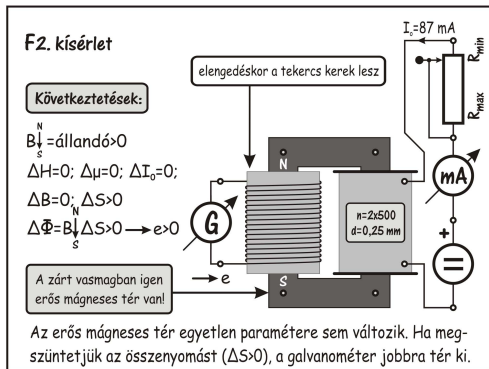
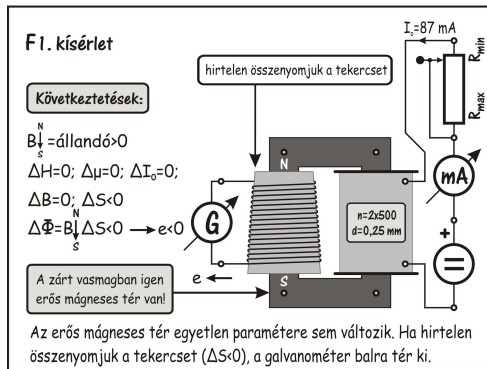
egy műanyagpoharat színültig megtöltünk vízzel, majd felemeljük, hogy igyunk belőle, a víz kicsordul a pohárból. Az egyetlen magyarázat csak az lehet, hogy kisebb lett a pohár térfogata, ennek pedig csak a keresztmetszet csökkenése lehet az oka, hiszen a magasság nem változott. *Az eredmény egyértelmű: az összes zárt, azonos hosszúságú görbe közül a kör zárja be a legnagyobb területet.* Ha sikerül a ΔS -sel, akárcsak egy nagyon kis feszült-

séget 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 majd „belefér” az összes eddigi kísérlet!

F. kísérletsorozat. A kis tekercset, mintegy 30 évvel ezelőtt, úgy képeztem ki, hogy a keresztmetszetét megváltoztathassam. Mivel igen kis felületváltozásra számíthatunk, ráadásul az eddigi változásokhoz 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 változik, 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:

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 megfogalmazzuk a törvényeit. A fenti kísérletsorozatokban megfigyelt jelenséget **elektromágneses indukciónak** nevezzük. Az elektromágneses indukció során egy változó fluxus az őt körülölelő menetben egy e feszültséget kelt (*a bemutatott néhány kísérlet alapján csak ennyit mondhatunk*). A hat kísérletsorozat harmincnál is több elemi kísérletet összefoglalva felírhatjuk az elektromágneses indukció alapképletét: $e = k \Delta\Phi / \Delta t$, vagyis az indukált feszültség nagysága arányos a mágneses fluxus változási sebességével. A k arányossági tényező meghatározása, az **ok** és az **okozat** köreinek további bővítése egy hasonló kísérletsorozat témája lehet.

Nagyvárad, 2009. novemberében.