FIZIKA

Hőtan · Elektromosságtan

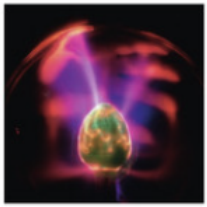
A kötet hátsó borítójának belsején egyedi kód található, melyet a **www.mozaweb.hu** *oldalon aktiválhatsz. Az aktiválás hozzáférést biztosít a kiadvány elektronikus változatához a honlapon található feltételekkel.*



Szerzők: dr. Jurisits József
dr. Szűcs József



A TERMÉSZETRŐL TIZENÉVESEKNEK



FIZIKA

Hőtan
Elektromosságtan 10

16., VÁLTOZATLAN KIADÁS

MOZAIK KIADÓ – SZEGED, 2018

Szerzők:

DR. JURISITS JÓZSEF
gimnáziumi tanár, szaktanácsadó

DR. SZŰCS JÓZSEF
egyetemi adjunktus

Bírálók:

DR. MOLNÁR MIKLÓS
egyetemi docens

DR. SZEGEDI ERVIN
vezetőtanár

DR. HILBERT MARGIT
egyetemi adjunktus

Felelős szerkesztő: Tóth Katalin
Borítóterv, tipográfia: Deák Ferenc, Reményfy Tamás
Fotók: Juhász Ferenc, Vadász Sándor
Rajzok: Ábrahám István
Ábrák: Szentirmai Péter, Végh Gyula
Kirendelt szakértők: Kempfner Zsófia, Szokolai Tibor, dr. Zsúdel László

Minden jog fenntartva, beleértve a sokszorosítás, a mű bővített, ill. rövidített változata kiadásának jogát is. A kiadó írásbeli hozzájárulása nélkül sem a teljes mű, sem annak része semmiféle formában (fotokópia, mikrofilm vagy más hordozó) nem sokszorosítható.

KERETTANTERV:
A bonyhádi Petőfi Sándor Evangélikus Gimnázium és Kollégium helyi tanterve
A dombóvári Illyés Gyula Gimnázium helyi tanterve

magyar nyomdatermék

ENGEDÉLYSZÁM: TKV/687-16/2013

ISBN 978 963 697 362 9

© MOZAIK KIADÓ – SZEGED, 2002



I. fejezet
HŐTAN

II. fejezet
ELEKTROSZTATIKA

III. fejezet
AZ ELEKTROMOS ÁRAM,
VEZETÉSI JELENSÉGEK

IV. fejezet
A MÁGNESES MEZŐ,
ELEKTROMÁGNESES INDUKCIÓ









Tartalom

HŐTAN

1. Hőtani alapjelenségek 10
1.1. Emlékeztető 10
1.2. A szilárd testek hőtágulásának törvényszerűségei 12
1.3. A folyadékok térfogati hőtágulása 16
2. Gázok állapotváltozásai 19
2.1. Emlékeztető. Állapotjelzők, állapotváltozások 19
2.2. Gázok állapotváltozása állandó nyomáson (izobár állapotváltozás) 21
2.3. Gázok állapotváltozása állandó térfogaton (izochor állapotváltozás) 25
2.4. Gázok állapotváltozása állandó hőmérsékleten (izotermikus állapotváltozás) 27
2.5. Az ideális gázok állapotváltozása, állapotegyenlete 30
3. Molekuláris hőelmélet 34
3.1. Emlékeztető 34
3.2. A gázok állapotváltozásainak molekuláris értelmezése 35
3.3. A gázok belső energiája, a hőtan I. főtétele 39
3.4. A gázok állapotváltozásainak energetikai vizsgálata 42
3.5. A termikus folyamatok iránya, a hőtan II. főtétele 48
4. Halmazállapot-változások 50
4.1. A halmazállapot-változások energetikai vizsgálata 50
4.2. A halmazállapot-változások molekuláris értelmezése 53
Összefoglalás 60

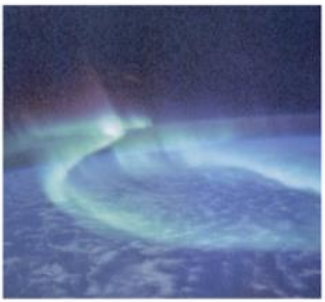
ELEKTROSZTATIKA

1. Elektrosztatikai alapismeretek 64
1.1. Emlékeztető 64
2. Coulomb törvénye. A töltésmegmaradás törvénye 69
3. Az elektromos mező jellemzése 72
3.1. Az elektromos térerősség 72
3.2. Az elektromos mező szemléltetése erővonalakkal 75
3.3. Az elektromos mező munkája. Az elektromos feszültség 78
4. Elektromos töltések, térerősség, potenciál a vezetőn 82
5. A kondenzátor. Az elektromos mező energiája 86
6. Kondenzátorok kapcsolása (kiegészítő anyag) 91
Összefoglalás 92

Tartalom









AZ ELEKTROMOS ÁRAM, VEZETÉSI JELENSÉGEK

1. Egyenáram. Áramköri alaptörvények 94
1.1. Emlékeztető 94
1.2. Az áramköri alapmennyiségek. Ohm törvénye 97
1.3. Mitől függ a fémes vezető ellenállása? 102
1.4. Az elektromos munka, teljesítmény és hőhatás 107
1.5. Fogyasztók soros kapcsolása 110
1.6. Fogyasztók párhuzamos kapcsolása 113
1.7. A fogyasztók soros és párhuzamos kapcsolásának gyakorlati alkalmazásai 116
1.8. Áramforrások modellezése. Üresjárási feszültség, belső ellenállás (kiegészítő anyag) 120
2. Vezetési jelenségek 124
2.1. Elektromos áram folyadékokban. Az elemi töltés meghatározása 124
2.2. Elektromos áram gázokban és vákuumban 126
2.3. Elektromos áram félvezetőkben 129
2.4. Félvezető eszközök 131
Összefoglalás 135

A MÁGNESES MEZŐ, ELEKTROMÁGNESES INDUKCIÓ

1. A mágneses mező 138
1.1. Emlékeztető 138
1.2. A mágneses indukcióvektor, indukcióvonalak, fluxus 141
1.3. Egyenes áramvezető és tekercs mágneses mezője 146
1.4. Elektromágnesek a gyakorlatban 150
1.5. A mágneses mező hatása mozgó töltésekre 153
2. Elektromágneses indukció 159
2.1. A mozgási elektromágneses indukció 159
2.2. Nyugalmi elektromágneses indukció 165
2.3. Az önindukció. A mágneses mező energiája 169
3. A váltakozó feszültségű áramkörök 173
3.1. A váltakozó feszültség előállítása és tulajdonságai 173
3.2. Ellenállások a váltakozó áramú áramkörben (kiegészítő anyag) 179
3.3. Teljesítmény a váltakozó áramú áramkörben (kiegészítő anyag) 182
3.4. A transzformátor 185
3.5. Elektromos balesetvédelem és elsősegélynyújtás 189
Összefoglalás 194



„... teljes meggyőződésem,
hogy a magasabb tudomány kifejlődése
csak ott lehetséges, hol ezen
magasabb tudomány egy művelt népnek
egészséges talaján nyugszik."

Eötvös József

Kedves Diákok!

A fizika tudománya a természetről szerzett tapasztalatokat rendszerezi, meghatározva ezekben a törvényszerű összefüggéseket. A fizikai ismeretek bővítése ezért elsősorban azt igényli, hogy **tudatos megfigyelésekkel, kísérletekkel** gyarapítsuk a természetről szerzett tapasztalatainkat. A tankönyv hőtani és elektromosságtani fejezetei egyaránt sok érdekes kísérlet élményét kínálják.

Ha a természettudományok vagy a műszaki tudományok mélyebb titkaival akarunk megismerkedni, netalán újabb titkokat tudósként felfedezni, **akkor használnunk kell a matematika nyelvét a természet fizikai törvényeinek pontos leírására.**

Gyakran hisszük azt, hogy a tanórán megértett anyagot már tudjuk is, pedig csak a tartós, felhasználásra alkalmas tudás az igazi. Ehhez **fontos a tanóra után a megfelelő anyagrész figyelmes elolvasása, a lényeg kiemelése, a gondolkodtató kérdésekkel és a feladatokkal való foglalkozás.** Ezért törekedtünk arra, hogy a könyv önállóan is használható legyen, hogy az a diák is megtanulhassa a tananyagot, aki az adott fizikaórán éppen nem volt jelen, vagy az órai gondolatmenetet nem tudta követni.

A megtanult ismeretek, módszerek nemcsak azok számára hasznosak, akik természettudományi vagy műszaki pályára készülnek, hanem arra is szolgálnak, hogy képesek legyünk bárhol használni a fizikaórákon megtanult észjárást, és otthon érezzük magunkat a természet és a modern technika világában.

A hőtan és az elektromosságtan tanulmányozásához kitartó türelmet, örömteli munkát és megérdemelt sikert kívánnak

e tankönyv Szerzői.

A TANKÖNYV HASZNÁLATÁT SEGÍTŐ JELZÉSEK

Sárga mezőbe a legfontosabb szabályokat, törvényeket, illetve a mennyiségi fogalmak meghatározását és kiszámítási módját tettük.

Vastag betűkkel a fontos megállapításokat és az új fogalmak nevét írtuk. A középszintű érettségi vizsga követelményeiben szereplő szakszavakat *-gal, az emelt szintűt pedig **-gal jelöli a könyv.

Bal oldali piros sávval hívjuk fel a figyelmet a kísérletekre, amelyek megismerése és megértése nélkül nem lehet feldolgozni a tananyagot.

Az egyes fejezeteket elmélyítő kisebb terjedelmű kiegészítő anyagot a bal oldali szürke sávról és a kisebb méretű betűkről ismerhetjük fel.

Az ábrák a szövegben leírtak könnyebb és jobb megértését segítik elő. Ezért célszerű együtt kezelni a szöveget és a hozzá tartozó ábrákat.

A *Megjegyzések* olyan gondolatok, amelyek nem tartoznak közvetlenül a tananyag logikai rendjébe, de fontos kiegészítői, értelmezői, elmélyítői annak.

A *Gondolkodtató kérdések* valójában számolás nélkül megoldható feladatok.

A *Feladatok* megoldásával elmélyíthetjük, jobban megérthetjük és alkalmazhatjuk az elméleti tananyagot.

Az *Olvasmányok* a természet, a technika, valamint a fizikatörténet érdekességeivel foglalkoznak. Betekintést adnak néhány természetkutató szellemi óriás életébe és munkásságába.

I. fejezet



HŐTAN



1. Hőtani alapjelenségek

1.1. Emlékeztető

A hőjelenségek mindennapi életünk természetes és fontos kísérői. Fázunk vagy megizzadunk; esik az eső vagy havazik; fűtjük a lakást; főzünk vagy ételt teszünk a hűtőszekrénybe; megbízhatóan működik autónk motorja és klímaberendezése – ezek mind-mind hőjelenségekkel kapcsolatos megállapítások.

Általános iskolában a hőjelenségek tanulmányozását az egyik fizikai alapmennyiség, a **hőmérséklet** bevezetésével kezdtük. Bőrünkkel is érzékelhetjük, hogy a különböző hőmérsékletű testek érintkezésénél, a **termikus kölcsönhatás során a két test hőmérséklete kiegyenlítődik.** A hőmérő tulajdonképpen saját hőmérsékletét jelzi, de ez – egy kis idő elteltével – a vele érintkező test hőmérsékletét is jelenti.

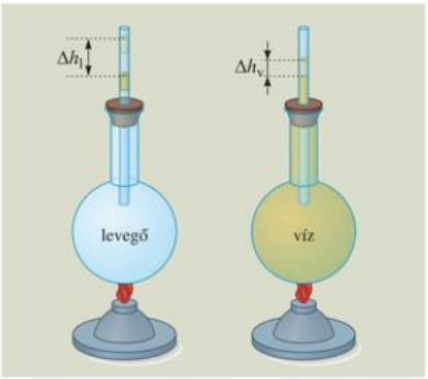
A hőmérsékleti skálák készítésének alapja, hogy **bizonyos természeti jelenségek mindig ugyanazon a hőmérsékleten következnek be.** A **Celsius-féle hőmérsékleti skála*** azt a hőmérsékleti értéket, amelyen a jég normál külső légnyomáson megolvad, 0 °C-nak, amelyen pedig a víz normál légnyomáson forr, 100 °C-nak tekinti.

A hőmérőkön a hőmérséklet leolvasását **az anyagok hőmérséklettel együtt változó fizikai jellemzői** (például térfogat, elektromos ellenállás stb.) teszik lehetővé. A leggyakrabban használt folyadékos hőmérőknél a folyadék hőtágulását használják fel.

A **testek hőtágulását*,** vagyis azt a törvényszerűséget, hogy melegítéskor nő, hűtéskor csökken a testek térfogata – tapasztalatból és korábbi tanulmányainkból is ismerhetjük.

Zárjunk le átfúrt gumidugóval egy 100-200 cm^3 térfogatú lombikot. A furatba helyezzünk egy 2-3 cm hosszú vízoszlopot tartalmazó üvegcsövet! Ha megfogjuk a lombikot, a szobahőmérsékletnél melegebb kezünk a bezárt levegő gyors tágulását idézi elő.

Ha ugyanezt a lombikot festett vízzel töltjük meg, és ugyanúgy melegítjük a kezünkkel, lényegesen lassúbb és kisebb mértékű változást figyelhetünk meg. Ezen belül is először kissé csökken a vízoszlop magassága, azután növekedni kezd.



10.1. Lombikba zárt levegő és víz hőtágulásának egyszerű vizsgálata

Borszeszégővel melegítve a lombikot, gyorsabb térfogatváltozást kapunk.

De miért csökkent a folyadék térfogata a melegítés elején? Valójában a folyadék térfogata nem csökkent, hanem az üvegedény előbb átmelegedett, és annak tágulása vezetett a folyadékszint kezdeti süllyedéséhez. A folyadékszint ezutáni emelkedése arra is utal, hogy a folyadék jobban tágul, mint az üveg.

Ezek az egyszerű kísérletek is mutatják, hogy a különböző halmazállapotú anyagok eltérő mértékben tágulnak a melegítéskor.

Mivel az anyagok hőtágulása az anyag mindegyik részén bekövetkezik, nagyobb térfogatú anyagoknál a hőtágulás mértéke is nagyobb lesz.

A testek hőtágulásának mértéke függ:
- **a kezdeti térfogattól vagy hosszúságtól,**
- **a hőmérséklet-változás nagyságától,**
- **az anyagi minőségtől, és ezen belül különösen az anyag halmazállapotától.**

Legnagyobb mértékben a légnemű halmazállapotú testek (gázok, gőzök) tágulnak. Kevésbé tágulnak a folyadékok, és a legkisebb mértékű a szilárd testek tágulása.

A testek hőtágulása a testeket alkotó részecskék (atomok, molekulák) hőmozgása alapján is értelmezhető.

A hőtágulás folyamatát szemléletesen a következő módon magyarázhatjuk: A hőmérséklet emelkedésével a testeket alkotó részecskék egyre intenzívebben mozognak. Így átlagosan nagyobb helyet foglalnak el a térben, ami az egész test térfogatának növekedését eredményezi. Hűléskor fordított a helyzet: a részecskék mozgása kisebb mértékű lesz. Így a térben elfoglalt helyük is kisebb lesz, vagyis az egész test térfogata csökken.

A gyakorlati életben a gépek, az épületek, a hidak tervezésénél (a káros deformációk, törések, repedések elkerülése érdekében) számolni kell a hőmérséklet-változással együtt járó hőtágulásokkal. A hőmérők készítéséhez, a pontos műszaki tervezésekhez is szükséges, hogy ismerjük a hőtágulás mértékének mennyiségi törvényszerűségeit. A következőkben ezekkel fogunk részletesen megismerkedni.



11.1. *Hogyan veszik figyelembe a hidak és csővezetékek tervezésénél a hőtágulást?*

MEGJEGYZÉSEK

1. *Anders Celsius* svéd csillagász az uppsalai csillagvizsgáló megalapítója és első igazgatója is volt. 1740-ben részt vett egy lappföldi expedícióban, melynek célja a Föld kerületének pontos meghatározása volt. Ezzel a méréssel először igazolták Newton feltételezését, mely szerint a Föld a pólus közelében kismértékben lapult.
   Nevéhez fűződik az 1742-ben bevezetett Celsius-skála. Celsius eredetileg a víz forráspontját vette 0 °C-nak, és fagyáspontját 100 °C-nak. A skála megfordítását Martin Strömer javasolta 1750-ben.



11.2. *Anders Celsius* (1701–1744) svéd csillagász, akitől a nálunk elterjedt hőmérsékleti skála származik

2. Az Egyesült Államokban a Celsius-skála helyett a Fahrenheit hőmérsékleti skálát használják. Itt a jég olvadáspontját 32 °F-kal, a víz normál külső nyomáson vett forráspontját pedig 212 °F-kal jelölik. Ennek a hőmérsékleti skálának a mértékegysége Fahrenheit-fok, jelölése: °F. A két skálán mért hőmérsékletek számértékeit könnyen átszámíthatjuk. Így pl. 20 °C-nak megfelel

$$T = \left(20 \cdot \frac{212-32}{100} + 32\right) °\mathrm{F} = 68\,°\mathrm{F},$$

vagy 50 °F-nak megfelel

$$T = \frac{50-32}{212-32} \cdot 100\,°\mathrm{C} = 10\,°\mathrm{C}.$$

1.2. A szilárd testek hőtágulásának törvényszerűségei

A SZILÁRD TESTEK LINEÁRIS HŐTÁGULÁSA

Lineáris vagy hosszanti hőtágulásról* beszélünk akkor, ha a szilárd test valamely hosszmérete a hőmérséklet növekedése közben növekszik.

A gyakorlatban elsősorban azon testek lineáris hőtágulását vizsgáljuk, amelyek esetén a hosszméret jóval nagyobb a keresztirányú méreteknél (pl. huzalok, rudak).

Végezzük el a következő kísérletet!
A *12.3. ábra* szerint rögzítsük egy fémcső egyik végét, majd kb. 1 m távolságban fektessünk a cső alá skála előtt mozgó mutatóval ellátott görgőt. Áramoltassunk a csövön át egyre magasabb hőmérsékletű vizet, és foglaljuk táblázatba a mutató vége által megtett s ív és a ΔT hőmérséklet-növekedés összetartozó értékeit.

Ha az r sugarú görgőhöz erősített mutató R hosszúságú, és a mutató vége s hosszúságú körívenmozdul el, akkor a hosszváltozást a $\Delta\ell = s \cdot \frac{r}{R}$ összefüggés alapján számíthatjuk ki.

Ha a mérés eredményét grafikonon ábrázoljuk, akkor a $\Delta\ell$ hosszváltozás és a ΔT hőmérséklet-változás között egyenes arányosságot tapasztalhatunk.

A homogén cső minden részletében egyenletesen tágul. Így várható, hogy ugyanakkora ΔT hőmérséklet-változásnál a cső 0,5 m-es szakasza csak feleannyit tágul, mint az 1 m hosszú csőszakasz. Ezt méréssel is ellenőrizhetjük.

Ugyanezzel a készülékkel igazolható, hogy a különböző anyagú testek lineáris hőtágulásának mértéke eltérő.

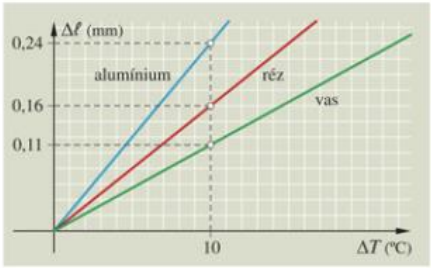
Egy adott test lineáris méretének változása ($\Delta\ell$)
- **egyenesen arányos a hőmérséklet megváltozásával (ΔT);**
- **egyenesen arányos az eredeti hosszal (ℓ_0);**
- **függ a testek anyagi minőségétől is.**

A $\Delta\ell$ hosszváltozást a következő összefüggésből számíthatjuk ki:

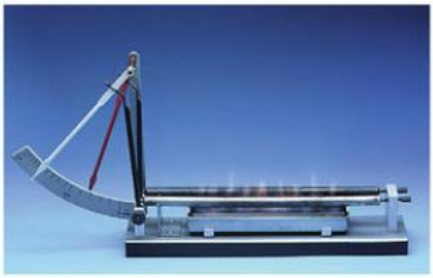
$$\Delta\ell = \alpha \cdot \ell_0 \cdot \Delta T.$$

Az α anyagi állandót lineáris hőtágulási tényezőnek* nevezzük. Mértékegysége: $\frac{1}{°C}$.

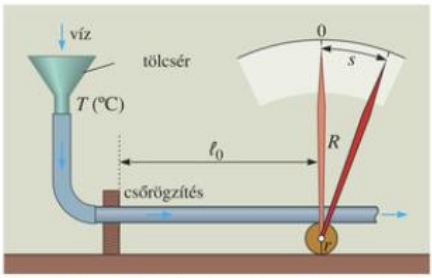
A lineáris hőtágulási tényező megmutatja, hogy mennyivel változik meg a test egységnyi hosszmérete, ha a hőmérséklet-változás 1 °C.



12.2. 1 m hosszú, különböző anyagból készült fémcsövek hosszváltozásának függése a hőmérséklet változásától



12.1. Szilárd testek lineáris hőtágulását vizsgáló kísérleti eszköz. (A fémrudakat égő borszeszlel melegíthetjük)



12.3. A $\Delta\ell$ hosszúságváltozás meghatározása görgős-mutatós áttéttel

Néhány szilárd anyag lineáris hőtágulási tényezőjének értéke (20 °C-on véve a kezdeti ℓ_0 hosszat):

Anyag neve	$\alpha\left(\frac{1}{°C}\cdot 10^{-5}\right)$
alumínium	2,4
ólom	2,8
réz	1,6
vas	1,1

Ha a megváltozott ℓ hosszúságot akarjuk megkapni, akkor az eredeti ℓ_0 kezdeti hosszúsághoz hozzáadjuk a $\Delta\ell$ hosszváltozást, így kapjuk a következő összefüggést:

$$\ell = \ell_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T).$$

A test térfogatának megváltozása (ΔV)
- **egyenesen arányos a hőmérséklet megváltozásával (ΔT),**
- **egyenesen arányos a test kezdeti térfogatával (V_0),**
- **és függ a testek anyagi minőségétől is.**

A ΔV térfogatváltozást a következő összefüggésből számíthatjuk ki:

$$\Delta V = \beta \cdot V_0 \cdot \Delta T.$$

A β az anyagi minőségre jellemző állandó, amelyet térfogati vagy köbös hőtágulási tényezőnek* nevezünk. Mértékegysége: $\frac{1}{°C}$.

A térfogati hőtágulási együttható megmutatja, hogy az egységnyi térfogatú szilárd testnek mekkora lesz a térfogatváltozása, ha a hőmérséklete 1 °C-kal változik meg.

SZILÁRD TESTEK TÉRFOGATI HŐTÁGULÁSA*

A szilárd testek **térfogati,** vagy más néven köbös hőtágulásának törvényszerűsége a lineáris hőtágulásához hasonló.

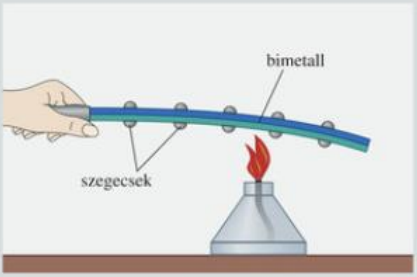
A megváltozott térfogatot egyből kiszámíthatjuk a következő összefüggésből:

$$V = V_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta T).$$

MEGJEGYZÉSEK

1. A lineáris hőtágulási tényező a szilárd testeknél elég kicsi, csak 10^{-5} nagyságrendű. Tehát a szilárd testek $\frac{\Delta\ell}{\ell_0}$ relatív hosszváltozása 1 °C hőmérséklet-változás hatására mindössze néhány ezred százalék.

2. Ha két különböző hőtágulási tényezőjű fémszalagot szegecseléssel vagy ponthegesztéssel összeerősítünk, akkor az így keletkezett bimetall (kettős fém) szalag melegítéskor ívben elhajlik úgy, hogy a jobban táguló lemez lesz a külső, nagyobb íven. Bimetallt olyan helyen használnak, ahol a hőmérséklet változásának hatására mechanikus berendezést (kapcsolót, szelepet stb.) akarnak működésbe léptetni. Ezzel tűzhelyek, vízmelegítők, fűtőberendezések biztonságos működtetése oldható meg.

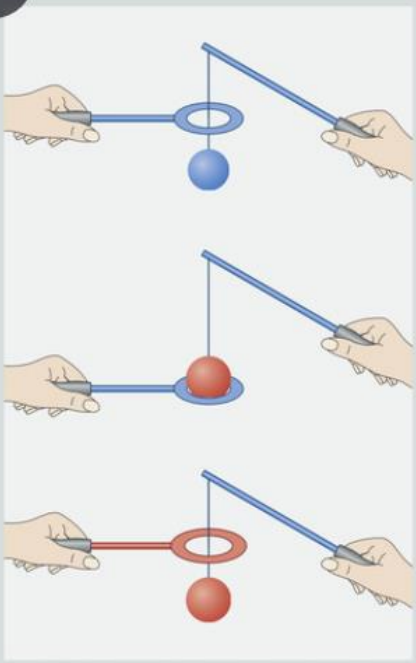


13.1. A bimetall szalag melegítés hatására meggörbül

3. Az építészetben azért használnak vasbeton szerkezetet, mert a vas és a beton anyaga közel azonos mértékben tágul. Így elkerülhetjük azt, hogy a szerkezetekben a hőmérséklet változásakor a hőtágulásból származó, nem kívánt belső feszítőerők keletkezzenek. A vasbeton szerkezet előnye az is, hogy a vasnak a húzó-, a betonnak pedig a nyomószilárdsága kiváló.

4. Régebben a vasúti sínek között hézagokat hagytak, hogy a hőmérséklet-változások következtében a síndarabok szabadon tágulhassanak. Ezért a vonatok ütemesen zakatoltak, amikor a kerekek a hézagokon átugrottak. Manapság viszont a síneket összehegesztik és erős betontalpakhoz rögzítik, ezek képesek ellenállni a táguláskor fellépő nagy erőknek. Így is előfordulhat, hogy nagy kánikulában a nem megfelelően rögzített vagy méretezett sínek elhajlanak.

5. Mivel a homogén anyagok tágulása egyenletes – az anyagokban táguláskor nem keletkeznek belső feszítőerők –, ezért a lemezeken vágott lyukak vagy az anyagtömbökben lévő üregek mérete hőtáguláskor éppen úgy változik, mintha ott is anyag lenne. Azaz a lyukakat és az üregeket körülvevő anyag „nem veszi észre" táguláskor vagy összehúzódáskor, hogy belül anyaghiány van. Egyszerűen szemléltethetjük ezt a 'S Gravesande [grévzend] -készülékkel, amely egy fémgolyóból és egy azzal közel egyenlő belső átmérőjű fémgyűrűből áll. Ha melegítjük a golyót, nem fér át a gyűrűn. Ha a gyűrűt is melegítjük, akkor a golyó ismét átfér a gyűrűn, mivel a gyűrű nyílása is kitágul.



14.1. *Mit jelképez az ábrán a kék és a piros szín?*

6. A szilárd testek köbös hőtágulási tényezője a táblázatokban külön nincs feltüntetve, mivel belátható, hogy az jó közelítéssel háromszorosa a lineáris tényezőnek: $\beta \approx 3 \cdot \alpha$.
Ezt egyszerűen bizonyíthatjuk is:
Vegyünk egy ℓ_0 élhosszúságú kockát, ennek térfogata: $V_0 = \ell_0^3$. Legyen a kocka anyagának lineáris hőtágulási tényezője α. Ha melegítjük a kockát, akkor az kitágul, minden élhossza megnövekszik. A megnövekedett élek hosszát a lineáris tágulási törvényből kapjuk meg:

$$\ell = \ell_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T).$$

A kocka megnövekedett térfogatát pedig a

$$V = \ell^3 = \ell_0^3 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)^3$$

összefüggésből számíthatjuk.
Elvégezve a köbre emelést, valamint a $V_0 = \ell_0^3$ helyettesítést, kapjuk:

$$V = V_0 \cdot [1 + 3\alpha \cdot \Delta T + 3 \cdot (\alpha \cdot \Delta T)^2 + (\alpha \cdot \Delta T)^3].$$

Mivel a szilárd testeknél az $\alpha \cdot \Delta T$ szorzat nagyságrendje kb. $10^{-5} \cdot 10^2 = 10^{-3}$, ezért a szorzat négyzete és köbe 10^{-6}, illetve 10^{-9} nagyságrendű. Így a zárójelen belül a harmadik és negyedik tag elhanyagolható az első két taghoz képest.

Így kapjuk, hogy $V \approx V_0 \cdot (1 + 3\alpha \cdot \Delta T)$.

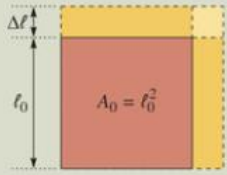
Ezt a köbös hőtágulási törvénnyel összevetve láthatjuk, hogy $\beta \approx 3 \cdot \alpha$.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK



1. Mikor kell nagyobb belógást hagyni a villamos távvezetékek szerelésénél: ha a szerelés télen alacsony hőmérsékleten, vagy ha nyári kánikulában történik?
2. A szekérkerék készítésénél a fémabroncsot melegen húzzák a bognárok a fából készült kerékre. Magyarázzuk meg, hogy miért!
3. Vajon miért készítik vékonyra a hőálló üvegedények falát?
4. Milyen hatással lehet a hőmérséklet változása egy ingaóra járására?
5. Hogyan illeszthetünk könnyedén egy csapágyat egy megfelelő méretű tengelyre?
6. Állapítsuk meg a *12.2. grafikonról,* hogy mekkora az alumínium, a réz és a vas hőtágulási tényezője!
7. Igazoljuk – a mellékelt ábrát használva –, hogy a testek hőtágulásánál a terület növekedését a $\Delta A = 2\alpha \cdot A_0 \cdot \Delta T$ összefüggéssel számíthatjuk!

7



FELADATOK

1. Mennyivel növekszik meg a hossza annak a 100 m hosszúságú alumíniumhuzalnak, amelynek a hőmérséklete 15 °C-ról 45 °C-ra nő meg? ($\alpha_a = 2{,}4 \cdot 10^{-5} \frac{1}{°C}$.)
2. Mekkora annak a rézrúdnak a hossza, amelyik 100 °C hőmérséklet-emelkedéskor 10 mm-rel lesz hosszabb? ($\alpha_r = 1{,}6 \cdot 10^{-5} \frac{1}{°C}$.)
3. Egy 10 m hosszúságú vashuzal hőmérséklete 20 °C. A huzalt felmelegítve a hossza 12 mm-rel változik meg. Mekkora lett a huzal hőmérséklete? ($\alpha_v = 1{,}1 \cdot 10^{-5} \frac{1}{°C}$.)
4. Egy fémrúd relatív hosszváltozása 0,368% lesz 200 °C hőmérséklet-emelkedés során.
   a) Mekkora a fém anyagának lineáris hőtágulási tényezője?
   b) Milyen anyagból készülhetett a rúd? (Használjuk a négyjegyű függvénytáblázatot!)
5. Az 1 dm^3 térfogatú, 20 °C hőmérsékletű alumíniumból készült kockát hány Celsius-fokra kell lehűteni, hogy a térfogata 1 cm^3-rel csökkenjen? ($\beta_a = 7{,}2 \cdot 10^{-5} \frac{1}{°C}$.)
6. Maximálisan mennyivel növekedhet meg annak a –15 °C hőmérsékletű jégtáblának a térfogata, amelynek mérete 6 m × 4 m × 0,2 m? ($\beta_j = 5{,}1 \cdot 10^{-5} \frac{1}{°C}$.)

1.3. A folyadékok térfogati hőtágulása

A gyakorlati életben gyakran kell számolnunk a folyadékok hőtágulásával is. Így pl. a vízmelegítők (bojlerek) tervezésénél gondoskodni kell a túlfolyóról is. Ezzel megelőzzük, hogy a melegedő folyadékok tágulásuk közben szétfeszítsék a tárolóedényeket. A precíziós hőmérők tervezésénél, készítésénél ugyancsak fontos, hogy ismerjük a folyadékok pontos tágulási törvényszerűségeit. A gépkocsihűtőknél is számolnunk kell a felmelegedett hűtőfolyadék tágulására, ezért használnak a hűtőrendszerben kiegyenlítő tartályt. Hasonló okból használnak tágulás kiegyenlítőt az egyedi tervezésű központifűtés-rendszereknél is.

A folyadékok hőtágulásának mennyiségi törvényszerűségeit is vizsgálhatjuk kísérleti úton.

Egy gumidugóval elzárt lombikban folyadékot melegítünk. A folyadék térfogatváltozását a lombikba benyúló vékony, A belső keresztmetszetű üvegcsőben lévő folyadékoszlop szintjének Δh változása alapján határozhatjuk meg ($\Delta V = A \cdot \Delta h$). Mérjük a lombikba benyúló hőmérővel a hőmérséklet ΔT változását, és ábrázoljuk ennek függvényében a térfogatváltozást. Végezzük el a mérést különböző V_0 kezdeti térfogatból kiindulva, illetve különböző anyagi minőségű folyadékokkal is.

A kísérlet elvégzésekor a folyadékok tágulására az alábbi törvényszerűségeket állapíthatjuk meg:

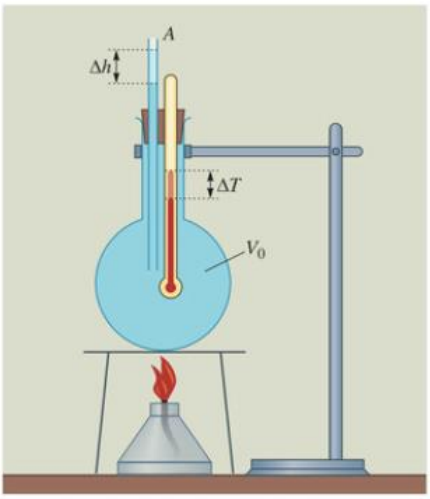
A folyadékok térfogatának megváltozása
- **egyenesen arányos a hőmérséklet változásával (ΔT),**
- **egyenesen arányos a kezdeti térfogattal: (V_0),**
- **és függ a folyadék anyagi minőségétől.**

Felírhatjuk a következő összefüggést:

$$\Delta V = \beta \cdot V_0 \cdot \Delta T.$$

A hőtágulás mértékét jellemző β anyagi állandót térfogati hőtágulási tényezőnek nevezzük. Mértékegysége: $\frac{1}{°C}$.

A térfogati hőtágulási tényező megmutatja, hogy egységnyi térfogatú folyadéknak mekkora lesz a térfogatváltozása, ha a folyadék hőmérséklete 1 °C-kal változik.



16.1. A folyadékok hőtágulását vizsgáló kísérleti összeállítás

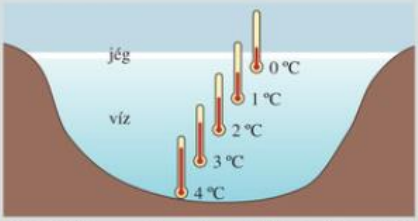
Néhány folyadék térfogati hőtágulási együtthatója 18 °C-ra vonatkoztatva:

Anyag neve	$\beta\left(\frac{1}{°C} \cdot 10^{-3}\right)$
aceton	1,43
alkohol	1,10
benzin	1,00
éter	1,62
higany	0,18
petróleum	0,92
salétromsav	1,24
terpentin	1,00
víz	0,13

Ha a tágulófolyadék vékony csövekben helyezkedik el, akkor a folyadékoszlop hosszának megváltozását úgyis kiszámíthatjuk, hogy a folyadék tágulását lineáris tágulásnak vesszük. Ekkor $\alpha = \frac{\beta}{3}$ lineáris hőtágulási tényezővel számolhatunk.

MEGJEGYZÉSEK

1. A folyadékok jobban tágulnak, mint a szilárd testek, térfogati hőtágulási együtthatójuk 10^{-4}–10^{-3} nagyságrendű, vagyis 1 °C hőmérséklet-változás esetén a folyadékok relatív térfogatváltozása 0,1–0,01%.
2. Folyadékos hőmérőkben legtöbbször higanyt vagy olyan folyadékot (pl. alkoholt) alkalmaznak, amelynek alacsony a fagyáspontja, így a hőmérséklet tág határok között mérhető.
3. A szilárd testek és folyadékok sűrűsége a hőmérséklet-változáskor megváltozik. A hőmérséklet növekedésekor a testek sűrűsége csökken, a hőmérséklet csökkenésekor pedig a testek sűrűsége növekszik.
4. A szilárd anyagok és folyadékok sűrűségének a hőmérséklet-változástól való függését a térfogatra vonatkozó összefüggésből nyerhetjük: $\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta \cdot \Delta T}$.
5. A víz eltérően viselkedik a többi folyadékhoz képest, melegítéskor 0 °C-tól 4 °C-ig a térfogata csökken, és csak további hőmérséklet-növekedéskor tágul közelítőleg egyenletesen. A víz sűrűsége – eltérő tágulási viselkedése miatt – 0 °C-tól 4 °C-ig növekszik, majd 4 °C után mindvégig csökken. Ezért a víz sűrűsége 4 °C hőmérsékleten a legnagyobb. A víznek ez az eltérő tulajdonsága teszi lehetővé, hogy a tavak, folyók télen nem fagynak be teljesen.



17.1. A befagyott tó jege alatt a víz hőmérséklete lefelé növekszik. *Mit jelent az erősödő kék színárnyalat?*

Ugyanis a víz hűlésekor 4 °C alatt egyre kisebb sűrűségű lesz, így a leghidegebb vízréteg a felszínen helyezkedik el. Ezért a fagyás, a jégképződés is a felszínen indul meg, és a jégréteg lefelé vastagszik. A jég jó hőszigetelése révén (az eszkimók jégből készítik a kunyhójukat) a jég alatti víz további hűlése megszűnik. Emiatt a vízi élőlények nem pusztulnak el télen a tavak, folyók jégpáncélja alatt sem (feltéve, ha elég mély a tó vagy a folyó).

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Hogyan kell megválasztani folyadékos hőmérő készítésekor a folyadéktartály térfogatát és az ahhoz csatlakozó vékony cső keresztmetszetét, hogy minél pontosabban tudjunk hőmérsékletet mérni?
2. Miért nem ajánlatos a hidegből meleg helyiségbe szállítandó edényt színültig folyadékkal megtölteni?
3. A folyadékos hőmérőben általában nem használnak vizet. Vajon miért?
4. Mi lehet az előnye egy etil-alkoholos folyadékos hőmérőnek a higanyossal szemben? (Használjuk a négyjegyű függvénytáblázatban található hőtágulási tényezőkre vonatkozó adatokat!)
5. Milyen hatással járhat Földünk globális felmelegedése a tengerek, óceánok szintjének változására? Miért?
6. Hogyan fagynának be télen a tavak és a folyók, ha a víz tágulása 0 °C-tól egyenletes növekedést mutatna?

FELADATOK

1. Egy 20 liter űrtartalmú vaslemezből készült kannát színültig töltünk gázolajjal a benzinkútnál, ahol a gázolaj hőmérséklete 5 °C. A kanna és olaj hőmérséklete a fűtött garázsban 20 °C-ra emelkedik. Mennyi gázolaj folyik ki a kannából, ha annak fedele rosszul zár? (A gázolaj térfogati hőtágulási tényezője $\beta_g = 0{,}001\ \frac{1}{°C}$, a vas lineáris hőtágulási tényezője $\alpha_v = 1{,}17 \cdot 10^{-5}\ \frac{1}{°C}$.)

MEGOLDÁS:

$\Delta T = 15\ °C$

$V_{0_g} = V_{0_ü} = 20\ dm^3$

$V_{ki} = ?$

A kifolyt gázolaj térfogatát megkapjuk, ha a gázolaj térfogat-növekedéséből kivonjuk a kanna űrtartalmának növekedését. A vaslemez kanna belső része olyan üregként tágul, amelyet vas vesz körül, így a kanna űrtartalmának megváltozását kiszámíthatjuk a vas köbös hőtágulásából:

$$\beta_v \approx 3 \cdot \alpha_v = 3{,}51 \cdot 10^{-5}\ \frac{1}{°C}.$$

$$\Delta V_g = V_{0_g} \cdot \beta_g \cdot \Delta T = 20\ dm^3 \cdot 0{,}001\ \frac{1}{°C} \cdot 15\ °C = 0{,}3\ dm^3.$$

$$\Delta V_ü = V_{0_ü} \cdot \beta_v \cdot \Delta T = 20\ dm^3 \cdot 3{,}51 \cdot 10^{-5}\ \frac{1}{°C} \cdot 15\ °C = 0{,}01\ dm^3.$$

Így a kifolyt gázolaj térfogata $V_{ki} = \Delta V_g - \Delta V_ü = \mathbf{0{,}29\ dm^3}$ lesz.

2. Mekkora a 10 dm^3 térfogatú, 18 °C hőmérsékletű víz térfogatváltozása, ha 80 °C hőmérsékletre melegítjük fel? ($\beta_{víz} = 1{,}3 \cdot 10^{-4}\ \frac{1}{°C}$.)

3. A szobahőmérsékletű (18 °C) higany térfogata 300 cm^3. Mekkora hőmérsékleten lesz a higany térfogata 2%-kal nagyobb? ($\beta_{Hg} = 1{,}81 \cdot 10^{-4}\ \frac{1}{°C}$.)

4. Egy ismeretlen folyadékot 10 °C-ról 40 °C-ra melegítettünk, eközben a térfogata 1,5%-kal növekedett. Mekkora a folyadék köbös hőtágulási együtthatója? Mi lehetett ez a folyadék?

5. A folyadékok tágulását vizsgáló kísérletben etil-alkoholt használunk. Az edényben és a hozzá csatlakozó üvegcsőben a folyadék együttes térfogata 200 cm^3. A cső keresztmetszete 0,25 cm^2. A kezdeti hőmérséklet 18 °C. Mennyivel emelkedik a csőben a folyadékoszlop szintje, ha a hőmérséklet 50 °C-ra nő? Az edény tágulásától eltekintünk. ($\beta_{alkohol} = 1{,}1 \cdot 10^{-3}\ \frac{1}{°C}$.)

6. Mennyivel emelkedne az óceánok vízszintje, ha a hőmérsékletük átlagosan 2 °C-kal növekedne? Vegyük az óceánok átlagos mélységét 2000 méternek, és a tengervíz hőtágulási együtthatóját a vízével azonosnak. A jéghegyek olvadását hagyjuk figyelmen kívül. ($\alpha_{víz} = 4{,}3 \cdot 10^{-5}\ \frac{1}{°C}$.)

7. Egy 20 literes alumíniumkannát színültig töltünk 5 °C hőmérsékletű petróleummal. Ezután a teli kannát 25 °C hőmérsékletű helyiségbe visszük. ($\beta_{petrol} = 9{,}2 \cdot 10^{-4}\ \frac{1}{°C}$, $\beta_{al} = 7{,}2 \cdot 10^{-5}\ \frac{1}{°C}$.)

a) Mennyi petróleum folyna ki a kannából, ha nem vesszük figyelembe az edény tágulását?

b) Mennyi a valóságban kifolyt petróleum térfogata?

8. Mekkora a víz sűrűsége 100 °C-on, ha a sűrűsége 4 °C-on 1000 $\frac{kg}{m^3}$?

2. Gázok állapotváltozásai

2.1. Emlékeztető. Állapotjelzők, állapotváltozások*

Helyezzünk tűhegyre papírkígyót, és tartsuk a meleg radiátor (vagy más fűtőtest) fölé! Minél melegebb a fűtőtest, annál erőteljesebb forgást figyelhetünk meg. Fűtéskor a szobában a radiátorok fölött légáramlás indul meg. A jelenség azzal magyarázható, hogy a radiátor fölött felmelegedett levegő kitágul, sűrűsége csökken, ezért felfelé áramlik, helyére alulról hidegebb levegő kerül.

A gázok melegedése nem feltétlenül jár együtt a gáz tágulásával.

Ha például egy dugóval elzárt lombikot melegítünk, a benne lévő levegő is melegszik, de nem tud kitágulni. Persze lehet, hogy kilöki a dugót, és mégis kitágul. Amíg a levegő nem tágulhat, melegítéskor a nyomása növekszik.

Az is lehetséges, hogy a gáz lehűlés közben tágul ki. (Gondoljunk a szifonpatronban lévő CO_2-gázra.) A gázok térfogatát tehát nemcsak a hőmérséklet, hanem például a nyomás is befolyásolja.

Ha adott mennyiségű és térfogatú gáz belsejében mindenhol ugyanakkora a nyomás és a hőmérséklet értéke, akkor a gáz **egyensúlyi állapotban*** van.

A gázok **egyensúlyi állapotát** bizonyos mérhető mennyiségek egyértelműen meghatározzák. Az ilyen mennyiségeket **állapotjelzőknek*** (vagy állapothatározóknak) nevezzük.

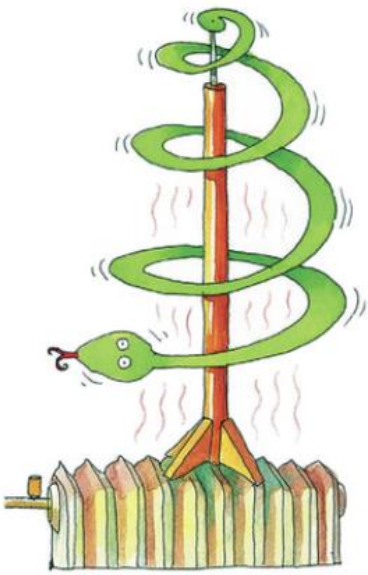
Adott minőségű gáz (levegő, O_2, H_2 stb.) állapotát az alábbi állapotjelzők határozzák meg:

- a gáz ***T* hőmérséklete,**
- a gáz ***p* nyomása,**
- a gáz ***V* térfogata** és
- a gáz ***m* tömege.**

A gáz állapotjelzői közül a hőmérséklet mérésével már foglalkoztunk.

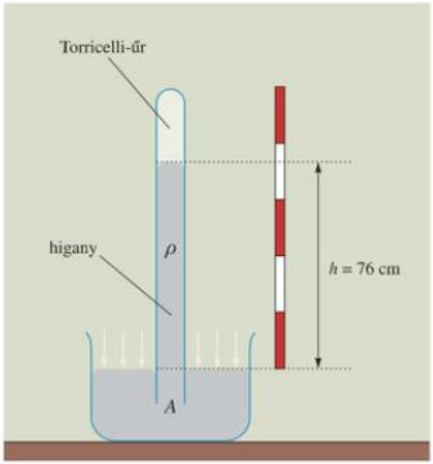
A gáz térfogatán mindig a tárolóedény térfogatát értjük. Ezt mérhetjük például úgy, hogy az edényt feltöltjük vízzel, majd ennek a víznek a térfogatát állapítjuk meg mérőhenger segítségével.

A gáz tömegét is mérni tudjuk olyan csappal ellátott edény felhasználásával, amelyből ki lehet a gázt szivattyúzni. A gáz tömege a gázzal töltött edény és a légüres teret (vákuumot) tartalmazó edény tömegének különbsége.

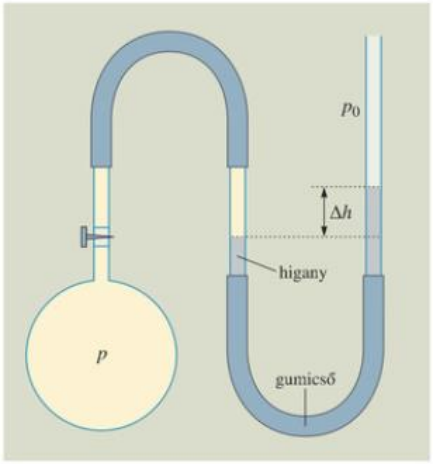








20.1. *Hogyan mérhetjük meg a légnyomást Torricelli kísérletével?*



20.2. Gázok nyomásának mérése higanyos manométerrel

A levegő nyomását *Torricelli* [toricselli] (1608–1647) olasz fizikus határozta meg először. Egyik végén zárt, kb. 1 m hosszú üvegcsövet megtöltött higannyal, majd a csövet nyitott végével lefelé, higanyt tartalmazó edénybe merítette. A függőleges csőben a külső higanyszinthez viszonyítva 76 cm magas higanyoszlop maradt. (A kifolyó higany helyén légüres tér keletkezett, amelyet Torricelli-űrnek szokás nevezni.) A higanyoszlop súlyából származó nyomással a külső légnyomás tartott egyensúlyt. Határozzuk meg ezt a nyomást!

Egy h magasságú, A keresztmetszetű, ρ sűrűségű folyadékoszlop súlyából származó nyomás (úgynevezett hidrosztatikai nyomás):

$$p = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot g}{A} = \frac{A \cdot h \cdot \rho \cdot g}{A} = h \cdot \rho \cdot g.$$

Ez alapján a légnyomás értéke:

$$p = 0{,}76\ \text{m} \cdot 13\,600\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9{,}81\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} =$$

$$= 101\,325\ \text{Pa} \approx 10^5\ \text{Pa}.$$

Ezt a nyomásértéket gyakran csak a Hg-oszlop hosszával jellemezzük, és 76 Hgcm-nek vagy 760 Hgmm-nek mondjuk. Ezt szokás normál légnyomásnak nevezni.

Mivel a légnyomás a fölöttünk lévő légkör súlyából származik, ezért értéke változik, függ a tengerszint feletti magasságtól és a levegő páratartalmától is.

Csappal ellátott üvegedényben a gáz nyomását mérhetjük úgy, hogy az edényhez hajlékony csővel egy higanyt tartalmazó U alakú csövet csatlakoztatunk (az elrendezést manométernek nevezzük). A csap kinyitása után a Hg-szintek különbsége adja meg a gáznyomás és a külső légnyomás eltérését. Ha pl. $\Delta h = 20$ cm és a külső légnyomás 76 Hgcm, akkor a belső nyomás $p = 76$ Hgcm + + 20 Hgcm = 96 Hgcm, amit Pa-ba is átszámíthatunk.

Ha egy adott mennyiségű gáz **kölcsönhatásba kerül** más testekkel, **akkor a gáz állapota megváltozik. A gáz állapotának megváltozását az állapotjelzőinek változása mutatja.**

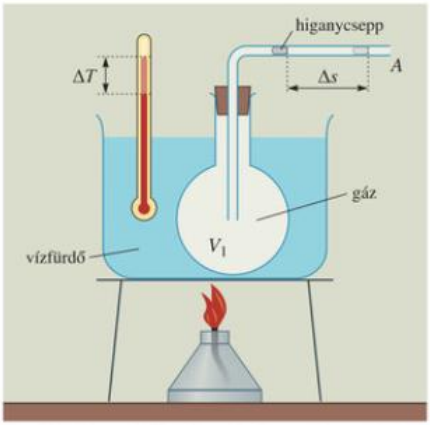
A gáz állapotváltozásakor egyidejűleg legalább két állapotjelző változik.

A gáz egy adott állapotában az állapotjelzők között kapcsolat áll fenn, azok nem vehetnek fel egymástól függetlenül tetszőleges értéket. A továbbiakban célunk az, hogy ezen kapcsolatok matematikai összefüggéseit megkeressük.

Először a gázok olyan **speciális állapotváltozásait** vizsgáljuk, ahol a gáz állapotváltozása során a p, V, T állapotjelzők közül valamelyik állandó marad.

Így megkülönböztetünk **izobár** (állandó nyomáson történő), **izochor** (állandó térfogat melletti) és **izoterm** (állandó hőmérsékletű) állapotváltozásokat.

2.2. Gázok állapotváltozása állandó nyomáson (izobár állapotváltozás*)



21.1. *Miért marad állandó a gázok nyomása a gázok tágulását vizsgáló kísérleti összeállításnál?*

A gázok izobár állapotváltozásának vizsgálatára végezzük el az ábra szerinti kísérletet. Legyen a higanycseppel a lombikba bezárt gáz (levegő) kezdeti térfogata V_1. Melegítsük a lombikot vízfürdőben, melynek hőmérsékletét hőmérővel mérjük. Ha ismerjük a cső A keresztmetszetét és megmérjük a higanycsepp Δs elmozdulását, a gáz térfogatváltozása a $\Delta V = \Delta s \cdot A$, az új térfogat pedig $V = V_1 + \Delta V$ összefüggésből számítható. Ábrázoljuk a V térfogatot a T hőmérséklet függvényében!

A táguló gáz nyomása tágulás közben állandó, és megegyezik a külső légnyomás értékével. Többfajta gázzal és különböző méretű lombikokkal is elvégezve a tágulási kísérletet, megállapíthatjuk a gázok állandó nyomáson történő tágulásának törvényszerűségeit.

A V térfogatot a °C-ban mért T hőmérséklet függvényében ábrázolva egyenest kapunk. Ennek meghosszabbítása bármely gáz esetén közelítően –273 °C-nál metszi a hőmérséklet tengelyt. Legyen a 0 °C-hoz tartozó térfogat V_0. Ekkor az egyenes meredeksége: $\frac{V_0}{273\ °C}$.

Ez azt jelenti, hogy a V térfogat és a °C-ban mért T hőmérséklet közötti függvénykapcsolat:

$$V = V_0 + \frac{V_0}{273\ °C} \cdot T.$$

Ezt átalakítva kapjuk, hogy

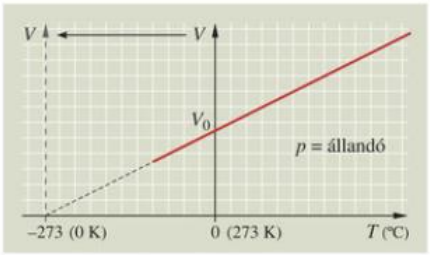
$$V = V_0\,(1 + \frac{1}{273\ °C} \cdot T).$$

Az eredményünk hasonló a szilárd testek és folyadékok térfogati hőtágulási törvényéhez, ahol most a köbös hőtágulási tényező $\beta = \frac{1}{273}\frac{1}{°C}$ értéknek vehető.

A legtöbb gáz – állandó nyomáson – a fenti összefüggésnek megfelelően tágul, ha sűrűsége elég kicsi, és nem túl alacsony a hőmérséklete.

Azt az idealizált (valóságban nem létező) gázt, amelynek a hőtágulási tényezője pontosan $\beta = \frac{1}{273}\frac{1}{°C}$ lenne, **ideális gáznak*** nevezzük.

Az olyan **valódi** (vagy reális) **gázokat***, amelyek hőtágulásánál a β értéke a fenti értéket jól megközelíti, ideális gázoknak tekintjük.



21.2. Ideális gázok V–T grafikonja

Gáz anyaga	$\beta\left(\frac{1}{°C}\right)$
ammónia	0,003802
hélium	0,003660
hidrogén	0,003662
levegő	0,003675
oxigén	0,003674
nitrogén	0,003674

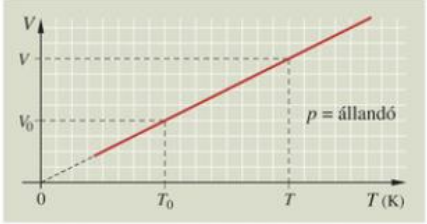
21.3. Valódi gázok hőtágulási tényezői normál állapotban

A V–T grafikonnak megfelelően célszerű egy **új hőmérsékleti skálát** bevezetni. A grafikon V tengelyét párhuzamosan eltoljuk abba a pontba, ahol a grafikon egyenese a T tengelyt metszi. Így az új **skála zéruspontja –273 °C-nál lesz.** A skálabeosztás nagysága változatlan marad – megegyezik a **Celsius-skála** beosztásával. Az így nyert új hőmérsékleti skálát **abszolút hőmérsékleti skálának** vagy **Kelvin-skálának*** nevezzük *Lord Kelvin* (1824–1907) angol fizikus tiszteletére.

A Kelvin-skálán mért hőmérsékletet **abszolút hőmérsékletnek*** hívjuk. A Kelvin-skála egységét **kelvinnek** nevezzük, **jele: K.**

A hőmérséklet értékét úgy számítjuk át **kelvinbe,** hogy a **Celsius-fokban** mért értékhez **273-at** adunk. Így –273 °C-nak 0 K, 0 °C-nak pedig 273 K felel meg.

A **Kelvin-skálát** alkalmazva állandó nyomáson az ideális gázok térfogata és abszolút hőmérséklete között egyenes arányosság áll fenn. Ennek a képe az origóból kiinduló félegyenes.



22.1. Az izobár állapotváltozás V–T diagramja

Az egyenes arányosság tetszőleges összetartozó értékpárra is igaz, vagyis:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}.$$

Az adott tömegű ideális gáz állandó nyomáson történő állapotváltozásakor a gáz térfogata egyenesen arányos a gáz abszolút hőmérsékletével. Ez Gay-Lussac I. törvénye.

A gázok állapotváltozásakor gyakran ábrázoljuk az egyik állapotjelzőt a másik függvényeként. Az így kapott **diagramok** pontjainak az adott mennyiségű gáz egy-egy állapota felel meg. Így a diagram vonala a gáz állapotváltozásának menetét mutatja. Leggyakrabban a ***p*–*V* diagramot*** használjuk.

Vegyük fel az izobár állapotváltozás p–V diagramját! Ekkor a gáz – egymást követő – egyensúlyi állapotainak a grafikonon megfelelő pontok sorozata a V tengellyel párhuzamos egyenest jelöl ki. Röviden azt mondjuk, hogy az **izobár állapotváltozás képe** a p–V diagramon a V tengellyel **párhuzamos egyenes.**



22.2. Az izobár állapotváltozás p–V diagramja

MEGJEGYZÉSEK

1. Szokás a Celsius-fokban mért hőmérsékletet t-vel is jelölni. Ekkor vigyáznunk kell, hogy ne tévesszük össze a hőmérséklet jelét az idő t jelével.
2. Ha hőmérséklet-különbségekkel kell számolnunk, a kétféle egységben vett különbség számértéke a fentiek szerint megegyezik: ΔT (°C) = ΔT (K), és a különbséget egyszerűen foknak mondjuk.
3. A valódi gázok annál inkább ideális gázként viselkednek, minél **kisebb a sűrűségük,** és minél **magasabb a hőmérsékletük.** Így pl. szobahőmérsékleten a hidrogén-, a hélium-, az oxigén- és a nitrogéngázokat ideális gázoknak tekinthetjük. Ugyanis a β hőtágulási tényezőjük

jól megközelíti az ideális gázhoz rendelt $\beta = \frac{1}{273\,°C} = 0{,}003663\,\frac{1}{°C}$ értéket. A valódi és az ideális gáz közötti különbség molekuláris magyarázatát a molekuláris hőelmélet tárgyalásánál adjuk meg.

4. Alacsony (–100 °C alatti) hőmérsékleten a valódi gázok cseppfolyósodnak, ekkor megszűnnek gázként viselkedni. Ezért a további hőmérséklet-csökkenés esetén térfogatváltozásuk már semmiképpen nem felel meg az ideális gázokra vonatkozó grafikonnak. Ezért ér véget a *21.2.* és a *22.1. ábra* grafikonja, mielőtt a hőmérsékleti tengelyt metszené.

5. A $T = -273$ °C nem csak a gázok tágulása szempontjából kitüntetett hőmérsékleti pont. A tapasztalatból és a mélyebb elméleti megfontolásokból következik, hogy semmilyen halmazállapotú anyag nem érheti el, és nem haladhatja túl negatív irányban ezt a kitüntetett hőmérsékleti pontot. Ezért méltán nevezzük a 0 K-t **abszolút zéruspontnak.** Az abszolút zéruspont $T = -273$ °C értéke kerekített érték. A pontosabb érték $T = -273{,}15$ °C.

6. Az abszolút zéruspont közelében az anyagok szokatlan sajátosságokkal rendelkeznek (szuperfolyékonyság, szupravezetés stb.). Az anyagok fajhője a zérusponthoz közeledve megváltozik, a nullához közeli értéket vesz fel, amelyből az következik, hogy a legkisebb hőfelvétel is nagy hőmérséklet-emelkedést okoz. Ezért nem érhető el, és nem léphető túl az abszolút zéruspont. **Nincs negatív abszolút hőmérséklet!** Ennek anyagszerkezeti magyarázatát a molekuláris hőelméletben ismerhetjük meg.

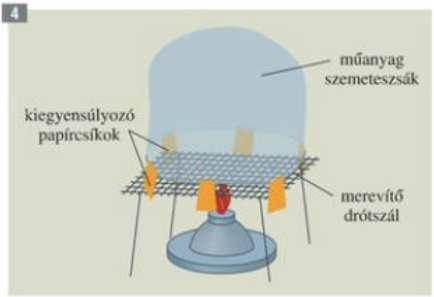
GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. A függvénytáblázat gázokra vonatkozó tágulási adatai alapján állapítsuk meg, hogy mely gázok közelítik meg legjobban az ideális gázt, és melyek térnek el attól nagyobb mértékben!

2. Mi történik a szoba levegőjének egy részével, ha a szobában befűtünk? Mi történik a szoba levegőjének lehűlésekor?

3. A hűtőszekrényből kivett közel üres üdítősüveg nyílására helyezzünk egy könnyű pénzérmét, majd melegítsük tenyerünkkel az üveg falát. Mit tapasztalunk? Magyarázzuk meg a jelenséget!

4. Készítsünk léghajómodellt! Könnyű műanyag szemeteszsákot szájával lefelé helyezzünk Bunsen-állványokra! Ragasszunk a zsák szájához néhány kiegyensúlyozó papírcsíkot! Esetleg a zsák szája mentén könnyű merevítő drótszálat vagy horgászzsinórt is fűzhetünk. Ha ezután borszeszégő lángjával alul és középen (hogy a zsák meg ne pörkölődjön) melegítjük a levegőt, a zsák hamarosan felemelkedik, kis idő múlva pedig visszaereszkedik. Adjunk magyarázatot az érdekes kísérletre!



5. Miért poros a radiátorok fölött a szoba mennyezete? Hogyan akadályozhatjuk meg a beporosodást?

6. A természetben milyen nagy légáramlatokat ismerünk?

FELADATOK

1. Mekkora lenne annak a levegőnek a térfogata 20 °C hőmérsékleten és külső légköri nyomáson, amely akkor távozik egy 4 m × 5 m × 3 m méretű szobából, amikor a szoba levegőjének hőmérséklete 0 °C-ról 20 °C-ra növekszik?

2. Egy tornaterem levegőjének hőmérséklete 0 °C. A terem 15 °C-ra való felfűtése során a nyílászárókon távozó levegő térfogata 50 m^3. Mekkora a tornaterem magassága, ha az alapterülete 200 m^2?

3. Egy könnyen mozgó dugattyúval elzárt 0,8 dm^2 alapterületű hengeres edényben 0 °C hőmérsékletű, 4 dm^3 térfogatú ammóniagáz van. Melegítés hatására a dugattyú 5 cm-t elmozdul. Mekkora a felmelegített gáz hőmérséklete? (A gázt tekintsük valódinak!)



4. A gázok hőtágulását vizsgáló kísérleti összeállítás lombikjának térfogata 100 cm^3. A hozzá csatlakozó cső belső átmérője 5 mm. Mekkora az 1 °C-nak megfelelő, a csövön található, két szomszédos beosztás közötti távolság?

5. Egy 50 liter űrtartalmú tartály 30 °C hőmérsékletű gázt tartalmaz. A tartály környezetétől nincs légmentesen elzárva. A gáz hányad része távozik el a tartályból, ha a gáz hőmérséklete a tartályban 50 °C-ra emelkedik? (A gázt tekintsük ideálisnak!)

3D



24.1. *Miért emelkedik a hőlégballon a magasba?*

2.3. Gázok állapotváltozása állandó térfogaton (izochor állapotváltozás*)

Mindennapos tapasztalat, hogy zárt edényben – amikor a gázok tágulását megakadályozzuk – a gázok nyomása melegítéskor megnő, hűtéskor pedig csökken.

Állandó mennyiségű gáz állandó térfogaton történő melegítésekor vagy hűtésekor a gáznak csak a **nyomása** (p) és a **hőmérséklete** (T) változik meg. A gázok ilyen speciális állapotváltozását **izochor** [izokor] – állandó térfogatú – **állapotváltozásnak** nevezzük.

A háztartásban használt – valamilyen hajtógázt tartalmazó – illatszeres vagy más palackokon gyakran olvashatjuk a figyelmeztető feliratot:

VIGYÁZAT, TŰZVESZÉLYES! A KÉSZÜLÉKBEN TÚLNYOMÁS VAN. TŰZBE DOBNI MÉG ÜRES ÁLLAPOTBAN IS TILOS!

Különösen veszélyesek lehetnek a lakás- és épülettüzeknél felforrósodott propán-bután gázpalackok. Ezek bármely pillanatban gyújtóbombaként robbanhatnak fel az óriásira növekedett belső gáznyomás hatására. Ezért a tűzoltóknak első dolguk a felhevült palackok vízsugárral történő gyors hűtése.

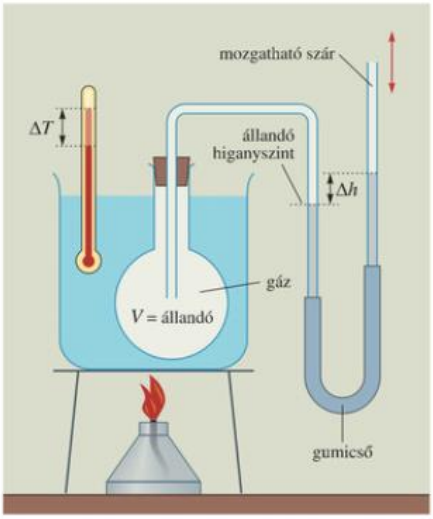
Zárt tartályok méretezésénél fontos, hogy ismerjük a nyomás- és hőmérséklet-változás közötti mennyiségi kapcsolatot.

Állítsuk össze az ábrán látható kísérletet! A lombikban lévő gáz hőmérséklete a vízfürdő hőmérsékletével változtatható. Az állandó térfogatot a lombikhoz csatlakozó – higanyt tartalmazó – közlekedőedény jobb szárának elmozdításával állítjuk be. A gáz túlnyomását a higanyszintek Δh különbségéből határozhatjuk meg.

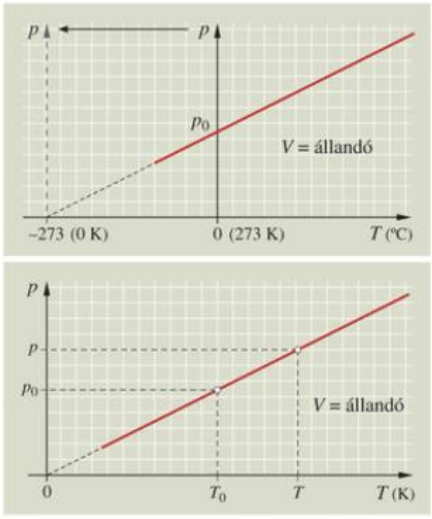
Ábrázoljuk a gáz p nyomását a °C-ban mért T hőmérséklet függvényében! Ismét olyan egyenest kapunk, amelynek meghosszabbítása közelítően –273 °C-nál metszi a hőmérséklet tengelyt. Legyen a 0 °C-hoz tartozó nyomás p_0. Ekkor az egyenes meredeksége: $\frac{p_0}{273\ °C}$, így az egyenlete:

$$p = p_0 + \frac{p_0}{273\ °C} \cdot T = p_0 \cdot \left(1 + \frac{T}{273\ °C}\right).$$

Célszerű most is az abszolút hőmérsékleti skálára áttérni.



25.1. *Hogyan tartjuk a térfogatot állandó értéken az izochor állapotváltozást vizsgáló kísérletnél?*



25.2. Az izochor állapotváltozás p–T grafikonjai

Így az alábbi összefüggést kapjuk:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$$

Az állandó térfogaton történő állapotváltozások során az adott tömegű ideális gáz nyomása egyenesen arányos a gáz abszolút hőmérsékletével. Ez Gay-Lussac II. törvénye.



26.1. *Lord Kelvin* (1824–1907) angol és *Louis Joseph Gay-Lussac* (1778–1850) francia fizikus

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Miért nehéz lecsavarni a befőttesüveg fedelét, ha melegen zárták le (légmentesen)? Hogyan segíthetünk ezen?
2. Hogyan változik meg az autókerékben a nyomás értéke, ha a kocsival tűző napon parkolunk? Hogyan állíthatjuk vissza az eredeti nyomást?
3. Milyen lesz a képe az izochor állapotváltozásoknak a p–V és a V–T diagramokon?
4. Ha héjától megfosztott, kemény főtt tojást teszünk egy előzőleg lánggal kissé felmelegített lombik szájához, a lehűlő lombik egészben beszippantja a tojást. Szájával lefelé fordított lombikból melegítéssel egészben ismét visszanyerhetjük a tojást. Adjunk magyarázatot az érdekes kísérletre!

FELADATOK

1. Egy nyári délelőttön a benzinkútnál, amikor a hőmérséklet 20 °C, az autó kerekeiben 200 kPa-ra állítjuk be a nyomást. (A mért nyomás túlnyomást jelent.) A külső légköri nyomást vegyük 100 kPa-nak.
   a) Mekkora túlnyomás mérhető a tűző napon hagyott gépkocsi kerekeiben, ha a hőmérséklet 50 °C?
   b) Mekkora lesz a keréknyomás hajnalban, amikor a levegő 10 °C-ra hűl le?
2. Egy befőttesüveget melegen, légmentesen zárunk le kör alakú, 8 cm átmérőjű fedéllel. Ekkor a bezárt levegő hőmérséklete 80 °C. A légnyomás állandó értéke 101 kPa. Mekkora erővel nyomódik rá a fedél az üvegre, ha a befőttesüveg kihűl, és a belső hőmérséklet 20 °C-ra csökken le?
3. A biztonsági szeleppel ellátott gáztartály szelepe 300 kPa túlnyomás esetén nyílik ki. 20 °C hőmérsékleten a tartályban a túlnyomás 180 kPa. Mekkora a bezárt gáz hőmérséklete, amikor a biztonsági szelep működésbe lép? (A légnyomás értéke 100 kPa.)
4. Egy hűtőszekrényből, ahol a belső hőmérséklet 15 °C, kiveszünk egy kb. félig telt üdítősüveget. Az üveg szájára megnedvesített pénzérmét helyezünk. Miközben az üvegben lévő levegő melegszik, az érme többször megemelkedik az üveg száján. A pénzérme tömege 30 g, a palack nyílásának keresztmetszete 3 cm^2, a külső levegő légnyomása 98 kPa.
   a) Mekkora a palackba zárt levegő hőmérséklete akkor, amikor az érme először emelkedik meg az üveg száján?
   b) Hogyan függ ez a hőmérsékleti érték a palackban lévő levegő térfogatától?

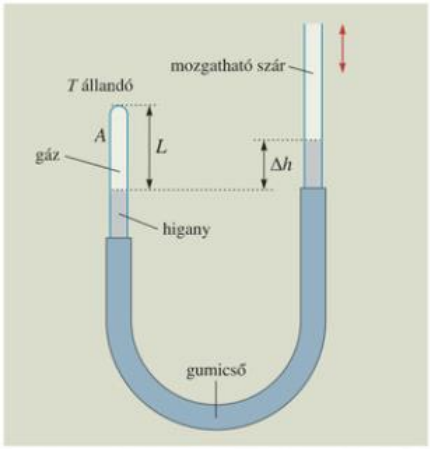
2.4. Gázok állapotváltozása állandó hőmérsékleten (izotermikus állapotváltozás*)

Üres orvosi fecskendő dugattyúját állítsuk a henger közepére, majd fogjuk be ujjunkkal a fecskendő nyílását! Ha ezután a dugattyút befelé nyomjuk, majd elengedjük, a dugattyú visszaugrik; ha kifelé húzzuk és elengedjük, szintén visszaugrik. A dugattyú mindkét esetben azért mozdul el, mert a bezárt gáz nyomása nem egyezik meg a külső légnyomással.

Gyakran tapasztalhatjuk, hogy ha a gázok térfogatát csökkentjük, akkor a gáz nyomása megnő. Ha pedig a gáz térfogatát növeljük, akkor a nyomása lecsökken.

A gázok **állandó hőmérsékleten** történő összenyomása és tágítása a nyomás megváltozásával jár együtt. A gázok ilyen állapotváltozását **izotermikus** vagy izoterm (állandó hőmérsékletű) **állapotváltozásnak** nevezzük. Ekkor a gáznak csak a p nyomása és a V térfogata változik meg.

A gázok izotermikus állapotváltozását vizsgálhatjuk az ábrán látható kísérleti eszköz segítségével.

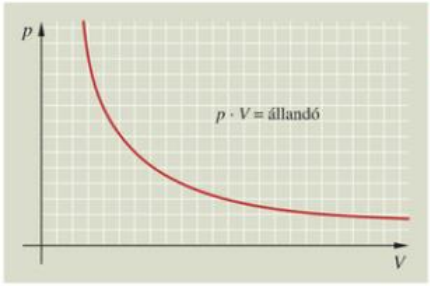


27.1. *Hogyan változtatjuk a bezárt gáz nyomását a gázok izoterm állapotváltozásának vizsgálatára szolgáló kísérleti összeállításnál?*

Vegyünk egy U alakú, egyik végén zárt, másik végén nyitott üvegcsövet tartalmazó, alul hajlékony gumicsővel összekötött közlekedőedényt, amelyben higany található (lásd a *27.1. ábrát*). Az összeállítás jobb oldali, felül nyitott szára függőleges irányban elmozdítható. Így a bal oldali zárt szárban található gáz a higanyszint változtatásával összenyomható, illetve tágítható (a gáz térfogata csökkenthető vagy növelhető). A változtatást lassan végezve és bizonyos időt várva elérhetjük, hogy a bezárt gáz termikus egyensúlyba kerüljön a környezetével (a bezárt gáz és a környezet hőmérséklete megegyezzen).

A gázoszlop l hosszának és a cső belső A keresztmetszetének mérésével meghatározhatjuk a térfogatot; a két üvegszárban lévő higanyszintek különbségét megmérve pedig a bezárt gáz nyomását. (Ehhez ismernünk kell a külső légnyomást is, melyet barométerről olvashatunk le.)

Mérjük meg több esetben a bezárt gáz térfogatát és nyomását, és foglaljuk táblázatba a kapott eredményeket! Képezzük az összetartozó térfogat- és nyomásértékek szorzatát, és hasonlítsuk össze ezeket! Ábrázoljuk a gáz nyomását a térfogat függvényében!



27.2. A gáz nyomását a térfogat függvényében a fordított arányosság grafikonja, az **izoterma** mutatja. *Hogyan nevezzük a görbét?*

3D

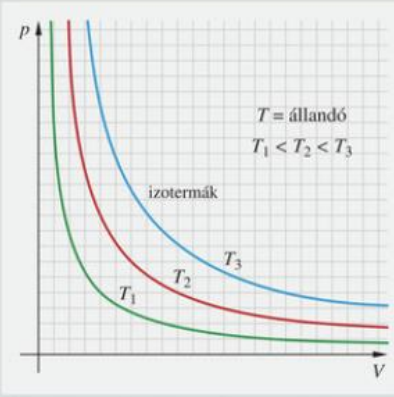
A kísérleti eredmények szerint:

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2.$$

Állandó hőmérsékleten az adott tömegű ideális gáz V térfogata és p nyomása között fordított arányosság van, szorzatuk állandó. Ez Boyle–Mariotte törvénye.

MEGJEGYZÉSEK

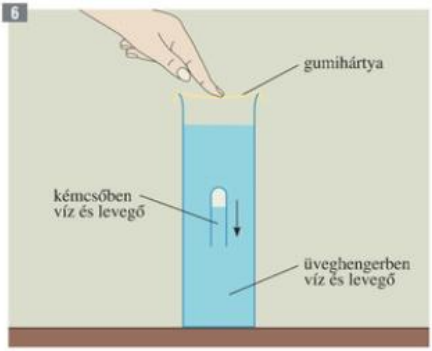
1. Ha különböző T hőmérsékleten akarjuk a kísérletet elvégezni, akkor a gázt tartalmazó bal oldali csövet változtatható hőmérsékletű vízfürdőbe helyezzük. Ekkor a $T_1 < T_2 < T_3$ hőmérsékletekhez tartozó $p \cdot V$ szorzatok értéke egyre nagyobb lesz, ezért az ábrázoláskor kapott hiperbolák – az **izotermák** – egymás felett helyezkednek el.
2. Ha a p–V síkot izotermákkal hálózzuk be, akkor azok – egy tereptérkép szintvonalaihoz hasonlóan – tájékoztatnak a síkon az egyes állapotváltozások hőmérsékleti viszonyairól.
3. *Robert Boyle* (1627–1691) angol fizikus és kémikus 1664-ben, illetve *Edmé Mariotte* (1620–1684) francia fizikus 1676-ban egymástól függetlenül állapították meg a róluk elnevezett gáztörvényt.



28.1. Az izotermikus állapotváltozások ábrázolása p–V diagramon

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. A gázok izotermikus állapotváltozásánál hogyan függ a gázok sűrűsége a nyomástól?
2. Mi történhet a gázzal, ha azt alacsony hőmérsékleten nagyon kis térfogatra nyomjuk össze?
3. Helyezzünk egy kissé felfújt léggömböt a légszivattyú burája alá, majd szívjuk ki a bura alól a levegő egy részét! Mi történik ekkor a léggömbbel? Értelmezzük a jelenséget!
4. A 3. feladat kísérlete alapján magyarázzuk meg, miért szükséges a világűrbe kilépő űrhajósoknak szkafandert viselniük!
5. Szereljünk szét egy kerékpárpumpát, tanulmányozzuk és értelmezzük a működését! Hogyan készíthetnénk belőle légszivattyút?
6. Érdekes kísérleteket végezhetünk az úgynevezett Cartesius-búvárral, amely a nevét *René Descartes* (latinosan Cartesius) francia filozófus-természettudósról kapta. Üveghengerbe vizet töltünk, majd ebbe vízzel teli kémcsövet helyezünk szájával lefelé. A víz egy része kifolyik, és a kémcsőben kis zárt légtér keletkezik. Megfelelő mennyiségű víz kifolyatása után a kémcső úszik, lebeg vagy elsüllyed a hengerben. Kössük le gumihártyával a henger nyílását! A gumihártya benyomásával a búvár lesüllyeszthető, felhúzásával felemelhető. Kísérletezzünk, és adjunk magyarázatot a tapasztalatainkra!



FELADATOK

1. Egy orvosi fecskendő végét befogva a hengerben lévő levegő térfogatát 60%-ára préseljük összsze. Mekkora lesz a levegő nyomása, ha a külső légnyomás 10^5 Pa?

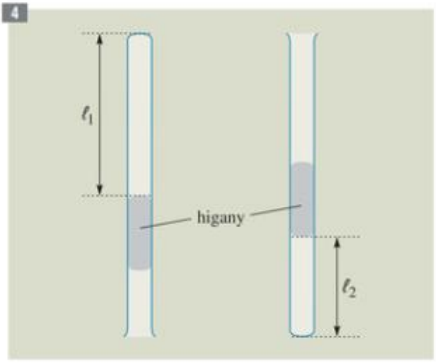
2. Egy kerékpártömlő szelepe 30 kPa túlnyomás hatására nyílik meg. Pumpáláskor a pumpa dugattyúja a levegő összepréselése kezdetén a henger aljától 30 cm-re van.
Hol áll a dugattyú, amikor az összenyomott levegő kezd beáramlani a szelepen keresztül a tömlőbe? (A tömlőben lévő levegő nyomását kezdetben vegyük azonosnak a külső légnyomáséval: $p_k = 100$ kPa.)

3. Egy függőleges állású, súlytalan dugattyúval ellátott henger alapterülete $A = 0{,}5$ dm^2. A levegőoszlop hossza $h = 30$ cm. A dugattyúra egy $m = 6{,}24$ kg tömegű vashengert helyezünk. Mennyit süllyedt a dugattyú, amikor újra egyensúlyba kerül? A hőmérséklet kezdetben és a végállapotban azonos. A külső légnyomás 100 kPa.

4. Kb. 30 cm hosszú, 2-3 mm átmérőjű, egyik végén zárt üvegcsövet lánggal hevítve, majd nyitott végét higanyt tartalmazó edénybe merítve, várjuk meg, amíg 5-10 cm-es Hg-szál hatol a csőbe. Kihűlés után ezt a csövet (Melde-cső) nyitott szájával egyszer függőlegesen lefelé, egyszer pedig felfelé tartva meghatározhatjuk a légnyomás értékét a következő összefüggésből:

$$(p_0 - p_{Hg}) \cdot \ell_1 = (p_0 + p_{Hg}) \cdot \ell_2.$$

Magyarázzuk meg az összefüggést, és mérjük meg a p_0 légnyomást! A mérést tálca felett végezzük, hogy a higanyszennyezést elkerüljük! A higany gőzei károsak az egészségre!



5. Vegyünk egy 2 cm átmérőjű hengert. Egyik végén egy jól záró mozgatható dugattyú van, a másik végét egy dugóval zárjuk el. A dugót a hengerből 100 N nagyságú erővel lehet kihúzni. A külső légnyomás 100 kPa. Kezdetben, amikor a dugattyút behelyeztük a hengerbe, akkor az a dugótól 30 cm távolságra van. Ha a dugattyút lassan toljuk a hengerbe, akkor hol áll a dugó kirepülésének pillanatában?



2.5. Az ideális gázok általános állapotváltozása*, állapotegyenlete*

3D

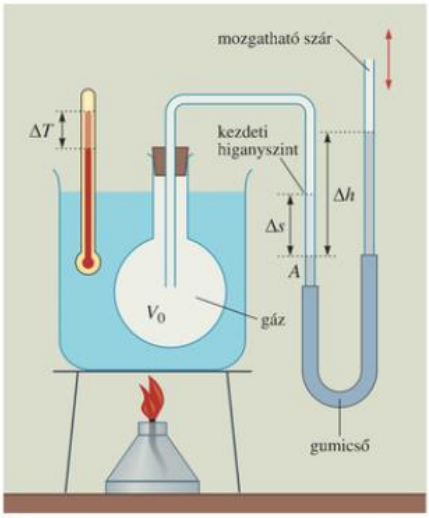
EGYESÍTETT GÁZTÖRVÉNY

Rögzítsük a *30.1. ábrán* látható kísérleti összeállításban a jobb oldali csőszárat, és melegítsük a lombikban lévő gázt! Ekkor a gáz térfogata, nyomása és hőmérséklete egyaránt megváltozik.

A fenti kísérletben csak a **gáz tömege** és minősége marad **változatlan, a *p*, *V*, *T* állapotjelzők mindegyike megváltozik.** Az ilyen állapotváltozást **általános állapotváltozásnak** nevezzük.

A *p*, *V*, *T* állapotjelzők közötti összefüggést az **egyesített gáztörvény** adja meg.

A gáz melegítésekor mérhetjük mindhárom (p, V, T) változó állapotjelző értékét egy adott pillanatban. A gáz V térfogatát a $V = V_0 + \Delta s \cdot A$ összefüggés alapján, a térfogathoz tartozó nyomás értékét pedig a $p = p_0 + \Delta h \cdot \rho \cdot g$ formula segítségével határozhatjuk meg. V_0 a gáz eredeti térfogata, p_0 a külső légnyomás, $2\Delta s = \Delta h$. A gáz hőmérséklete megegyezik a vízfürdő hőmérővel mért T hőmérsékletével.



30.1. A gázok általános állapotváltozását vizsgáló kísérleti összeállítás. *Mi a szerepe a mozgatható szárnak?*

Az elvégzett kísérlet pontos méréseinek adataiból az alábbi törvényszerűséget állapíthatjuk meg:

Az állandó tömegű gázok nyomásának és térfogatának szorzata egyenesen arányos a gáz abszolút hőmérsékletével:

$$p \cdot V \sim T, \text{ vagyis } \frac{p \cdot V}{T} = \text{állandó.}$$

Így az egyesített gáztörvényt* az alábbi alakban írhatjuk fel:

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}.$$

EMLÉKEZTETŐ

Az anyagok minden halmazállapotban atomi részecskékből – atomokból vagy molekulákból – épülnek fel. Az anyagi részecskék sokaságának jellemzésére az anyagmennyiség szolgál.

Az **anyagmennyiség* jele: *n*,** mértékegysége a mól. A mértékegység jele: mol. 1 mol annak a részecskesokaságnak az anyagmennyisége, amely annyi részecskét tartalmaz, mint amennyi atom van 12 g tömegű ^{12}C-szénizotópban. Ennek értéke: $6{,}023 \cdot 10^{23}$. Az állandó mennyiséget **Avogadro-állandónak*** nevezzük. Jele: N_A, mértékegysége: $\frac{1}{\text{mol}}$.

Moláris tömegnek* nevezzük (jele: ***M***) azt a tömeget, amely megmutatja, hogy mekkora az 1 mólnyi elem vagy vegyület tömege. A moláris tömeg mértékegysége: $\frac{\text{kg}}{\text{mol}}$ vagy $\frac{\text{g}}{\text{mol}}$.

A fenti mennyiségek közötti összefüggés:

$$n = \frac{m}{M}.$$

Vagyis valamely elem vagy vegyület *n* anyagmennyiségét megkapjuk, ha az anyag *m* tömegét elosztjuk az elem vagy vegyület *M* moláris tömegével.

ÁLLAPOTEGYENLET

Az eddigiek során mindig állandó tömegű gáz állapotváltozásait vizsgáltuk. A gyakorlatból azonban tudjuk, hogy a palackba zárt gáz tömege is változhat (felhasználáskor csökken, töltéskor nő). Korábban már megállapítottuk, hogy az adott m tömegű gáz nyomásának és térfogatának $p \cdot V$ szorzata egyenesen arányos az abszolút T hőmérséklettel. Vagyis

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{állandó}.$$

Hogyan lehetne ezt az állandót meghatározni? Kémiai tanulmányainkból ismeretes, hogy a **normál állapotú*** ($p_0 = 101{,}325$ kPa, $T_0 = 273{,}15$ K), **1 mol anyagmennyiségű ideális gáz térfogata $V = 22\,414$ cm^3.** Ezt a térfogatot **normál moláris térfogatnak*** nevezzük.

Ezeket az adatokat a fenti törtkifejezésbe behelyettesítve megkapjuk a keresett R állandó számértékét és mértékegységét is 1 mol gázra:

$$R = \frac{p \cdot V}{T} = \frac{101\,325 \text{ Pa} \cdot 0{,}022414 \text{ m}^3}{273{,}15 \text{ K}} = 8{,}314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}.$$

n mol gáz esetén – mivel annak térfogata a normál moláris térfogat n-szerese – a $\frac{p \cdot V}{T}$ törtkifejezés értéke is n-szer nagyobb, vagyis $\frac{p \cdot V}{T} = n \cdot R$, illetve az $n = \frac{m}{M}$ hányadost behelyettesítve: $\frac{p \cdot V}{T} = \frac{m}{M} \cdot R$. A kifejezéseket átrendezve kapjuk az ideális gázok állapotegyenletét:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

vagy

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T.$$

Az $R = 8{,}314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ állandót egyetemes vagy általános gázállandónak* nevezzük.

A fenti egyenlet az n mol ideális gáz egy adott állapotában adja meg az összefüggést a gáz állapotjelzői között, innen ered az állapotegyenlet elnevezés.

MEGJEGYZÉSEK

1. Az állapotegyenlet n anyagmennyiséget tartalmazó alakja jól kifejezi, hogy az állapotegyenlet lényegében független az ideális gázok minőségétől.
   Ez azt jelenti, hogy egy adott V térfogatú edényben, adott T hőmérsékleten csak a gáz anyagmennyiségétől, vagyis a zárt térben lévő **részecskék számától függ** az, hogy a részecskék mekkora ***p* nyomást** fejtenek ki az edény falára.

2. Előfordulhat, hogy ha zárt térben lévő gázt melegítünk állandó térfogaton, akkor elég magas hőmérsékleten (kb. 1000 °C felett) a gázban lévő molekulák egy része – az egymással való heves ütközésük következtében – atomokra esik szét (disszociál), így hirtelen megnő a zárt térben lévő részecskék száma, amit ugrásszerű nyomásnövekedésként érzékelünk.

3. Az állapotegyenletnek a gáz m tömegét tartalmazó alakját átalakíthatjuk úgy, hogy bevezetjük a $\rho = \frac{m}{V}$ sűrűséget. Az így kapott $p = \frac{\rho}{M} \cdot R \cdot T$ vagy $\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}$ alakból látható, hogy a gáz sűrűsége egyenesen arányos a nyomással és fordítottan arányos az abszolút hőmérséklettel.

4. Az ideális gázok állapotegyenletéből könnyen származtathatjuk a speciális és az általános állapotváltozásokra vonatkozó törvényszerűségeket.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Állapítsuk meg, hogy az alábbi folyamatokban a gázok milyen típusú (izobár, izochor, izoterm vagy általános) állapotváltozásai jönnek létre!

a) Egy mozgatható dugattyúval elzárt edényben lévő gázt lassan melegítünk.

b) A dugattyús edényben lévő gázt úgy melegítjük, hogy a dugattyú maga előtt egy rugót nyom össze.

c) A dugattyút gyorsan beljebb toljuk a hengeres edénybe.

d) A dugattyút lassan húzzuk kifelé a hengerből (a henger fala jó hővezető).

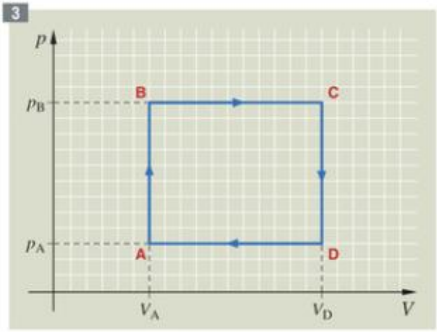
e) Gázt tartalmazó zárt palack jó hővezető, érdes falát hosszú ideig dörzsöljük.

f) A függőleges helyzetű hengeres, dugattyúval ellátott edényt úgy melegítjük, hogy az emelkedő dugattyúra egy súlyos nehezéket helyezünk.

2. Hányféle különböző módon lehet adott mennyiségű gázt egy adott állapotából egy tetszőleges másik állapotába eljuttatni úgy, hogy közben két speciális állapotváltozás következzen be? A különböző lehetőségeket ábrázoljuk a p–V diagramon!

3. Tekintsük a 3. ábrán az $ABCD$ téglalapot a p–V diagramon. Értelmezzük, hogy mi történik a gázzal, és milyen állapotváltozásokon megy keresztül, ha a (p,V) állapotpont az $A \to B \to C \to D \to A$ úton körbejárja a téglalap kerületét (vagyis a gáz körfolyamatot végez)!

3



4. Az ideális gázok állapotegyenlete alapján magyarázzuk meg, hogy miért lehet lopóval vagy pipettával folyadékot felszívni!

5. Hogyan érhetjük el azt, hogy egy gáztartályból gázt kiengedve a bentmaradó gáz nyomása ne csökkenjen?

FELADATOK

1. Egy 40 liter űrtartalmú hegesztőpalackban 5 MPa nyomású oxigén van. A gáz hőmérséklete 15 °C.

a) Mennyivel nő meg a palackban a nyomás, ha a benne lévő gáz hőmérséklete a tűző napon lévő munkaterületen 50 °C -ra emelkedik?

b) Mekkora tömegű gázt használtak el a palackból, ha a munka végeztével a nyomásmérő ismét 5 MPa értéket mutat, és közben a gáz hőmérséklete 30 °C-ra csökken?

MEGOLDÁS:

$V = 40\ \text{dm}^3$

$p_1 = 5\ \text{MPa} = 5 \cdot 10^6\ \text{Pa}$; $p_3 = p_1 = 5\ \text{MPa}$

$T_1 = 15\ °\text{C} = 288\ \text{K}$; $T_2 = 50\ °\text{C} = 323\ \text{K}$; $T_3 = 30\ °\text{C} = 303\ \text{K}$

$M = 32\ \frac{\text{g}}{\text{mol}}$

p_2, $\Delta m = ?$

a) Az oxigéngáz megnövekedett nyomását Gay-Lussac II. törvényéből számíthatjuk ki. (Ne feledkezzünk meg a hőmérsékleteket kelvinbe átszámítani!)

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}, \text{ ebből } p_2 = p_1 \cdot \frac{T_2}{T_1} = 5 \text{ Mpa} \cdot \frac{323 \text{ K}}{288 \text{ K}} = \mathbf{5{,}61 \text{ MPa.}}$$

b) Az elhasznált gáz tömegét az állapotegyenlet segítségével határozhatjuk meg.

A $p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$ állapotegyenletet írjuk fel az (1) (3) állapotokra! Az így kapott egyenletekből a tömegek kiszámíthatók:

$$m_1 = \frac{p_1 \cdot V \cdot M}{R \cdot T_1} = \frac{5 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{8{,}31 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 288 \text{ K}} = 2674 \text{ g} = 2{,}674 \text{ kg},$$

$$m_3 = \frac{p_3 \cdot V \cdot M}{R \cdot T_3} = \frac{5 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{8{,}31 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 303 \text{ K}} = 2541 \text{ g} = 2{,}541 \text{ kg}.$$

Tehát az elhasznált gáz tömege $\Delta m = m_1 - m_3 = \mathbf{0{,}133 \text{ kg}}$.

2. Egy 30 cm átmérőjű léggömb belsejében a levegő nyomása 20 °C hőmérsékleten 110 kPa. Mekkora a léggömb belsejében a nyomás, ha a napon 55 °C-ra melegszik fel a léggömbbe bezárt levegő, és a léggömb átmérője 31 cm-re nő meg?

3. Egy tóban 15 méter mélyen, ahol a hőmérséklet 10 °C, egy légbuborék térfogata 3 cm^3. Mekkora a légbuborék térfogata, amikor feljön a felszínre, ahol a víz hőmérséklete 20 °C? (A 10 m magas vízoszlop nyomása megegyezik a külső légnyomás $p_0 = 100$ kPa értékével.)

4. Egy dugattyúval elzárt hengeres edényben lévő 5 dm^3 térfogatú ideális gázt melegítünk 17 °C hőmérsékletről 47 °C hőmérsékletre úgy, hogy először hagyjuk a dugattyút szabadon mozogni a hengerben 30 °C hőmérsékletig, majd rögzítjük a dugattyút, és a melegítést tovább folytatjuk. Mekkora a gáz nyomása és térfogata a melegítés végén? Ábrázoljuk a gáz állapotváltozását a p–V diagramon! (A külső légnyomás 101 kPa.)

5. Egy kerékpárbelsőben mért túlnyomás 50 kPa 15 °C-on. A napra kitett gumibelső térfogata 5%-kal növekszik, a túlnyomás a tömlő belsejében pedig 60 kPa-ra nő meg. A külső légnyomás 100 kPa. Mennyivel változott meg a tömlőben lévő levegő hőmérséklete?

6. Mekkora tömegű oxigén van abban az 50 liter térfogatú hegesztőpalackban, amelyben a gáz nyomása 10 MPa, és hőmérséklete 27 °C? A palackból 2,5 kg tömegű gázt elhasználunk. Mekkora a palackban maradt gáz nyomása, ha a palackban maradt gáz hőmérséklete 10 °C-kal csökken?

7. 1 m átmérőjű meteorológiai léggömböt 94,52 g tömegű ismeretlen gázzal töltöttek meg. A gáz hőmérséklete 20 °C, nyomása 110 kPa. Milyen gáz lehet a léggömbben?

8. Határozzuk meg az állapotegyenlet felhasználásával a normál állapotú hidrogéngáz, oxigéngáz, héliumgáz sűrűségét! Hasonlítsuk össze a kapott értékeket a függvénytáblázatban szereplő adatokkal! Mi lehet a kismértékű eltérés oka?

3. Molekuláris hőelmélet

3.1. Emlékeztető

A gázok **rendezetlen hőmozgást végző részecskékből állnak.** A részecskék egymással és az edény falával rugalmasan ütköznek.

A részecskék szapora ütközései révén a gázok nyomást fejtenek ki a gázt tartalmazó edény falára.

A gázrészecskék rendezetlen mozgására utaló jelenséget figyelhetünk meg olyan sötét, poros helyiségben, ahol a beszűrődő napsugarak megvilágítják a poros levegőt. Láthatjuk a fénysugár útjába eső megvilágított levegőben az apró porszemek cikcakkos mozgását.

Ezt a jelenséget először *Robert Brown* (1773–1858), angol botanikus írta le, aki a virágpollenek hasonló mozgását figyelte meg mikroszkóp alatt.

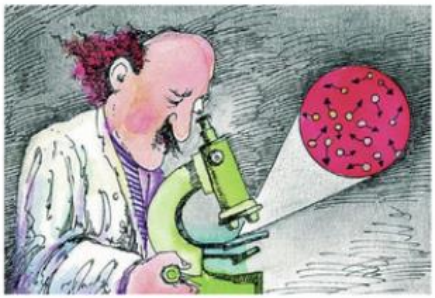
A porszemek, virágporok és más apró testecskék megfigyelt rendezetlen mozgását az atomi részecskék rendezetlen mozgásának következményeként értelmezhetjük. A kis testekre az – azoknak minden oldalról véletlenszerűen nekiütköző – atomi részecskék erőlökéseket fejtenek ki. A mikroütközések együttes hatása a porszemek kis tömege miatt nem egyenlítődik ki, ezért az apró testek is rendezetlen mozgásba kezdenek.

Ezt a mozgást szokás **Brown-mozgásnak*** nevezni. A Brown-mozgás az atomi részecskék létének és hőmozgásának közvetett bizonyítéka.

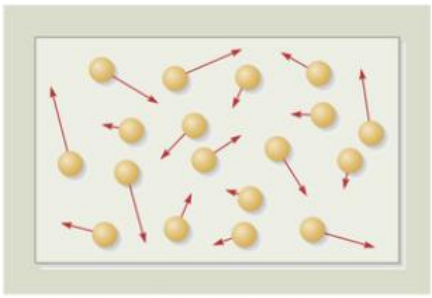
Albert Einstein (1879–1955) Nobel-díjas fizikus 1905-ben adta meg a Brown-mozgás egzakt matematikai leírását, ezzel nagyban hozzájárult ahhoz, hogy a tudós világ a múlt század elején az atomok létezését elfogadja.

A folyadékok és gázok spontán elkeveredése, **diffúziója*** is a részecskék hőmozgásával értelmezhető.

Az anyag halmazállapotainak leírására különböző részecskemodellek születtek.

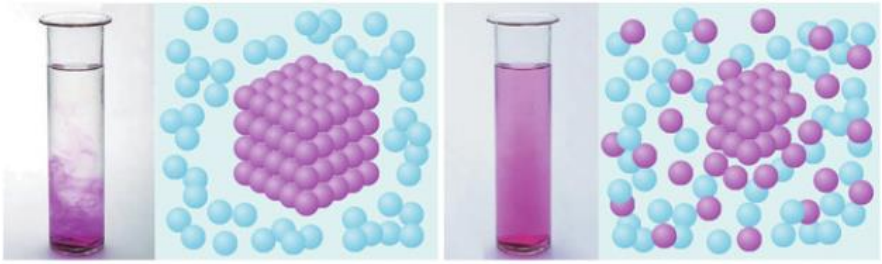


34.1. A Brown-mozgás megfigyelése mikroszkóppal



34.3. A gázrészecskék rendezetlen mozgása

3D

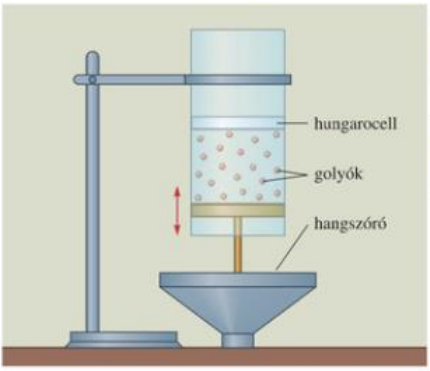


34.2. A hipermangán vízben való oldódása és modellezése részecskékkel. *Hogyan növelhető az oldódás sebessége?*

3.2. A gázok állapotváltozásainak molekuláris értelmezése



35.1. A „fénymalom" kereke megvilágításkor forgásba jön. *Mitől függ a forgás szögsebessége?*



35.2. *Hogyan növelhető a „hőmérséklet" a gázmodell-kísérleti eszköznél?*

A „fénymalom" nevű kísérleti eszköz üvegburában gázt és lapátokkal ellátott tengelyezett kereket tartalmaz. A fémlapátok egyik oldala fényes, a másik oldala kormozott. Ha az eszköz közelébe égő gyufát, gyertyát vagy izzólámpát viszünk, a kerék forgásba jön.

A forgás arra vezethető vissza, hogy a lángból vagy az izzólámpából érkező hősugarakat (hasonlóan a napsugárzáshoz) a sötét, kormozott felület jobban elnyeli. Így a sötét oldal jobban felmelegszik, mint a fényes felület.

A melegebb felület az előtte elhelyezkedő gázt is jobban felmelegíti. Ezért a melegebb (sötét) oldal előtti gázrészecskék mozgása szaporább, mint a hidegebb (fényes) oldal előttieké. Ebből adódik, hogy a gázrészecskék a sötét oldalra nagyobb nyomást fejtenek ki, mint a fényesre. Ezért a lapátos kerék forgásba jön.

A gázok nyomásának molekuláris értelmezésekor figyelembe vesszük, hogy a gázt alkotó **atomi részecskék** – a **rendezetlen hőmozgás során** – a gázt tartalmazó **edény falával rugalmasan ütköznek.** Eközben a részecskék **sebességének iránya megváltozik.** A sebességváltozás lendületváltozást is jelent, amely erőhatást eredményez az ütköző részecske és a fal között. Így az igen nagyszámú (kb. mólnyi mennyiségű) mikroütközések következtében a gázrészecskék az edény falára egy **átlagos erőt,** ennek következtében pedig **átlagos nyomást** fejtenek ki. Ezt a gáz nyomásaként érzékelhetjük és mérhetjük.

Kvalitatív modellkísérleteket végezhetünk a gázok állapotváltozására a fenti ábrán látható kísérleti eszközzel.

- A gáz részecskéit a dugattyúval ellátott átlátszó edényben lévő apró golyókkal modellezzük.
- A golyók rendezetlen mozgását az edény alján lévő hangszóró rezgő membránja hozza létre.
- A gáz mennyiségének változását a golyók számának változtatásával modellezhetjük.
- A nagyobb hőmérséklethez tartozó intenzívebb hőmozgást úgy érhetjük el, hogy a hangszóró membránjára nagyobb feszültséget kapcsolunk.
- A nyomást a dugattyú súlyával változtathatjuk.

A modellkísérletek elvégzésével megállapíthatjuk, hogy a részecskék által az edény falára kifejtett **nyomás annál nagyobb,**

- **minél nagyobb** a részecskék rendezetlen hőmozgásának **átlagos sebessége,** illetve
- **minél nagyobb a térfogategységben lévő részecskék száma** (minél sűrűbben helyezkednek el a részecskék) az edényben.

Számos jelenség (diffúzió, oldódás) arra utal, hogy a részecskék hőmozgása fokozódik a hőmérséklet emelkedésével. Vagyis minél **nagyobb a gáz hőmérséklete, annál nagyobb** a falnak ütköző **részecskék átlagos sebessége** is (lásd „fénymalom").

A modellkísérletek tapasztalatai alapján értelmezhetjük az ideális gázok állapotváltozásainak törvényszerűségeit.

Az **izoterm (T = állandó) állapotváltozásoknál** a térfogatváltozással együttjáró **részecskesűrűség megváltozása** okozza a **nyomás változását.**

A gáz összenyomásakor a részecskesűrűség növekedése a nyomás növekedésével jár. Táguláskor pedig a részecskesűrűség csökkenése a nyomás csökkenését okozza.

Az **izochor (V = állandó) állapotváltozásoknál** a részecskék rendezetlen hőmozgásának **átlagos sebességváltozása** okozza a gáz **nyomásának változását.**

Melegítéskor a gázrészecskék hőmozgása fokozódik, a részecskék átlagos sebessége megnő. Ezt a gáz nyomásának növekedéseként érzékeljük. Hűtéskor pedig a hőmozgás intenzitása, és így az átlagos sebesség is csökken, ezért a gáz nyomása is csökkenni fog.

Az **izobár (p = állandó) állapotváltozásoknál a részecskesűrűség változását** a hőmozgás **átlagos sebességének változása egyenlíti ki,** ezért marad **állandó a gáz nyomása.**

Melegítéskor ugyan növekszik a részecskék átlagos sebessége (ami nyomásnövekedést okozna), de mivel a gáz tágul, a részecskesűrűség csökkenése miatt a gáz nyomása állandó marad. Hűtéskor fordított a helyzet: az átlagos sebesség csökkenését a részecskesűrűség növekedése kompenzálja.

Az ideális gázokra vonatkozó állapotegyenlet alkalmas átalakításával a gáztörvények pontosabb mennyiségi értelmezéséhez juthatunk.

Tekintsük az állapotegyenlet *n anyagmennyiséggel* kifejezett alakját: $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$.

Az anyagmennyiség definíciója alapján az n mólszám kifejezhető a részecskék N száma és az N_A Avogadro-állandó hányadosaként: $n = \frac{N}{N_A}$.

Ezt behelyettesítve: $p \cdot V = N \cdot \frac{R}{N_A} \cdot T$.

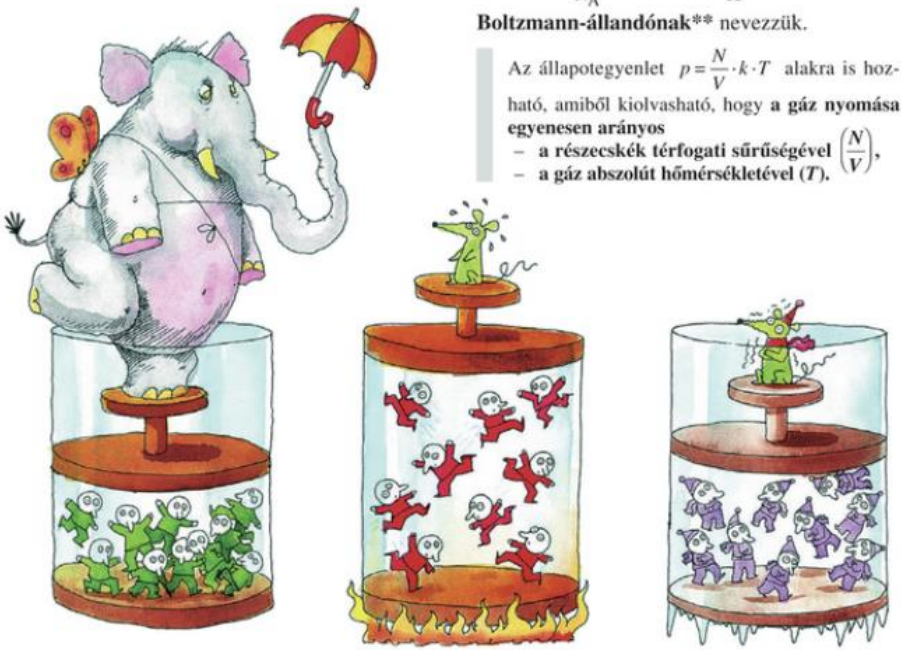
Bevezetve a $k = \frac{R}{N_A}$ jelölést, megkapjuk az állapotegyenlet részecskeszámmal kifejezett alakját:

$$p \cdot V = N \cdot k \cdot T.$$

A $k = \frac{R}{N_A} = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$ állandó értéket **Boltzmann-állandónak**** nevezzük.

Az állapotegyenlet $p = \frac{N}{V} \cdot k \cdot T$ alakra is hozható, amiből kiolvasható, hogy **a gáz nyomása egyenesen arányos**

- **a részecskék térfogati sűrűségével** $\left(\frac{N}{V}\right)$,
- **a gáz abszolút hőmérsékletével (T).**



MEGJEGYZÉSEK

1. A valódi gázok akkor tekinthetők jó közelítéssel ideális gázoknak, ha minél kisebb a részecskék térfogati sűrűsége és minél magasabb a hőmérséklet. Ugyanis ekkor a részecskék saját térfogata és a köztük fellépő molekuláris erők elhanyagolhatóak.
2. A gázrészecskék az edény falával rendezetlenül, nagy számban, szaporán ütköznek. Az ütközések során fellépő atomi erőlökések a kicsinységük miatt külön-külön nem mérhetők. Ezért a makroszkopikus mérések során mindig csak a „kisimult" átlagot tudjuk mérni.



37.1. *Rudolf Clausius* (1822–1888) német és *Ludwig Boltzmann* (1844–1906) osztrák fizikus

3. A molekuláris hőelmélet az 1850-es években *Rudolf Clausius* munkássága nyomán kezdett fejlődni. *James Clark Maxwell* (1831–1879) angol és *Ludwig Boltzmann* osztrák fizikus fejlesztette tovább az elméletet, amely később az általuk kidolgozott statisztikus fizika alapjául szolgált.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Ha egy hosszú, függőlegesen elhelyezett zárt csőbe valamilyen gázt töltünk, akkor méréssel is igazolhatjuk, hogy a cső felső lapjánál a nyomás egy kicsivel kisebb, mint az alaplapnál. Értelmezzük a jelenséget a kinetikus gázelmélet alapján!
2. Hányféleképpen tudjuk megváltoztatni a modellkísérlet során a nyomással egyenesen arányos részecskesűrűséget? Milyen változtatást jelent ez a gázoknál a valóságban?
3. Azonos térfogat és hőmérséklet esetén 1 g tömegű hidrogéngáznak vagy 1 g tömegű oxigéngáznak nagyobb a nyomása? Válaszunkat indokoljuk a részecskemodell alapján!
4. Milyen kapcsolat lehet a gázok $\frac{m}{V}$ sűrűsége és az $\frac{N}{V}$ részecskesűrűség között?

FELADATOK

1. Mekkora átlagos erőt fejt ki egy géppisztolyból leadott lövéssorozat a céltáblára, ha 1 perc alatt 120 lövedék csapódik a táblába $200\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ sebességgel? Egy-egy lövedék tömege 50 g. Mekkora erőt fejt ki egy lövedék a céltáblára, ha 5 cm mélyen hatol be a tábla anyagába?
2. Egy sivatagi homokvihar alkalmával a levegőben $90\ \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$ sebességgel repülő homokszemcsék ütköznek a sebességre merőleges sátorlapnak. Az áramló levegőben köbméterenként 400 gramm tömegű homok van.
   a) Mekkora nyomást fejtenek ki a homokszemek a sátorlapra, ha az ütközésüket rugalmatlannak vesszük?
   b) Hogyan változik meg a nyomás, ha a sátorlapot feszesebbre állítjuk?

3D

OLVASMÁNY

Földünk légköre

Földünk légkörét a Föld gravitációs vonzása tartja a Föld körül fogva. Ha ez a vonzás megszűnne, vagy nem lenne elég erős, akkor a légkör atomi részecskéinek állandó rendezetlen hőmozgása következtében a részecskék a világűrbe szöknének, azaz a légkör előbb-utóbb elillanna. A Holdnak azért nincs légköre, mert a gravitációs vonzása nem elég erős ahhoz, hogy a nagy sebességgel mozgó gázrészecskéket a gravitációs vonzáskörében tartsa. Ezért szöktek meg a Hold felszínéről a – valamikor a Hold belsejéből vulkáni tevékenységgel kiszabadult – forró gázok.

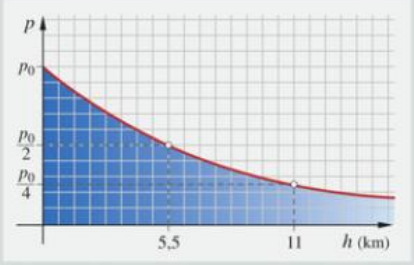


38.1. A Föld légkörének nincs éles határa

A Nap bolygói közül a Földön kívül mások is rendelkeznek légkörrel: így a Vénusz légköre túlnyomórészt szén-dioxidból áll. A bolygó felszínének átlagos hőmérséklete 470 °C, légköri nyomása pedig a földi légnyomás mintegy 100-szorosa. A Mars légkörét is nagyrészt szén-dioxid alkotja, amelynek hőmérséklete és nyomása a felszínen –53 °C és 640 Pa.

Mekkora lehet a légkörünk tömege? A kérdést becsléssel könnyen megválaszolhatjuk a Föld felszínén lévő légnyomás ismeretében. Tudjuk, hogy a levegő súlyából származó légnyomás értéke kb.100 kPa nagyságú. Ez azt jelenti, hogy a levegő a Föld felszínének minden egyes négyzetméterére 100 kN = 10^5 N erőt fejt ki súlyából adódóan. Így a légkör teljes súlyát könnyen megkapjuk, ha a 10^5 N értéket megszorozzuk a földfelszín $A = 510$ millió km^2 nagyságával. Így $G_{\text{légkör}} = 10^5\ \text{N/m}^2 \cdot 510 \cdot 10^{12}\ \text{m}^2 = 5{,}1 \cdot 10^{19}$ N. Ebből a légkör tömegét úgy nyerjük, hogy a G súlyt osztjuk a $g = 10\ \text{m/s}^2$ gravitációs gyorsulással: $m = G/g = 5{,}1 \cdot 10^{18}$ kg. (Ez a Föld tömegének $6 \cdot 10^{24}$ kg – mintegy 1 milliomod része.)

Milyen vastag a Föld légköre? Azt gondolhatnánk, hogy a légkör vastagságát könnyen megkaphatjuk, hiszen a légnyomásból ismerjük az 1 négyzetméter feletti levegőoszlop súlyát és tömegét (10^5 N, illetve 10^4 kg), így az oszlop térfogatát megkapnánk, ha a levegő tömegét elosztjuk annak normál sűrűségével: 10^4 kg: 1,3 kg/m^3 = 7700 m^3. Ebből adódna a levegőoszlop $h = 7700$ m magassága. Csakhogy a levegő sűrűsége és nyomása nem állandó. A magassággal oly módon csökkennek a kezdeti értékek, hogy kb. 5,5 kilométerenként a sűrűség és a nyomás is megfeleződik. (Ezért kell a Himalája 8000 méteres csúcsainak meghódításához a hegymászóknak oxigénmaszkot használni, mert abban a magasságban a levegő sűrűsége a tengerszinten mért értéknek csak kb. 35%-a.) Ez azt is jelenti, hogy a felettünk lévő légkör tömege 5,5 kilométerenként megfeleződik, vagyis 5,5 km magasság alatt található a légkör tömegének 50%-a, 11 km alatt a 75%-a. Hétszeres feleződés után, azaz 38,5 km magasság alatt pedig több mint 99%-a található a légkör teljes tömegének.



38.2. A levegő nyomásának csökkenése a magasság függvényében

A fokozatosan ritkuló légkörnek azonban nincs éles felső határa. A légkör fokozatosan ritkul addig, amíg részecskesűrűsége eléri a Naprendszerünk bolygóközi részecskesűrűség-értékét (amely csak néhány részecskét jelent köbcentiméterenként). Erre a magasságra úgy kaphatunk becslést, ha – kiindulva a Föld felszínén lévő kb. $2{,}5 \cdot 10^{19}$ részecske/cm^3 kezdeti értékéből – vesszük a légköri nyomással arányosan csökkenő részecskesűrűség sorozatos feleződését. Ily módon a légkör felső határának 300-400 km adódik. A becsült érték helyességét bizonyítja, hogy a mesterséges holdak legalább 300-400 km feletti magasságban keringenek a Föld körül azért, hogy a levegő okozta közegellenállás már ne akadályozza a mozgásukat.

3.3. A gázok belső energiája, a hőtan I. főtétele

AZ IDEÁLIS GÁZOK BELSŐ ENERGIÁJA

A gyakorlatban sok helyen használjuk fel a gázokat munkavégzésre, a környezetünk megváltoztatására (gőzgép, robbanómotor, légfék, légkalapács stb.).

A nyugvó gázok is rendelkeznek energiával, amely a részecskék hőmozgásával kapcsolatos. Ezt az energiát a gázok **belső energiájának** nevezzük.

Mi határozza meg az ideális gázok belső energiáját a részecskemodell szerint?

Induljunk ki a részecskemodell alábbi alapfeltevéseiből:

- a részecskéket pontszerűnek tekintjük,
- a részecskék rendezetlen mozgást végeznek,
- egymással és az edény falával rugalmasan ütköznek.

Ezen feltevések alapján nyilvánvaló, hogy az **ideális gáz belső energiáját a részecskék rendezetlen mozgásából származó mozgási energiák összege adja.**

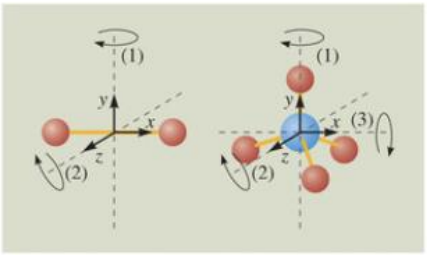
A korábbiakban láthattuk, hogy a gázok hőmérsékletének növekedése a részecskék intenzívebb hőmozgásával jár együtt. Ez viszont azt jelenti, hogy magasabb hőmérsékleten nagyobb a részecskék átlagsebessége, és így az ε_m **átlagos mozgási energiája**** is. ($\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot v_{\text{átl.}}^2$, ahol m_0 egy részecske tömege.)

A részecskemodell alapján matematikailag levezethető, hogy az ideális gáz részecskéinek ε átlagos mozgási energiája egyenesen arányos a gáz abszolút hőmérsékletével, ahol az arányossági tényező a k Boltzmann-állandó $\frac{3}{2}$-szerese:

$$\varepsilon_m = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T.$$

A modell szerint az egyatomos gázok (ilyenek a nemesgázok) pontszerű részecskékből állnak. Az N részecskéből álló gáz teljes mozgási energiáját (az E_b belső energiát) megkapjuk, ha az ε átlagos energiát megszorozzuk a részecskék N számával azaz:

$$E_b = N \cdot \varepsilon = N \cdot \frac{3}{2} \cdot k \cdot T.$$



39.1. Két- és többatomos molekula modellje 2, illetve 3 lehetséges forgástengellyel

Ha a gáz két- vagy többatomos molekulákból tevődik össze, akkor a molekuláknak a mozgási energián kívül forgási energiájuk is van. Ugyanis a többatomos molekulák, mint parányi súlyzók, egymásra merőleges tengelyek körül foroghatnak is.

Az atomok rendezetlen mozgása csak haladó mozgásból, a molekuláké pedig haladó és forgómozgásból tevődik össze.

A háromdimenziós haladó mozgásnak 3 **szabadsági foka**** van. A forgómozgásnál – a forgástengelyek számától függően – 2 vagy 3 a szabadsági fokok száma. Így az egyatomos gázoknak (nemes gázok) $f = 3$ a szabadsági fok száma. A kétatomos gázoknak $f = 3 + 2 = 5$ szabadsági foka van. (A három és annál több atomos gázoknak $f = 3 + 3 = 6$ szabadsági foka is lehet.)

A gázrészecskék teljes átlagos energiáját $\varepsilon = \frac{f}{2} \cdot k \cdot T$ alakban írhatjuk fel.

Az N részecskéből álló gáz belső energiája:

$$E_b = N \cdot \varepsilon = N \cdot \frac{f}{2} \cdot k \cdot T.$$

Ha figyelembe vesszük az ideális gázokra vonatkozó állapotegyenlet különböző alakjait, akkor a belső energia felírható az alábbi formákban is:

$$E_b = \frac{f}{2} \cdot N \cdot k \cdot T = \frac{f}{2} \cdot p \cdot V;$$

$$E_b = \frac{f}{2} \cdot \frac{m}{M} \cdot R \cdot T.$$

A HŐTAN I. FŐTÉTELE

Hogyan tudjuk egy adott gázmennyiség E_b belső energiáját megnövelni? Ehhez a részecskék átlagos sebességét kell növelnünk, amire kétféle lehetőség kínálkozik:

a) A gázt úgy melegítjük, hogy magasabb hőmérsékletű környezettel hozzuk termikus kölcsönhatásba.

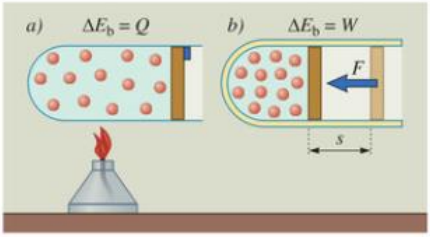
A melegebb környezet nagy sebességű részecskéi először az edény falában, majd a gázban is nagyobb átlagsebességű mozgást hoznak létre, amit a hőmérséklet emelkedéseként észlelünk.

A termikus kölcsönhatással átadott energiát **hőmennyiségnek*** nevezzük, és Q-val jelöljük.

b) Összenyomjuk a gázt, ami szintén a részecskék átlagos sebességének növekedését eredményezi.

Egy dugattyúval elzárt hengeres edényben az álló dugattyúval ütköző részecskék sebességének nagysága a rugalmas visszapattanásnál nem változik (hasonlóan a falról visszapattanó labdához). Összenyomás közben viszont a befelé (a részecskékkel szemben) haladó dugattyúról nagyobb sebességgel pattannak vissza a részecskék. Ezzel növekszik a részecskék átlagos sebessége, nő a hőmérséklet és a belső energia.

A gáz összenyomásakor erőt fejtünk ki bizonyos úton, tehát munkát végzünk. A mechanikai kölcsönhatással átadott energiát a W munka adja meg.



40.1. *Hogyan növelhető a gáz belső energiája?*

A kétféle módon történő energiaváltoztatás fordított irányban is lejátszódhat. Ha a gáz ad le hőt a hidegebb környezetének, akkor a Q hőmennyiség negatív, a gáz E_b belső energiája csökken.

Ugyanígy csökken a gáz E_b belső energiája, ha a gáz tágul (a távolodó dugattyúról kisebb sebességgel pattannak vissza a részecskék). Ilyenkor a gázon végzett W munka negatív, mivel a dugattyúra ható külső erő iránya ellentétes az elmozdulással.

Az energia megmaradásának tétele szerint:

A gáz belső energiájának megváltozása egyenlő a gázzal közölt Q hőmennyiség és a gázon végzett W mechanikai munka előjeles összegével, vagyis:

$$\Delta E_b = Q + W.$$

Ezt nevezzük a hőtan I. főtételének.

MEGJEGYZÉSEK

1. A kétatomos molekuláknál az atomokat összekötő tengely körüli forgás nem eredményez forgási energiát, mivel az atomok pontszerűek. Ezért itt a forgómozgás szabadsági fokának megállapításánál a súlyzó középpontján átmenő, a súlyzó rúdjára és egymásra is merőleges két tengelyt kell csak számba venni (*39.1. ábra*).
2. A belső energiába **nem számítjuk bele** a makroszkopikus testek – rendezett mozgásából eredő – **mozgási energiáját** és a különböző fizikai mezőkben (gravitációs, elektromos) meglévő **külső potenciális energiáját.**
3. A hőtan első főtétele nemcsak a gázokra, hanem minden testre érvényes, ezért úgy tekinthető, mint az energiamegmaradás törvényének általánosítása. A súrlódással járó mozgásoknál a mechanikai energiák összege nem állandó, hanem csökken. A hiányt okozó súrlódási munkavégzés azonban nem vész el, hanem a kölcsönhatásban lévő testek belső energiáját növeli.

4. A fizikusoknak sokáig téves elképzelése volt a hő (hőmennyiség) fogalmáról. Azt gondolták, hogy melegítésnél a melegebb testből valamilyen láthatatlan „hőfolyadék" jut át a hidegebb testbe. Anyagszerkezeti ismeretek hiányában nem tudhatták, hogy a hőátadás valójában a részecskék rendezetlen mozgásának átadását jelenti. *Joule* angol fizikus volt az, aki a 19. sz. közepén mérésekkel meghatározta a mechanikai munka és a hőmennyiség, valamint az elektromos munka és a hőmennyiség közötti megegyező kapcsolatot. Ezzel jelentősen hozzájárult az energiamegmaradás törvényének felismeréséhez. *Joule* nevét viseli az energia és a munka mértékegysége.



41.1. *James Prescott Joule* (1818–1889)

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Hogyan változik meg a gáz belső energiája, ha egy adott – elég magas – hőmérsékleten a kétatomos gázmolekulák egy része atomokra esik szét?

2. Hasonlítsuk össze egy adott hőmérsékletű levegőben található O_2-, N_2- és H_2-molekulák átlagos sebességét!

3. Lehet-e egy gáz belső energiája zérus vagy negatív érték?

4. Hogyan változik meg a szobában lévő levegő belső energiája, ha befűtünk?

5. Mondjunk példát arra, hogy egy gáz egyszerre kerül más testekkel – a belső energiáját megváltoztató – termikus és mechanikai kölcsönhatásba!

6. Előfordulhat-e, hogy a kettős kölcsönhatásban részt vevő gáz felmelegszik annak ellenére, hogy a termikus kölcsönhatáskor energiát ad át egy másik testnek? Ha igen, mondjunk rá példát! (Hűtjük, és mégis melegszik.)

7. Előfordulhat-e, hogy a kettős kölcsönhatásban részt vevő gáz lehűl annak ellenére, hogy termikus módon energiát vesz fel egy másik testtől? (Melegítjük, és mégis lehűl.)

FELADATOK

1. Mekkora a belső energiája 1 mólnyi normál állapotú egyatomos, illetve kétatomos gáznak?

2. Becsüljük meg egy 4 m × 5 m × 3 m méretű szobában lévő levegő belső energiáját!

3. Egy szoba szellőztetése során a szobában lévő szilárd anyagok és folyadékok belső energiája csökkent. Hogyan változott meg a szoba levegőjének belső energiája?

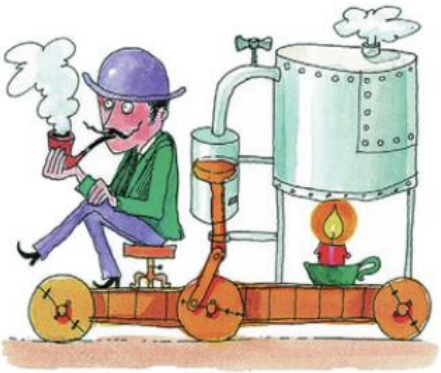
4. Mennyivel változik meg 1 mól kétatomos ideális gáz belső energiája, ha hőmérséklete 3 K-nel növekszik?

5. 5 mól normál állapotú, egyatomos ideális gáz belső energiája melegítés során 10%-kal nő. Mekkora a gáz hőmérséklete melegítés végén? Mekkora a belsőenergia-növekedése?

6. Egy dugattyúval elzárt hengerben a levegőt lassan nyomjuk össze úgy, hogy közben a levegő hőmérséklete ne változzon! A munkavégzés 100 J. Történt-e az összenyomás során a gáz és a környezete között hőcsere, ha igen, akkor mekkora ennek mértéke?

7. Keressünk irodalmat, és olvassunk Joule életéről és munkásságáról!

3.4. A gázok állapotváltozásainak energetikai vizsgálata



A **gázok állapotváltozása** mindig más testekkel **való kölcsönhatások révén jön létre.**

Melegítéskor (hőközlés) és hűtéskor (hőelvonás) **termikus kölcsönhatás** lép fel a gáz és a környezete között. A gázok tágulásakor és összenyomásakor pedig **mechanikai kölcsönhatás** jön létre a gáz és a külső környezet között.

A kétféle kölcsönhatás során **energiacsere** valósul meg a gáz és a külső környezet között. Ennek végeredményeként a **gáz belső energiája növekedhet, csökkenhet vagy állandó marad.**

Vizsgáljuk meg az ideális gáz és a környezete közötti termikus és mechanikai kölcsönhatások hatására létrejött speciális állapotváltozások energiaviszonyait. Végezzük ezt az I. főtétel $\Delta E_b = Q + W$ energiamérlege alapján!

IZOBÁR ÁLLAPOTVÁLTOZÁSOK ENERGIACSERÉJE

Melegítsünk egy dugattyúval ellátott hengerbe zárt gázt állandó nyomáson!

A melegítéskor a termikus kölcsönhatás során Q hőmennyiséget közlünk a gázzal, amely tágulása közben W' **tágulási munkát** végez a külső környezettel szemben. A gáz hűtésekor Q hőmennyiséget vonunk el, miközben a gáz térfogata csökken. Ekkor a külső környezet végez W **térfogati munkát*** a gázon.

A gáz tágulási munkája kiszámítható a $W' = F \cdot s$ összefüggés alapján. A gáz által a dugattyúra kifejtett erő $F = p \cdot A$ alakban írható. A gáz térfogatának változása pedig $\Delta V = A \cdot s$. Így a gáz tágulási munkája:

$$W' = F \cdot s = p \cdot A \cdot s = p \cdot \Delta V.$$

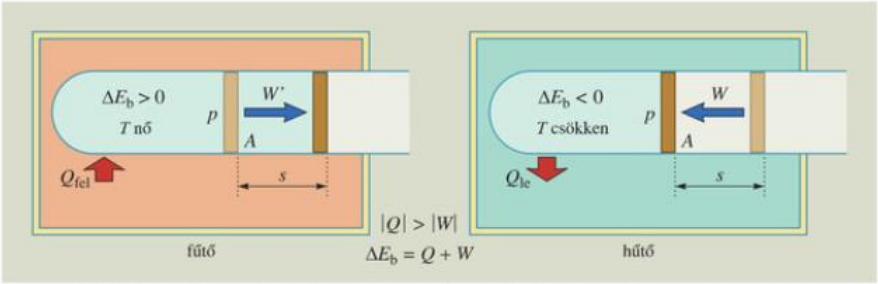
A tágulási munka fenti kifejezése tetszőleges alakú edény térfogatváltozására is igaz.

Izobár állapotváltozásnál a gáz tágulási munkáját úgy számíthatjuk ki, hogy az állandó p nyomást megszorozzuk a ΔV térfogat-növekedéssel. Így:

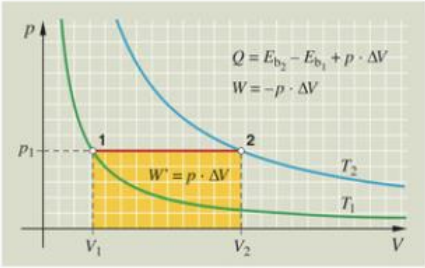
$$W' = p \cdot \Delta V.$$

A külső környezet által a gázon végzett munka pedig:

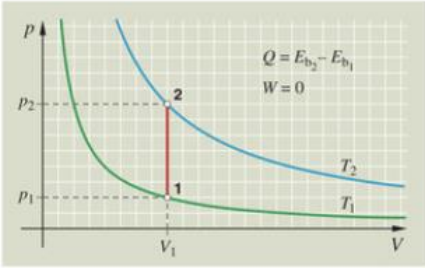
$$W = -W' = -p \cdot \Delta V.$$



42.1. Az izobár állapotváltozások energiacsere-viszonyai a gáz és a környezete között



43.1. *Mit mutat meg a sárga terület az izobár állapotváltozás p–V diagramján?*



43.3. Az izochor állapotváltozás p–V diagramja

Az izobár állapotváltozások energiacsere-viszonyaira az alábbiak jellemzőek:

- **A gáz környezetével egyidejűleg termikus és mechanikai kölcsönhatásban is van.**
- **A gáz és környezete közötti kétfajta kölcsönhatás során az energiacserék iránya mindig ellentétes.** Ha a gáz termikus úton energiát kap, akkor tágulási munkavégzéssel energiát ad le. Fordítva: ha termikus úton energiát vonunk el a gáztól, akkor a környezet pozitív munkát végez a gázon.
- **A termikus úton történő energiacsere nagysága mindig nagyobb a mechanikai energiacsere nagyságánál.** Ezért melegítéskor a gáz belső energiája mindig nő, hűtéskor pedig mindig csökken.

Izobár állapotváltozás során a gáz belső energiájának megváltozása az I. főtétel alapján:

$$\Delta E_b = Q - p \cdot \Delta V.$$

IZOCHOR ÁLLAPOTVÁLTOZÁSOK ENERGIACSERÉJE

Kísérletünkben rögzítsük a dugattyút egy adott helyen. Ezzel biztosítjuk a gáz állandó térfogatát.

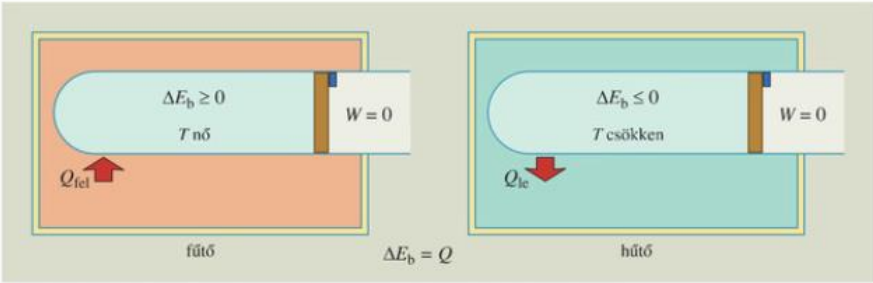
Ebben az esetben a gáz állapota csak úgy változhat, ha a gázt melegítjük vagy hűtjük. Mivel **a térfogat állandó,** ezért **mechanikai kölcsönhatás,** és így mechanikai munkavégzés **sem jön létre** a gáz és a külső környezet között.

Az izochor állapotváltozás során a gáz és a környezete között csak termikus úton történik energiacsere hőfelvétellel vagy hőleadással.

Izochor állapotváltozás során a gáz belső energiájának megváltozása:

$$\Delta E_b = Q.$$

Ekkor a gázzal közölt Q hőmennyiség teljes egészében a gáz belső energiájának növelésére fordítódik. A gáztól elvont Q hőmennyiség pontosan megegyezik a gáz belső energiájának csökkenésével.



43.2. A gáz és környezete közötti energiacsere izochor állapotváltozások során

IZOTERM ÁLLAPOTVÁLTOZÁSOK ENERGIACSERÉJE

Az izoterm állapotváltozások során a gáz hőmérséklete állandó, így a gáz belső energiája nem változik, vagyis $\Delta E_b = 0$.

Az izoterm állapotváltozást pl. úgy valósíthatjuk meg, hogy a gázt tartalmazó, dugattyúval ellátott hengert olvadó jég-víz keverékbe helyezzük. A keverék hőmérséklete állandó: azonos a jég olvadáspontjával (0 °C). Így a gáz hőmérséklete is ezen az állandó értéken marad.

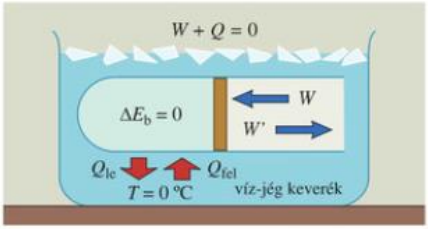
Ha a gázt a dugattyú segítségével lassan összenyomjuk, akkor a víz-jég keverékben a jég egy része megolvad. A gázon végzett külső munkát a gáz hő formájában adja le környezetének. Ha viszont az összenyomott gázt lassan tágulni hagyjuk, akkor a víz egy része megfagy. A gáz által a víztől elvont hő a gáz tágulási munkáját fedezi.

A gázok izotermikus állapotváltozására jellemző energiacsere-viszonyok:

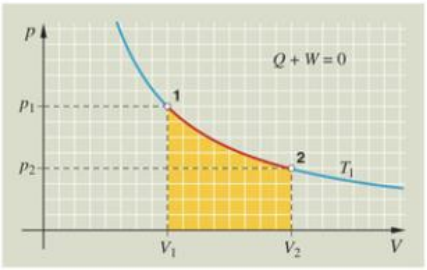
- **A gáz és a környezete között kétfajta kölcsönhatás jön létre.**
- **A gáz összenyomásakor a gázon végzett pozitív mechanikai munkát a gáz a környezetének leadott hővel kompenzálja.**
- **A gáz tágulásakor a gáz mechanikai munkavégzését az állandó hőmérsékletű környezettől felvett hő fedezi.**
- **A kétféle kölcsönhatás energiacseréje mindig ellenkező irányú, és az energiaváltozások előjeles összege zérus.**

Izoterm állapotváltozás során a gáz belső energiájának megváltozása zérus, azaz:

$$\Delta E_b = Q + W = 0.$$



44.1. Izotermikus állapotváltozások energiacsere-viszonyai



44.2. *Mi mutatja a hőcsere nagyságát az izoterm állapotváltozás p–V diagramján?*

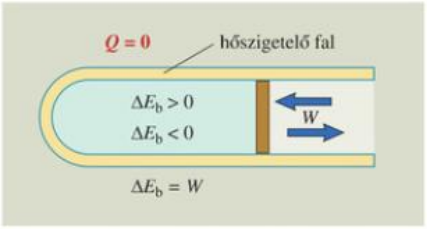
A GÁZOK ADIABATIKUS ÁLLAPOTVÁLTOZÁSAI*

Ha a gáz tágulása vagy összenyomása gyorsan történik, vagy ha a gázt tartalmazó edény jó hőszigetelő, akkor nincs mód a megfelelő hőcserére. Ilyenkor a gáz összenyomáskor felmelegszik, illetve táguláskor lehűl.

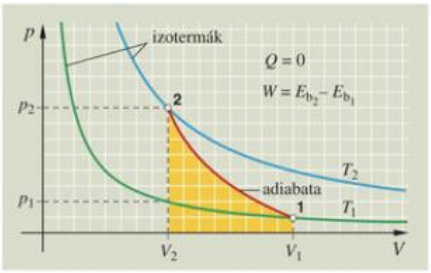
Ezt tapasztalhatjuk például, ha a kerékpártömlőt gyorsan pumpáljuk. Ekkor a pumpában lévő levegő és a pumpa hengerének fala felmelegszik, amit kezünkkel is érzékelhetünk. A szódásszifonpatron becsavarásakor pedig láthatjuk és kezünkkel is érzékelhetjük, hogy a patron külső fala megderesedik. Ez jelzi, hogy a szén-dioxid-gáz és a patron fala a gáz gyors tágulásakor hirtelen lehűlt.

A dízelmotorban a hirtelen összenyomott levegő annyira felmelegszik, hogy az ekkor befecskendezett üzemanyag öngyulladással elég. Az égéstől még forróbbá váló, nagy nyomású gázkeverék a gyors táguláskor munkát végezve lehűl.

Külön érdemes megvizsgálni a gázok állapotváltozásának azt a határesetét, amikor a gáz és a környezete közötti hőcsere elhanyagolható, azaz $Q = 0$. **Az ilyen állapotváltozásokat adiabatikus állapotváltozásoknak nevezzük.**



44.3. A gázok adiabatikus állapotváltozásainak energiacsere-viszonyai



45.1. *Mi adja meg a belső energia változását az adiabatikus állapotváltozás p–V diagramján?*

Az adiabatikus állapotváltozás nem tartozik a speciális állapotváltozások közé, hiszen mindhárom állapotjelző (p, V, T) változik. Energetikai szempontból viszont sajátságos, mert az állapotváltozás során a gáz és a környezete között csak mechanikai kölcsönhatás jön létre.

– Az adiabatikus állapotváltozáskor – amikor nincs hőcsere – a gázon végzett munka teljes egészében a gáz belső energiáját növeli, ezért a gáz összenyomáskor felmelegszik.
– A gáz adiabatikus tágulásakor pedig a térfogati munkavégzést a gáz belső energiájából fedezi, ezért a gáz táguláskor lehűl.

Adiabatikus állapotváltozás során a gáz belső energiájának megváltozása megegyezik a gázon végzett munkával:

$$\Delta E_b = W.$$

AZ IDEÁLIS GÁZOK FAJHŐJE*

A korábbi tanulmányaink során már megismerkedtünk a termikus kölcsönhatásokban az anyagokra jellemző fizikai mennyiséggel, a fajhővel.

Egy adott anyag fajhője megmutatja, hogy mekkora hőmennyiség felvételére vagy leadására van szükség ahhoz, hogy az 1 kg tömegű anyag hőmérséklete 1 °C-kal (vagy 1 K-nel) változzon.

A definíció alapján a fajhő matematikai kifejezése:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}, \text{ mértékegysége: } \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot {}^\circ\text{C}} \left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right).$$

Az ideális gázok állapotváltozásainak energetikai vizsgálatakor láthattuk, hogy a gázokkal közölt Q hőmennyiség nem mindig fordítódik teljes egészében a belső energia növelésére.

A konkrét állapotváltozásoktól függően **a gáz belső energiájának megváltozása, és így a hőmérséklet-változása is különböző lehet azonos Q hőcsere esetében is.**

Ezért **a gázok fajhője nemcsak a gáz anyagi minőségétől, hanem a hőközlés módjától is függ.** A gázok fajhőjének megadásakor meg kell adni a hőcsere módját is.

Az **állandó nyomáson történő hőcserénél a c_p fajhőt*, míg állandó térfogaton történő hőcsere esetén a c_V fajhőt*** használjuk.

A gázok állandó nyomáson nehezebben melegszenek fel, mint állandó térfogaton, mivel ekkor mechanikai munkavégzés is történik. A gázzal közölt hőmennyiség egy része a gáz által a környezetén végzett tágulási munkára fordítódik, így a gáz belső energiájának változása kisebb, mint az állandó térfogaton bekövetkező állapotváltozás esetén.

Ezért az izobár állapotváltozásoknál a gázok fajhője nagyobb, mint az izochor állapotváltozások esetén ($c_p > c_V$).

Az ideális gázok kétféle fajhőjét kifejezhetjük a gázok M moláris tömegével és f szabadsági fokával. A kifejezéshez eljuthatunk, ha alkalmazzuk az I. főtételt, és felhasználjuk az állapotegyenlet megfelelő alakját:

$$c_V = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} = \frac{\Delta E_b}{m \cdot \Delta T} = \frac{\frac{f}{2} \cdot \frac{m}{M} \cdot R \cdot \Delta T}{m \cdot \Delta T} = \frac{f}{2} \cdot \frac{R}{M}.$$

$$c_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} = \frac{\Delta E_b + p \cdot \Delta V}{m \cdot \Delta T} =$$

$$= \frac{\frac{f}{2} \cdot \frac{m}{M} \cdot R \cdot \Delta T + \frac{m}{M} \cdot R \cdot \Delta T}{m \cdot \Delta T} = \left(\frac{f}{2} + 1 \right) \cdot \frac{R}{M}.$$

Az ideális gázok kétféle fajhőjére kapott kifejezések:

$$c_V = \frac{f}{2} \cdot \frac{R}{M} \quad \text{és} \quad c_p = \left(\frac{f}{2} + 1 \right) \cdot \frac{R}{M},$$

ahol az f a gáz atomi részecskéinek szabadsági foka, M a gáz moláris tömege, R pedig az egyetemes gázállandó.

MEGJEGYZÉSEK

1. Mivel az izochor állapotváltozások során a gáz belső energiájának megváltozása egyenlő a közölt vagy elvont Q hőmennyiséggel, ezért a belső energia megváltozásának kiszámítására használhatjuk a $\Delta E_b = c_V \cdot m \cdot \Delta T$ kifejezést is. A kifejezés a gáz tetszőleges állapotváltozásánál is alkalmazható, mivel a belső energia megváltozása csak a hőmérséklet-változástól függ.

2. Gyakran használják a **hőkapacitás*** fizikai mennyiséget is, mellyel a testek hőbefogadó képességét jellemezhetjük. A testek hőkapacitása megadja, hogy a test hőmérsékletének 1 fokkal történő megváltoztatásához mekkora Q hőcserére van szükség. Értékét megkapjuk, ha a Q hőcsere értékét osztjuk a test ΔT hőmérséklet-változásával. A hőkapacitás jele C, mértékegysége $\frac{1}{\text{K}}$ vagy $\frac{1}{°\text{C}}$. Így $C = \frac{Q}{\Delta T}$. Homogén, azonos anyagból álló testeknél a hőkapacitás és a fajhő közötti összefüggés: $c = \frac{C}{m}$. A fajhő elnevezés a fajlagos (vagyis egységnyi tömegre vonatkoztatott) hőkapacitás rövidítéséből származik.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Mely állapotváltozások során van a gáz csak egyféle kölcsönhatásban a környezetével, és melyek azok az állapotváltozások, amelyeknél a gáz és a környezete között egyidejűleg kétféle kölcsönhatás is megvalósul?

2. Mely állapotváltozásokra igaz a következő kijelentés? A gáz táguláskor hőt vesz fel környezetétől, összenyomáskor pedig hőt ad le környezetének.

3. Mely állítások igazak az ideális gázok izobár állapotváltozására?
   a) Az állapotváltozás során a gázzal közölt hő egy része a gáz tágulási munkáját fedezi.
   b) A gáz tágulási munkája éppen egyenlő a gázzal közölt hővel.
   c) A gáztól elvont hő nagyobb, mint a gázon végzett mechanikai munka.
   d) A termikus hőcsere előjele mindig ellentétes a gázon végzett külső munka előjelével.

4. Miért nem kell a szilárd testeknél és a folyadékoknál kétféle fajhővel számolni?

5. Izotermikus tágulás során a gáz $Q = 200$ J hőmennyiséget vett fel. Mekkora volt a gáz térfogati munkavégzése?

6. A gáz izotermikus összenyomásakor 500 J munkát végzünk. Mennyi hőt kell elvonni a gáztól?

7. Mennyivel nő a gáz belső energiája, ha adiabatikus összenyomásakor 200 J munkát végzünk?

FELADATOK

1. Egy dugattyúval elzárt edényben 2 mól 27 °C hőmérsékletű kétatomos ideális gáz van. A külső légnyomás 100 kPa. A gázt egyenletesen melegítjük mindaddig, míg hőmérséklete eléri az 57 °C-ot. Ábrázoljuk a gáz állapotváltozását a p–V diagramon!
   a) Mekkora a gáz térfogata kezdetben és a melegítés végén?
   b) Mennyi hőt közöltünk a gázzal a melegítés során?
   c) Mennyivel változott meg a gáz belső energiája, és mennyi munkát végzett a gáz?

MEGOLDÁS:

Adatok:

$n = 2$ mol

$T_1 = 27\ °C = 300$ K

$T_2 = 57\ °C = 330$ K

$p = 100$ kPa $= 10^5$ Pa

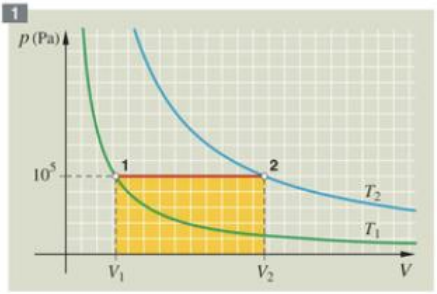
$R = 8{,}314 \dfrac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

a) $V_1 = ?,\ V_2 = ?$

b) $Q = ?$

c) $\Delta E_b = ?,\ W' = ?$

1



a) Az állapotegyenletből kifejezzük a térfogatot, majd az (1) és (2) állapot adott állapotjelzőit behelyettesítve megkapjuk a keresett térfogatértékeket:

$$V_1 = \frac{n \cdot R \cdot T_1}{p} = \frac{2\ \text{mol} \cdot 8{,}314 \dfrac{\text{J}}{\text{mol}} \cdot 300\text{K}}{10^5 \dfrac{\text{N}}{\text{m}^2}} = 4{,}98 \cdot 10^{-2}\ \text{m}^3,$$

$$V_2 = \frac{n \cdot R \cdot T_2}{p} = \frac{2\text{mol} \cdot 8{,}314 \dfrac{\text{J}}{\text{mol}} \cdot 330\text{K}}{10^5 \dfrac{\text{N}}{\text{m}^2}} = 5{,}48 \cdot 10^{-2}\ \text{m}^3.$$

b) Felhasználva az ideális gázokra vonatkozó fajhő összefüggést, kiszámíthatjuk a felvett hőt:

$$Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T = \frac{f+2}{2} \cdot \frac{R}{M} \cdot m \cdot \Delta T = \frac{7}{2} \cdot R \cdot n \cdot \Delta T = \frac{7}{2} \cdot 8{,}314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 2\ \text{mol} \cdot 30\ \text{K} = 1746\ \text{J}.$$

c) A belső energia összefüggése alapján kiszámíthatjuk a belső energia megváltozását:

$$\Delta E_b = \frac{f}{2} \cdot n \cdot R \cdot \Delta T = \frac{5}{2} \cdot 2\ \text{mol} \cdot 8{,}314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 30\ \text{K} = 1247\ \text{J}.$$

A gáz tágulási munkáját pedig a nyomás és a térfogatváltozás ismeretében számíthatjuk:

$$W' = p \cdot \Delta V = 10^5\ \text{Pa} \cdot 5 \cdot 10^{-3}\ \text{m}^3 = 500\ \text{J}.$$

2. Mennyivel változik egy ideális gáz belső energiája, ha állandó térfogaton 100 J hőt közlünk vele?

3. 2 mól kétatomos, normál állapotú ideális gázt állandó nyomáson 27 °C hőmérsékletre melegítünk.
a) Mennyivel változott meg a gáz belső energiája? *b)* Mennyi hőt közöltünk a gázzal?

4. Egyatomos gáz állandó nyomáson történő melegítése során a gáz 200 J tágulási munkát végzett.
a) Mennyivel változott meg a gáz belső energiája? *b)* Mennyi hőt közöltünk a gázzal?

5. Normál állapotú, 160 g tömegű oxigéngáz nyomását első esetben állandó térfogaton melegítve kétszeresére növeljük, majd állandó nyomáson folytatva a melegítést, térfogatát is megduplázzuk. Második esetben, először duplázzuk meg a gáz térfogatát állandó nyomáson való melegítéssel, majd a térfogatot állandó értéken tartva a gázt addig melegítjük, míg nyomása meg nem kétszereződik. Ábrázoljuk a folyamatot p–V diagramon!
a) Mekkora a végállapotok és a kezdeti állapot közötti belső energia különbsége?
b) Mennyi hőt kellett közölni a gázzal az első, illetve a második esetben?

3.5. A termikus folyamatok iránya, a hőtan II. főtétele

A természetben lejátszódó folyamatok közül egyesek fordított irányban is végbemehetnek, mások lefolyása viszont határozottan csak egy irányban történhet. A mindennapi életben ezeket jól el lehet különíteni egymástól. Ha megfordítható eseményről videofelvételt készítünk, akkor a felvételt ugyanolyan sebességgel visszafelé lejátszva is valóságosnak érezzük. Nem tudjuk megkülönböztetni a fordított felvételt az eredetitől.

Például egy golyó két fal közötti rugalmas pattogásáról vagy egy hintázó gyerekről készült film, előre-hátra lejátszásakor nem érzékelünk jelentős különbséget.

Ha viszont nem megfordítható folyamatról készítünk videofelvételt, akkor azt visszafelé lejátszva rögtön rájövünk, hogy nem ez a történések valóságos sorrendje. A látott folyamat a tapasztalatainkkal ellenkezik.

Ugyancsak meglepődnénk, ha azt látnánk, hogy a padlón szétterülő víztócsa összegyűlik, és visszaömlik az edénybe, a váza cserépdarabjaiból az egész váza magától összeáll, és felugrik a polcra, a betört ablaküveg szilánkjaiból összeáll, és kiugrik belőle egy labda, vagy a magára hagyott pohárban a vízből fokozatosan egy jégkocka válik ki, majd a pohár fölé nyúló kanálra pattan.

A fizikai folyamatoknak is – az időbeni lefolyásuk megfordíthatóságának szempontjából – két nagy csoportja van. A megfordítható, más néven **reverzibilis*** folyamatok, és nem megfordítható, vagyis **irreverzibilis*** folyamatok (latinul a reverzió szó megfordítást jelent).

Az energiaveszteség nélküli mechanikai folyamatok többsége **reverzibilis** (megfordítható) folyamat. Ilyen például a hinta vagy a fonálinga veszteség nélküli, periodikus lengése; a golyó ismétlődő, rugalmas ütközése két fal között; vagy egy labda pattogása rugalmas talajon.

Ha viszont a mechanikai folyamat már súrlódási veszteséggel jár, akkor a folyamat irreverzibilis (nem megfordítható) lesz. Ekkor a mechanikai munka vesztesége a testek belső energiáját növeli.

A padlóra ejtett ólomgolyó rugalmatlan ütközése után a padlón marad, és felmelegszik. Ennek fordítottja azonban – bár a **hőtan I. főtétele nem tiltja** – nem játszódik le. Vagyis a golyó lehűlve, a belső energiáját csökkentve nem pattan vissza a rugalmatlan padlóról.

A termikus kölcsönhatások során lejátszódó valóságos folyamatok mindig **irreverzibilisek.**

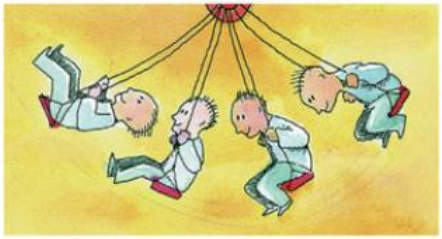
Ezt nevezzük a **hőtan II. főtételének.**

A testek termikus kölcsönhatásakor mindig a melegebb test ad át energiát a hidegebb testnek. Az energiacsere folyamatának ez az iránya – magától, külső beavatkozás nélkül – nem megfordítható.

A HŐTAN II. FŐTÉTELÉNEK MOLEKULÁRIS ÉRTELMEZÉSE

A második főtétel azt mondja ki, hogy a termikus folyamatoknak meghatározott iránya van. Értelmezzük ezt az atomi részecskék rendezetlen hőmozgása alapján.

A folyamat kezdetén melegebb test intenzívebben mozgó részecskéi a hőmérséklet kiegyenlítődése után lassabban, a kezdetben hidegebb test részecskéi pedig gyorsabban fognak mozogni.





48.1. Megfordítható és nem megfordítható folyamat

Így a melegebb test belső energiája csökkenni fog, a hidegebbé pedig növekszik.

A termikus kölcsönhatásokban részt vevő testek részecskéinek rendezetlen mozgása tehát mindig a kiegyenlítődés irányában változik meg.

A fordított folyamat bekövetkezése – hogy a melegebb test részecskéi még intenzívebben mozognak, miközben a hidegebb test részecskéi még lassabban mozognak – nagyon valószínűtlen. Akárcsak az, hogy egy törött váza cserepeit egy zacskóban rázogatva a cserepek ép, egész vázává álljanak össze.

A haladó vagy forgómozgást végző testek **mechanikai mozgási energiája a test részecskéinek** – valamilyen módon – **rendezett mozgási energiájából** tevődik össze. Ez a rendezett mozgás a súrlódás következtében teljesen megszűnhet. Ekkor a mozgási energia a rendezetlen hőmozgás energiáját növeli (szokás azt mondani, hogy a mechanikai energia hővé szóródik szét). **Vagyis a mechanikai energia teljes egészében belső energiává alakulhat.**

Fordított folyamat azonban nem valósulhat meg: gyakorlatilag zérus annak a valószínűsége, hogy minden atomi részecske spontán módon egyszerre egy irányban – rendezett módon – mozogjon.

A belső energia nem alakulhat vissza teljes egészében mechanikai energiává.

MEGJEGYZÉSEK

1. A hidegebb hűtőszekrényből hő „megy át" a melegebb szobába. Ez az ellentétes hőcsere azonban nem magától – spontán módon – következik be, hanem a hűtőgép kompresszorának munkavégzése következtében. A kompresszor azonban elektromos energiát fogyaszt. Ez is a II. főtételt igazolja: ha a hidegebb helyről a melegebb hely felé történik a hőátadás, annak nyoma és ára van (lásd a villanyszámlát), a folyamat spontán módon nem megy végbe.

2. A II. főtételnek még számos, az előzővel egyenértékű megfogalmazása ismeretes, amelyek közül mindegyik egyértelműen meghatározza a termikus folyamatok lejátszódásának lehetséges irányát.
   Clausius megfogalmazása (1850): A termikus energia hő alakjában hidegebb testről melegebb testre nem mehet át önként.
   Kelvin tétele (1852): Minden irreverzibilis folyamatnál egy bizonyos mennyiségű munka szétszóródik (belső energiává alakul).
   Max Planck fogalmazása: Nincs olyan periodikusan működő hőerőgép, amely hőt von el egy hőtartályból, és azt teljes egészében mechanikai munkává alakítja. (Az ilyen nem létező hőerőgépet másodfajú perpetuum mobilének szokás nevezni.)

3. A II. főtétel Planck-féle megfogalmazása szerint nincs 100%-os hatásfokú hőerőgép, vagyis a fizikai törvényeknek ellentmond olyan belső égésű motor konstruálása, amely pl. az elégetett üzemanyag során felszabadult hőt teljes egészében mechanikai energiává alakítaná át. Ez a fizikai törvény az autókonstruktőrök elé egy elvi korlátot állít azzal, hogy a belső égésű motorok üzemanyag-fogyasztása egy bizonyos határ alá nem csökkenthető.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Keressünk a mindennapi életből példákat reverzibilis és irreverzibilis folyamatokra!
2. Milyen haszonnal járna, ha tudnánk másodfajú perpetuum mobilét készíteni?
3. Hogyan változna meg annak a zárt helyiségnek a hőmérséklete, amelyben egy nagy teljesítményű hűtőszekrényt működtetnénk egyszer a hűtőszekrény zárt ajtaja mellett, másszor pedig a hűtőszekrény nyitott ajtajánál?

4. Halmazállapot-változások

4.1. A halmazállapot-változások energetikai vizsgálata

3D

EMLÉKEZTETŐ

A környezetünkben található kémiai anyagok háromféle: **szilárd, cseppfolyós (vagy folyékony) és légnemű** halmazállapotban fordulnak elő.

Az anyagok halmazállapota termikus kölcsönhatások következtében megváltozhat. Az anyagok ilyen – belső szerkezeti változással is együtt járó – állapotváltozását **halmazállapot-változásnak nevezzük.**

A legegyszerűbb kémiai anyagok, az elemek mindhárom halmazállapotban előfordulhatnak.

Ha egyszerre együtt van jelen valamely anyag többféle halmazállapotban is, akkor a halmazállapotokat szokás fázisoknak nevezni. Így olvadáskor együtt van az anyag szilárd és folyékony fázisa, párolgáskor és forráskor pedig a folyékony és a gőz fázis. Ennek megfelelően a halmazállapot-változásokat fázisátalakulásoknak is hívjuk. Tágabb értelemben a fázisok a szilárd anyagok különböző kristálymódosulatait is jelenthetik. Így a grafit és a gyémánt a szénnek két különböző szilárd fázisa vagy kristályos módosulata.

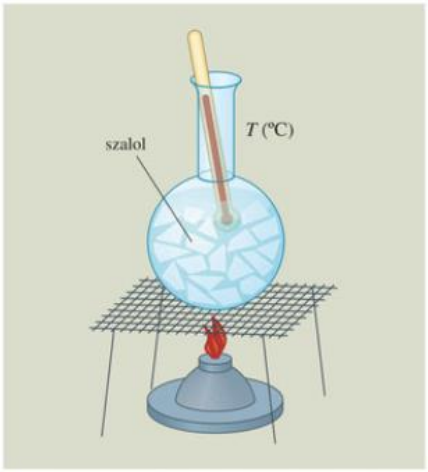
A halmazállapot-változások az energiacsere iránya szerint két csoportba sorolhatók:

Energiabefektetést igénylő átmenetek:
- olvadás (szilárd ⇒ cseppfolyós),
- párolgás, forrás (folyékony ⇒ légnemű),
- szublimáció (szilárd ⇒ légnemű).

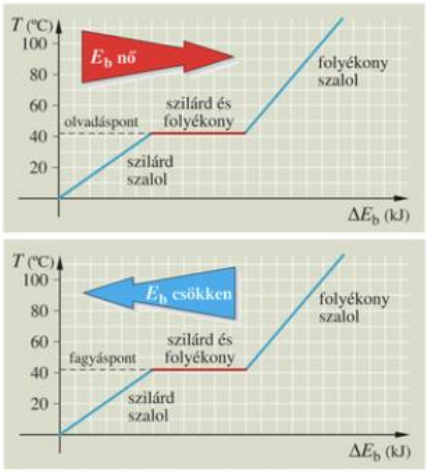
Energiafelszabadulással járó átmenetek:
- lecsapódás (légnemű ⇒ cseppfolyós),
- fagyás (cseppfolyós ⇒ szilárd),
- lecsapódás vagy megszilárdulás (légnemű ⇒ szilárd átmenet).

Az *50.1. ábra* szerinti kísérleti elrendezéssel vizsgáljuk meg a szalol (vagy fixírsó) olvadásának folyamatát. Az anyagok várható olvadáspontja 40 °C körüli érték. Egyenletes melegítés során egyenlő időközönként mérjük a kristályos anyag hőmérsékletét. Készítsünk hőmérséklet–idő grafikont! Vegyük fel a grafikont a megolvadt anyag hűtésekor is! Időben egyenletes hőátadást feltételezve arra következtethetünk, hogy a kristályos anyag ΔT hőmérséklet-változása hogyan függ a ΔE_b belső energiájának megváltozásától.

3D



50.1. Olvadáskor és fagyáskor a szilárd-folyadék rendszer hőmérséklete állandó



50.2. A szalol hőmérsékletének változása olvadáskor és fagyáskor

Különböző mennyiségű és minőségű anyagokat olvasztva (vagy fagyasztva) a hőmérséklet–idő grafikonok alapján az alábbi törvényszerűségeket állapíthatjuk meg:

- A halmazállapot-változásokhoz az **anyagi minőségtől** és a **külső nyomástól** függő **meghatározott hőmérsékleti pontok** tartoznak.
- **Olvadáspont* (fagyáspont):** az a **hőmérsékleti pont,** amelyen az olvadás és a fagyás folyamata végbemegy.
- A *kétfázisú rendszer* **hőmérséklete** mindaddig **állandó marad,** amíg az olvadás vagy fagyás folyamata tart.

Az olvadáskor a rendszer által felvett vagy a fagyáskor leadott Q **hőmennyiség egyenesen arányos a megolvadt vagy a megfagyott anyag** m **tömegével.** Az arányossági szorzó az anyagi minőségre jellemző állandó érték, amelyet az anyag **olvadáshőjének* vagy fagyáshőjének** nevezünk.

Az olvadáshő (fagyáshő) megmutatja, hogy az 1 kg tömegű anyag megolvadásakor (fagyásakor) mekkora a hőcsere az anyag és a környezete között.

Jele: L_o, mértékegysége: $1\frac{\text{J}}{\text{kg}}$.

Az m tömegű test megolvadásakor (megfagyásakor) a felvett (leadott) hőmennyiséget a

$$Q = L_o \cdot m$$

összefüggésből számíthatjuk ki.

Megfigyelhetjük, hogy nemcsak a forró kávé, a meleg leves vagy a langyos tea párolog, hanem hűvös reggeleken a tó vagy a folyó felszíne is gőzölög. Ekkor a víz hőmérséklete 15–20 °C lehet. Télen a szabadba kiterített vizes, sőt még a fagyott ruha is előbb-utóbb megszárad. Ebből arra következtethetünk, hogy még a fagyáspont körüli hideg víz és a szilárd halmazállapotú jég is képes elpárologni.

Tapasztalatainkból megállapíthatjuk, hogy a folyadékok felszínéről kiinduló **párolgás minden hőmérsékleten végbemegy,** a párolgásnak nincs állandó hőmérsékleti pontja. Egyes anyagok jobban, mások kevésbé párolognak.

A kályha mellett gyorsabban szárad meg a vizes ruha, mint a hideg szobában.

- Ugyanannyi idő alatt ugyanakkora folyadékfelszínről, azonos külső körülmények között **magasabb hőmérsékleten nagyobb tömegű folyadék párolog el.**
- **A párolgás gyorsasága növelhető** a folyadékfelszín **felületének növelésével** vagy a felszín feletti **páratartalom csökkentésével** is.

Kánikulában, strandoláskor gyakran fázunk, amikor a langyos fürdővízből kijövünk, mivel a bőrünk felszínén maradt vízréteg elpárolog, és ekkor hőt von el testünktől. Ugyanezen az elven „működik" a szervezetünk, amikor a túlmelegedés ellen izzadással védekezik. A sportolók fájdalmas sérüléseinek gyors orvoslására gyakran használnak olyan gyorsan párolgó folyadékot, mely intenzív párolgás közben hűti a sérült testrészt, ezzel enyhítve a fájdalmat.

- A folyékony anyagok párolgáskor hőt vesznek fel a környezetüktől. A felvett Q **hőmennyiség egyenesen arányos az elpárolgott folyadék** m **tömegével,** az arányossági szorzó **az anyagra jellemző** L_p **párolgáshő*.**

A párolgáshő megadja, hogy mekkora hőmennyiségre van szükség ahhoz, hogy az 1 kg tömegű folyadékból ugyanakkora tömegű és hőmérsékletű gőz legyen.

Az m tömegű folyadék elpárolgásához felvett hőmennyiséget a

$$Q = L_p \cdot m$$

összefüggéssel számíthatjuk ki.



51.1. Párolgás hűti az élő szervezetet is

Egy adott hőmérsékleten történő lecsapódásakor a gőz által a környezetének **leadott hőmennyiség megegyezik** a párolgás során **felvett hőmennyiséggel** ($Q_{le} = Q_{fel}$).

Ha a párolgás a folyadék belsejében is megindul, akkor a jelenséget **forrásnak* nevezzük.**

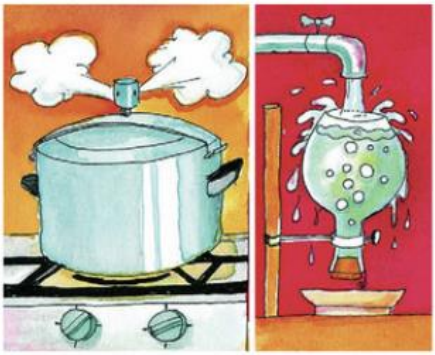
Forráskor a folyadék belsejében lévő levegő- vagy más gázbuborékok a folyadék gőzével telítődnek, térfogatuk megnő, ezért a felszínre emelkednek, ahol belőlük a gőz eltávozik.

A forrás egy adott hőmérsékleti ponton, a **forrásponton*** indul meg. A folyadék hőmérséklete forrás közben állandó marad.

A forráspont értéke függ:
- **a folyadék anyagi minőségétől,**
- **a folyadék felszíne fölötti levegő és gőz keverékének nyomásától. A külső nyomás csökkenésekor a forráspont csökken, növekedésekor pedig növekszik.**

Ezért használunk zárt edényeket – kuktafazék, sterilizáló edények – a víz forráspontjának növelésére. Magasabb hőmérsékleten a nyers ételek hamarabb megfőnek, a kórokozók elpusztulnak.

A turisták gyakran tapasztalják, hogy a magas hegységekben, ahol a légnyomás értéke kisebb, a víz már 100 °C alatti hőmérsékleten elkezd forrni. Ez a főzéskor gondot okoz. Ilyen nyomáscsökkentést magunk is megvalósíthatunk az *52.1. ábra* jobb oldalán látható kísérlettel, ahol a zárt lombikban felmelegített víz feletti levegő-gőz keverék nyomását vízhűtéssel csökkentjük.



52.1. *Hogyan növelhető és csökkenthető a folyadékok forráspontja az ábra szerint?*

Mindennapi tapasztalat, hogy nagyobb menynyiségű víz felforralásához több időre, és így több hő felvételére van szükség.

Ha azonos tömegű alkoholt és vizet forralunk azonos körülmények között, akkor az alkohol harmadannyi idő alatt forr el, mint a víz.

Mérésekkel igazolhatjuk, hogy forráskor a folyadék által felvett Q **hőmennyiség egyenesen arányos a** forrásponton elforralt **folyadék** m **tömegével, és függ az anyagi minőségtől.**

Az m tömegű folyadék elforralásához szükséges hőmennyiség értékét a

$$Q = L_f \cdot m$$

összefüggésből számíthatjuk ki, amelyben L_f az anyagra jellemző állandó, az anyag forráshője.

A forráshő* megadja, hogy mennyi hőt kell közölni a forrásban lévő 1 kg tömegű folyadékkal, hogy ugyanakkora hőmérsékletű gőz keletkezzen belőle.

A forráshő kismértékben függ a forrásponttól is, és megegyezik a forrásponthoz tartozó párolgáshővel.

Néhány anyag forráspontja és forráshője 10^5 Pa nyomáson:

Anyag	forráspont (°C)	forráshő $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$
víz	100	2250
alkohol	78	841
benzol	80	394
éter	35	360
higany	357	285
petróleum	150	335
aceton	56	525

Amikor a gőz a forrásponton lecsapódik, akkor a forrásakor a környezetétől felvett hőmennyiséget a környezetének visszaadja ($Q_{le} = Q_{fel}$). Ezt használják fel a távfűtőrendszerekben, ahol a hőközpontokban előállított gőzt vezetik jól szigetelt csővezetékeken keresztül a lakásokhoz. Itt a gőz lecsapódásakor jelentős mennyiségű hő szabadul fel.

4.2. A halmazállapot-változások molekuláris értelmezése

Az anyagok különböző halmazállapotú formáit az anyagot alkotó atomi részecskékkel különbözőképpen modellezhetjük (halmazállapot-modell). Ezekkel a részecskemodellekkel a halmazállapot-változások törvényszerűségeit is értelmezhetjük.

SZILÁRD TESTEK RÉSZECSKEMODELLJE

A szilárd, kristályos anyagok modelljének megfelel a térben helyhez kötött, szabályos rendben (kristályrácsban) elhelyezkedő atomi részecskék modellje, ahol a szomszédos részecskék között **rugalmas erőkhöz hasonló, erős molekuláris vonzóerők** működnek.

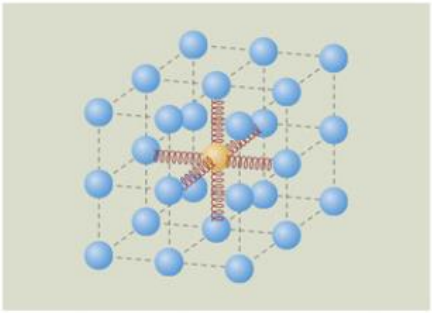
A modell alapján **a szilárd testek részecskéi** – egymáshoz közeli, helyhez kötött – **rezgőmozgást végeznek.**

A részecskék **rezgőmozgásának tágassága (amplitúdója) egyre nagyobb lesz, ha a szilárd test hőmérséklete növekszik.**

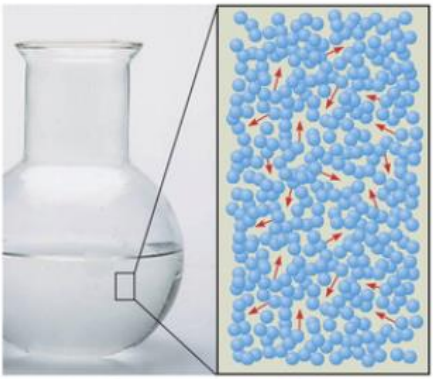
A modell segítségével megmagyarázhatjuk, hogy miért **állandó a szilárd testek térfogata és alakja.** Értelmezhetjük, miért változik meg kismértékben a térfogatuk a hőmérséklet változásával. **Így a modell számot ad a hőtágulás jelenségéről is.**

A szilárd testek teljes belső energiáját a részecskék hőmozgásából származó mozgási energiák és a belső molekuláris erőkből származó kötési vagy rácsenergiák teljes összege adja:

$$E_{b_{szil.}} = \Sigma E_{mozg.} + \Sigma E_{rács}.$$



53.1. *Mit modellezünk a rugókkal a kristályos anyagok fenti modelljében?*



53.2. A folyadékot rendezetlen mozgást végző, egymáshoz közeli golyók halmazával modellezhetjük

FOLYADÉKOK RÉSZECSKEMODELLJE

Ha a szilárd testek melegítésekor a hőmérséklet eléri az olvadáspontot, akkor a récsecskék egyre fokozódó rezgőmozgásának következtében a kristályrács összeomlik. **A kristályos szerkezet megszűnik, a szilárd test megolvad. A test folyékony halmazállapotú lesz.**

A folyadékokban **a részecskék között gyengébb, vonzó jellegű összetartó (kohéziós) erők** működnek, amelyek lehetővé teszik, hogy a részecskék egymáshoz képest rendezetlenül elmozduljanak. **Ez a folyadékok részecskemodellje.**

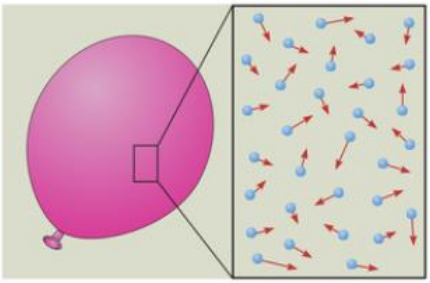
A modell alapján értelmezhető, hogy a folyadékoknak miért állandó a térfogata és változó az alakja.

A folyadék teljes belső energiáját a részecskék rendezetlen mozgásából adódó mozgási energiák és a gyengébb kohéziós erőkből származó kölcsönhatási energiák együttes összege adja:

$$E_{b_{foly.}} = \Sigma E_{mozg.} + \Sigma E_{kohéz.}.$$

LÉGNEMŰ TESTEK RÉSZECSKEMODELLJE

Párolgáskor (forráskor) egyes folyadékrészecskék képesek legyőzni az összetartó (kohéziós) erőt, és kilépnek a folyadékból. A visszamaradó folyadék hőmérséklete csökken.



54.1. Légnemű anyag részecskemodelljének szemléltetése szabadon, rendezetlenül röpködő golyócskákkal

A folyadékot elhagyó részecskék egymásnak ütközve rendezetlenül, szabadon röpködnek, mozgásuk során betöltik a rendelkezésükre álló teret. **Ez a testek légnemű halmazállapotának részecskemodellje.**

A légnemű halmazállapotban az anyag belső energiáját túlnyomórészt a részecskék kinetikus energiájának összege adja. Így az elhanyagolható molekuláris erők miatt a molekuláris kölcsönhatási energiáktól eltekinthetünk. Így:

$$E_{b_{gáz}} \approx \Sigma E_{mozg.}.$$

A halmazállapot-változások során **a testekkel közölt vagy azoktól elvont hőmennyiség** jó közelítéssel **megegyezik a test két halmazállapotában meglévő belső energiák különbségével:**

$$Q = E_{b_2} - E_{b_1}.$$

A halmazállapot-változás közben a testek hőmérséklete nem változik. Ezért a belső energiák különbsége a részecskék közötti összetartó erők megváltozásából, a kölcsönhatási energiák különbségéből származik.

MEGJEGYZÉSEK

1. A legtöbb anyag olvadáspontja – amelyeknél az olvadás térfogat-növekedéssel jár – külső nyomásnövekedés hatására növekszik. A jég olvadáspontja viszont, ahol olvadáskor térfogatcsökkenés következik be, nyomás hatására csökken. Részben ezzel magyarázható, hogy korcsolyázáskor a korcsolya éle alatt a nagy nyomás hatására a jég megolvad, és a korcsolya voltaképpen az így keletkezett vékony vízrétegen – mint kenőanyagon – siklik. A magashegységek gleccsereinek lassú mozgása is hasonlóan értelmezhető. A jég súlyából származó nagy nyomás hatására a jég megolvad, és a gleccserek az így keletkező vízrétegen csúsznak le.

2. Párolgásnál (forrásnál) és lecsapódásnál arra is gondolni kell, hogy az anyag gőzzé alakulásakor vagy a gőz lecsapódásakor jelentős térfogatváltozás következik be, ezért a külső környezet negatív vagy pozitív munkavégzésétől nem tekinthetünk el.

3. Fizikai értelemben csak a kristályos anyagokat tekintjük szilárd anyagoknak (ezeket egybeírva szilárdtesteknek nevezzük, belső szerkezetükkel a szilárdtestfizika foglalkozik). A kristályszerkezet nélküli – bár a köznapi értelemben szilárdnak tűnő – anyagoknak nincs határozott olvadáspontjuk. A hőmérséklet emelkedésével lassan válnak hajlékonnyá, képlékennyé, majd folyóssá. Ezeket *amorf* (alaktalan, nem kristályos) anyagoknak nevezzük. Ilyenek az üveg, a műanyagok, a bitumen stb. A fizika az amorf anyagokat nagy belső súrlódású folyadékoknak tekinti.

4. Szokás negyedik halmazállapotnak nevezni az anyag *plazmaállapotát,* amikor több ezer vagy millió fokos hőmérsékleten az atomok teljesen ionizálódnak. Ilyenkor az atommagok és elektronok keveréke van együtt. Ebben az állapotban az anyagok teljesen elveszítik egyedi tulajdonságukat. Az atommagokból és elektronokból álló anyaghalmaz szűkebb értelemben nem tekinthető kémiai anyagnak. Plazmaállapotban van az anyag a Nap felszínén és belsejében, illetve más csillagokban, földi körülmények között gázkisülésekben és a villámban. A plazma tanulmányozása fontos szerepet játszik a fúziós atomreaktorok tervezésénél.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Miért fagynak be télen nehezen a folyók és tavak, és tavasszal miért olvad el a jég viszonylag lassan?
2. Hogyan állapítható meg egy edényben megfagyott folyadék szilárd felszínéről, hogy térfogat-növekedés vagy -csökkenés történt-e fagyáskor?
3. A folyadékok párolgáskor hőt vonnak el környezetükből. Keressünk példákat a jelenség további gyakorlati alkalmazására!
4. Hányféleképpen gyorsíthatjuk meg a vizes ruha száradását?
5. A felhő és a köd lecsapódó vízgőzből keletkező, apró vízcseppekből áll. Vajon miért mutatnak csökkenő légnyomást a barométerek, ha esős idő várható?
6. Végezzük el a következő érdekes kísérletet! Üres üdítős fémdobozba öntsünk kevés vizet. Valamilyen hőszigetelő tartó segítségével emeljük gázláng fölé a dobozt, és melegítsük addig, amíg a víz fel nem forr. Amikor felül már áramlik ki a gőz, mártsuk a nyílásával lefelé fordított dobozt hirtelen hideg vízbe. A fémdoboz hangos reccsenéssel teljesen összeroppan. Adjunk magyarázatot a történtekre!
7. A vízgőz munkavégző képességének hasznosításával a 18. században kezdtek komolyabban foglalkozni. Nézzünk utána, hogy kik és mikor találták fel a gőzgépet, a gőzhajót és a gőzmozdonyt, és hogy milyen szerepet játszottak ezek a találmányok az ipari forradalomban!

FELADATOK

1. Hőszigetelt edényben lévő 300 g vizes hóra 50 g 100 °C hőmérsékletű vízgőzt vezetünk, majd lezárjuk az edényt. Termikus egyensúly kialakulásakor az edényben 60 °C hőmérsékletű víz található.
   a) Mennyi havat tartalmazott a vizes hó?
   b) Legfeljebb mennyi gőzt vezethetünk a termoszba, hogy a víz-hó keverék hőmérséklete ne emelkedjen?

MEGOLDÁS:

$T_o = 0\ °C$; $T_g = 100\ °C$; $T_k = 60\ °C$

$m_ö = m_h + m_v = 300\ g$; $m_g = 50\ g$

m_h, $m_{g\max} = ?$

a) Termikus egyensúly kialakulásakor az edényben lévő víz-hó keverék által felvett hőmennyiség egyenlő lesz a gőz által leadott hőmennyiséggel: $Q_{fel} = Q_{le}$.
A felvett hő egy része a hó megolvasztására, a másik része pedig a keletkező 300 g tömegű T_o hőmérsékletű víz T_k közös hőmérsékletre való felmelegítésére fordítódik. A gőz által leadott hő is két részből áll: a lecsapódáskor felszabaduló hőből, és a T_k közös hőmérsékletre való lehűléskor leadott részből. Így felírhatjuk az energiamérleg egyenletét:

$$m_h \cdot L_o + c_v \cdot m_ö \cdot T_k = m_g \cdot L_f + c_v \cdot m_g \cdot (100\ °C - T_k),$$

amelyből a hó m_h tömege kifejezhető:

$$m_h = \frac{m_g \cdot (L_f + c_v \cdot (T_g - T_k)) - c_v \cdot m_ö \cdot (T_k - T_o)}{L_o}.$$

Az adatok behelyettesítésével megkapjuk a hó tömegét:

$$m_h = \frac{50\,\text{g}\cdot\left(2256\,\frac{\text{J}}{\text{g}} + 4{,}2\,\frac{\text{J}}{\text{g}\cdot\text{°C}}\cdot 40\,\text{°C}\right) - 4{,}2\,\frac{\text{J}}{\text{g}\cdot\text{°C}}\cdot 300\,\text{g}\cdot 60\,\text{°C}}{335\,\frac{\text{J}}{\text{g}}} = \mathbf{136{,}1\,g.}$$

b) Az edénybe vezetett vízgőz hatására mindaddig nem emelkedik a hó-víz keverék hőmérséklete, amíg az összes hó el nem olvad. Így a keresett maximális tömegű gőz által leadott hő éppen megolvasztja az m tömegű havat. Ezért felírhatjuk az alábbi energiamérleg-egyenletet:

$$m_{g_{max.}}\cdot L_f + c_v\cdot m_{g_{max.}}\cdot(T_k - T_o) = m_h\cdot L_o,$$

ebből a gőz tömegére az adatok behelyettesítésével kapjuk az $m_{g_{max.}} = \mathbf{17{,}0\ g}$ értéket.

2. Mennyi hőre van szükség, hogy 5 kg –10 °C hőmérsékletű jeget megolvasszunk? (A jég fajhője $c = 2{,}093\,\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$, olvadáshője pedig $L_o = 335\,\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$.)

3. Hányszor több időre van szükség az m tömegű, 20 °C hőmérsékletű víz 100 °C-on történő elforralásához, mint 100 °C-ra való felmelegítéséhez, ha a melegítő teljesítménye mindkét esetben azonos? (A víz fajhője $c = 4{,}2\,\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$, forráshője $L_f = 2256\,\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$.)

4. Mekkora tömegű 0 °C hőmérsékletű jeget tudunk megolvasztani 100 g 100 °C hőmérsékletű vízgőzzel?

5. Egy termoszban lévő 400 g tömegű, 25 °C hőmérsékletű vízbe 100 g tömegű olvadó jeget teszünk, majd a termoszt lezárjuk.

a) Elolvad-e a termoszban a jég?

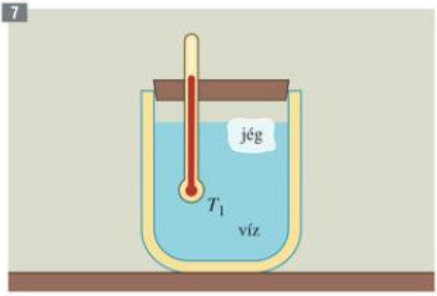
b) Ha nem olvad el a jég, akkor mennyi marad belőle? Ha elolvad, akkor mekkora lesz a termoszban lévő víz hőmérséklete?

6. Hőszigetelt edényben 400 g tömegű olvadó jég található. A jégre 100 g tömegű forró (100 °C hőmérsékletű) gőzt engedünk, majd az edényt lezárjuk.

a) Mit találunk a termoszban a termikus egyensúly kialakulása után?

b) Mekkora lesz a termoszban a közös hőmérséklet?

7. Hőszigetelt edénybe (kaloriméterbe) öntsünk ismert m_v tömegű langyos vizet, és mérjük meg ennek T_1 hőmérsékletét. Ezután tegyünk a vízbe 1-2 olvadó (0 °C-os) jégkockát. A jég elolvadása után mérjük meg a végső T hőmérsékletet. A kezdeti és végső víztömegre a mérőhengerrel megmért térfogatokból következtethetünk. A két tömeg különbségéből megkapjuk a jég kezdeti m_j tömegét.



A leadott és a felvett hőmennyiség egyenlő:

$$c_v\cdot m_v\cdot(T_1 - T) = L_o\cdot m_j + c_v\cdot m_j\cdot T.$$

Ha felhasználjuk a víz táblázatban szereplő c_v fajhőjét, az egyenletből kiszámítható az L_o olvadáshő.

Határozzuk meg méréssel a jég olvadáshőjét, és ellenőrizzük, hogy a mért érték hány százalékkal tér el a táblázatbeli hivatalos értéktől!

OLVASMÁNY

Hőerőgépek, hűtőgépek, hőszivattyúk



Az olyan gépeket, amelyek hőfelvétellel mechanikai munkát képesek végezni, **hőerőgépeknek** nevezzük. Ide sorolhatók a gőzgépek, a belső égésű motorok, gőz- és gázturbinák. A gőzgépeknél gőzkazánokban előállított magas hőmérsékletű gőzt a gőzgép munkahengerébe vezetik, ahol a táguló gáz mechanikai munkát végez, és eközben lehűl. A belső égésű motoroknál zárt térben – a munkahengerekben – a robbanásszerűen elégetett üzemanyag biztosítja az égéstermékekből és levegőből álló gáz hőfelvételét, melynek egy része munkavégzésre fordítódik. A gőzgépeket gyakorlatban ma már nem nagyon alkalmazzák, helyettük a belső égésű motorok terjedtek el. Ezeket elsősorban a közlekedési eszközök (közúti járművek, vasúti mozdonyok, hajók, repülőgépek) hajtására használják.



A gőz- és gázturbináknál a nagy sebességgel áramló forró gőzt vagy elégetett gáz égéstermékeit közvetlenül rávezetik a turbinalapátokra, a turbina ezáltal forgásba jön, és mechanikai munkát képes végezni. A turbinákat leggyakrabban villamos energiát termelő hőerőművekben alkalmazzák villamos generátorok hajtására. A gázturbina alapelvén működnek az egyes turbóhajtású versenyautók és repülőgépek hajtóművei is. Vadászgépeknél és egyes utasszállító repülőgéptípusoknál a tolóerőt a gázturbinából közvetlenül nagy sebességgel kiáramló gáz biztosítja, amely égéstermék és levegő keverékéből tevődik össze. Az ilyen berendezést sugárhajtóműnek nevezzük. A sugárhajtású repülőgépek sebessége meghaladhatja a hangsebességet, ezért ezeket szuperszonikus gépeknek nevezik. Amikor a szuperszonikus gépek túllépik a hangsebességet, akkor gyakran hallhatunk erős, ún. hangrobbanásokat, amelyek a repülőgépek által összenyomott levegő gyors kitágulásából erednek.

A hőtan II. főtételének megfelelően a hőerőgépekben nem lehet teljes egészében a felvett hőt mechanikai munkává átalakítani, annak csak egy része hasznosulhat. A **hőerőgépek hatásfokán** éppen ezt a hányadost értjük. Elméleti meggondolások alapján belátható, hogy a hőerőgépek hatásfoka nem haladhatja meg a $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$ hányadost, ahol T_1 jelenti egy ideális körfolyamat során az izotermikus hőfelvétel, T_2 pedig az izotermikus hőleadás hőmérsékletét. Ezért a minél jobb hatásfok elérése céljából arra törekszenek, hogy a munkát végző gáz vagy gőz hőmérséklete a munkavégzés kezdetén magas, a végén pedig alacsony legyen.

Ezt a célt szolgálják a hőerőművek – távolból is jól látható – gőzölgő hűtőtornyai, melyekben a munkát végzett „fáradt" gőzt hűtik.

3D

A **hűtőgépek** olyan berendezések, melyek belső terében a hőmérséklet tartósan alacsonyabb a külső környezet hőmérsékleténél. Ezt a hővezetés és hősugárzás miatt csak a belső térből való állandó hőelvonással lehet elérni.

A hidegebb helyről a hőtan II. főtétele értelmében csak külső munkavégzés árán tudunk hőt elvonni. A munkát a kompresszoros hűtőgépeknél egy villanymotor végzi. A kompresszor a hűtőgép légnemű halmazállapotban lévő hűtőközegét adiabatikusan összesűríti, az így felmelegedett hűtőközeg a hűtőgép hátsó hűtőbordáin keresztül – a külső környezetnek hőt leadva – lehűl, és közben cseppfolyósodik. A cseppfolyós hűtőközeg a hűtőtérbe jutva gyorsan elpárolog, s eközben hőt von el a belső térből. Ezután a zárt rendszerben a folyamat újraindul. Korábban megfelelő hűtőközegként freongázt használtak. A hűtőgépek tönkremenetelekor kiszabadult freongáz azonban károsítja az ózonréteget, ezért ma már más gázokkal, pl. izobutánnal helyettesítik.



3D

A hűtőgépeket a **jósági tényezővel** szokták jellemezni, amely megmutatja, hogy a hidegebb térrészből elvont Q hőmennyiség hányszorosa a befektetett, elektromos energiából nyert W munkának. A jósági tényező értéke 1-nél nagyobb, energiatakarékos hűtőgépeknél elérheti az 5-6 értéket is. Az ugyancsak hűtőgépnek tekinthető kisebb teljesítményű **klímaberendezéseknél** viszont csak 2 körüli érték lehet.

Lényegében hűtőgépnek tekinthetők a lakások egyedi fűtésére használt olyan berendezések is, amelyek elektromos energia felhasználása révén a külső, hidegebb környezetből hőt visznek át a belső, melegebb környezetbe. Az ilyen berendezéseket **hőszivattyúknak** nevezzük. A hőszivattyúkat is a jósági tényezővel jellemezhetjük. A jósági tényező a fűtött térbe bejuttatott Q hőmennyiség és az ehhez szükséges W elektromos energia hányadosa, melynek értéke elérheti a 3-at. Így a jó hőszivattyúk az egyszerű elektromos hősugárzóknál 3-szor gazdaságosabbak lehetnek, hiszen 1 kWh elektromos energia befektetéssel akár 3 kWh hőmennyiséget juttathatunk a külső, hidegebb környezetből a fűtött térbe. Az egyszerű hősugárzó által leadott hő megegyezik a felvett elektromos energiával, így annak jósági tényezője mindig 1. Ezért gazdaságos a hőszivattyúk alkalmazása fűtésre. Gyors elterjedésüket a ma még meglehetősen drága beruházási költségek gátolják.

3D

A gázok cseppfolyósítása**

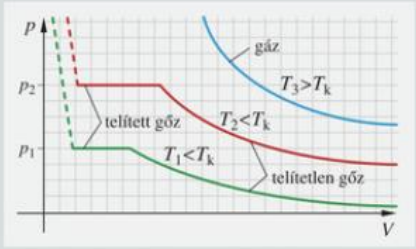
Ha a gázok hőmérsékletét csökkentjük és nyomását növeljük, akkor a gázrészecskék hőmozgásának intenzitása csökken, a térfogati részecskesűrűség pedig növekszik. Így az ideálisgáz-modell feltételei egyre kevésbé teljesülnek: a részecskék térfogata a teljes térfogathoz képest egyre számottevőbb lesz, és a részecskék közötti kohéziós erők sem lesznek elhanyagolhatók. A reális gáz viselkedése mindinkább eltér az ideális gázétól. Az állapothatározók között nem áll fenn az ideális gázra vonatkozó állapotegyenlet.

Gáz anyaga	T_k (°C)	p_k (kPa)
ammónia	132,9	11150
hélium	–267,9	226
hidrogén	–239,9	1,68
nitrogén	–147,2	3350
oxigén	–118,9	5000
szén-dioxid	31,1	7300

Ha a gázok nyomását tovább növeljük, miközben hőmérsékletét csökkentjük, elérünk egy olyan T_k kritikus hőmérsékleti értéket és p_k kritikus nyomásértéket, ahol a gáz cseppfolyósodik. Ezek a kritikus értékek a gázok minőségétől függő állandók. Néhány ilyen értéket tartalmaz a fenti táblázat.

A kritikus hőmérséklet fölött összenyomással a gázok bármilyen nagy nyomás mellett sem cseppfolyósíthatók.

A kritikus hőmérséklet alatt a gázokat inkább **gőzöknek** nevezzük,** mivel csak akkor viselkednek gázként – viszonylag jól követve a gáztörvényeket –, ha nyomásuk nem éri el egy hőmérséklettől függő p_t telítési nyomás értéket. Ekkor a gőzt **telítetlen gőznek** hívjuk.** Ha viszont a gőzt izotermikusan összenyomjuk, akkor a p_t telítési nyomásértéket elérve a nyomás további térfogatcsökkenés esetén már nem növekszik, a gőz **telítetté**** válik, és állandó nyomás mellett a felesleges gőz lecsapódik.



59.1. Telítetlen gőzök, telített gőzök, gázok állapotváltozásai a p–V diagramon

A gázok cseppfolyósításának nagy a gyakorlati jelentősége. A hűtéstechnikában, tároláskor, szállításkor (hűtőkocsiknál, tartályhajóknál) gyakran alkalmaznak folyékony nitrogént, amelynek hőmérséklete –195 °C-nál is alacsonyabb. Ugyancsak folyékony nitrogént alkalmaznak az orvosi gyakorlatban, kutatásoknál a különböző emberi vagy állati szervek, örökítőanyagok tartós tárolására.

A rendkívül alacsony hőmérsékletű folyékony gázok tárolására, szállítására speciális hőszigetelt edényeket alkalmaznak. A ma is használt **Dewar-edényt** *James Dewar* [djuö] skót fizikus szerkesztette meg, aki a gázok cseppfolyósításával foglalkozott, és először cseppfolyósította 1898-ban a hidrogéngázt. A tárolóedény felépítése megegyezik a háztartásokban is gyakran alkalmazott termosz felépítésével: lényeges része az üvegből vagy fémből készült kettős fal. A jó hőszigetelését a kettős fal közötti tér légritkításával érik el, hasonlóan, mint a lakások nyílászáróinál egyre inkább használatos termoplán üvegeknél. A hősugárzás csökkentésére az edény belső falát fényes ezüstbevonattal látják el. Az így kialakított hőszigetelt edényekben a cseppfolyós gázok hosszú ideig tárolhatók, az alacsony hőmérséklet az edény belsejében szükség szerinti ideig biztosítható.

A gázok cseppfolyósításának másik nagy gyakorlati jelentősége abban áll, hogy cseppfolyós halmazállapotban a gázok sűrűsége jóval nagyobb – közel megegyezik a víz sűrűségével –, így szállításkor, folyékony állapotban a gáz jóval kisebb térfogatot foglal el. A bolygóközi űrrakéták üzemanyagához is cseppfolyós oxigént használnak, hogy a helykihasználás minél jobb legyen.

A cseppfolyós gázok további alkalmazása a fizikai és műszaki kutatások területére esik. Cseppfolyós héliumot használnak igen alacsony (4 kelvin körüli) hőmérsékletek biztosítására olyan fizikai kutatásokhoz, ahol abszolút zéruspont közeli hőmérsékletre van szükség. Ebben a hőmérsékleti tartományban ugyanis az anyagok fizikai tulajdonságaiban ugrásszerű változások következhetnek be. Két különleges jelenség, hogy egyes vezetők elektromos ellenállása rendkívüli mértékben lecsökken, azaz az anyag **szupravezetővé** válik, illetve az, hogy a folyékony hélium belső súrlódása elhanyagolható lesz (ezt a jelenséget nevezzük **szuperfolyékonyságnak**).



59.2. A cseppfolyós levegőben megfagyasztott virág törékeny lesz, mint a porcelán

Összefoglalás

A TESTEK HŐTÁGULÁSA

A testek hőmérsékletének változásakor a testek térfogata megváltozik. Ezt a jelenséget **hőtágulásnak** nevezzük.

Szilárd testeknél megkülönböztetünk hosszanti vagy **lineáris hőtágulást,** és **térfogati** vagy **köbös** hőtágulást. A **folyadékoknál** és **gázoknál** általában csak a **térfogati hőtágulással** számolunk.

A **lineáris hőtágulásnál** a hosszváltozást a

$$\Delta \ell = \alpha \cdot \ell_0 \cdot \Delta T,$$

a **térfogati hőtágulásnál** pedig a térfogatváltozást a

$$\Delta V = \beta \cdot V_0 \cdot \Delta T$$

összefüggésből számíthatjuk ki, ahol az α **lineáris hőtágulási tényező,** illetve a β **köbös hőtágulási tényező** az anyagi minőségre jellemző állandók.

A hőtágulási tényezők számértéke megmutatja, hogy 1 °C hőmérséklet-változáskor a hosszúság vagy térfogat megváltozásának nagysága hányadrésze a kezdeti értéknek.

A különböző minőségű gázok izobár hőtágulásánál a köbös hőtágulási tényező közel állandó értékű: $\beta \approx 0{,}0036 \frac{1}{°C}$. Az **ideális gáz** köbös hőtágulási tényezőjét $\beta = \frac{1}{273} \frac{1}{°C}$ állandó értéknek vesszük.

Ez lehetővé teszi az **abszolút hőmérsékleti** vagy **Kelvin-skála** használatát. A hőmérséklet értékét **kelvinbe** úgy számítjuk át, hogy a **Celsius-fokban** mért értékhez **273-at** adunk:

$$T\,(\mathrm{K}) = T\,(°\mathrm{C}) + 273.$$

A GÁZOK ÁLLAPOTVÁLTOZÁSAI

A gázok egyensúlyi fizikai állapotát az állapotjelzőkkel adhatjuk meg. Az állapotjelzők lehetnek:

- összeadódó **állapotjelzők: a *V* térfogat, az *m* tömeg, az *n* anyagmennyiség,** illetve
- kiegyenlítődő **állapotjelzők: a *p* nyomás** és **a *T* hőmérséklet.**

Adott mennyiségű gáz adott állapotában az állapotjelzők közötti mennyiségi összefüggést általános esetben az állapotegyenlet adja meg: az **ideális gázokra** vonatkozó **állapotegyenlet** két lehetséges matematikai alakja:

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \quad \text{vagy} \quad p \cdot V = n \cdot R \cdot T,$$

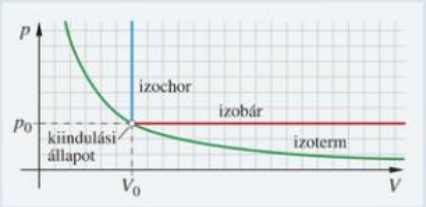
ahol p a gáz nyomása, V a térfogata, m a gáz tömege, M a moláris tömege, $\frac{m}{M} = n$ az anyagmennyiség, R az egyetemes gázállandó, T pedig a gáz abszolút hőmérséklete.

Az állapotegyenlet a **valódi** (reális) gázok állapotváltozásaira csak jó közelítéssel érvényes.

Az **állandó** tömegű gázok **speciális állapotváltozásáról** akkor beszélünk, ha **a hőmérséklet, a nyomás,** vagy pedig **a térfogat** az állapotváltozás során állandó marad. Így megkülönböztetünk **izoterm, izobár** és **izochor** állapotváltozásokat. A speciális állapotváltozások törvényei az állapotegyenletből származtathatók, törvényszerűségeit a következő táblázatban tekinthetjük át. Láthatjuk, hogy az állapotegyenlet megfelelő átrendezéséből nyerhetjük az adott speciális állapotváltozás törvényét.

Az állapotváltozás elnevezése	Állandó állapotjelző	Az állapotváltozás törvénye
izoterm	T hőmérséklet	$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T =$ állandó, vagy $p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$ **Boyle–Mariotte-törvény**
izobár	p nyomás	$\frac{V}{T} = \frac{m}{M} \cdot \frac{R}{p} =$ állandó, vagy $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$ **Gay-Lussac I. törvénye**
izochor	V térfogat	$\frac{p}{T} = \frac{m}{M} \cdot \frac{R}{V} =$ állandó, vagy $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$ **Gay-Lussac II. törvénye**

Az **állapotváltozásokat** legtöbbször a ***p–V* diagramon** ábrázoljuk: az **izotermikus** állapotváltozások grafikonjai *hiperbolák* (izotermák), az **izochor** állapotváltozások képe a *p tengellyel párhuzamos egyenesek*, az **izobár** állapotváltozások vonalai pedig a *V tengellyel párhuzamos egyenesek*.



A GÁZOK MOLEKULÁRIS HŐELMÉLETE

A molekuláris hőelmélet a termikus jelenségeket az anyag atomi részecskéinek hőmozgása alapján értelmezi. A gázok állapotváltozásait a **gázok részecskemodellje** alapján is tárgyalhatjuk. A tárgyalás során feltesszük, hogy a gázokat alkotó **atomi részecskék kiterjedés nélküli** szilárd, **rugalmas golyókként** viselkednek. A részecskék között **nem lépnek fel belső molekuláris erők**, a **részecskék** egymás közötti és a gáztartály falával történő **ütközései rugalmasnak tekinthetők.** A **gázok nyomását** az atomi részecskéknek a gáztartály falával történő rugalmas ütközéseiből származtatjuk.

A **részecskemodellnek** megfelelő – ideális gázokra érvényes – állapotegyenlet alakja:

$$p \cdot V = N \cdot k \cdot T.$$

A TESTEK BELSŐ ENERGIÁJA

A **testek belső energiáját** a testeket alkotó **atomi részecskék hőmozgásából származó mozgási energiák** és a részecskék közötti molekuláris kölcsönhatásokból eredő **belső potenciális (kölcsönhatási) energiák összege adja.**

Az ideális gázok **belső energiája egyenlő a gázrészecskék mozgási energiájának** (haladó és forgómozgást is számításba véve) **összegével:**

$$E_b = N \cdot \varepsilon = N \cdot \frac{f}{2} \cdot k \cdot T,$$

ahol az $\varepsilon = \frac{f}{2} \cdot k \cdot T$ az egy részecskére jutó átlagos energia, f a részecskék szabadsági foka, amely atomok esetén $f = 3$, molekulák esetén pedig $f = 5$ vagy $f = 6$.

Adott mennyiségű gáz belső energiája egyenesen arányos a gáz abszolút hőmérsékletével.

A HŐTAN I. FŐTÉTELE

A **testek belső energiáját kétféle módon** tudjuk megváltoztatni: **termikus kölcsönhatással** vagy **mechanikai kölcsönhatás** útján. Így a változtatás mértékét a Q **hőmennyiség** vagy a W **mechanikai munka** adja meg.

Az **energiamegmaradás** alapján a testek belső energiájának eredő megváltozása egyenlő a Q hőmennyiség és a testen végzett W mechanikai munka előjeles összegével:

$$\Delta E_b = Q + W.$$

Ezt az összefüggést nevezzük a **hőtan I. főtételének.** A hőmennyiséget a $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ képlettel, a mechanikai munkát pedig állandó nyomáson a $W = p \cdot \Delta V$ összefüggéssel kapjuk meg.

A testek közötti termikus energiacsere anyagi jellemzője a testek c **fajhője.** A fajhő számértéke megadja, hogy mekkora Q hőközléssel (vagy hőelvonással) lehet az 1 kg tömegű test hőmérsékletét 1 K-nel megváltoztatni. A fajhő mértékegysége: $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$. A fajhő értéke függ a testek anyagi minőségétől és halmazállapotától.

A gázok **fajhője függ** a testek közötti **hőcsere módjától** is. Ezért a gázoknál megkülönböztetünk állandó nyomáson mérhető c_p, illetve állandó térfogaton mérhető c_V fajhőt. Minden gáznál az állandó nyomáson mért fajhő nagyobb az állandó térfogaton mért fajhőnél.

A **hőtan II. főtétele a hőtani folyamatok irányát szabja meg.** A termikus kölcsönhatások során mindig **a melegebb test hűl le,** és **a hidegebb melegszik fel.** A hőmérsékletek kiegyenlítődése vissza nem fordítható, **irreverzibilis folyamat.**

Az **irreverzibilis hőtani folyamatok** a részecskék rendezetlen mozgásával értelmezhetők: a hőtani folyamatok **mindig csak olyan irányban játszódnak le,** hogy a folyamat eredményeként a **részecskék rendezetlen hőmozgása még rendezetlenebbé válik.**

HALMAZÁLLAPOT-VÁLTOZÁSOK

A természetben a testek három: **szilárd, folyékony és légnemű** halmazállapotban fordulnak elő. A testek halmazállapota termikus kölcsönhatások során megváltozhat.

Minden halmazállapot-változás energiacserével jár együtt. Energiafelvétellel járó halmazállapot-változás **az olvadás, a párolgás, a forrás, a szublimáció. Energialeadással jár a lecsapódás és a fagyás.**

Az olvadás (fagyás), illetve a forrás csak meghatározott, az anyagi minőségtől és a külső nyomástól függő hőmérsékleti ponton, az **olvadásponton** (vagy fagyásponton), illetve a **forrásponton** következik be. A **párolgás,** a **lecsapódás** és a **szublimáció** minden hőmérsékleten végbemehet.

A testek **olvadásakor** (fagyásakor) és **forráskor** (lecsapódáskor) termikus módon **felvett** (vagy leadott) Q hőmennyiség **egyenesen arányos a test tömegével:**

$$Q = L_o \cdot m, \quad \text{illetve} \quad Q = L_f \cdot m.$$

Az L_o anyagi minőségre jellemző **állandót olvadáshőnek,** az L_f **állandót** pedig **forráshőnek** nevezzük. Az anyagi állandók mértékegysége: $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$.

A **halmazállapot-változások** törvényszerűségei a molekuláris hőelmélet **részecskemodellje** alapján is értelmezhetők:

- A halmazállapot-változás közben a **testek hőmérséklete nem,** de a **belső energiája megváltozik.**
- **A belső energia megváltozása** egyenlő a testeket alkotó atomi **részecskék** belső **kölcsönhatási-energia-változásainak összegével.**

II. fejezet



ELEKTROSZTATIKA

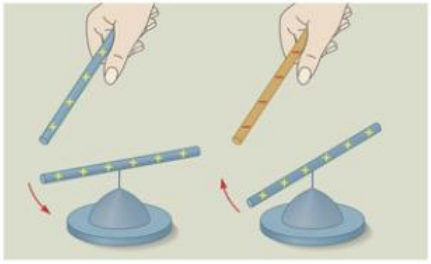


1. Elektrosztatikai alapismeretek

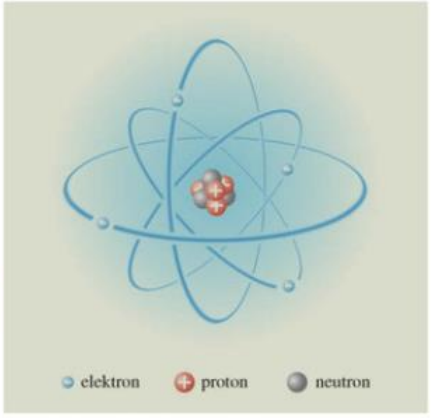
1.1. Emlékeztető



64.1. Öltözködés közben hajunk és a pulóver ellentétes elektromos állapotú lesz



64.2. Az elektromos kölcsönhatás vagy taszításban, vagy vonzásban nyilvánul meg



64.3. Az atomokban és a molekulákban egyenlő számú proton és elektron van, így kifelé elektromosan semlegesek

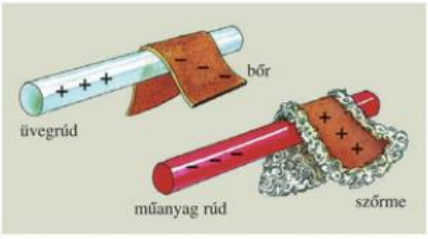
Gyakran tapasztaljuk, hogy az egymással szorosan érintkező anyagok szétválasztás után vonzzák egymást. Jól látható ez fésülködésnél, öltözködésnél, ha műanyag irattartóból papírlapot húzunk ki, vagy műanyag vonalzót száraz papírlappal megdörzsölünk. Ilyenkor azt mondjuk, hogy a kezdetben semleges anyagok **elektromosan feltöltődnek, elektromos állapotba kerülnek.**

A testeknek kétféle elektromos állapota, kétféle elektromos töltése lehetséges. Az egyiket **pozitívnak,** a másikat **negatívnak** nevezték el. **Az azonos előjelű elektromos töltéssel rendelkező testek taszítják, az ellentétes előjelű elektromos töltéssel rendelkező testek vonzzák egymást.** (Egyszerűbben csak így fogalmazunk: Az egynemű töltések taszítják, a különneműek vonzzák egymást.)

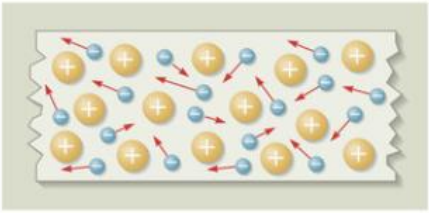
Miért lesz két összedörzsölt semleges anyag elektromos töltése mindig ellenkező előjelű?

Ma már ismerjük a testek elektromos állapotának atomszerkezeti magyarázatát. Az atomok **pozitív protonokból** és semleges neutronokból álló atommagot és **negatív elektronokból** álló „elektronfelhőt" tartalmaznak. **Semleges atomokban a protonok és az elektronok száma megegyezik,** ellentétes töltéseik éppen közömbösítik egymás hatását.

Különböző anyagok szoros érintkezésénél arról az anyagról, amelynek atomjai, molekulái gyengébben kötik az elektronokat, átjutnak elektronok a másik anyagra. **Az elektrontöbblet negatív töltésű, az elektronhiány pozitív töltésű anyagot eredményez.**



64.4. *Milyen irányban „vándorolnak" az elektronok az érintkező anyagok között?*



65.1. A fémekben szabad elektronok és helyhez kötött pozitív ionok vannak

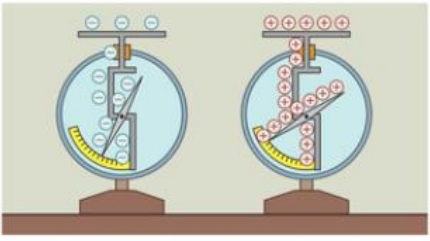
A testek elektromos töltése átvihető más testekre. A **vezetőanyagokban** a töltéshordozó részecskék könnyen elmozdulnak, az elektromos állapot a vezető egészére szétterjed. Jó vezetők a fémek, amelyekben az atomok külső elektronjai szabadon mozoghatnak a fém egész terjedelmében. A Föld belseje is nagy kiterjedésű vezető. **Földelésről** beszélünk, ha egy testet fémes vezető útján összekötünk a Föld nedves, vezető rétegével.

Az elektrotechnikában gyakran alkalmazott földelés rajzjele: ⏚

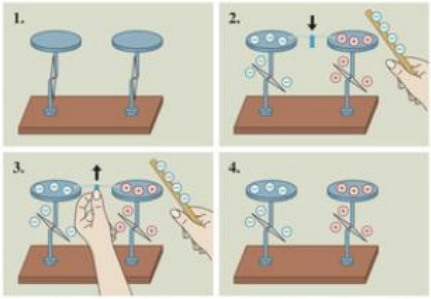
A **szigetelőanyagok** töltéshordozói helyhez kötöttek, ezeknél csak az elektromos testtel való érintkezés helyén jön létre elektrontöbblet vagy elektronhiány. Jó szigetelőanyagok például a porcelán, a műanyagok, az olaj vagy a száraz levegő.

Az **elektroszkóp** elektromos töltések mennyiségi és minőségi vizsgálatára is alkalmas eszköz. Az elektroszkóp belső, álló része és mutatója a környezetétől elszigetelt fémes vezető, amelynél az aszimmetrikus anyageloszlású mutatót a vele azonos töltésű állórész taszító hatása téríti ki eredeti nyugalmi állapotából.

Megfigyelhetjük, hogy **az elektromos testek a semleges vezető- és szigetelőanyagokat egyaránt vonzzák.** Mi ennek a magyarázata?



65.2. A bal oldali elektroszkóp kevés negatív, a jobb oldali elektroszkóp sok pozitív töltést tartalmaz

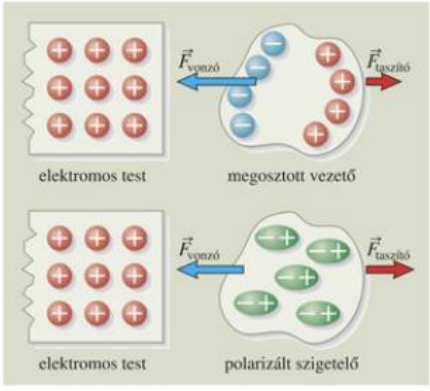


65.3. *Magyarázzuk el a megosztás jelenségét az ábrasorozat alapján!*

Az elektromos test a környezetében lévő **vezetőanyagokon elektromos megosztást** idéz elő. A vele egyező előjelű töltéseket a test távolabbi részébe taszítja, az ellentétes előjelű töltéseket a közelebbi oldalra vonzza.

Szigetelőanyagoknál az elektromos test a molekulákon belül a szimmetrikus elhelyezkedésű töltések súlypontját eltolja, más szóval elektromos **dipólusokat*** hoz létre. Az egyes anyagokban eleve meglévő, de rendezetlen dipólusokat pedig rendezett helyzetbe forgatja. **A szigetelő elektromosan polarizálódik*.**

Az elektromos test nagyobb vonzóerőt fejt ki a megosztott vagy polarizált testben a hozzá közelebbi töltésekre, mint amekkora taszítóerővel hat a távolabbi töltésekre. Az eredőerő tehát vezető és szigetelő esetén is vonzóerő lesz.



65.4. *Miért vonzza az elektromos állapotú test a semleges testeket?*



66.1. A lézernyomtató képalkotása is az ellentétes előjelű töltések vonzásán alapszik

Az elektromos testek a levegő molekuláit – különösen a levegőben lévő vízmolekulákat – is polarizálják, magukhoz vonzzák, majd töltésük egy részét átadva eltaszítják azokat. Az elektromos testek idővel tehát elveszítik elektromos állapotukat.

Az anyagok elektromos feltöltődése és az elektromos testek közötti kölcsönhatás fontos szerepet kap a legkorszerűbb technikai berendezésekben is.

A **fénymásolók** és a számítógépek **lézernyomtatói** is ilyen elven működnek. Ezeknél **izzólámpa** fényével vagy lézersugárral fényérzékeny forgó hengeren létrehozzák a szöveg vagy ábra pozitív töltésű lenyomatát, ami azután magához vonzza a negatív töltésű festékszemcséket. Az így kapott elsődleges képet még papírlapra másolják és hevítéssel rögzítik.

A fénymásolást (xerográfiát) *Selényi Pál* (1884–1954) magyar fizikus fedezte fel.

Egyes üzemekben **elektrosztatikus leválasztókkal** akadályozzák meg, hogy környezetszennyező anyagok (pl. lúg- és savködök, kátrány) kerüljenek a levegőbe.

Az elektromosan feltöltődő anyagok közötti szikrakisülés bizonyos körülmények között tűz- vagy robbanásveszélyt jelent. A **balesetveszély elhárításának** lehetőségeire a későbbiek során még visszatérünk.

OLVASMÁNY

A villám, védekezés a villámcsapás ellen

A felhőkben lévő kicsapódott vízcseppek vagy jégszemek esését a felfelé áramló levegő akadályozza meg. Eközben az egymással súrlódó, különböző anyagi minőségű részecskék elektromos töltésűvé válnak. A szél szétszakíthatja a különböző töltéssel rendelkező tartományokat, így pozitív és negatív felhők is keletkeznek.

Az erősen feltöltött pozitív és negatív felhők annyira felgyorsíthatják a köztük lévő levegő ionjait, elektronjait, hogy ezek az útjukba eső molekulákat ionizálva ion- és elektronlavinát indítanak el: a pozitív ionok a negatív felhő felé, a negatív elektronok a pozitív felhő felé áramlanak, és pillanatszerűen közömbösítik a felhők töltését. Ez az elektromos kisülés a villám.

A villámot fény- és hangjelenség kíséri. A fényt az ütközéstől magasabb energiájú állapotba jutott (gerjesztett) levegőmolekulák bocsátják ki. A hang (mennydörgés) abból származik, hogy a villám okozta hirtelen felmelegedés majd lehűlés miatt a levegő lökésszerűen kitágul, majd összehúzódik. A hangnak a fényhez viszonyított késéséből és a hangsebességből a villám becsapódási helyének távolsága is megbecsülhető.

Az embert is veszélyezteti a villámcsapás, de a villám természetének ismerete többféle lehetőséget is ad a védekezésre.

A felhő és a föld közötti villám úgy jön létre, hogy a felhő megosztó hatást gyakorol a föld felszínén lévő vezető testekre, így azok a felhővel ellentétes töltésűvé válnak. A felhő elektromos kisülése elsősorban a jó vezető és a felszínből kiemelkedő tárgyak felé indul el.



66.2. A villám óriási szikrakisülés

A villámhárító az épületek tetejére szerelt hegyes fémtárgy, amelyet vastag vezető útján földelnek, hogy a felhő megosztó hatása jól érvényesüljön, és a villámban áramló töltések ezen az útvonalon a földbe juthassanak. A villámhárító tehát nem tereli el, hanem ellenkezőleg, magába gyűjti a villámokat azért, hogy azok ne a környezetet károsítsák.

Könnyen érheti villámcsapás a sík terepen álló fát vagy embert. A villám haladási útvonala gyakran elágazik a környező vezetési pályák irányába is. Ezért zivataros időben ne álljunk közvetlenül a villámcsapással fenyegetett fa alá, hanem célszerű attól mintegy 5–10 m távolságban lekuporodni. Ekkor a fa villámhárítóként is működik, és a fába csapó villám útvonalától is kellő távolságban vagyunk.

Zivataros időben ne rakjunk tüzet, mert a tűz vezető ioncsatornát hoz létre, amely könnyen válhat az elektromos kisülés útvonalává.

Tökéletes a villámvédelmünk, ha fémkarosszériás gépkocsiban ülünk (még akkor is, ha a villám belecsapna az autóba). Ennek magyarázatára még ebben a fejezetben visszatérünk (83. o.).

Az évezredeken át titokzatos természeti jelenségnek, a villámnak a kutatása csak a 18. században kezdődött. *Benjamin Franklin* (1706–1790) amerikai természetkutató 1752-ben papírsárkányt bocsátott fel zivatarfelhőkbe. A sárkányt tartó nedves kötél aljára erősített kulcsból szikrák ugrottak át a tudós kezére. (Hasonló, nagyon veszélyes kísérlet során 1753-ban Richmann péterváry professzort halálos villámcsapás érte.)

Franklin kísérletével bebizonyította, hogy a felhők is elektromos töltéssel rendelkeznek, a villám pedig elektromos kisülés. Az ő fémcsúcsokkal végzett kísérletei alapján született meg a villámhárító.

Benjamin Franklin nemcsak természettudósként, hanem mint neves államférfi és író is hírnevet szerzett. Az Amerikai Függetlenségi Nyilatkozat megfogalmazásában is részt vett.

A villámkutatás napjainkban sem fejeződött be. A gömbvillám például ma is tudományos viták tárgyát képezi.



67.1. Villámhárító



67.2. Franklin és fia „befogják az ég villámait”

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Miért nem célszerű a tévéképernyőt száraz ruhával portalanítani?
2. Mit jelent az öblítőszerek flakonján az „antisztatizáló” megjelölés?
3. Milyen célt szolgál az egyes gépkocsik végén függő úgynevezett földelő lánc?
4. Mivel magyarázható, hogy benzinkutaknál műanyag kannákba tilos, fémkannákba viszont szabad benzint kiszolgálni?

5. Mivel magyarázható, hogy miután az elektromos testek magukhoz vonzották a semleges testet, gyakran el is taszítják azt?

6. Milyen következménnyel jár, ha a *65.2. ábra* két elektroszkópjának fémtányérját vezetővel összekötjük?

7. Miért tér ki az elektroszkóp mutatója már akkor is, amikor még csak közelítjük az elektromos testet az elektroszkóp gömbjéhez?

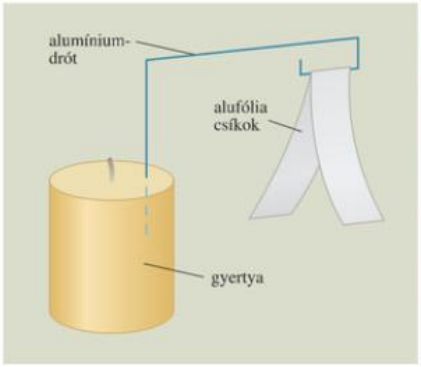
8. Mi történik, ha elektromos töltésű testet közelítünk csapból folyó keskeny vízsugárhoz?

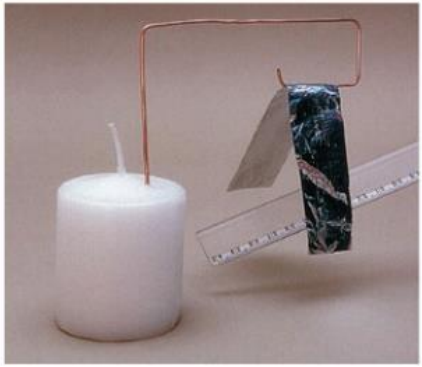
9. Ha személyautóból kiszállunk, majd az ajtó kilincséhez érünk, néha gyenge „csípést" érzünk az ujjainkon. Mi ennek az oka?

10. Vezető- vagy szigetelőanyagból készült a *65.3. ábra* szerinti kísérlet két elektroszkópját összekötő rúd és ennek a rúdnak a fogantyúja?

FELADATOK

1. Készítsünk egyszerű „házi" elektroszkópot! Egy példa a megoldásra:





2. Adjunk az elektroszkópnak töltést például papírral megdörzsölt műanyag vonalzó segítségével! Ezután végezzünk megfigyeléseket arra vonatkozóan, hogy környezetünkben mely anyagok vezetők, és melyek szigetelők!

3. Vigyünk feltöltött elektroszkóp közelébe égő gyertyát! Mi történik? Adjunk magyarázatot!

4. Annak ismeretében, hogy a papír zsebkendővel vagy papírszalvétával megdörzsölt műanyag vonalzó negatív töltésű, vizsgáljuk meg más anyagok elektromos töltésének előjelét:
   a) a vonalzóhoz dörzsölt papír töltését,
   b) összedörzsölt üvegpohár és papír töltését,
   c) összedörzsölt műanyag flakon és papír töltését,
   d) egyéb elektromos állapotú testek töltését!

5. Gyűjtsünk anyagot Benjamin Franklin fordulatokban gazdag életéről, tudományos és közéleti tevékenységéről!

6. Tájékozódjunk Selényi Pál életéről és munkásságáról!

2. Coulomb törvénye. A töltésmegmaradás törvénye

Bár az ókori görögök is megfigyelték már, hogy a megdörzsölt borostyánkő (görögül: elektron) könnyű testeket magához vonz, sokáig nem foglalkoztak e jelenségkör törvényszerűségeivel.

Az elektromosan töltött testek kölcsönhatására először *Coulomb* [kulomb] francia fizikus állapított meg mennyiségi összefüggést (1785).

Coulomb rugalmas elcsavarodásra képes, úgynevezett **torziós fémszálra**** vízszintes szigetelőrudat függesztett, a végén kis fémgömbbel. A gömbnek elektromos töltést adott, majd ehhez egy másik elektromos töltésű fémgömböt közelített. A torziós szál elcsavarodásának mértékéből meg tudta határozni a gömbök közötti elektromos vonzó- vagy taszítóerőt. Vizsgálta az erő függését a töltések nagyságától és a töltések közötti távolságtól.

A töltésmennyiséget úgy változtatta, hogy a feltöltött fémgömbhöz ugyanolyan méretű és minőségű semleges gömböt érintett. Szétválasztás után az ilyen gömbök teljesen egyforma elektromos hatást mutattak, így töltésüket egyenlő nagynak, az eredetihez viszonyítva pedig feleakkorának lehetett feltételezni.

A mérések szerint **két pontszerű töltés között ható vonzó- vagy taszítóerő nagysága** (F)
- **egyenesen arányos a kölcsönható töltések nagyságával** (Q_1 **és** Q_2), **és**
- **fordítottan arányos a töltések közötti távolság négyzetével** (r^2).

Matematikai formában Coulomb törvénye*:

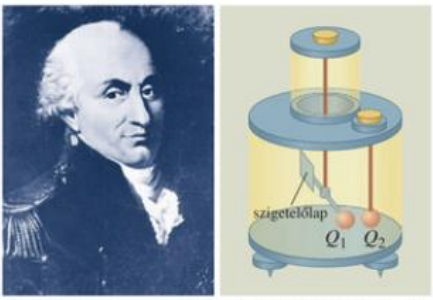
$$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}.$$

A k *arányossági tényező* a mértékegységek megválasztásától és a töltések közötti anyag minőségétől függő állandó.

A töltésmennyiség SI-mértékegysége – Coulomb emlékére – a *coulomb* nevet kapta. Jele: C.

Az 1 C töltés nagyságát más törvény alapján rögzítették, amelyből következik, hogy k értéke légüres térben (és közelítően levegőben is):

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{C^2}}.$$



69.1. *Charles Augustin de Coulomb* (1736–1806) és a kísérleteihez használt eszköz

A Coulomb-törvény alapján az 1 C pontszerű töltés a vele egyenlő nagyságú pontszerű töltésre 1 m távolságból légüres térben $9 \cdot 10^9$ newton erőt fejt ki.

Pontos mérésekkel (melyekről később lesz szó) meghatározták az elektron töltését is. Egy elektron töltése:

$$e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}.$$

Az elektron töltése az elektromos töltés legkisebb adagja, az úgynevezett **elemi töltés*.**

A Coulomb-törvény alapján a testeken lévő elektromos töltés mennyiségét sok esetben meg tudjuk határozni. Ha az összedörzsölt semleges testek egyikén Q többlettöltés jelenik meg, akkor megfigyelhető, hogy a másikon $-Q$ töltés található (amennyiben a környezet valamennyit el nem vezet ezekből a töltésekből). Ha egy test Q töltéséből több test is kap Q_1, Q_2, …, Q_n töltést, akkor a mérések szerint:

$$Q = Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_n.$$

A folyamatokban részt vevő töltéshordozó részecskék ugyanúgy viszik magukkal töltésüket, mint a tömegüket, csak a töltések előjelesen összegeződnek.

Egy zárt rendszerben az elektromos töltések előjeles összege mindig állandó. Ez a töltésmegmaradás törvénye*.

MEGJEGYZÉSEK

1. Megfigyelhettük, hogy az „elektromos töltés” (vagy röviden „töltés”) elnevezés többféle értelemben is előfordul a fizikában.
   – Jelenthet elektromos tulajdonságot, állapotot. (pl.: A test kétféle elektromos töltéssel rendelkezhet.)
   – Ez a neve az elektromos állapot nagyságát jellemző fizikai mennyiségnek is. (pl.: Egy golyó töltése $Q = 3 \cdot 10^{-14}$ C.)
   – Jelölheti magát az elektromos állapotú testet is. (pl.: Két pontszerű töltés között ható erő…)

2. Coulomb mint hadmérnök sok időt fordított tudományos kutatásokra. Maga tervezte a róla elnevezett törvény felismerésére alkalmas eszközt, a torziós mérleget. Mérésekkel meghatározta a rugalmas szálra ható forgatónyomaték és az elcsavarodási szög közötti függvénykapcsolatot. Nevéhez fűződik a csúszási súrlódási erő törvényének vizsgálata is.

3. A Coulomb-törvényt gyakran a következő formában írják fel: $F = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$.

   Az itt szereplő ε_0 állandót a **vákuum dielektromos állandójának**** (más néven **permittivitás****) nevezik. A dielektromos állandó használatával a Coulomb-törvény ugyan bonyolultabb formát kap, más, később szereplő összefüggések viszont egyszerűbbé válnak.

   A $k = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}$ összefüggésből adódik, hogy $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \frac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2}$.

4. A **coulomb** igen nagy mértékegységet jelent. A testek dörzsölés útján történő elektromos feltöltődése során 1 C-nál több nagyságrenddel kisebb töltések fordulnak csak elő (μC, nC).

5. Figyeljük meg az elektromos és a gravitációs erőtörvények hasonlóságát! Emlékeztetőül a gravitációs erőtörvény: $F = f \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$, ahol m_1 és m_2 a testek tömegét, r a köztük lévő távolságot jelenti. A gravitációs állandó értéke: $f = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{kg}^2}$.

   Eltérés abban van, hogy gravitációs kölcsönhatás csak vonzás lehet, az elektromos kölcsönhatásnál viszont vonzás és taszítás is felléphet. A gravitációs kölcsönhatás az anyag minden fajtájára jellemző, az elektromos kölcsönhatás csak bizonyos anyagi részecskékhez kapcsolódik (például a neutronok között nem jelentkezik). A gravitáció lényegesen gyengébb kölcsönhatás, mint az elektromos, ezért általában el is hanyagolható az utóbbi mellett. Ezek a különbségek is mutatják, hogy a törvények formai hasonlósága ellenére a gravitációban és az elektromosságban az anyag két különböző tulajdonsága nyilvánul meg.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Hogyan tudnánk a két egyforma és egyenlő töltésű kis fémgolyó közti elektromos taszítóerőt a negyedére csökkenteni?

2. Két elektromos töltéssel rendelkező, egyforma kis fémgömböt szigetelőrudakkal tartva egymáshoz érintünk, majd ismét az eredeti távolságba visszük őket egymástól. Hogyan változik az eredetihez viszonyítva a két gömb közötti elektromos erőhatás nagysága és iránya, ha a gömbök kezdeti töltése

   a) Q és $-Q$; *b)* Q és Q; *c)* Q és $-3Q$; *d)* Q és $3Q$?

3. Egymástól bizonyos távolságban lévő két proton egyikét egy elektronnal helyettesítjük. Hogyan változik ettől a két részecske közötti

a) elektromos kölcsönhatás; *b)* gravitációs kölcsönhatás? (Használjunk táblázatot, ha szükséges!)

FELADATOK

1. Szigetelőnyelekre erősített egyforma kis fémgolyók egyike –2 mC, a másik 50 μC elektromos töltést tartalmaz.

a) Képes lenne-e a világ legerősebb embere ezt a két golyót egymástól 30 cm távolságban tartani?

b) Összeérintés és szétválasztás után milyen távolságban fejtene ki a két golyó egymásra az előbbivel megegyező nagyságú erőt?

MEGOLDÁS:

$Q_1 = -2 \cdot 10^{-3}\ \text{C};$
$Q_2 = 50 \cdot 10^{-6}\ \text{C}$
$r_1 = 0{,}3\ \text{m}$

$F,\ r_2 = ?$

a) A golyók közötti vonzóerőt kell ellensúlyoznunk, amit a Coulomb-törvénnyel számolhatunk ki.

$$\text{Az erő nagysága: } F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r_1^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-3}\,\text{C} \cdot 50 \cdot 10^{-6}\,\text{C}}{(0{,}3\ \text{m})^2} = \mathbf{10^4\ N.}$$

Nem tudná tartani őket.

b) Összeérintéskor, a töltésmegmaradás szerint, a két golyó együttes töltése $-1950 \cdot 10^{-6}$ C lesz. A vezetőgömbökön a szimmetria miatt $Q_1 = Q_2 = -975 \cdot 10^{-6}$ C töltés helyezkedik el, és taszítani fogják egymást. Keressük, hogy most milyen távolságban (r_2) lép fel közöttük az eredetivel egyenlő nagyságú erő. A Coulomb-törvényből r_2 kifejezhető:

$$r_2 = \sqrt{\frac{k \cdot Q_1 \cdot Q_2}{F}} = \sqrt{\frac{9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot 975 \cdot 10^{-6}\,\text{C} \cdot 975 \cdot 10^{-6}\,\text{C}}{10^4\,\text{N}}} = \mathbf{0{,}925\ m = 92{,}5\ cm.}$$

2. Számítsuk ki az 1 C nagyságú töltéshez szükséges

a) elektronok; *b)* protonok; *c)* He atommagok; *d)* U atommagok számát!

3. Egymástól 20 cm távolságra lévő pontszerű testek $4{,}2 \cdot 10^{-8}$ C és $-3 \cdot 10^{-7}$ C töltéssel rendelkeznek. Milyen nagyságú és irányú elektromos erőt fejtenek ki egymásra?

4. Egy műanyag vonalzót összedörzsölünk egy 2 g tömegű fóliával. Ezután a vonalzó még éppen fel tudja emelni a 2,5 cm-re alatta elhelyezkedő fóliát.

a) Mennyinek adódik a Coulomb-törvény alapján a testek töltése?

b) Miért tekinthető csak becslésnek az előbbi számítás?

5. Mekkora távolságra tudná megközelíteni egymást két, lépésben haladó személygépkocsi, ha mindegyik 1 C többlettöltéssel rendelkezne? Mindegyik autó tömege 1 t, a súrlódási tényező a talajon 0,5.

3. Az elektromos mező jellemzése

3.1. Az elektromos térerősség

Két test gravitációs vagy elektromos kölcsönhatásához nem kell a testeknek érintkezniük egymással. Tudjuk, hogy ezek a kölcsönhatások akkor is létrejönnek, ha légüres tér van a testek között. A testek nem a „semmin keresztül" kapaszkodnak egymásba, hanem gravitációs, illetve elektromos mező közvetíti a köztük fellépő kölcsönhatást.

Az elektromos töltéssel rendelkező testek közötti kölcsönhatás az általuk létrehozott **elektromos mező,** vagy más néven **elektromos erőtér*** közvetítésével jön létre.

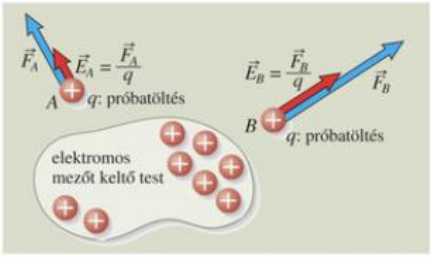
Az elektromos mező létezését először Michael *Faraday* [feredé] (1791–1867) angol fizikus tételezte fel a 19. században. Mára bebizonyosodott, hogy az elektromos mező valóban az anyag létező, sajátos, nagyon finom eloszlású, nem atomi felépítésű formája. Az elektromos mezőt nem érzékeljük súrlódás vagy közegellenállás alapján, mint pl. a levegőt. Az elektromos mező jelenléte a bele helyezett elektromos töltésre ható erő következtében vehető észre.

Az elektromos mezőt azon a helyen tekintjük erősebbnek, ahol a mező vizsgálatára használt próbatöltésre* nagyobb erő hat. Az erőt azonban nem csak a mező erőssége befolyásolja. Ugyanabban a mezőben nagyobb próbatöltés alkalmazása esetén is arányosan nagyobb erőt kapunk. Az erő és a próbatöltés nagyságának hányadosa a mező egy pontjában már állandó, egyértelműen a mező erősségére jellemző mennyiség lesz.

Ezért **az elektromos mezőt valamely pontjában a próbatöltésre ható erő (F) és a próbatöltés (q) hányadosával jellemezzük. Ennek a hányadosnak a neve: elektromos térerősség*. Jele: E.**

$$E = \frac{F}{q}, \text{ mértékegysége: } \frac{\text{N}}{\text{C}}.$$

A mező egy pontjában $1\ \frac{\text{N}}{\text{C}}$ a térerősség, ha ott 1 C próbatöltésre 1 N erő hat.



72.1. A térerősség iránya megegyezik a pozitív próbatöltésre ható erő irányával. *Vajon miért nagyobb a térerősség a B pontban, mint az A pontban?*

A térerősség vektormennyiség. Irányának (megállapodás szerint) a pozitív próbatöltésre ható erő irányát tekintjük.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Nézzük az elektromos térerősség meghatározását egy egyszerű példán!

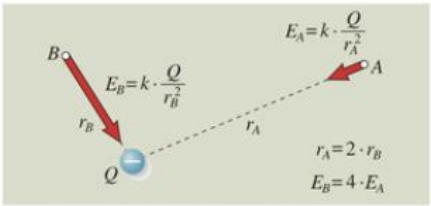
Keressük egy Q pontszerű töltés* által létrehozott elektromos mezőben a Q töltéstől r távolságú P pontban az elektromos térerősség nagyságát!

A P pontba helyezett q próbatöltésre ható erőt a Coulomb-törvény alapján számíthatjuk ki:

$$F = k \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2}.$$

A térerősség:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{k \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2}}{q} = k \cdot \frac{Q}{r^2}.$$

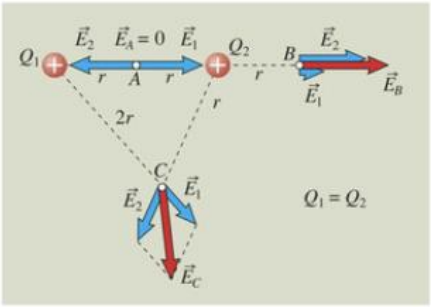


72.2. *Hogyan változnának az A és B pontbeli térerősségek, ha a Q töltést egy ugyanakkora, de ellentétes előjelű töltésre cserélnénk?*

A keresett térerősség tehát egyenesen arányos a mezőt létrehozó Q töltéssel, fordítottan arányos a tőle mért r távolság négyzetével, és független a vizsgálatnál használt q próbatöltés nagyságától.

A térerősség pozitív Q esetén a töltéstől elirányul, negatív Q esetén pedig a töltés felé mutat.

Ha több töltés együtt hoz létre valamilyen elektromos mezőt, akkor érvényes a **szuperpozíció elve**.** Mindegyik töltés a másiktól függetlenül létrehozza a maga elektromos mezőjét. Az egyes elektromos mezők térerősségeinek vektori összege adja az eredő térerősséget.



73.1. A szuperpozíció elvének alkalmazása pontszerű Q_1 és Q_2 töltések elektromos mezőjében

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Mit jelent az, hogy az elektromos mező egy pontjában a térerősség nagysága 3000 $\frac{\text{N}}{\text{C}}$, iránya pedig észak felé mutat?
2. Az elektromos mező egy pontjában elengedett elektron függőlegesen felfelé indul el. Merre mutat ezen a helyen az elektromos térerősség vektora?
3. Lehetséges-e, hogy egy háromszor nagyobb töltés a környezetében háromszor kisebb térerősséget hozzon létre?
4. Egy szabályos háromszög csúcsaiban egyenlő nagyságú, megegyező előjelű töltéseket helyezünk el. Mennyi a térerősség a háromszög középpontjában?
5. Az A pontban pozitív, a B pontban kétszer akkora, de negatív előjelű töltést rögzítünk. Az A és B ponton áthaladó egyenes melyik részén van az a pont, ahol a térerősség zérus?

FELADATOK

1. Egy kis golyónak 10^{-7} C pozitív töltést adunk. A golyó felett 30 cm magasságban egy $2 \cdot 10^{-7}$ C töltésű és $5 \cdot 10^{-8}$ kg tömegű porszem található.

   Milyen nagyságú és irányú gyorsulással indul el a porszem?

MEGOLDÁS:

$Q = 10^{-7}$ C

$r = 30$ cm $= 3 \cdot 10^{-1}$ m

$q = 2 \cdot 10^{-7}$ C

$m = 5 \cdot 10^{-8}$ kg

$a = ?$

A golyó töltése által a porszem helyén létrehozott elektromos térerősség:

$$E = k \cdot \frac{Q}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{10^{-7}\text{C}}{(3 \cdot 10^{-1}\text{m})^2} = \mathbf{10^4 \frac{N}{C}}.$$

A porszemre felfelé irányuló elektromos erő:

$$F_{el} = E \cdot q = 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}} \cdot 2 \cdot 10^{-7}\,\text{C} = 2 \cdot 10^{-3}\,\text{N}.$$

A porszemre lefelé ható gravitációs erő:

$$F_g = m \cdot g = 5 \cdot 10^{-8}\,\text{kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 5 \cdot 10^{-7}\,\text{N}.$$

A gravitációs erő négy nagyságrenddel kisebb az elektromos erőnél, ezért elhanyagolható. A dinamika alaptörvénye szerint a gyorsulás felfelé mutat, nagysága:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{2 \cdot 10^{-3}\,\text{N}}{5 \cdot 10^{-8}\,\text{kg}} = 0{,}4 \cdot 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \mathbf{4 \cdot 10^4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}.$$

2. Határozzuk meg az elektromos mező térerősségének nagyságát és irányát abban a pontban, amelyben a mező a $2 \cdot 10^{-7}$ C töltésű részecskére $3 \cdot 10^{-4}$ N erőt fejt ki függőlegesen lefelé!

3. $10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}$ lefelé irányuló térerősségű elektromos mezőben elengedünk egy elektront, melynek tömege $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg.

a) Milyen nagyságú és irányú elektromos erő hat az elektronra?

b) Milyen nagyságú és irányú gravitációs erő hat az elektronra?

c) Milyen nagyságú és irányú gyorsulással indul el az elektron?

4. $2 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}$ térerősségű mezőben lévő elektromosan feltöltött porszemre $6{,}4 \cdot 10^{-13}$ N nagyságú elektromos erő hat. Hány elektron töltésével rendelkezik a porszem?

5. Adjuk meg egy $Q = -5 \cdot 10^{-7}$ C pontszerű töltés által létrehozott elektromos mezőben a töltéstől $r = 0{,}1$ m távolságra a térerősség nagyságát és irányát!

6. Milyen előjelű és nagyságú az a pontszerű töltés, amelynek elektromos mezőjében

a) a töltéstől 3 m távolságban a térerősség 180 $\frac{\text{N}}{\text{C}}$ nagyságú és a töltés felé irányul?

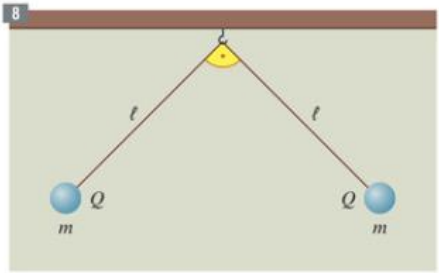
b) a töltéstől 20 cm távolságban a térerősség 300 $\frac{\text{N}}{\text{C}}$ nagyságú és a töltéstől elirányul?

7. A $Q_1 = -4 \cdot 10^{-7}$ C és a $Q_2 = 2 \cdot 10^{-7}$ C pontszerű töltések 60 cm-re helyezkednek el egymástól. Határozzuk meg az elektromos térerősség nagyságát és irányát

a) a ponttöltések közötti szakasz felezőpontjában;

b) abban a pontban, amely a Q_1 töltéstől 90 cm, a Q_2 töltéstől pedig 30 cm távolságban helyezkedik el!

8. Egyforma, $m = 0{,}01$ g tömegű kis golyóknak ugyanakkora töltést adtunk, majd $\ell = 10$ cm hosszú fonalakra, közös pontban felfüggesztettük őket. Az egyensúly beállta után a fonalak éppen derékszöget zártak be egymással. Mennyi a golyók töltése?



3.2. Az elektromos mező szemléltetése erővonalakkal

A különböző nagyságú, előjelű, elhelyezkedésű elektromos töltések eltérő elektromos mezőket hoznak létre maguk körül. Ez kísérletileg is jól megfigyelhető.

Öntsünk lapos üvegtálba ricinusolajat, majd helyezzünk ebbe különböző méretű és alakú fémtesteket, amelyeket vezető köt össze egy dörzselektromos gép (pl. szalaggenerátor**) pozitív, illetve negatív pólusával!

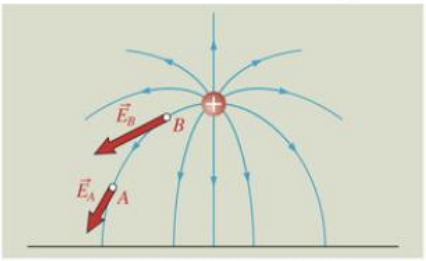
Szórjunk egyenletesen búzadarát az olaj felületére! Ha a dörzselektromos géppel elektromosan feltöltjük az olajba merülő elektródákat, a daraszemek az elektromos mezőre jellemző vonalakban rendeződnek. (*75.1. ábra*)

Az elektromos mezőt gyakran a mező szerkezetére jellemző vonalakkal, az úgynevezett **elektromos erővonalakkal*** szemléltetjük. Az erővonalak – a térerősséghez hasonlóan – az elektromos mező mennyiségi jellemzésére is felhasználhatók. Ennek érdekében a következő megállapodás szerint kell az erővonalakat megszerkeszteni:

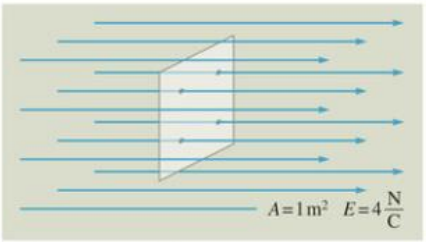
- **az erővonalak iránya megegyezik a térerősség irányával,**
- **az erővonalak sűrűsége megegyezik a térerősség nagyságával.**

Görbe erővonal irányának egy adott pontban a görbéhez húzott érintő irányát tekintjük. Az erővonalak sűrűségén a térerősségre merőleges egységnyi felületen áthaladó erővonalszámot értjük.

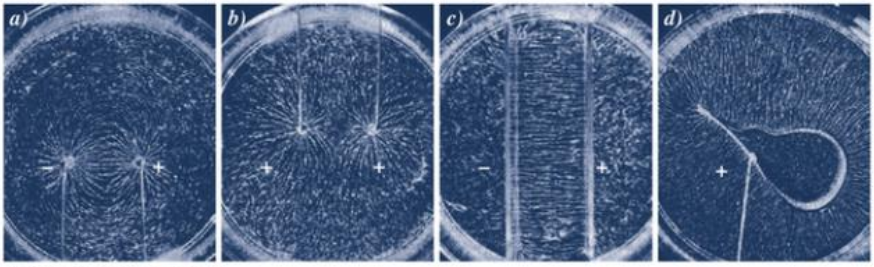
Egy felületen áthaladó összes erővonal száma a felület elektromos fluxusának számértékét adja.** A fluxus betűjele: Ψ [pszi]. Ha a felület merőleges az erővonalakra, akkor a fluxus és a térerősség kapcsolata: $\Psi = E \cdot A$. Az elektromos fluxus mértékegysége: $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}} \cdot \mathrm{m}^2$.



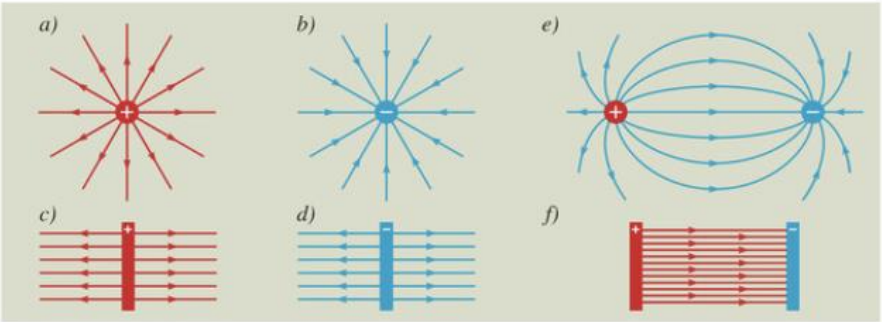
75.2. Az erővonal érintője adja a térerősség irányát az adott pontban. *Hogyan látszik az erővonal képéből, hogy $E_B > E_A$?*



75.3. Az egységnyi felületet merőlegesen metsző erővonalak száma megadja a térerősség nagyságát. *Mennyi az A felület fluxusa? És ha 90°-kal elforgatjuk úgy, hogy párhuzamos legyen az erővonalakkal?*



75.1. Kísérleti erővonalképek



76.1. Egyszerű erővonalképek

Példák egyszerű erővonalképekre:

a) Pontszerű pozitív töltés mezőjében az erővonalak sugarasan kifelé irányulnak.

b) Pontszerű negatív töltésnél hasonló az erővonalkép, de befelé mutató iránnyal.

c) Pozitív töltésű sík fémlemez közelében az erővonalak párhuzamosak, egyenlő sűrűségűek, és a lemezből kifelé irányulnak. A lemez egyik oldalán a térerősség nagyságra és irányra is megegyezik. Az ilyen térrészben **homogén elektromos mezőről*** beszélünk.

d) Hasonló erővonalkép jellemzi a negatív töltésű sík fémlemez környezetét, csak a lemez felé irányuló erővonalakkal.

e) A dipólus (két egyenlő nagyságú és ellentétes előjelű töltés) inhomogén erőterében a pozitív töltéstől a negatív töltés felé haladnak az erővonalak.

f) Két egyenlő nagyságú, ellentétes előjelű töltéssel rendelkező párhuzamos fémlemez között homogén mező erővonalképe látható, a lemezeken kívül nincs elektromos mező.

Az *e)* ábra az *a)* és *b)*, az *f)* ábra a *c)* és *d)* ábrák mezőinek szuperpozíciójaként fogható fel.

Az elektromos erővonalképet modern technikai eszközök működésének magyarázatánál is alkalmazzák. Az **érintőképernyő** egyik elterjedt típusa az ún. kapacitív panel. Ennél üveg- vagy műanyag lap alatt rácsos szerkezetű vezető réteg helyezkedik el, melynek segítségével elektromos mezőt hoznak létre a kijelző felett. A panelt megközelítő ujjunk – mint egy földelt vezetőnek egy pontja – módosítja az eredeti elektromos mezőt. Ezt a helyi változást érzékeli a vezérlőcsip.

Keressünk az interneten kapacitív képernyő működésére vonatkozó ábrákat!

MEGJEGYZÉSEK

1. Az erővonalak nem valóságosan létező, hanem képzeletbeli vonalak a mező térerősségének szemléltetésére.

2. Vizsgáljuk meg, hogy egy Q pontszerű töltésből hány erővonalat kell indítanunk, hogy az erővonalak számszerűen is helyesen jellemezzék a térerősség nagyságát!
Vegyük körül a Q ponttöltést r sugarú gömbbel! Ennek felületén a térerősség:

$$E = k \cdot \frac{Q}{r^2}.$$

A gömb fluxusa:

$$\Psi = E \cdot A = k \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot 4 \cdot r^2 \cdot \pi = 4 \cdot \pi \cdot k \cdot Q = \frac{Q}{\varepsilon_0}.$$

A gömbfelület teljes fluxusa nem függ a gömb sugarától. Ponttöltés mezőjét tehát akkor jellemezzük számszerűen is helyesen az erővonalakkal, ha a Q ponttöltésből $4 \cdot \pi \cdot k \cdot Q$, vagy más jelöléssel $\frac{Q}{\varepsilon_0}$ erővonalat indítunk, és ezek megszakítás nélkül, sugarasan haladnak egészen végtelen távolságig.

A kapott eredmény nem csak pontszerű töltésre érvényes. Bármilyen Q töltést körülzáró felület teljes fluxusa:

$$\Psi_{\text{összes}} = \frac{Q}{\varepsilon_0}, \quad \text{ez Gauss tétele.}$$

3. Ha a térerősség nem merőleges a felületre, akkor a felületet átdöfő erővonalak számát, azaz a fluxust a következőképpen számíthatjuk:

$\Psi = E_m \cdot A$, ahol E_m a térerősség felületre merőleges összetevőjét jelenti.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Az 1. ábra egy térrész erővonalait mutatja.

Az ábrán jelölt pontok közül

a) melyikben a legnagyobb a térerősség?

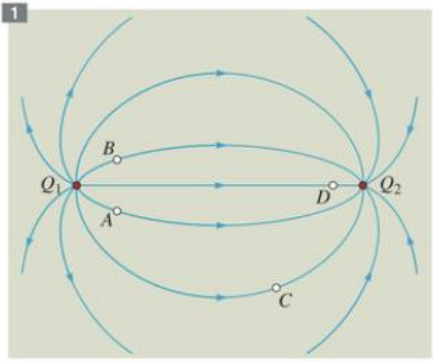
b) melyikben a legkisebb a térerősség?

c) melyik két pontban egyezik meg közelítően a térerősség nagysága?

d) melyik két pontban egyezik meg közelítően a térerősség iránya?

e) Milyen előjelű az elektromos mezőt keltő Q_1 és Q_2 töltés?

1



2. Határozzuk meg a *75.1. ábra* kísérleti erővonalképein az erővonalak irányát!

FELADATOK

1. Homogén mezőben a térerősségre merőleges 0,2 m^2-es felületen 600 erővonal halad át.

a) Mekkora ebben a mezőben a térerősség értéke?

b) Mennyi a felület 0,1 m^2-es részének a fluxusa?

c) Mennyi az előbbi felületre merőleges 0,1 m^2-es felületnek a fluxusa?

d) Mennyi a térerősséggel 30°-os szöget bezáró 0,1 m^2-es felületnek a fluxusa?

2. 5000 $\frac{N}{C}$ térerősségű homogén elektromos mezőben a térerősségre merőlegesen elhelyezünk egy 30 cm^2 területű lapot.

a) Mennyi ennek a lapnak a fluxusa?

b) Mennyi lesz a lap fluxusa, ha 90°-kal elforgatjuk?

c) Mennyi lesz a lap fluxusa az eredeti helyzetből történt 30°-os elforgatás után?

3.3. Az elektromos mező munkája.* Az elektromos feszültség

A dörzsöléssel elektromos állapotba hozott testek magukhoz rántanak, illetve felemelnek apró tárgyakat. A működő szalaggenerátor elektródájára szórt hungarocell golyócskák feltöltődés után a tér minden irányába szétrepülnek. Tudjuk, hogy a testek felemelkedése, gyorsulása mindegyik esetben az elektromos mező erőhatásának a következménye.

Az elektromos mező a benne lévő töltésekre azok elmozdulása közben erőt fejt ki, a mező tehát munkát végez. A tér két pontja között jelen lévő elektromos mezőt az is jellemzi, hogy mennyi munkát tud végezni a mező a két pont között elmozduló próbatöltésen. Ez a munka azonban nemcsak a mezőtől, hanem az elmozduló próbatöltés nagyságától is függ. Mivel az elektromos mező által kifejtett erő egyenesen arányos a próbatöltéssel, a mező két pont között végzett munkája szintén egyenes arányban áll a próbatöltés nagyságával.

Két pont között elmozduló próbatöltésen a mező által végzett munkának (W) és a próbatöltésnek (q) a hányadosa a mezőnek erre a két pontjára jellemző állandó, amely már független a próbatöltéstől, ezért alkalmas a két pont közötti elektromos mező jellemzésére. A hányados neve elektromos feszültség. Jele: U.

$$U = \frac{W}{q}.$$

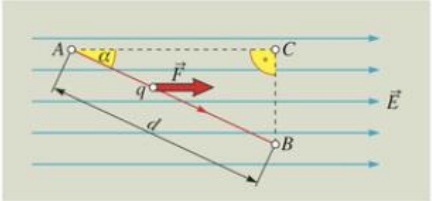
A feszültség mértékegysége *Volta* olasz fizikus tiszteletére a *volt*, jele V.

$$1\ \mathrm{V} = 1\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{C}}$$

1 V a feszültség az elektromos mező két pontja között, ha a mező 1 C töltést 1 J munkával visz át az egyik pontból a másikba.

Példaként határozzuk meg az elektromos feszültséget egy E térerősségű homogén mező d távolságban lévő A és B pontja között!

Vezessük a q pozitív próbatöltést az AB szakasz mentén az A pontból a B pontba! Mivel



78.1. $W_{AB} = W_{AC} + W_{CB}$

a mező által kifejtett erő iránya α szöget zár be a d elmozdulás irányával, a munka értelmezése szerint a mező munkája:

$$W_{AB} = F \cdot d \cdot \cos\alpha.$$

Az erő a térerősséggel kifejezve: $F = E \cdot q$. Ezt felhasználva, a mező munkája:

$$W_{AB} = E \cdot q \cdot d \cdot \cos\alpha.$$

A feszültség definíciója alapján:

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} = \frac{E \cdot q \cdot d \cdot \cos\alpha}{q} = E \cdot d \cdot \cos\alpha.$$

A feszültség valóban nem függ a próbatöltés nagyságától, csak a mező erősségétől (E) és a két pont helyzetétől (d és α).



78.2. *Alessandro Volta* (1745–1827) olasz fizikus

Nézzük meg, hogy mit kapnánk az A és B pont közötti feszültségre, ha más útvonalon vinnénk a próbatöltést az A pontból a B pontba! Az egyszerű számolhatóság érdekében kövessük például az ACB útvonalat!

Az AC szakaszon az erő és az elmozdulás egyirányú, a munka:

$$W_{AC} = F \cdot \overline{AC} = E \cdot q \cdot \overline{AC}.$$

Ha felhasználjuk, hogy $\overline{AC} = d \cdot \cos\alpha$, akkor

$$W_{AC} = E \cdot q \cdot d \cdot \cos\alpha.$$

Az ACB útvonal hátralévő CB szakasza merőleges az elektromos erő irányára, így ezen a szakaszon az elektromos mező munkája zérus.

A munka a teljes útvonalon:

$$W_{ACB} = W_{AC} = E \cdot q \cdot d \cdot \cos\alpha.$$

Hasonlóan belátható, hogy a mező munkája az A és B pont között bármelyik útvonalon ugyanannyinak adódik.

Két pont között a mező munkája és így a feszültség is független a próbatöltés útvonalától. Az elektromos mező konzervatív.

Az U feszültség és az E térerősség kapcsolata egyszerűsödik, ha a vizsgált d távolságú pontok homogén mezőben, a térerősség irányában helyezkednek el. Ilyenkor $\cos\alpha = 1$, és így

$$U = E \cdot d.$$

Gyakran a feszültség ismeretében számoljuk a térerősséget:

$$E = \frac{U}{d}.$$

Az összefüggésből a térerősség SI mértékegysége:

$$1\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}} = 1\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}.$$

A feszültség *előjeles* mennyiség. Az U_{AB} **feszültség pozitív, ha** az A pontból a B pontba elmozduló pozitív próbatöltésen a mező pozitív munkát végez, vagyis **az A ponttól a B pont felé a térerősség irányában haladunk** (azzal hegyesszögű irányban). A munka előjeles értelmezéséből következik, hogy

$$U_{BA} = -U_{AB}.$$

Az U_{AB} feszültség az A pont B ponthoz viszonyított feszültségét jelenti.

Gyakran egy közös O ponthoz viszonyítva adunk meg minden feszültséget. Ilyenkor az U_{AO} helyett röviden csak az U_A jelölést használjuk. **A közös ponthoz viszonyított feszültség neve: potenciál**.**

Bármely két pont közötti feszültséget felfoghatjuk úgy is, mint potenciáljaik különbségét.

Feszültség = potenciálkülönbség,**

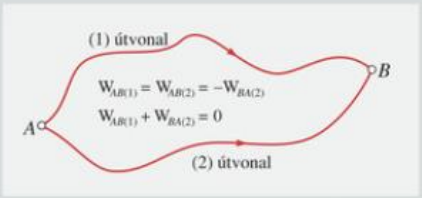
$$U_{AB} = U_A - U_B.$$

Ha két pont között a feszültség 0, akkor a pontok azonos potenciálúak, más szóval **ekvipotenciális** pontok.

MEGJEGYZÉSEK

1. Ha példánkban megváltoztatnánk a q próbatöltés előjelét, akkor a mező W_{AB} munkája is ellentétes jelűre változna. A kettő hányadosa, a feszültség, tehát független a próbatöltés előjelétől is.

2. A mező munkavégzésének függetlensége a két pont közötti útvonaltól másképpen úgy is megfogalmazható, hogy **zárt görbe mentén a mező munkavégzése zérus. Ez az energiamegmaradás megnyilvánulása.** Ugyanis sztatikus mezőben egy görbét körbejárva a kiindulási állapotba jutunk. A változatlan mező nem végezhet munkát, nem növelheti a próbatöltés energiáját.



79.1. Zárt görbét körbejárva a mező munkája zérus

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Mit jelent az, hogy egy rúdelem két pólusa között 1,5 V a feszültség?
2. Két pont között elmozgatunk egy próbatöltést. Nem beszélhetnénk ilyenkor a mező munkavégzése helyett a mi munkánkról?
3. Egy áramforrás pozitív pólusa P, negatív pólusa N. Milyen előjelű az
   a) U_{PN} feszültség?
   b) U_{NP} feszültség?
4. Egy pozitív próbatöltésnek az A pontból a B pontba való elmozgatását a mező akadályozza, a mozgatáshoz pozitív munkát kell végeznünk. Milyen előjelű
   a) a mező munkája?
   b) az U_{AB} feszültség?
   c) az U_{BA} feszültség?
5. $U_{AB} > U_{CD}$. Mondhatjuk-e biztosan, hogy az A és B pont között
   a) erősebb az elektromos mező, mint a C és D pont között?
   b) több munkát tud végezni a mező egy próbatöltésen, mint a C és D pont között?
6. Egy homogén elektromos mezőben egy O pont körül r sugarú kört rajzolunk. Hogyan változik a körvonal mentén haladva a kerületi pontok és a középpont közötti feszültség?

FELADATOK

1. 4,5 V-os zseblámpatelep egymástól 5 cm-re lévő pólusai között közelítően homogén elektromos mező alakult ki. Mekkora sebességgel csapódna egy negatív pólustól induló elektron a pozitív pólusba, ha közben nem ütközne a levegő molekuláival?

MEGOLDÁS:

$U = 4{,}5\ \text{V}$

$d = 5\ \text{cm} = 5 \cdot 10^{-2}\ \text{m}$

$Q_e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C}$

$m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}$

$v = ?$

A kérdésre kétféle úton is megadhatjuk a választ.

a) Homogén mezőben állandó erő hat az elektronra, tehát egyenletesen gyorsuló mozgás jön létre.
A térerősség:

$$E = \frac{U}{d} = \frac{4{,}5\ \text{V}}{5 \cdot 10^{-2}\ \text{m}} = 90\ \frac{\text{V}}{\text{m}}.$$

Az elektronra ható erő:

$$F = E \cdot Q_e = 90\ \frac{\text{V}}{\text{m}} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C} = 14{,}4 \cdot 10^{-18}\ \text{N}.$$

A gyorsulás:

$$a = \frac{F}{m_e} = \frac{14{,}4 \cdot 10^{-18}\ \text{N}}{9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}} = 1{,}58 \cdot 10^{13}\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

Az útra vonatkozó összefüggésből az idő:

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot d}{a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 5 \cdot 10^{-2}\,\text{m}}{1{,}58 \cdot 10^{13}\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} = 8 \cdot 10^{-8}\,\text{s}.$$

Az elért sebesség:

$$v = a \cdot t = 1{,}58 \cdot 10^{13}\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 8 \cdot 10^{-8}\,\text{s} = \mathbf{1{,}26 \cdot 10^6\,\frac{m}{s}}.$$

b) A munkatétel szerint:

$$W_{\text{elektron}} = \Delta E_{\text{mozgási}},$$

$$Q_e \cdot U = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2,$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot Q_e \cdot U}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\text{C} \cdot 4{,}5\,\text{V}}{9{,}1 \cdot 10^{-31}\,\text{kg}}} = \mathbf{1{,}26 \cdot 10^6\,\frac{m}{s}}.$$

Látható, hogy a mező homogén volta és az út nem játszik szerepet.

2. Akkumulátor két pólusa között áthaladó elektronon az elektromos mező $1{,}92 \cdot 10^{-18}$ J munkát végez. Mennyi az akkumulátor feszültsége?

3. Egy rúdelem két pólusa között a feszültség 1,5 V. Mennyi munkát végez az elektromos mező, miközben a negatív pólusról 1 millió elektron átáramlik a pozitív pólusra?

4. Az atomfizikában ma is használatos munka mértékegység az 1 eV (elektronvolt). Azt a munkát jelenti, amit az elektromos mező végez, miközben egy elektront 1 V feszültségű pontok között elmozgat.

a) Határozzuk meg, hogy 1 eV hány J!

b) Mekkora sebességgel rendelkezik az elektron, ha 1 eV a mozgási energiája (az elektron tömege $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg)?

5. Homogén elektromos mezőben, melynek térerőssége $3 \cdot 10^5\,\frac{\text{V}}{\text{m}}$, elengedünk egy $4 \cdot 10^{-3}$ C töltésű részecskét. Az elektromos mező ezen 30 J munkát végez.

a) Mekkora erő hat a részecskére?

b) Mennyi a befutott pálya végei között a feszültség?

c) Mekkora a megtett út?

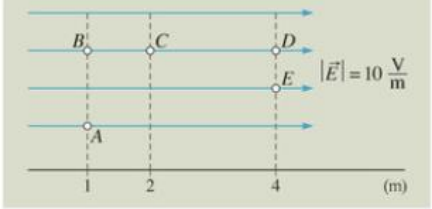
d) Mennyi az elért sebesség, ha a részecske tömege 0,2 g?

6. Mennyi a térerősség abban a homogén elektromos mezőben, amelyben a térerősség irányával 30°-os szöget bezáró 20 cm hosszú szakasz végpontjai között a feszültség 100 V?

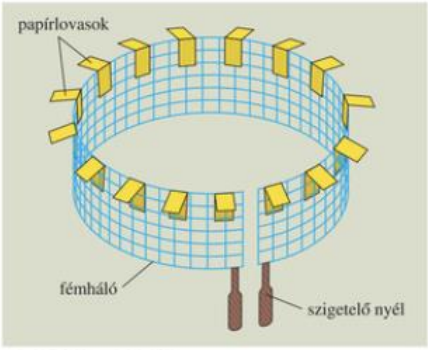
7. Keressünk az ábrán azonos potenciálú pontokat! Határozzuk meg a feszültséget azon pontok között, amelyek nem ekvipotenciálisak (nem azonos potenciálúak)!

8. Ismerjük az *A*, *B*, *C*, *D* és *E* pontok potenciálját: $U_A = 200$ V; $U_B = 50$ V; $U_C = 0$ V; $U_D = -50$ V; $U_E = -200$ V.
Határozzuk meg az alábbi pontpárok közti feszültséget: *AB*, *BA*, *BC*, *BD*, *DA*, *DE*!

7



4. Elektromos töltések, térerősség, potenciál a vezetőn



82.1. Feltöltött fémháló

Mindkét oldalán papírlovasokat tartalmazó, szigetelőnyéllel ellátott fémhálót töltsünk fel szalaggenerátorról! Ha a hálót meghajlítjuk, a papírlovasok csak a domború oldalon jeleznek töltést. A belső, homorú oldalon viszont nem térnek ki. Ha a hálót áthajlítjuk úgy, hogy a külső és belső oldal felcserélődjön, ismét csak a külső oldalon tapasztalunk feltöltődést.

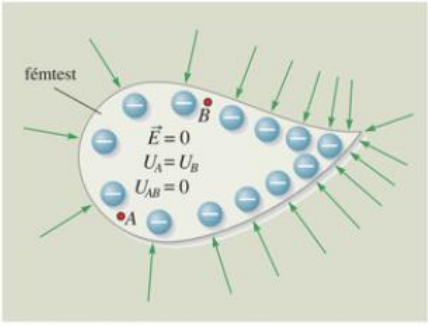
Az egynemű töltések a köztük fellépő taszító hatás miatt a lehető legnagyobb mértékben eltávolodnak egymástól. **A vezetőre vitt többlettöltés* mindig a vezető külső felületén helyezkedik el,** ott is minél távolabb a többi töltéstől. Ezért a **csúcsokon nagyobb a töltéssűrűség*.**

A vezető belsejében lévő elektromos mező elmozdítja a töltéseket. Amikor már beállt a töltések nyugalmi állapota, vagyis **sztatikus elektromos állapotban* a vezető belsejében a térerősség zérus.** Ha ekkor a vezető belsejéből kiemelnénk egy darabot, az ilyen semleges rész (hiszen a többlettöltés a felületen van) eltávolítása semmit sem változtatna az addigi elektromos mezőn. Ebből következik, hogy a térerősség a vezetőben található üregben is zérus lesz. Másképpen úgy is fogalmazhatunk, hogy **a vezetőfelületekkel határolt térrészek elektromosan árnyékoltak*.**

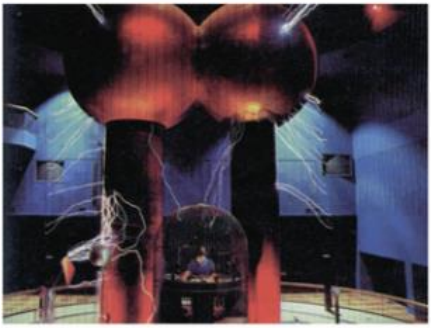
Ha a vezető felületén a térerősségvektornak lenne a felülettel párhuzamos összetevője, akkor a felület mentén még elmozdulnának a töltések, hiszen érintő irányú erő hatna rájuk. Ezért sztatikus állapotban a vezető környezetében **az erővonalak csak a vezető felületére merőleges helyzetűek lehetnek.**

Ahol a térerősség zérus vagy merőleges az elmozdulás irányára, ott az elmozduló próbatöltésen nem végez munkát az elektromos mező. **Nyugalmi elektromos állapotban a vezető pontjai között tehát nincsen feszültség.** (A vezető pontjai azonos potenciálúak: ekvipotenciálisak**.)

A gyakorlatban különösen érdekes a nem folytonos fémfelületeknek, fémhálóknak a belső térrészre gyakorolt elektromos árnyékoló hatása. Az ilyen fémburkolatokat felfedezőjükről **Faraday-kalitkának*** nevezték el.



82.2. Töltés, térerősség és potenciál a vezetőn



82.3. A Faraday-kalitka véd a villámcsapástól



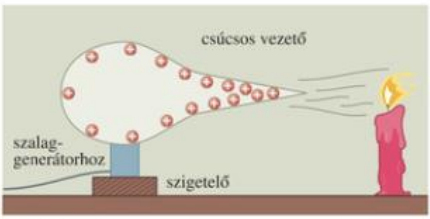
83.1. *Mitől védi a fémrács a gázpalackokat?*

Faraday-kalitka például a gépkocsik fémkarosszériája. Ha az autót villámcsapás éri, a benne ülők semmilyen elektromos hatást nem érzékelnek. A földbe lefutó villám persze kiégetheti a kerekek gumiköpenyét, és ez okozhat balesetet. Az álló gépkocsi azonban teljesen biztonságos hely zivataros időben. Ilyenkor azonban célszerű a motort leállítani, mert a kipufogógáz ionfelhőt, ioncsatornát hoz létre, ami „vonzza" a villámokat.

Ugyanígy védi a villámcsapástól az utasokat a repülőgép fémburkolata, vagy a gázpalackokat, robbanóanyagokat a fémrácsból készült tárolóház.

A különböző elektronikus berendezéseket és ezek összekötő vezetékeit is gyakran tömör vagy hálószerű fémburkolattal árnyékolják a külső elektromos zavarokkal szemben.

Az emberi test is vezető, és szalaggenerátorral veszély nélkül feltölthető. Álljunk szigetelőzsámolyra, és helyezzük tenyerünket a generátor még semleges elektródájára. Ezután indítsuk a generátor motorját. A lágy és száraz haj vagy a zselézett haj fokozatosan égnek áll. A belső szerveket nem éri káros hatás, hiszen ott nincs elektromos mező. Ruhánkról viszont ugorhat ki szikra a közeli tárgyakra vagy tanulókra. (Ez sem veszélyes, csak kis csípést okoz.)

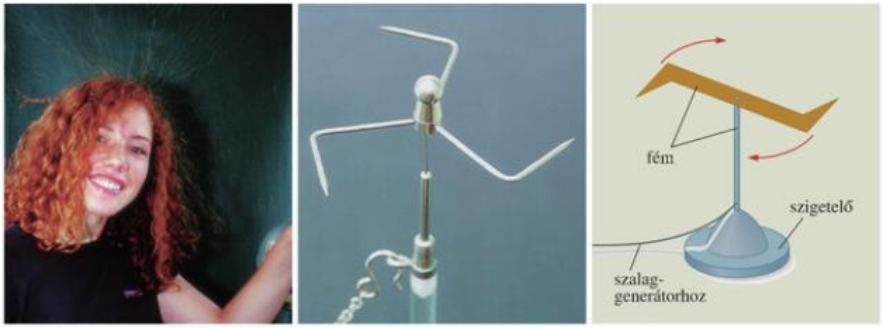


83.3. *Miért fúj a szél az elektromos csúcsok felől?*

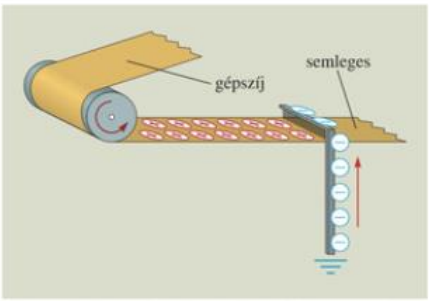
Ugyancsak érdekes megnyilvánulásai és fontos gyakorlati alkalmazásai vannak az elektromosan feltöltött vagy megosztott vezetők csúcsainál fellépő **elektromos csúcshatásnak*.** Ennek lényege, hogy a nagy töltéssűrűség erős inhomogén elektromos mezőt eredményez a csúcs közelében. Ez a mező polarizálja és a csúcshoz mozgatja a levegő molekuláit. A molekulák a csúccsal érintkezve feltöltődnek, majd a csúcs nagy sebességgel eltaszítja azokat. Az elektromos csúcsok közelében tehát a levegő vezetőként viselkedik.

Töltsünk fel hegyes csúccsal rendelkező fémtestet szalaggenerátorral. A csúcs a közelébe vitt gyertya lángját „elfújja". Az elektromos szelet a csúcsnál feltöltődött és onnan nagy sebességgel eláramló levegőmolekulák keltik.

A vezetőből készült, csúcsokkal rendelkező Segner-kerék** forogni kezd, ha töltést viszünk rá. A kereket a csúcs által keltett elektromos szél ellenereje hajtja. A működés elve hasonló az öntözőberendezéseknél látható vízi Segner-kerékhez, amely *Segner János*** [zégner], 1704–1777) magyar fizikus egyik neves találmánya (1750).



83.2. *Miért ágaznak el a hajszálak? Miért kezd el forogni az elektromos Segner-kerék?*



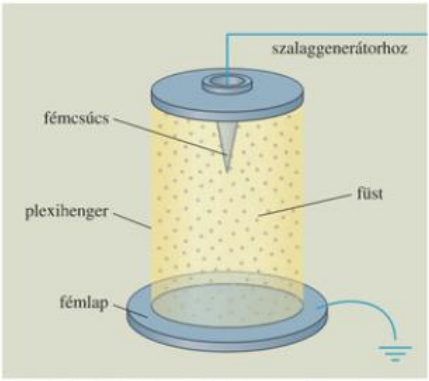
84.1. A feltöltött gépszíjat csúcshatás útján semlegesítik

A **villámhárító** is csúcsban végződik. A csúcshatás elősegíti az elektromos felhő és a föld között a töltés kiegyenlítődését. (Lásd *67.1. ábra.*)

A szíjáttétellel meghajtott gépeknél a szoros érintkezés miatt a gépszíj feltöltődik. Ahol a szétválasztott töltések közötti esetleges szikrakisülés robbanásveszélyt jelent, **földelt fémfésűvel szívják le a töltéseket.**

Átlátszó műanyag henger átfúrt alaplapjába szereljünk fémcsúcsot. Engedjünk a szájával lefelé fordított hengerbe füstöt, majd helyezzük a hengert fémlapra. Ha a fémcsúcsot és a fémlapot szalaggenerátorral ellentétes előjelűre kezdjük feltölteni, a füst pillanatszerűen lecsapódik. A hengerben tiszta, átlátható levegő marad.

A kísérlet az **elektrosztatikus légtisztítót** modellezi, amelyben a légszennyező részecskék csúcshatással feltöltődnek, majd az ellentétes töltésű falon kicsapódnak.

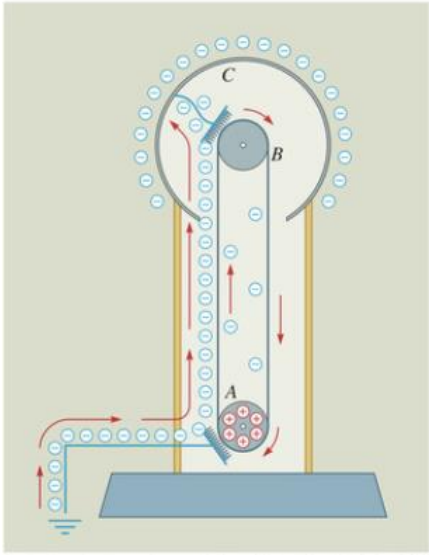


84.2. Csúcshatással történő elektrosztatikus légtisztítás kísérleti megvalósítása

Lényeges szerepe van a csúcshatásnak az iskolai elektrosztatikai kísérletekben használt **szalaggenerátor működésénél** is.

A *84.3. ábrán A*-val jelölt műanyag hengert és a ráfeszülő gumiszalagot villanymotor hajtja meg. Szoros érintkezés folyamán a henger pozitív, a gumiszalag belső fele negatív töltésűvé válik. A tovahaladó szalag a negatív töltéseket elszállítja, azok nagy felületen oszlanak szét. Az ugyanakkora pozitív töltés viszont koncentráltan az *A* hengeren marad. Így ez a pozitív töltés megosztó hatást gyakorol a földelt fémfésűre, és csúcshatás útján a földből negatív töltéseket szív a szalag külső felületére. Ezeket a negatív töltéseket a fémszalag a felső, *B* jelzésű hengerhez szállítja, ahol egy másik fémfésűn keresztül, ismét csúcshatás formájában, kijutnak az üreges *C* jelzésű elektróda külső felületére. Egyes szalaggenerátoroknál az *A* helyett a *B* henger készült műanyagból, és ez válik pozitív töltésűvé. Itt az elektronok útja fordított: a *C* elektródáról haladnak a föld felé.

A szalaggenerátor és a föld között 100 kV nagyságrendű feszültség hozható létre. Hasonló elven működik a felfedezőjéről Van de Graaf-generátornak nevezett berendezés, amellyel még nagyobb feszültséget állítanak elő elektromos töltésű részecskék felgyorsítása céljából.



84.3. A szalaggenerátor csúcshatások segítségével a földből a *C* elektródára szállítja a negatív töltéseket

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Egy vezetővel körülvett térrészben csak zérus lehet a térerősség?
2. Hogyan lehet szigetelőnyélen lévő elektromos töltésű fémgolyó teljes töltését átadni egy üreges vezetőnek?
3. Miért áll égnek a hajunk, ha elektromosan feltöltődünk? (*83.2. ábra*)
4. Minden gépjármű védelmet biztosít a villámcsapás ellen?
5. Miért nagyobb először az elektromosan feltöltött fémcsúcsoknak a levegő molekuláira gyakorolt vonzóereje, azután pedig a taszítóereje?
6. Működne-e légüres térben
   a) az elektroszkóp? (*65.2. ábra*)
   b) az elektromos Segner-kerék? (*83.2. ábra*)
7. El kell-e szigetelni a villámhárítót az épülettől? (*67.1. ábra*)
8. Hogyan magyarázható, hogy (különösen zivataros időben) a szabadban lévő vezetőanyagok csúcsainál időnként fényjelenségek figyelhetők meg (St. Elmo tüze)?



FELADATOK

1. Ragasszunk vagy kössünk „házi" elektroszkópunk fémtestéhez gombostűt! Figyeljük meg, hogy így az elektroszkóp nehezebben tölthető fel, és gyorsabban elveszíti töltését!
2. Gyűjtsünk információkat Segner János magyar fizikus életéről és munkásságáról!



85.1. Dörzselektromos gépek elektrosztatikus kísérletekhez. Van de Graaf-féle szalaggenerátor (balra) és Wimhurst-féle influenciagép (jobbra)

5. A kondenzátor. Az elektromos mező energiája

3D

A folyadékok tárolására különböző méretű, alakú edényeket, tartályokat használunk. Folyadékot tarthatunk bennük, és azt igényeink szerint felhasználhatjuk. Hasonló szerepet töltenek be az elektrotechnikában a kondenzátorok, csak bennük elektromos töltéseket tárolunk.

A kondenzátor* az elektrotechnikában fontos szerepet játszó, **elektromos töltések felhalmozására, sűrítésére szolgáló eszköz.** Rajzjele: ⊣⊢.

Legegyszerűbb fajtája **a síkkondenzátor*,** amely **két egymástól elszigetelt, párhuzamos fémlemezből (fegyverzetből) áll.**

A feltöltött síkkondenzátor lemezein egyenlő nagyságú és ellentétes előjelű töltés található. Ezt az állapotot legegyszerűbben úgy hozhatjuk létre, hogy a kondenzátor lemezeit egy áramforrás két kivezetéséhez csatlakoztatjuk. A kondenzátor úgy is feltölthető, hogy az egyik lemezt földeljük, a másikra pedig töltést viszünk. A földelt lemezen a feltöltött lemez megosztó hatása folytán is ellenkező előjelű és ugyanolyan nagyságú töltés jelenik meg.

A feltöltött kondenzátor fegyverzetei* között (jó közelítéssel) homogén elektromos mező van jelen, a lemezeken kívül pedig zérus a térerősség. Ezt jól mutatja az erővonalakról készült korábbi felvétel is. (*75.1. ábra*)

A KONDENZÁTOR KAPACITÁSA

A kondenzátorra vitt töltés nagyságával egyenes arányban nő a kondenzátor lemezei* közötti feszültség is.

Ezt szemléletesen úgy indokolhatjuk, hogy több töltésből arányosan több erővonal halad a lemezek közötti térben. A nagyobb erővonal-sűrűség nagyobb térerősséget jelent, ami nagyobb feszültséget eredményez a két lemez között.

Az egyik lemez töltésének (Q) és a lemezek közötti feszültségnek (U) a hányadosa a kondenzátorra jellemző állandó, amit a kondenzátor kapacitásának nevezünk.

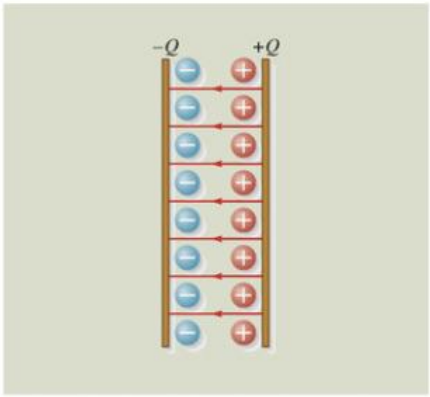
A kapacitás* betűjele: C.

$$C = \frac{Q}{U}$$

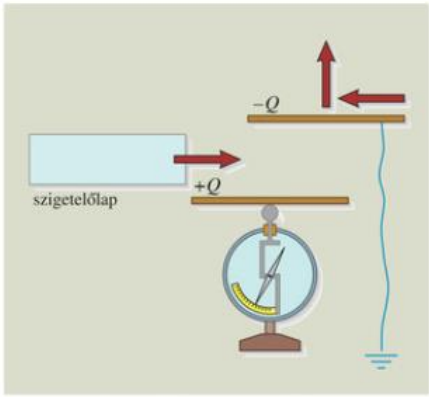
Minél nagyobb a kondenzátor kapacitása, annál több töltés befogadására képes ugyanakkora feszültség mellett.

A kapacitás mértékegysége Faraday tiszteletére a *farad** [farád], jele: F.

$$1\,\mathrm{F} = 1\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{V}}$$



86.1. *Milyen a feltöltött kondenzátor elektromos mezője?*



86.2. *Hogyan változtatható a kapacitás?*

Mitől függ a síkkondenzátor kapacitása? Keressük a választ kísérleti úton! (*86.2. ábra*)

Adjunk fémtányéros vagy vezetővel fémlaphoz kötött elektrométernek (feszültségskálával ellátott elektroszkópnak) valamilyen töltést, majd helyezzünk el a tányérral párhuzamosan földelt fémlemezt! (Itt már megfelelő földelést jelent az is, ha fogjuk ezt a fémlemezt.) Az így kapott síkkondenzátor feszültsége az elektrométeren leolvasható.

A kondenzátor Q töltése állandó (ha az elektrométer fémtányérját nem érintjük és töltését nem vezetjük el), így a $Q = C \cdot U$ összefüggés szerint a kapacitás fordított arányban változik a feszültséggel.

Toljuk el a párhuzamos lemezek egyikét úgy, hogy a szemben álló felületek nagysága növekedjen! Azt tapasztaljuk, hogy a feszültség csökken, tehát a kapacitás nőtt.

Távolítsuk egymástól a lemezeket! A feszültség nő, tehát a kapacitás csökkent.

Helyezzünk a lemezek közé üveglapot vagy más szigetelőlapot! A feszültség csökkent, tehát a kapacitás növekedett.

Pontos mérések és számítások szerint a síkkondenzátor kapacitása

- **egyenesen arányos a lemezek területével (A),**
- **fordítottan arányos a lemezek közötti távolsággal (d),**
- **és függ a szigetelőanyag minőségétől (ε_r):**

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d}.$$

ε_0 a légüres tér **dielektromos állandója:**

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot k} = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \frac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2}.$$

ε_r a szigetelőanyag relatív dielektromos állandója. Megmutatja, hogy hányszorosára nő a kondenzátor kapacitása, ha légüres tér helyett valamilyen szigetelőanyag tölti ki a kondenzátor belsejét. A légüres tér relatív dielektromos állandója 1. A levegőé szintén 1-nek vehető (1,0006), a kondenzátoroknál használatos más szigetelőanyagoknál általában 1 és 10 közötti érték.

A KONDENZÁTOR ENERGIÁJA*

Ha papírral megdörzsölt műanyag vonalzó vagy papírlaptól elválasztott műanyag fólia mentén mozgatunk egy glimmlámpát (közeli elektródákat tartalmazó, légritka üvegcsövet), a lámpa többször felvillan. A lámpa világításához energia szükséges.

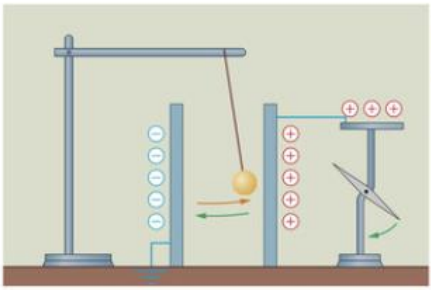


87.1. *Mi okozhatja, hogy $C_1 > C_2$?*

Végezzük el a *87.2. ábrán* látható kísérletet! Helyezzünk el egymástól néhány centiméteres távolságban párhuzamos fémlapokat úgy, hogy az egyik szigetelőállványon legyen, a másikat pedig földeljük. A szigetelt fémlemeznek adjunk valamilyen töltést, majd függesszünk a lemezek közé szigetelőfonálon alufóliából gyúrt golyót! A fonálinga először gyors, majd egyre lassúbb lengéseket végezve átszállítja a lemezek töltését a másik lemezre. A töltések kiegyenlítődése folyamán fokozatosan megszűnik az elektromos mező. A kondenzátor töltésének csökkenését elektroszkóppal is figyelhetjük.

Az elektromos mező elmozdítja a benne lévő töltéseket, munkavégzésre képes. **Az elektromos mezőnek energiája* van.** Mennyi energiával rendelkezik a feltöltött kondenzátor elektromos mezője?

A kondenzátor elektromos mezőjének energiáját megadja az a munka, amelyet a mező végezni tud a mező megszűnéséig, vagyis az egyik lemez töltéseinek a másik lemezre való átszállítása során.



87.2. Az elektromos mező munkát végez a töltéseket szállító alufólia golyócskán

Legyen kezdetben a kondenzátor egyik lemezének töltése Q, a másik lemezé $-Q$, a lemezek közötti feszültség pedig U. Ha q adagokban átvisszük a töltést az egyik lemezről a másikra, akkor csak az első kicsiny adag átvitelekor számolhatjuk a munkát a kezdeti feszültséggel a $W = q \cdot U$ összefüggés alapján. A későbbi q töltésadagok átvitelénél már kisebb a mező munkája, hiszen addig már csökkent a lemezek közötti feszültség. Mivel a kondenzátor feszültsége a lemezeken lévő töltés csökkenésével egyenletesen csökken a kezdeti U értékről zérusra, a teljes kezdeti Q töltés átszállítása során átlagosan $\frac{U}{2}$ feszültséggel számolhatunk.

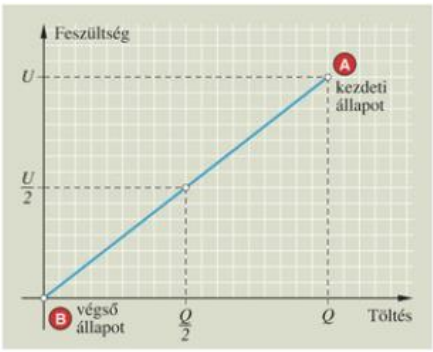
A mező munkája a teljes töltés átszállítása közben:

$$W = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot U.$$

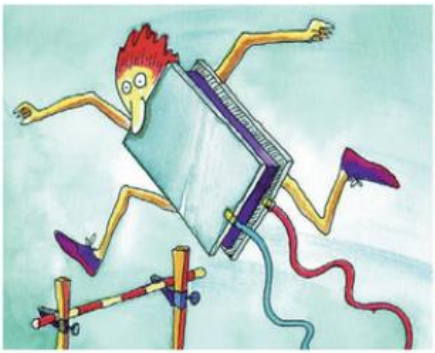
Felhasználva a $Q = C \cdot U$ összefüggést,

a kondenzátorban lévő elektromos mező energiája, azaz a kondenzátor energiája:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2.$$



88.1. A kezdeti Q töltés csökkenésével együtt a kezdeti U feszültség is csökken



88.2. A kondenzátor energiájánál fogva akár fel is tudna ugrani

MEGJEGYZÉSEK

1. A feltöltött kondenzátor energiáját a lemezek közötti homogén elektromos mező tárolja, melynek térfogata:

$$V = A \cdot d.$$

Az energiát kifejezhetjük a mező jellemzőivel is:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \cdot E^2 \cdot d^2 = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot V.$$

Az egységnyi térfogatra jutó energiát az energiasűrűséggel jellemezzük:

$$\rho_{el} = \frac{W}{V} = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2.$$

Az elektromos energiasűrűség** a térerősség négyzetével arányos.
Az energiasűrűség segítségével nem homogén elektromos mezők összes energiája is kiszámítható.

2. Az 1 F nagyon nagy kapacitásértéket jelent. A gyakorlatban előforduló kondenzátorok kapacitása pF (pikofarad), nF (nanofarad) vagy μF (mikrofarad) nagyságrendű.

3. A kondenzátorban maximálisan tárolható töltésmennyiségre a kondenzátoron feltüntetett kapacitás és maximális feszültség értékéből következtethetünk. A feltüntetettnél nagyobb feszültség esetén a szigetelőanyag elektronjai nemcsak a molekulákon belül tolódnak el, hanem ki is szakadnak a molekulákból, „átütés" következik be, a szigetelőréteg vezetővé válik. Az átütési térerősség** például levegőnél 3 $\frac{\text{kV}}{\text{mm}}$, száraz papírnál 11 $\frac{\text{kV}}{\text{mm}}$.

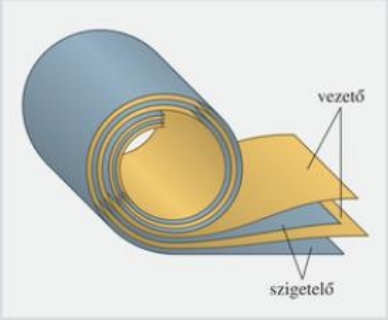
4. Az elektrotechnikában sokféle kondenzátor használatos. Eltérhetnek a kondenzátorok alakjukban (sík-, gömb- vagy hengerkondenzátorok); és különbözhetnek a szigetelőanyagban (levegő, papír, csillám, olaj stb.) is. Gyakori a papírszigeteléssel elválasztott, alufólia csíkokat tartalmazó kondenzátor, amelynél ezeket a rétegeket hengeres formában felcsévélik, majd henger vagy téglatest alakú tokban tárolják. A nagy felület és a kis lemeztávolság miatt nagy kapacitás érhető el.



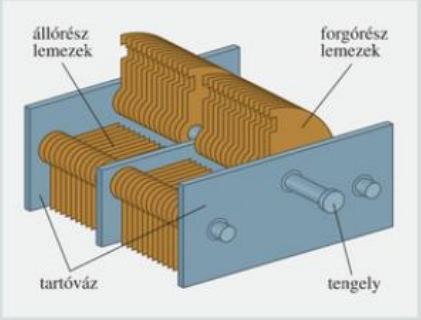
89.1. A gyakorlatban használatos kondenzátorok

Az *elektrolitikus (elektrolit) kondenzátor** különlegessége, hogy a két fegyverzet között elektrolízissel kialakított molekuláris vékonyságú oxidréteg biztosítja a szigetelést. A nagyon keskeny szigetelőréteg nagy kapacitást eredményez (több ezer μF is lehet), ugyanakkor kicsi (100 V alatti) az átütési feszültség. Az elektrolitikus kondenzátorra csak a feltüntetett polaritással szabad feszültséget kapcsolni, egyébként tönkremegy az elektrolízissel létrehozott szigetelőréteg (fel is robbanhat a kondenzátor a heves gőzfejlődés miatt!).

Elterjedt a változtatható kapacitású *forgókondenzátor**, amelynek az állórészén lévő párhuzamos fémlemezei közé fokozatosan beforgathatók a tőlük elszigetelt forgórész fémlemezei. A szembenálló lemezfelületek nagyságának változása idézi elő a kapacitás változását. Általában forgókondenzátor gombját csavarjuk, amikor a rádiókészüléken más adóállomást keresünk. (Később még visszatérünk ennek magyarázatára.)



89.2. Hengeres kondenzátor szerkezete



89.3. Forgókondenzátor

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Mondhatjuk-e egy adott kondenzátorról, hogy amikor nagyobb feszültséget kapcsolunk rá, akkor
a) nagyobb a kapacitása,
b) kisebb a kapacitása,
c) nagyobb a töltésmennyisége?

2. Mit jelent az, hogy egy kondenzátor kapacitása 2 μF?

3. Egy feltöltött kondenzátor egyik lemezét szigetelőanyaggal érintjük meg, és távolítjuk a másik lemeztől. Hogyan változik a kondenzátor töltése, kapacitása, feszültsége, térerőssége, energiája?

4. Mi a kondenzátor szerepe a vaku és a defibrillátor működésében? (Nézz utána az interneten!)

4





FELADATOK

1. Mennyi annak a kondenzátornak a kapacitása, amelyre 6 V feszültségű áramforrást kapcsolva az egyik lemezen $2 \cdot 10^{-7}$ C, a másik lemezen $-2 \cdot 10^{-7}$ C töltés jelenik meg?

2. Egy 20 nF kapacitású kondenzátor egyik lemezét földeljük, a másikra 10^{-8} C töltést viszünk. Mennyi a lemezek közötti feszültség?

3. Mennyi munkával lehetne egy 47 μF kapacitású kondenzátort 50 V feszültségűre feltölteni? Mennyi lenne ekkor a töltése?

4. Egy 10 pF kapacitású kondenzátorra 100 V feszültséget kapcsolunk.
a) Mennyi a kondenzátor töltése?
b) Mennyi a kondenzátor elektromos mezőjének energiája?
c) Mennyi töltéssel lenne a lemezek közötti feszültség 150 V?
d) Mennyi lenne a kondenzátor feszültsége, ha 1 millió elektronnal töltenénk fel?

5. Egy kondenzátoron feltüntetett maximális feszültség 63 V. A kondenzátor kapacitása 2,2 μF.
a) Legfeljebb mennyi töltés tárolható ebben a kondenzátorban?
b) Legfeljebb mennyi lehet a kondenzátor elektromos energiája?

6. Légszigetelésű kondenzátor 4 dm^2 területű lemezei egymástól 2 mm távolságra helyezkednek el. A kondenzátorra 500 V feszültséget kapcsolunk.
a) Mennyi a lemezek között a térerősség?
b) Mennyi a kondenzátor kapacitása?
c) Mekkora töltésmennyiséget tárol a kondenzátor?
d) Mennyi elektromos energiát tárol a kondenzátor?
e) Mennyi munkával tudnánk az áramforrásról lekapcsolt lemezeket 5 mm távolságra széthúzni?

6. Kondenzátorok kapcsolása (Kiegészítő anyag)

A kereskedelmi forgalomban meghatározott kapacitású és maximális feszültségű kondenzátorok találhatók. Más jellemző értékeket kaphatunk a kondenzátorok valamilyen összekapcsolásával.

A legegyszerűbben megvalósítható a párhuzamos és a soros kapcsolás.

***a)* Párhuzamos kapcsolás.** A párhuzamosan kapcsolt kondenzátorok feszültsége megegyezik (U), hiszen az A pont és a B pont potenciálkülönbsége adja mindegyik kondenzátor feszültségét. Eltérő kapacitások (C_1, C_2) esetén a két kondenzátor töltése is különbözik (Q_1, Q_2).

Az eredő kapacitást a rendszer egyik kivezetésére vitt összes töltés (Q) és a két kivezetés közötti feszültség (U) hányadosa adja:

$$C = \frac{Q}{U}.$$

A töltésmegmaradás szerint:

$$Q = Q_1 + Q_2.$$

Ezt felhasználva:

$$C = \frac{Q_1 + Q_2}{U} = \frac{Q_1}{U} + \frac{Q_2}{U} = C_1 + C_2.$$

Az eredő kapacitás megegyezik a részkapacitások összegével.

***b)* Soros kapcsolás.** A sorosan kapcsolt kondenzátorok töltése megegyezik (Q), hiszen a kondenzátorok fémesen összekötött lemezei megosztás útján kapják ellentétes előjelű töltéseiket. Ezért különböző kapacitású (C_1, C_2) kondenzátoroknál a feszültség is különböző lesz (U_1, U_2). Az egyik kivezetéstől a másik felé haladva csak a kondenzátorok lemezei között változik a potenciál, és mindig ugyanolyan módon (például A-tól B felé haladva mindkét kondenzátornál csökken a potenciál, először U_1, majd U_2 értékkel).

A két kivezetés közötti teljes potenciálkülönbség:

$$U = U_1 + U_2.$$

Az egész rendszerre tehát nagyobb maximális feszültség is kapcsolható, mint amennyi az egyes kondenzátorokon megengedett.

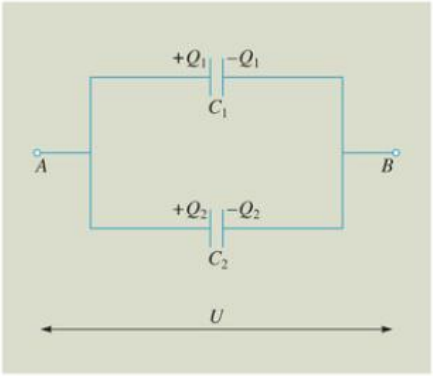
Az eredő kapacitást most is az egyik kivezetésre vitt töltés (Q) és a kivezetések közötti feszültség (U) hányadosa adja:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q}{U_1 + U_2}.$$

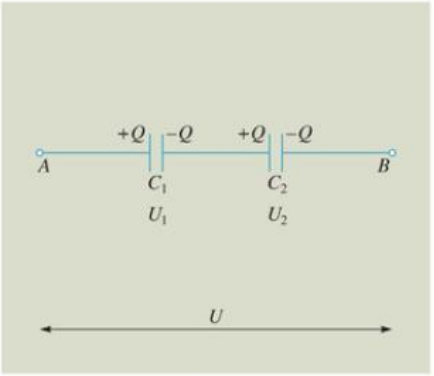
Az egyenlőség mindkét oldalának a reciproka is egyenlő:

$$\frac{1}{C} = \frac{U_1 + U_2}{Q} = \frac{U_1}{Q} + \frac{U_2}{Q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

Az eredő kapacitás reciproka megegyezik a részkapacitások reciprokainak összegével.



91.1. Kondenzátorok párhuzamos kapcsolása



91.2. Kondenzátorok soros kapcsolása

Összefoglalás

Az elektrosztatika nyugvó, elektromos állapotú testekkel és az általuk létrehozott elektromos mezőkkel foglalkozik.

A testek elektromos állapotát **elektrontöbblet** (negatív töltés) vagy **elektronhiány** (pozitív töltés) okozza. A testek elektromos kölcsönható képességének jellemzésére szolgáló fizikai mennyiség a **töltés (*Q*),** melynek mértékegysége: coulomb (*C*).

Zárt rendszerben a töltés előjeles összege állandó **(töltésmegmaradás törvénye).**

Pontszerű töltések közötti erőhatás egyenesen arányos a töltések nagyságával és fordítva arányos a távolságuk négyzetével. A **Coulomb-törvény** matematikai formában (hasonlóság a gravitációs erőtörvénnyel):

$$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}, \quad \text{ahol légüres térben: } k = 9 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2}{\mathrm{C}^2}.$$

A testek elektromos kölcsönhatását az általuk létrehozott elektromos mező közvetíti. **A mező nem atomi felépítésű anyag.** Az elektromos mezőt jellemző fizikai mennyiség az **elektromos térerősség (*E*),** amelyet a mező próbatöltésre (*q*) gyakorolt erőhatása (*F*) alapján értelmezünk:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad \text{mértékegysége: } \frac{\text{newton (N)}}{\text{coulomb (C)}} = \frac{\text{volt (V)}}{\text{méter (m)}}.$$

A mező egy adott pontjában az egységnyi pozitív próbatöltésre ható erő számértékre és irányra is meghatározza a térerősséget. A mező térerősségét **erővonalakkal** is szemléltethetjük. Az erővonalak sűrűsége a térerősség nagyságát, az erővonalak érintője a térerősség irányát mutatja.

Az elektromos mezőt két pont között jellemzi a **feszültég (*U*),** melyet a mező próbatöltésen (*q*) végzett munkája (*W*) alapján értelmezünk:

$$U = \frac{W}{q}, \quad \text{mértékegysége: volt (V)} = \frac{\text{joule (J)}}{\text{coulomb (C)}}.$$

A mező egységnyi pozitív próbatöltésen végzett munkája számértékre és előjelesen is megadja a feszültséget. A sztatikus elektromos mező két pontja közötti **feszültség független a két pont közötti útvonaltól.**

Valamely közös ponthoz viszonyított feszültség neve: **potenciál. Feszültség = potenciálkülönbség.**

Minden töltés a másiktól függetlenül létrehozza a maga elektromos mezőjét, saját járulékát a térerősséghez és a potenciálhoz **(szuperpozíció elve).**

Sztatikus állapotban a többlettöltés a vezető felületén helyezkedik el, és a csúcsokban sűrűsödik. A vezető pontjai között nincsen feszültség. A térerősség a vezető belsejében zérus, a vezető felületén pedig merőleges a felületre.

A **kondenzátor** elektromos töltések felhalmozására szolgáló eszköz. Jellemzője a **kapacitás (C):**

$$C = \frac{Q}{U}, \quad \text{mértékegysége: farad (F)} = \frac{\text{coulomb (C)}}{\text{volt (V)}}.$$

A kapacitás számértéke megadja, hogy a kondenzátor 1 V feszültség mellett mennyi töltés befogadására képes.

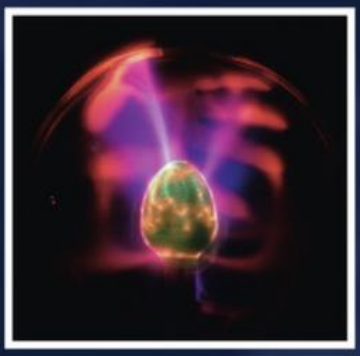
A síkkondenzátor kapacitása függ a lemezek területétől, egymástól mért távolságuktól és a szigetelőanyag minőségétől.

A síkkondenzátor elektromos mezőjének **energiája:**

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2.$$

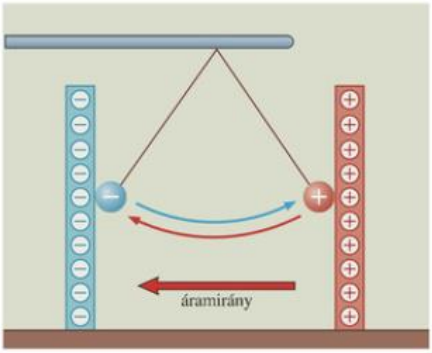
III. fejezet

AZ ELEKTROMOS ÁRAM, VEZETÉSI JELENSÉGEK



1. Egyenáram. Áramköri alaptörvények

1.1. Emlékeztető



94.1. Az áramirány a pozitív töltések mozgási iránya, vagy a negatív töltések mozgásával ellentétes irány

A *94.1. ábrán* bemutatott kísérlet giling-galang játékában az alufólia golyócska a negatív lemez töltéseit a pozitív lemezre, a pozitív lemez töltéseit a negatív lemezre szállítja. A lemezek fokozatosan elveszítik töltésüket.

Hasonló eredményt érünk el, csak rövidebb idő alatt, ha a két lemezt fémes vezetővel kötjük össze. Ekkor a fémes vezető szabad elektronjai áramlanak a negatív lemez felől a pozitív lemez felé. Mindkét esetben elektromos áramról beszélünk.

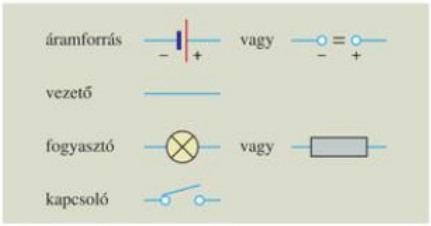
Az elektromos töltéshordozók meghatározott irányú rendezett mozgását **elektromos áramnak** nevezzük, és azt az **áramerősséggel** (I) jellemezzük.

Az elektromos áram **irányán** – egy régi megállapodás alapján – **a pozitív töltéshordozók áramlási irányát** (vagy a negatív töltéshordozók áramlásával ellentétes irányt) értjük.

Erősebb az elektromos áram, ha az áramlási keresztmetszeten

- **ugyanannyi idő alatt több az átáramlott részecskék együttes töltése, vagy**
- **ugyanannyi össztöltésű részecske kevesebb idő alatt áramlik át.**

Állandó elektromos áramot **áramkörrel** hozunk létre, amelynek fő részei: **az áramforrás, a vezető és a fogyasztó.**



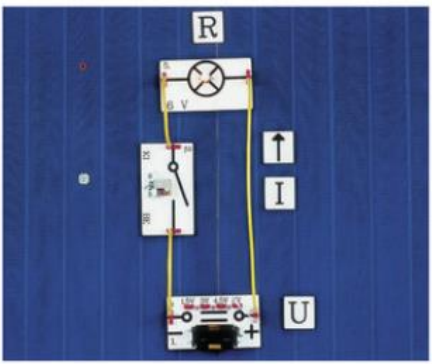
94.2. Egyszerű áramköri elemek

Kövessük az egyszerű áramkörben végbemenő folyamatokat az energiaváltozások és kölcsönhatások szempontjából!

Az **áramforrás** negatív és pozitív pólusán lévő többlettöltésekre elektromos mezőt hoznak létre, amely a vezetőben és az izzóban lévő szabad elektronokat áramlásra kényszeríti a negatív pólustól az izzón át a pozitív pólus felé. Az áramforrás által létrehozott elektromos mezőt a **feszültséggel** (U) jellemezzük.

A vezető belsejében van elektromos mező, amely felgyorsítja a fémes vezető szabad elektronjait (mező-elektron kölcsönhatás).

Az elektronok azonban a fémrács helyhez kötött ionjaival ütközve lelassulnak, miközben azokat élénkebb rezgésbe hozzák (elektron-rácsion kölcsönhatás).



94.3. Egyszerű áramkör rajzjelekkel és a jellemző mennyiségekkel

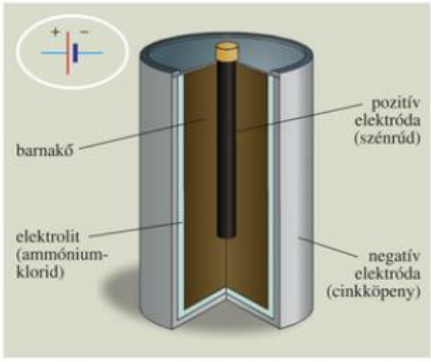
Az élénkebb rácsion* rezgéseket tartalmazó, vagyis felmelegedett vezető hőt ad le környezetének (vezető-környezet kölcsönhatás).

A vezetőt – energiaátalakító szerepének hangsúlyozására – esetenként **fogyasztónak** is nevezzük. Töltésáramlást akadályozó szerepét az **ellenállás** (R) jellemzi.

Ha az áramkörben csak az áramforráson kívül áramlanának a negatív töltéshordozók a negatív pólustól a pozitív pólus felé, akkor a töltéskülönbség gyorsan kiegyenlítődne, és az elektromos áram megszűnne. Az izzó állandó fényereje azonban állandó erősségű áramra utal. Ez csak úgy magyarázható, hogy a negatív töltéshordozók áramlása az áramforráson belül is folytatódik. Itt már a pozitív pólustól a negatív pólus felé, vagyis az elektromos mező erőhatásával szemben áramlanak a töltéshordozók.

Mi szolgáltatja azt az energiát, ami a töltéshordozókat az áramforrás belsejében az elektromos mező ellenében mozgatja? Mi biztosítja a töltésszétválasztást és az elektromos mező fenntartását? A válasz: az áramforrásban lévő valamilyen belső energiaforrás. Például galvánelemnél ez kémiai energiaforrást jelent. Az elhasznált galvánelem elszíneződött, lyukas cinkhengere szemmel láthatóan jelzi az elem korábbi kémiai energiájának csökkenését. Elektromos generátoroknál a forgórészt meghajtó gőz vagy víz szolgáltatja ezt az energiát.

Az áramkörben körbeáramlanak a töltéshordozók. Az áramforráson kívül az elektromos mező mozgatja a töltéshordozókat, míg az áramforráson belül az elektromos mező erőhatásával szemben, az áramforrásban tárolt valamilyen fajta belső energia felhasználásával mozognak tovább a töltéshordozó részecskék.

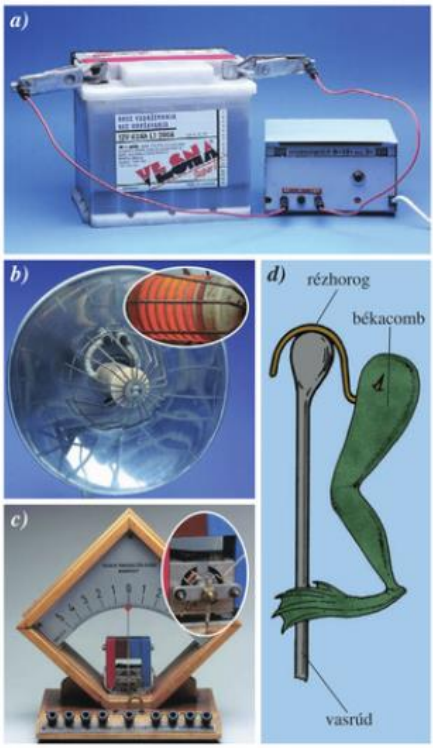


95.1. A gyakorlatban elterjedt galvánelem (rúdelem) felépítése és rajzjele

Az áramkörben meghatározott irányú energiaátalakulás megy végbe:

áramforrás belső energiája ⇒ elektromos mező energiája ⇒ töltéshordozók mozgási energiája ⇒ vezető anyagában a rendezetlen mozgás energiája (belső energia) ⇒ környezet energiája

Az elektromos áramot általában **hő-, fény-, kémiai, mágneses vagy élettani hatásai** alapján észleljük.

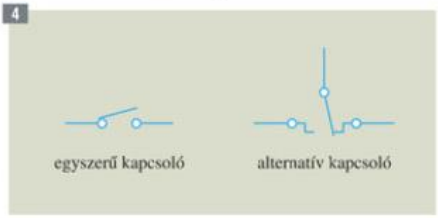


95.2. *Az elektromos áram milyen hatásait mutatják a különböző képek?*

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Mi a különbség egy feltöltött kondenzátor és egy áramforrás között?
2. Mi a különbség vezeték és fogyasztó között? Válhat-e a vezeték is fogyasztóvá?
3. A síelőket drótkötélpálya szállítja fel a hegytetőre. Onnan havas pályán lesiklanak a völgybe. Ezután ismét drótkötélpályára szállnak, majd ismét lesiklanak és így tovább. Milyen hasonlóságokat találunk a síelés és egy elektromos áramkör között?
4. Mi a szerepe az egyszerű kapcsolónak, és milyen célt szolgál a váltókapcsoló (alternatív kapcsoló)?
5. Mi történik, ha egy kapcsoló zárlatos?

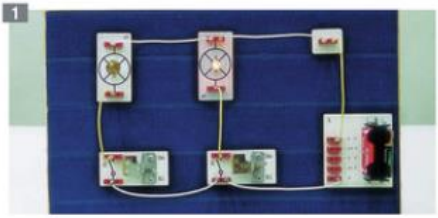
4



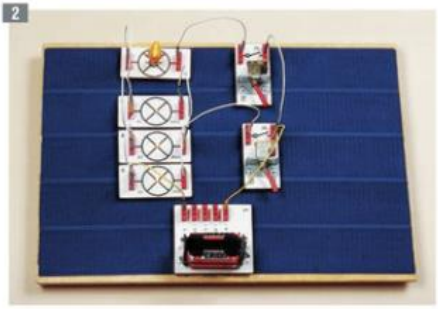
FELADATOK

1. Állítsunk össze olyan áramkört, amelyben két izzót két kapcsolóval külön-külön tudunk be- és kikapcsolni (lakás világításának modellje)!
2. Állítsunk össze olyan áramkört, amelyben egy erősebb izzót egy kapcsolóval, 2-3 kisebb izzót egyszerre egy másik kapcsolóval tudunk be- és kikapcsolni (csillárkapcsolás modellje)!
3. A harmadik ábrán a lépcsőházi világítást modellező áramkör kapcsolási rajza látható. Magyarázzuk meg, hogy hogyan működik az áramkör, és a kapcsolás összeállításával ellenőrizzük megállapításainkat!
4. Létesítsünk olyan kapcsolást, amelyben az izzó csak akkor világít, ha az áramkörben lévő *A* és *B* kapcsolót zárjuk (ÉS-áramkör)!
5. Létesítsünk olyan áramkört, amelyben az izzó akkor világít, ha az áramkörben lévő *A* vagy *B* kapcsolót zárjuk (VAGY-áramkör)!
6. Nézzünk utána, hogy a gyakorlatban hol alkalmaznak ÉS- és VAGY-áramkört!
7. Ismételjük át kémiai tanulmányaink alapján a galvánelemek működését!
8. Keressünk irodalmat, és olvassunk a galvánelemek felfedezéséről (Galvani, Volta)!

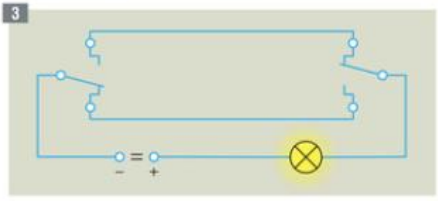
1



2



3



1.2. Az áramköri alapmennyiségek. Ohm törvénye



97.1. *André Marie Ampère* (1775–1836); az elektrodinamika, az elektromágnesség egyik megalapozója

A továbbiakban fémes vezető anyagokban folyó elektromos árammal foglalkozunk, amelynél az áramlás feltételei változatlanok. Ilyenkor a vezető keresztmetszetén átáramlott töltés (Q) egyenesen arányos az idővel (t). A kettő hányadosa állandó, és alkalmas az elektromos áram erősségének jellemzésére.

A hányados neve: áramerősség. Jele: *I*.

$$I = \frac{Q}{t}.$$

Az áramerősség mértékegysége *Ampère* francia fizikus tiszteletére: 1 A (amper).

$$1\ \mathrm{A} = 1\ \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{s}}.$$

1 amper az áramerősség, ha a vezető keresztmetszetén 1 másodperc alatt 1 coulomb töltés áramlik át.

Időben állandó áramerősség esetén **egyenáramról** (stacionárius áramról) beszélünk.

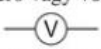
Az áramerősség-mérő vagy más néven **ampermérő** rajzjele:



Az ampermérő a rajta átfolyó áram erősségét mutatja. Ha egy fogyasztó áramerősségét akarjuk mérni, akkor úgy kell az ampermérőt az áramkörbe kapcsolni, hogy a rajta átfolyó áram erőssége megegyezzen a fogyasztó áramerősségével. Ez az ampermérő és a fogyasztó soros kapcsolásával érhető el.

Az elektromos áramot létrehozó elektromos mezőt két pont között az U feszültséggel jellemezzük.

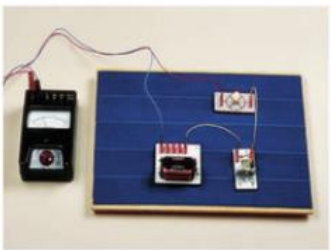
A feszültségmérő vagy **voltmérő** rajzjele:

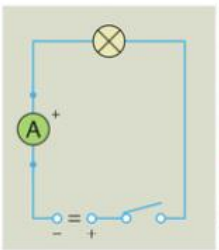


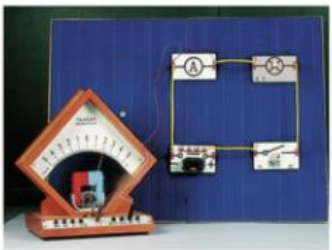
A feszültségmérő a rajta lévő (mondjuk így is: rajta eső) feszültséget mutatja. Egy fogyasztó feszültségének méréséhez tehát úgy kell kapcsolnunk a voltmérőt, hogy a rajta eső feszültség megegyezzen a fogyasztó feszültségével. Ez a két áramköri elem párhuzamos kapcsolásával valósul meg

Az áramerősség- és feszültségmérő műszerek hasonló elvi felépítésűek, legtöbbször mindkét mennyiség mérésére alkalmasak. Az áram hatásai alapján, többségében a mágneses hatás alapján működnek.

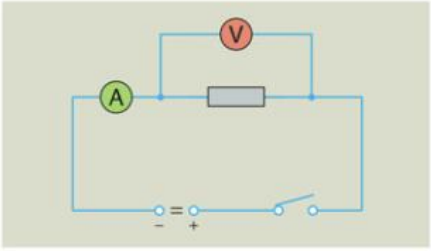
Ma még gyakran találkozunk – az iskolai szemléltetésnél is – mutatóval jelző, úgynevezett **analóg** műszerekkel. Ezeket azonban mindinkább felváltják az egyszerűbb, biztonságosabb mérési lehetőséget nyújtó számkijelzős, más néven



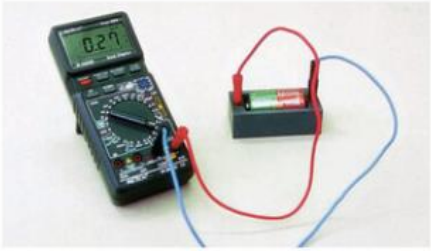




97.2. *Hogyan kapcsoljuk az ampermérőt a fogyasztóhoz?* (Elvi rajz és kísérleti megvalósítások.)



98.1. Fogyasztó feszültségének és áramerősségének egyidejű mérése



98.3. Áramforrás feszültségének mérése digitális multiméterrel

digitális mérőműszerek. Rendszerint többféle elektromos mennyiség mérésére is alkalmasak, ilyenkor **multiméternek** nevezzük őket.

Hogyan függ össze egy adott fogyasztón a feszültség és az áramerősség? Az erre vonatkozó törvényszerűséget *Ohm* német fizikus ismerte fel a 19. század elején.

Kapcsoljunk változtatható feszültségű áramforrást hosszabb, vékony fémes vezetőre (például kantálhuzalra)! Növeljük és mérjük a vezetőre jutó feszültséget, valamint a vezetőn átfolyó áramerősséget! Foglaljuk táblázatba a feszültség (U) és az áramerősség (I) összetartozó értékeit! A táblázat alapján készítsünk grafikont a két mennyiség kapcsolatáról! Végezzük el az előbbi mérést egy másik vezetőn (fogyasztón) is!

Pontos méréssel a feszültség-áramerősség grafikon origón átmenő egyenesnek adódik. Különböző fogyasztókra eltérő meredekségű egyenest kapunk.

Egy vezetőn átfolyó áram erőssége (I) egyenesen arányos a vezetőn eső feszültséggel (U). Ez Ohm törvénye: $I \sim U$.



98.2. *Georg Simon Ohm* (1787–1854); ő vizsgálta először a vezetők ellenállására vonatkozó törvényeket

Egyenesen arányos mennyiségek hányadosa állandó, ezért az $\frac{U}{I}$ hányados jellemző a vezetőre.

Ez a hányados akkor nagyobb, ha
- ugyanakkora feszültség esetén kisebb áramerősség jön létre, vagy
- ugyanakkora áramerősség létrehozásához nagyobb feszültség szükséges.

Az $\frac{U}{I}$ hányados tehát a vezető töltésáramlást akadályozó hatásának mennyiségi jellemzője.

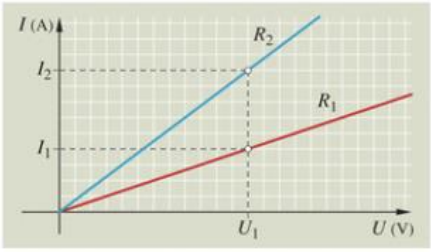
A hányados neve: ellenállás. Betűjele: R.

$$R = \frac{U}{I}.$$

Az ellenállás mértékegysége *Ohm* német fizikus tiszteletére: 1 Ω (ohm, Ω = görög nagy omega).

1 Ω az ellenállása annak a vezetőnek, amelyen 1 V feszültség hatására 1 A erősségű áram folyik.

$$1\,\Omega = 1\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}}.$$



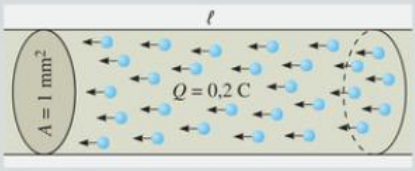
98.4. *Milyen kapcsolat áll fenn a feszültség és az áramerősség között? Melyik ellenállás a nagyobb?*

MEGJEGYZÉSEK

1. Az „ellenállás” szót az elektromosságtanban többféle értelemben is használják. Jelentheti a fogyasztót, tehát egy alkatrészt, amelyben az elektromos mező energiája fogy, és átalakul másfajta energiává (például a környezet belső energiájává). Ellenállásnak nevezzük az $R = \frac{U}{I}$ összefüggéssel értelmezett fizikai mennyiséget is, amely a vezető töltésáramlást akadályozó tulajdonságának mennyiségi jellemzésére szolgál.

2. Egy vezetőre az $\frac{I}{U}$ hányados is állandó, jellemző mennyiség. Ezt **vezetőképességnek**** nevezik. Jele: G. $G = \frac{I}{U}$. Mértékegysége: 1 S (siemens)** $= 1\,\frac{\text{A}}{\text{V}}$.

3. Becsüljük meg az elektronok áramlási sebességét az áramkörben! Egy zseblámpaizzó üzemi áramerőssége 0,2 A. Az izzót a zseblámpateleppel összekötő rézvezeték legyen 1 mm^2 keresztmetszetű. Határozzuk meg, hogy milyen hosszú vezetékrészben lévő szabad elektronok haladnak át a vezető egy kiszemelt keresztmetszetén 1 s alatt!



99.1. A szabad elektronok 1 s alatt megtett útja

A vezetékszakasz szabad elektronjainak töltése 0,2 C.

Réznél atomonként 2 szabad elektronnal, azaz $3{,}2 \cdot 10^{-19}$ C töltéssel számolva, a vezetékszakasz atomjainak száma:

$$N = \frac{0{,}2\ \text{C}}{3{,}2 \cdot 10^{-19}\ \text{C}} = 6{,}25 \cdot 10^{17}.$$

A mólok száma:

$$n = \frac{6{,}25 \cdot 10^{17}}{6 \cdot 10^{23}} = 1{,}04 \cdot 10^{-6}\,\text{mol}.$$

A vezetőszakasz tömege:

$$m = n \cdot M = 1{,}04 \cdot 10^{-6}\,\text{mol} \cdot 63{,}5 \cdot 10^{-3}\,\frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 6{,}61 \cdot 10^{-8}\,\text{kg}.$$

A térfogat:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{6{,}61 \cdot 10^{-8}\,\text{kg}}{8920\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 7{,}4 \cdot 10^{-12}\,\text{m}^3 = 7{,}4 \cdot 10^{-3}\,\text{mm}^3.$$

A hossz:

$$\ell = \frac{V}{A} = \frac{7{,}4 \cdot 10^{-3}\,\text{mm}^3}{1\ \text{mm}^2} = 7{,}4 \cdot 10^{-3}\,\text{mm}.$$

Tehát az áramlási sebesség:

$$v = \frac{\ell}{t} = \frac{7{,}4 \cdot 10^{-3}\,\text{mm}}{1\ \text{s}} = 7{,}4 \cdot 10^{-3}\,\frac{\text{mm}}{\text{s}}.$$

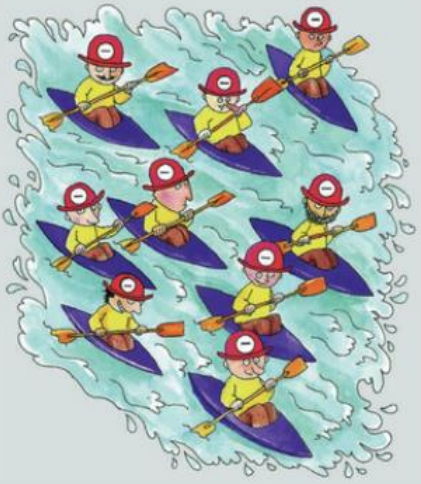
Ha például az izzót a zseblámpateleppel összekötő vezeték 20 cm hosszúságú, akkor az az időtartam, amíg a telep negatív pólusán kilépő elektronok az izzót elérik:

$$t = \frac{s}{v} = \frac{200\ \text{mm}}{7{,}4 \cdot 10^{-3}\,\frac{\text{mm}}{\text{s}}} = 27000\ \text{s} = 7{,}5\ \text{óra}.$$

Hogyan értelmezhető a 3. feladat eredménye? Egy gyors hegyi pataknál a vízáram erőssége megegyezhet egy lassan hömpölygő széles folyóéval. Becslésünk eredménye azt mutatja, hogy az elektronok áramlása az utóbbira emlékeztet inkább.

Hogyan egyeztethető össze az elektronok rendkívül lassú áramlása azzal a tapasztalattal, hogy az áramkör zárásakor azonnal felvillan az izzó?

A szabad elektronok az áramkör minden részén, tehát az izzóban is jelen vannak. Nem az elektronoknak kell tehát gyorsan az áramforrástól az izzóhoz érniük, hanem az elektronokat elindító hatásnak, vagyis az elektromos mezőnek. Az utóbbi pedig valóban nagyon gyorsan (fénysebességgel) terjed.



GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Mit jelent az, hogy

a) egy vezetőn az áramerősség 50 mA?

b) egy vezető ellenállása 2 kΩ?

2. Az *A* vezető ellenállása kétszerese a *B* vezető ellenállásának: $R_A = 2 \cdot R_B$. Mit mondhatunk a két vezetőnél

a) a feszültségekről, ha ugyanakkora a rajtuk átfolyó áram erőssége;

b) az áramerősségről, ha mindkettőn ugyanannyi a feszültség?

3. Miért lehet ugyanazt a műszert áramerősség és feszültség mérésére is használni?

4. Az elektrosztatikában tanultak szerint fémes vezetőnél

a) a töltések a felületen helyezkednek el,

b) a vezető belsejében a térerősség zérus,

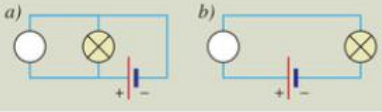
c) bármely két pont között a feszültség zérus.

Érvényesek-e ezek a megállapítások az egyenáramú áramkörben lévő vezetőkre is?

5. Lehet-e két vezető közül abban a vezetőben nagyobb az áramerősség, amelyik kevesebb áramlásra képes szabad elektront tartalmaz?

6. Állapítsuk meg, hogy ampermérőt vagy voltmérőt tartalmaz a kapcsolási rajz!

6



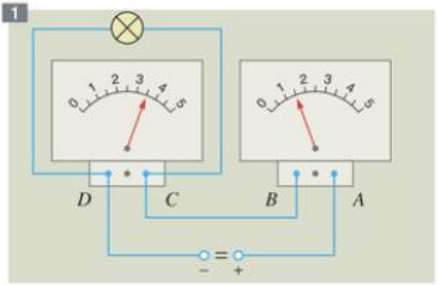
FELADATOK

1. Az ábrán egy ellenállásmérés szerelési rajza látható.

a) Készítsünk az összeállításról elvi kapcsolási rajzot! Jelöljük ezen, hogy melyik műszer az ampermérő, illetve voltmérő! Tüntessük fel azt is, hogy a műszereknek melyik a + jelű bemenete!

b) Mennyi a fogyasztó ellenállása, ha a voltmérő 10 V, az ampermérő 0,5 A méréshatárú?

1



MEGOLDÁS:

a) AB = ampermérő; CD = voltmérő; „+” jelű bemenetek: A és C.
(Az elvi kapcsolási rajz a fogyasztó és a voltmérő felcserélésével is helyes maradna.)

b) A méréshatár a mutató végkitéréséhez tartozó feszültséget, ill. áramerősséget jelenti. Mivel a voltmérőnél 5 skálaértéknek 10 V felel meg, ezért 3,5 skálaértéknek 7 V felel meg. Az ampermérőnél az 5 skálajelzés 0,5 A áramerősséget jelent, ezért 1,5 skálajelzés 0,15 A áramerősséget jelent.

Eszerint a mért értékek: $U = 7\ \text{V}$; $I = 0{,}15\ \text{A}$.

A fogyasztó ellenállása: $R = \dfrac{U}{I} = \dfrac{7\ \text{V}}{0{,}15\ \text{A}} = \mathbf{46{,}7\ \Omega}$.

2. Milyen az áramirány és mekkora az áramerősség annál a vezetőnél, amelynek keresztmetszetén percenként 1 millió elektron áramlik át függőlegesen felfelé?

3. A táblázat egy vezetőre kapcsolt feszültség- és a létrejövő áramerősség-értékeket tartalmazza.

U (V)	0,5	1	1,5	3	4,5	6
I (mA)	10					

a) Egészítsük ki a táblázatot!

b) Ábrázoljuk az áramerősséget a feszültség függvényében!

c) Mennyi a vezető ellenállása?

4. Egy zseblámpaizzó ellenállása 17,5 Ω, áramerőssége 200 mA. Mekkora az izzószál két végpontja közötti feszültség?

5. Egy villanyvasalón 230 V-os feszültség esetén 2,7 A erősségű áram folyik.

a) Mennyi idő alatt áramlik át rajta 1 C töltés?

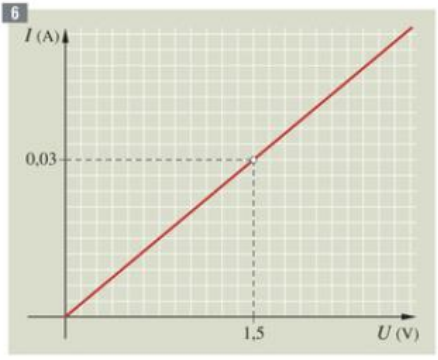
b) Mennyi a fűtőszál ellenállása?

6. A grafikon egy vezetőn átfolyó áram erősségét mutatja a feszültség függvényében.

a) Mennyi a vezető ellenállása?

b) Mekkora áram folyna a vezetőn 10 V-os feszültség esetén?

6



7. Keressünk irodalmat, és tájékozódjunk Ohm és Ampère életéről, munkásságáról!

1.3. Mitől függ a fémes vezető ellenállása?

Végezzük el a következő kísérleteket! (*102.1. ábra*) Állandó feszültségen növeljük egy áramkörbe kapcsolt vékony vezetőhuzal (például kantálhuzal) hosszát 2-szeresére, 3-szorosára! Azt tapasztaljuk, hogy az áramerősség 2-szer, 3-szor kisebb, az ellenállás tehát 2-szer, 3-szor nagyobb lesz.

Növeljük állandó feszültségen az áramkörbe kapcsolt vezetőhuzal keresztmetszetét 2-szeresére, 3-szorosára! Megfigyelhetjük, hogy az áramerősség is 2-szeresére, 3-szorosára növekedett, tehát az ellenállás 2-szer, 3-szor kisebb lett.

Változatlan feszültség mellett helyettesítsük a vezetőhuzalt ugyanolyan hosszúságú és keresztmetszetű, de más anyagi minőségű (például réz) vezetőhuzallal! Az árammérőt állítsuk legnagyobb méréshatárra, majd zárjuk egy pillanatra az áramkört! A megváltozott áramerősség a korábbitól eltérő ellenállásra utal.

Mérések szerint a vezető ellenállása (R)
- **egyenesen arányos a vezető hosszával (ℓ),**
- **fordítottan arányos a vezető keresztmetszetével (A), és**
- **függ a vezető anyagi minőségétől.**

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{A},$$

ahol ρ a vezető anyagára jellemző arányossági tényező, amelynek neve: fajlagos ellenállás.

A fajlagos ellenállás SI-mértékegysége: $\Omega \cdot \mathrm{m}$. A gyakorlatban azonban sokszor használnak egy másik mértékegységet is: $\Omega \cdot \frac{\mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}$. Az utóbbi számértéke megadja, hogy 1 m hosszú, 1 mm^2 keresztmetszetű vezetőnek hány Ω az ellenállása.

A gyakorlatban legelterjedtebb vezetőanyagok (réz, alumínium) fajlagos ellenállása:

$$\rho_{\mathrm{Cu}} = 0{,}0178\ \Omega \cdot \frac{\mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}} = 0{,}0178 \cdot 10^{-6}\ \Omega \cdot \mathrm{m},$$

$$\rho_{\mathrm{Al}} = 0{,}027\ \Omega \cdot \frac{\mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}} = 0{,}027 \cdot 10^{-6}\ \Omega \cdot \mathrm{m}.$$

Ha az állandó feszültségű áramforrás áramkörébe kapcsolt vezetőhuzalt hevítjük, az áramerősség jelentősen csökken, az ellenállás tehát növekszik. Az ellenállás változása a fajlagos ellenállás változásával függ össze, a hőtágulás szerepe elhanyagolható.

Ellenállásméréssel meggyőződhetünk róla, hogy egy izzólámpa üzemi ellenállása többszöröse lehet a hidegellenállásnak.

A fémes vezető ellenállása függ még a vezető hőmérsékletétől is, a hőmérséklet növelésekor nő a fémes vezető ellenállása.

Adjunk magyarázatot a vezető ellenállását befolyásoló tényezőkre a fémes vezetők áramvezetésére vonatkozó modellünk segítségével!

Az elektromos ellenállás definíciója alapján akkor nagyobb az ellenállás, ha ugyanakkora feszültség mellett kisebb áramerősség jön létre.

Rögzítsük gondolatban a feszültség értékét, és nézzük, hogy mitől változhat az áramerősség!
- Hosszabb vezetőben ugyanakkora feszültség kisebb térerősséget eredményez ($U = E \cdot \ell$), és ezért kisebb erő hat a szabad elektronokra ($F = E \cdot Q$). Így a vezető anyagának változatlan fékező hatása mellett a gyengébb elektromos mező kisebb elektronáramlási sebességet, tehát kisebb áramerősséget hoz létre.
- Nagyobb keresztmetszet (és változatlan hossz) esetén ugyanakkora térerősség gyorsítja az elektronokat, de szélesebb tartományban. Ezért



102.1. *Miből látszik, hogy az ellenállás a hosszal egyenesen, a keresztmetszettel fordítottan arányos?*

időegységenként több elektron halad át a vezető keresztmetszetén.
- Az anyagi minőséggel változik a vezetőben az áramlásra képes elektronok száma, valamint (az eltérő anyagszerkezet folytán) a vezető töltésáramlást akadályozó tulajdonsága is.
- Magasabb hőmérsékleten a fémkristály kötött részecskéinek erőteljesebb rezgése nagyobb akadályt jelent az áramló elektronok számára.

Gondolatmenetünkből látható, hogy az $R = \frac{U}{I}$ összefüggéssel értelmezett elektromos ellenállás kétféle módon is mutatkozhat nagyobbnak, ha
- nagyobb a vezető töltésáramlást akadályozó hatása, vagy
- ha kisebb a vezetőben a töltésáramlást keltő hatás (gyengébb elektromos mező, kevesebb szabad töltéshordozó).

MEGJEGYZÉSEK

1. A hőmérséklet-változással járó ellenállás-változást a következő összefüggéssel számolhatjuk: $\Delta R = \alpha \cdot R_0 \cdot \Delta T$, ahol R_0 a kezdeti ellenállás, ΔT a hőmérséklet-változás, α az anyagi minőségre jellemző *hőfoktényező***, melynek mértékegysége $\frac{1}{°C}$. Számértéke megadja, hogy az 1 °C hőmérséklet-változásnál bekövetkező ellenállás-változás hányad része az eredeti ellenállásnak. A fémes vezetők hőfoktényezője $10^{-3}–10^{-5}$ nagyságrendű. Tehát 1 °C-os hőmérséklet-változás az eredeti ellenállás ezredével, százezredével való megváltozását eredményezi. Ezt a számításainkban általában elhanyagoljuk, csak nagyobb hőmérséklet-változásoknál vesszük figyelembe. A hőfoktényezőt általában 20 °C-os kezdeti ellenálláshoz adják meg (α_{20}).
2. Ha változik a vezető hőmérséklete, változik az ellenállása is, tehát nem érvényes rá Ohm törvénye. A feszültség növelésével egyre jelentősebb az áram hőhatása, és így egyre nagyobb eltérések mutatkoznak az Ohm-törvénytől. Ohm törvénye változatlan vezetési tulajdonságok mellett teljesül a vezetőre. A gyakorlatban csak akkora feszültségig alkalmazhatjuk, amíg az áram hőhatása elhanyagolható mértékű.
3. Az áramkörökben a fogyasztót az áramforrással viszonylag nagy keresztmetszetű és kis fajlagos ellenállású réz- vagy alumíniumvezeték köti össze. A vezeték ellenállása ezért rendszerint több nagyságrenddel kisebb a fogyasztó ellenállásánál. Ilyenkor a vezeték ellenállását elhanyagolhatónak (zérusnak) tekintjük. Nagyon kis ellenállású fogyasztó esetén viszont nem engedhető meg ez az elhanyagolás.
4. Áramkörök megfelelő áramerősségeinek beállításához **huzal-** vagy **rétegellenállásokat** gyártanak. Ha egy áramkörben állandó feszültség mellett különböző áramerősségekre van szükség, akkor ezt **változtatható ellenállásokkal** biztosítják.

   Ezek rajzjele:  vagy . A rajzjelen a nyíl egy érintkező csúszkát jelent, amelynek elmozgatásával (elforgatásával) változik a vezető áramkörbe kapcsolódó részének a hossza.



103.1. Huzal- és rétegellenállások



103.2. Tolóellenállás



103.3. Változtatható ellenállás forgatható csúszkával

5. A fémek hőmérséklet-csökkenésével együtt jár a fokozatos ellenállás-csökkenés. Ettől lényegesen eltérő jelenség, hogy hűtés során bizonyos anyagok ellenállása hirtelen megszűnik, zérusra csökken. Ez a **szupravezetés****. Megfigyelték például, hogy a szupravezető gyűrűben elindított áram erőssége (áramforrás nélkül) egy év alatt sem csökkent. A szupravezetést először *Heike Kamerlingh Onnes* (1853–1926), Nobel-díjas holland fizikus figyelte meg 1911-ben. Hosszú ideig csak az abszolút zérus ponthoz közeli hőmérsékleten sikerült szupravezetést létrehozni, de az utóbbi évtizedekben jelentős eredményeket értek el magasabb hőmérsékletű anyagokkal is. A szupravezetésben ígéretes technikai alkalmazási lehetőségek rejlenek (veszteség nélküli energiaátvitel, erős mágneses mezők létrehozása stb.). A jelenségre csak a modern fizika (kvantummechanika) ad magyarázatot. Keressünk az interneten a szupravezetést és annak alkalmazását bemutató filmeket, képeket, cikkeket!

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Válaszoljunk az alábbi kérdésekre!

a) Mit olvashatunk ki a $\rho_{\text{ezüst}} = 0{,}016\ \Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$ és $\rho_{\text{konstantán}} = 0{,}4 \cdot 10^{-6}\ \Omega \cdot \text{m}$ fajlagos ellenállás értékekből?

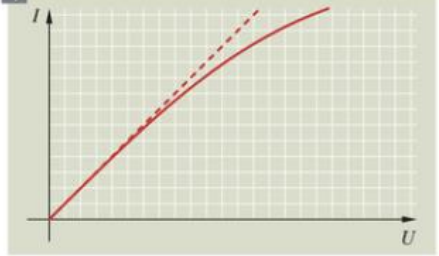
b) Az ezüst vagy a konstantán vezeti jobban az elektromos áramot?

2. Higannyal töltött gumicsövet megnyújtunk. Miért és hogyan változik a Hg ellenállása?

3. Hogyan függ a vezető ellenállása a vezető átmérőjétől?

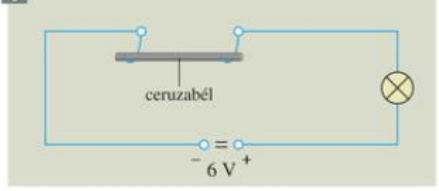
4. Az ábra egy izzólámpa áramerősség-feszültség grafikonját mutatja. Hogyan magyarázható az Ohm-törvénytől való eltérés?

4



5. Zárjuk egy izzó áramkörét rögzített fémtartókra (például krokodilcsipeszre) fektetett ceruzabélen keresztül! Ha a ceruzabelet ujjunkkal óvatosan megnyomjuk, az izzó fényereje nő. Ha az izzót fejhallgatóra cseréljük, és a ceruzabélre rábeszélünk, a fejhallgatóban hallható a hangunk. Hogyan magyarázzuk ezeket a kísérleti tapasztalatokat?

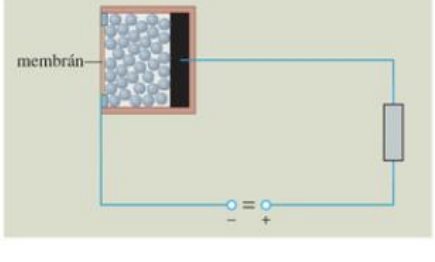
5



6. A szénmikrofon két vezetőfelület között lazán érintkező grafitszemcséket tartalmaz. Hogyan tudja a szénmikrofon a felületét (a rugalmas membránt) érő hangrezgéseket megfelelő áramingadozásokká alakítani?

7. Egy ellenálláshuzalt 6 egyenlő részre vágunk, majd a darabokat egymás mellé helyezve, egy kötegbe fogjuk, és a végeken összeforrasztjuk. Hasonlítsuk össze a köteg és az eredeti huzal ellenállását!

6



FELADATOK

1. 0,2 mm átmérőjű rézvezetőből olyan tekercset akarunk készíteni, amelyen 1,5 V feszültségű áramforrással 50 mA erősségű áramot hozhatunk létre. Milyen hosszú rézvezetőre van szükségünk?

MEGOLDÁS:

$U = 1{,}5\ \text{V}$

$I = 50\ \text{mA} = 0{,}05\ \text{A}$

$d = 0{,}2\ \text{mm} = 2 \cdot 10^{-4}\ \text{m}$

$\rho = 1{,}78 \cdot 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m}$

$\ell = ?$

A vezető ellenállása:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{1{,}5\ \text{V}}{0{,}05\ \text{A}} = 30\ \Omega.$$

A vezető hosszát az ellenállás kiszámítási képletének segítségével kapjuk:

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{A} = \rho \cdot \frac{\ell}{\left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot \rho \cdot \ell}{d^2 \cdot \pi}.$$

Ebből

$$\ell = \frac{R \cdot d^2 \cdot \pi}{4 \cdot \rho} = \frac{30\ \Omega \cdot (2 \cdot 10^{-4}\ \text{m})^2 \cdot 3{,}14}{4 \cdot 1{,}78 \cdot 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m}} = \mathbf{53\ m.}$$

2. Igazoljuk a fajlagos ellenállás mértékegységei közötti következő összefüggést:

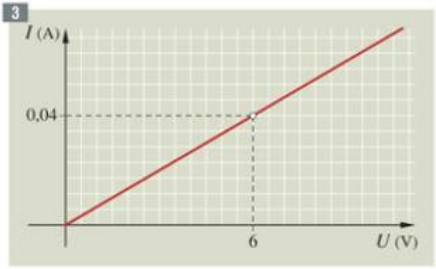
$$1\ \Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} = 10^{-6}\ \Omega \cdot \text{m}!$$

3. A grafikon egy 10 m hosszú vezetőhuzal áramerősségét mutatja a feszültség függvényében. Készítsünk feszültség-áramerősség grafikont

a) a huzalnak egy 5 m hosszú darabjáról!

b) a huzalnak 5 m hosszú, de 2-szeres keresztmetszetű darabjáról! (Középen visszahajtjuk, és a végeket összefogjuk!)

3



4. A táblázat ℓ hosszúságú, d átmérőjű vezető R ellenállására vonatkozik.

a) A vezető fajlagos ellenállásának kiszámítása után, a fajlagos ellenállásokat tartalmazó táblázat alapján becsüljük meg, hogy milyen anyagból készülhetett a vezető!

b) Egészítsük ki a táblázatot!

ℓ (m)	d (mm)	R (Ω)
4	0,1	720
	0,1	180
4	0,2	

5. Vegyünk ismert hosszúságú és átmérőjű vezetőhuzalt (például kantálhuzalt), és kapcsoljuk néhány voltos áramforrás áramkörébe!

a) Mérjük a huzalra jutó feszültséget és az átfolyó áramerősséget, majd számítsuk ki a huzal ellenállását! Végezzük ezt el legalább három különböző feszültségnél, és a kapott ellenállásértékek átlagát fogadjuk el helyes eredménynek!

b) A huzal ellenállásának, hosszának és átmérőjének ismeretében számítsuk ki a huzal anyagának fajlagos ellenállását!

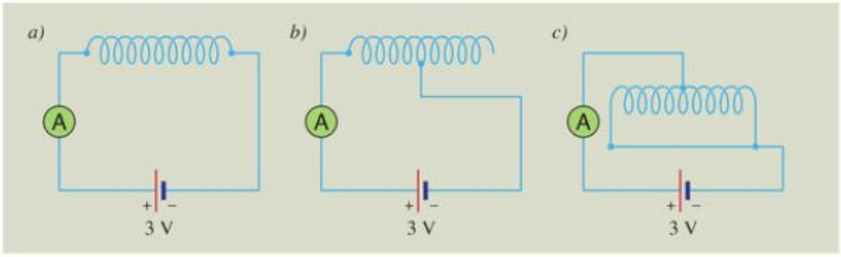
c) Határozzuk meg, hogy a fajlagos ellenállás számított értéke hány %-kal tér el a táblázatban található értéktől!

6. Egy tekercs elkészítésénél 60 m hosszú, 0,5 mm^2 keresztmetszetű, $1{,}78 \cdot 10^{-8}\ \Omega \cdot m$ fajlagos ellenállású huzalt használtunk fel.

a) Mennyi a tekercs ellenállása?

b) Rákapcsolhatunk-e a tekercsre egy 12 V-os akkumulátort, ha a vezeték szigetelését veszélyeztető melegedés miatt a tekercs megengedett maximális áramerőssége 2 A?

7. Egy szigetelőlapra csévélt 600 Ω ellenállású huzalnak a két végén és a közepén is van csatlakozási pontja. Mekkora áramerősséget jelez az ampermérő a következő kapcsolásokban?



8. Egy áramkörben a fogyasztót az áramforrás pozitív és negatív pólusával egyaránt 20 cm hosszú, 1 mm^2 keresztmetszetű, $1{,}78 \cdot 10^{-8}\ \Omega \cdot m$ fajlagos ellenállású rézvezető köti össze.

a) Mennyi az áramkörben a teljes vezeték ellenállása?

b) Hány százalékos hibát követünk el, ha az izzó 63 ohmos ellenállása mellett a vezeték ellenállását elhanyagoljuk?

9. 2 mm^2 keresztmetszetű alumíniumhuzalból készült vezetékpár valahol zárlatos. A vezetékpár végére 6 V-os feszültséget kapcsolva a vezetékben 1,5 A erősségű áram folyik. Milyen távolságban keressük a zárlat helyét? (Használjunk táblázatot!)

10. Végezzünk mérést és számítást egy 6,3 V; 0,3 A feliratú skálaizzón!

a) Számítsuk ki a feltüntetett adatok szerinti üzemi ellenállást!

b) Mérjük meg az izzó ellenállását 1,5 V, majd 6 V feszültség alkalmazásával!

c) Adjunk magyarázatot a kapott eredmények eltérésére!

11. Egy izzólámpa volfrámszálának üzemi hőmérséklete 2100 °C. Ezen a hőmérsékleten az izzószál ellenállása 1210 ohm. Becsüljük meg, hogy mennyi a volfrám ellenállása

a) 20 °C-os szobahőmérsékleten;

b) 40 °C-os nyári melegben!

Fogadjuk el a volfrám hőfokténye zőjét hőmérséklettől függetlenül $4{,}3 \cdot 10^{-3}\ \frac{1}{°C}$-nak.

1.4. Az elektromos munka, teljesítmény és hőhatás

Az elektromos áramkör energiaátalakító. Az áramforrás valamilyen energia (például galvánelemnél kémiai energia) felhasználásával elektromos töltéseket választ szét, elektromos mezőt hoz létre. Az elektromos mező mozgatja a fogyasztóban lévő elektronokat a fémrács akadályozó hatásával szemben. Az elektronok a mezőtől kapott energiát a fémrács ionjaival való ütközés során leadják a fogyasztónak, növelik annak belső energiáját. A felmelegedett fogyasztó hőt ad le a hidegebb környezetének.

Ha a fogyasztón U a feszültség és Q az átáramló töltés, akkor a feszültség definíciója alapján az elektromos mező munkája (W):

$$W = U \cdot Q.$$

A töltésmennyiséget az áramerősséggel (I) és az idővel (t) kifejezve:

$$Q = I \cdot t.$$

Ez alapján az elektromos mező által a fogyasztón végzett munka vagy rövidebb szóhasználattal az **elektromos munka:**

$$\boldsymbol{W = U \cdot I \cdot t.}$$

Az elektromos munka SI-mértékegysége: 1 J = 1 V · A · s (1 joule = 1 volt · amper · szekundum).

A teljesítmény értelmezése szerint:

$$P = \frac{W}{t}.$$

Így az **elektromos teljesítmény:**

$$P = \frac{W}{t} = \frac{U \cdot I \cdot t}{t},$$

$$\boldsymbol{P = U \cdot I.}$$

A teljesítmény mértékegysége: 1 W = 1 V · A (1 watt = 1 volt · amper).

Az elektromos teljesítményt gyakran fejezzük ki a fogyasztó ellenállásával.

A feszültséget az $U = I \cdot R$ összefüggés alapján helyettesítve a következő kifejezés adódik:

$$P = I^2 \cdot R.$$

Az áramerősségre az $I = \frac{U}{R}$ összefüggést alkalmazva az alábbi kifejezéshez jutunk:

$$P = \frac{U^2}{R}.$$

Az elektromos fogyasztókon rendszerint feltüntetik, hogy milyen feszültségre tervezték őket, és mennyi az üzemi teljesítményük. Ezért az elektromos munkát leggyakrabban a P teljesítmény és a t idő felhasználásával számítjuk ki:

$$\boldsymbol{W = P \cdot t.}$$

Az összefüggés alapján az elektromos munkát gyakran az SI-től eltérő kWh (kilowattóra) mértékegységben adják meg:

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3{,}6 \cdot 10^6 \text{ J}.$$

Ha beállt a fogyasztó állandó hőmérséklete, akkor energiája is változatlan. **Az elektromos mező által végzett munka megegyezik a fogyasztó által leadott hőmennyiséggel.**

$$Q_{\text{hő}} = W_{\text{elektromos}}.$$

A fogyasztó által leadott hőmennyiség

$$Q_{\text{hő}} = U \cdot I \cdot t.$$

Ez a Joule–Lenz-törvény, melyet James Prescott Joule (1818–1889) angol és Heinrich Lenz [lenc], 1804–1865) német származású orosz fizikus mérések alapján fedezett fel a 19. század közepén. Mindketten fontos szerepet játszottak az energiamegmaradás törvényének felismerésében.

Az elektromos eszközök, gépek, készülékek sokféle módon szolgáltatnak energiát, teszik könnyebbé, gazdagabbá életünket. Ennek azonban ára is van (a havi villanyszámla mindig emlékeztet rá). Energiatakarékossággal nemcsak saját költségeinket csökkentjük, hanem hosszabb távon az élhetőbb környezetet, a fenntartható fejlődést, a jövő nemzedéket is szolgáljuk.

Hogyan tudjuk mindennapi életünkben takarékosabban használni az elektromos energiát?

Gyakran kis odafigyelés is elég, máskor hosszabb távú gondolkodás szükséges.

3D

1. Az üzemeltetési idő csökkentése

- Különösen fontos a nagy teljesítményű berendezések (villanybojler, elektromos főzőlap) üzemeltetési idejének rövidítése. Bojlernél elérhetjük ezt alacsonyabb hőfok beállításával, 2-3 évenkénti vízkőmentesítéssel és a fürdés helyett a kevesebb vizet igénylő zuhanyozás választásával. A főzőlapot hamarabb lekapcsolhatjuk, hiszen nagy hőkapacitása miatt még percekig elegendő hőt biztosíthat a főzéshez.
- Kapcsoljuk ki az elektronikai berendezéseket (tévé, rádió, számítógép stb.), a fényforrásokat, ha használatukban nagyobb szünetet tartunk!
- Hosszabb távollét esetén úgy áramtalanítsunk, hogy a konnektorból is kihúzzuk a csatlakozókat. Ez villámvédelmi szempontból is indokolt! A készenléti (standby) üzemmód is fogyasztással jár, ami jelentős többletköltséget okozhat. Érdemes az ilyen berendezéseket egy kapcsolóval felszerelt elosztón át üzemeltetni és használaton kívül lekapcsolni.

2. A hatásfok javítása

- Az áram munkája ($W_{\text{elektromos}}$, amiért fizetünk) csak részben fordítódik a kívánt energiaváltozásra ($\Delta E_{\text{hasznos}}$; vízmelegítés, a szoba megvilágítása, az élelmiszerek hűtését biztosító körfolyamat stb.). Érdekünk tehát, hogy a

$$\Delta E_{\text{hasznos}} = \eta \cdot W_{\text{elektromos}}$$

összefüggésben az $\eta < 1$ hatásfokot minél nagyobbra növeljük. Bár lehet, hogy egy korszerűbb berendezés drágább, hosszabb távon olcsóbb lehet.
- Hagyományos izzólámpa helyett ezért használjunk energiatakarékos kompakt vagy LED fényforrásokat!
- Vásárláskor lehetőleg a magasabb (A) energiaosztályú hűtőgépet, mosógépet válasszuk. Ezekkel 30%-os vagy még nagyobb energiatakarékosságot is elérhetünk.
- A hűtőszekrények sokat üzemelnek, ezért az átlagos lakásoknál az áramszámla közel harmadáért felelősek. A hatásfokuk javítható a hűvösebb, szellős környezettel, az ajtók jó tömítésével, a kevesebb nyitogatással, alacsonyabb hőfok beállításával, a jégréteg leolvasztásával, minél hűvösebb étel behelyezésével.
- A teli mosógépnek, hűtőnek lényegesen jobb a hatásfoka, mint a félig üresen működő gépeknek.

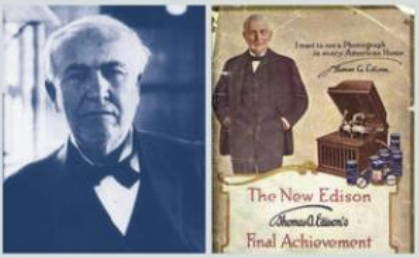
3D

OLVASMÁNY

Az elektromos világítás történetéből

Az elektromosság felhasználása először a világítástechnikában hozott forradalmi változást. A petróleumlámpákat, gázlámpákat, helyenként az ívlámpákat az izzólámpa váltotta fel.

Az izzólámpa világításra is jól használható első változatát, a szénszálas izzólámpát** *Thomas Edison*** [edizon] amerikai kutató készítette el 1879-ben. Az üvegburából kiszivattyúzta a levegőt, így védte meg a szénszálat az elégéstől. Edison rendkívüli tehetségű feltaláló volt, ezernél is több elektrotechnikai találmány fűződik a nevéhez (többek között a szénmikrofon, a fonográf, a filmfelvevő gép, a lúgos akkumulátor és az első villamos erőmű).



108.1. *Thomas Edison* (1847–1931) és a fonográf

Európában Temesváron valósult meg először a városi villanyvilágítás (1884). Az új világítástechnika hazai elterjedése a 20. század elejére esett, de még az 1920-as években is az újdonság erejével hatott. Ezt érezteti Babits Mihály *Esti megérkezés* című verse is (1923):

„Az esti sötét
halk mezei lelkét
a mohó kilométerek
bús messzibe nyelték.
Kocsim ablakait most
veri a fény,
két sorban a lámpák
jönnek elém.

Tépett takaró lett
már a sötétből;
csak az ég, a nagy ég
fut velem a rétről;
kiejtik az utcán
a csönd mezei
csokrát a kiránduló
fáradt kezei.

De harsan a lángok
lármája, a lámpák
csilláma szemembe
csengeti lángját.
Máshol az éjszaka
csendje halálos:
itt villan a villany
és villog a város.

Idelenn a város
villanya villog,
de fenn a nagy ég
száz csillaga csillog:
a villany a földi,
a csillag az égi,
a villany az új,
a csillag a régi."

Az elektromos világítás elterjesztésében és továbbfejlesztésében magyar mérnökök, kutatók is jelentős szerepet játszottak. Az Egyesült Izzólámpa és Villamossági Rt. újpesti telepén gyártották az első volfrámszálas izzólámpát** (1905). *Bródy Imre* (1891–1944) magyar fizikus alkalmazott először kriptongáztöltést az izzólámpában (1936). Ezzel csökkentette a volfrámszál párolgását, ami a lámpa hatásfokát és élettartamát is megnövelte. Bródy Imre tervei szerint épült Ajkán a világ első kriptongázgyára.

Napjainkban – a rossz (maximum 5%-os) fényhatásfok miatt – fokozatosan beszüntetik a hagyományos izzólámpák gyártását. Helyettük a jobb fényhatásfokú, hosszabb élettartamú, ugyanakkor azonban drágább és a megszokottól eltérő színhatású **halogénlámpák, kompakt fénycsövek** és **LED-lámpák** választhatók. Közülük csak a halogénlámpa tartalmaz izzószálat. Kompakt fénycsőben gáz és az edény fala, LED-lámpánál félvezető anyag bocsátja ki a fényt alacsony hőmérsékleten.



109.1. Energiatakarékos halogénlámpa, kompakt fénycső és különböző LED-lámpák

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. A főzőlappal vagy a merülőforralóval lehet gazdaságosabban melegíteni?
2. Miért olcsóbb az éjszakai áram, mint a nappali?
3. Miért veszélyes, ha a kiolvadt biztosítékot vastag vezetővel pótoljuk (megpatkoljuk)?

FELADATOK

1. Egy elektromos főzőlap 230 V-os feszültségen 2,5 A erősségű áramot vesz fel.
   a) Mennyi a főzőlap teljesítménye?
   b) Mennyi hőt ad le a főzőlap 20 perc alatt?
2. Ellenőrizni akartuk, hogy helyesen mér-e az elektromos fogyasztásmérőnk (villanyóránk). Ezért lekapcsoltuk a lakás elektromos fogyasztóit, csak egy 230 V; 1600 W feliratú hősugárzót kapcsoltunk be. Megfigyeltük, hogy a fogyasztásmérő forgótárcsája 1 perc alatt éppen 10 fordulatot tett meg. A fogyasztásmérőn 375 fordulat/kWh felirat látható. Jól mér-e a villanyóránk?
3. Egy villanybojler fűtőszálán 230 V feszültség mellett 7,8 A erősségű áram folyik.
   a) Mennyi a fűtőszál ellenállása?
   b) Mennyi a teljesítmény?
   c) Mennyi idő alatt melegít fel a bojler 120 liter 20 °C-os vizet 90 °C-ra? $c_{víz} = 4{,}2\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{°C}}$.
4. Tájékozódjunk, majd rendezzünk vitát arról, hogy milyen célra milyen fényforrást érdemes vásárolnunk! Érveinket számításokkal igazoljuk!
5. Felkérést kaptunk az elektromos fűtés népszerűsítésére. Érveljünk mellette és ellene is!
6. Keressünk irodalmat, és olvassunk Bródy Imre életéről, munkásságáról!

1.5. Fogyasztók soros kapcsolása

Kapcsoljunk sorosan két fogyasztót (például izzót), majd mérjük meg, és hasonlítsuk össze az áramerősségeiket!

Mérjük meg, és hasonlítsuk össze két sorosan kapcsolt fogyasztó esetén az áramforrás feszültségét az egyes fogyasztókra eső feszültségekkel!

Sorosan kapcsolt fogyasztók között nincsen áramelágazás, ezért **a fogyasztók áramerőssége megegyezik:**

$$I_1 = I_2 = I.$$

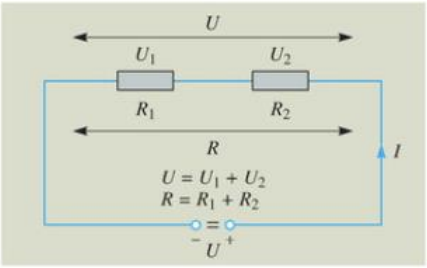
Soros kapcsolásnál **az áramforrás feszültsége egyenlő a fogyasztók feszültségeinek összegével:**

$$U = U_1 + U_2.$$

A feszültségek közötti kapcsolat érthetővé válik, ha elképzeljük, hogy az áramforrás egyik pólusától a fogyasztókon keresztül a másik pólusig elmozgatunk egy egységnyi próbatöltést. Ekkor a mező munkája számértékre éppen a feszültséggel egyenlő. A mező teljes munkáját pedig nyilván az egyes fogyasztókon végzett munkák összege adja.

Mivel az áramerősség megegyezik a sorosan kapcsolt fogyasztókon, ezért

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2}.$$



110.1. Sorosan kapcsolt fogyasztók

Soros kapcsolásnál a nagyobb ellenállású fogyasztóra tehát arányosan nagyobb feszültség jut. **Az áramforrás feszültsége az ellenállások arányában oszlik meg a fogyasztókon.**

A sorosan kapcsolt fogyasztók helyettesíthetők egyetlen fogyasztóval úgy, hogy ezen az eredeti áramforrás az eredeti áramerősséget hozza létre. A helyettesítő fogyasztó ellenállását nevezzük **eredő ellenállásnak.** Az eredő ellenállás:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U_1 + U_2}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} = R_1 + R_2.$$

Tehát **az eredő ellenállás megegyezik a részellenállások összegével:**

$$R = R_1 + R_2.$$

MEGJEGYZÉSEK

1. Kettőnél több fogyasztó soros kapcsolásakor hasonló módon fogalmazhatók meg az áramerősségre, feszültségre és az eredő ellenállásra vonatkozó törvények. Így több soros kapcsolású fogyasztó esetén

   az eredő feszültség: $U = U_1 + U_2 + \ldots + U_n,$

   az eredő ellenállás: $R = R_1 + R_2 + \ldots + R_n,$

   az áramerősség állandó tehát: $\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_3}{R_3} = \ldots = \frac{U_n}{R_n}.$

2. Az ampermérő ellenállása hozzáadódik a vele sorosan kapcsolódó fogyasztóéhoz, a műszer beiktatása tehát csökkenti a fogyasztó eredeti áramerősségét. Minél kisebb az ampermérő ellenállása a fogyasztóéhoz képest, annál kevésbé módosítja az eredeti áramerősséget. Az ideális ampermérőt 0 ellenállásúnak tekintjük.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Mi történik, ha a soros kapcsolású izzók egyike kiég?

2. Egy áramkörben sorosan kapcsolunk egy *A* és egy 3-szor nagyobb ellenállású *B* fogyasztót.

a) Milyen arányban áll a *B* és *A* fogyasztó feszültsége?

b) Milyen arányban áll a *B* fogyasztó és az áramforrás feszültsége?

3. Mit mondhatunk soros kapcsolásnál a részteljesítmények és az eredő teljesítmény kapcsolatáról?

4. Az áramforrás egyik pólusát pozitívnak, a másikat negatívnak mondjuk. Milyen előjelűnek mondhatjuk a sorosan kapcsolt fogyasztók találkozási pontját?

5. Miért nem melegszik fel a vasalózsinór, annak ellenére, hogy rajta ugyanolyan erősségű áram folyik, mint a vasalóban izzó ellenálláshuzalon?

6. Ha a 230 V-os hálózatra sorba kapcsolunk egy 230 V; 60 W feliratú izzólámpát és egy zseblámpaizzót, az utóbbi az áramkör zárásakor kiég. Miért nem ég ki a zseblámpaizzó, ha azt az áramkör zárása előtt rövidre zárjuk, majd a zárás után megszüntetjük a rövidzárat? (Vigyázat a kísérlet elvégzésénél! A 230 V-os hálózat érintése életveszélyes!)

FELADATOK

1. 3,5 V; 0,2 A feliratú zseblámpaizzót a feltüntetett jellemzőkkel szeretnénk üzemeltetni, de csak 12 V-os akkumulátorral és egy 100 Ω-os változtatható ellenállással rendelkezünk.

a) A változtatható ellenállás mekkora részét kapcsoljuk sorosan az izzóval?

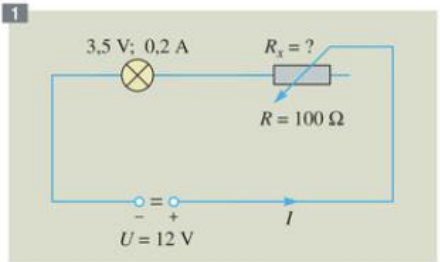
b) Milyen hatásfokú ez a kapcsolás?

c) Milyen teljesítményfelirat esetén használható itt a változtatható ellenállás?

MEGOLDÁS:

$U_i = 3{,}5$ V;
$U = 12$ V
$I = 0{,}2$ A
$R = 100\ \Omega$
$R_x = ?$;
$\eta = ?$;
$P_{max} = ?$

1



a) A változtatható ellenállás csúszkáig terjedő bal oldali része (R_x) sorosan kapcsolódik az izzóval, a jobb oldali része ($100\ \Omega - R_x$) nem kapcsolódik az áramkörbe.

Az R_x ellenálláson is $I = 0{,}2$ A-es áram folyik, és a rá eső feszültség:

$$U_x = 12\text{ V} - 3{,}5\text{ V} = 8{,}5\text{ V}.$$

Ebből

$$R_x = \frac{U_x}{I} = \frac{8{,}5\text{ V}}{0{,}2\text{ A}} = \mathbf{42{,}5\ \Omega}.$$

b) Az izzó teljesítményét viszonyítjuk az áramforrás leadott teljesítményéhez:

$$\eta = \frac{U_i \cdot I}{U \cdot I} = \frac{U_i}{U} = \frac{3{,}5\ \text{V}}{12\ \text{V}} = \mathbf{0{,}29\ (= 29\%).}$$

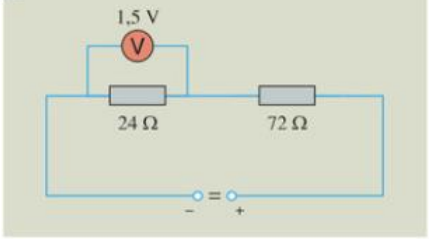
c) A változtatható ellenállás megengedhető teljesítménye az egész ellenálláson átfolyó megengedhető áramerősségből adódik. Esetünkben, ha az áram az egész R ellenálláson folyna:

$P = I^2 \cdot R = (0{,}2\ \text{A})^2 \cdot 100\ \Omega = 4\ \text{W}$ lenne a teljesítmény. A szükséges felirat: $P_{max} \geq \mathbf{4\ W.}$

2. Egy 6 V-os áramforrás sarkaira sorba kapcsolunk egy 200 Ω és egy 300 Ω ellenállású fogyasztót. Határozzuk meg a fogyasztók áramerősségét és feszültségét!

3. Egy áramkörben 24 Ω-os és 72 Ω-os fogyasztókat kapcsoltunk sorba. A kisebb ellenállású fogyasztón 1,5 V-os feszültséget mértünk. Határozzuk meg a másik fogyasztó és az áramforrás feszültségét és az áramkörben folyó áram erősségét!

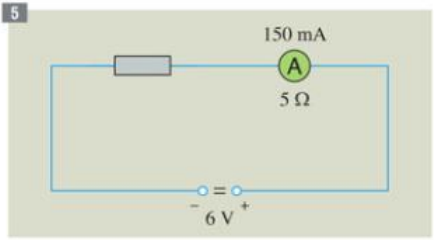
3



4. Egy 100 ohmos ellenálláson a voltmérő 5 V feszültséget, a vele sorosan kapcsolt ismeretlen R ellenálláson a voltmérő 3,2 V feszültséget mutat. Mennyi az ismeretlen ellenállás?

5. 6 V-os áramforrás áramkörében egy ismeretlen ellenállású fogyasztóval sorosan kapcsolunk egy 5 ohm belső ellenállású ampermérőt. Az ampermérő 150 mA-es áramerősséget mutat. Mennyi a fogyasztó ellenállása?

5

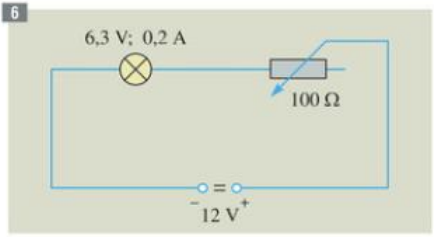


6. Egy izzót, amelyen 6,3 V; 0,2 A felirat olvasható, 12 V-os akkumulátorról üzemeltetünk egy maximálisan 100 ohmos változtatható ellenállás soros kapcsolásával.

a) Milyen értékűre állítsuk be a változtatható ellenállást?

b) Számítsuk ki a kapcsolás hatásfokát (az izzó teljesítményének és az áramforrás teljesítményének arányát)!

6



7. 1 kW teljesítményű, 6 A áramfelvételű fogyasztóhoz 500 m hosszú, 4 mm^2 keresztmetszetű, $3 \cdot 10^{-8}\ \Omega \cdot m$ fajlagos ellenállású alumíniumvezeték-pár szállítja az elektromos energiát. Az áramforrás által leadott energia hány százaléka vész kárba a vezetéken?

8. A 14 V; 3 W feliratú karácsonyfaizzók közül hányat lehet sorba kapcsolni a 230 V-os hálózatra? Mennyi lesz az izzók teljesítménye, ha egy kiégett izzót rövidzárral helyettesítünk? (Vigyázat! A hálózati feszültségen lévő vezeték érintése életveszélyes!)

9. Egy 24 V-os áramforrás sarkaira sorba kapcsolunk egy 36 Ω-os, egy 48 Ω-os és egy harmadik, ismeretlen ellenállású fogyasztót. Az áramerősség 150 mA.

a) Mennyi a harmadik fogyasztó ellenállása?

b) Mennyi az egyes fogyasztókon a feszültség?

1.6. Fogyasztók párhuzamos kapcsolása

Kapcsoljunk párhuzamosan két fogyasztót (például izzót), majd mérjük meg és hasonlítsuk össze a feszültségeiket!

Párhuzamosan kapcsolt fogyasztók esetén mérjük meg és hasonlítsuk össze a főág áramerősségét a mellékágak áramerősségével!

Az elektromos töltések által keltett elektromos mezőkben – ugyanúgy, mint az elektrosztatikában – két pont között bármilyen útvonalon haladva ugyanannyi a feszültség.

Mérésekkel is igazolható, hogy **a párhuzamosan kapcsolt fogyasztók feszültsége megegyezik:**

$$U_1 = U_2 = U.$$

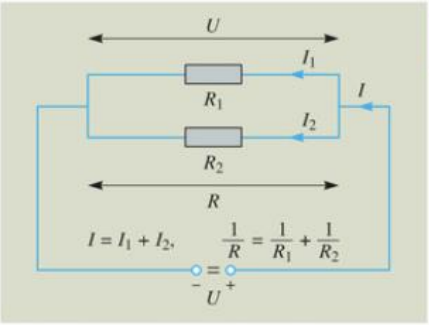
Az áram útját követve az áramkör főága párhuzamos mellékágakra válik szét. A töltésmegmaradás törvényéből következik, hogy **a főág áramerőssége egyenlő a mellékágak áramerősségeinek összegével:**

$$I = I_1 + I_2.$$

A párhuzamosan kapcsolt fogyasztók feszültségének megegyezése azt jelenti, hogy

$$I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2.$$

A párhuzamosan kapcsolt fogyasztók áramerőssége tehát fordítottan arányos a fogyasztók ellenállásával.



113.2. Párhuzamosan kapcsolt fogyasztók

A főág áramerőssége az ellenállásokkal fordított arányban oszlik meg a fogyasztókon.

Az eredő ellenállás, amellyel helyettesíthető a párhuzamosan kapcsolt fogyasztók együttese:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U}{I_1 + I_2}.$$

Írjuk fel a bal és jobb oldal reciprokainak egyenlőségét!

$$\frac{1}{R} = \frac{I_1 + I_2}{U} = \frac{I_1}{U} + \frac{I_2}{U} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Tehát **az eredő ellenállás reciproka megegyezik a részellenállások reciprokainak összegével:**

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$



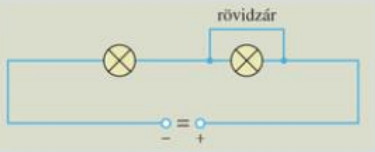
113.1. A lakás elektromos hálózatának vázlata. *Hogyan kapcsolódnak a fogyasztók?*

MEGJEGYZÉSEK

1. Fogyasztók párhuzamos kapcsolásának törvényei kettőnél több fogyasztó esetén is hasonlóképpen teljesülnek, mint két párhuzamosan kapcsolt fogyasztónál.

2. A fogyasztók soros kapcsolása felfogható a fogyasztó hosszának növeléseként, a párhuzamos kapcsolás pedig a fogyasztó keresztmetszetének növeléseként. Így érthető, hogy soros kapcsolásnál az eredő ellenállás nagyobb bármelyik részellenállásnál. Párhuzamos kapcsolásnál pedig az eredő ellenállás kisebb bármelyik részellenállásnál.

3. Egy fogyasztó rövidre zárása azt jelenti, hogy elhanyagolható ellenállású vezető kapcsolódik a fogyasztóval párhuzamosan. A fogyasztó és a **rövidzár** eredő ellenállása közelítően nulla lesz, az áramkörben az áramerősség jelentősen megnő. Ez az áram a rövidzáron halad át, a rövidzárral párhuzamos fogyasztók áramerőssége közel zérusra csökken. A vezeték hirtelen melegedése károsodásokat, tüzet is okozhat. Az áram növekedéséből adódó károk megelőzésére olvadó biztosítékot vagy mágneses megszakítót kapcsolnak az áramkörbe. Ezek meghatározott áramerősség felett rövid időn belül megszakítják az áramkört.



4. Egy fogyasztó feszültségének mérésekor a feszültségmérőt párhuzamosan kapcsoljuk a fogyasztóval. A párhuzamos ág az áram egy részét eltereli. Így a fogyasztón az eredetinél kisebb lesz az áramerősség, és az $U = I \cdot R$ összefüggés szerint a fogyasztó feszültsége is. Minél nagyobb a voltmérő belső ellenállása a fogyasztó ellenállásához képest, annál kevésbé módosítja a műszer az eredeti feszültséget. Az ideális voltmérőt végtelen nagy ellenállásúnak tekintjük (a rajta átfolyó áramot zérusnak vesszük).

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Egy fogyasztót egyszer sorosan, egyszer pedig párhuzamosan kapcsolunk egy 5-ször nagyobb ellenállású fogyasztóval. Melyik kapcsolásnál érvényesek az alábbi megállapítások?

   a) A nagyobb ellenálláson 5-ször kisebb áram folyik.

   b) A nagyobb ellenálláson 5-ször nagyobb a feszültség.

   c) A nagyobb ellenálláson is annyi a feszültség, mint a kisebb ellenálláson.

   d) Az eredő ellenállás nagyobb bármelyik részellenállásnál.

   e) Az eredő ellenállás kisebb bármelyik részellenállásnál.

   f) Az áramforráson nagyobb áram folyik, mint bármelyik ellenálláson.

   g) Az egyik fogyasztó kiiktatása nem változtatja meg a másikon az áramerősséget.

   h) Az áramforrás teljesítménye megegyezik a fogyasztók teljesítményének összegével.

2. Mi várható, ha egy ampermérőt véletlenül voltmérőként, vagy egy voltmérőt véletlenül ampermérőként kapcsolunk az áramkörbe?

3. A $P = I^2 \cdot R$ összefüggés egyenes arányosságot, a $P = \frac{U^2}{R}$ összefüggés pedig fordított arányosságot mutat az ellenállás és a teljesítmény között. Hol teljesül az egyik és hol a másik arányosság?

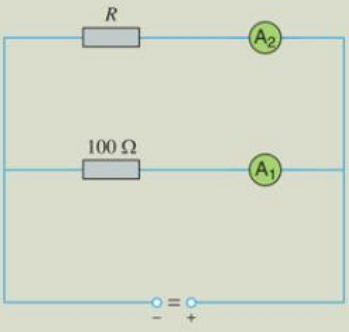
4. Hogyan lehet két egyforma fűtőspirál felhasználásával háromfokozatú melegítő eszközt készíteni?

FELADATOK

1. Egy 12 V-os áramforrásra párhuzamosan kapcsolunk egy 200 Ω és egy 300 Ω ellenállású fogyasztót. Számítsuk ki
   a) az eredő ellenállást,
   b) a főág áramerősségét,
   c) az egyes fogyasztók áramerősségét,
   d) a fogyasztók és az áramforrás teljesítményét!

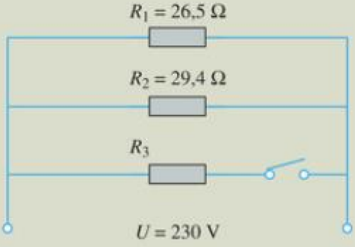
2. Az ábra szerinti kapcsolásban az A_1 ampermérő 40 mA-es, az A_2 ampermérő 6,8 mA-es áramerősséget mutat. Mennyi az ismeretlen R ellenállás? Mekkora teljesítményt ad le az áramforrás? (A műszerek ideálisnak tekinthetők.)

2



3. 230 V-os hálózaton egyszerre működtetünk egy 26,5 ohm üzemi ellenállású hősugárzót és egy 29,4 ohm üzemi ellenállású vasalót.
   a) Mennyi a fogyasztók feszültsége, áramerőssége, teljesítménye, eredő ellenállása?
   b) Használható-e egyidejűleg még az 1200 W teljesítményű hajszárító is, ha a fogyasztásmérőhöz 20 A-es megszakító tartozik?

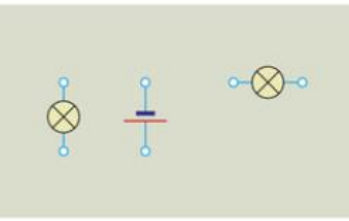
3



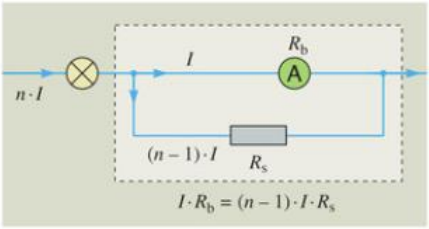
4. Két ellenállás soros kapcsolásával 200 ohm, párhuzamos kapcsolásával 40 ohm eredő ellenállást kaptunk. Mekkorák az ellenállások külön-külön?

5. Egy szerelőtáblán az ábra szerint rögzítették az áramforrást és az izzókat. Egészítsük ki ezt az elrendezést füzetünkben olyan áramkörré, hogy az izzók
   a) sorosan kapcsolódjanak,
   b) párhuzamosan kapcsolódjanak!
   Állítsuk össze a kapcsolásokat, és ellenőrizzük működésüket!

5



1.7. A fogyasztók soros és párhuzamos kapcsolásának gyakorlati alkalmazásai



116.1. Ampermérő méréshatárának növelése

AMPERMÉRŐ MÉRÉSHATÁRÁNAK KITERJESZTÉSE*

Legyen egy árammérő alapműszer méréshatára I. Ez azt jelenti, hogyha I erősségű áram folyik át a műszer tekercsén, akkor a tekercs a mutató végkitéréséig fordul el. Hogyan tudjuk a műszer méréshatárát n-szeresre növelni, vagyis elérni, hogy a műszer mutatója akkor kerüljön végkitérésbe, ha a vizsgált fogyasztón $n \cdot I$ erősségű áram folyik?

Ha az alapműszert nem akarjuk átalakítani, akkor azon továbbra is maximálisan I erősségű áram folyhat. A maradék $(n-1) \cdot I$ áramerősséget a fogyasztó után el kell ágaztatnunk az alapműszerrel párhuzamosan kapcsolt úgynevezett söntellenállás (R_s) felé. Ahhoz, hogy a fogyasztó árama a kívánt arányban osztódjon, a sönt-ellenállást $(n-1)$-szer kisebbre kell választanunk az alapműszer R_b belső ellenállásánál.

Az elágaztatás a műszer dobozán belül történik, ezért úgy látjuk, hogy végkitérésben $n \cdot I$ áramerősség halad át a műszeren is.

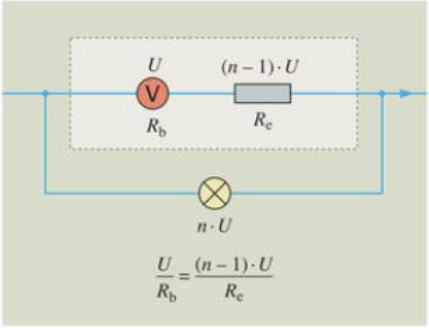
VOLTMÉRŐ MÉRÉSHATÁRÁNAK KITERJESZTÉSE

Legyen egy feszültségmérő alapműszer méréshatára U. Ez azt jelenti, hogy a mutató végkitérésénél U feszültség esik a műszer tekercsén. Azt szeretnénk, hogy a mutató csak akkor térjen ki teljesen, ha a vizsgált fogyasztó feszültsége $n \cdot U$. Ez elérhető úgy, hogy az alapműszerrel, a műszert tartalmazó dobozon belül, sorosan kapcsolunk egy előtét-ellenállást (R_e). Az így kiegészített műszert használjuk voltmérőként. R_b ellenállású alapműszerrel $(n-1) \cdot R_b$ ellenállású előtét-ellenállást kell sorosan kapcsolni. Így a fogyasztó $n \cdot U$ feszültségéből $(n-1) \cdot U$ az előtét-ellenállásra, U pedig az alapműszerre esik.

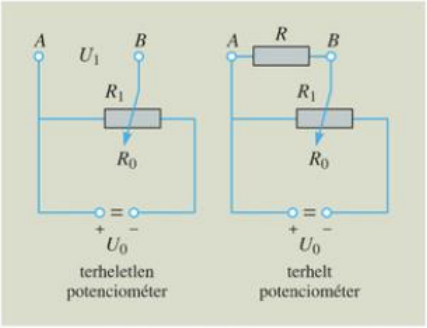
POTENCIOMÉTER (FESZÜLTSÉGOSZTÓ)*

A változtatható ellenállás értéke legyen R_0. A végpontjaihoz kapcsolt áramforrás feszültsége megoszlik a csúszkától a végpontokig terjedő két részen, azok ellenállásának arányában. Az AB kivezetéseken mérhető feszültség:

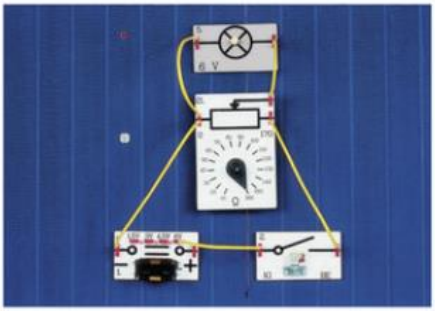
$$U_1 = U_0 \cdot \frac{R_1}{R_0}.$$



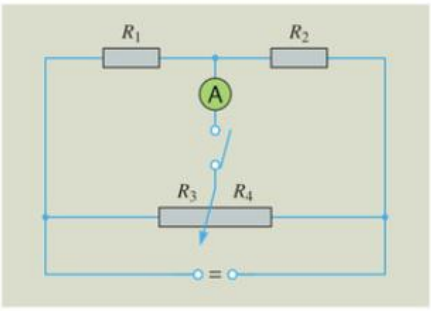
116.2. Voltmérő méréshatárának növelése



116.3. *Hogyan növelhetjük a potenciométer U_1 kimeneti feszültségét?*



117.1. Izzó fényerejének szabályozása potenciométerrel



117.2. Wheatstone-híd [viszton]

A csúszka elmozdításával (R_1 változtatásával) változik az AB kivezetéseken mérhető feszültség is. Az ilyen feszültségosztót nevezik potenciométernek.

Ha a potenciométert terheljük (a kivezetéseire R ellenállású fogyasztót kapcsolunk), lecsökken a kimeneti U_1 feszültség. Ilyenkor ugyanis a potenciométer R_1 ellenállású részét párhuzamosan kapcsoljuk az R ellenállású fogyasztóval. Ezek párhuzamos eredője kapcsolódik sorosan a potenciométer másik részével ($R_0 - R_1$-gyel).

A WHEATSTONE-FÉLE MÉRŐHÍD**

Ha a *117.2. ábra* áramkörében a kapcsoló nyitott, akkor a kapcsolás két párhuzamos ágat tartalmaz, amelyek mindegyikében két-két ellenállás kapcsolódik sorosan. Ilyenkor az áramforrás feszültsége mindegyik ágon az ellenállások arányában oszlik meg.

Ha az ellenállások aránya az áramkör különböző ágaiban

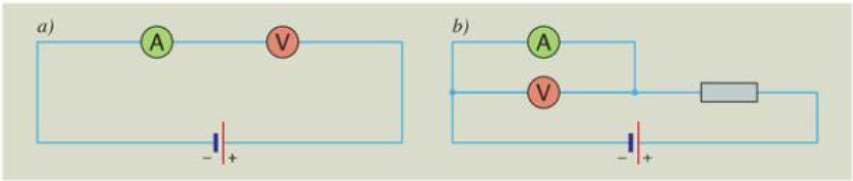
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4},$$

akkor a párhuzamos ágakat összekötő híd végpontjai azonos potenciálúak. Ekkor a kapcsoló zárásakor a műszer nem jelez áramot. Ha a fenti arány nem teljesül, a kapcsoló zárásakor a műszeren áram folyik.

Az R_3 és R_4 ellenállások aránya a potenciométerrel változtatható. Legyen R_1 a mérendő ellenállás. A mérőhíd potenciométerének állását addig változtatjuk, amíg a hídban folyó áram zérusra nem csökken. Ekkor a fenti ellenállásarányra vonatkozó összefüggésből az ismeretlen ellenállásérték kiszámítható. Mivel a leolvasás árammentes műszernél történik, ezért a műszer saját belső ellenállása nem hamisítja meg a mérési eredményt. Így ez a mérési eljárás rendkívül pontos.

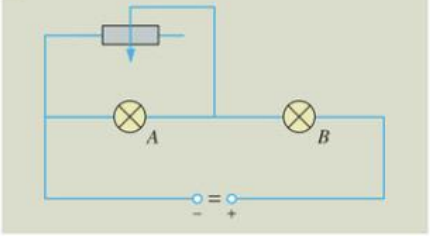
GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Hogyan változik az ampermérő belső ellenállása a méréshatár kiterjesztésekor? (*116.1. ábra*)
2. Hogyan változik a voltmérő belső ellenállása a méréshatár kiterjesztésekor? (*116.2. ábra*)
3. Mit határozhatunk meg az alábbi kapcsolások szerint a voltmérő által jelzett felszültség és az ampermérő által jelzett áramerősség hányadosaként?



4. Két egyforma izzót (*A* és *B*) kapcsoljunk sorosan egy áramforrás áramkörébe! Az egyik izzóval (*A*) párhuzamosan kössünk az áramkörbe egy változtatható ellenállást! Hogyan változik az izzók fényereje, ha a változtatható ellenállás értékét folyamatosan csökkentjük?

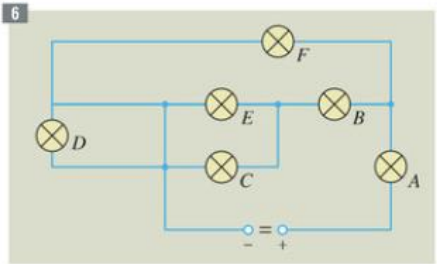
4



5. Kiegyenlített Wheatstone-hídban felcseréljük az áramforrást és a mérőműszert. Kitér-e a műszer mutatója?

6. Adjuk meg a kapcsolási rajzon szereplő egyforma izzók növekvő fényerősség szerinti sorrendjét!

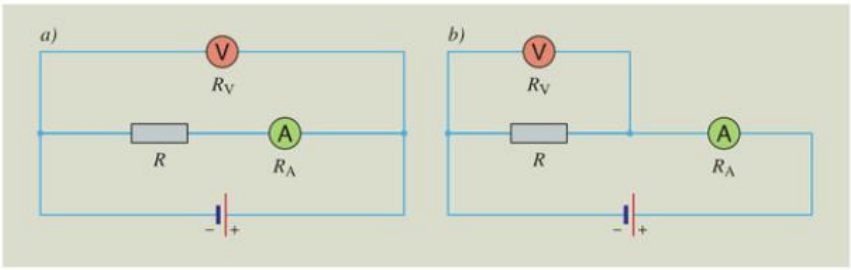
6



7. A *117.2. ábra* szerinti Wheatstone-hídon zárt kapcsolóállásnál akkor nem folyik áram (kiegyenlített Wheatstone-híd), ha a huzal potenciométer-mutatója az 50. skálabeosztásnál áll. A skála egyenletes beosztása balról jobbra 0-tól 250-ig terjed. Mit mondhatunk az R_1 és az R_2 ellenállás értékéről?

FELADATOK

1. Egy R ellenállású fogyasztón lévő feszültséget és a rajta átfolyó áram erősségét egyidejűleg mérjük. A mért értékekből számítjuk az R ellenállást. Az alábbi két kapcsolás közül melyik ad pontosabb eredményt?



MEGOLDÁS:

Az *a)* ábrán a mért áramerősség valóban az R ellenálláson folyik át. A mért feszültség viszont nem az R ellenálláson, hanem az R ellenállás és az ampermérő R_A ellenállásának soros eredőjén esik. Az utóbbi érték annál inkább közelíti meg az R ellenálláson lévő feszültséget, minél kisebb R_A az R-hez képest. Ez a kapcsolás tehát $R_A \ll R$ esetén ajánlatos.

A *b)* ábrán a voltmérő mutatja helyesen az R ellenálláson eső feszültséget. Az ampermérő viszont az R ellenálláson és a vele párhuzamosan kapcsolt voltmérő R_V ellenállásán folyó áramok összegét méri. Ez az áramerősség annál inkább egyezik meg az R ellenállás áramerősségével, minél nagyobb az R_V az R értékéhez képest. Ez a kapcsolás $R_V \gg R$ esetén javasolható.

2. Egy alapműszer belső ellenállása 100 ohm. A mutató végkitérésénél 1 mA-es áram folyik át a műszer tekercsén.

a) Hogyan készíthetünk ebből az alapműszerből 50 mA méréshatárú ampermérőt?

b) Mekkora ellenállást képvisel a kiterjesztett méréshatárú műszer?

3. Egy 100 mV méréshatárú, 100 ohm belső ellenállású alapműszerből 5 V méréshatárú voltmérőt akarunk készíteni.

a) Hogyan valósíthatjuk ezt meg?

b) Mennyi lesz a kiterjesztett méréshatárú voltmérő belső ellenállása?

4. Egy alapműszer méréshatára 2 mA vagy 80 mV.

a) Hogyan készíthetünk belőle 0,2 A méréshatárú ampermérőt?

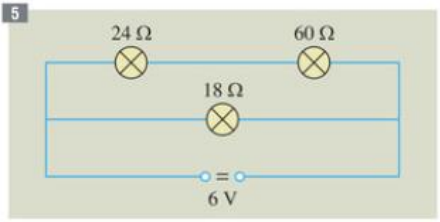
b) Hogyan készíthetünk belőle 10 V méréshatárú voltmérőt?

5. Egy 24 Ω, egy 60 Ω és egy 18 Ω ellenállású izzót az ábra szerint egy 6 V-os telepre kapcsoltunk.

a) Számítsuk ki a kapcsolásban szereplő izzók és az áramforrás teljesítményét!

b) A 24 Ω ellenállású izzót előbb ideális ampermérővel, majd ideális voltmérővel helyettesítjük. Mit mutatnak a műszerek?

5

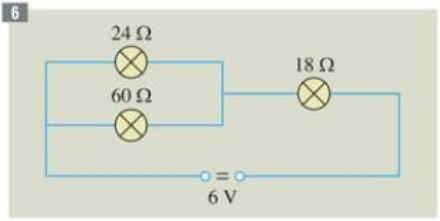


6. Egy 24 Ω, egy 60 Ω és egy 18 Ω ellenállású izzót az ábra szerint egy 6 V-os telepre kapcsoltunk.

a) Számítsuk ki a kapcsolásban szereplő izzók és az áramforrás teljesítményét!

b) A 60 Ω ellenállású izzót előbb ideális ampermérővel, majd ideális voltmérővel helyettesítjük. Mit mutatnak a műszerek?

6

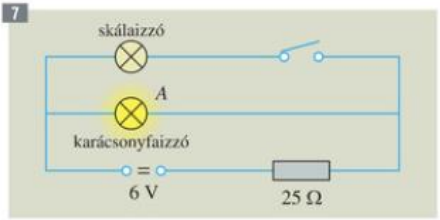


7. Állítsuk össze az ábra szerinti kapcsolást, és figyeljük meg, hogy a kapcsoló zárásakor az *A* jelű izzó fényereje csökken!

a) Adjunk magyarázatot a tapasztalt jelenségre!

b) Mit várunk, ha az áramkörben 25 Ω helyett kisebb ellenállást alkalmazunk?

7

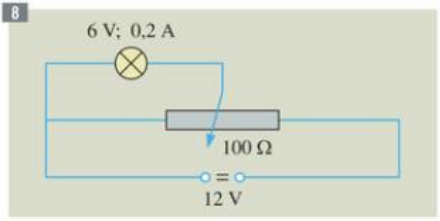


8. Egy 6 V; 0,2 A feliratú izzót 12 V-os áramforrásról 100 ohmos feszültségosztó (potenciométer) segítségével akarunk működtetni.

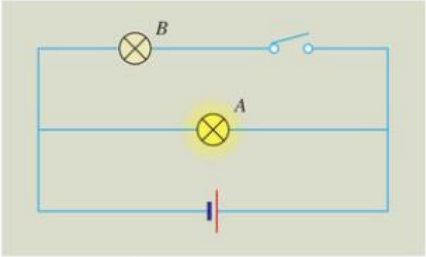
a) Hová állítsuk a potenciométer csúszkáját?

b) Az áramforrás által leadott energia hány százaléka jut az izzóra?

8



1.8. Áramforrások modellezése. Üresjárási feszültség, belső ellenállás (Kiegészítő anyag)



120.1. Az *A* izzó fénye gyengül, ha a *B* izzót bekapcsoljuk

Figyeljük meg, hogy egy rúdelem vagy telep áramkörében lévő izzó fényereje csökken, ha vele párhuzamosan egy másik izzót is bekapcsolunk! Feltűnőbb a fényváltozás, ha nagyobb teljesítményű izzót kapcsolunk be, vagy ha használtabb a rúdelem (telep).

A jelenség érthetővé válik, ha feltételezzük, hogy az izzóval sorosan kapcsolódó más ellenállás is van az áramkörben. A két párhuzamosan kapcsolt izzó eredő ellenállása ugyanis kisebb lesz, mint az eredetileg bekapcsolt izzó ellenállása volt. Így a második izzó bekapcsolásával az áramforrás feszültsége másképp oszlik meg az izzók és a velük sorosan kapcsolódó ellenállás között, kevesebb feszültség jut az izzókra.

Az áramkörben a töltések körbeáramlását nemcsak az áramforráson kívüli vezető, hanem az áramforráson belül, az áramforrás anyaga is akadályozza. Az áramforrásnak **van belső ellenállása**.**

Az áramforrást úgy modellezhetjük, hogy a kapcsai (kivezetései) között van egy állandó U_0 üresjárási feszültséget biztosító feszültségforrás** és egy állandó R_b belső ellenállás, amely sorosan kapcsolódik az R_k külső ellenállással**.**

Az U_0 üresjárási feszültség megegyezik a külső ellenállásra jutó U_k és a belső ellenállásra jutó U_b feszültség összegével.

$$U_0 = U_k + U_b.$$

Az U_k feszültséget **kapocsfeszültségnek**** is nevezzük, mivel a külső ellenálláson eső feszültség egyúttal az áramforrás kapcsai közötti feszültséget is jelenti.

Növekvő külső ellenállás esetén nő a kapocsfeszültség is, és közelít az U_0 feszültség értékéhez. A legnagyobb külső ellenállást az áramkör megszakításakor (más szóval az áramforrás üresjárása esetén) érjük el. Ekkor a kapcsokon mérhető feszültség:

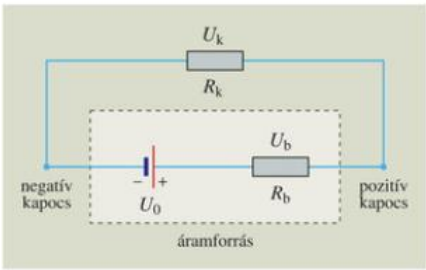
$$U_k = U_0,$$

ezért nevezzük az U_0 feszültséget **üresjárási feszültségnek.**

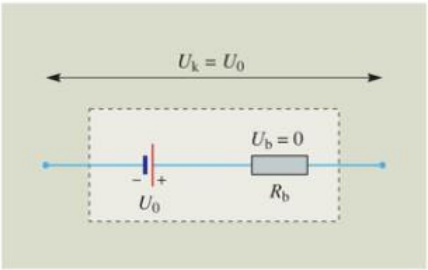
Egy áramkörben az áramerősség kiszámítására vonatkozó összefüggés, más néven

Ohm törvénye teljes áramkörre:**

$$I = \frac{U_0}{R_k + R_b}.$$



120.2. Áramforrás modellezése

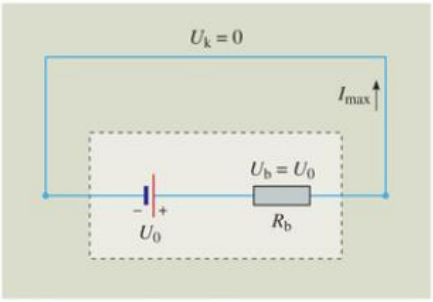


120.3. Terheletlen áramforrás**

Az áramforrásból nyerhető legnagyobb áramot $R_k = 0$ esetben kapjuk, vagyis amikor az áramforrás sarkait rövidre zárjuk.

$$I_{max} = \frac{U_0}{R_b}.$$

Az áramkörben a rövidzár (zárlat)* általában elkerülendő, mert túlterhelést jelent az áramforrásnak, az összekötő vezetékeknek. Ezek túlmelegedése tüzet is okozhat. Az áramforrások védelmére, a balesetveszély elhárítására szolgálnak a megfelelően méretezett biztosítékok (olvadóbiztosíték*, automata áramkioldó*).



121.1. Rövidre zárt áramforrás

MEGJEGYZÉSEK

1. Az *elektromotoros erő*** nagyságra megegyezik az üresjárási feszültséggel.

2. Az áramkörben a fogyasztó ellenállása mellett az áramforrás belső ellenállása gyakran elhanyagolható. Eddig ilyen ideális eseteket tételeztünk fel, ezért nem számoltunk az áramforrás belső ellenállásával. Ilyenkor elegendő egyszerűen csak az áramforrás feszültségéről beszélni, hiszen a kapocsfeszültség megegyezik az üresjárási feszültséggel (elektromotoros erővel). A kémiai energiát felhasználó áramforrások (galvánelemek, akkumulátorok) üresjárási feszültsége az elhasználódás során is gyakorlatilag állandó marad. A belső ellenállás viszont lényegesen megnő. Az új zseblámpatelep 0,1 ohm körüli belső ellenállása az elöregedés során 100 ohm nagyságrendűre is növekedhet. Ezzel magyarázható, hogy a használt elemek terheletlen állapotban elegendő feszültséget mutatnak, az izzóval való terhelésnél azonban lecsökken a kapocsfeszültség, és nem világít az izzó.

3. Egy készülék működéséhez szükséges feszültséget gyakran rúdelemek soros kapcsolásával érjük el. Ilyenkor az egyik elem pozitív pólusát a következő elem negatív pólusához kötjük. A zseblámpatelep 4,5 V-os üresjárási feszültsége például 3 db 1,5 V-os üresjárási feszültségű elem soros kapcsolásával adódik.

   Az elemek soros kapcsolásakor** természetesen belső ellenállásaik is sorosan kapcsolódnak és összeadódnak. Új elemeknél ez a belső ellenállás általában elhanyagolható a fogyasztó külső ellenállásához képest. A használt, nagy belső ellenállású elemeket viszont nem érdemes sorosan kapcsolni, mert nem tudunk lényeges áramnövekedést elérni.





121.2. A sorba kapcsolt elemek feszültsége összeadódik

4. *Gustav Robert Kirchhoff* [kirhhoff] (1824–1887) német fizikus ismerte fel 1845-ben, hogy az áramerősségre és feszültségre egyszerű, és a számításokban mégis nagyon jól használható törvények fogalmazhatók meg, amelyek minden áramkörben (a legbonyolultabban is) teljesülnek.

Ha egy áramköri csomópontba befolyó áramokat pozitív, az onnan kifolyó áramokat negatív előjellel látjuk el, akkor bármely csomópontban az áramerősségek előjeles összege zérus:

$$I_1 + I_2 + I_3 + \ldots = 0.$$

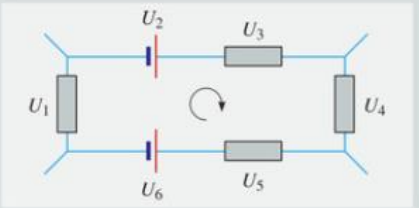
Ez Kirchhoff I. törvénye**.



Ha egy hurokban valamilyen körüljárási irány szerint haladva minden feszültséget (áramforrását, fogyasztóét) előjelesen veszünk figyelembe, akkor bármely zárt áramköri hurok mentén a feszültségek előjeles összege zérus:

$$U_1 + U_2 + U_3 + \ldots = 0.$$

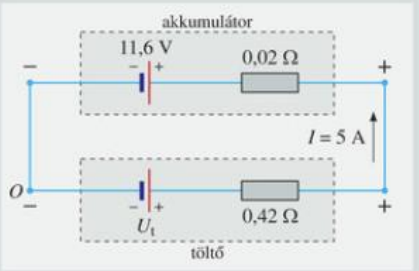
Ez Kirchhoff II. törvénye**.



A két törvény a töltésmegmaradás és az energiamegmaradás kifejezője. A soros és párhuzamos kapcsolás megismert törvényszerűségei is a Kirchhoff-törvények speciális megnyilvánulásai.

Oldjunk meg a Kirchhoff-törvényekkel egy akkumulátortöltőre vonatkozó példát!
Tegyük fel, hogy egy 12 V névleges feszültségű lemerült akkumulátor üresjárási feszültsége 11,6 V, belső ellenállása 0,02 Ω. Mekkora töltőfeszültség kapcsolható az akkumulátorra, ha a töltő belső ellenállása 0,42 Ω és a megengedhető legnagyobb töltőáram 5 A?
(Megjegyzés: A legnagyobb töltőáramot mindig megkaphatjuk, ha az akkumulátoron feltüntetett ún. töltéskapacitás értéket – esetünkben 50 Ah – elosztjuk 10 h-val.)

Megoldás:
Az akkumulátor töltésekor a töltő + pólusát az akkumulátor + pólusához kötjük.
A csomóponti törvény szerint az áramkörben mindenhol ugyanakkora áram folyik, hiszen nincsen elágazás. Alkalmazzuk a huroktörvényt úgy, hogy pl. az O pontból indulva, az áram irányában haladva összegezzük előjelesen a feszültségeket. (Emlékeztetőül: a feszültség a térerősség irányában haladva pozitív, ellenkező irányban negatív.)



$$-U_t + 0{,}42\ \Omega \cdot 5\ \text{A} + 0{,}02\ \Omega \cdot 5\ \text{A} + 11{,}6\ \text{V} = 0$$
$$-U_t + 2{,}1\ \text{V} + 0{,}1\ \text{V} + 11{,}6\ \text{V} = 0$$
$$U_t = 13{,}8\ \text{V}$$

Feltöltődés közben az akkumulátor feszültsége növekszik. Így vagy lecsökken a töltőáram, vagy növelnünk kell a töltő feszültségét, amit rendszerint egy többállású kapcsoló segítségével tudunk változtatni a kívánt töltőáramhoz szükséges értékre.

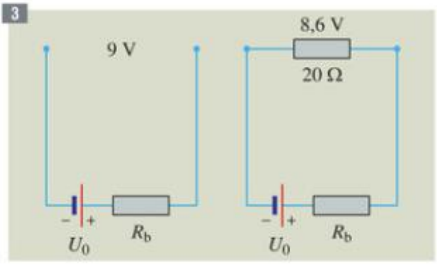
GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Miért világít gyengébben az autó fényszórója, amikor az indítómotort bekapcsoljuk?
2. Ha egy rúdelem kapcsait kis ellenállású fogyasztóval kötjük össze vagy rövidre zárjuk, az elem felmelegszik. Mi ennek a magyarázata?
3. Miért terveznek 4,5 V feliratú zseblámpatelephez 3,5 V; 0,2 A feliratú zseblámpaizzót?
4. Ha egy áramforrás kapcsaira csak egy voltmérőt csatlakoztatunk, az gyakorlatilag az áramforrás üresjárási feszültségét mutatja. Miért?
5. Tervezzünk olyan mérést, amellyel igazolni vagy cáfolni tudjuk, hogy érdemes az olcsó, hagyományos elemek helyett a reklámokban ajánlott drága, tartós elemeket vásárolni! Vitassuk meg!

FELADATOK

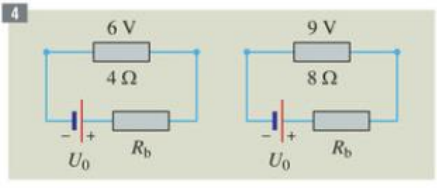
1. Egy 12,4 V üresjárási feszültségű, 0,4 ohm belső ellenállású telepre 10 ohm ellenállású fogyasztót kapcsolunk.
   a) Mennyi lesz az áramerősség?
   b) Számítsuk ki a kapocsfeszültséget és a belső ellenálláson eső feszültséget!
   c) Hogyan érhetnénk el ugyanennél a telepnél, hogy nagyobb legyen az áramerősség? Mennyi lehetne az áramerősség legnagyobb értéke?
   d) Hogyan érhetnénk el ugyanennél a telepnél, hogy nagyobb legyen a kapocsfeszültség? Menynyi lehetne a legnagyobb kapocsfeszültség?
2. Egy akkumulátor üresjárási feszültsége 12,2 V, belső ellenállása 0,02 ohm. Az indítómotor ellenállása 0,1 ohm.
   a) Mennyi lesz az indítómotor áramfelvétele?
   b) Mennyivel csökken az akkumulátor kapocsfeszültsége az indítómotor bekapcsolásakor?
   c) Mekkora teljesítményt vesz fel az indítómotor?
   d) Milyen hatásfokkal működteti az akkumulátor az indítómotort?
3. Egy áramforrás kapcsain terheletlen állapotban 9 V a feszültség. 20 ohmos terhelés esetén a kapocsfeszültség 8,6 V-ra csökken.
   a) Számítsuk ki a 20 ohmos terhelő ellenálláson folyó áram erősségét!
   b) Mekkora az áramforrás belső ellenállása?
   c) Mekkora áram folyna a telepre kapcsolt 10 ohmos ellenálláson?
   d) Mekkora az a legnagyobb áramerősség, amelyet ez az áramforrás szolgáltatni tudna?

3



4. Egy áramforrás kapcsain 4 ohmos terhelésnél 6 V feszültséget, 8 ohmos terhelésnél 9 V feszültséget mértünk.
   a) Határozzuk meg az áramforrás üresjárási feszültségét és belső ellenállását!
   b) Mennyi lenne a kapocsfeszültség 10 ohmos terhelés esetén?

4



2. Vezetési jelenségek

2.1. Elektromos áram folyadékokban. Kémiai áramforrások



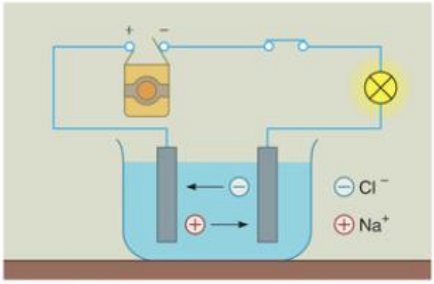
124.1. Az elektrolitok vezetik az elektromos áramot

Ha két szénrudat vagy két rézlemezt folyadékba merítünk, és néhány voltos feszültséget kapcsolunk a folyadékra, áramerősség-mérővel vagy érzékeny izzóval megfigyelhetjük, hogy folyadékoknál is vannak vezetők és szigetelők. Szigetelő például az olaj, a glicerin, az alkohol és a desztillált víz.

A csapvíz már gyengén vezet. Ha konyhasót oldunk fel benne, fokozatosan jobb vezetőnek mutatkozik. Ha néhány percig áramot vezetünk az oldaton keresztül, észrevehetjük, hogy a folyadékba merülő elektródokon anyag válik ki.

Kémiai tanulmányainkból tudjuk, hogy az **elektrolitok*** (bázisok, savak, sók vizes oldatai) **vezetik az elektromos áramot.** Az oldódás során a molekulák ionokra bomlanak (disszociálnak*). Az elektrolitokban, a fémektől eltérően, nem az elektronok, hanem **a pozitív és negatív ionok a töltéshordozók.**

Pl. a konyhasó (NaCl) vizes oldatában a Na^+- és a Cl^--ionok a mozgásképes töltéshordozók.



124.2. A konyhasó vizes oldatának áramvezetése

Az áramforrás elektromos mezőjének hatására a pozitív ionok a negatív elektród (a katód), a negatív ionok a pozitív elektród (az anód) felé vándorolnak, az elektródokon semlegesítődnek és kiválnak. Az elektródokon történő anyagkiválás az **elektrolízis.**

Az elektrolízis fontos szerepet játszik a technikában, például a fémbevonatok készítésénél (galvanizálás*).

Az elektrolízis tudománytörténeti szempontból is jelentős. Az elektrolízis törvényeinek felfedezése a nagy angol kísérleti fizikus, *Faraday* nevéhez fűződik.

Faraday megállapította, hogy az elektródokon kiváló anyag mennyisége arányos az átáramló töltésmennyiséggel. Mérései szerint 1 mólnyi 1 vegyértékű anyag kiválasztásához 96 500 C töltésmennyiség szükséges. Fel lehetett tételezni, hogy egy anyag minden atomjának kiválasztása ugyanannyi töltést igényel. Így 1 db 1 vegyértékű ion közömbösítéséhez szükséges töltésmennyiség:

$$q = \frac{96\,500\ \text{C}}{6{,}2 \cdot 10^{23}} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\text{C}.$$

2 vegyértékű ionra 2-szer, 3 vegyértékű ionra 3-szor ennyi töltés adódott.

Az elektrolízis törvényeiből következtettek először arra, hogy az elektromosságnak is van elemi mennyisége, a $q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C töltés.

Kémiai tanulmányainkból tudjuk, hogy különböző anyagú elektródok elektrolitba merülésekor az elektródok között elektromos feszültség jön létre, tehát áramforrás keletkezik. A jelenséget Luigi Galvani (1737–1798) olasz orvos-fizikus észlelte először híres békacomb-kísérletében. A felfedező emlékére az ilyen áramforrást **galvánelemnek** nevezték el.

A galvánelem keletkezésének alapja, hogy az elektróda és az elektrolit határfelületén az egyik anyagból a másikba fémionok lépnek át olyan irányba, hogy ezáltal alacsonyabb kötési energiájú állapotba kerüljenek. Mivel érintkezés előtt az elektróda és az elektrolit is semleges volt, a fémionok átlépése a két anyag határfelület menti ellentétes előjelű feltöltődését eredményezi. A töltésszétválasztás a létrejövő elektromos mező

erőhatása ellenében történik. A szétválasztott töltések kiegyenlítődése csak a galvánelem kapcsait összekötő vezetőn keresztül valósulhat meg. A töltésszétválasztás során felépülő elektromos mező energiája a **kémiai kötési energia** csökkenéséből származik. Erre utal a **kémiai áramforrás** elnevezés is.

Az elektródok és az elektrolit anyagától függően különböző **galvánelemek** készíthetők. Kis teljesítményű elektromos eszközökben (elemlámpa, távirányító, óra, hordozható rádió stb.) gyakori áramforrás az 1,5 V feszültségű **szárazelem** (rúdelem). Többféle méretben és formában is előfordul (mikroelem, ceruzaelem, góliátelem és több elem sorba kapcsolásával előálló 4,5 V-os vagy 9 V-os telep).

A hagyományos szárazelemben cinkhenger a negatív, szénrúd a pozitív elektróda. Az elektrolit nedvszívó anyagba itatott ammónium-klorid oldat. A kiszáradástól bitumenszigeteléssel védik.

A hagyományos szárazelem használaton kívül is lemerül. A kilyukadó cinkhengeren átszivárgó elektrolit károsíthatja a készüléket és a környezetet.

Ezek a hátrányok kevésbé jelentkeznek és nagyobb terhelés is lehetséges a szárazelemek továbbfejlesztett változatainál, az **alkáli elemeknél.**

Az **akkumulátor** (ellentétben az előbbiekben szereplő egyszer használatos szárazelemekkel) újratölthető galvánelem. Az akkumulátor feltöltésénél, elektrolízis eredményeként, az elektródák felülete különböző anyagi minőségűvé válik. Ilyenkor a befektetett elektromos energia kémiai energiává alakul. Ha a feltöltött akkumulátorra fogyasztót kapcsolunk, az akkumulátor galvánelemként áramot indít (kisül), kémiai energiájának csökkenése árán elektromos energiát nyerünk vissza.

Az akkumulátorok felhasználhatósága szempontjából a feszültség mellett fontos jellemző a méret és a **kapacitás.** Akkumulátorok kapacitásán a kinyerhető töltésmennyiséget értik, amit amperórában (Ah) adnak meg.



125.1. *Hányféle akkumulátort használunk rendszeresen?*

Az **ólomakkumulátor** higított kénsavba merülő elektródái feltöltött állapotban ólom és ólomdioxid, kisütött állapotban mindkettő ólom-szulfát. Az ólomakkumulátor viszonylag olcsó és képes az autók 100 A nagyságrendű indító áramát szolgáltatni. Ezért gépkocsikban ma is szinte kizárólag ezt a típust használják.

Az akkumulátorok fejlesztése elsősorban arra irányul, hogy minél kisebb méretekben minél nagyobb kapacitást érjenek el. Ilyen vonatkozásban előrelépést jelent a **nikkel-metálhidrid** (NiMH) akkumulátor, melyet többek között laptopoknál, mobiltelefonoknál alkalmaznak.

A mai legkorszerűbb típusnak a **lítiumion-akkumulátor** tekinthető. Ez már alkalmas egy feltöltéssel az elektromos autók mintegy 100 km-es úton történő üzemeltetésére.

A nagyvárosok levegőjének szennyezettsége és a kőolajkészletek kimerülése egyre sürgetőbbé teszi az elektromos autók elterjesztését. Ebben az akkumulátorok fejlesztése döntő szerepet játszik.

Fontos tudnunk, hogy az **elhasznált galvánelemek és akkumulátorok nem dobhatók a háztartási szemétbe!** Anyaguk súlyosan szennyezné a talajt és a benne lévő vizeket. A használt kémiai áramforrások elhelyezésére gyűjtőpontokat alakítanak ki (pl. szupermarketekben, elektronikai áruházakban).

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Miért hámozza le gyakran a fák kérgét a villámcsapás?
2. Miért kapcsoljuk töltéskor a töltő pozitív pólusát az akkumulátor pozitív pólusához?
3. Mi a fizikai hasonlóság és az eltérés az akkumulátor és a kondenzátor között?
4. Melyik autótípus rokonszenvesebb számunkra: a hagyományos vagy az elektromos autó? (Vitassuk meg érveinket az osztálytársakkal!)

2.2. Elektromos áram gázokban és vákuumban (Kiegészítő anyag)

A levegőt általában jó elektromos szigetelőnek tartjuk, egyébként nem mernénk a nagyfeszültségű távvezetékek közelébe menni. De tudjuk azt is, hogy a szalaggenerátor vagy szikrainduktor* elektródái közötti szikrakisülés* a levegőben folyó elektromos áramot jelent. Elektromos áram a villám is, amelynél az áramerősség a 100000 A értéket is elérheti. A levegő tehát vezetőként és szigetelőként egyaránt viselkedhet.

Figyeljük meg, hogy egy égő gyertya fölé helyezett feltöltött elektroszkóp gyorsan elveszíti a töltését!

A hőhatások, a mindenhol jelen lévő radioaktív sugárzás, a világűrből érkező kozmikus sugárzás, a Nap sugárzása a levegőben és más gázokban is kifejtik ionizáló hatásukat*. Ezért a gázok mindig tartalmaznak kevés töltéshordozót (ionokat és elektronokat). Gyengébb elektromos mezők hatására ezek a töltéshordozók áramlásba jönnek, de általában csak elhanyagolható erősségű, látható következményekkel nem járó áram folyik a levegőben és más gázokban is.

A gázok áramvezetése akkor válik jelentőssé, ha nagyobb térerősség hatására bekövetkezik az úgynevezett ütközési ionizáció*. Ekkor az elektromos mező a jelen lévő töltéshordozókat annyira felgyorsítja, hogy azok a semleges atomokkal, molekulákkal ütközve ion-elektron párokat keltenek. Ezek előjelük szerint a megfelelő elektróda felé felgyorsulva újra ionizálnak és így tovább.

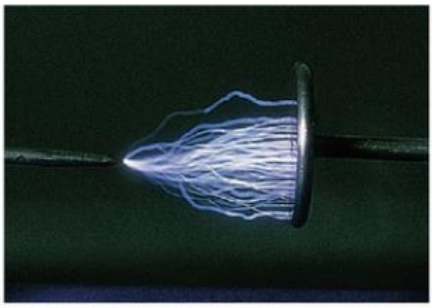
A felgyorsult töltéshordozók a semleges atomokkal, molekulákkal történő ütközéskor nemcsak ionizálnak, hanem kisebb energiájú ütközéseknél a gázrészecskék elektronjait magasabb energiájú (gerjesztett) állapotba* hozzák, amelyből azok fénykibocsátással kerülnek vissza alapállapotukba. A kibocsátott fény színe függ a gáz anyagi minőségétől.

A gázok ütközési ionizációjának tehát kísérőjelensége a gáz fénykibocsátása. **A gázok áramvezetésének gyakorlati alkalmazásai általában a fényhatásokkal függenek össze.**

Érdekes fényjelenségeket figyelhetünk meg, ha szikrainduktor néhány ezer voltos feszültségét fokozatosan csökkenő nyomású kisülési csősorozatra kapcsoljuk (keskeny szikra, kiszélesedő fényoszlop, majd különféle szaggatott fénysávok).

A nagyvárosok éjszakai fényeit adó **reklámcsövek,** az izzólámpánál lényegesen jobb hatásfokú fénycsövek, a kompakt fénycsövek, a glimmlámpák (kis fogyasztású, vöröses fényű jelzőlámpák kapcsolókban, fáziskeresőben) mind-mind a csökkentett nyomású gázokban folyó elektromos áramot hasznosítják.

Egyre több helyen találkozhatunk figyelemfelkeltő vagy dekorációs céllal elhelyezett, színes, imbolygó fényfonalakat tartalmazó plazmagömbbel. (Tankönyvünk címlapján is ilyen részlet látható.) A plazmagömb kisnyomású nemesgázt tartalmazó üvegedény. A benne lévő nagy váltakozó feszültségű generátor elektromos mezője ionizálja a gömbben lévő gáz egy részét. Így elektronokból, ionokból és semleges molekulákból álló, úgynevezett plazma** jön létre. A plazma nagy sebességű



126.1. A szikrainduktor elektródái közötti szikrakisülésben is elektromos áram folyik. *Hol a legnagyobb a térerősség?*



126.2. Kisülési csősorozat: balról jobbra csökken a nyomás



127.1. Régebben sokfelé alkalmaztak neonfeliratokat



127.3. Plazmagömb

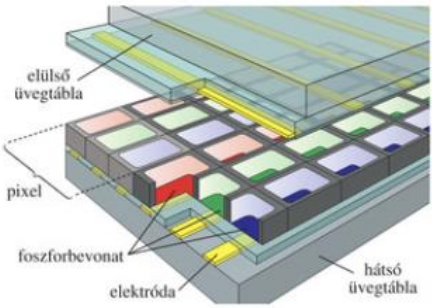
töltött részecskéi főként az erővonalak mentén haladva kényszerítik fénykibocsátásra a molekulákat.

Az elektromos mező a gömbön kívül is folytatódik, ezért világít, meglepő módon, a gömbhöz közelített fénycső vagy kompakt fénycső. A gömbhöz érintett ujjunk, mint megosztott vezető, erősíti a helyi elektromos mezőt, így ujjunk felé irányul, ezáltal felerősödik a fényfonal.

A **plazmatévé** működésében is fontos szerepet játszik a gázok áramvezetése és fénykibocsátása. Egyszerűen fogalmazva azt mondhatnánk, hogy a plazmatévé képét a képernyő milliónyi apró neoncsöve hozza létre. Minden egyes képpont (pixel) a piros, zöld és kék szín kibocsátására három miniatűr kamrából áll. A kamrák két üvegtábla között helyezkednek el és neon-xenon gázkeveréket tartalmaznak. Minden kamrát egy-egy elektróda irányít, melynek elektromos impulzusára a gázkeverék plazmaállapotba kerül (innen az elnevezés), és UV fényt bocsát ki. Ez a fény gerjeszti a kamra hátsó falának foszforbevonatát a rá jellemző színű látható fény kibocsátására. Egy képpont három kis kamrájának szabályozott erősségű sugárzásából színkeveréssel áll elő a képpontra jellemző szín. Több millió pixel fénye adja az éles, nem vibráló képet.

A fényképezőgép **vakujának** több száz voltra töltött kondenzátora exponáláskor a másodperc törtrésze alatt kisül. A kisülési áram a villanócsőben lévő xenongázt plazmaállapotba hozza, és erős fényimpulzus kibocsátására kényszeríti.

Légüres térben (vákuumban*) csak akkor folyhat elektromos áram, ha oda kívülről töltéshordozókat juttatunk. Ez gyakorlatilag úgy valósítható meg, hogy a zárt csőbe nyúló negatív fémelektródot (katódot) elektronkibocsátásra kényszerítjük. A fémek kristályrácsában szabadon mozgó elektronok kötődnek a fémekhez, ezért a fémkatód is csak valamilyen energiabefektetés hatására bocsát ki elektronokat.



127.2. A plazmatévé szerkezete



127.4. Plazmatévé és a képernyő egy részlete



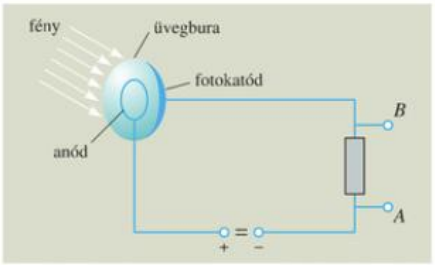
128.1. Szívvizsgálat EKG-készülékkel



128.3. Nagyítás elektronmikroszkóppal

3D

A légüres tér vezetővé tételének egyik módja a **termikus emisszió**,** amelynél az elektromos árammal felizzított katód bocsát ki elektronokat. Az anód vonzására az elektronok a vákuumban felgyorsulnak, elektromos és mágneses mezőkkel eltéríthetők, a megfelelő bevonatú cső falába ütközve felvillanásokat okoznak. A termikus elektronemissziót felfedezőjéről Edison-hatásnak is nevezik (1883). Ilyen elven működő **katódsugárcsövet*** tartalmaz a hagyományos tévékészülék, az elektromos feszültség időbeli változását felrajzoló oszcilloszkóp*, a szív és az agy elektromos jeleit mutató EKG- és EEG-készülék** vagy a fénymikroszkópnál lényegesen nagyobb felbontóképességű elektronmikroszkóp*.



128.2. Fotocella elvi ábrája. *Hogyan változik a feszültség (U_{AB}) a megvilágítás hatására?*

A vákuumot vezetővé tehetjük **fotoemisszió*** (más néven **fényelektromos jelenség** vagy **fotoeffektus**) útján is. Ilyenkor fény hatására lépnek ki elektronok a katódból. Ez történik például a **fotocellánál*,** amely elektromos áram fénnyel történő vezérlésére használható. A fotocella sokféle módon nyer alkalmazást a technikában: pl. tűz- és betörésriasztásnál, kapu-automatákban, termékek számlálásánál, gyártási hiba vagy balesetveszély miatt gépek automatikus leállításánál stb.

Fémbe ütköző felgyorsított töltéshordozók is lökhetnek ki onnan elektronokat, és lehetnek erősebb elektromos áram elindítói. Így működik például a fotoelektron-sokszorozó*, amelynél a leggyengébb sugárzás is észlelhető az általa elindított elektronlavina következtében.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. *a)* A tárgyalt vákuumcsövek közül melyikkel lehet fényingadozást megfelelő áramingadozássá alakítani?

b) A vákuumcsövek közül melyik alkalmas áramingadozás fényingadozássá alakítására? Hol találkozunk ennek alkalmazásával?

FELADATOK

1. Soroljunk fel a gázok áramvezetésére vonatkozó olyan példákat, amelyekkel lakásunkban, lakóhelyünk környékén találkozunk!

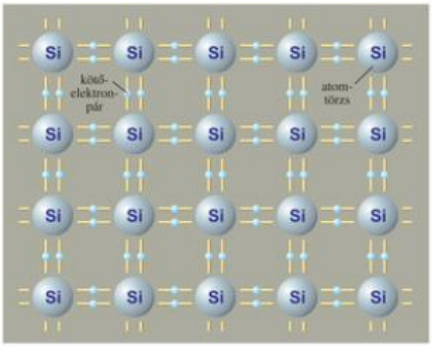
2. Normál állapotú levegőben közelítően 10^{-6} m az elektron szabad úthossza és 10^{-18} J a molekulák ionizációs energiája. Milyen térerősségnél és mekkora sebességgel képes az elektron ionizálni?

2.3. Elektromos áram félvezetőkben

Kapcsoljunk néhány voltos feszültséget fotoellenállásra, és mérjük az áramerősséget! Figyeljük meg, hogy a fotoellenállás megvilágításakor jelentősen nő az áramerősség!

Mérjük a 1,5 V-os feszültség hatására egy termisztoron átfolyó áram erősségét! Ha a termisztort kezünkkel vagy rövid ideig lánggal melegítjük, áramnövekedést figyelhetünk meg.

A melegítés erősíti a szilárd félvezető anyag kötött részecskéinek hőmozgását, ennek pedig – a fémes vezetőkhöz hasonlóan – ellenállás-növelő szerepe van. Ha mégis csökken az ellenállás, akkor ez azt jelenti, hogy a melegítésnek egy másfajta, jelentősebb következménnyel is kell járnia! Az ellenállás csökkenésének oka: melegítéskor és megvilágítás hatására szabad töltéshordozók keletkeznek a félvezető anyagban.



129.2. *Miért nem vezet a tiszta szilíciumkristály hideg és sötét környezetben?*

A félvezető anyagok elektromos vezetőképességük alapján a fémek és a szigetelők közé sorolhatók. Alacsony hőmérsékleten és sötétben szigetelőként viselkednek, megvilágításra vagy melegítésre (már szobahőmérsékleten is) pedig vezetővé válnak. Félvezető anyagok például a szilícium, a germánium, a szelén, a gallium-arzenid stb.

Vizsgáljuk meg a szilíciumkristálynak, mint tipikus félvezető anyagnak, az elektromos viselkedését!

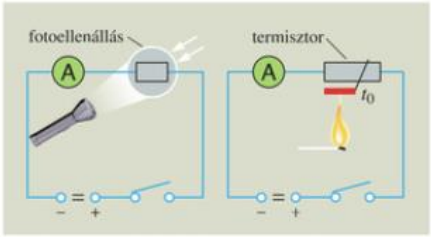
A szilícium a periódusos rendszer negyedik oszlopában található, külső elektronhéján 4 vegyértékelektront tartalmaz. A Si-kristályban minden atom négy másik atomhoz kapcsolódik elektronpárok segítségével. Ebben az állapotban nincsenek szabad töltéshordozók, a Si-kristály szigetelő.

A vegyértékelektronok kristálybeli kötődése azonban gyenge, szobahőmérsékletű hőmozgás vagy fény hatására egyes elektronok már kiszakadnak a kötésből. Ezután **szabad elektronként** mozognak a kristályban.

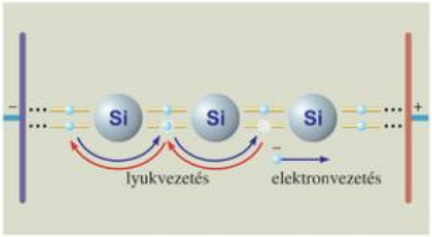
Minden kötésből kiszakadt elektron helyén marad egy elektronhiány, egy **pozitív lyuk*.** A hőmozgás folytán a szomszédos kötésben lévő elektronok átugorhatnak ebbe a lyukba, és így az ő helyükön jelenik meg a pozitív lyuk. A kristályban tehát a pozitív lyukak is vándorolhatnak (ami tulajdonképpen kötésből kötésbe történő elektronáramlás következménye).

Ha feszültséget kapcsolunk a Si-kristályra, a negatív szabad elektronok a pozitív pólus felé, a pozitív lyukak pedig a negatív pólus felé áramlanak.

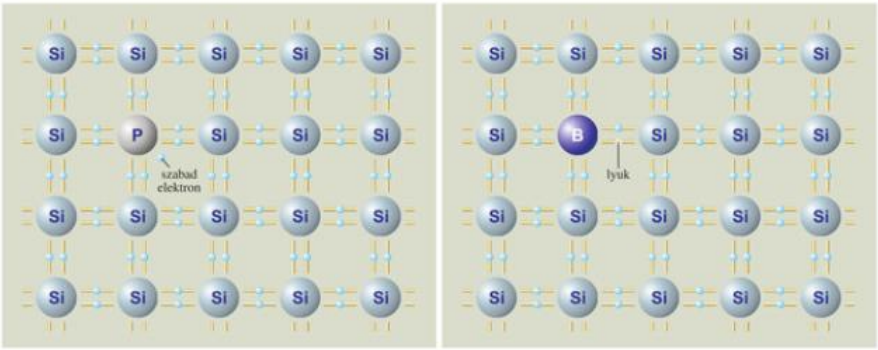
Tiszta Si-kristályban a vezetésben részt vevő negatív elektronok és pozitív lyukak száma megegyezik. Ez a **sajátvezetés*.**



129.1. *Miért csökken a félvezető ellenállása megvilágítás, illetve melegítés hatására?*



129.3. Sajátvezetés: a negatív szabad elektronok a pozitív pólus felé, a pozitív lyukak a negatív pólus felé haladnak



130.1. Az n-típusú félvezető (balra) 5 vegyértékű, míg a p-típusú 3 vegyértékű szennyezőatomokat tartalmaz

A hőmérséklet emelkedése vagy erősebb megvilágítás növeli az elektron-lyuk párok* számát. A kristály áramvezetését ez jobban befolyásolja, mint az energiafelvétel következtében erősödő rácsrezgések. **Melegítés vagy megvilágítás hatására tehát a félvezető anyagok ellenállása csökken.**

A félvezető anyagok áramvezető képessége növelhető úgy is, hogy idegen, úgynevezett **szennyezőatomokat*** építenek a kristályba.

Ha a Si-kristályba valamely atom helyére egy 5 vegyértékű elemet, például foszfort (P) ültetnek, akkor ennek az 5 vegyértékelektronjából* a kristálybeli kötések csak 4 elektront igényelnek, 1 elektron tehát szabaddá válik. A kristálykötésből ez az elektron nem hiányzik, ezért nem marad a helyén elektronbefogásra képes pozitív lyuk.

Minden 5 vegyértékű szennyezőatom tehát 1-1 szabad elektronnal járul hozzá a kristály vezetőképességéhez. Az 5 vegyértékű szennyezőatomokat tartalmazó félvezetőkben a szabad elektronok (negatív töltéshordozók) vannak többségben. Az ilyen kristályt **n-típusú félvezetőnek*** nevezzük.

Ha Si-kristályba három vegyértékű atomokat, például bórt (B) adagolunk, akkor minden bóratomnál hiányzik egy elektron a kristálybeli kötésből. Ezt az elektront a hőmozgást végző környező atomokból könnyen befogja a bór. Így minden bóratom 1-1 pozitív lyukat eredményez a kristályban. Az olyan félvezetőt, amelyben a többségi töltéshordozók a pozitív lyukak, **p-típusú félvezetőnek*** hívjuk.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Mi a hasonlóság és mi az eltérés az elektronvezetés és a lyukvezetés között?
2. Mi a hasonlóság és az eltérés a tiszta félvezetők és az elekrolitok áramvezetése között?
3. Mi a különbség elektromos vezetés szempontjából a fémek, a félvezető kristályok és a szigetelők között?
4. Más következménnyel jár-e a melegítés vagy megvilágítás a tiszta és a szennyezett (n-típusú vagy p-típusú) félvezetőknél?
5. A félvezetők gyártása különlegesen steril körülmények között folyik. Mi lehet ennek az oka?
6. Nézzünk utána, hogy hol található és miről nevezetes a Szilícium-völgy!

2.4. Félvezető eszközök

A 20. század második felében az addig egyeduralkodó vákuumcsöves eszközöket egyre több területről kiszorították a kisebb méretű, kisebb teljesítményigényű és kevésbé sérülékeny félvezető eszközök. A méretek további, több nagyságrendű csökkentésével, integrált áramkörök kialakításával a félvezetők alkalmazása forradalmasította az elektronikát. Gondoljunk pl. arra, hogy a múlt század közepén előállított első, elektroncsöves számítógépek még többteremnyi helyet igényeltek. Képességeikben ugyanakkor meg sem közelítették a mai, zsebben hordozható okostelefonokat. A félvezető technika fejlődése napjainkban is mindig újabb meglepetéseket hoz számunkra.

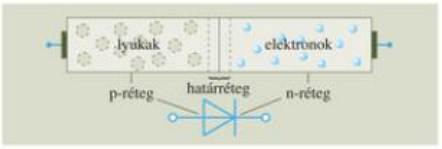
Tekintsük át röviden a legegyszerűbb félvezető eszközök működési elvét és felhasználási lehetőségeit!

EGYRÉTEGŰ FÉLVEZETŐ*

A **fotoellenállás*** és a **termisztor*** olyan félvezető eszközök, melyek csak egyféle szennyezett félvezető réteget tartalmaznak.

Kapcsoljunk sorba 6–12 V-os áramforrásra fotoellenállást és érzékeny izzót. Figyeljük meg, hogy ha a fotoellenállást megvilágítjuk (napfénnyel, izzólámpával, zseblámpával), akkor a kis izzó is világít! Az áramkör egy fényjelző berendezést modellez.

Kapcsoljunk 6 V-os áramforrás áramkörébe sorosan termisztort és 6 V; 0,3 A feliratú izzót! Figyeljük meg, hogy az izzó fényereje fokozatosan növekszik, a termisztor pedig egyre melegebb lesz. Az áram hőhatása csökkenti a termisztor ellenállását, és ezáltal egy áramkör fokozatos indítását biztosítja. A fokozatos indítás védi az izzólámpákat a hirtelen felmelegedéssel járó igénybevételtől. (Gondoljunk arra, hogy a lakásban is rendszerint a bekapcsolás pillanatában égnek ki az izzók.)



131.2. A dióda szerkezete, rajzjele

A fotoellenállás esetén a megvilágítás növekedése, a termisztor esetén a hőmérséklet növekedése okoz ellenállás-csökkenést. E tulajdonságaik alapján fénymérő, illetve ellenállás-hőmérő készítésére, továbbá hő- vagy fényjelző berendezések működtetésére használhatók.

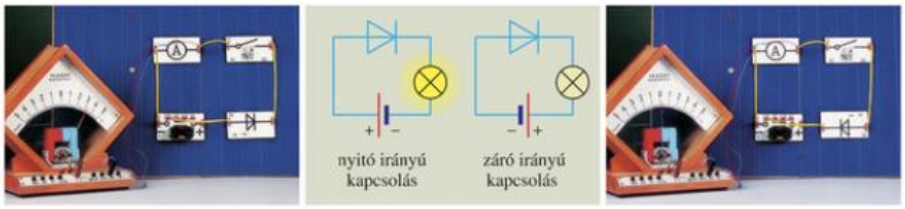
KÉTRÉTEGŰ FÉLVEZETŐ*

A **dióda*** egy p- és egy n-típusú félvezető rétegből áll.

Kapcsoljunk 6 V-os áramforrás sarkaira sorosan egy Si-diódát és egy izzót (pl. rizsszemizzót)! Figyeljük meg, hogy a dióda egyik irányban vezetőként, a másik irányban szigetelőként viselkedik!

A p- és az n-réteg találkozásánál a negatív elektronok és a pozitív lyukak semlegesítik egymást. Ezáltal egy töltéshordozókban szegény **határréteg*** alakul ki.

Ha az n-réteghez az áramforrás pozitív, a p-réteghez a negatív pólusát kötjük, akkor az elektromos mező „kiszívja" a töltéseket a határrétegből. A szigetelő jellegű határréteg kiszélesedik, a dióda nem vezet **(záró irányú kapcsolás*).** Ha viszont az n-réteghez a negatív, a p-réteghez a pozitív pólust kapcsoljuk, akkor az elektromos mező feltölti a határréteget töltéshordozókkal. Megszűnik a határréteg szigetelő jellege, a dióda vezet **(nyitó irányú kapcsolás*).**



131.1. A dióda nyitó irányú (balra) és záró irányú kapcsolása



132.1. Űrhajó napelemmel. *Mi történik, ha nem süt a Nap?*



132.2. Infravörös fényt adó LED a távirányítóban

A **dióda** a vázolt tulajdonsága alapján **felhasználható a váltakozó feszültség egyenirányítására*.**

Vannak speciális kialakítású diódák is.

A **fotodióda*** határrétege megvilágítható. Az itt elnyelődő fény energiája elektron-lyuk párok létrehozására és szétválasztására fordítódik. A fotodióda tehát áramforrásnak használható. Ilyen elven működik a **fényelem (napelem)*,** amely a fény energiáját közvetlenül elektromos energiává alakítja.

Ma általában szilícium alapú napelemeket használnak, amelyek soros és párhuzamos kapcsolásával napelemtelepeket hoznak létre. Egyre szélesebb körben alkalmazzák őket: nélkülözhetetlenek az űrhajók, mesterséges holdak áramforrásaként, de egyes zsebszámológépek is ilyenekkel működnek. Mivel környezetkímélők, ma már a közlekedésben és települések áramellátásában is szerepet kapnak. A napfényből nyert energia egy részét akkumulátorokba vagy a központi hálózatba táplálják, és fényszegény időszakban innen veszik fel a szükséges energiát.

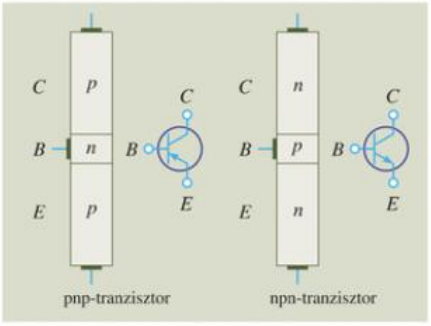
A fotodiódához képest fordított irányú energiaátalakítást valósít meg a **fénykibocsátó dióda**,** más néven **LED** (Light Emitting Diode). Nyitó irányú kapcsolás esetén a határrétegbe áramló és találkozáskor egymást megsemmisítő negatív elektronok és pozitív lyukak energiája fény formájában távozik a diódából. A látható fényt kibocsátó LED-lámpák korunk legenergiatakarékosabb fényforrásai. Infravörös fényt kibocsátó LED van például a tévé vagy videó távirányítójában.

A **CD-lejátszókban** fénykibocsátó **lézerdióda*** éles fénysugara tapogatja le a CD lemezt. A CD lemezen a felvételnél kialakított, pontonként változó fényvisszaverő tulajdonság hordozza a hang- vagy képi információt. A lejátszásnál a lemezről visszavert fénysugár változásai vezérlik az elektromos áramot, és ezzel hozzák létre az eredetinek megfelelő hangot vagy képet.

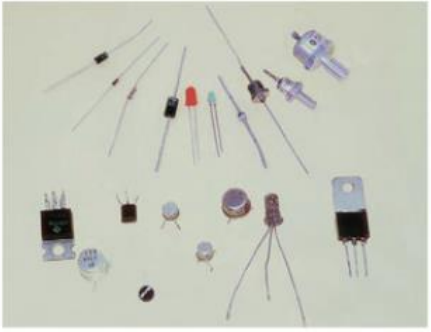
HÁROMRÉTEGŰ FÉLVEZETŐ*

A **tranzisztor*** három rétegének elnevezése: **emitter*** (E), **bázis*** (B) és **kollektor*** (C).

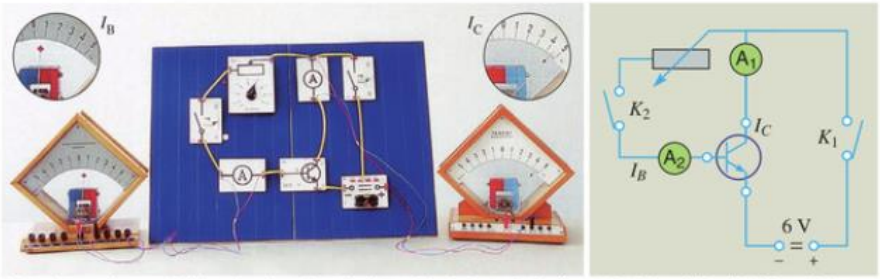
A rétegek jellegétől függően van **pnp-tranzisztor*** és **npn-tranzisztor*.** A kétféle típus működési elve és felhasználása is hasonló, csak az áramforrások polaritását kell megfordítani.



132.3. A tranzisztor szerkezete és rajzjele



132.4. *Melyik a dióda és melyik a tranzisztor?*



133.1. A tranzisztor erősítése. Az áramok a K_2 kapcsoló zárása után 0-ról növekedtek a látható értékre. *Hányszor nagyobb a kollektoráram növekedése a bázisáram növekedésénél?* (A_2 5 mA, A_1 50 mA méréshatárú.)

Vizsgáljuk meg kísérletileg egy npn-tranzisztor áramvezetését!

Állítsuk össze a *133.1. ábra* szerinti kapcsolást! Zárjuk először a K_1 kapcsolóval a kollektor-emitter áramkört! Az A_1 ampermérő nem jelez áramot, a tranzisztor nem vezet.

Ezután a K_1 kapcsolót hagyjuk zárva, és zárjuk a K_2 kapcsolóval a bázis-emitter áramkört is, melynek áramát az A_2 ampermérő méri! Meglepő, hogy nemcsak az A_2, hanem az A_1 műszer is áramot jelez, sőt az utóbbi kb. 100-szor nagyobbat.

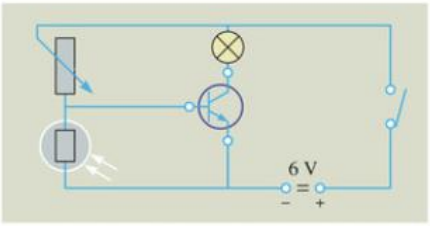
Ha a 20 kΩ-os változtatható ellenállást 1 kΩ-ig csökkentjük, a kollektoráram* növekedése ismét kb. 100-szorosa a bázisáram növekedésének. A tranzisztor tehát alkalmas erősítésre: a bázisáram kis változásai a kollektoráramban felerősítve jelentkeznek.

A működés elve röviden a következő: A K_1 kapcsoló zárásakor a tranzisztoron a kollektor-bázis diódarész záró irányú feszültséget kapott, ennek határrétege szigetelővé vált. A K_2 kapcsoló zárásakor a bázis-emitter diódarészen a nyitó irányú feszültség hatására áram jött létre. Ez az áram – a bázis csupán néhány µm-es vastagsága miatt – töltéshordozókat juttat a lezárt kollektor-bázis dióda határrétegébe is. A tranzisztor a bázisáram erősségétől függő mértékben végig vezetővé válik.

A tranzisztor erősítését megfigyelhetjük a *133.2. ábra* szerinti fényérzékelő kapcsolásnál is.

Alkalmazzunk érzékeny kisfeszültségű izzót (például rizsszemizzót)! A változtatható ellenállást állítsuk maximálisra (kb. 20 kΩ)! Figyeljük meg, hogy amikor a fotoellenállás nem kap fényt (takarásnál vagy a terem elsötétítésekor), az izzó világít!

Sötétítésnél ugyanis nő a fotoellenállás ellenállásának nagysága. A változtatható ellenállásból és fotoellenállásból álló feszültségosztón nő a fotoellenállásra jutó, vagyis a bázis és emitter közötti nyitó irányú feszültség. A tranzisztor kinyit, vezetővé válik.

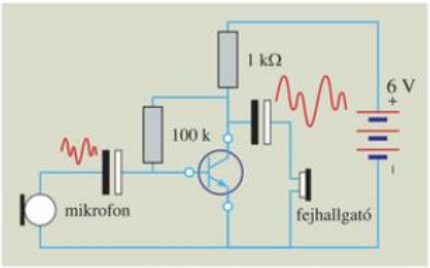


133.2. Fény-árnyék jelző kapcsolás. *Mikor világít az izzó?*

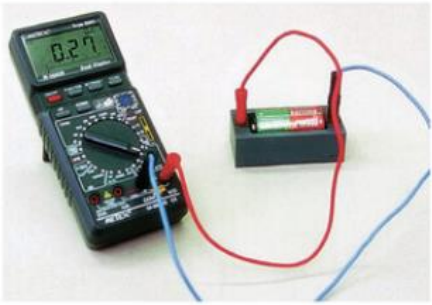
A fotoellenállás és a változtatható ellenállás felcserélésekor a kapcsolás fordított módon jelez: ha megfelelően beállítjuk a változtatható ellenállás értékét, akkor az izzó éppen sötétítésnél alszik el.

A **tranzisztorokat** az elektrotechnikában széles körben felhasználják **áramváltozások felerősítésére** (rádió, tévé, magnetofon, videó stb.).

A tranzisztor felfedezése (1947) nagy lökést adott az elektronika fejlődésének. John Bardeen [bardin], Walter Brattain [bretn] és William Shockley [sokli] amerikai fizikusok találmányukért 1956-ban Nobel-díjat kaptak.



133.3. Egyfokozatú erősítő kapcsolási rajza



134.1. A digitális multiméterrel egyszerűbb és biztonságosabb a mérés, mint az analóg mérőműszerekkel

A technika mai szintjén a tranzisztorokat, más áramköri alkatrészekkel (dióda, ellenállás, kondenzátor stb.) együtt rendszerint egymástól elválaszthatatlanul, kis szilíciumlapon alakítják ki a félvezető kristály különböző típusú, mértékű és formájú szennyezése útján. Ez az **integrált áramkör*** (IC). Egy mm^2 nagyságrendű félvezető lapka **(chip* v. csip*)** akár milliónyi integrált alkatrészt is tartalmazhat.

Napjainkban a számítógépektől a hírközlési, szórakoztatási célú elektronikus készülékeken át a korszerű mérőműszerekig és szabályozó eszközökig mindenhol alapvető szerepe van az integrált áramköröknek.

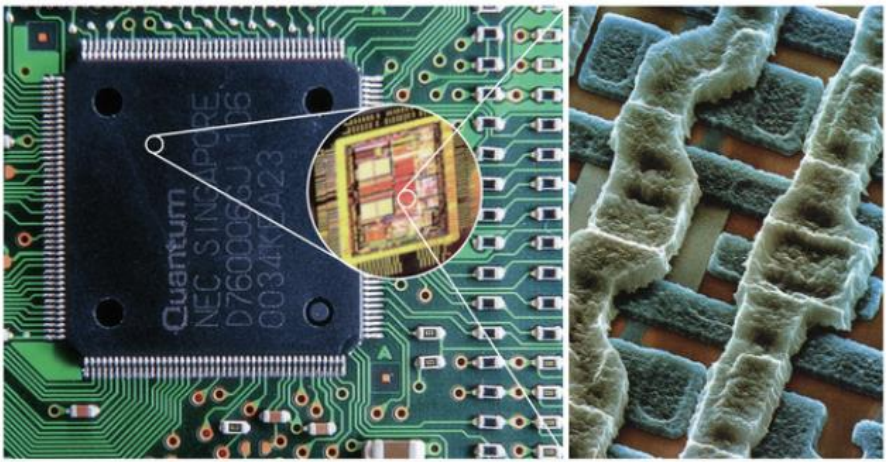
GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Melyik félvezető eszköz alkalmas
- *a)* váltakozó áram egyenirányítására?
- *b)* kis áramerősség-változások felerősítésére?
- *c)* érzékeny hőmérő készítésére?
- *d)* áramforrás készítésére?
- *e)* fényváltozásokból elektromos áramerősség-változások létrehozására?
- *f)* áramerősség-változásokból fényerősség-változások előidézésére?

2. Hogyan készítenénk termisztoros hőmérőt*?

3. Nézzünk utána interneten, hogy mi a különbség a naptelep és a napkollektor között!

3D



134.2. Integrált áramkör (csip) és egy kinagyított részlete. (4000-szeres nagyítás). *Keressünk friss híreket a tabletekben, telefonokban működő csipek műszaki jellemzőiről!*

Összefoglalás

A töltéshordozók meghatározott irányú rendezett mozgását **elektromos áramnak** nevezzük.

Áramirányon a pozitív töltések áramlási irányát, vagy a negatív töltések áramlásával ellentétes irányt értjük.

Az **áramerősséget** (I) a vezető keresztmetszetén áthaladó töltésmennyiség (Q) és az áthaladás idejének (t) hányadosával értelmezzük:

$$I = \frac{Q}{t}, \quad \text{mértékegysége: } 1\ \text{A} = 1\frac{\text{C}}{\text{s}}.$$

Az áramerősség függ az áramot létrehozó elektromos mező erősségétől (amit a feszültség jellemez), valamint a vezető töltésáramlást akadályozó hatásától (amit az ellenállás jellemez).

Ohm törvénye szerint egy vezetőn a feszültség és áramerősség között egyenes arányosság áll fenn. A vezetőre jellemző ellenállást (R) a feszültség (U) és az áramerősség (I) hányadosával értelmezzük:

$$R = \frac{U}{I}, \quad \text{mértékegysége: } 1\ \Omega = 1\frac{\text{V}}{\text{A}}.$$

A vezető ellenállása függ a vezető hosszától (l), keresztmetszetétől (A) és anyagi minőségétől, amit a fajlagos ellenállás (ρ) fejez ki:

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{A}.$$

Időben állandó elektromos áramot **áramkörrel** hozunk létre, melynek részei: áramforrás, vezető, fogyasztó, kapcsoló.

Az áramkörben a töltéshordozók **körbe áramlanak.** Az áramforráson kívül az áramforrásban szétválasztott töltések elektromos mezőjének hatására, az áramforráson belül ennek az elektromos mezőnek az erőhatásával szemben mozognak a töltések.

Az áramkörben többszörös **energiaátalakulás** folyik, melynek állomásai:
- az áramforrást működtető (kémiai, mozgási, fény stb.) energia;
- a pólusokon szétváló töltések elektromos mezőjének energiája;
- az áramló töltéshordozók mozgási energiája;
- a vezető anyagában a részecskék rendezetlen mozgásának energiája;
- a környezet energiája.

Az **elektromos mező munkája** a vezetőn (fogyasztón):

$$W = U \cdot I \cdot t, \quad \text{mértékegysége: } 1\ \text{J} = 1\ \text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}.$$

Az elektromos teljesítmény:

$$P = U \cdot I, \quad \text{mértékegysége: } 1\ \text{W} = 1\ \text{V} \cdot \text{A}.$$

A fejezetben vizsgált egyenáramú áramkörökben megfigyelhettük a töltésmennyiség és az energia megmaradását. Ezt fejezik ki a hálózatokra a **Kirchhoff-féle törvények** is.

A csomóponti törvény szerint bármely csomópontra:

$$\sum I = 0.$$

A huroktörvény szerint bármely áramköri hurokra:

$$\sum U = 0.$$

E törvények speciális eseteivel találkozhattunk a fogyasztók soros és párhuzamos kapcsolásánál.

Soros kapcsolásnál:

$$I_1 = I_2,$$
$$U = U_1 + U_2,$$
$$R = R_1 + R_2.$$

Párhuzamos kapcsolásnál:

$$U_1 = U_2,$$
$$I = I_1 + I_2,$$
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Az áramforrást modellezhetjük egy U_0 **üresjárási feszültséget** adó és egy R_b **belső ellenállással** rendelkező alkatrészként, ahol az R_k külső és az R_b belső ellenállás sorosan kapcsolódik.

Általános esetben az áramkörben folyó áram erőssége:

$$I = \frac{U_0}{R_k + R_b}.$$

Ez a **teljes áramkörre vonatkozó Ohm-törvény.**

Az anyagok elektromos szempontból lehetnek vezetők és szigetelők, de a két viselkedés között nincs merev határ.

Fémekben a szabad elektronok, **elektrolitokban** a pozitív és negatív ionok, **gázokban** ionok és elektronok vezetik az elektromos áramot.

A **gázok** gyakorlatban is hasznosítható áramvezetésénél a mindig jelen lévő kevés töltéshordozó megfelelő felgyorsításával és ütközési ionizációval valósítjuk meg a töltéshordozók utánpótlását.

Vákuumban általában a katódból termikus emisszió vagy fotoemisszió útján kibocsátott elektronok biztosítják az áramvezetést.

A **félvezetőkben** hő és fény hatására vagy szennyező atomok beültetésével szabaddá váló negatív elektronok és pozitív lyukak az elektromos töltéshordozók.

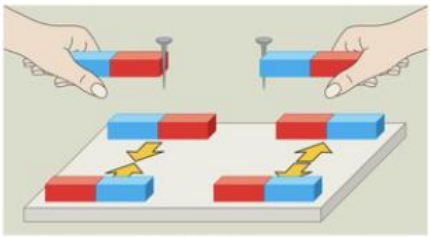
IV. fejezet



A MÁGNESES MEZŐ, ELEKTROMÁGNESES INDUKCIÓ

1. A mágneses mező

1.1. Emlékeztető



138.1. A mágneses kölcsönhatás vagy vonzásban, vagy taszításban nyilvánul meg



138.2. Pólus – görög szó, jelentése: sark



138.3. A iránytű északi pólusa a földrajzi északi irányt jelzi

Bizonyára sokan érezzük úgy, hogy az állandó mágnesekkel való első ismerkedés gyerekkorunk legérdekesebb élményei közé tartozik. A testek újszerű, meglepő viselkedésével szembesültünk.

Ma már megszoktuk, hogy **a mágnesek egymásra és a vastárgyakra erőt fejtenek ki.** Természetes számunkra a hűtőszekrényhez tapadó üzenő, a varródoboz tűtartója, a mágneses zár a szekrényajtón vagy az iránytű beállása az észak–déli irányba.

Általános iskolai tanulmányainkban részletesebben is megismerkedtünk a mágneses kölcsönhatással.

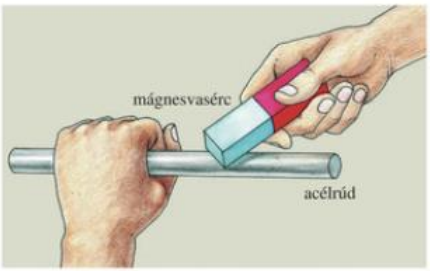
Tudjuk, hogy a mágnesrúd a végei közelében fejti ki a legerősebb hatást: itt vannak a mágneses pólusok. A mágneses dipólus* egyik végét **északi,** a másikat **déli pólusnak** nevezzük. **Az egyforma pólusok taszítják, a különbözők vonzzák egymást.**

A Föld is egy nagy mágnes, amelynek egyik pólusa az északi, a másik a déli sarok közelében van. Az iránytű a tengelye körül könnyen elforduló mágnestű. **Az iránytűnek azt a pólusát, amely egyensúlyi helyzetében észak felé mutat, északi pólusnak nevezték el.** Ebből következik, hogy a Föld földrajzi északi pólusa közelében a „Földmágnes" déli pólusa helyezkedik el.

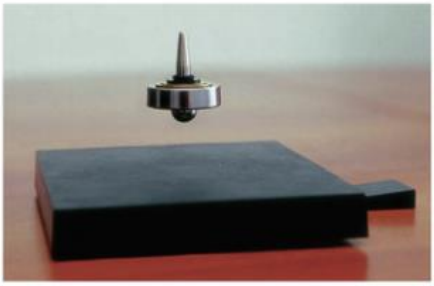
A mágnes közelébe vitt vastárgy mágnesként viselkedik: ez a **mágneses megosztás*** jelensége. Azzal magyarázható, hogy a vasban rendezetlen kis mágneses tartományok találhatók, amelyek a mágnes hatására rendeződnek, így a vastárgy is



138.4. *Miért csak mágnes közelében mágneses a kulcs?*



138.5. *Hogyan készíthetünk acélrúdból állandó mágnest?*



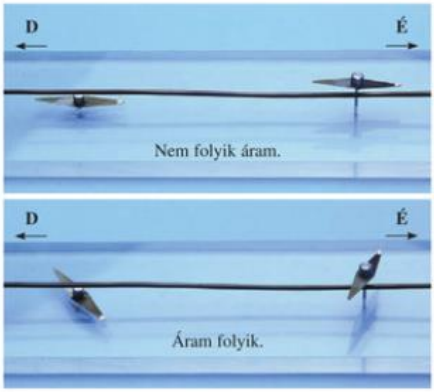
139.1. A mágneses pörgettyű lebeg a mágneses mezőben

mágneses dipólusként viselkedik. A vasnak a mágneshez közeli oldalán a mágnesével ellentétes pólus alakul ki, ezért vonzza mindig a mágnes a vasat. Hasonlóan viselkedik a nikkel, a kobalt és néhány ötvözet.

A mágnes eltávolítása után a lágyvasban megszűnik az elemi mágnesek rendezettsége, a lágyvas elveszti mágnességét. Az acél viszont részben megőrzi mágneses rendezettségét, ezért lehet acélból állandó mágnest készíteni.

Általános iskolai tanulmányainkból tudjuk, hogy – az elektromos kölcsönhatáshoz hasonlóan – a mágneses kölcsönhatásokat is mező közvetíti, a **mágneses mező (mágneses erőtér*).**

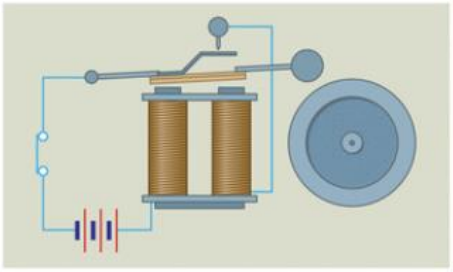
Mindennapi tapasztalatunk, hogy **mágneses mezőt** nemcsak állandó mágnessel, hanem **elektromos árammal is létrehozhatunk.** Az áram mágneses hatását *Oersted*** [örszted] dán fizikus észlelte először (1820). Ma már otthonunkban is sokféle elektromos eszköz található, amelyek az áram mágneses hatása alapján működnek. Ilyen többek között az elektromos csengő, az automata biztosíték, valamint a hajszárító, a porszívó és a mosógép elektromos motorja.

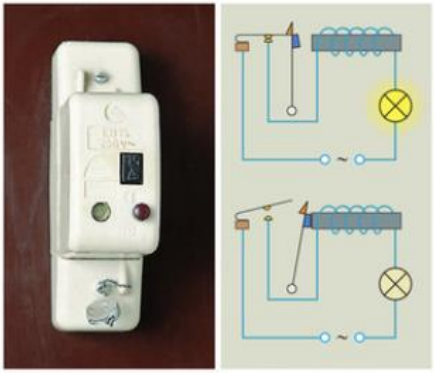


139.3. Az áramjárta vezető körül mágneses mező van

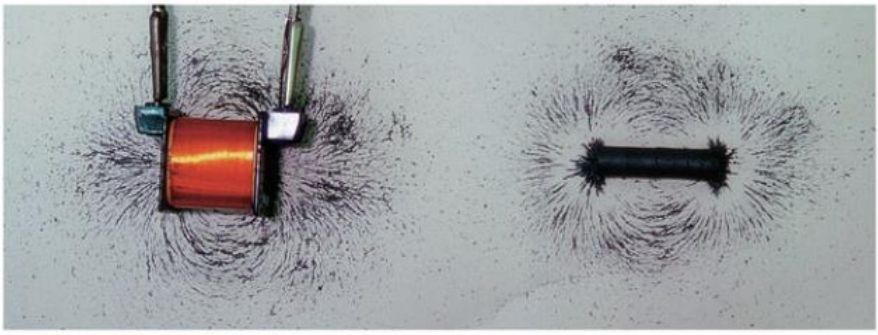


139.4. *Hans Christian Oersted* (1777–1851) bemutatja az áram mágneses hatását





139.2. *Magyarázzuk el a kapcsolási rajz alapján az elektromos csengő és az automata biztosíték működését!*

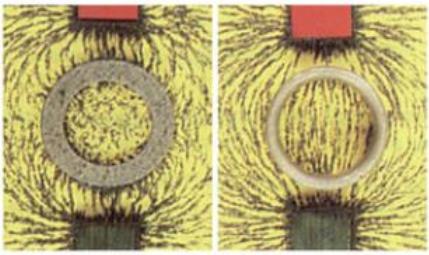


140.1. Az áramjárta tekercs mágneses mezője (balra) hasonló a rúdmágnes mágneses mezőjéhez (jobbra)

Megfigyelhetjük, hogy – a mágnesrúdhoz hasonlóan – **az árammal átjárt tekercs is mágneses dipólusként** viselkedik: egyik vége északi, a másik déli pólusként hat az iránytűre. Ha a tekercsben az áram irányát megváltoztatjuk, a tekercs mágneses pólusai is felcserélődnek.

Ha vasreszeléket szórunk mágnesrúd, illetve árammal átjárt tekercs környezetébe, a vasreszelék hasonló elrendeződése a mágneses mezők hasonló szerkezetét is mutatja.

Vasreszelékkel az is szemléltethető, hogy a vasgyűrű árnyékolja a mágneses mezőt.



140.2. A vasgyűrű árnyékolja, az alumíniumgyűrű nem árnyékolja a mágneses mezőt

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Soroljunk fel az elektromos és mágneses jelenségek közötti
   a) hasonlóságokat!
   b) eltéréseket!
2. Két egyforma kinézetű mágnesrúd és vasrúd közül hogyan lehetne eldönteni, hogy melyik a mágnes?
3. Mely anyagoknál figyelhető meg elektromos megosztás, és melyeknél mágneses megosztás?
4. A kapcsolási rajz alapján hogyan magyarázzuk
   a) az elektromos csengő működését? (*139.2. ábra*)
   b) az automata biztosíték működését? (*139.5. ábra*)
5. Milyen energiaátalakulások történnek egy elektromos csengő áramkörében?
6. Miért készítik mágneses mezőre érzékeny készülékek (pl. számítógépek) fémházát vasból?

FELADAT

1. Keressünk otthon minél több eszközt, amely állandó mágnest vagy elektromágnest tartalmaz!

1.2. A mágneses indukcióvektor*, indukcióvonalak, fluxus

A MÁGNESES INDUKCIÓVEKTOR

A mágneses és az elektrosztatikus kölcsönhatás többféle hasonlóságot is mutat. Jogos az a gondolat, hogy a mágneses mező jellemzésénél járjunk el az elektrosztatikában tanult minta szerint.

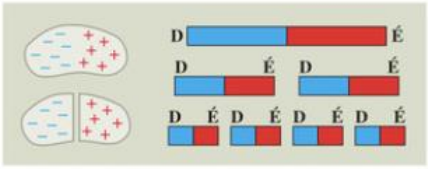
Az elektromos mezőt az egységnyi pozitív próbatöltésre gyakorolt erőhatása alapján jellemeztük. A mágneses mezőt így valamelyik egységnyi pólusra ható erő segítségével jellemezhetnénk. A logikus elgondolás megvalósítása azonban többféle nehézségbe is ütközik.

Végezzük el a következő kísérletet! Vegyünk egy kiegyenesített gemkapcsot, majd húzzuk végig rajta néhányszor egy irányban egy mágnes valamelyik pólusát! Állapítsuk meg iránytűvel az így kapott mágnes pólusainak jellegét! Ezután vágjuk el a gemkapcsot középen, és vizsgáljuk meg iránytűvel a két darab mágneses tulajdonságait!

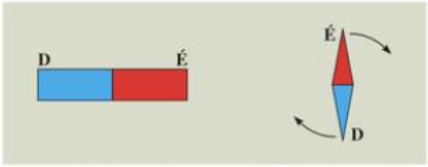
Azt tapasztaljuk, hogy ha egy mágneses dipólust kettévágunk, ismét dipólust kapunk. Hiába ismételjük ezt akárhányszor, nem tudjuk az egyik mágneses pólust a másiktól elválasztani. Így a mágneses mezőnek a mágneses pólusra gyakorolt hatása helyett mindig a mágneses dipólusra gyakorolt hatást figyelhetjük meg.

A mágneses pólus helye nem is határozható meg egyértelműen (különösen árammal átjárt tekercsnél nem). Az is gondot jelent, hogy a mágnesrúd pólusának erőssége változik ütés, melegítés vagy különböző mágneses mezők hatására.

A mágneses mező vizsgálatára felhasznált **mágnesnek az egyik pólusát nem tudjuk a másiktól elválasztani. A mágneses mezőt csak mágneses dipólussal vizsgálhatjuk.**



141.2. A kétféle elektromos töltés szétválasztható, a kétféle mágneses pólus viszont nem



141.3. A rúdmágnes mágneses mezője forgatónyomatékot fejt ki a mezőt vizsgáló mágneses dipólusra

Ha a mágneses mező a vizsgáló dipólus egyik pólusát például balra húzza, akkor a másik pólust jobbra tolja, azaz forgatóhatást fejt ki a mágneses dipólusra. Ezért **a mágneses mező erősségét a dipólusra** (például iránytűre) **kifejtett forgatónyomatékával jellemezhetjük.**

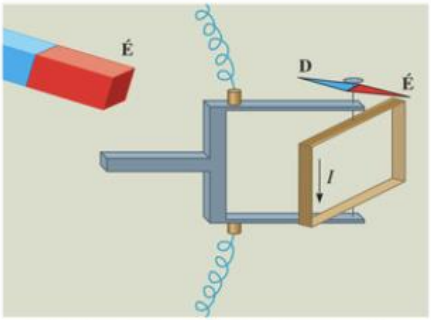
Egy adott mágneses mezőben egy adott vizsgáló dipólusra gyakorolt forgatónyomaték nem egyértelmű, függ a dipólus helyzetétől. Például a dipólus egyensúlyi helyzetében már nem hat forgatónyomaték. A legnagyobb forgatónyomatékot az egyensúlyi helyzetre merőleges helyzetben kapjuk. A mágneses mező jellemzésénél a vizsgáló dipólusra az adott helyen ható maximális forgatónyomatékot vesszük figyelembe.



141.1. Maximális forgatónyomatékú (balra), illetve zérus forgatónyomatékú helyzet a Föld mágneses mezőjében

3D

3D



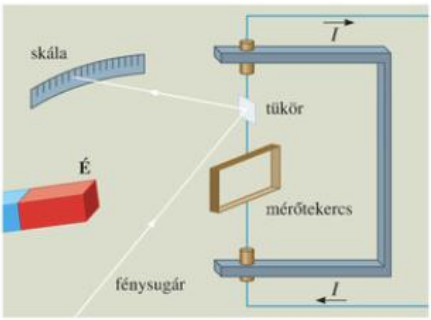
142.1. Kézi magnetométer és iránytű egyensúlyi helyzete

A pontosság, megbízhatóság érdekében állandó mágnes helyett árammal átjárt lapos tekercset, úgynevezett **magnetométert*** alkalmazunk vizsgáló dipólusként. A tekercs északi pólusát **jobbkéz-szabály*** alapján határozhatjuk meg. **Ha jobb kezünkkel úgy fogjuk meg a tekercset, hogy behajlított ujjaink az áram irányába mutassanak, akkor hüvelykujjunk a tekercs északi végét mutatja.**

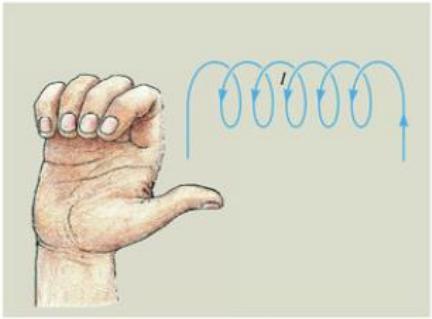
Függesszük fel a magnetométert rugalmas fémszálra! (*142.2. ábra*) Az elcsavarodás szöge egyenesen arányos a forgatónyomatékkal. Így az elcsavarodás szögéből következtetni tudunk a forgatónyomaték nagyságára.

Helyezzük a rugalmas szálon függő magnetométert a vizsgálandó mágneses mezőbe (például egy mágnesrúd vagy árammal átjárt tekercs közelébe)!

Vizsgáljuk meg, hogy adott erősségű mágneses mezőben mitől függ a magnetométerre ható legnagyobb forgatónyomaték!



142.2. Mágneses indukció vizsgálata magnetométerrel



142.3. *Hol van a tekercs északi pólusa?*

A magnetométerre ható maximális forgatónyomaték nemcsak a mágneses mező erősségétől, hanem a magnetométer jellemzőitől is függ.

Mérések szerint **egy mágneses mező adott pontjában a magnetométerre ható maximális forgatónyomaték (M) egyenesen arányos a magnetométeren folyó áram erősségével (I), a magnetométer területével (A) és menetszámával (N).**

Az $\frac{M}{N \cdot I \cdot A}$ hányados már csak a mágneses mezőtől függ. A hányados akkor nagyobb, ha ugyanarra a magnetométerre a maximális forgatónyomatékú helyzetben nagyobb forgatónyomatékot gyakorol a mágneses mező.

Ez a hányados ugyanúgy alkalmas a mágneses mező erősségének jellemzésére, mint az elektromos mezőben a térerősség. A hányados neve: mágneses indukció*. Jele: B.

$$B = \frac{M}{N \cdot I \cdot A}.$$

A mágneses indukció SI-mértékegysége Nikola Tesla** horvát származású amerikai fizikus tiszteletére a *tesla** [teszla], jele: T.

$$1\,\mathrm{T} = 1\,\frac{\mathrm{N \cdot m}}{\mathrm{A \cdot m^2}} = 1\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A \cdot m}} = 1\,\frac{\mathrm{V \cdot s}}{\mathrm{m^2}}.$$

A mágneses indukció – az elektromos térerősséghez hasonlóan – vektormennyiség.

Megállapodás szerint **a mágneses indukció irányát az egyensúlyi helyzetben lévő mérődipól északi pólusa mutatja.**

INDUKCIÓVONALAK, MÁGNESES FLUXUS

Az elektrosztatikában megismerkedtünk az elektromos mező szemléltetésére szolgáló erővonalakkal. A mágneses mezőt hasonló módon, szemléletesen jellemző vonalakat **mágneses indukcióvonalaknak*** nevezzük.

Az indukcióvonalak szerkesztésére (elképzelésére) ugyanolyan megállapodás érvényes, mint az elektromos erővonalakra:

- az indukcióvonalak érintőjének iránya megegyezik a mágneses indukcióvektor irányával;
- az indukcióvonalakra merőleges egységnyi felületen át annyi indukcióvonalat képzelünk, amennyi a mágneses indukció számértéke.

Mágneses indukcióvonalak kísérleti képét kaphatjuk, ha mágneses mezőben elhelyezett vízszintes lapra vasreszeléket szórunk. A vasszemcsék a mágneses mezőben mágneses dipólláncokat alakítanak ki, amelyek közelítően az indukcióvonalakat követik.

Egy felületen áthaladó összes indukcióvonal száma a felület **mágneses fluxusának*** számértékét adja.

A mágneses fluxus betűjele: Φ (fí), a görög nagy f betű.

A mágneses indukció irányára merőleges A nagyságú felület mágneses fluxusa:

$$\Phi = B \cdot A.$$

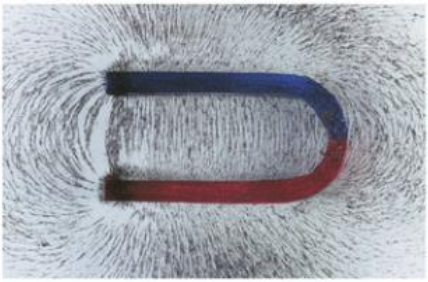
Ha a mágneses indukció nem merőleges a felületre, akkor az indukcióvektor felületre merőleges összetevőjével kell számolni a fluxust.

Olyan mágneses mezőben, ahol a mágneses indukció párhuzamos a felülettel, a felület fluxusa zérus.

A mágneses fluxus mértékegysége a **weber*** (Wb).

$$1\ \text{Wb} = 1\ \text{V} \cdot \text{s}.$$

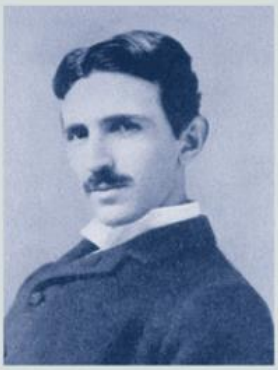
A mértékegységet *Wilhelm Weber*** [véber] (1804–1891) német fizikus tiszteletére nevezték el.



143.1. Mágnespatkómező kísérleti indukcióvonalai

MEGJEGYZÉSEK

1. *Nikola Tesla* (1856–1943) az elektrotechnika történetének érdekes alakja, a 19–20. századforduló legnagyobb feltalálói közé tartozott. Szerb család gyermekeként született az Osztrák–Magyar Monarchiában; Grazban, Budapesten és Prágában tanult. A budapesti Ganz-gyárban és Amerikában, Edison laboratóriumában is dolgozott. Több száz szabadalma volt. Feltalálta a forgó mágneses tér elvén alapuló többfázisú villamos motort. Az általa felfedezett és róla elnevezett Tesla-transzformátor és a vezető felületén folyó nagyfrekvenciás Tesla-áramok alapozták meg világhírét. E találmányok alapján cirkuszi mutatványosok világszerte elkápráztatták a közönséget azáltal, hogy az emberi test felületén több millió volt feszültségű, de nagyon gyenge áramerősségű – és így veszélytelen – nagyfrekvenciás áramokat hoztak létre. A kísérleteknél óriási szikraeső csapdos az ember körül, a kézben tartott légritka csövekben változatos fényjelenségek lépnek fel.

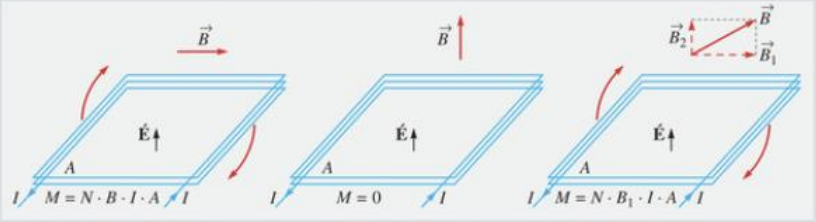


143.2. *Nikola Tesla,* akiről elnevezték a mágneses indukció mértékegységét

2. Mágneses mezőben árammal átjárt tekercsre forgatónyomaték hat, amíg a tekercs északi pólusával nem fordul a külső mágneses indukció irányába.

A maximális forgatónyomaték: $M = N \cdot B \cdot I \cdot A$.

Ez akkor lép fel, amikor a külső mágneses indukció párhuzamos a tekercs meneteinek síkjával. Más irányú mágneses indukció esetén a szuperpozíció elvét alkalmazzuk. Úgy tekintjük, mintha a B indukciójú mágneses mezőt egy a menetek síkjával párhuzamos B_1 indukciójú és egy a menetek síkjára merőleges B_2 indukciójú mágneses mező együtt hozta volna létre. Ilyenkor a fenti összefüggésben a B_1 összetevőt kell szerepeltetni.

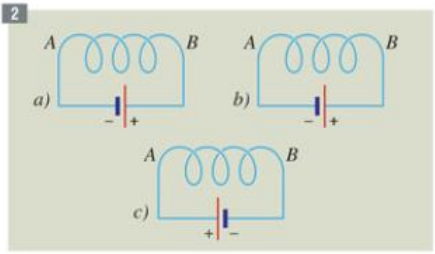


144.1. *B* mágneses indukciójú mezőben a tekercsre ható forgatónyomaték

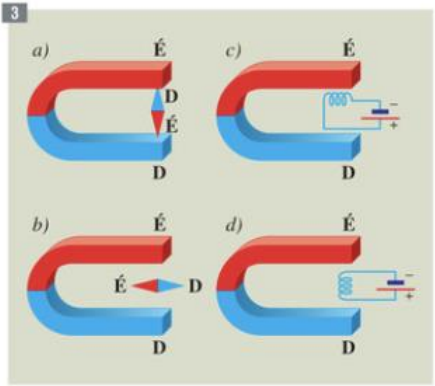
GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Hol fordulhat elő a Földön, hogy egy súlypontjában felfüggesztett iránytű északi pólusa
a) függőlegesen lefelé mutat?
b) függőlegesen felfelé mutat?
Milyen irányú ezeken a helyeken a mágneses indukció vektora?

2. Az ábrán szereplő áramkörökben a szabadon elforduló tekercsek *A* vagy *B* vége jelezné az északi irányt?



3. Az ábrán mágnespatkók sarkai között a mágneses mezőt vizsgáló dipólus (iránytű vagy magnetométer) látható.
a) Milyen a mágnespatkók sarkai között a mágneses indukció iránya?
b) A rajzok közül melyiken van a dipólus egyensúlyi helyzetben, és melyiken maximális forgatónyomatékú helyzetben?



4. Hogyan lehet elérni, hogy gyengébb mágneses mező is hatást gyakoroljon a magnetométerre?

5. Az ampermérő szerkezetének milyen módosításával lehetne elérni, hogy már kisebb áramnál is teljesen kitérjen a mutató? (*95.2. ábra*)

FELADATOK

1. Mágneses mező valamely pontjában 5-ször mérjük az N menetszámú, A keresztmetszetű, I erősségű árammal átjárt magnetométerre ható M maximális forgatónyomatékot. A mérési eredmények egy részét tartalmazza a táblázat.
Egészítsük ki a táblázatot, és számítsuk ki a vizsgált pontban a mágneses indukció nagyságát! (A mérési hibákat – amelyek egy valóságos mérésnél fellépnek – most elhanyagolhatjuk.)

MEGOLDÁS:

$N = 80$

$A = 5\ \text{cm}^2 = 5 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2$

$I = 20\ \text{mA} = 2 \cdot 10^{-2}\ \text{A}$

$M = 4 \cdot 10^{-5}\ \text{N} \cdot \text{m}$

$B = ?$

N	A (cm^2)	I (mA)	M (N · m)
80	5	20	$4 \cdot 10^{-5}$
80	5	40	
80		20	$8 \cdot 10^{-5}$
40	5		$8 \cdot 10^{-5}$
	10	40	$4 \cdot 10^{-5}$

A mágneses indukció már az 1. sor adataiból meghatározható. Mivel a mérés maximális forgatónyomatékú helyzetben történt, alkalmazható az alábbi összefüggés:

$$B = \frac{M}{N \cdot I \cdot A} = \frac{4 \cdot 10^{-5}\ \text{N} \cdot \text{m}}{80 \cdot 2 \cdot 10^{-2}\ \text{A} \cdot 5 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2} = 0{,}05\ \text{T} = \mathbf{50\ mT.}$$

A 2. sorban a forgatónyomatékot kiszámíthatnánk az előbbi összefüggés segítségével, de egyszerűbb az arányos következtetés.

Az 1. és 2. sorban ugyanazt a mágneses indukciót mértük, ezért 2-szer nagyobb áramerősségű magnetométerre 2-szer nagyobb forgatónyomaték hat, tehát $M = \mathbf{8 \cdot 10^{-5}\ N \cdot m.}$

A 3. sort is hasonlíthatjuk a már kitöltött sorokhoz, például a 2. sorhoz. A 2-szer kisebb áramerősséget ellensúlyozhatja a 2-szer nagyobb menetszám, tehát $A = \mathbf{10\ cm^2.}$

Fejezzük be a táblázat kitöltését!

2. Egy forgótekercses műszer 100 menetes, 6 cm^2 területű tekercse 0,1 T mágneses indukciójú térben helyezkedik el, legnagyobb forgatónyomatékú helyzetben. A forgatónyomaték $9 \cdot 10^{-6}$ N · m. Mekkora áram folyik a műszer tekercsén?

3. 0,5 T mágneses indukciójú mezőbe 150 menetes, 4 cm átmérőjű tekercset helyezünk.

a) Mekkora maximális forgatónyomaték hat a tekercsre, ha 0,2 A-es áramot vezetünk át rajta?

b) A tekercset 30°-kal elforgatjuk. Mennyi lesz akkor a forgatónyomaték?

4. Egy 50 menetes, 12 cm^2 területű magnetométerbe 0,4 A erősségű áramot vezetünk. Egy mágneses mezőben $6 \cdot 10^{-5}$ N · m maximális forgatónyomaték hat a magnetométerre.

a) Mennyi itt a mágneses indukció értéke?

b) Mekkora szöggel kell a tekercset elforgatni, hogy a maximális forgatónyomaték felét kapjuk?

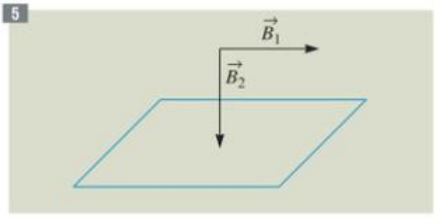
5. Az ábra szerinti 10 cm × 10 cm oldalú négyzet alakú vezetőkeret homogén mágneses mezőben helyezkedik el. Mennyi a keret fluxusa, ha

a) csak a $B_1 = 0{,}4$ T mágneses indukciójú mező van jelen?

b) csak a $B_2 = 0{,}3$ T indukciójú mező van jelen?

c) mindkét előző mező egyszerre jelen van?

5



1.3. Egyenes áramvezető és tekercs mágneses mezője

Az árammal létrehozott mágneses mezők erősségét szabályozni tudjuk, az áram kikapcsolásával meg is tudjuk azokat szüntetni. Ez nagy előnyt jelent az állandó mágnesekkel szemben.

Nézzük meg az elektromos árammal létrehozott mágneses mezők két legegyszerűbb esetét!

HOSSZÚ EGYENES VEZETŐ MÁGNESES MEZŐJE**

Fűzzünk át lyukas, merev lapon egyenes vezetőt, majd kössük azt néhány amperes egyenárammal terhelhető áramforrás (áramátalakító vagy akkumulátor) kapcsaira! Zárjuk az áramkört, és szórjunk vasreszeléket a vízszintes lapra (kicsit rázva vagy ütögetve a lapot). A vasreszelék koncentrikus körök mentén rendeződik el a vezető körül.

Ha iránytűt viszünk a vezető közelébe, megfigyelhetjük, hogy a vezető mágneses mezője annál nagyobb forgatónyomatékot fejt ki (annál inkább kitéríti az iránytűt eredeti észak–déli irányú állásából), minél nagyobb az áram erőssége, és minél kisebb a vezetőtől mért távolság.

Magnetométerrel mennyiségileg is vizsgálhatjuk a mágneses indukciót befolyásoló tényezőket.

Hosszú egyenes áramvezető mágneses mezőjében a mágneses indukció nagysága
- **egyenesen arányos a vezető áramerősségével (I), és**
- **fordítottan arányos a vezetőtől mért távolsággal (r).**

A mágneses indukció meghatározására szolgáló összefüggés szokásos formája:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot r \cdot \pi}.$$

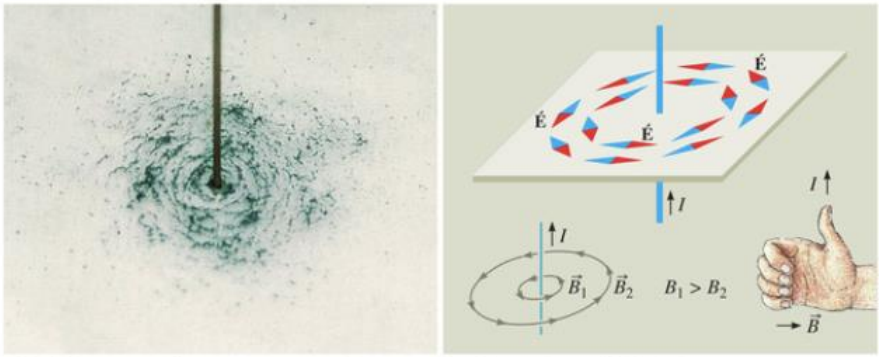
A μ_0 (mű-null) állandó a mágneses mezők elméletében gyakran előfordul, a **légüres tér permeabilitásának**** [perméabilitás] nevezzük. Értéke:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\mathrm{V \cdot s}}{\mathrm{A \cdot m}}.$$

A vezetőt körülvevő mágneses indukcióvonal mentén iránytűvel meghatározhatjuk a mágneses indukció irányát. A megfigyelésből adódó irányszabályt *jobbkéz-szabály* formájában szokás megfogalmazni:

Ha jobb kezünkkel úgy fogjuk meg az egyenes vezetőt, hogy kifeszített hüvelykujjunk az áram irányába mutat, akkor behajlított ujjaink mutatják a mágneses indukció irányát.

Az irányszabály azt is kifejezi, hogy az egyenes vezető mágneses mezőjében egy pontból elindulva, és mindig a mágneses indukció irányában haladva, visszajutunk a kiindulási pontba. Az ilyen, önmagában záródó indukcióvonallal rendelkező mágneses mezőt *örvényes mezőnek*** nevezzük.



146.1. Mágneses mező az egyenes áramvezető környezetében. *Mi mutatja meg $\vec{B}$ irányát?*

TEKERCS MÁGNESES MEZŐJE*

Már megfigyeltük, hogy a tekercs környezetében kialakuló mágneses mező erős hasonlóságot mutat a mágnesrúd körül létrejövő mágneses mezővel. A tekercs magnetométerként való használata kapcsán megismertük a tekercs északi pólusának meghatározására vonatkozó jobbkéz-szabályt.

Sok esetben fontos szerepet játszik a tekercs belsejében lévő mágneses mező. Ezért most ennek vizsgálatával foglalkozunk.

Hosszabb, a menetek között átlátható tekercsbe tegyünk vízszintes merev lapot. Vezessünk a tekercsen át néhány amperes egyenáramot, és a lap enyhe ütögetése vagy rázása közben szórjunk rá egyenletesen vasreszeléket!

A vasreszelék a tekercs tengelyével párhuzamos, egyenletes sűrűségű vonalak formájában helyezkedik el.

A tekercs belsejébe helyezett, torziós szálon függő magnetométerrel vagy kis állandó mágnessel megvizsgálhatjuk, hogy a tekercsben a mágneses mező erősségét befolyásolja az áramerősség, a tekercs menetszáma és hossza.

A megfigyelések, mérések szerint az árammal átjárt hosszú, egyenes **tekercs (szolenoid**) belsejében homogén mágneses mező* jön létre.**

A tekercsben a mágneses indukció nagysága (B)
- **egyenesen arányos az áramerősséggel (I) és a menetek számával (N),**
- **fordítottan arányos a tekercs hosszával (ℓ).**

A mágneses indukció meghatározására vonatkozó összefüggés:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{I \cdot N}{\ell}.$$

A tekercsben a mágneses indukció irányát az odahelyezett iránytű északi pólusa jelzi. Megfigyelhetjük, hogy a tekercs északi pólusára megfogalmazott jobbkéz-szabály megadja a tekercs belsejében a mágneses indukció irányát is:

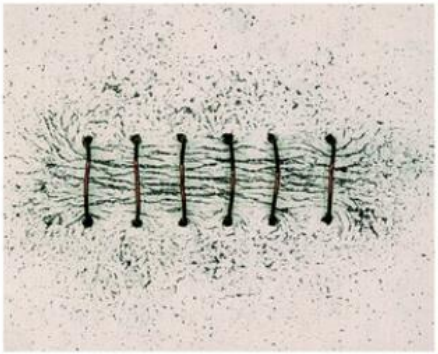
Ha jobb kezünkkel úgy fogjuk meg a tekercset, hogy behajlított ujjaink az áram irányába mutassanak, akkor kifeszített hüvelykujjunk a mágneses indukció irányát mutatja a tekercs belsejében.

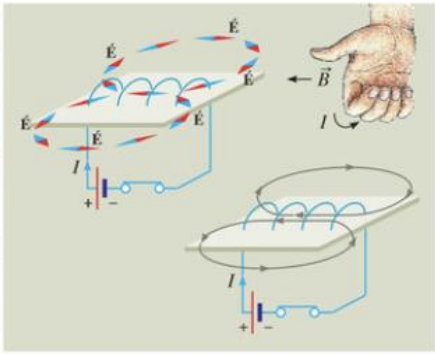
Árammal átjárt, átlátható tekercsbe tegyünk iránytűt, és haladjunk az iránytűvel a mágneses indukció irányába (az iránytű északi pólusa által mutatott irányba)! Azt tapasztaljuk, hogy a végén visszajutunk a kiindulási pontunkba.

Érdekes kérdés, hogy vajon milyen a mágneses indukció iránya egy mágnesrúd belsejében?

Mágnesrúd belsejébe nem tudunk iránytűt helyezni és mozgatni. De az atomok, sőt az atom építőkövei is kis mágneses dipólok. Ezekkel az anyag belsejében is lehet a mágneses indukció irányát vizsgálni. A kísérletek azt bizonyítják, hogy a mágnesrúd a belsejében is a tekercshez hasonló mágneses mezővel rendelkezik.

Bármilyen árammal keltett vagy állandó mágnessel létrehozott mágneses mezőt vizsgálnánk meg, azt tapasztalnánk, hogy **a mágneses mező mindig örvényes.**



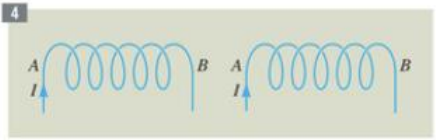


147.1. Mágneses mező az áramvezető tekercsnél. *Milyen $\vec{B}$ iránya a tekercsben?*

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Balra vagy jobbra mutat az áramirány a *139.3. ábra* kísérleténél?
2. Helyesen szemléltetjük-e az árammal átjárt egyenes vezető mágneses mezőjét, ha a vezetőre merőleges síkban egyenletesen növekvő sugarú indukcióvonal-köröket rajzolunk?
3. Rendelkezésünkre áll egy áramforrás és egy szigetelőréteggel bevont rézhuzal. Hogyan lehetne minél nagyobb mágneses indukciójú mágneses mezőt létrehozni?
4. Egy tekercsben az áram a tekercs *A* végétől a *B* vége felé halad. Eldönthető-e ebből a tekercsbeli mágneses indukció iránya?
5. Lehet-e olyan tekercset készíteni, amelyben az áram nem hoz létre mágneses mezőt?

4



6. Árammal átjárt tekercs belsejében haladó indukcióvonalak a tekercs körüli teljes téren át záródnak. Mire következtethetünk ebből a tekercs belsejében és a tekercs környezetében létrejövő mágneses mező indukciójának nagyságára vonatkozóan?
7. Hogyan lehet a magnetométeres méréseknél a Föld mágneses mezejének hatását kiküszöbölni?
8. Hogyan lehet a Föld mágneses mezejének indukcióját megmérni egy iránytű és egy akkora tekercs felhasználásával, amelyben elfér az iránytű?

FELADATOK

1. Edison amerikai feltaláló 1879-ben megalkotta a világításra is jól használható szénszálas izzólámpát. A lakások elektromos világításának bevezetését azonban komoly ellenkezés is fogadta. Ezt példázza egy korabeli sajtóvélemény: „Ahol tehát villanydrót van, ott az egész helyiség mágneses lesz. Az órák mind megállnak, mert összeragadnak az alkatrészek. Az ajtók zárai szintén beragadnak a mágnességtől. Ha például egy nő elmegy a vezeték alatt, a mágnesség kiragadja a hajából a tűket…"

   Becsüljük meg, hogy egy lakásban egy áramvezetőtől származó mágneses indukció mekkora a Föld természetes mágneses mezőjének $4 \cdot 10^{-5}$ T mágneses indukciójához képest! (Az utóbbit ugyanis csak iránytű segítségével vesszük észre.)

MEGOLDÁS:

A lakások áramköreit általában 10 A-es biztosítékok védik. Ennél nagyobb áram így egyik vezetőben sem folyhat. Számítsuk ki például, hogy ilyen áramerősségű egyenes vezető milyen távolságban hoz létre $4 \cdot 10^{-5}$ T mágneses indukciójú mezőt!

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot r \cdot \pi} \text{ összefüggésből } r = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot B} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}} \cdot 10 \text{ A}}{2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot 10^{-5} \text{ T}} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ m} = \mathbf{5 \text{ cm}}.$$

Az áramvezetőtől nagyobb távolságban vagy kisebb áramerősségnél még gyengébb mágneses mező származik egy áramvezetőtől. Megfigyelhetjük továbbá, hogy a lakásokban – falban vagy szabadon – vezetékpáron szállítják az elektromos energiát. A vezetékpár két vezetékén minden pillanatban egyenlő nagyságú és ellentétes irányú áram folyik, amelyek gyakorlatilag kioltják egymás mágneses hatását.

Az elektromos világítással kapcsolatos aggodalmak tehát alaptalannak bizonyultak.

2. Milyen erősségű áramot kell átvezetnünk egy 10 cm hosszú, 100 menetes tekercsen, hogy annak belsejében megszüntessük a Föld $4 \cdot 10^{-5}$ T mágneses indukciójú mágneses mezőjét?

MEGOLDÁS:

$B = 4 \cdot 10^{-7}$ T

$l = 10$ cm $= 0{,}1$ m

$N = 100$

$I = ?$

A tekercs belsejében a mágneses indukció nagysága:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{I \cdot N}{\ell}, \text{ ebből } I = \frac{B \cdot \ell}{\mu_0 \cdot N} = \frac{4 \cdot 10^{-5}\,\text{T} \cdot 10^{-1}\,\text{m}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}\,\frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}} \cdot 10^{2}} = 0{,}03\,\text{A} = \mathbf{30\ mA.}$$

Az eredő mágneses indukció természetesen csak akkor lesz zérus, ha a tekercs belsejének és a Földnek a mágneses indukciója ellentétes irányú.

3. Végezzük el a következő kísérletet! Helyezzünk az asztalra iránytűt, mágnestől, vastárgyaktól minél távolabb! Fektessünk az iránytűre, azzal közelítően párhuzamosan (észak–déli irányban) egyenes vezetőt! Érintsük a vezető végeit egy pillanatig rúdelem vagy telep sarkaihoz, és figyeljük meg az iránytű északi pólusának elmozdulását!

a) Megfelel-e a tapasztalatunk az egyenes vezető mágneses mezőjénél tanult irányszabálynak?

b) Ellenőrizzük az irányszabályt ellenkező irányú áram esetén és a vezető fölé helyezett iránytűvel is!

4. Hosszú egyenes áramvezetőtől 8 cm távolságban 4 cm² területű, 160 menetes, 0,5 A-es áramú magnetométeren a maximális forgatónyomaték $4 \cdot 10^{-8}$ N · m.

a) Mennyi ezen a helyen a mágneses indukció átlagos értéke?

b) Mekkora áram folyik az egyenes vezetőn?



5. Mekkora áram folyik azon az egyenes vezetőn, amelytől 1 cm távolságban 1 mT a mágneses indukció értéke?

6. Egy becsapódó villám áramerőssége 50 000 A. Mekkora mágneses indukciót kelt a villám a becsapódás helyétől 5 m távolságban? (A villámot tekintsük egyenes vezetőnek!)

7. Egy árammal átjárt tekercsbe 100 menetes, 10 cm² keresztmetszetű, 80 mA-es áramú magnetométert helyezünk, amelyre maximálisan $6 \cdot 10^{-6}$ N · m forgatónyomaték hat.

a) Mennyi a mágneses indukció a tekercsben?

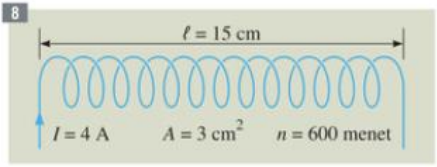
b) Mekkora áram folyik a tekercsben, ha az 1600 menetes és 20 cm hosszúságú?

8. Egy 600 menetes, 15 cm hosszúságú, 3 cm² keresztmetszetű tekercsen 4 A erősségű áram folyik.

a) Mennyi a tekercsben a mágneses indukció?

b) Mennyi a tekercs belsejében a fluxus?

8



1.4. Elektromágnesek a gyakorlatban

Ennek a fejezetnek az emlékeztetőjében már volt szó arról, hogy a vasban rendezetlen formában kis mágneses tartományok vannak. Ezek nem mutatnak eredő mágneses hatást. Külső mágneses mezőben azonban a kis mágnesek elfordulnak, rendeződnek. Az anyag egésze ezután mágnesként viselkedik, amelynek mágneses mezője erősíti az eredeti mágneses mezőt.

Az anyagoknak a mágneses mezőt befolyásoló szerepét az **anyag relatív permeabilitásával**** jellemezzük, melynek jele: μ_r. Mértékegysége nincsen, mivel pusztа arányszám. Megmutatja, hogy a légüres térbeli mágneses mező mágneses indukciója hányszorosára növekszik, ha a légüres teret egy anyaggal töltjük ki.

A vashoz hasonló, a mágneses mezőt jelentősen erősítő anyagokat **ferromágneses anyagoknak**** nevezzük. A nem ferromágneses anyagoknak nincsen érdemleges befolyásuk a mágneses mező erősségére, relatív permeabilitásuk közelítően 1.

A ferromágneses anyagok relatív permeabilitása függ az eredeti mágneses mező erősségétől is. Ez érthető, ha arra gondolunk, hogy amikor a mágneses mező a ferromágneses anyag kis mágneses tartományait már befordította a mágneses indukció irányába, akkor a még erősebb mágneses mezőhöz a ferromágneses anyag nem tud még nagyobb mértékben hozzájárulni.

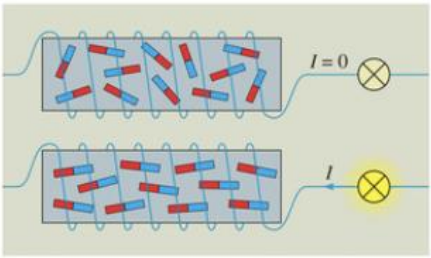
Bizonyos ötvözeteknél (pl. permalloy, hyperm) a relatív permeabilitás maximális értéke 50 000 is lehet. Néhány ferromágneses anyag relatív permeabilitásának középértéke:

vas: 2000, nikkel: 270, kobalt: 170.

Végezzük el a következő kísérletet! Vegyünk néhány száz menetet tartalmazó olyan tekercset, amelynek zárt vasmagja szétnyitható (például két U alakú részre)! Kapcsoljuk a tekercset egy 1,5 V-os rúdelem pólusaihoz! Ha a zárható vasmag két része sima felülettel illeszkedik, akkor a zárt vasmagot nem tudjuk szétfeszíteni.

A vasmag alkalmazása rendkívül nagy jelentőségű. A mágneses kölcsönhatást ugyanúgy felerősíti, mintha a tekercs áramerősségét több ezerszeresre növeltük volna. Vasmagos tekercsben a mágneses indukció:

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{I \cdot N}{\ell}.$$



150.1. Áram hatására a vasmag elemi mágnesei rendeződnek. *Merre fordulnak itt az északi pólusok?*

A lágyvasmagot* tartalmazó tekercset elektromágnesnek* nevezzük. A lágyvasmag előnye, hogy az áram megszűnésekor elveszti mágnesességét. Az elektromágneseket az elektrotechnika legkülönbözőbb területein alkalmazzák.

Nagy erőhatás kifejtésére szolgál az **elektromágneses emelődaru*.**

Az emlékeztetőben már utaltunk az általános iskolában megismert elektromos csengőre (*139.2. ábra*), amelynek lényege az **elektromágneses szaggató*.** Az áramkör elektromágnest és egy rugó hatására záródó érintkezőt is tartalmaz. Az áramkör zárásakor az elektromágnes a rugó ellenében



150.2. Elektromágneses daru

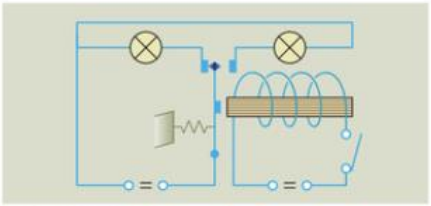
magához ránt egy kis vaslemezt, és ezzel az érintkezőnél megszakítja az áramkört. Mivel ekkor az elektromágnes elengedi a vaslemezt, a rugó azt az érintkezőhöz húzza, és ismét záródik az áramkör, és így tovább.

Ugyancsak volt szó a lakások áramköreiben is alkalmazott **automata biztosítékról*** (*139.5. ábra*). Ha az áramerősség túllépi a megengedett értéket, az elektromágnes behúz, és megszakad az áramkör. Egy kapcsoló segítségével tudjuk az eredeti állapotot visszaállítani.

A *151.2. ábra* egy kétállású **elektromágneses távkapcsoló** (relé)* kapcsolási rajzát mutatja. A kapcsoló zárásakor a relé behúz, ezáltal az egyik izzó áramköre megszakad, a másiké viszont záródik. A távkapcsoló alkalmas gyenge árammal távoli, nagy teljesítményű áramkörök be- vagy kikapcsolására. Többek között vasúti jelzőberendezéseknél és gépjárművekben is alkalmazzák.

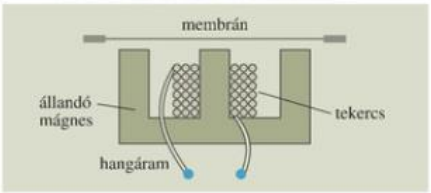
A **telefonhallgatóban*** (*151.3. ábra*) lévő elektromágnes vasmagja állandó mágnes, melynek erősségét a tekercsen átfolyó és a hangrezgés szerint ingadozó áram változtatja. Így az elektromágnes a hangrezgésnek megfelelően húzza (rezgeti) a lágyvas lemezből készült membránt.

A **dinamikus hangszórónál*** a hangáram a membránhoz rögzített lengőtekercsen halad át. A tekercs az állandó mágnessel való kölcsönhatás nagyságának és irányának megfelelően rezeg a kúp alakú, rendszerint papírból készült membránnal együtt.



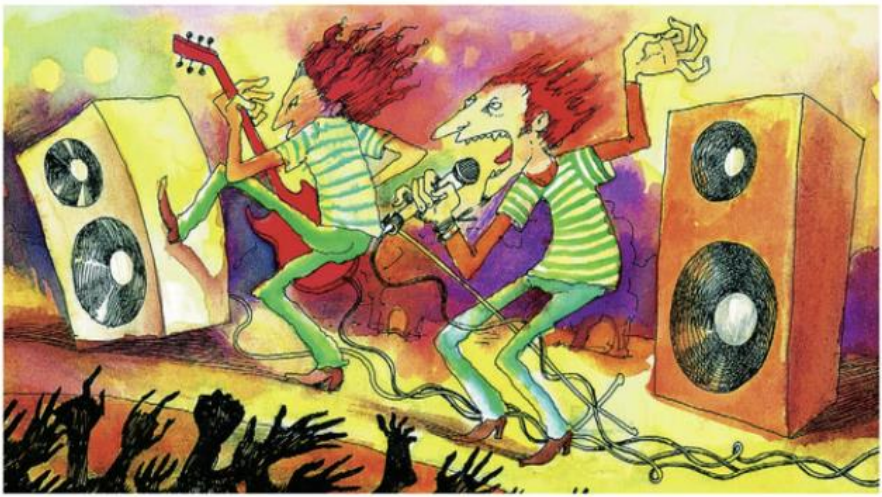
151.2. Kétállású relé kapcsolási rajza





151.3. Hagyományos telefonhallgató és működési elve

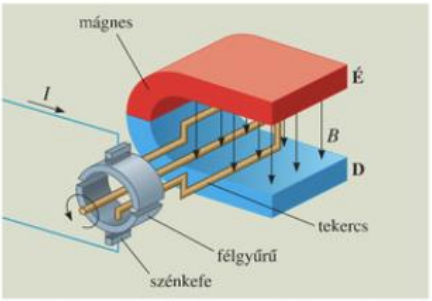
3D



151.1. Mikrofon, erősítő és hangfal nélkül koncertek sem lehetnének

Forgótekercses mérőműszereknél* (*95.2. ábra*) mágnespatkó sarkai között helyezkedik el a tengelyezett tekercs, a hozzá erősített mutatóval. Áram hatására a tekercs addig fordul el, amíg ezt a fellépő rugóerő engedi! Az **egyenáramú motorban*** (*152.1. ábra*) a tekercsel együtt forgó két félgyűrűn át, csúszóérintkezők (álló szénkefék) segítségével vezetnek áramot úgy, hogy az egyensúlyi helyzeten való átfordulás után az áramirány megváltozzon a tekercsen. Ezért a tekercs (a tehetetlensége miatt) egy kicsit mindig túlfordul, így a motor forgórésze állandó forgásban marad.

A nagyobb forgatónyomaték érdekében növelik a tekercs menetszámát, és vasmagot alkalmaznak. Az egyenletesebb forgatóhatás céljából – egy tekercs és a hozzá tartozó két félgyűrű helyett – több egymáshoz képest elforgatott helyzetű tekercs és az ezekhez tartozó gyűrűszeletpárok találhatók az egyenáramú motorok forgórészében. Az áram mindig az éppen maximális forgatónyomatékú helyzetben lévő tekercsen folyik át. Ha az állórész állandó mágnesét elektromágnessel helyettesítjük és ugyanarról az áramforrásról tápláljuk, mint a forgórész tekercsét, akkor az áramforrás polaritásának megfordítása sem változtat a motor forgásirányán. Ugyanis ekkor egyszerre fordulnak meg az álló- és forgórész mágneses pólusai. Az ilyen motort **univerzális motornak*** nevezzük, mert nemcsak egyen-, hanem váltakozó feszültséggel is működik. A háztartási gépek elektromos motorjai (porszívó, hajszárító stb.) általában ilyen elven működő univerzális motorok.



152.1. Az egyenáramú motor elve. *Hogyan érhető el ellentétes forgásirány?*



152.2. Az univerzális motor forgórésze

Az elektromos motoroknak a robbanómotorokkal szemben az egyik legnagyobb előnyük, hogy nem szennyezik a környezetet. Ezért a jövőben még szélesebb körű alkalmazásuk várható (például a közlekedésben).

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Miért használnak lágyvasat és nem acélt az elektromágnesek vasmagjaként?
2. Lehet-e az elektromágneses daruval izzó vasrudakat is emelni?
3. Mennyiben térne el a telefonhallgató működése, ha tekercsébe állandó mágnes helyett lágyvasmagot építenének? (*151.3. ábra*) (A hangáram változó nagyságú és irányú áramot jelent.)

FELADATOK

1. A szétszedhető iskolai transzformátor 6 cm hosszú, 600 menetes tekercsének belső keresztmetszete 10 cm^2. A tekercsen 0,2 A erősségű áram folyik.
   a) Mennyi a tekercs belsejében a mágneses indukció és a mágneses fluxus?
   b) Hogyan változnak az előbbi értékek, ha a tekercsbe $\mu_r = 1200$ relatív permeabilitású vasmagot teszünk?
2. Egy 20 cm hosszú, 300 menetes tekercs belsejében szeretnénk a Föld $6 \cdot 10^{-5}$ T indukciójú mágneses mezőjét „megszüntetni". Mekkora áramerősséggel valósíthatjuk ezt meg
   a) légmagas tekercs esetén? *b)* $\mu_r = 1200$ relatív permeabilitású vasmagos tekercs esetén?

1.5. A mágneses mező hatása mozgó töltésekre

A LORENTZ-ERŐ

Ha állandó mágnest viszünk feltöltött elektroszkóp közelébe, csak annyi változást látunk, mint bármely más fémtárgy közelítésekor.

Közelítsünk ezután mágnessel katódsugárcsőhöz (árnyékvetítő lemezes katódsugárcső, oszcilloszkóp vagy tévé képernyőjéhez)! A kép elmozdul, mert a mágneses mező eltéríti a képernyő felé haladó elektronokat. (Vigyázat! Színes tévével ne kísérletezzünk, mert a mágnes károkat okozhat a készülékben!)

Az eltérítésre vonatkozóan irányszabályt is megállapíthatunk. Ha a katódsugárcső képernyőjén kis fénylő foltot látunk, és a mágnesrudat a képernyőre merőlegesen, az elektronok haladási egyenese mentén közelítjük, akkor nincsen eltérülés. A legnagyobb eltérítést akkor érjük el, ha a mágnest oldalról közelítjük a katódsugárcsőhöz, vagyis amikor a mágneses mező indukcióvektora merőleges a mozgó töltések sebességvektorára. (Ezt úgy is elérhetjük, hogy a csövet egy mágnespatkó sarkai közé fogjuk.)

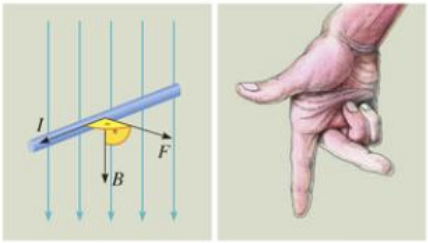
A katódsugár eltérülésének megfigyelésével irányszabályt is megfogalmazhatunk az elektromos töltésű részecske mozgása által képviselt áram iránya, a mágneses indukció iránya és az erő iránya között.

Megfigyeléseink szerint a mágneses mező nyugvó elektromos töltésekre nem fejt ki erőhatást. Mozgó töltésekre is csak akkor, ha a mágneses mező indukciója nem párhuzamos a mozgó töltések sebességével.

A mágneses mező által a mozgó töltésre gyakorolt erő irányát is **jobbkéz-szabállyal** szokás rögzíteni:

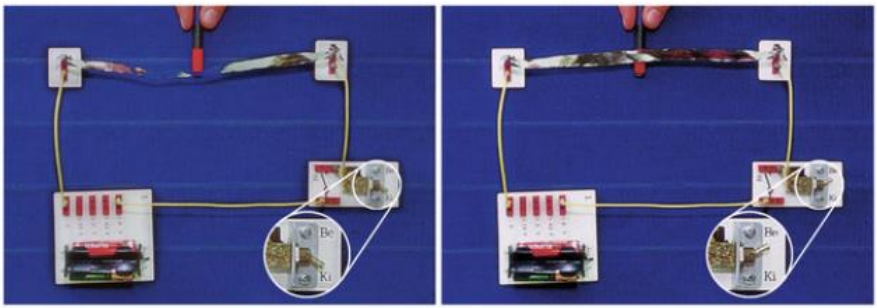
Ha jobb kezünk három ujját merőlegesen kifeszítjük úgy, hogy hüvelykujjunk a mozgó töltés által képviselt áram (I) irányába, mutatóujjunk a mágneses indukció (B) irányába mutat, akkor középső ujjunk jelzi a mozgó töltésre ható erő (F) irányát.

Javaslat a sorrendben vett ujjak jelentésének megjegyzésére:
amire hat (I), ami hat (B), az eredmény (F).



153.2. Mágneses mező hatása mozgó töltésre

A vezetőben folyó elektromos áram is mozgó töltéseket jelent. Ezért a mágneses mező – ha az indukció vektora nem párhuzamos a vezetővel – erőt fejt ki az áramvezetőre is. Az erőhatásra ugyanolyan irányszabály érvényes, mivel a mozgó töltések a rájuk ható erőt továbbítják a vezető anyagának.



153.1. A mágneses mező hatása az elektromos áramra (fotók a kísérletről)

Ellenőrizzük kísérlettel áramvezetőnél is a megfogalmazott jobbkéz-szabály helyességét!

Rögzítsünk kísérleti szerelőtáblára nem túl feszesen alufólia csíkot! Tegyünk a csík alá vagy fölé kis mágnest, amelynek pólusait ismerjük, és mágneses indukcióvektora felfelé vagy lefelé mutat! Kapcsoljunk egy pillanatig rúdelemet vagy telepet az alufólia csíkra! Az alufólia csík határozottan kitér oldalirányban. Megnézhetjük valamelyik irány megváltoztatásának a következményét is.

Ha megfigyeljük az áram, a mágneses indukció és az erő irányát is, meggyőződhetünk a megfogalmazott irányszabály helyességéről.

Az erő nagyságára vonatkozóan is végezhetünk kísérleti vizsgálatokat.

Azt tapasztaljuk, hogy az áramvezetőre ható erő nagyobb, ha erősebb mágneses mező hat rá (például közelebb visszük a mágnest a vezetőhöz), ha erősebb áram folyik a vezetőben, és akkor is, ha hosszabb vezető helyezkedik el a mágneses mezőben (például egy helyett több mágnest helyezünk el a vezető mentén).

Kísérleti és elméleti úton is igazolható, hogy

A mágneses mező által az áramvezetőre kifejtett erő (F) egyenesen arányos
- **a mágneses indukcióval (B),**
- **a vezető áramerősségével (I) és**
- **a vezető hosszával (ℓ).**

Az áramvezetőre merőleges mágneses indukció esetén

$$F = B \cdot I \cdot \ell.$$

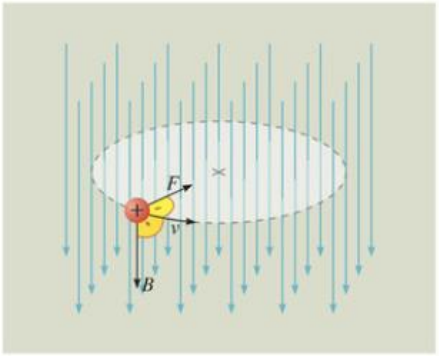
Az összefüggés átalakítható úgy, hogy a v sebességgel mozgó Q töltésre ható erő számítására legyen alkalmas.

Az $I = \frac{Q}{t}$ és az $\ell = v \cdot t$ összefüggések felhasználásával adódik, hogy

$$F = B \cdot Q \cdot v.$$

Ha a mágneses indukció nem merőleges az áramvezetőre, illetve a mozgó töltés sebességére, akkor a mágneses indukció vektorának a merőleges összetevőjével kell számolnunk.

A mágneses mező által a mozgó töltésre kifejtett erőt Lorentz** (1853–1928) holland fizikusról *Lorentz-erőnek** nevezzük.



154.1. *Mikor tér körpályára mágneses mezőben az elektromos töltésű részecske?*

ELEKTROMOS TÖLTÉSEK MOZGÁSA MÁGNESES MEZŐBEN

A **Lorentz-erő** mindig merőleges a sebességre, **a sebesség nagyságát nem változtatja, csak az irányát.**

Nézzük meg az elektromos töltésű részecske mozgását homogén mágneses mezőben (*154.1. ábra*)!

Ha a részecske sebessége merőleges volt az indukcióvonalakra, akkor az irányváltozás után is merőleges marad. A részecske tehát egy síkmozgást végez úgy, hogy sebességére merőleges irányú, állandó nagyságú erő hat. Az ilyen erő egyenletes körmozgást hoz létre, melyben a Lorentz-erő biztosítja a centripetális eredő erőt:

$$B \cdot Q \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{r}.$$

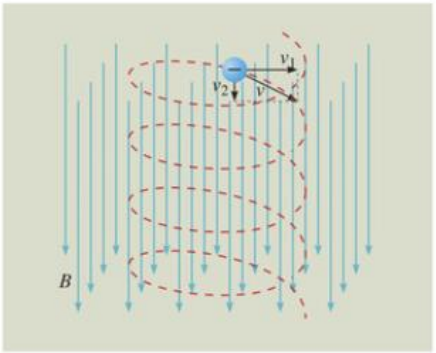
Ebből kifejezhető a körpálya sugara:

$$r = \frac{m \cdot v}{B \cdot Q}.$$

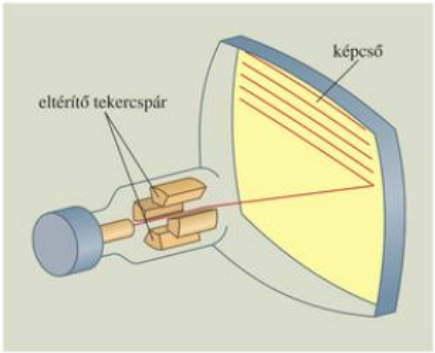
Ha a részecske sebessége nem merőleges a homogén mágneses mező indukcióvonalaira (*155.1. ábra*), akkor a sebességet felbonthatjuk a mágneses indukcióra merőleges v_1 és az indukcióval párhuzamos v_2 összetevőkre.

Ha csak a v_1 sebességgel rendelkezne, akkor egyenletes körmozgást végezne.

Ha a részecskének csak v_2 sebessége volna, akkor mozgását nem befolyásolná a mágneses mező. Az indukcióvonalakkal párhuzamosan egyenes vonalú egyenletes mozgást végezne.



155.1. Homogén mágneses mezőben az elektromos töltésű részecske általában spirálpályán mozog



155.2. Hagyományos tévé képcsöve eltérítő tekercspárokkal. *Milyen irányú mágneses mező okoz vízszintes eltérítést?*

Ha mindkét mozgást egyidejűleg végzi, akkor spirálpályán haladva, mintegy „feltekeredik" az indukcióvonalakra.

Az elektromos részecskék mágneses eltérítése a mindennapi technikában és a tudományos kutatásban is nagy jelentőségű.

A **katódsugárcsöves tévékészülékben*** vízszintes és függőleges eltérítő tekercspárok mágneses mezőjével biztosítják, hogy az elektronsugár nagy sebességgel soronként balról jobbra és felülről lefelé végigpásztázza a képernyőt. Az elektronsugár áramerősségét a gyorsító elektromos mező befolyásolja, igazodva a képpont megvilágítottságához. Szemünk tehetetlensége miatt a képpontok gyors egymás utáni felvillanását nem külön, hanem egy teljes kép formájában érzékeljük.

Az **elektronmikroszkópban*, ionmikroszkópban*** olyan mágneses mezőket hoznak létre, amelyek az optikai lencsék fényeltérítő hatásához hasonlóan térítik el a felgyorsított elektronokat, ionokat. Az úgynevezett mágneses lencsék ugyanúgy alkotnak képet e részecskékkel, mint az üveglencsék fénnyel.

A **részecskefizikai kutatásokban**, az atom, atommag építőköveinek, a különböző sugárzásoknak a megismerésében történetileg fontos szerepe volt – és van napjainkban is – az elektromos és mágneses mezőkkel való eltérítéseknek, a Lorentz-féle erőtörvény alkalmazásának.

A **tömegspektroszkópiának**, vagyis a részecskék tömeg szerinti szétválasztásának egyik fő módszere az ionizált részecskék mágneses mezőkkel történő eltérítése.

J. J. Thomson angol fizikus a katódsugarak elektromos és mágneses eltérítése alapján határozta meg az elektronok $\frac{Q}{m}$ fajlagos töltését, majd a Q töltés ismeretében az elektronok m tömegét (1897).

Világszerte nagy erővel folynak a kutatások a csillagok energiatermelését biztosító, úgynevezett fúziós magreakció* szabályozott megvalósítására. Ez ugyanis megoldhatná az emberiség energiagondjait, mivel hidrogénből (lényegében az óceánok vizéből) nyernénk az energiát. A folyamat lényege, hogy több millió °C-os hőmérsékleten a hidrogén atommagok legyőzik az elektromos taszító kölcsönhatást, és egyesülésüknél energia szabadul föl. De ilyen magas hőmérsékleten minden edény elpárolog. Miben tároljuk a hidrogén atommagokat? A nagy sebességű, elektromos töltéssel rendelkező részecskék (plazma) számára kiváló **„tárolóedény"** a mágneses mező.



155.3. A toroid tekercs belseje jó mágneses tárolóedény a magas hőmérsékletű plazmához

3D

OLVASMÁNY

A földmágnesség*

A kínaiak már az időszámításunk kezdete előtti 12. században is használták az iránytűt a földrajzi tájékozódáshoz. Azóta a tudományos kutatás, különösen pedig az utóbbi évtizedekben az űrkutatás eredményeként nagymértékben gazdagodtak a földmágnességre vonatkozó ismereteink.

Mérések szerint a Föld mágneses tengelye (észak–déli pólusok összekötő egyenese) és a Föld forgástengelye szöget zár be egymással, az úgynevezett deklinációs szöget (δ). Ennek értéke hazánkban hozzávetőleg 0,3°.

Ha vízszintes tengelyű mágnest helyezünk el mágneses észak–déli irányba, a mágnestű északi pólusa a vízszintestől lehajlik. Ez a lehajlási szög az inklináció szöge (φ). Magyarországon ez a szög megközelítően 60°.

A Föld mágneses mezőjének indukcióvektora tehát közelítően északi irányban a Föld belseje felé mutat. A mágneses indukcióvektor vízszintes összetevőjének közelítő értéke nálunk $B_v = 2 \cdot 10^{-5}$ T.

A vulkáni kőzetek megszilárdulásakor rögzítődött bennük a földi mágneses indukció akkori iránya. A kőzetek vizsgálatából kiderült, hogy a Föld mágneses pólusai többször is helyet cseréltek (közelítően 1 millió évenként). A pólusváltás folyamata viszonylag gyorsan zajlott (néhány tízezer év alatt), utána nagyjából állandósult a mágneses mező.

A mérések szerint a földi mágneses indukció az utóbbi évszázadban 5-6%-kal csökkent, ami lehet egy újabb beindult pólusváltási folyamat előjele is. Legutóbb kb. 800 000 éve volt pólusváltás.

A földmágnesség lenyomatát összehasonlítva a különböző kontinensek kőzeteiben – a kontinensek vándorlására lehet következtetni. Megállapítható, hogy valamikor csak egy kontinens létezett a Földön.

A földmágnesség pontos magyarázatát nem ismerjük, de feltételezések szerint a Föld izzó magjában folyó elektromos áramok következménye.

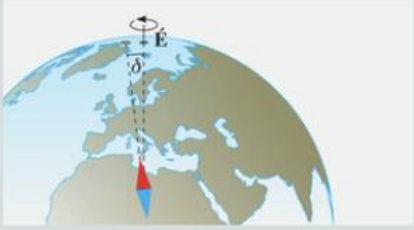
A földmágnességnek – a légkör mellett – nagy szerepe van a földi élet védelmében. A Napból és a kozmikus térségből ugyanis folyamatosan nagy sebességű elektromos részecskék (főként protonok és elektronok) záporа éri a Földet. A földi mágneses mező azonban csavarvonalszerű pályákon eltéríti ezeket a sugárzásokat a sarkok irányába. A sarki légkörbe ütközve ezek okozzák az északi és déli sarki fényt.

Mesterséges holdak méréseiből derült ki, hogy a Nap részecskesugárzásának jelentős része nem jut be a légkör sűrűbb rétegeibe. A földi mágneses mező ugyanis csapdát képez, a sarkok felé keskenyedő tartományba zárja a sugárzást. Így alakult ki a légkör felett néhány földsugárnyi távolságban a két úgynevezett van Allen-féle sugárzási zóna. A külsőben elektronok, a belsőben protonok mozognak nagy sebességgel.

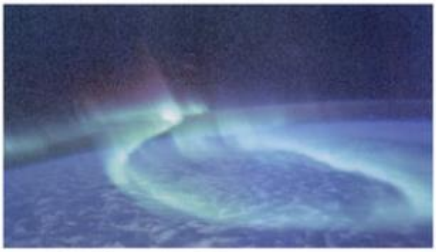
A Nap részecskesugárzása is elektromos áramot jelent, amelynek mágneses mezője jelentős zavarokat okoz a Föld mágneses terében (különösen napfolttevékenység idején).

Az űrkutatásnak köszönhetően részletesen feltérképezték a Föld környezetének mágneses tulajdonságait, követik ezek változásait. A mágneses mező helyi eltéréseiből a Föld szerkezetére (például vasérctartalomra) is tudnak következtetni.

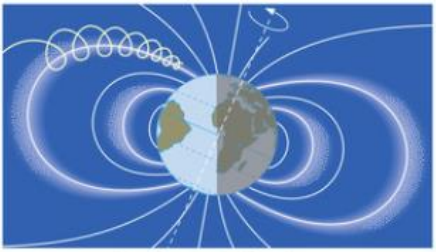
Az űrkutatás kiderítette, hogy a többi bolygónak is van kisebb-nagyobb erősségű mágneses mezője. A Holdnak nemcsak a légköre, hanem a mágneses mezője is hiányzik. Semmi sem védte a felszíni kőzeteket a napsugárzás és a kozmikus sugárzás romboló hatásától. Így alakult ki a felszínt borító finom porréteg. Érdekes felfedezés, hogy a holdkőzetekben viszont megtalálták egy régi mágneses mező nyomait.







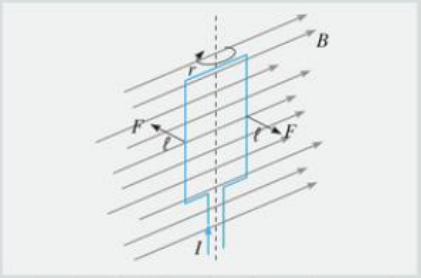
157.1. Sarki fény a világűrből



157.2. A van Allen-féle sugárzási övek

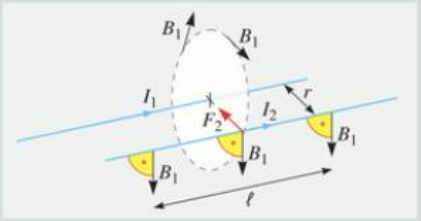
MEGJEGYZÉSEK

1. A mágneses mező áramvezetőre kifejtett erőhatása és az árammal átjárt tekercsre vonatkozó forgató hatása nem független egymástól. Az egyik hatásra vonatkozó összefüggésből levezethetjük a másik hatásra vonatkozó összefüggést.



Helyezzünk el gondolatban B mágneses indukciójú mágneses mezőben, legnagyobb forgatónyomatékú helyzetben egy I erősségű árammal átjárt, téglalap alakú, egymenetes magnetométert! A mérőkeret területe: $2 \cdot r \cdot \ell$. A mérőkeretre ható forgatónyomaték: $M = B \cdot I \cdot 2 \cdot r \cdot \ell$. A forgatónyomatékot a mérőkeret ℓ hosszúságú áramvezetőire ható F erők együttes forgatónyomatékaként is felfoghatjuk: $M = 2 \cdot F \cdot r$. A két forgatónyomaték egyenlőségéből az erő nagyságára megkapjuk az $F = B \cdot I \cdot \ell$ összefüggést.

2. Két párhuzamos áramvezető** bármelyikére a másik mágneses mezője erőt fejt ki. Az irányszabályokból kikövetkeztethetjük, hogy egyirányú áramok vonzzák, ellentétes irányúak taszítják egymást.

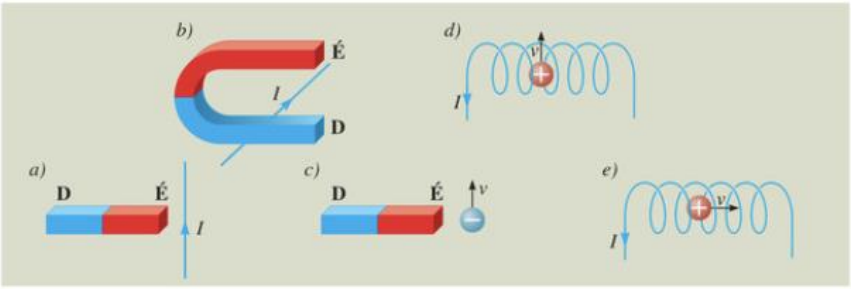


Az erők nagyságát is kiszámíthatjuk. Az I_1 áramú vezető a tőle r távolságban lévő vezető helyén $B_1 = \mu_0 \cdot \dfrac{I_1}{2 \cdot r \cdot \pi}$ erősségű mágneses mezőt hoz létre. Ez a mágneses mező az I_2 áramú vezető ℓ hosszúságú darabjára $F_2 = B_1 \cdot I_2 \cdot \ell = \mu_0 \cdot \dfrac{I_1}{2 \cdot r \cdot \pi} \cdot I_2 \cdot \ell = \dfrac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \dfrac{\ell}{r}$ nagyságú erőt fejt ki. Mivel távolságot és erőt pontosan tudunk mérni, erre az összefüggésre alapozták az áramerősség SI-mértékegységének (az ampernek) a hitelesítését: 1 amper az áramerősség abban az egyenes vezetőben, amelyik az ugyanekkora áramerősségű, 1 m távolságú párhuzamos vezető 1 m hosszú szakaszára $\dfrac{\mu_0}{2 \cdot \pi}$ N erőt fejt ki.

Az elektromos áramvezetők kölcsönhatásának törvényeit kísérleti úton Ampère fedezte fel.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Milyen irányú erő hat az ábrán a mágneses mezőbe helyezett áramvezetőkre és szabadon mozgó töltésekre?



2. Miért válik a Föld légkörébe érkező elektromos töltésű részecskék spirális pályája a sarkok felé egyre kisebb sugarúvá? (*157.2. ábra*)

3. Hogyan függ a homogén mágneses mezővel körpályára kényszerített részecske periódusideje a részecske sebességétől?

4. A *Megjegyzések* 2. pontjában lévő ábra bizonyítja, hogy az (1) áramvezető vonzza a (2) áramvezetőt. Milyen erőt fejt ki a (2) áramvezető az (1) áramvezetőre?

FELADATOK

1. Homogén, 0,6 T indukciójú mágneses mező az indukcióra merőleges helyzetű, 40 cm hosszú vezetőre 8 N erőt fejt ki.

a) Mekkora a vezetőben folyó áram erőssége?

b) Mekkora erő hatna a vezetőre, ha az 20°-os szöget zárna be az indukcióval?

2. Az Egyenlítőn a Föld mágneses mezőjének indukciója $2 \cdot 10^{-5}$ T értékű és vízszintesen északi irányú.

a) Hogyan helyezzünk el egy egyenes áramvezetőt, és milyen irányú áramot vezessünk át rajta, hogy a Föld mágneses mezője felfelé irányuló erőt fejtsen ki a vezetőre?

b) Mekkora ez az erő, ha a vezető 20 cm hosszú, és 100 A erősségű áram folyik benne?

c) Becsüljük meg, hogy a mágneses erő fel tudja-e emelni a vezetőt!

3. Egy $3 \cdot 10^{-2}$ T indukciójú homogén mágneses mezőbe az indukcióvonalakra merőlegesen $2 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ sebességgel belövünk egy protont.

a) Mekkora sugarú körpályára tér a részecske?

b) Miben különbözne az előbbi körtől az ugyanekkora sebességgel belőtt elektron körpályája? (A szükséges adatokat keressük meg táblázatban!)

4. A hidrogén egy protont, a hidrogén izotópja, a deutérium egy protont és egy neutront tartalmaz az atommagjában. Az atommagokat 100 V feszültséggel felgyorsítjuk, majd az indukcióvonalakra merőlegesen 0,02 T mágneses indukciójú homogén mágneses mezőbe vezetjük. Mekkora sugarú körpályán mozognak? (A szükséges adatokat keressük meg táblázatban!)

2. Elektromágneses indukció

2.1. A mozgási elektromágneses indukció

AZ INDUKÁLT FESZÜLTSÉG

Már általános iskolai tanulmányaink során tapasztaltuk, hogy mágnes és tekercs közelítésekor és távolításakor a tekercshez kapcsolt voltmérő mutatója ellenkező irányban tér ki.

Vizsgáljuk meg most ismét ezt a jelenséget, és keressünk magyarázatokat a tapasztalatainkra!

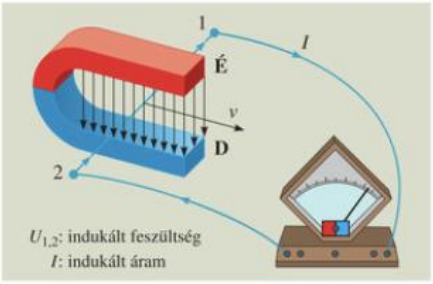
Egyenes vezető végeit kössük érzékeny árammérőhöz (galvanométerhez)! Ha a vezető egy darabját mágnespatkó sarkai között mozgatjuk, a galvanométer áramot jelez minden olyan esetben, amikor a vezető metszi a mágneses mező indukcióvonalait.

Nagyobb áramot kapunk, ha erősebb mágneses mezőben mozog a vezető, ha nagyobb a vezető sebessége vagy a mágneses mezőben mozgó vezetőszakasz hossza.

A vezető hosszát növelhetjük úgy, hogy tekercset használunk. A tekercset és a mágnest egymáshoz képest mozgatva már kevésbé érzékeny műszer is jelzi a létrejött áramot.

Ha egy vezető úgy mozog valamely mágneses mezőhöz viszonyítva, hogy metszi annak (képzeletbeli) indukcióvonalait, akkor a vezető végei között elektromos feszültség, zárt vezetőkör esetén pedig elektromos áram jön létre. A keletkezett feszültséget **indukált feszültségnek,** az áramot **indukált áramnak** nevezzük. Az egész jelenség neve: **mozgási elektromágneses indukció*** (röviden: mozgási indukció).

A mágneses mezőhöz képest mozgó vezetővel együtt mozognak a benne lévő töltések is. A mozgó töltésekre ható Lorentz-erő választja szét a vezetőben a pozitív és negatív töltéseket, és hozza létre az indukált feszültséget.



159.2. Mozgási elektromágneses indukció. *Indokoljuk az áramirányt!*

Mérésekkel és elméleti úton is igazolható, hogy **az indukált feszültség (U) egyenesen arányos**
– a mágneses indukcióval (B),
– a vezető hosszával (ℓ),
– a mozgás sebességével (v).

Ha B, ℓ és v egymásra merőleges helyzetűek, az indukált feszültség nagysága:

$$U = B \cdot \ell \cdot v.$$

Ha a merőlegesség nem teljesül, akkor a vektoroknak azon összetevőivel kell számolni, melyek megfelelnek a kölcsönös merőlegesség feltételének.

Használjuk fel, hogy $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$! Ezzel átalakítható az előbbi összefüggés:

$$U = B \cdot \ell \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t} = B \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$





159.1. Ha egy tekercshez mágnest közelítünk (balra) vagy távolítunk, a tekercsben feszültség indukálódik

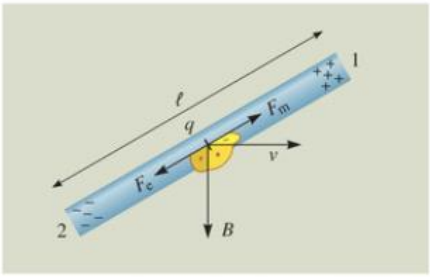
Az indukált feszültség nagysága tehát számolható a vezető által körülzárt fluxus megváltozása (vagy a vezető által átmetszett fluxus) és az ehhez szükséges idő hányadosaként:

$$U = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Az elektromágneses indukció jelenségét és az indukált feszültségre vonatkozó törvényt *Faraday* angol fizikus fedezte fel kísérleti úton 1831-ben. (Faraday-féle indukciós törvény**)

Gondoljuk végig, hogyan következik elméletileg a Lorentz-erőtörvényből az indukált feszültség nagyságára vonatkozó összefüggés!

A v sebességgel mozgó vezetővel együtt mozognak a vezetőben lévő pozitív és negatív töltések is. A pozitív töltésekre a *160.1. ábrán* jelölt irányban F_m mágneses Lorentz-erő hat. Mivel a pozitív töltések helyhez kötöttek, a mágneses mező erőhatása a negatív töltéseket fogja ellenkező irányban elmozdítani. A vezető „2" jelzésű végén tehát negatív többlettöltés, az „1" jelzésű végén (az eltávozott negatív töltések miatt) pozitív többlettöltés halmozódik fel.



160.1. A mágneses mező F_m erőhatásával szemben fellép az elektromos mező F_e erőhatása

Mekkora feszültség jön létre az így kialakult áramforrás pólusai között?

Az ábra szerint egy kiszemelt pozitív töltésre mozgás közben állandóan hat az F_m mágneses Lorentz-erő, de fellép a már szétválasztott töltések elektromos mezőjének F_e erőhatása is. (Hasonló módon, csak ellentétes irányban lépnek fel ezek az erők a vezetőben lévő negatív töltésekre is.)

A töltésszétválasztás akkor nem folytatódik, ha ez a két erő kiegyenlíti egymás hatását.

$$F_m = B \cdot q \cdot v; \quad F_e = E \cdot q = \frac{U}{\ell} \cdot q.$$

A két erő egyenlőségéből kifejezhető a feszültség. Az eredmény:

$$U = B \cdot \ell \cdot v.$$

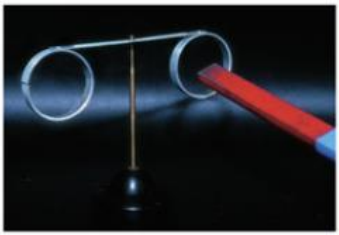
AZ INDUKÁLT ÁRAM IRÁNYA

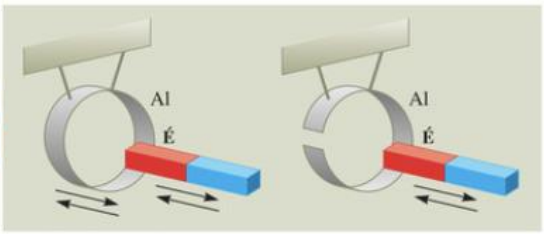
Kísérleteink mutatták, hogy ellenkező irányú áram indukálódik a tekercsben, ha közelítünk a mágnes valamelyik pólusával, vagy távolodunk a tekercstől ugyanezzel a pólussal.

Mozgassunk mágnest felfüggesztett alumíniumgyűrűhöz viszonyítva! Közelítéskor taszítást, távolításkor vonzást tapasztalunk a mágnes és az alumíniumkarika között.

Meggyőződhetünk arról is, hogy nem a légáram hozta lengésbe a gyűrűt: ha egy kis szakadás van benne, nem következik be az előbb tapasztalt mozgás. A jelenség tehát az indukált áram következménye. Az indukált áram hatására az alumíniumgyűrű olyan mágneses dipólussá változik, amely a közeledő mágnessel taszító, a távolodó mágnessel vonzó kölcsönhatásba lép.

Az indukált áram iránya mindig olyan, hogy mágneses hatásával akadályozza az indukáló folyamatot.





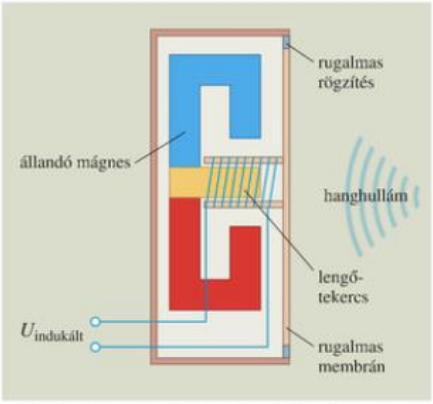
160.2. *Melyik alumíniumgyűrűvel és hogyan igazolható Lenz törvénye?*

A törvényt *Lenz* ismerte fel 1834-ben.

Lenz törvénye* az energiamegmaradás törvényét fejezi ki.

Gondoljuk el például, hogy a mágnes és a gyűrű közeledésekor olyan indukált áram keletkezne, amely nem taszító, hanem vonzó kölcsönhatást idézne elő. Akkor csak kissé el kellene indítanunk a két testet egymás felé, a vonzóerő gyorsítaná őket, még nagyobb áram indukálódna, amely még nagyobb vonzó hatást eredményezne stb. Világos, hogy így a rendszer energiája magától növekedne, ami ellentmondana az energiamegmaradás törvényének.

Mivel azonban közelítéskor taszítóerő lép fel, a további közelítés csak munka befektetése útján érhető el. Az indukált áram elektromos munkáját a közelítés során befektetett mechanikai munka fedezi.



161.2. A dinamikus mikrofon elve. *Képes lenne-e ez az eszköz fordított irányú energiaátalakításra?*

A MOZGÁSI INDUKCIÓ ALKALMAZÁSAI

A mozgási elektromágneses indukció lehetőséget biztosít arra, hogy mechanikai energia befektetése árán elektromos mezőt, elektromos energiát hozzunk létre. Ezen az elven működnek az **elektromos generátorok,** amelyek a villamos energia ipari előállítására szolgálnak.

A generátorokkal a későbbiekben még foglalkozunk.

A hangfelvételeknél használatos **mikrofonok** a hangrezgéseket elektromos jelekké (megfelelően változó elektromos feszültséggé) alakítják át. A dinamikus mikrofon a mozgási indukció elvén alapszik (*161.2. ábra*). A hangrezgés hatására a membrán (rugalmas lemez) és a hozzáerősített tekercs is rezeg a rögzített állandó mágnes mezőjében. Így a tekercsben a hangrezgés tulajdonságait hordozó elektromos feszültség indukálódik.

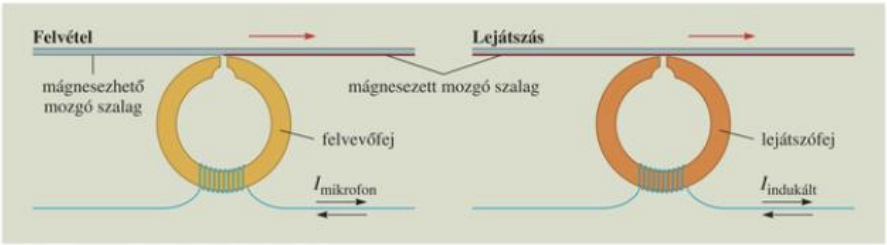
Napjainkban nagy jelentősége van a **mágneses információtárolásnak és -visszaadásnak** (magnetofon, videó, floppi).

A **magnetofonfelvételnél** a hang tulajdonságaival rendelkező áram (mikrofon árama) átfolyik a felvevőfej tekercsén (*161.1. ábra*). A tekercs gyűrű alakú vasmagjának légrése előtt egyenletesen halad a mágnesezhető szalag, amely a tekercs áramának megfelelően átmágneseződik.

Visszajátszáskor fordított folyamat játszódik le: A légrés előtt elhaladó változó mágnesezettségű szalag változó feszültséget indukál a lejátszófej tekercsében.

A számítógép floppymeghajtója mágnesezhető hajlékony vagy merev lemezt forgat a fej vasmagos tekercsének légrésében. A felvétel és a visszajátszás fizikai elve megegyezik a magnetofonéval.

A számítógépnél digitális jeleket használnak: a lemezen csak kétféle (1-nek és 0-nak megfelelő) mágneses jel szerepel.



161.1. Magnetofonfelvétel és -lejátszás elve

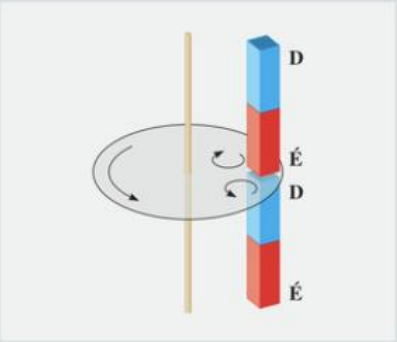
MEGJEGYZÉS

1. Ha könnyen forgó alumíniumkorongot megpörgetünk, és elektromágnes vagy állandó mágnes erős mágneses mezőjébe helyezzük, a korong gyorsan lefékeződik. Nem tömör (szeletelt) korongnál lényegesen gyengébb a fékező hatás.

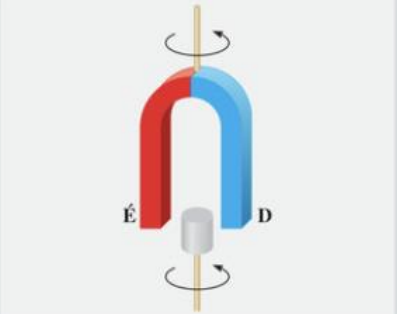
A jelenséget az ún. **örvényáramok**** okozzák. Ha egyenes vezető helyett kiterjedt fémtest valamely része lép be a mágneses mezőbe vagy mozdul ki onnan – örvényszerű áramok indukálódnak a fémben. Ezek mágneses hatása – Lenz törvénye szerint – akadályozza az indukáló folyamatot, jelen esetben a korong mágneshez viszonyított forgását. Szeletelt korongnál nem tudnak mindenhol korlátlanul kialakulni az örvényáramok. Az örvényáramok felhasználhatók mágneses fékezésre (villanyóra forgó tárcsájánál, műszerek mutatóinak lengéscsillapításánál).

Ha álló alumíniumkorong felett, vagy könnyű, tengelyezett alumíniumpohár körül erős mágnespatkót forgatunk, a korong (pohár) forgásba jön. Ez is az örvényáramok mágneses hatásának következménye. Ezen az elven működnek az **aszinkron motorok,** amelyeknek forgórésze igyekszik követni az állórész áramaival létrehozott forgó mágneses mezőt.

Az örvényáramok hőhatása hasznosítható is (például az indukciós olvasztókemencékben), de legtöbbször káros, energiaveszteséget okoz. Az utóbbi elkerülésére a tekercsek vasmagjait gyakran egymástól elszigetelt lemezekből készítik.



162.1. Az örvényáram fékez: a forgó Al-tárcsát az álló mágnesek fékezik



162.2. Az örvényáram forgat: a forgó mágnes az álló Al-hengert forgásba hozza

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Hogyan érhető el a gyakorlatban, hogy nagy feszültség indukálódjon?

2. Mágneses mezőben, elhanyagolható súrlódás mellett egyenletesen mozgatunk egy vezetőt. Kell-e ehhez erőt kifejtenünk, ha

a) feszültség indukálódik, de áram nem?

b) feszültség és áram is indukálódik?

3. Miért világít jobban a kerékpár lámpája, ha gyorsabban forgatjuk a kereket?

4. Miért fékeződik jobban a kerékpár kereke, amikor a kerékpár lámpája erősebben világít?

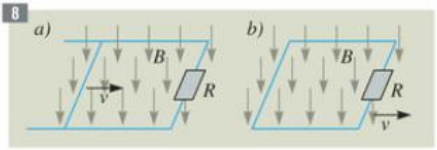
5. A mágnes az alumíniumot nem vonzza. Ha erősen mágnesezett korongot ejtünk le Al-csőben, az mégis sokkal lassabban ér talajt, mintha szabadon ejtettük volna. Miért?

6. Milyen körüljárású áram indukálódik a *160.2. ábra* zárt alumíniumgyűrűjében az északi pólus közelítésénél és távolításánál?

7. Milyen polaritású feszültség indukálódik a *160.2. ábra* megszakított gyűrűjének végpontjai között a mágnes északi pólusának közeledésekor és távolodásakor?

8. Az *a)* és *b)* ábránál is vezető mozog homogén mágneses térben a mágneses indukcióra merőlegesen: az egyik esetben csak egy vezetődarab, a másik esetben az egész zárt vezető kör. Egyforma indukált áramot kapunk-e a két esetben?

8

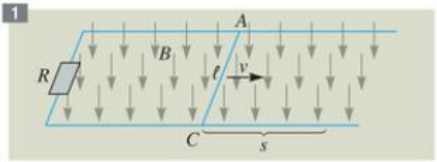


9. A dinamikus hangszóró (151. oldal) elvi felépítése megegyezik a dinamikus mikrofonéval. Mi a lényeges eltérés a működési elvben?

FELADATOK

1. Lefelé irányuló $B = 3$ T indukciójú homogén mágneses mezőben vízszintes vezetékpáron súrlódásmentesen csúszik egy $\ell = 20$ cm hosszú vezetődarab. A sebesség $v = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ nagyságú és merőleges a vezetőre. A vezetékpárt $R = 5\ \Omega$-os ellenállás zárja le.

1



a) Mekkora feszültség indukálódik a mozgó vezetőn?

b) Milyen nagyságú és irányú lesz az indukált áram?

c) Milyen nagyságú és irányú erőt kell kifejtenünk az egyenletes mozgáshoz?

d) Mennyi munkát kell végeznünk a vezető $s = 0{,}5$ m-es útján?

e) Hogyan teljesül itt az energiamegmaradás törvénye?

MEGOLDÁS:

$B = 3$ T

$\ell = 20\ \text{cm} = 0{,}2\ \text{m}$

$v = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$R = 5\ \Omega$

$U = ?,\ I = ?,\ F = ?,\ W = ?$

a) $U = B \cdot \ell \cdot v = 3\ \text{T} \cdot 0{,}2\ \text{m} \cdot 4 \frac{\text{m}}{\text{s}} = \mathbf{2{,}4\ V.}$

b) $I = \frac{U}{R} = \frac{2{,}4\ \text{V}}{5\ \Omega} = \mathbf{0{,}48\ A.}$

Az áram iránya a pozitív A pólustól az R ellenálláson át a C pontig, onnan a mozgó vezetőn keresztül (a keletkezett áramforráson belül) az A pont felé irányul.

c) $F = B \cdot I \cdot \ell = 3\ \text{T} \cdot 0{,}48\ \text{A} \cdot 0{,}2\ \text{m} = \mathbf{0{,}288\ N.}$

Az erőt a mozgatás irányában kell kifejtenünk, mivel az indukált árammal átjárt mozgó vezetőre a mágneses mező fékező hatást fejt ki. (Ezt Lenz törvénye is kimondja, de a Lorentz-erő irányszabályából is kikövetkeztethető.)

d) $W = F \cdot s = 0{,}288\ \text{N} \cdot 0{,}5\ \text{m} = \mathbf{0{,}144\ J.}$

e) Az általunk befektetett munka fedezi az elektromos mező munkáját az R ellenálláson, majd leadott hő formájában növeli a környezet belső energiáját. Állításunkat ellenőrizhetjük az elektromos munka kiszámításával.

A mozgatás ideje:

$$t = \frac{s}{v} = \frac{0{,}5\ \text{m}}{4\ \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0{,}125\ \text{s}.$$

Az elektromos munka eközben:

$$W = U \cdot I \cdot t = 2{,}4\ \text{V} \cdot 0{,}48\ \text{A} \cdot 0{,}125\ \text{s} = \mathbf{0{,}144\ J.}$$

2. Mekkora sebességgel kell mozgatnunk egy 30 cm hosszú vezetőt a $8 \cdot 10^{-2}$ T indukciójú homogén mágneses mezőben, hogy a vezető végei között 1,5 V feszültség indukálódjon, ha

a) a sebesség merőleges a mágneses indukcióra?

b) a sebesség és a mágneses indukció 30°-os szöget zár be?

3. Lefelé irányuló 2 T mágneses indukciójú homogén mágneses mezőben 40 cm hosszú, vízszintes vezető mozog a mágneses indukcióra és a vezetőre is merőleges irányban $3\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ sebességgel.

a) Mekkora feszültség indukálódik a vezető végei között?

b) Mekkora áram jön létre, ha a vezető végeit 10 ohmos ellenállással kötjük össze?

c) Mekkora erőt kell kifejteni a vezetőre, ha nyitott és ha zárt a vezető áramköre?

d) Mennyi munkát kell végeznünk zárt áramkör esetén, hogy 2 másodpercig egyenletesen mozogjon a vezető, és mennyi az elektromos munka ugyanezen idő alatt?

4. A Föld mágneses mezőjének indukciója egy helyen $2{,}5 \cdot 10^{-5}$ T nagyságú, és észak felé, de a vízszintestől 65°-kal lefelé mutat. Egy repülőgép, melynek legnagyobb szélessége 30 m, vízszintesen észak felé repül $720\ \frac{\text{km}}{\text{h}}$ sebességgel.

a) Mekkora feszültség indukálódik a gép szárnyainak végpontjai között?

b) Mekkora lenne az indukált feszültség, ha ugyanezzel a sebességgel repülne északnak, de a vízszintestől 65°-kal lefelé mutató irányban?

c) Milyen irányú repülésnél indukálódna a legnagyobb feszültség a gépen?

d) Miért nem lehet a jelenséget áramforrásként használni a repülőgépen?

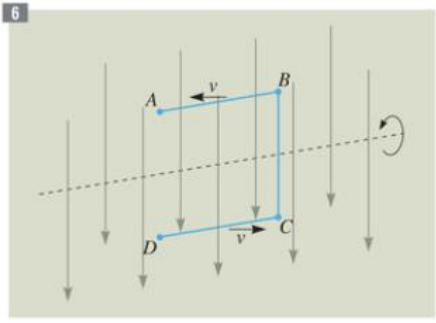
5. Egy 1200 menetes, 10 cm^2 keresztmetszetű, 25 ohm belső ellenállású tekercs kivezetéseit rövidre zárjuk. A tekercset a $2 \cdot 10^{-5}$ T indukciójú földi mágneses mezőben 0,1 s alatt a mágneses indukcióval párhuzamos tengelyű helyzetből a mágneses indukcióra merőleges helyzetbe forgatjuk. Mekkora átlagos áram folyik a tekercsen?

6. Függőlegesen lefelé irányuló 0,8 T mágneses indukciójú homogén mezőben $20\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ kerületi sebességgel forog egy 10 cm oldalú, négyzet alakú fémkeret. Mennyi az indukált feszültség az *AB*, *BC*, *CD* és *AD* pontpárok között, amikor a keret síkja

a) függőleges;

b) vízszintes?

6



2.2. Nyugalmi elektromágneses indukció

Végezzük el a következő kísérleteket!

Vegyünk egy kettős tekercset, melyben a belső és a külső tekercs egymástól független, nincsenek egymással vezető kapcsolatban! A belső tekercset kössük néhány voltos áramforrás áramkörébe, a külső tekercshez pedig csatlakoztassunk voltmérőt (*165.1. ábra*)!

Figyeljük meg, hogy a belső tekercs áramkörének zárásakor és nyitásakor a külső tekercshez kapcsolt voltmérő ellentétes irányú kitérést mutat!

Ismételjük meg a kísérletet úgy, hogy a két tekercsbe közös vasmagot helyezünk! Lényegesen nagyobb feszültség keletkezik.

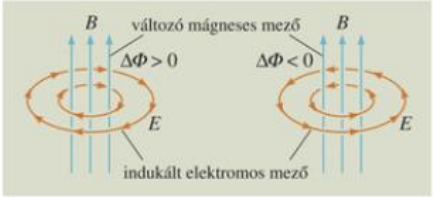
Növeljük, illetve csökkentsük a belső tekercs áramát változtatható ellenállás vagy potenciométer segítségével! Hozzuk létre ugyanazt az áramváltozást hosszabb és rövidebb idő alatt! Ha rövidebb idő alatt történik az áramváltozás, nagyobb feszültséget jelez a voltmérő.

Az elvégzett kísérletekben is feszültség indukálódott egy tekercsben, de ezt nem a tekercs és a mágnes viszonylagos mozgása hozta létre. Tehát nem a Lorentz-erő következményéről van szó.

A belső tekercs áramának változása mágnesesmező-változást eredményezett, és ez hozta létre a külső tekercsben a feszültséget.

Általánosan is igazolható, hogy változó mágneses mező körül örvényes elektromos mező alakul ki. Ezt a jelenséget nyugalmi elektromágneses indukciónak* nevezzük.**

Az elektromos mező akkor is kialakul a térben, ha nincs ott vezető. Zárt vezetőkörben viszont az indukált elektromos mező indukált áramot hoz létre.



165.2. Változó mágneses mező körül örvényes elektromos mező jön létre. *Indokoljuk az E térerősség irányát!*

Kísérleteink szerint az indukált feszültség annál nagyobb, minél nagyobb fluxusváltozás történt a tekercsben, és minél rövidebb idő alatt következett ez be. Pontosabb vizsgálatokkal bizonyítható, hogy

a változó mágneses mezőt egyszer körbejárva, az indukált feszültség nagysága ugyanúgy számolható Faraday törvénye alapján, mint a mozgási indukciónál:

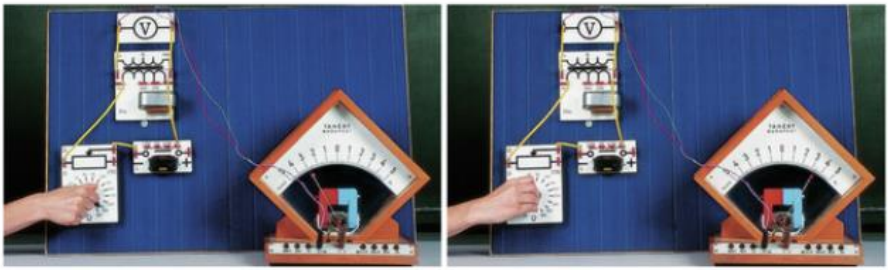
$$U = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Ekkora feszültség indukálódik a változó fluxust körülvevő egymenetű tekercs végei között.

N menetű tekercsnél összeadódnak az egyes menetek részfeszültségei, így **a tekercs végei között az indukált feszültség nagysága:**

$$U = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

ahol $\Delta\Phi$ a tekercs által körülzárt fluxus megváltozását jelenti.



165.1. Ha közös vasmagú tekercsek egyikében változtatjuk az áramerősséget, a másikban feszültség indukálódik. *Mivel magyarázható, hogy a két felvételen az indukált feszültség ellentétes előjelű?*

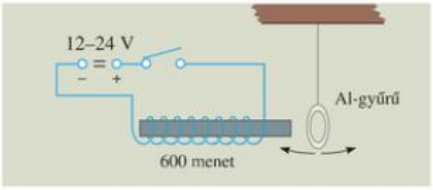
Megfigyeltük, hogy a fluxus növekedése, illetve csökkentése ellenkező irányú áramot indukál.

Az energiamegmaradás törvényének következménye, hogy **a nyugalmi indukció útján keletkező indukált áram irányára is érvényes Lenz törvénye.**

Végezzük el a következő kísérletet (*166.1. ábra*)!

600 menetes nyitott vasmagos tekercs elé Al-karikát függesztünk, és a tekercsre 12–24 V-os feszültséget kapcsolunk. Az áramkör zárásakor a tekercs taszítja, az áramkör nyitásakor pedig vonzza az Al-karikát. Hogyan magyarázzuk e kísérleti tapasztalatokat?

Az áramkör zárásakor az Al-karika belsejében is növekvő mágneses fluxus jelenik meg, ami indukált áramot eredményez a karikában. Az indukált áram fluxusának a tekercs növekvő fluxusát akadályozni, csökkenteni kell. Ez akkor teljesül, ha a tekercs és a karika (mint egymenetű tekercs) azonos mágneses pólusokkal fordulnak egymással szembe, vagyis taszítják egymást. Az áram kikapcsolásakor az indukált áramnak a mágneses mező megszűnését kell akadályoznia. Így a karikában az előbbivel ellentétes irányú áram indukálódik, a tekercs és a karika mágnesként vonzzák egymást.



166.1. A nyugalmi indukciónál is teljesül Lenz törvénye

A nyugalmi indukción alapul az általános iskolai tanulmányainkból ismert, és a technikában nagy jelentőséggel bíró **transzformátor** működése. A transzformátorral a továbbiakban még részletesebben foglalkozunk.

OLVASMÁNY

Michael Faraday



Michael Faraday 1791-ben született egy Londonhoz közeli településen, a kovácsmester fiaként. 13 évesen már dolgozott, egy londoni könyvkereskedőnél volt könyvkötőinas. Faraday nemcsak bekötötte a könyveket, hanem sokat el is olvasott. Így alakult ki szenvedélyes érdeklődése a természettudományok iránt. A könyvekből megismert kémiai, fizikai kísérletek közül maga is elvégezte azokat, melyeknek költségeit szerény fizetéséből fedezni tudta.

Eljárt *Davynek*, az akkor már híres kémikusnak, a Royal Institution igazgatójának népszerűsítő előadásaira. Ahogy olvasmányairól, az előadásokról is feljegyzéseket készített. Jegyzeteit, rajzokkal kiegészítve, elegáns kötésben elküldte a neves tudósnak. Davy felismerte Faraday tehetségét, és meghívta laboratóriumi asszisztensnek, később munkatársnak. Davy halála után pedig Faraday lett az intézet igazgatója.

Faraday nem rendelkezett matematikai előképzettséggel, nem befolyásolták a kor nagy tekintélyű elméleti fizikusainak gondolkodási sémái. Független egyéniségként kísérletekkel vizsgálta a számára izgalmas természeti jelenségeket, és egyéni módon értelmezte kutatási eredményeit.

A kor legizgalmasabb kérdése az elektromosság és a mágnesség kapcsolata volt. *Oersted* 1820-ban tett szenzációs felfedezésének, az áramvezető mágnestűre gyakorolt hatásának ismerete óta sok fizikus feltételezte, hogy a fordított hatás is létezik, vagyis mágnességgel is lehet elektromosságot kelteni. A kísérleti próbálkozások azonban eredménytelenek maradtak: a nyugvó mágnesek közelében semmiféle elektromos hatást nem tudtak kimutatni.

Faraday naplójában is több éven át szerepel a bejegyzés: no effect (semmi hatás). De ő nem adta fel. Rendkívüli szívóssággal minden jelentéktelennek tűnő körülményt is feljegyzett, amíg megfigyeléseiben felismerte a logikai kapcsolatokat. Rájött, hogy nem a mágnesség önmagában, hanem a mágnesség változása

kelti az elektromosságot. A nyugalmi és mozgási elektromágneses indukció jelenségeinek és törvényeinek felfedezésével megalapozta, előkészítette a mai modern technikát: az elektromos energia generátorokkal történő előállítását, transzformátorokkal való átalakítását és szállítását, de még a rádióhullámok felfedezését is.

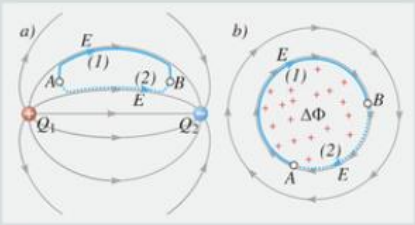
Tanulmányainkban más területeken is hivatkoztunk Faraday munkásságára. Az ő nevéhez fűződik az elektromos és mágneses mezőnek mint erőhatásokat közvetítő közegnek a feltételezése, ami alapvetően új szemléletet hozott a fizikai gondolkodásba. Felfedezte az elektrolízis törvényeit, a Faraday-kalitkát, a mágneses mezőnek a fényre gyakorolt hatását (Faraday-effektus). Nem véletlenül tekintik Faradayt a legnagyobb kísérletező fizikusnak.

Egyéniségét jellemzi, hogy amikor felkínálták számára a hazájában legnagyobb tudományos elismerést jelentő rangot, a Royal Society elnökségét, azt szerényen elhárította olyan indokkal, hogy ez a tisztség akadályozná tudományos búvárkodásában. Boldog emberként élt úgy, hogy sem a rang, sem a vagyon nem érdekelte. 1867-ben halt meg.

MEGJEGYZÉSEK

1. Faraday törvényét előjelesen $U = -\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ alakban írják fel. Itt a negatív előjel Lenz törvényére utal. Azt fejezi ki, hogy az indukált feszültséget okozó fluxusváltozással ellentétes az indukált feszültség (indukált áram) által okozott fluxusváltozás.

2. A nyugvó elektromos töltések által létrehozott elektromos mezőben nincsenek elektromos örvények: nem haladhatunk zárt görbe mentén úgy egy pozitív töltésű részecskével, hogy arra az elektromos mező mindig gyorsító hatást fejtsen ki (hogy a térerősség vektora mindig előre mutasson). Két pont között bármilyen útvonalon visszük az elektromos töltést, ugyanannyi a mező munkája, ugyanannyinak adódik a feszültség is. Zárt görbe mentén az elektromos mező teljes munkája és a teljes feszültség is zérus.



167.1. Nyugvó töltések (*a*) és változó mágneses mező (*b*) által keltett elektromos mező

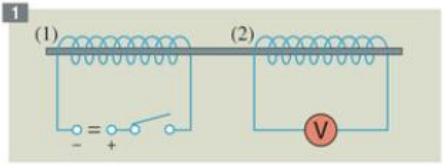
A mágneses mező mindig örvényes. A most megismert változó mágneses mező körül létrejövő elektromos mező szintén örvényes. Ebben az elektromos mezőben egy zárt görbét körbejárhatunk úgy, hogy egy pozitív töltésre végig gyorsító erő hat. A teljes körbejárásnál az elektromos mező munkája nem zérus, és így a teljes körfeszültség sem zérus, hanem a Faraday-törvény szerint $U = \dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Ebből az is következik, hogy örvényes mezőben két pont között nincs egyértelmű feszültség. Az A ponttól a B pont felé haladva az „1" és a „2" jelű útvonalon az U_{AB} feszültségek nagyságra és előjelre is eltérnek.

3. A változó fluxust körülvevő zárt görbe mentén a teljes feszültség nem függ attól, hogy közel vagy távol, rövid vagy hosszú úton járjuk körbe a változó mágneses fluxust. Más a helyzet az indukálódott elektromos mező térerősségével. A változó fluxus körüli szimmetrikus, r sugarú kör mentén például állandó az indukált elektromos mező térerőssége, és ez a homogén mezőben megismert $U = E \cdot d$ összefüggés alapján ki is számítható:

$$E = \frac{U}{2 \cdot r \cdot \pi} = \frac{\Delta\Phi}{2 \cdot r \cdot \pi \cdot \Delta t}.$$

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Az ábra (1) és (2) jelű tekercsében közös vasmag helyezkedik el.



a) Jelez-e feszültséget a (2) tekercshez kapcsolt voltmérő, amikor az (1) tekercs áramkörében a kapcsoló folyamatosan zárt?

b) Jelez-e a voltmérő, ha zárt kapcsoló állásban kihúzzuk a vasmagot?

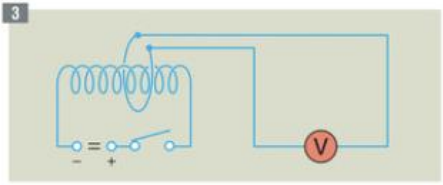
c) Mit mutat a voltmérő, ha zárjuk, majd nyitjuk a kapcsolót?

d) Hogyan tudnánk nagyobb indukált feszültséget elérni a (2) jelzésű tekercs változtatásával?

e) Hogyan tudnánk nagyobb indukált feszültséget elérni az (1) jelzésű tekercs változtatásával?

2. Hogyan lehetséges, hogy egy épület környezetébe lecsapó villám is tönkretehet épületen belüli elektromos készüléket?

3. Egy áramkörbe kapcsolódó tekercset körvezetővel veszünk körül, amelyen mérjük az indukált feszültséget. A körvezető sugarát egyre kisebbre választjuk úgy, hogy a végén a körvezető már teljesen a tekercs belsejében található. Változik-e eközben a ki-be kapcsolgatásoknál mérhető indukált feszültség?



4. Hol fordul elő

a) örvénymentes elektromos mező?

b) örvényes elektromos mező?

c) örvénymentes mágneses mező?

d) örvényes mágneses mező?

FELADATOK

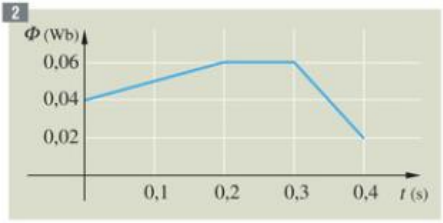
1. Egy 600 menetes 10 cm^2 keresztmetszetű tekercsben a mágneses indukció 0,2 s alatt egyenletesen növekszik zérusról 0,1 T-ra.

a) Mennyi lesz a tekercs végein mérhető feszültség?

b) Milyen eltérést tapasztalunk az indukált feszültségben, ha ugyanennyi idő alatt ismét zérusra csökken a mágneses indukció?

c) Mekkora áram folyik a tekercsen, ha a végeit 20 ohmos ellenállással zárjuk, és a tekercsnek is van 12 ohm ellenállása?

2. Az ábrán egy 800 menetes tekercs belsejében lévő mágneses fluxust ábrázoltunk az idő függvényében. Ábrázoljuk a tekercs végei között indukált feszültséget az idő függvényében!



2.3. Az önindukció. A mágneses mező energiája

Állítsuk össze a *169.1. ábra* szerinti kapcsolást például 700 menetes tekercs és néhány voltos feszültség alkalmazásával! Az egyik izzóval a tekercset, a másikkal a közelítően ugyanakkora ellenállású huzalt kapcsoljuk sorba. Először ne legyen a tekercsben vasmag! Ha a kapcsolót zárjuk, a két párhuzamos ágban az egyforma izzók egyszerre villannak fel. Ezután tegyünk a tekercsbe zárt vasmagot! A kapcsoló zárásakor jól látható, hogy a tekerccsel sorba kapcsolt izzó később villan fel, mint a másik izzó.

Fokozhatjuk az izzó áramának késését, ha a tekercs fölé csévélt másik 700 menetes tekercsen is átvezetjük az áramot, azaz 1400 menetes tekercset alkalmazunk. Érdekes azonban megfigyelni, hogy nem mindegy, hogyan vezetjük tovább az áramot a külső tekercsen. Ha azon fordított irányban halad az áram, mint a belső tekercsnél, akkor a tekercságon folyó áram semmi késést nem mutat a másik ág áramához képest.

A jelenség a tekercsben lévő mágneses mezővel függ össze, hiszen akkor észlelhető, amikor a mágneses mező erősségét több ezerszeresre növelő vasmagot teszünk a tekercsbe, és nem észlelhető, amikor a belső tekercshez sorosan kapcsolódó külső tekercs lerontja a belső tekercs mágneses hatását.

Végezzünk a zárt vasmagos tekerccsel még egy kísérletet (*169.2. ábra*)!

Kapcsoljunk néhány voltos áramforrás sarkaihoz párhuzamosan egy zárt vasmagos tekercset és egy glimmlámpát (ködfénylámpát), melynek gyújtási feszültsége 100 V körüli érték! Az áramkör zárásakor semmi különöset nem észlelünk. Természetes, hogy az áramforrás feszültsége kevés a glimmlámpa begyújtásához.

Az áramkör megszakításának pillanatában azonban felvillan a glimmlámpa!

Ez két okból is meglepő. Akkor világított a lámpa, amikor már lekapcsoltuk róla az áramforrást, másrészt lényegesen nagyobb feszültség keletkezett, mint az áramforrás feszültsége.

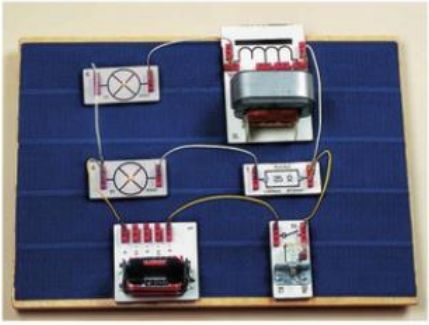
Ha valaki kételkedik ebben, érintse meg egyik kezének két ujjával a tekercs két kivezetését, és egy kis áramütést fog érezni (ami itt nem veszélyes, csak egy kis ijedtséget okozhat)!

A tekercs belsejében történő bármilyen mágneses fluxusváltozás feszültséget indukál a tekercsben.

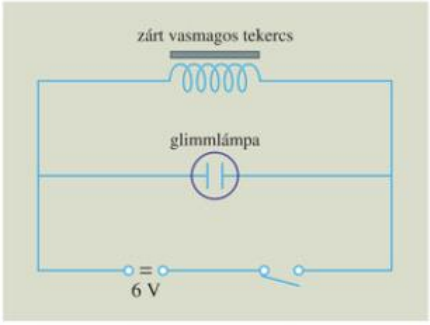
A tekercs áramának változásakor is változik a tekercs belsejében a mágneses fluxus, emiatt feszültség indukálódik a tekercsben. Ez az önindukció* jelensége.

Az önindukció a nyugalmi indukciónak speciális esete, így érvényesek rá annak törvényszerűségei.

A be- és kikapcsolási kísérletekben* megfigyelhettük, hogy az önindukciónál is teljesül Lenz törvénye. Az indukált feszültség akadályozta az indukáló folyamatot, **bekapcsolásnál késleltette az áram létrejöttét, kikapcsolásnál pedig az áram megszűnését.**



169.1. A vasmagos tekercsen az áram késik a feszültséghez képest



169.2. A tekercs áramának megszakításakor felvillan a 100 V gyújtási feszültségű glimmlámpa

Be- és kikapcsolásnál ugyanakkora fluxusváltozás történt, ugyanolyan menetszámú tekercsben. Az eltérés a fluxusváltozás időtartamában volt. Kikapcsolásnál ugyanis lényegesen kisebb idő alatt szűnt meg az áram, mint amennyi idő alatt bekapcsolásnál elérte a végleges értékét.

Tudjuk Faraday törvényéből, hogy az indukált feszültség nagysága fordítottan arányos a fluxusváltozás idejével. Ez a magyarázata annak, hogy kikapcsolásnál az áramforrás feszültségének sokszorosát tapasztalhattuk önindukciós feszültségként.

A tekercsben fellépő önindukciós feszültség kiszámítása történhet Faraday törvényével:

$$U = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Mivel az önindukciós feszültség mindig a tekercs áramváltozásának a következménye, gyakrabban használjuk az áramváltozást tartalmazó összefüggést.

Az önindukciós feszültség nagysága:

$$U = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

ahol L a tekercs **önindukciós együtthatója*, más néven induktivitása*.**

Mértékegysége: 1 henry* $= 1\,\frac{\mathrm{V \cdot s}}{\mathrm{A}}$. Jele: H.



170.1. *Mivel indokolható, hogy $L_1 > L_2$?*

Mitől függ egy tekercs induktivitása?

Részletezzük a Faraday-törvényt olyan esetre, amikor a fluxusváltozást a tekercs áramának megváltozása okozza!

$$U = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = N \cdot \frac{\Delta B \cdot A}{\Delta t} =$$

$$= N \cdot \frac{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot \Delta I \cdot N \cdot A}{\ell \cdot \Delta t} =$$

$$= \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot A}{\ell} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Eszerint

$$L = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot A}{\ell}.$$

Az induktivitás a tekercsre jellemző mennyiség, hasonlóan ahhoz, ahogy a kapacitás a kondenzátor jellemzője.

A tekercs induktivitása függ a tekercs menetszámától, keresztmetszetétől, hosszától és a tekercset kitöltő anyag minőségétől. A gyakorlatban a vasmag alkalmazásának van a legnagyobb szerepe, több nagyságrenddel is növelheti a tekercs induktivitását.

Az elektrosztatikában foglalkoztunk az elektromos mező energiájával. Meghatároztuk a kondenzátor homogén elektromos mezőjében tárolt energiát:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2.$$

A kikapcsolási jelenség meggyőzően bizonyítja, hogy a mágneses mezőnek is van energiája. A glimmlámpa ugyanis az áramforrás lekapcsolása után villant fel. Ezt csak úgy értelmezhetjük, hogy a tekercs megszűnő mágneses mezője adott át energiát a lámpának.

Méréssel vagy matematikai levezetéssel meghatározhatjuk a mágneses mező energiájának számítására vonatkozó összefüggést. A kondenzátor elektromos energiájára megismert összefüggéshez hasonló eredményt kapunk.

A tekercs mágneses mezőjének energiája*:

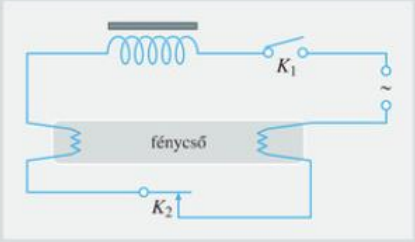
$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2.$$

A tekercs mágneses energiája tehát egyenesen arányos a tekercs induktivitásával és az áramerősség négyzetével.

3D

MEGJEGYZÉSEK

1. Az önindukció gyakorlati szerepét két példán mutatjuk be.



Az épületekben világításra használt **fénycsövek** működési elve röviden a következő. A K_1 kapcsoló (a fénycső kapcsolója) zárásakor az áram a nagy induktivitású tekercsen (fojtótekercsen) át a párhuzamosan kapcsolódó fénycsövön vagy a K_2 bimetálkapcsolón keresztül folyhat. A fénycsőben még kevés a töltéshordozó, ezért nem vezet. Az áram a K_2 kapcsolón át folyik és fűti a fénycsőbe nyúló izzószálakat, amelyek elektronokat bocsátanak ki a fénycsőbe (termikus emisszió). A K_2 kapcsoló érintkezője rövid idő alatt elhajlik a melegedés hatására, és megszakad az áramkör. A fojtótekercsen keletkező nagy önindukciós feszültség már elegendő a fénycső begyújtásához. Miután az ütközési ionizáció megnövelte a töltéshordozók számát, a fénycső ezután kisebb feszültségen is folyamatosan vezet.

Nagy induktivitású tekercsek áramköreinek megszakításakor a nagy önindukciós feszültség hatására a megszakító (kapcsoló) érintkezői között **szikrakisülés** jön létre. Ez az érintkezők beégését okozhatja. Ha a megszakítóval párhuzamosan kondenzátort kapcsolunk, ez az önindukciós feszültség hatására feltöltődik. Ekkor a tekercs mágneses mezőjének energiája a kondenzátor elektromos mezőjének energiájává alakul, kevesebb energia marad a szikrakisülés létrehozására. Ilyen célból építenek kondenzátort például gépkocsik gyújtóberendezésébe vagy elektromos motorokba.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Egészítsük ki a következő mondatokat!

a) Ha a tekercsben változik a mágneses fluxus, akkor a tekercsben … indukálódik.

b) Önindukciós feszültség akkor jön létre egy tekercsben, ha változik annak … .

c) Az önindukció a mozgási és a nyugalmi indukció közül a … speciális esetének tekinthető.

d) Az önindukcióra … Lenz törvénye.

e) Az önindukciós feszültség bekapcsoláskor az áram növekedését, kikapcsoláskor az áram csökkenését … .

f) Az önindukciós feszültség mindig késlelteti a tekercs … .

g) Az önindukciós feszültséget úgy növelhetjük, hogy … .

2. Mit jelent az, hogy egy tekercs induktivitása 1 H?

3. Feltüntethető-e egy tekercsen, hogy hány henrys, vagy ez változó érték?

4. Hogyan készíthető önindukció-mentes tekercs?

5. Hogyan készíthetünk nagy induktivitású tekercset?

6. Milyen energia-összefüggéseket ismerünk, amelyek formailag hasonlítanak a tekercs energiájára megismert összefüggéshez?

FELADATOK

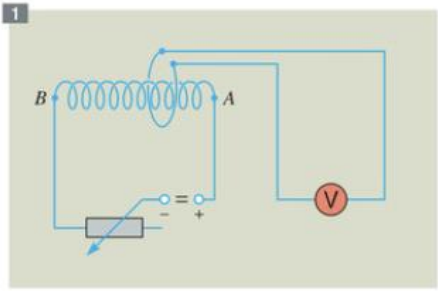
1. Egy 2 cm^2 keresztmetszetű, 600 menetes tekercsben 9 A erősségű árammal 4,8 T indukciójú mágneses mezőt hoztunk létre. Az áramerősséget 0,5 s alatt egyenletesen 1,5 A-re csökkentjük.

a) Mekkora feszültséget jelez a tekercset körülzáró vezetőben lévő voltmérő?

b) Milyen nagyságú és polaritású feszültség indukálódik a tekercs A és B végpontja között?

c) Mennyi a tekercs induktivitása?

MEGOLDÁS:



$A = 2\ cm^2 = 2 \cdot 10^{-4}\ m^2$

$N = 600$

$I_1 = 9\ A,\ I_2 = 1{,}5\ A$

$B_1 = 4{,}8\ T,\ B_2 = 0{,}8\ T$ (a tekercs áramerősségének változása arányában csökkent)

$\Delta t = 0{,}5\ s$

$U_1 = ?,$

$U_{AB} = ?,$

$L = ?$

a) $U_1 = \dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \dfrac{\Delta B \cdot A}{\Delta t} = \dfrac{4\ T \cdot 2 \cdot 10^{-4}\ A}{5 \cdot 10^{-1}\ s} = 1{,}6 \cdot 10^{-3}\ V = \mathbf{1{,}6\ mV.}$

b) Ugyanez a fluxusváltozás indukál feszültséget a tekercsben is, csak N-szer nagyobbat:

$$U_{AB} = N \cdot U_1 = 600 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-3}\ V = \mathbf{0{,}96\ V.}$$

A tekercs most olyan áramforrásként viselkedik, amely akadályozza az áram csökkenését. A tekercs, mint áramforrás, tehát sorosan kapcsolódik a külső áramforrással: az A pont negatív, a B pont pozitív pólusként viselkedik.

c) A tekercsen indukált feszültség önindukciós feszültség, alkalmazható rá az

$$U = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

összefüggés is. Ebből:

$$L = \frac{U \cdot \Delta t}{\Delta I} = \frac{0{,}96\ V \cdot 0{,}5\ s}{7{,}5\ A} = 0{,}064\ H = \mathbf{64\ mH.}$$

2. Egy 0,4 H induktivitású tekercs áramát 0,5 s alatt egyenletesen 2 A-ról 10 A-re növeljük.

a) Mekkora önindukciós feszültség keletkezik a tekercsben? *b)* Mennyi a tekercsben a mágneses energia változása?

3. Az önindukciós kísérletnél 7 H induktivitású tekercs 40 mA-es áramának kikapcsolásakor legalább 100 V önindukciós feszültség lépett fel.

a) Mit mondhatunk az áram megszűnésének idejéről? *b)* Mennyi energia szabadult fel a tekercsből? *c)* Milyen relatív permeabilitású vasmagot tartalmazott a 700 menetes, 5 cm hosszú, 3 cm^2 keresztmetszetű tekercs?

4. Egy 5 cm^2 keresztmetszetű, 10 cm hosszúságú, 600 menetes tekercs $\mu_r = 5000$ relatív permeabilitású vasmagot tartalmaz. A tekercs 0,2 A-es árama 0,02 s alatt egyenletesen zérusra csökkent.

a) Mekkora önindukciós feszültség keletkezett a tekercsben? *b)* Mennyi a tekercs induktivitása? *c)* Mennyi mágneses energiával rendelkezett a tekercs?

3. A váltakozó feszültségű áramkörök

3.1. A váltakozó feszültség előállítása és tulajdonságai

3D

Korábbi tanulmányainkból már ismert, hogy az elektromos energiát rendszerint a váltakozó feszültségű hálózatból nyerjük. Arról is hallottunk, hogy a váltakozó feszültséget előállító elektromos generátorok* a mozgási indukció elvére épülnek. A továbbiakban kissé részletesebben megismerkedünk a váltakozó feszültség előállításával és jellemzőivel.

Ha egy tekercs kivezetéseihez középállású, egyenfeszültségű voltmérőt kapcsolunk, és a tekercs előtt mágnesrudat forgatunk, a voltmérő mutatója váltakozva jobbra-balra tér ki. Változik az indukált feszültség nagysága és iránya is.

Tudjuk, hogy a mozgási indukciónál mindegy, hogy a tekercs vagy a mágnes mozog. A vezető és a mágneses mező viszonylagos mozgása számít.

Vizsgáljuk meg a váltakozó feszültség előállítását egy olyan modellen, amelynél egy téglalap alakú keretet (egymenetű tekercset) egyenletesen forgatunk homogén mágneses mezőben. Az indukált feszültséget a kerettel együtt forgó, annak kivezetéseihez kapcsolódó fémgyűrűkről vezetjük el csúszó érintkezők segítségével! (*173.1. ábra*)

Az ábrán azt a pillanatot látjuk, amikor a keret síkja párhuzamos a mágneses indukcióvonalakkal. Az ℓ hosszúságú vezetőszakaszokra, a vezetők pillanatnyi v sebességére és a B mágneses indukcióvektorra teljesül a merőlegesség feltétele, tehát az AB és CD szakaszokon is

$$U_1 = B \cdot \ell \cdot v$$

feszültség indukálódik a rajzon feltüntetett polaritásokkal. (Gondoljunk arra, hogy az alsó vezetőszakasz ellenkező irányban mozog, mint a felső!)

A téglalap hátsó és első oldala az indukcióvonalak síkjában mozog, tehát nincsen arra merőleges sebességük, így nem indukálódik bennük feszültség.

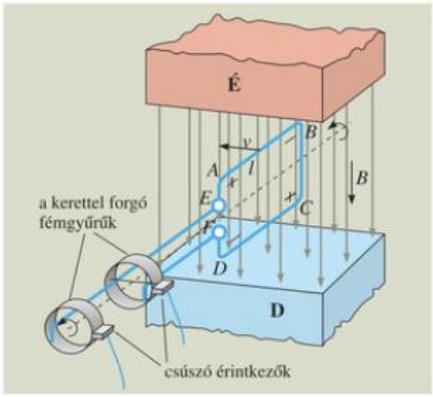
Mivel a keret két szemközti oldala – mint áramforrás – sorosan kapcsolódik (a B és C pontnál az egyik negatív pólusát a másik pozitív pólusával köti össze vezető), a két feszültség összeadódik. Az EF kivezetéseken a pillanatnyi feszültség:

$$U_{EF} = 2 \cdot B \cdot \ell \cdot v.$$

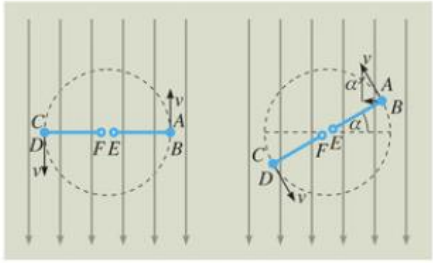
Gondoljuk meg, hogy a keret forgása során ez a legnagyobb feszültség. Ugyanis a téglalap körpályán mozgó oldalainak sebessége mindig érintő irányú, tehát a v csak ebben a helyzetben merőleges B-re. 180°-kal később is ezt tapasztaljuk, de E és F szerepet cserél, U_{EF} negatív lesz.

A 90°-kal korábbi helyzetben a sebességnek nem volt mágneses indukcióra merőleges összetevője, így az indukált feszültség zérus volt.

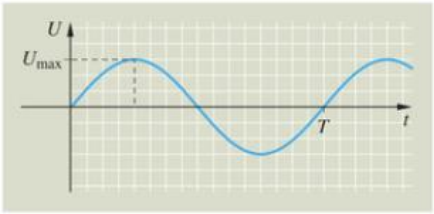
Vegyünk ehhez viszonyítva egy tetszőleges α szögű helyzetet. Itt az indukált feszültség számítása csak annyiban különbözik a maximális feszültségű helyzettől, hogy a v kerületi sebesség helyett ennek az indukcióvonalakra merőleges összetevőjével, vagyis $v \cdot \sin\alpha$-val kell számolnunk.



173.1. A váltakozó feszültség előállításának és elvezetésének modellje



173.2. *Milyen α szögnél lesz a forgatott fémkeretben indukált feszültség 0, illetve maximális?*



174.1. A feszültség az idő szinuszos függvénye

A modellünkben a keret kivezetésein lévő feszültség egy tetszőleges α szögű helyzetben:

$$U_{EF} = 2 \cdot B \cdot \ell \cdot v \cdot \sin\alpha.$$

Tömörebben így is megadhatjuk a pillanatnyi feszültséget:

$$U = U_{max} \cdot \sin\alpha.$$

Ha egy keret helyett N menetű tekercset forgatunk, mindig N-szerese adódik az előbbi feszültségnek, tehát a feszültség pillanatnyi értéke hasonló módon fog változni.

A váltakozó feszültség* pillanatnyi értéke a feszültséget előállító generátor forgórészének szögelfordulásával együtt változik.

Ha a zérus feszültségű helyzettől mérjük az α szögelfordulást, akkor a pillanatnyi feszültség*

$$U = U_{max} \cdot \sin\alpha.$$

A szögelfordulást kifejezve a szögsebesség és az idő szorzatával:

$$U = U_{max} \cdot \sin\omega \cdot t.$$

A feszültség az időnek szinuszos függvénye.

Az egyenletes körmozgásnál megismert mennyiségeket a váltakozó feszültség jellemzésénél is használjuk, de az elnevezésekben vannak eltérések is.

T jelöli a **periódusidőt***, a feszültség egy periódusának időtartamát.

A másodpercenkénti periódusok száma a **frekvencia***. Jele f, mértékegysége $\frac{1}{s}$, amit Hz-vel jelölünk, és hertz-nek [herc] nevezünk.

$$f = \frac{1}{T}.$$

Az ω-val jelölt mennyiség a váltakozó feszültség **körfrekvenciája***:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 2 \cdot \pi \cdot f.$$

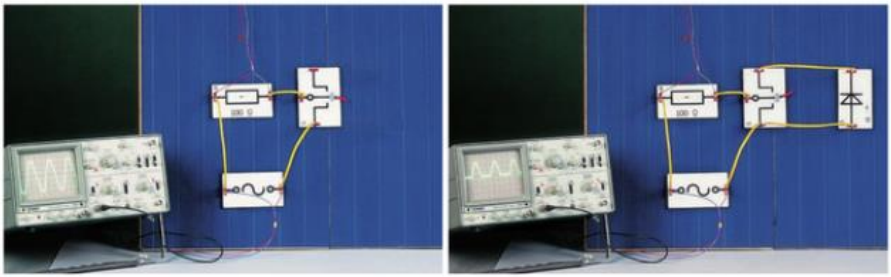
Az $\alpha = \omega \cdot t$ a **fázisszög***.

A váltakozó feszültséget egy fogyasztóra kapcsolva a feszültséggel megegyező periódusidejű, időben szinuszosan változó áramot kapunk.

$$I = I_{max} \cdot \sin\omega \cdot t.$$

Oszcilloszkóppal mérni tudjuk a váltakozó feszültség jellemzőit, sőt a készülék fel is rajzolja a váltakozó feszültség időbeli képét. Az oszcilloszkóp lényegében egy katódsugárcső, amelyben vízszintesen és függőlegesen eltérítő kondenzátor lemezpárok között is áthalad az elektronsugár.

A vízszintesen eltérítő, egyenletesen növekvő feszültség beállítható úgy, hogy éppen a vizsgált feszültség egy periódusideje alatt pásztázza végig vízszintesen az elektronsugár a képernyőt. Ha közben a függőlegesen eltérítő lemezpárra a vizsgálandó feszültséget kapcsoljuk, akkor a katódsugár éppen ennek egy periódusát fogja felrajzolni a képernyőre.



174.2. Az oszcilloszkóp felrajzolja a váltakozó feszültség időbeli grafikonját. Váltakozó feszültséget kapcsolunk fogyasztóra közvetlenül (balra) és diódán keresztül

A gyakorlatban a váltakozó feszültség és a váltakozó áram pillanatnyi jellemzői helyett inkább az átlagos jellemzők a fontosak.

A hőhatás szempontjából vett átlagos értékeket effektív értéknek nevezzük.

Egy váltakozó feszültség effektív* értékén egy olyan időben állandó feszültséget (egyenfeszültséget) értünk, amely ugyanazon a fogyasztón, ugyanannyi idő alatt ugyanannyi hőt fejleszt, mint a szóban forgó váltakozó feszültség.

A hálózati feszültség effektív értéke nálunk 230 V, frekvenciája 50 Hz, periódusideje 0,02 s.

Bebizonyítható, hogy szinuszos váltakozó feszültségnél az effektív és a maximális értékek között a következő kapcsolat áll fenn:

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}, \; I_{\text{eff}} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}.$$

A váltalkozó áramú fogyasztókon **az elektromos teljesítményt és munkát az effektív értékek segítségével számíthatjuk ki.**

$$P_{\text{eff}} = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} = I_{\text{eff}}^2 \cdot R = \frac{U_{\text{eff}}^2}{R},$$

$$W = P_{\text{eff}} \cdot t = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot t.$$

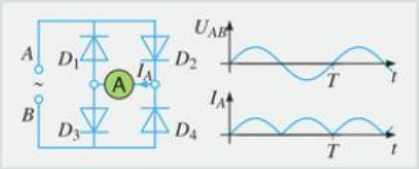
A váltakozó feszültségű voltmérő és ampermérő skáláját úgy készítik, hogy arról a feszültség vagy áramerősség effektív* értékét olvashatjuk le.

Tudjuk, hogy a forgótekercses mérőműszerek mutatója ellenkező irányú áram hatására ellenkező irányban tér ki. A váltakozó áramú műszerek is általában forgótekercsesek, első pillantásra az egyenáramú műszerekkel megegyező felépítésűek. Ha jobban megfigyeljük a szerkezetüket, megtaláljuk a váltakozó áramú műszerekbe beépített diódákat.

A forgótekercses váltakozó áramú műszereknek a mutatója azért tér ki mindig ugyanazon irányba, mert az egyenirányító mindig csak egyirányú áramot enged át az alapműszeren.

MEGJEGYZÉS

1. A váltakozó áramú amper- és voltmérőben a diódák **Graetz-féle** [gréc] **egyenirányító** kapcsolását alkalmazzák. Ezzel elérhető, hogy a váltakozó feszültség mindkét félperiódusában (akár az *A*, akár a *B* az áramforrás pozitív pólusa) azonos irányú áram haladjon át az alapműszeren (I_A).



A gyakorlatban többféle célból is szükséges a váltakozó feszültségből egyenfeszültség előállítása. Ezt ma leggyakrabban félvezető diódákkal oldják meg. Például a gépkocsi akkumulátorának töltésére is használnak váltakozó áramú generátort és diódákat.

Egy másik lehetséges megoldás, hogy a *173.1. ábra* váltakozó áramú generátor modelljének kivezetései és az érintkező szénkefék nem két gyűrűhöz, hanem két elszigetelt félgyűrűhöz kapcsolódnak. (Ilyet láthatunk a *152.1. ábrán* az egyenáramú motor modelljénél.) Ezzel a megoldással az egyenirányítást mechanikusan, a generátoron belül oldják meg. Ilyenkor már egyenáramú generátorról beszélünk.

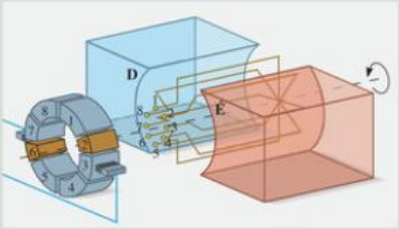
A két félgyűrűs egyenirányítás ugyanolyan eredményt ad, mint a Graetz-kapcsolás.

A gyakorlatban egy tekercs és két félgyűrű helyett több tekercset és hozzájuk kapcsolódó gyűrűszeleteket (kommutátort) alkalmaznak. Így a kivezetéseken „simább" (kevésbé lüktető) egyenfeszültség adódik.

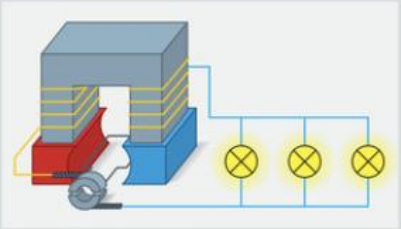
Ha az állórész állandó mágnese helyett elektromágnest alkalmazunk (*176.2. ábra*), akkor a keletkezett egyenáramot az elektromágnesen átvezetve biztosíthatjuk a szükséges mágneses mezőt. Induláskor a vasmag maradék mágnessége elég egy gyengébb áram indukálódásához, az áram áthalad az állórész tekercsein és erősíti a mágneses mezőt, ezután már erősebb

3D

áram indukálódik és így tovább. Ez az **öngerjesztés elve*,** az ilyen elven működő egyenáramú generátort **dinamónak*** nevezzük. A dinamót *Jedlik Ányos** magyar fizikus fedezte fel 1859-ben, elterjesztése a német Siemens nevéhez fűződik.



176.1. Az egyenáramú generátor modellje



176.2. A dinamó modellje

OLVASMÁNY

Jedlik Ányos



Jedlik Ányos (1800–1895) a fizikatörténet első jelentős magyar egyénisége, a fizikatanítás magyar úttörője.

Egyszerű, jobbágysorban élő szülők gyermekeként született 1800-ban a Komárom megyei Szimőn (ma Zemné), a keresztségben az István nevet kapta. A nagyszombati és pozsonyi gimnáziumi tanulmányok után bencés rendi szerzetes lett, ekkor vette fel az Ányos keresztnevet. A pesti tudományegyetemen folytatott tanulmányokat követően 9 évig a Bencés rend győri gimnáziumában tanított matematikát és fizikát. Később a pozsonyi akadémia, majd a pesti egyetem fizika tanszékének lett a tanára.

Pályája kezdetétől törekedett a fizikai jelenségek kísérleti bemutatására. Győri tanárként mintegy 300 bemutatott kísérletéről készített feljegyzést. A 19. század eleji technikai felszereltség mellett ez rendkívüli teljesítmény volt.

Jedlik német folyóiratokból tájékozódott az akkor fejlődésnek indult elektromosságtan legújabb eredményeiről. Megismételte, továbbfejlesztette *Volta, Oersted, Ampère, Faraday* kísérleteit. Még győri tanárként az elektromos áram mágneses hatásával sikerült folyamatos forgást létrehoznia: ezzel felfedezte a villanymotort (az ő fogalmazásában a „villanydelejes forgonyt").

Legnagyobb horderejű felfedezése: a dinamóelv. Erről így elmélkedett: *„Mi történnék, ha netán jelentékeny villanyfolyam, mielőtt más célra használtatnék, a delejek (mágnesek) körül elhelyezett tekercseken végig vezettetnék? Ha ez a delejek erejét öregbítené (fokozná), akkor a villanyfolyam is erősíttetnék, miáltal a delejek ismét erősebbé tétetnének…"* Találmányairól nem gondolta, hogy ezeket ő ismerte fel elsőként, nem szabadalmaztatta őket. Így a dinamót néhány évvel később a német Siemens felfedezéseként ismerte meg a világ.

Jelentős volt a fény színképének vizsgálatára alkalmas optikai rácsokat előállító gépe, amellyel üveglemezre milliméterenként 2000 karcolást tudott készíteni. (Ezt 100 évig nem tudta senki felülmúlni.)

Találmányai közé tartozik a szódavízgyártó gép, és olyan villanyfejlesztő, amellyel kondenzátorok felhasználásával egymillió voltos feszültséget és 90 cm hosszú szikrákat tudott létrehozni. Az utóbbival nagy feltűnést keltett és aranyérmet nyert 1873-ban a bécsi világkiállításon.

A reformkorszakban, az addig használatos latin nyelv mellett, elsőként tanította a fizikát magyar nyelven. Ehhez a hiányos szakmai szókincset is fejlesztette könyveiben. (Tőle származnak többek között a dugattyú, huzal, merőleges, eredő, összetevő, nyomaték, kitérés, vetület szavak.)

A tudós tanár azt tervezte, hogy magyar nyelvű egyetemi fizikatankönyvet ír *Természet Elemei* címmel. Ebből nyomtatásban sajnos csak az első kötet jelent meg az 1848–49-es szabadságharcok idején, melynek címe: *Súlyos Testek Természettana.* A *Hőtan* című kötet csak kézirat formájában készült el 1847–51 között. (A kéziratot jelenleg a Pannonhalmi Főapátság Könyvtárában őrzik.)

A korabeli nyelvezet és helyesírás szemléltetésére egy részlet a *Jedlik Hőtan* kéziratából:

1. CZIKK

A kiterjedésről

33) Midőn valamely testel uj meleg mennyiség közöltetik, ez sajátságos tulajdonánál fogva a test részecskéire taszitó erő gyanánt hat, 's azokat egymástól valamennyire eltávolitja; ennélfogva tehát a testek melegülés által minden kivétel nélkül szétterjednek. Ellenben ha valamelly test részecskéire taszitólag működő melegmennyiségből veszit, azok az összefüggési erőnek (kohéziós erőnek) szabadabb működése által egymáshoz közelebb vonatnak; tehát a testek meghülés által összehuzodnak.

1848-ban, amikor Jellasics seregei közeledtek, Jedlik is beállt aktív nemzetőrnek. A veszély elmúltával azonban visszatért tudományos munkájához. Ezt folytatta akadémikusként, egyetemi rektorként és nyugalomba vonulása után is, egészen 95 éves korában bekövetkezett haláláig.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK



1. Milyen mozgást végeznek az elektronok a váltakozó áramú áramkörben?
2. Sós oldatba merülő elektródokra váltakozó feszültséget kapcsolunk. Folyik-e áram az áramkörben? Megfigyelhetünk-e elektrolízist?
3. Mit tapasztalunk, ha váltakozó feszültségre kapcsolt
   a) légmagos tekercshez iránytűt közelítünk?
   b) elektromágneshez iránytűt közelítünk?
   c) elektromágneshez lágyvasat közelítünk?
4. Két egyforma izzó éppen egyforma fényerővel világít. Az egyikre 6 V-os egyenfeszültséget kapcsoltunk, a másikra ismeretlen nagyságú váltakozó feszültséget. Mennyi a váltakozó feszültség effektív értéke?
5. Mi a váltakozó áram útja a 175. oldal Graetz-kapcsolásában az egyik és a másik félperiódusban?
6. Egyes forgótekercses műszerek egy kapcsoló segítségével egyenáramú mérésről váltakozó áramú mérésre állíthatók. Mit változtat a műszeren az átkapcsolás?
7. A *152.1. ábra* az egyenáramú motor elvét szemlélteti, de az eszköz egyenáramú generátorként is működhet. Mi az eltérés a kétféle alkalmazás között?
8. Az azonos felépítésű egyenáramú motort és generátort összekapcsoljuk: a generátor forgórészét elindítjuk, az indukált feszültség meghajtja az elektromos motort, a motor forgatja a generátor forgórészét, ez tovább szolgáltatja a feszültséget a motornak stb. Elkészült az örökmozgó?

FELADATOK

1. Este 20 óra és 21 óra 30 perc között egy 230 V; 40 W feliratú asztali lámpa fényénél olvastunk.

a) Mennyi volt az izzólámpa energiafelhasználása?

b) Mennyit kell fizetni a felhasznált energiáért?

c) Mennyi volt az effektív és maximális áramerősség az izzón?

d) Ábrázoljuk az áramerősséget az idő függvényében!

e) Mennyi volt a fázisszög és a pillanatnyi áramerősség a $t_1 = \frac{T}{12}$ időpontban?

f) Egyenletes fényerővel világít-e az izzólámpa?

g) Mennyi a világító izzószál ellenállása?

MEGOLDÁS:

$U_{\text{eff}} = 230\ \text{V}$

$P_{\text{eff}} = 40\ \text{W}$

$t = 1{,}5\ \text{óra} = 5400\ \text{s}$

$W = ?,\ I_{\text{eff}} = ?,\ I_{\max} = ?,\ \alpha_1 = ?,\ I_1 = ?,\ R = ?$

a) $W = P_{\text{eff}} \cdot t = 40\ \text{W} \cdot 5400\ \text{s} = \mathbf{216\ kJ} = 40\ \text{W} \cdot 1{,}5\ \text{h} = \mathbf{0{,}06\ kWh.}$

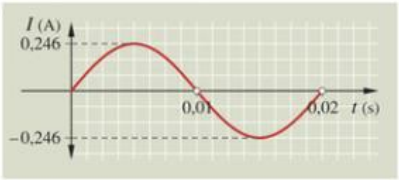
b) A számítást a helyi áramtarifa (villanyszámla) segítségével tudjuk elvégezni.

c) $P_{\text{eff}} = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$ alapján:

$$I_{\text{eff}} = \frac{P_{\text{eff}}}{U_{\text{eff}}} = \frac{40\ \text{W}}{230\ \text{V}} = \mathbf{0{,}174\ A},$$

$$I_{\max} = I_{\text{eff}} \cdot \sqrt{2} = 0{,}174\ \text{A} \cdot \sqrt{2} = \mathbf{0{,}246\ A}.$$

d)



e) $\alpha_1 = \omega \cdot t_1 = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{12} = \frac{\pi}{6}$ (radián) vagy **30°**,

$$I_1 = I_{\max} \cdot \sin\alpha_1 = I_{\max} \cdot \sin\frac{\pi}{6} = \frac{I_{\max}}{2} = \frac{0{,}246\ \text{A}}{2} = \mathbf{0{,}123\ A}.$$

f) Nem, de az izzószál hőtehetetlensége miatt a változást a szemünk nem érzékeli. (A fényerő fényingadozása érzékelhetőbb.)

g) $R = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} = \frac{230\ \text{V}}{0{,}174\ \text{A}} = \mathbf{1322\ \Omega}$. (A hideg izzószál ellenállása lényegesen kisebb.)

2. Mennyi a 230 V-os hálózati feszültség

a) maximuma? *b)* periódusideje? *c)* frekvenciája? *d)* körfrekvenciája?

3. Mennyi a hálózati feszültség fázisszöge és pillanatnyi értéke a $t_1 = 0{,}005$ s, $t_2 = 0{,}01$ s, $t_3 = 0{,}015$ s, $t_4 = 0{,}02$ s időpontokban?

4. Határozzuk meg a következő függvény szerinti váltakozó feszültség jellemzőit, majd ábrázoljuk a feszültség pillanatnyi értékét az idő függvényében: $U = 141 \cdot \sin 377 \cdot t$! (A mennyiségek SI-egységben értendők.)

5. Az előző feladatban szereplő feszültséget 100 ohmos ellenállású izzólámpára kapcsoljuk. Adjuk meg a létrejövő áram jellemzőit, és ábrázoljuk az áramerősséget az idő függvényében!

3.2. Ellenállások a váltakozó áramú áramkörben (Kiegészítő anyag)

A váltakozó áramú áramkörökben az ellenállásoknak többféle típusa is létezik.

Ezek mindegyikét az effektív feszültség és az effektív áramerősség hányadosával jellemezzük, közös néven **impedanciának**** nevezzük, és *Z*-vel jelöljük:

$$Z = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}}.$$

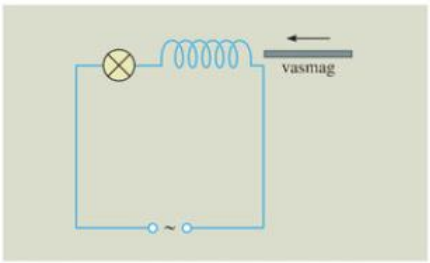
Váltakozó áram esetén az áramerősség az időnek szinuszos függvénye. Az áram pozitív félperiódusában a töltéshordozók a vezetőben az egyik irányban, a negatív félperiódus alatt pedig a másik irányban mozognak. Bármelyik irányú mozgás esetén a fémes vezető kristályrácsa ugyanúgy akadályozza a töltéshordozók szabad áramlását. A vezető tehát váltakozó áramú áramkörben is rendelkezik ugyanolyan ellenállással, mint egyenáramú áramkörben.

A vezető hossza (ℓ), keresztmetszete (A) és anyagi minősége (ρ) által meghatározott ellenállását váltakozó áramú áramkörben **ohmos ellenállásnak*** nevezzük.

Az ohmos ellenállás:

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{A}.$$

Az ohmos ellenálláson a feszültség és áramerősség pillanatnyi értékei együtt változnak, nincsen közöttük fáziseltolódás**.



179.2. Ha vasmagot tolunk a tekercsbe, az izzó gyengébben világít

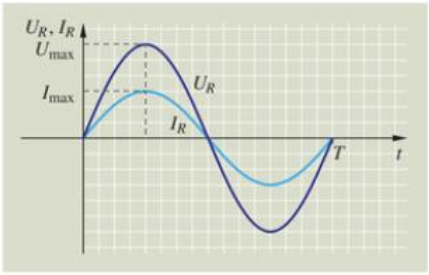
Végezzük el a következő kísérleteket!

Vezessünk váltakozó áramú áramkörben légmagos tekercsen át áramot egy izzóhoz úgy, hogy az izzó világítson! Ezután helyezzünk a tekercsbe vasmagot. Az izzó fényereje gyengül. A tekercs ellenállása tehát nőtt, anélkül, hogy a vezető hosszát, keresztmetszetét vagy anyagi minőségét megváltoztattuk volna.

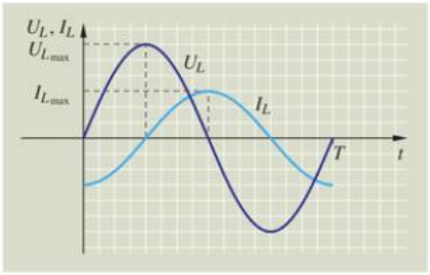
Ismételjük meg az önindukciós alapkísérletet! (*169.1. ábra*) Modellezzük a váltakozó feszültséget az egyenfeszültség gyors ki-be kapcsolgatásával! Azt tapasztaljuk, hogy a vasmagos tekercscsel sorosan kapcsolt izzó átlagos fényereje gyengébb, mint a másik izzóé. Ha növeljük a kapcsolgatás ütemét, tovább gyengül a tekercscsel sorosan kapcsolt izzó fényereje.

Ha a tekercsben nincsen vasmag, a két izzó mindig egyformán világít.

A kísérletek arra utalnak, hogy a többlet ellenállás az önindukció következménye.



179.1. Ohmos ellenálláson a feszültség és áramerősség azonos fázisban van



179.3. Induktív ellenálláson az áramerősség negyed periódust késik a feszültséghez képest

Az önindukciónak váltakozó áramú áramkörben effektív áramerősséget csökkentő hatása van, amit az úgynevezett **induktív ellenállással**** jellemzünk és X_L-lel jelölünk.

Kísérletek igazolják, hogy az induktív ellenállás egyenesen arányos
- **a tekercs induktivitásával (L) és**
- **az áram körfrekvenciájával (ω).**

A számítások és mérések szerint az induktív ellenállás:

$$X_L = L \cdot \omega.$$

Az önindukciós kísérleteknél tapasztaltuk, hogy a feszültséghez viszonyítva bekapcsolásnál és kikapcsolásnál is késett az áramerősség.

Váltakozó áramú áramkörben tiszta induktív ellenállás esetén **az áramerősség** 90°-ot **késik** a feszültséghez képest (fáziskésés**).

Végezzük el a következő kísérleteket!

Kapcsoljunk váltakozó feszültségű áramforrásra sorosan kondenzátort és váltakozó áramú ampermérőt! A műszer mutatója állandó kitérést, állandó effektív áramerősséget mutat.

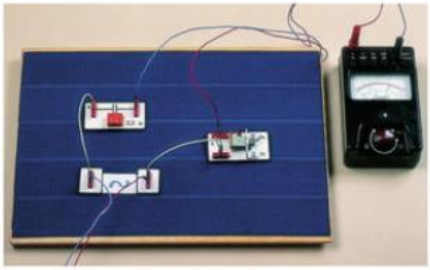
Állítsuk össze a *180.1. ábra* áramkörét egyenáramú, középállású ampermérő felhasználásával! Zárjuk a váltókapcsolót váltakozva az egyik, majd a másik irányban!

Rövid ideig egyik, majd másik irányban tér ki a műszer mutatója: a kondenzátor feltöltődése és kisülése ellenkező irányú áramokat jelent.

Helyettesítsük az egyenáramú műszert váltakozó áramú ampermérővel (vagy érzékeny rizsszemizzóval)! A váltakozó feszültséget az egyenfeszültség gyors ki-be kapcsolgatásával modellezhetjük.

A kapcsolgatások gyorsításakor (a frekvencia növelésekor) a mutató átlagos kitérése (az effektív áramerősség) nő, tehát az ellenállás csökken.

Kisebb kapacitású kondenzátorral kisebb átlagos áramot, tehát nagyobb ellenállást tapasztalunk.



180.2. Váltakozó áramú áramkörben a kondenzátor vezetőként viselkedik

Váltakozó áramú áramkörben a kondenzátor is áramvezetőként viselkedik. Bár a lemezek közötti szigetelésen nem haladnak át a töltéshordozók, a kondenzátor feltöltődése és kisülése lehetővé teszi az áramkörben a váltakozó áramot.

A kondenzátor áramcsökkentő hatását az úgynevezett **kapacitív ellenállással**** jellemezzük, és X_C-vel jelöljük.

Kísérletek igazolják, hogy a kapacitív ellenállás fordítottan arányos
- **a kondenzátor kapacitásával (C) és**
- **az áram körfrekvenciájával (ω).**

Számítások és mérések szerint a kapacitív ellenállás:

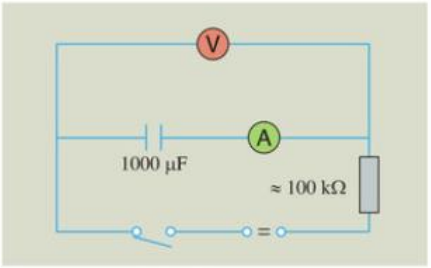
$$X_C = \frac{1}{C \cdot \omega}.$$

A *181.1. ábra* szerinti áramkör elkészítése után zárjuk a kapcsolót, és figyeljük a műszereket! Az áramerősség nagy értékről indulva csökken zérusra, a feszültség pedig zérusról indulva növekszik maximumra. Előbb folyik a kondenzátort feltöltő áram, és utána alakul ki a kondenzátoron a feszültség.

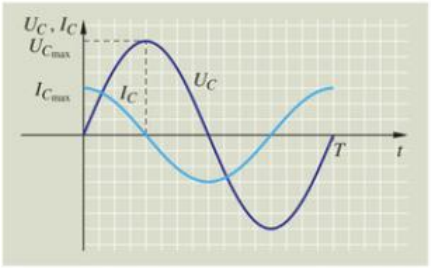
A kapacitív ellenálláson az **áram** 90°-ot **siet** a feszültséghez képest (fázissietés**).



180.1. Kondenzátor feltöltése és kisülése



181.1. A kondenzátor feszültsége késik az áramerősséghez képest



181.2. Kapacitív ellenálláson az áramerősség negyed periódust siet a feszültséghez képest

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Milyen típusú ellenállása van váltakozó áramú körben egy izzólámpának, villanyvasalónak, villanybojlernek, fénycső fojtótekercsének, egy villanymotor tekercsének?
2. Hogyan adódik az induktív és kapacitív ellenállás összefüggéséből az ohm mértékegység?
3. Hogyan készíthető olyan tekercs, amely közelítően tiszta induktív ellenállású?
4. Feltüntethető-e valamely elektromos alkatrészen annak ohmos, induktív vagy kapacitív ellenállása?

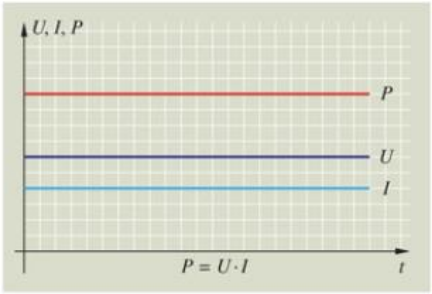
FELADATOK

1. 230 V-os hálózatról soros kapcsolásban üzemeltetjük a karácsonyfaizzókat. Hány izzót kapcsolhatunk sorba, ha üzemi áramerősségük 0,16 A és egyenként 76,4 ohm ellenállásúak?
2. 230 V-os 50 Hz-es hálózati feszültségre tiszta induktív ellenállásúnak tekinthető zárt vasmagos tekercset kapcsoltunk. Az effektív áramerősség 0,4 A. Mennyi az induktív ellenállás és a tekercs induktivitása?
3. 42 V, 50 Hz-es váltakozó feszültségre 2,2 µF kapacitású kondenzátort kapcsolunk. Mennyi a kondenzátor ellenállása és az áramerősség?
4. Az alábbi táblázat egy kondenzátorra kapcsolt 50 Hz-es váltakozó feszültség és a létrejövő áramerősség összetartozó értékeit tartalmazza.

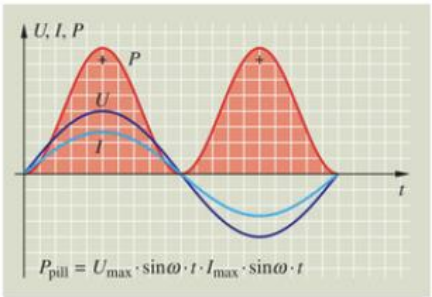
U_{eff} (V)	4	8	10	12	16
I_{eff} (A)	0,001				

   a) Egészítsük ki a táblázatot!
   b) Mennyi a kondenzátor kapacitása?
   c) Milyen ohmos ellenállású vezetőnél kaphatnánk ugyanezt a táblázatot?
   d) Milyen induktivitású tiszta induktív tekercsnél kaphatnánk ugyanezt a táblázatot?
5. Határozzuk meg méréssel egy kondenzátor kapacitását! Hány %-kal tér el a mért érték a kondenzátoron feltüntetett értéktől?
6. Mérjük meg egy zárt vasmagos tekercs induktivitását! (Egy zárt vasmagos tekercs közelítően tiszta induktív ellenállásúnak vehető.)

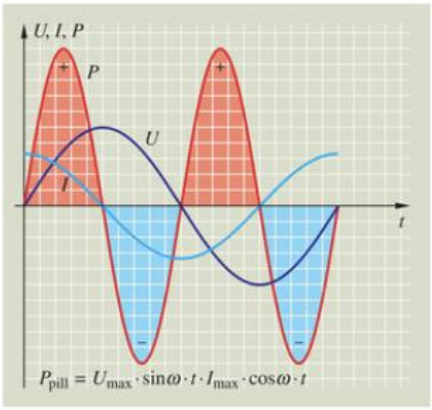
3.3. Teljesítmény a váltakozó áramú áramkörben (Kiegészítő anyag)



182.1. Teljesítmény egyenáramú áramkörben



182.2. Ohmos ellenálláson a feszültség, áramerősség és pillanatnyi teljesítmény az idő függvényében



182.3. Kapacitív ellenálláson a feszültség, áramerősség és pillanatnyi teljesítmény az idő függvényében

Valamely áramkörben egy fogyasztó teljesítménye megmutatja, hogy a fogyasztó **egy** időegység alatt mennyi energiát vesz fel az áramforrásból.

Egyenáramú áramkör esetén a teljesítményt a feszültség és az áramerősség szorzata adja:

$$P = U \cdot I.$$

Mivel mindkét tényező az idő folyamán állandó, a teljesítmény is időben állandó, pozitív érték.

Váltakozó áramú körben a feszültség és az áramerősség is szinuszosan változik, szorzatukat **pillanatnyi teljesítménynek**** nevezzük.

$$P_{\text{pill}} = U_{\text{pill}} \cdot I_{\text{pill}}.$$

A pillanatnyi teljesítmény megmutatja, hogy mennyi energiát venne fel a fogyasztó egy időegység alatt az áramforrásból, ha a pillanatnyi áramköri jellemzők nem változnának.

Matematikai úton vagy a két függvény szorzatának megszerkesztésével belátható, hogy a pillanatnyi teljesítmény is szinuszosan változó mennyiség.

Tekintsük például ohmos és kapacitív ellenállásnál a pillanatnyi teljesítmény időbeli grafikonját! (*182.2., 182.3. ábra*)

Látható, hogy ohmos ellenálláson a pillanatnyi teljesítmény mindig pozitív vagy zérus. Az ohmos ellenállás csak felvesz (bár pillanatonként változó mértékben), de vissza nem ad energiát az áramforrásnak. A felvett energia – általában ugyanúgy, mint az egyenáramú áramkör fogyasztóin – belsőenergia-növekedést okoz, majd hőátadással a környezet energiáját növeli.

A kapacitív ellenállás pillanatnyi teljesítmény grafikonján szimmetrikusan fordulnak elő pozitív és negatív előjelű tartományok. Amikor pozitív a teljesítmény, a kondenzátor felvesz energiát. Ilyenkor a kondenzátor feltöltődik, az áramforrás energiája átalakul a kondenzátor elektromos mezőjének energiájává. A negatív teljesítmény fordított irányú energiaátalakulást jelent: a kisülő kondenzátor elektromos mezőjének energiája átalakul az áramforrás energiájává.

A pillanatnyi teljesítmény grafikon pozitív és negatív előjelű tartományainak szimmetriája

arra utal, hogy időátlagban a kondenzátor nem tekinthető fogyasztónak. Amennyi energiát felvesz az áramforrásból, ugyanannyit vissza is szolgáltat.

Hasonló eredményt kapunk a tiszta induktív ellenállás esetén is, csak ott a tekercs mágneses mezőjének felépítésére fordítódik energia. Ezt követően a mágneses mező megszűnésekor az áramforrás szintén visszakapja a befektetett energiát.

Valamely váltakozó áramú ellenálláson a teljesítmény időbeli átlagát, a hatásos, vagy más néven **effektív teljesítményt*** a következő összefüggéssel kaphatjuk:

$$P_{\text{eff}} = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos\varphi.$$

Itt φ a feszültség és áramerősség közötti fázisszög, a $\cos\varphi$ neve pedig **teljesítménytényező****.

Ohmos ellenálláson $\varphi = 0$, $\cos\varphi = 1$, tehát az effektív teljesítményt a

$$P_{\text{eff}} = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$$

összefüggéssel is számíthatjuk, ahol U_{eff} és I_{eff} az ohmos ellenállás feszültségének és áramerősségének effektív értéke.

Tiszta induktív vagy kapacitív ellenállás esetén $\varphi = 90°$, $\cos\varphi = 0$, tehát az effektív teljesítmény is zérus.

Az **elektromos mező munkája** a váltakozó áramú áramkörben az effektív teljesítmény és az idő szorzataként számítható (ha $t >> T$):

$$W = P_{\text{eff}} \cdot t.$$

Ezt az energiafelhasználást méri lakásunkban az elektromos fogyasztásmérő (villanyóra).

MEGJEGYZÉSEK

1. A tekercsek általában nem tekinthetők tisztán ohmos vagy tisztán induktív ellenállásúnak. Ezért a fázisszögük 0° és 90° közötti érték. Zárt vasmagos tekercs fázisszöge megközelíti a 90°-ot.

   Az elektromos motorok is tartalmaznak vasmagos tekercseket. A terheletlen motorok (amelyek nem végeznek munkát) közelítően induktív ellenállásként viselkednek. Terhelésnél a motorok tekercsében indukálódó feszültség csökkenti az eredeti fázisszöget, növeli a teljesítménytényezőt, így az effektív teljesítmény növekszik. Az áramforrásból felvett energia ilyenkor nem hőközlés, hanem munkavégzés formájában adódik át a környezetnek.

2. Ha tiszta induktív vagy kapacitív ellenállást kapcsolunk a hálózatra, akkor áram folyik ugyan a vezetőben, de effektív teljesítmény nincsen, nem kell fizetnünk az energiafelhasználásért. Ugyanakkor a távoli generátortól a távvezetéken át is folyik áram, és melegíti a vezetéket, tehát a villamos erőműveknél energiaveszteség jelentkezik.

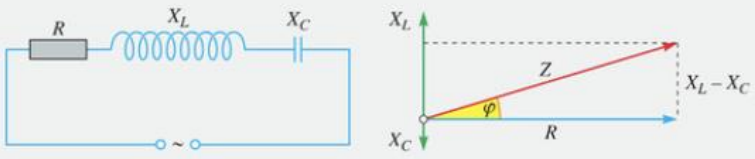
   Ez különösen jelentős lehet az üzemek vasmagos tekercseket tartalmazó nagyobb gépeinél, berendezéseinél, még akkor is, ha nem tisztán induktív ellenállásokról, hanem 0° és 90° közötti fáziskésést okozó fogyasztókról van szó.

   Ahhoz, hogy a távvezetékeken az energiaveszteség minél kisebb legyen a hasznosított (és a fogyasztó által kifizetett) energiához képest – a fázisszöget minél kisebbre kell csökkenteni. Ezért kötelező az induktív jellegű fogyasztóknál fázisjavító kondenzátorok alkalmazása. A kondenzátor fázissiettető hatásával ellensúlyozhatja a tekercs fáziskésleltető hatását.

3. Bebizonyítható, hogy váltakozó áramú ellenállások soros kapcsolása esetén a teljesítménytényező ($\cos\varphi$) és az eredő impedancia (Z) a következő összefüggésekkel számítható:

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z}, \quad Z^2 = R^2 + (X_L - X_C)^2.$$

A mennyiségek közötti kapcsolat az ellenállások vektorábrájával szemléltethető.



GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Forog-e a villanyóra tárcsája, ha csak tiszta induktív vagy kapacitív ellenállást kapcsolunk a hálózatra?
2. Milyen ellenállása van annak a kondenzátornak, melynek a lemezei közötti szigetelőrétege kissé átvezet? Milyen lesz egy ilyen alkatrésznél a teljesítménytényező?
3. Mi a különbség váltakozó áramú áramkörben a teljesítménytényező és a hatásfok között?

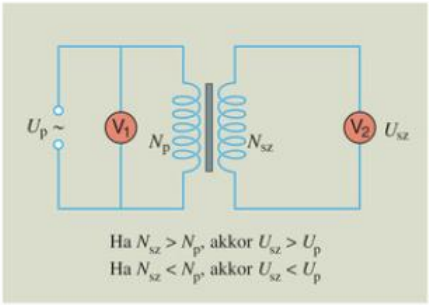
FELADATOK

1. Egy lakás 230 V-os hálózati feszültséghez csatlakozó elektromos hálózatát 10 A-es biztosíték védi.
   a) Milyen teljesítményű fogyasztókat használhatunk?
   b) Mennyi lehet a fogyasztók ellenállása?
2. Mennyi a 230 V-os hálózatra készült 100 W-os izzó
   a) effektív áramerőssége?
   b) ellenállása?
   c) villamosenergia-felhasználása 15 perc alatt?
3. 230 V-os hálózatra kapcsolunk egy 1200 ohm kapacitív ellenállású kondenzátort.
   a) Mekkora effektív áramerősség folyik a vezetéken?
   b) Mennyi a kondenzátor villamosenergia-felhasználása 1 óra alatt?
4. Egy 230 V-os hálózati feszültségre kapcsolt villamos motor áramerőssége 1,5 A, teljesítménytényezője 0,8.
   a) Mennyi energiát használ fel a motor 30 perces üzemeltetés alatt?
   b) Mennyi munkát végez a motor, ha hatásfoka 75%?
   c) Mennyi a fázisszög a feszültség és áramerősség között?
   d) Mennyi a motor eredő ellenállása (impedanciája)?
5. Egy 230 V-os hálózatra kapcsolt motor árama 65°-ot késik a feszültséghez képest. A motor 0,8-es hatásfokkal 10 perc alatt 240 kJ munkát végez. Mennyi a motor
   a) effektív teljesítménye?
   b) effektív áramerőssége?
   c) impedanciája?

3.4. A transzformátor



185.1. Transzformátorok az energiaszállító rendszerben



185.2. A feszültség fel- és letranszformálása

A transzformátor a váltakozó áramú hálózatokban az egyik legalapvetőbb eszköz. Az elektromos erőművek és a felhasználó között, a távvezetékrendszer több pontján is találkozhatunk transzformátorokkal. A hálózatról üzemelő szórakoztató elektronikai készülékek bármelyikében szintén megtalálható a transzformátor

Általános iskolai tanulmányainkból tudjuk, hogy a villamosenergia-ellátó rendszerből transzformátorral állítjuk elő a szükséges nagyságú váltakozó feszültséget.

Vizsgáljuk meg a transzformátor működését és legfontosabb törvényszerűségeit!

A transzformátor két (vagy több) közös, zárt vasmagon elhelyezett tekercsből áll. **Az energiaforráshoz kapcsolódó tekercset primer*, a másik tekercset szekunder* tekercsnek nevezzük.**

Működése a nyugalmi indukció elvén alapszik. A primer tekercsben létrehozott váltakozó áram változó mágneses mezőt kelt a közös vasmagban. A változó mágneses fluxus hatására a szekunder tekercsben is feszültség indukálódik.

Adjunk néhány voltos váltakozó feszültséget egy terheletlen (nyitott szekunder tekercsű) transzformátor primer oldalára! Kapcsoljunk a primer és a szekunder tekercs kivezetéseihez is váltakozó feszültségű voltmérőt! Változtassuk a primer és szekunder menetszámot (N_p és N_{sz}), és foglaljuk táblázatba a tekercsek menetszámát, valamint a rajtuk mérhető primer és szekunder effektív feszültség (U_p és U_{sz}) értékét!



185.3. *Mi létesít kapcsolatot a transzformátor primer és szekunder tekercse között?*

Mérések szerint a transzformátoron a primer és szekunder effektív feszültségek aránya megegyezik a primer és szekunder tekercsek menetszámának arányával:

$$\frac{U_p}{U_{sz}} = \frac{N_p}{N_{sz}}.$$

A kapott eredmény érthetővé válik, ha arra gondolunk, hogy a primer és a szekunder feszültségek pillanatnyi értékei megegyeznek a közös vasmagú (közös fluxusú) tekercsekben indukált feszültségekkel:

$$U_{p_{pill}} = N_p \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

$$U_{sz_{pill}} = N_{sz} \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

A két egyenlőségből már következik az effektív feszültségek és a menetszámok megegyező aránya.

A jó transzformátoron elhanyagolható az energiaveszteség. **A primer oldalon az áramforrásból felvett teljesítmény megegyezik a szekunder oldalon a fogyasztónak leadott teljesítménnyel.**

$$U_p \cdot I_p = U_{sz} \cdot I_{sz}.$$

Ezt az összefüggést összevetve a feszültségek és a menetszámok kapcsolatára nyert összefüggéssel:

$$\frac{I_p}{I_{sz}} = \frac{N_{sz}}{N_p},$$

tehát az effektív áramerősségek fordítottan arányosak a menetszámokkal.

A transzformátor gyakorlati felhasználása azon alapszik, hogy segítségével – lényegében energiaveszteség nélkül – a váltakozó feszültséget át tudjuk alakítani ugyanolyan frekvenciájú nagyobb váltakozó feszültséggé (ez a **feltranszformálás***), vagy kisebb váltakozó feszültséggé (ez a **letranszformálás***).

Különösen fontos szerepet tölt be a transzformátor a villamos energiának az erőmű és a fogyasztók közötti gazdaságos szállításánál.

A nagy távolságok miatt nem elhanyagolható a távvezeték R ellenállása. Jelentős lehet a távvezetéken fellépő $I^2 \cdot R$ teljesítményveszteség, ami a vezetékek melegedésére és a környezet fűtésére fordítódik.

Mivel ez a veszteség a távvezetéken folyó áramerősség négyzetével arányos, a távvezeték áramerősségének csökkentése nagy megtakarításokat eredményezhet. A teljesítményre vonatkozó $P = U \cdot I$ egyenlőség szerint a fogyasztók által igényelt, meghatározott teljesítmény úgy szállítható kis áramerősséggel, ha azt nagy feszültségen valósítjuk meg.

A transzformátor segítségével ez megoldható. A generátor és a távvezeték között feltranszformálást végeznek, ezáltal a távvezetéken nagy feszültség és kis áramerősség adódik. Kevés lesz a távvezetéken fellépő veszteség. A távvezeték után a fogyasztók felé letranszformálnak. Így a fogyasztók kisebb, kevesebb veszéllyel járó feszültségen hasznosíthatják az elektromos energiát.

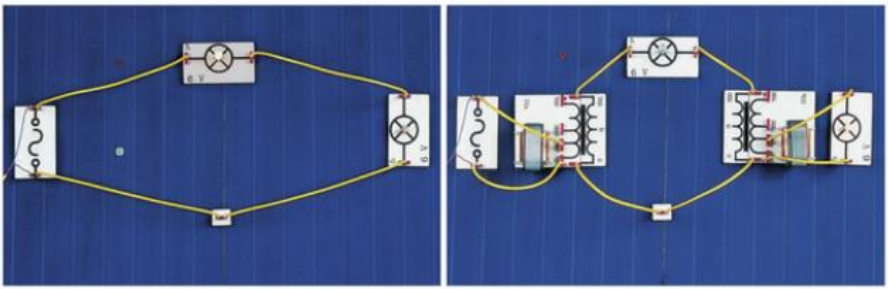
A transzformátor energiaszállításban betöltött szerepének modellezésére végezzük el a következő kísérletet!

Két közel egyforma ellenállású izzót kapcsoljunk sorba olyan váltakozó feszültségű áramforrásra, hogy mindkét izzó gyengén világítson. Az egyik izzó modellezze a távvezetéket, a másik a fogyasztót. Modellünk szerint az áramforrás által leadott energiának csak a fele jut el a fogyasztóhoz, a másik fele elvész a távvezetéken.

Alkalmazzunk most az áramforrás és a távvezetéket jelképező izzó között feltranszformálást, a távvezeték-izzó és a fogyasztó között pedig ugyanolyan mértékű letranszformálást! Megfigyelhetjük, hogy a távvezetékizzó nem világít, a fogyasztót jelképező izzó viszont a korábbinál erősebb fénnyel világít.

A transzformátorok alkalmazása gazdasági és környezetvédelmi szempontból is nagy jelentőségű.

Az első, üzemi célokra használható transzformátort *Bláthy Ottó***, *Déri Miksa*** és *Zipernowsky Károly*** magyar mérnökök készítették 1885-ben.



186.1. Modellkísérlet. *Miért gazdaságosabb transzformátorokkal az elektromos energia szállítása?*



187.1. A zárt vasmagú transzformátor és az elektromos távvezetékrendszer korszerű megvalósítása *Bláthy Ottó, Déri Miksa, Zipernowsky Károly* magyar mérnökök nevéhez fűződik (1885)

MEGJEGYZÉSEK

1. A transzformátor feszültségei és menetszámai közötti összefüggés terheletlen transzformátornál teljesül pontosan. Ha a szekunder kört fogyasztóval terheljük, csökken a szekunder köri kapocsfeszültség. Ezért a transzformátor tervezésénél a szekunder menetszámot kissé megnövelik.

2. Az áramerősségek és a menetszámok kapcsolatára vonatkozó összefüggés annál inkább teljesül, minél jobban terheljük a szekunder kört.

3. A primer kör által az áramforrásból felvett teljesítmény egy része a tekercseket melegíti (rézveszteség), egy másik része pedig az örvényáramok és a vasmag átmágneseződései miatt a vasmag melegítésére fordítódik (vasveszteség).
   Lemezelt vasmagok felhasználásával jelentősen csökken az örvényáramú veszteség. A korszerű transzformátorok összes vesztesége csupán 2% körüli érték. A nagy transzformátorok így is olajhűtést igényelnek.

4. A transzformátor primer és szekunder körében a teljesítmények egyenlőségét a következő összefüggés fejezi ki pontosan:

$$U_p \cdot I_p \cdot \cos\varphi_p = U_{sz} \cdot I_{sz} \cdot \cos\varphi_{sz}.$$

   Üzemi terhelés esetén azonban:

$$\cos\varphi_p \approx \cos\varphi_{sz}.$$

   Ezért írható egyszerűbben:

$$U_p \cdot I_p = U_{sz} \cdot I_{sz}.$$

5. A generátorok 10-15 kV-os feszültségét a távvezeték előtt rendszerint 100-200 kV-ra transzformálják fel, de előfordul 750 kV-os távvezeték is. A fogyasztó előtt a letranszformálás transzformátorállomásokon több lépésben történik (35 kV, 6 kV), amíg a lakások 230 V-os feszültségét megkapjuk.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Az elektromos feszültség, áramerősség, teljesítmény, munka közül melyiknek a növelése érhető el transzformátor segítségével?
2. Hogyan változik egy meghatározott primer feszültségre kapcsolt transzformátor szekunder feszültsége és áramerőssége, ha
   a) a szekunder menetszámot megduplázzuk?
   b) a primer menetszámot megduplázzuk?
3. A hálózati feszültségnél kisebb feszültséget igénylő fogyasztók számára változtatható ellenállás, potenciométer és transzformátor segítségével is biztosítható a szükséges feszültség. Melyik a leggazdaságosabb megoldás?
4. Miért csökken a szétszedhető transzformátor szekunder feszültsége, ha a záróvasmagot eltávolítjuk?
5. Mi okozza egyes transzformátorok „morgó" hangját?
6. 230 V-os feszültségre kapcsolt, 1200 menetes primer és 6 menetes szekunder tekercset tartalmazó transzformátorral „100-as" vasszöget is meg lehet olvasztani anélkül, hogy a hálózati olvadó biztosíték megszakadna, vagy az automata biztosító lekapcsolna. Hogyan magyarázható ez a kísérleti tapasztalat? (Ilyen elven működik az indukciós olvasztókemence is.)
7. Hogyan változik a távvezetéken az energiaveszteség, ha ugyanazt a teljesítményt 20 kV helyett 200 kV-os távvezetéken juttatjuk el a fogyasztóhoz?
8. Fogyaszt-e elektromos energiát a hálózatra kapcsolt terheletlen transzformátor (például csengőreduktor, amikor nem szól a csengő)?
9. Gépkocsi akkumulátoros gyújtásánál az akkumulátor 12 V-os egyenfeszültségét transzformálják fel a gyújtószikrához szükséges közel 20 000 V-os feszültségre. Hogyan lehet egyenfeszültséget feltranszformálni? (Ilyen elven működik a szikrainduktor is.)

FELADATOK

1. Korszerű-e városunk energiagazdálkodása? Keressünk érveket és ellenérveket! Alkossunk az osztályban két csoportot, és rendezzünk vitát!
2. Egy transzformátor primer köri menetszáma 35-szöröse a szekunder menetszámnak. Mekkora áram folyik a primer körben, amikor a szekunder tekercshez kapcsolt izzón az áramerősség 0,6 A?
3. Egy 700 menetes primer tekercset tartalmazó transzformátor szekunder tekercse olyan 350 menetes tekercs, amelynek a 100. menetnél is van megcsapolása (kivezetése). Milyen feszültségeket vehetünk le a szekunder tekercsről, ha a primer tekercset a 230 V-os hálózati feszültségre kapcsoljuk?
4. Egy transzformátor primer tekercse 300, szekunder tekercse 20 menetes. A szekunder körben lévő zseblámpaizzón a feszültség 3,5 V, az áramerősség 0,2 A.
   a) Milyen erősségű áram folyik a primer körben?
   b) Mennyi a primer feszültség?
   c) Mennyi a teljesítményfelvétel?
5. Olvassunk Bláthy Ottó, Déri Miksa, Zipernowsky Károly életéről és munkásságáról!

3.5. Elektromos balesetvédelem* és elsősegélynyújtás*

Az élőlényekben a sejtnedv elektrolit*, ezért az emberi szervezet is vezeti az elektromos áramot.

Az áram az emberi testen égési sérüléseket hozhat létre, megváltoztathatja a sejtnedvek összetételét, és életveszélyes izomgörcsöket okozhat.

Mindegyik hatás függ a testen áthaladó áram erősségétől és az áram átfolyásának időtartamától.

Az áram erősségét a feszültség és az ellenállás együtt határozza meg.

Az emberi test belsejének ellenállása kb. 500 ohm. A bőrön be- és kilépő áram esetén a test ellenállása az 50 000 ohmos értéket is elérheti. Az ellenállás tehát döntően a vezetővel érintkező bőrfelülettől származik. Sérült, nedves (izzadt) bőr vagy a vezető nagy bőrfelülettel való érintkezése esetén az emberi test ellenállása nagyságrendekkel is csökkenhet. (A bőr verejtékezéssel járó ellenállás-változását használják fel az úgynevezett hazugságvizsgálóknál.)

A bőrfelület viszonylag nagy ellenállása miatt a vezetővel való érintkezés helyén keletkeznek az égési sérülések.

Áramütéseknél az életveszélyt rendszerint az okozza, hogy az áram izomgörcsöt, és ezáltal szív- vagy légzésbénulást idéz elő. A veszélyes áramerősség nagyságát több tényező befolyásolja: az áram útja a testen át, az egyéni érzékenység (a gyerekeknél nagyobb a veszély), az áram behatás ideje, az áram frekvenciája.

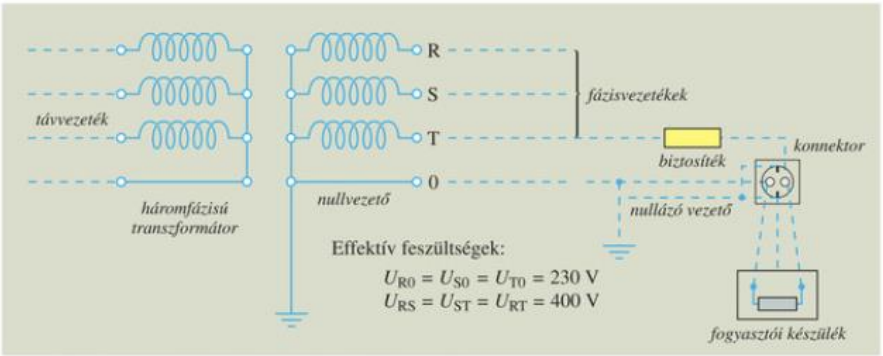
Az egyenáram és a 100 kHz feletti frekvenciájú váltakozó áramok kevésbé veszélyesek. A mikrohullámú, rövidhullámú gyógykezeléseknél például többamperes nagyfrekvenciás áramok haladnak át a beteg testrészeken, és fejtik ki ott melegítő, gyógyító hatásukat.

A nálunk használt 50 Hz-es hálózati frekvencia a legveszélyesebb tartományba esik. Ilyen frekvencián az 1 mA erősségű áramot már érzékeljük. Veszélyességi küszöbként 10 mA-t szokás megadni, mert ennél már bekövetkezik az izmok görcsös összehúzódása. (Lehet, hogy nem tudjuk a vezetéket elengedni.) 50 mA felett már halálos szívbénulás, szívkamralebegés léphet fel.

Az áramerősségre tapasztalt 10 mA-es veszélyességi küszöb és az emberi test 5000 ohmra becsült ellenállása alapján **50 V tekinthető a veszélyes feszültség határának.** (Egyenfeszültség esetén ez az érték 120 V.)

Az áramütés elleni védekezéshez célszerű ismerni a villamosenergia-hálózat legalapvetőbb jellemzőit.

A hálózat úgynevezett **háromfázisú rendszer*.** A távvezetéket követő letranszformálás után a háromfázisú transzformátor három tekercsének azonos végét egy pontba kapcsolják, és leföldelik (*189.1. ábra*). Ehhez a ponthoz kapcsolódó vezeték a **nullvezető***. A tekercsek másik végeihez kapcsolódó vezetékek a **fázisvezetők*** **(R, S, T).** Bármely fázisvezető és a nullvezető között a feszültség **230 V.** Két fázisvezető között



189.1. Háromfázisú áramrendszer és nullázásos érintésvédelem

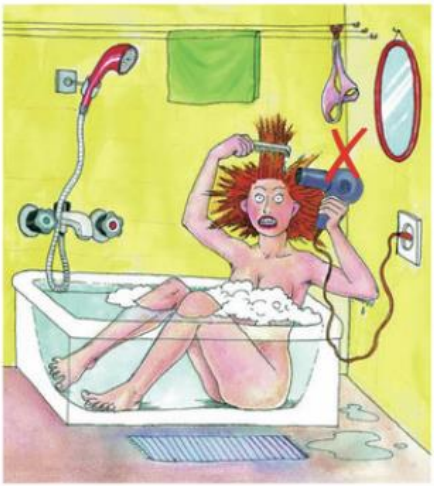
az előbbi feszültség $\sqrt{3}$-szorosa lép fel, amit kerekítve **400 V**-nak vehetünk.

A hálózati feszültség pillanatról pillanatra változik. A megadott értékek a hőhatás szempontjából vett átlagértéket (effektív értéket) jelentenek. Ezek közül a 400 V-os feszültséget úgynevezett ipari áramhoz, elsősorban nagyobb teljesítményű motorok meghajtásához használják.

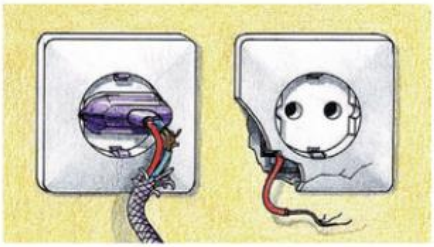
A kisebb energiaigényű lakásokba valamelyik fázisvezetéket és a nullvezetőt vezetik be. Ehhez a két vezetékhez csatlakoznak a lakásokban található szokásos dugaszoló aljzatok (konnektorok) is, 230 V-os kimeneti feszültséggel.

Ne felejtsük el, hogy a 230 V-os hálózati feszültség életveszélyes!

3D



190.1. *Miért életveszélyes fürdőkádban hajszárítót használni?*



190.2. A rossz szigetelés élet- és tűzveszélyes!

A legtöbb súlyos elektromos baleset a fázisvezeték és egy földelt fémtest (vízcsap, radiátor, talaj) egyidejű érintéséből származik. A nullvezeték földeléséből következően ugyanis **a hálózati feszültség egyik pólusa a talaj!**

Ne bízzunk meg teljesen a szigetelőanyagokban sem, mert nedvesség, pára hatására a felületükön vezetővé válhatnak. Nedves kézzel ne nyúljunk elektromos berendezésekhez! Ne irányítsunk vízsugarat feszültség alatt álló vezetőre, konnektorra (például tűzoltásnál)!

Gyakran okoznak balesetet a sérült elektromos vezetékek. Sérült szigetelésű elektromos vezeték használata életveszélyes!

Leszakadt távvezetéket ne is közelítsünk meg, mert a talajon, mint ellenálláson át folyó áram következtében az úgynevezett lépésfeszültség is halálos lehet.

Az elektromos melegítő eszközök, villamos motorok belsejében bekövetkezhet vezetékszakadás, a vezeték és a fémtest érintkezése, amiből súlyos elektromos baleset származhat. Ennek kivédésére az érintésvédelem többféle módja is elterjedt.

Gyakran találkozhatunk a kettős szigetelés alkalmazásával. Ebben az esetben az üzemszerűen feszültség alatt álló vezető részeket a szokásos szigetelésen túl egy külső szigetelő burkolat is borítja (porszívó, villanyborotva stb.).

Az érintésvédelem másik, lakásokban is elterjedt módja a **nullázás*** (*191.2. ábra*). Ennél a fogyasztói készülék érinthető fémtestét a **nullázó vezető** útján összekötik a hálózati földelt nullvezetékkel (*189.1. ábra*). Ha az üzemi szigetelés meghibásodása miatt a készülék fémteste és a földelés között 50 V-nál nagyobb feszültség lépne fel, akkor a nullázó vezető felé folyó zárlati áram azonnal megszakítja az áramkört (kismegszakító vagy olvadó biztosító működtetésével).

Olyan elektromos készüléket, amelyet védőérintkezős villásdugóval hoznak forgalomba, csak védőérintkezős dugaszoló aljzathoz csatlakoztassunk! Csak ezáltal valósul meg ezeknél a készülékeknél a nullázásos érintésvédelem. Ellenkező esetben a készülékek érintése életveszélyes áramütéssel járhat. Ugyanilyen veszélyt jelent a nullázó vezető és nullvezető felcserélése is. Ezért az áramvezető kábelekben a nullázó vezetőt (a védővezetőt) zöld-sárga szín, a nullvezetőt (az üzemszerinti áramvezetőt) pedig kék szín jelöli.



191.1. *Miért életveszélyes a leszakadt nagyfeszültségű távvezetéket megközelíteni?*

Mit tehetünk, ha mégis bekövetkezik az elektromos baleset?

1. A legfontosabb a sérült azonnali kiszabadítása az áramkörből.
Megvalósítása többféle módon is történhet:
- az áram lekapcsolásával;
- csatlakozó kihúzásával;
- biztosíték kiiktatásával;
- a sérült és a vezeték szigetelőanyag segítségével történő elválasztásával (száraz fa vagy ruha, kötél segítségével).

Közben ne érjünk a sérülthöz vagy földelt fémtárgyhoz, mert bennünket is áramütés érhet!



191.2. Gyakori érintésvédelmi mód a nullázás

2. Nyújtsunk elsősegélyt, és hívjunk orvost!
Ha a sérült nem lélegzik, azonnal mesterséges lélegeztetést kell alkalmazni. Sokszor csak több órás mesterséges légzés vezet eredményre! Orvosi ellenőrzés, megfigyelés kisebb áramütés esetén is indokolt, akkor is, ha a sérült jól érzi magát. Az áramütés következményei néha csak utólag jelentkeznek.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Hogyan lehet egyszerűen megállapítani, hogy a konnektor melyik pólusa a fázis és melyik a földelés?
2. Szabályos villanyszerelés esetén miért a fázisvezetéket szakítja meg a kapcsoló?
3. Miért szerelik a fürdőszobai világítás kapcsolóját a fal külső oldalára?
4. Miért nem éri áramütés a nagyfeszültségű távvezetéken álló madarat?
5. Nem kell semmilyen veszélytől tartanunk a nagyfeszültségű távvezeték alatt?

OLVASMÁNY

Elektromos energiatermelés és környezetvédelem

A 19. század az elektromos felfedezések évszázada volt. Az új ismeretekre vezető kutatásokhoz és a technikai alkalmazásokhoz egyaránt megfelelő teljesítményt szolgáltató áramforrásokra volt szükség. Az első jól használható áramforrást a *Volta* által 1800-ban felfedezett galvánelem, majd Volta-oszlop jelentette. *Planté* francia fizikus 1859-ben feltalálta az ólomakkumulátort. Ugyanebben az évben elkészült *Jedlik Ányos* első dinamója is. 1882-ben pedig New Yorkban Edison üzembe helyezte az első villamos erőművet, amelyben gőzgéppel hajtott 6 dinamó 110 V feszültségű elektromos energiát állított elő.

A Ganz-gyár mérnökei, *Bláthy, Déri* és *Zipernowsky* által tervezett transzformátor (1885) azért volt nagy jelentőségű, mert lehetővé tette az erőművekben koncentráltan előállított elektromos energia nagy távolságokra és kis veszteséggel történő szállítását. Nem véletlen, hogy ugyancsak a Ganz-gyár mérnöke, *Kandó Kálmán* a századforduló idején már a villamos vasúti vontatás úttörőjeként szerzett hírnevet.

A 20. században az ipar, a hírközlés, az elektronika olyan ugrásszerű fejlődése következett, hogy gyakorlatilag az élet minden területén nélkülözhetetlenné vált az elektromos energia felhasználása. Bár ennek ma előnyeit érzékeljük, az emberiség jövőjét veszélyeztető következményekről sem szabad megfeledkeznünk.

A villamos energia döntő többségét erőművekben állítják elő úgy, hogy a generátor forgórészét a hozzákapcsolt turbina lapátjaira áramló gőz, levegő vagy víz hajtja meg. Hazai erőműveink csaknem kizárólag gőzhajtású turbinákkal üzemelnek. A termelt villamos energia több mint fele **hőerőművekből** származik, amelyekben fosszilis energiahordozók (szén, olaj, gáz) elégetésével forralnak el vizet, és nyerik a turbinákat meghajtó gőzt. A fosszilis tüzelőanyagok használatával kapcsolatos egyik gond, hogy rohamosan fogynak a rendelkezésre álló készletek. A másik probléma, hogy a fosszilis tüzelőanyagok erősen környezetszennyezők. Az égéstermékek közül különösen a CO_2 üvegházhatást és a SO_2 környezeti savasodást okozó hatása a legveszélyesebb.

Jelenleg a hazai előállítású villamos energia közel 40%-a az 1760 MW összteljesítményű Paksi **Atomerőműből** származik, amely eddigi működése során semmilyen környezeti károsodást nem okozott, és amelyet független nemzetközi szakértői szer-



192.1. *Kandó Kálmán* (1869–1931) első villanymozdonya



192.2. A visontai Mátrai Hőerőmű madártávlatból



192.3. A Paksi Atomerőmű turbinacsarnoka

vezetek is a legbiztonságosabban működő atomerőművek közé sorolnak. A radioaktív hulladékok tárolásában kell még megtalálni a közvélemény számára is megnyugtató megoldást.

Világszerte erősödnek a **megújuló energiaforrások** alkalmazására irányuló törekvések. Ebben a *vízerőművek* játsszák a legnagyobb szerepet, amelyek elsősorban a megfelelő eséssel és vízhozammal rendelkező folyók energiáját hasznosítják. Ezek nem szennyezik a környezetet, de vannak kedvezőtlen környezeti hatásaik is (nagyméretű víztárolók; hordalékszállítás, a talajvízszint és az ökológiai viszonyok megváltoztatása). Épültek már az árapály vízszintkülönbségét hasznosító és a tengervíz hullámainak energiájával működő kísérleti erőművek is.

Figyelemre méltó az utóbbi időben a *szélerőművek* terjedése, bekapcsolódása az elektromos energiaellátó rendszerekbe (USA, Dánia és egyre több nyugat-európai ország esetében). A szélerőművek környezetbarát megoldást jelentenek, hátrányuk azonban a viszonylag kicsiny (általában 1 MW alatti) teljesítmény, valamint a nem folytonos működés.

A *napenergia* hasznosításának egyik módjáról, a közvetlenül elektromos energiát előállító naptelepekről már korábban esett szó (űrkutatás, földi erőművek). Vannak olyan naperőművek is, amelyekben a tükrökkel összegyűjtött napenergiát használják vízgőz előállítására.

A *biomassza* (szerves anyagok, hulladékok) hasznosításában is többféle törekvés figyelhető meg. Jó hatásfokú, és kevésbé környezetszennyező villamosenergia-termelést biztosíthat a biomassza elgázosítása, majd gázturbinákban való elégetése. De járművek számára is állítanak elő biomasszából környezetkímélő üzemanyagot (metil- és etil-alkoholt).

Működnek a Föld belső hőjét villamosenergia-termelésre felhasználó *geotermikus* erőművek is.



193.1. Szélerőműtelep Walesben



193.2. Naperőmű

Hazai viszonylatban a megújuló energiaforrások többségének alkalmazásához nem rendelkezünk kedvező feltételekkel. Ezért nagyon fontos annak tudatosítása, hogy **az energiatakarékosság is a környezetvédelem része.** Különösen sokféle lehetőség kínálkozik erre a fűtés területén jó hőszigetelési és korszerű fűtési módok segítségével.

Jó hatásfokú fűtést tesznek lehetővé a *hőszivattyúk,* amelyek az elektromos hálózatból felvett energiának mintegy háromszorosát adják le a lakásnak, a különbözetet az alacsonyabb hőmérsékletű külső környezetből nyerik.

A fűtési, vízmelegítési energiaszükséglet jelentős részét fedezhetik a *napkollektorok,* amelyek az üvegházhatást hasznosítják, csapdát jelentenek a Napból érkező hősugarak energiája számára.

Jelentős eredmények születtek a közelmúltban az **üzemanyagcellák** fejlesztése terén is. Ezekben hidrogén és oxigén egyesítése során hő szabadul fel és víz keletkezik. Ez a környezetbarát megoldás nemcsak a jövőbeni villamosenergia-termelés és fűtés, hanem a közlekedés energiaforrásaként is ígéretesnek tűnik.

Bár a felhasznált elektromos energia döntő többsége az erőművekből származik, környezetvédelmi szempontból nem szabad megfeledkeznünk az **elhasznált galvánelemek és akkumulátorok gondos és szelektív tárolásáról** – különben azok súlyos környezeti szennyezést okozhatnak. Az akkumulátorok elkülönített gyűjtése azért is indokolt, mert lehetőség van az újrafeldolgozásukra.

Összefoglalás

A MÁGNESES MEZŐ

A mágneses és elektromos kölcsönhatás többféle hasonlóságot mutat (vonzás-taszítás, kétféle pólus, megosztás jelensége, mező közvetíti). Eltérés viszont, hogy amíg a kétféle elektromos töltés szétválasztható, a mágnesek mindig dipólusok.

A mágneses mező erősségét a mezőnek a vizsgáló mágneses dipólusra kifejtett forgatónyomatékával mérhetjük. **A mágneses mezőt jellemző fizikai mennyiség a mágneses indukció,** melynek nagysága

$$B = \frac{M}{N \cdot I \cdot A},$$

ahol N, I és A a magnetométer (mérőtekercs) menetszáma, áramerőssége és keresztmetszete. M a magnetométerre a maximális forgatónyomatékú helyzetben ható forgatónyomaték.

A mágneses indukció mértékegysége a tesla (T).

A mágneses indukció vektormennyiség, irányát az egyensúlyi helyzetben lévő mérődipól északi pólusa mutatja.

Ahogyan az elektromos mezőt az erővonalakkal, a mágneses mezőt az indukcióvonalakkal lehet szemléletesen jellemezni.

Míg az elektromos mező erővonalai nyitottak (egyik töltéstől a másik felé vagy a végtelen felé haladnak), a mágneses indukcióvonalak mindig visszatérő, önmagukban záródó görbék: a **mágneses mező mindig örvényes.**

Egy felületen áthaladó összes indukcióvonal száma adja a felület **fluxusát (Φ).** A mágneses indukcióra merőleges felület fluxusa:

$$\Phi = B \cdot A.$$

A mágneses fluxus mértékegysége a weber (Wb).

Mágneses mezőt leggyakrabban árammal átjárt tekercs segítségével hozunk létre. **Hosszú, egyenes tekercs belsejében homogén mágneses mező jön létre,** amelyben a mágneses indukció irányát (egyúttal a tekercs északi pólusának helyét) a jobbkéz-szabály adja meg.

A mágneses indukció nagysága a tekercsben

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{I \cdot N}{\ell},$$

ahol I, N és ℓ a tekercs áramerősségét, menetszámát és hosszát jelölik. μ_0 állandó, a légüres tér permeabilitása, μ_r pedig a tekercs belsejét kitöltő anyagra jellemző relatív permeabilitás.

A ferromágneses anyagok kis mágneses tartományai mágneses mezőben rendeződnek, és jelentősen erősítik az eredeti mágneses mezőt. Ezek relatív mágneses permeabilitása nagy érték.

A lágyvasmagot tartalmazó tekercseket, az **elektromágneseket** sokféle céllal alkalmazzák a technikában.

A mágneses mező erőt fejt ki a mozgó töltésekre, és így az áramvezetőre is. A **Lorentz-erő** nagysága, ha a B mágneses indukció merőleges a Q töltés v sebességére (vagy az I áramerősségű, ℓ hosszúságú vezetőre),

$$F = B \cdot Q \cdot v \quad \text{vagy} \quad F = B \cdot I \cdot \ell.$$

Az erő irányát jobbkéz-szabállyal adhatjuk meg.

ELEKTROMÁGNESES INDUKCIÓ

Ha mágneses mezőben úgy mozgatunk egy vezetőt, hogy az metszi a mágneses indukcióvonalakat, akkor a Lorentz-erő elmozdítja (szétválasztja) a vezetőben a töltéseket. A vezető végei között elektromos mező, elektromos feszültség jön létre. Ez a **mozgási elektromágneses indukció.**

Az indukált feszültség nagysága:

$$U = B \cdot \ell \cdot v,$$

feltéve, hogy a B mágneses indukció, az ℓ hosszúságú vezető és ennek v sebessége merőleges egymásra.

Az indukált áram iránya mindig olyan, hogy mágneses hatásával akadályozza az indukáló folyamatot. Ez **Lenz törvénye,** amely az energiamegmaradás kifejezője.

Elektromos feszültséget és áramot létrehozhatunk **nyugalmi elektromágneses indukcióval** is. Ennek lényege, hogy változó mágneses mező körül mindig örvényes elektromos mező alakul ki. Ha N menetes tekercsben Δt idő alatt $\Delta\Phi$ a fluxusváltozás, akkor a tekercs végpontjai között

$$U = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

az indukált feszültség (Faraday törvénye). A nyugalmi indukciónál is teljesül Lenz törvénye.

A nyugalmi indukció speciális esete az **önindukció,** ami azt jelenti, hogy a tekercs áramának megváltozása következtében indukálódik a tekercsben feszültség. Az önindukció következménye, hogy a tekercs árama késik a feszültséghez képest.

Az önindukciós feszültséget az

$$U = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

összefüggéssel számoljuk, ahol L a tekercs induktivitása, amelynek mértékegysége a henry (H).

Az elektromos és mágneses mezőnek egyaránt van energiája, melyet a kondenzátor és a tekercs esetén hasonló összefüggéssel számolhatunk:

$$E_{\text{elektromos}} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2, \quad E_{\text{mágneses}} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2.$$

A VÁLTAKOZÓ FESZÜLTSÉGŰ ÁRAMKÖRÖK

A mozgási indukció felhasználásával állítunk elő **váltakozó feszültséget,** illetve váltakozó áramot.

Ha homogén mágneses mezőben állandó szögsebességgel forgatunk egy tekercset, a tekercs végei között létrejövő feszültség az idő függvényében:

$$U = U_{\max} \cdot \sin\omega \cdot t.$$

A feszültség U pillanatnyi értéke a t időnek szinuszos függvénye.

A váltakozó feszültség körfrekvenciája

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 2 \cdot \pi \cdot f,$$

ahol T a periódusidő, f a frekvencia.

A váltakozó feszültség, illetve áram hőhatás szempontjából vett átlagos értékét **effektív értéknek** nevezzük.

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}, \quad I_{\text{eff}} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}.$$

A váltakozó áramú műszerek a feszültség vagy áramerősség effektív értékét mutatják.

A váltakozó áramú áramkörben az elektromos ellenállást általános esetben **impedanciának** nevezzük, és Z-vel jelöljük:

$$Z = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}}.$$

Az impedancia speciális típusai:

a) **Ohmos ellenállás** számítása: $R = \rho \cdot \frac{\ell}{A}$.

Az ohmos ellenálláson a feszültség és az áramerősség azonos fázisban van.

b) **Induktív ellenállás** számítása: $X_L = L \cdot \omega$.

Az induktív ellenálláson az áramerősség 90°-ot késik a feszültséghez képest.

c) **Kapacitív ellenállás** számítása: $X_C = \frac{1}{C \cdot \omega}$.

A kapacitív ellenálláson az áramerősség 90°-ot siet a feszültséghez képest.

Az induktív ellenállás a mágneses mező, a kapacitív ellenállás az elektromos mező felépítéséhez igényel energiát, de a mezők megszűnéskor ezt vissza is táplálják az áramforrásba. Az ohmos ellenállás az elektromos mezőből folyamatosan vesz fel energiát, és – ugyanúgy, mint az egyenáramú áramkörben – hő formájában átadja ezt a környezetének.

Az időegységre jutó átlagos energiafelhasználást kifejező **effektív teljesítmény** (hőteljesítmény):

$$P_{\text{eff}} = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}},$$

általános esetben

$$P_{\text{eff}} = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos\varphi,$$

ahol φ a feszültség és áramerősség közötti fázisszög, a $\cos\varphi$ neve teljesítménytényező.

A váltakozó feszültséget a villamos erőművekben különböző energiaforrások felhasználásával (fosszilis, atom-, víz-, szél-, napenergiából) állítják elő, és **háromfázisú áramrendszerben** juttatják el a fogyasztókhoz. A váltakozó áramú energiaszállításban és átalakításban fontos szerep jut a **transzformátoroknak,** amelyek gyakorlatilag teljesítményveszteség nélkül működnek: az effektív feszültséget a menetszámokkal egyenes, az effektív áramerősséget pedig a menetszámokkal fordított arányban változtatják:

$$\frac{U_{\text{sz}}}{U_{\text{p}}} = \frac{N_{\text{sz}}}{N_{\text{p}}}, \quad \frac{I_{\text{sz}}}{I_{\text{p}}} = \frac{N_{\text{p}}}{N_{\text{sz}}}.$$

Megoldások

(A terjedelem csökkentése érdekében a megoldásokat gyakran nem teljes mondatban fogalmaztuk meg, és néhány egyszerű kérdésre nem adtuk meg a választ.)

I. HŐTAN

1.2. A szilárd testek hőtágulásának törvényszerűségei (15. o.)

G.k.: 1. Nyári kánikulában kell nagyobb belógást hagyni a vezeték szerelésénél, hogy télen az összehúzódáskor ne váljék túlságosan feszessé a vezeték, mert ekkor elszakadhat. **2.** A kitágult fémabroncs könnyen illeszthető a kerékre. Kihűlés után az összehúzódó abroncs rászorul a kerékre. **3.** Hogy a vékony üvegfal egyenletesen melegedjen és táguljon. Ezzel elkerülhető az üveg egyenetlen tágulásából eredő repedése, törése. **4.** Mivel az órainga hossza a hőmérséklet emelkedésekor növekszik, csökkenése esetén pedig csökken, ezért az inga az első esetben lassabban leng, az óra késni fog, a második esetben az inga szaporábban leng, ekkor az óra sietni fog. (Az inga lengésidője függ az inga hosszától.) **5.** Vagy a csapágyat melegítjük fel, vagy pedig a tengelyt hűtjük le. A könnyű összeillesztés után a hőmérsékletek kiegyenlítődésekor a csapágy a tengelyre szorul.

6. $\alpha_{Al} = 2{,}4 \cdot 10^{-5}\,\frac{1}{°C}$. $\alpha_{Cu} = 1{,}6 \cdot 10^{-5}\,\frac{1}{°C}$. $\alpha_{Fe} = 1{,}1 \cdot 10^{-5}\,\frac{1}{°C}$. **7.** Fejezzük ki az ábrán a sárga területeket, az átfedés elhanyagolható.

F.: 1. $\Delta l = 72$ mm; **2.** $l_0 = 6{,}25$ m; **3.** $\Delta T = 109$ °C, $T = T_0 + \Delta T = 129$ °C; **4.** $\alpha = 1{,}84 \cdot 10^{-5}\,\frac{1}{°C}$; a rúd sárgarézből készült. **5.** $\Delta T = -13{,}9$ °C, $T = T_0 + \Delta T = 6{,}1$ °C; **6.** $\Delta V = 11{,}02$ dm^3.

1.3. A folyadékok térfogati hőtágulása (17. o.)

G.k.: 1. A folyadéktartály térfogatát válasszuk nagyra, a hozzá csatlakozó cső pedig kis keresztmetszetű legyen. Így elérhetjük, hogy a folyadék térfogatváltozása nagy folyadékoszlop-hosszváltozást okoz a csőben, ezért a skálabeosztások ritkábbak lesznek, ez pontosabb hőmérsékletmérést tesz lehetővé. **2.** Mert a hőtágulás következtében a folyadék az edényből kifolyhat, vagy a lezárt edényt a tágulló folyadék szétfeszítheti. **3.** Mivel a víz 0 °C–4 °C tartományban rendellenesen viselkedik, ezért nem lenne egyenletes a hőmérő skálabeosztása. **4.** Az etil-alkohol hőtágulási együtthatója kb. hatszor nagyobb, mint a higanyé, így az alkohollal könnyebb érzékenyebb hőmérőt készíteni. Másrészt az alkohol fagyáspontja jóval alacsonyabb a higanyénál, így az alkoholos hőmérővel a higanyosnál alacsonyabb hőmérsékleteket is tudunk mérni. **5.** A hőtágulás következtében a tengerek, óceánok szintje emelkedik. **6.** A legsűrűbb a 0 °C-os víz lenne, amely a folyók és tavak alján helyezkedne el, így a fagyás a tavak és folyók aljától felfelé történne, ezért a jég nem lenne felülről hőszigetelő, s így a víz teljesen befagyna.

F.: 2. $\Delta V = 80{,}6$ cm^3; **3.** $\Delta T = \frac{\Delta V}{V_0 \cdot \beta} = 110{,}5$ °C, $T = T_0 + \Delta T = 128{,}5$ °C; **4.** $\beta = \frac{\Delta V}{V_0 \cdot \beta} = 5 \cdot 10^{-4}\,\frac{1}{°C}$.

A folyadék glicerin volt. **5.** $\Delta V = 7{,}04$ cm^3, $\Delta h = \frac{\Delta V}{A} = 28{,}16$ cm; **6.** $\Delta \ell = \ell_0 \cdot \frac{\beta_{víz}}{3} \cdot \Delta T = 17{,}3$ cm;

7. *a)* $V_{ki} = V_0 \cdot \beta_p \cdot \Delta T = 368$ cm^3; *b)* $V_{ki} = V_0 \cdot \beta_p \cdot \Delta T - V_0 \cdot \beta_{al} \cdot \Delta T = 339$ cm^3; **8.** $\rho_T = \frac{\rho_0}{1 + \beta \cdot \Delta T} = 987{,}7\,\frac{kg}{m^3}$.

2.2. Gázok állapotváltozása állandó nyomáson (23. o.)

G.k.: 1. Az ideális gázt jól megközelítő reális gázok: a hidrogén, a hélium, az oxigén, a nitrogén, a levegő. Az ettől nagyobb mértékben eltérő gázok: a kén-dioxid és a szén-monoxid. **2.** Fűtéskor a szoba levegőjének egy része a szabadba távozik, lehűléskor pedig a szabadból levegő jut a szobába (ezt a jelenséget nevezik természetes szellőzésnek). **3.** A pénzérme az üveg száján a melegítés során többször felemelkedik. Az üvegben lévő – pénzérmével elzárt – levegő melegszik, így nyomása megnő, ezért a palackban keletkező túlnyomásból származó erő hatására a pénzérme felemelkedik, eközben – az üvegből kiáramló levegő hatására – a nyomás kiegyenlítődik, ekkor a pénzérme visszaesik a palack szájára. Ez a folyamat

a melegedés folyamán többször megismétlődik. **4.** A zacskóban felmelegedett levegő sűrűsége kisebb lesz, így a zacskó léggömbként felemelkedik. A levegő lehűlése után a sűrűsége megnő, ezért a „léggömb" leereszkedik. **5.** A radiátor feletti levegő kitágul és felfelé áramlik, így a légáramlattal a levegőben lévő por a mennyezetre jut, ahol megtapad. A radiátorra helyezett üveglappal megakadályozhatjuk a felfelé szálló légáramlatot. **6.** Az Egyenlítőnél felszálló és a Rák- és Baktérítőn leszálló passzátszelek.

F.: 1. $\Delta V = V_0 \cdot \beta_{lev} \cdot \Delta T = 4{,}41\ \text{m}^3$; **2.** $V_0 = \frac{\Delta V}{\beta_{lev} \cdot \Delta T} = 907\ \text{m}^3$, $h = \frac{V_0}{A} = 4{,}54\ \text{m}$; **3.** $\Delta T = \frac{A \cdot \Delta h}{V_0 \cdot \beta_a} = 26{,}3\ ^\circ\text{C}$, $T = T_0 + \Delta T = 26{,}3\ ^\circ\text{C}$; **4.** $\Delta V = V_0 \cdot \beta \cdot \Delta T = 0{,}3663\ \text{cm}^3$, $\Delta h = \frac{\Delta V}{r^2 \cdot \pi} = 1{,}87\ \text{cm}$; **5.** $V_0 = \frac{V_1}{1 + \frac{\Delta T_1}{273\ ^\circ\text{C}}} = 45\ \text{m}^3$, $V_2 = V_0\left(1 + \frac{\Delta T_2}{273}\right) = 53{,}24\ \text{m}^3$, $q = \frac{V_2 - V_1}{V_1} = 0{,}066$, azaz 6,6%.

2.3. Gázok állapotváltozása állandó térfogaton (26. o.)

G.k.: 1. Lehűléskor a befőttesüvegbe zárt levegő nyomása lecsökken, az így kialakult nyomáskülönbség miatt a külső légnyomás a fedelet az üvegre szorítja. A fedél pereme alá pl. egy kés pengéjét feszítve az üvegbe levegőt tudunk engedni. Ez a nyomáskülönbséget megszünteti, ezután a fedél könnyedén lecsavarható. **2.** A tömlőbe bezárt levegő hőmérséklete és nyomása megnövekszik. A nyomást levegő kiengedésével vagy hűtésével csökkenthetjük. **3.** A *p*-, illetve *V*-tengellyel párhuzamos egyenes szakasz. **4.** A lombikban lévő levegő hűlésekor nyomása csökken, így a külső légnyomás nagyobb lesz. A nyomáskülönbségből származó erő a főtt tojást a lombikba préseli. Melegítéskor fordított lesz a helyzet: a lombikban megnő a nyomás, ezért a tojás kipréselődik a lombikból.

F.: 1. *a)* $\Delta p_2 = 230{,}7\ \text{kPa}$; *b)* $\Delta p_3 = 189{,}8\ \text{kPa}$; **2.** $F = 86{,}2\ \text{N}$; **3.** $T_2 = 418{,}6\ \text{K} = 145{,}6\ ^\circ\text{C}$; **4.** *a)* $T = 17{,}9\ ^\circ\text{C}$; *b)* Nem függ a kérdéses hőmérséklet a palackban lévő levegő térfogatától.

2.4. Gázok állapotváltozása állandó hőmérsékleten (28. o.)

G.k.: 1. A sűrűség a nyomással egyenesen arányos. **2.** A gáz cseppfolyósodhat. **3.** A bura alatt a léggömbön kívüli levegő nyomása csökken, ezért a léggömb a belső levegő tágulásának következtében felfúvódik. **5.** A rugalmas, harang alakú dugattyút fordítva kell a pumpa hengerébe helyezni, így a dugattyú lenyomásakor a dugattyú és a henger fala között a levegő a pumpából a szabadba áramlik, felhúzásakor viszont a dugattyú és a henger fala között a rés megszűnik, a légritkítandó térből a levegő a pumpa hengerébe áramlik. **6.** A kémcsőben lévő levegőoszlop a „búvár" részeként tekinthető, amelyre felhajtóerő hat. A külső nyomás a vízben tovaterjed, hatására a levegőoszlop összenyomódik, csökken a felhajtóerő. Az egyensúly megbomlik, a „búvár" lemerül. A külső nyomás megszűnésével a levegőoszlop kitágul, a megnövekedett felhajtóerő a „búvárt" a felszínre hozza.

F.: 1. $p_2 = 1{,}67 \cdot 10^5\ \text{Pa}$; **2.** $h_2 = 23{,}1\ \text{cm}$; **3.** $\Delta h = 3{,}3\ \text{cm}$; **4.** A Boyle–Mariotte-törvényből nyert egyenletből: $p_0 = p_{Hg} \cdot \frac{\ell_1 + \ell_2}{\ell_1 - \ell_2}$. **5.** $s = 7{,}2\ \text{cm}$.

2.5. Az ideális gázok általános állapotváltozása, állapotegyenlete (32. o.)

G.k.: 1. *a)* izobár; *b)* általános; *c)* általános; *d)* izotermikus; *e)* izochor; *f)* izobár; **2.** Összesen hat eset lehetséges egyik állapotból a másikba jutással egymást követő két speciális állapotváltozás útján, ezek a következők: (1) izochor – izobár; (2) izobár – izochor; (3) izoterm – izobár; (4) izoterm – izochor; (5) izobár – izoterm; (6) izochor – izoterm; **3.** Az $A \to B$ és a $C \to D$ átmenetek izochor, a $B \to C$ és a $D \to A$ átmenetek pedig izobár állapotváltozást jelentenek. A körfolyamatot megvalósíthatjuk egy dugattyúval ellátott hengeres edényben lévő gázzal: először rögzített dugattyúállásnál felmelegítjük a gázt egy adott hőmérsékletre, majd további melegítéskor a dugattyút állandó nyomás mellett mozogni hagyjuk. Ezt követően – a dugattyút ismét rögzítve – a gázt addig hűtjük, amíg nyomása nem csökken le az eredeti értékre. Ekkor a dugattyú rögzítését feloldva a hűtést állandó nyomás mellett addig folytatjuk, amíg a gáz eredeti térfogatára húzódik össze. **4.** A lopóban (pipettában) maradt levegő nyomása csökken, így a külső légnyomás a folyadékot a csövön keresztül a lopóba (pipettába) nyomja. **5.** A gázt melegíteni kell.

F.: 2. $p_2 = 111{,}6$ kPa; **3.** $V_2 = 7{,}8$ cm^3; **4.** $V_3 = 5{,}2$ dm^3, $p_3 = 106{,}7$ kPa; **5.** $\Delta T = 34{,}6$ °C; **6.** $m = 6{,}4$ kg; $p_2 = 5{,}9$ MPa. **7.** $M = 4\ \frac{\text{g}}{\text{mol}}$, a gáz hélium. **8.** $\rho_H = 0{,}089\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$; $\rho_{He} = 0{,}179\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$; $\rho_O = 1{,}428\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Az eltérés oka az, hogy a táblázat adatai valódi gázokra vonatkoznak.

3.2. A gázok állapotváltozásainak molekuláris értelmezése (37. o.)

G.k.: 1. A cső alsó és a felső lapjára kifejtett erők különbsége, amely a nyomások különbségéből származik, egyenlő a csőben lévő gázrészecskék súlyával. **2.** A térfogat csökkentésével, vagy a részecskék számának növekedésével. Ezt összenyomással, vagy a gáz bevitelével valósíthatjuk meg a gyakorlatban. **3.** A hidrogéngáznak nagyobb a nyomása, mivel nagyobb a részecskék száma és sűrűsége. **4.** Egyenes arányosság.

F.: 1. *a)* $F_á = 20$ N; *b)* $F = 20\,000$ N; **2.** *a)* $p = 250$ Pa; *b)* A sátorlap feszítésével a nyomás nőni fog. (Mivel a homokszemek nem teljesen rugalmatlanul ütköznek a megfeszített lappal, hanem arról visszapattannak, így nagyobb lesz az impulzusváltozás, ezért az erőhatás is növekedni fog.)

3.3. A testek belső energiája, a hőtan I. főtétele (41. o.)

G.k.: 1. A gáz belső energiája növekszik. (Ha a széteső molekulák hányada q, akkor a belső energia növekedési aránya $\frac{q}{5}$.) **2.** Azonos hőmérsékleten a nagyobb tömegű molekuláknak kisebb az átlagos sebessége. Így legkisebb sebességű az O_2-molekula, legnagyobb sebessége pedig a H_2-molekulának van. **3.** Nem lehet, mivel a belső energia a mozgási energiák összege, amely mindig pozitív. **4.** A szobában lévő levegő belső energiája nem változik (mivel a $p \cdot V$ szorzat állandó). **5.** Pumpában lévő levegőt összenyomunk, miközben a pumpa falán keresztül a gáz hőt ad le. **6.** Az előző példában a gázt hűtjük, de az mégis felmelegszik az összenyomás hatására. **7.** A szódásüvegbe csavart szifonpatronban lévő levegőt kezünkkel melegítjük, de az mégis lehűl a gyors tágulás következtében.

F.: 1. Egyatomos gáznál $E_b = \frac{3}{2} \cdot R \cdot T = 3405$ J, kétatomos gáz esetében pedig $E_b = \frac{5}{2} \cdot R \cdot T = 5674$ J; **2.** $E_b = \frac{5}{2} \cdot p \cdot V = 15\,000$ kJ; **3.** Mivel az $E_b = \frac{5}{2} \cdot p \cdot V$ állandó, a szobában lévő levegő belső energiája nem változik. A szoba tárgyainak belsőenergia-csökkenését a szobából távozó levegő viszi magával. **4.** $\Delta E_b = \frac{5}{2} \cdot R \cdot \Delta T = 62{,}3$ J; **5.** $E_b = \frac{3}{2} \cdot n \cdot R \cdot T$, $T = 1{,}1 \cdot T_1 = 27{,}3$ °C; $\Delta E_b = \frac{3}{2} \cdot n \cdot R \cdot \Delta T = 1702{,}3$ J; **6.** Igen, történt hőcsere: $Q = -100$ J. Az összenyomott levegő a környezetének hőt adott le.

3.4. A gázok állapotváltozásainak energetikai vizsgálata (46. o.)

G.k.: 1. A gáz és környezete között egyféle kölcsönhatás jön létre az izochor és az adiabatikus állapotváltozás során. Kétféle kölcsönhatás valósul meg az izobár és az izoterm állapotváltozások esetén. **2.** Az izoterm és izobár állapotváltozásokra igaz a kijelentés. **3.** Igaz állítások: *a) c) d);* **4.** Mivel a testeken végzett külső munkavégzés a hőcseréhez képest elhanyagolható. **5.** $W' = 200$ J; **6.** $Q = -500$ J; **7.** $\Delta E_b = 200$ J.

F.: 2. $\Delta E_b = Q = 100$ J; **3.** *a)* $\Delta E_b = \frac{5}{2} \cdot R \cdot n \cdot \Delta T = 1121{,}8$ J; *b)* $Q = \Delta E_b + p \cdot \Delta V = \frac{7}{2} \cdot R \cdot n \cdot \Delta T = 1571{,}4$ J; **4.** *a)* $\Delta E_b = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Delta V = \frac{3}{2} \cdot W' = 300$ J; *b)* $Q = \Delta E_b + W' = 500$ J. **5.** *a)* $\Delta E_b = 85{,}1$ kJ; *b)* $Q_1 = 107{,}8$ kJ; $Q_2 = 96{,}4$ kJ.

3.5. A termikus folyamatok iránya, a hőtan II. főtétele (49. o.)

G.k.: 1. Reverzibilis folyamatok: súrlódás nélküli inga lengése, veszteség nélküli rugó rezgőmozgása stb. Irreverzibilis folyamatok: egy test csúszása súrlódásos felületen, labda pattogása füves felületen stb. **2.** 100% hatásfokú hőerőgépeket lehetne tervezni. Mechanikai munka befektetése nélkül kinyerhetnénk az óceánok hatalmas belső energiakészletét stb. **3.** Mindkét esetben a helyiség hőmérséklete emelkedne. Zárt ajtónál jobban.

4.2. A halmazállapot-változások molekuláris értelmezése (55. o.)

G.k.: 1. A jég nagy olvadáshője miatt (1 kg tömegű jég megolvasztásához kb. annyi hőre van szükség, mint 1 kg víz hőmérsékletének 80 °C-kal történő növeléséhez). **2.** Térfogat növekedésekor a felszín domború (például a víznél), csökkenésekor viszont a felszín homorú (pl. a fixírsónál) lesz fagyás során. **3.** Lázas beteg vizes borogatásánál, nyári locsolásnál stb. **4.** A ruhát magasabb hőmérsékleten (napon) szárítjuk kiterítve, erős légáramlatban (szélben). **5.** A felhőképződés következtében csökken a levegőben lévő vízgőzrészecskék száma, ami a légnyomás csökkenéséhez vezet. **6.** A doboz hűtésekor lecsapódott a doboz belsejében a vízgőz. Ez belső nyomáscsökkenést eredményez, ezért a külső légnyomás összeroppantja a gyenge falú dobozt.

F.: 2. $Q = c_j \cdot m_j \cdot \Delta T + m_j \cdot L_o = 1780$ kJ; **3.** $\frac{t_2}{t_1} = \frac{m \cdot L_f}{c \cdot m \cdot \Delta T} = 6{,}71$; **4.** $m_j = \frac{m_g \cdot L_f + c_v \cdot m_g \cdot \Delta T}{L_o} = 0{,}80$ kg;

5. $c_{víz} \cdot m_{víz} \cdot (T - 0\,°C) \geq L_o \cdot m_j$, ezért a jég teljesen megolvad. $T_{közös} = \frac{m_v \cdot c_v \cdot T - m_j \cdot L_o}{c_v \cdot (m_j + m_v)} = 4{,}05$ °C lesz.

6. A jég teljesen megolvad, és a termikus egyensúly létrejöttekor 63,6 °C hőmérsékletű víz lesz a termoszban.

II. ELEKTROSZTATIKA

1. ELEKTROSZTATIKAI ALAPISMERETEK

1.1. Emlékeztető (67. o.)

G.k.: 1. Feltöltődik, és jobban porosodik. **2.** Gátolja a dörzsöléses feltöltődést. **3.** Levezeti a töltéseket a földbe, megakadályozza a szikrakisülést. **4.** A műanyag feltöltődhet, a fém elvezeti a töltéseket. **5.** Átvehetik a töltés egy részét. **6.** Mindkettő kisebb pozitív töltést mutat. **7.** Elektromos megosztás miatt. **8.** Az elektromos test vonzza a vízsugarat. **9.** Az elektromos töltésűvé vált emberi test és az autó közötti kis szikrakisülés. **10.** A rúd vezető, a fogantyú szigetelő.

2. COULOMB TÖRVÉNYE. A TÖLTÉSMEGMARADÁS TÖRVÉNYE (70. o.)

G.k.: 1. Távolságukat kétszeresére növeljük. **2.** *a)* Nullára csökken. *b)* Nem változik. *c)* Nagysága harmadára csökken, iránya ellentétes lesz. *d)* Nagysága négyharmadszorosára nő, iránya változatlan. **3.** *a)* Ugyanakkora, de taszító- helyett vonzóerő. *b)* Vonzóerő marad, de kb. 1850-szer kisebb lesz.

F.: 2. *a)* $6{,}25 \cdot 10^{18}$; *b)* $6{,}25 \cdot 10^{18}$; *c)* $3{,}12 \cdot 10^{18}$; *d)* $6{,}8 \cdot 10^{16}$; **3.** $2{,}8 \cdot 10^{-3}$ N vonzóerő. **4.** *a)* $3{,}73 \cdot 10^{-8}$ C; *b)* A testek nem pontszerűek. **5.** 1,34 km. (Érzékelhető, hogy az 1 C nagy töltésmennyiség!)

3. AZ ELEKTROMOS MEZŐ JELLEMZÉSE

3.1. Az elektromos térerősség (73. o.)

G.k.: 2. Lefelé. **3.** Igen, 3-szor nagyobb távolságban. **4.** $E = 0\ \frac{N}{C}$. **5.** Az *A* pontból induló, *B*-t nem tartalmazó félegyenesen.

F.: 2. $1{,}5 \cdot 10^3\ \frac{N}{C}$ lefelé. **3.** *a)* $1{,}6 \cdot 10^{-15}$ N felfelé. *b)* $9{,}1 \cdot 10^{-30}$ N lefelé. *c)* A gravitációs erő elhanyagolható az elektromos erő mellett. $1{,}76 \cdot 10^{15}\ \frac{m}{s^2}$ felfelé. **4.** 200; **5.** $4{,}5 \cdot 10^5\ \frac{N}{C}$ és a töltés felé irányul. **6.** *a)* $1{,}8 \cdot 10^{-7}$ C; negatív; *b)* $1{,}33 \cdot 10^{-9}$ C; pozitív; **7.** *a)* $6 \cdot 10^4\ \frac{N}{C}$ a negatív töltés felé. *b)* $1{,}56 \cdot 10^4\ \frac{N}{C}$ elirányul a töltésektől. **8.** $1{,}49 \cdot 10^{-8}$ C.

3.2. Az elektromos mező szemléltetése erővonalakkal (77. o.)

G.k.: 1. *a)* *D*; *b)* *C*; *c)* *A* és *B*; *d)* *B* és *C*; *e)* Q_1 pozitív, Q_2 negatív.

F.: 1. *a)* $3000\ \frac{N}{C}$; *b)* $300\ \frac{N \cdot m^2}{C}$; *c)* 0; *d)* $150\ \frac{N \cdot m^2}{C}$; **2.** *a)* $15\ \frac{N \cdot m^2}{C}$; *b)* 0; *c)* $13\ \frac{N \cdot m^2}{C}$.

3.3. Az elektromos mező munkája. Az elektromos feszültség (80. o.)

G.k.: 2. Egyenletes mozgatás esetén a két munka egyenlő nagyságú, de ellentétes előjelű. Nem egyenletes mozgatásnál a két munka nagysága is különbözik. **3.** *a)* Pozitív. *b)* Negatív. **4.** *a)* Negatív. *b)* Negatív. *c)* Pozitív. **5.** *a)* Nem. A feszültség a térerősségen kívül függ a két pont mezőbeli elhelyezkedésétől is. *b)* Igen. **6.** Az $U = E \cdot r \cdot \cos\alpha$ alapján, ahol E és r állandó: koszinusz függvényként.

F.: 2. 12 V; **3.** $2{,}4 \cdot 10^{-13}$ J; **4.** *a)* $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J; *b)* $5{,}93 \cdot 10^{5} \frac{\text{m}}{\text{s}}$; **5.** *a)* 1200 N; *b)* 7500 V; *c)* 2,5 cm; *d)* $548 \frac{\text{m}}{\text{s}}$; **6.** $577 \frac{\text{V}}{\text{m}}$; **7.** A és B, D és E; $U_{BC} = 10$ V; $U_{CD} = 20$ V; $U_{BD} = 30$ V; **8.** $U_{AB} = 150$ V; $U_{BA} = -150$ V; $U_{BC} = 50$ V; $U_{BD} = 100$ V; $U_{DA} = -250$ V; $U_{DE} = 150$ V.

4. ELEKTROMOS TÖLTÉSEK, TÉRERŐSSÉG, POTENCIÁL A VEZETŐN (85. o.)

G.k.: 1. Akkor nem, ha töltést viszünk e térrészbe. **2.** A fémgolyót az üreges vezető belsejéhez érintjük. **3.** Az azonos előjelű töltések taszító hatása miatt. **4.** Csak a fémfelületekkel határolt térrész védett (például a teherautó platója vagy a kívülről műanyag borítású utastér nem). **5.** Először a dipólusokra ható, azután az egynemű töltések közötti erőhatás miatt. **6.** *a)* Igen. *b)* Nem. **7.** Nem, sőt minél több ponton össze kell vele kötni. **8.** A csúcshatással felgyorsított részecskék okozzák ugyanúgy, mint a villámnál.

5. A KONDENZÁTOR. AZ ELEKTROMOS MEZŐ ENERGIÁJA (90. o.)

G.k.: 1. *a)* Nem. *b)* Nem. *c)* Igen. **3.** A töltés és térerősség állandó, a feszültség nő, a kapacitás csökken, az energia nő.

F.: 1. 33 nF; **2.** 0,5 V; **3.** $5{,}9 \cdot 10^{-2}$ J és $2{,}35 \cdot 10^{-3}$ C; **4.** *a)* 10^{-9} C; *b)* $5 \cdot 10^{-8}$ J; *c)* $1{,}5 \cdot 10^{-9}$ C; *d)* $1{,}6 \cdot 10^{-2}$ V; **5.** *a)* $1{,}4 \cdot 10^{-4}$ C; *b)* $4{,}4 \cdot 10^{-3}$ J; **6.** *a)* $2{,}5 \cdot 10^{5} \frac{\text{V}}{\text{m}}$; *b)* 177 pF; *c)* $8{,}9 \cdot 10^{-8}$ C; *d)* $2{,}2 \cdot 10^{-5}$ J; *e)* $3{,}3 \cdot 10^{-5}$ J.

III. AZ ELEKTROMOS ÁRAM. VEZETÉSI JELENSÉGEK

1. EGYENÁRAM, ÁRAMKÖRI ALAPTÖRVÉNYEK

1.1. Emlékeztető (96. o.)

G.k.: 1. A kondenzátor kisütésekor csak külső áram folyik, nincs belső töltésszétválasztás. **2.** A vezeték is fogyasztó, de ez általában elhanyagolható a „fő" fogyasztók mellett. Például rövidzár esetén a vezeték válik fogyasztóvá. **3.** A sílelők a töltéshordozóknak, a drótkötélpálya az áramforrásnak, a havas lejtő a vezetőnek (fogyasztónak) felelnek meg. **4.** Az egyszerű kapcsoló zárja vagy nyitja, az alternatív kapcsoló egyik irányban zárja, miközben másik irányban nyitja az áramkört. **5.** Folyamatosan zárja az áramkört.

1.2. Az áramköri alapmennyiségek. Ohm törvénye (100. o.)

G.k.: 2. *a)* $U_A = 2 \cdot U_B$; *b)* $I_b = 2 \cdot I_A$; **3.** A műszeren az átfolyó I áramerősség helyett az $U = I \cdot R_b$ feszültség is feltüntethető, ahol R_b a műszer saját belső ellenállása. **4.** Nem érvényesek. Itt nem nyugvó, hanem az egymást kiegyensúlyozó erők mellett egyenletesen áramló töltésekről van szó. **5.** Lehet, ha a kevesebb elektron gyorsabban áramlik. **6.** *a)* Voltmérőt. *b)* Ampermérőt.

F.: 2. $2{,}67 \cdot 10^{-15}$ A lefelé. **3.** *c)* 50 Ω; **4.** 3,5 V; **5.** *a)* 0,37 s; *b)* 85,2 Ω; **6.** *a)* 50 Ω; *b)* 0,2 A.

1.3. Mitől függ a fémes vezető ellenállása? (104. o.)

G.k.: 1. *b)* Az ezüst. **2.** Nő a hossz és csökken a keresztmetszet, tehát az ellenállás is növekszik. **3.** Az ellenállás az átmérő négyzetével fordítottan arányos. **4.** Nagyobb feszültségen nagyobb az ellenállás. Ok: a melegedés. **5.** A kísérlet szénmikrofont modellez. A rugalmas anyagok érintkezési felülete nő, az ellenállása így csökken a nyomással. **6.** Az előző feladat szerint. **7.** A köteg ellenállása 36-szor kisebb.

F.: 3. *a)* 2-szeres meredekségű egyenes. *b)* 4-szeres meredekségű egyenes. **4.** *a)* Kantál. *b)* $\ell = 1$ m, $R = 180$ Ω; **6.** *a)* 2,17 Ω; *b)* Nem! (5,7 A). **7.** *a)* 5 mA; *b)* 10 mA; *c)* 20 mA; **8.** *a)* 0,0072 Ω; *b)* 0,01%-os hibát. A vezeték ellenállását tehát elhanyagolhatjuk. **9.** 148,1 m távolságban. **10.** *a)* 21 Ω; *b)* 6 V-on kb. ennyit, 1,5 V-on kevesebbet kapunk. *c)* A hőmérséklet csökkenésével kisebb lesz az ellenállás. **11.** *a)* 121,7 Ω; *b)* 132,2 Ω.

1.4. Az elektromos munka, teljesítmény és hőhatás (109. o.)

G.k.: 1. *a)* A merülőforralóval. **2.** Az éjszakai kisebb energiaigény olcsóbban biztosítható. **3.** A hálózat túlterhelése esetén nem olvad ki a biztosíték, a falban a vezeték túlmelegedhet (ha az automata nem old ki).

F.: 1. *a)* 575 W; *b)* 690 kJ. **2.** A villanyóra helyesen mér. **3.** *a)* 29,5 Ω; *b)* 1794 W; *c)* 5,5 óra.

1.5. Fogyasztók soros kapcsolása (111. o.)

G.k.: 1. A másik sem világít. **2.** *a)* $\frac{U_B}{U_A} = 3$; *b)* $\frac{U_B}{U} = \frac{3}{4}$; **3.** Az eredő teljesítmény egyenlő a részteljesítmények összegével. **4.** A pozitív pólushoz viszonyítva negatív, a negatív pólushoz viszonyítva pedig pozitív. **5.** A fűtőszál sokkal nagyobb ellenállású, mint a vezeték. **6.** A második esetben a felmelegedett izzólámpának lényegesen nagyobb az ellenállása, így más arányban oszlik meg a két izzón a hálózati feszültség, mint az első bekapcsolásnál.

F.: 2. 12 mA; 2,4 V; 3,6 V; **3.** 4,5 V; 6 V; 62,5 mA; **4.** 64 Ω; **5.** 35 Ω; **6.** *a)* 28,5 Ω; *b)* 52,5%; **7.** 21,3%; **8.** 17 izzót (legalább). 3,16 W. **9.** *a)* 76 Ω; *b)* 5,4 V; 7,2 V; 11,4 V.

1.6. Fogyasztók párhuzamos kapcsolása (114. o.)

G.k.: 1. *a)* Párhuzamos. *b)* Soros. *c)* Párhuzamos. *d)* Soros. *e)* Párhuzamos. *f)* Párhuzamos. *g)* Párhuzamos. *h)* Bármelyik. **2.** Az ampermérőn – kis ellenállása miatt – nagy áram folyik, valószínűleg tönkremegy. A voltmérőnek nagy az ellenállása, nem lesz baja. **3.** Fogyasztók soros kapcsolásánál I állandó, P és R egyenesen arányos. Párhuzamos kapcsolásnál U állandó, P és R fordítottan arányos. **4.** Két fűtőszál soros kapcsolása, egy fűtőspirál, majd két fűtőspirál párhuzamos kapcsolása. 2-szeresre, majd 4-szeresre nő a teljesítmény.

F.: 1. *a)* 120 Ω; *b)* 0,1 A; *c)* 0,06 A; 0,04 A; *d)* 0,72 W; 0,48 W; 1,2 W; **2.** 588,2 Ω; 0,187 W; **3.** *a)* $U = 230$ V; $I_1 = 8{,}68$ A; $I_2 = 7{,}82$ A; $P_1 = 1996{,}4$ W; $P_2 = 1798{,}2$ W; $R = 13{,}94$ Ω; *b)* Ha a hajszárítót is bekapcsoljuk, az automata megszakítja az áramkört. **4.** 144,7 Ω és 55,3 Ω.

1.7. A fogyasztók soros és párhuzamos kapcsolásának gyakorlati alkalmazásai (117. o.)

G.k.: 1. Csökken. **2.** Növekszik. **3.** *a)* A voltmérő ellenállását. *b)* Az ampermérő ellenállását. **4.** Az A izzónál csökken, a B-nél nő a fényerő. **5.** Nem. **6.** D, C és E, B, F, A; **7.** $R_2 = 4 \cdot R_1$.

F.: 2. *a)* $R_S = 2{,}04$ Ω; *b)* $R_b = 2$ Ω; **3.** *a)* $R_e = 4900$ Ω; *b)* $R_b = 5$ kΩ; **4.** *a)* $R_S = 0{,}4$ Ω; *b)* $R_e = 4960$ Ω; **5.** *a)* 0,12 W; 0,3 W; 2 W; 2,42 W; *b)* 0,1 A, 6 V; **6.** *a)* 0,36 W; 0,14 W; 0,52 W; 1,02 W; *b)* 0,33 A, 3,43 V; **7.** *a)* Egy izzó ellenállásánál kisebb a két párhuzamosan kapcsolt izzó eredő ellenállása. Ennek megfelelően változik a sorosan kapcsolódó ellenállásokon a feszültségek aránya. *b)* A jelenség kevésbé észlelhető. **8.** *a)* A bal oldali végétől 78,3 Ω; *b)* 36,2%.

1.8. Áramforrások modellezése. Üresjárási feszültség, belső ellenállás (123. o.)

G.k.: 1. A nagy áramerősség megnöveli a belső ellenálláson eső feszültséget, így lecsökken a kapocsfeszültség. **2.** A belső ellenálláson folyó rövidzárási áram hőhatása. **3.** A külső ellenálláson kevesebb lesz a feszültség, mint az üresjárási feszültség (4,5 V). **4.** A voltmérő belső ellenállása sokkal nagyobb az áramforrás belső ellenállásánál.

F.: 1. *a)* 1,19 A; *b)* 11,9 V és 0,48 V; *c)* R_k csökkentésével. $I_{max} = 31$ A; *d)* R_k növelésével. $U_{k_{max}} = 12{,}4$ V; **2.** *a)* 101,7 A (ha az összekötő vezeték ellenállását elhanyagoljuk). *b)* 2,03 V-tal. *c)* 1,034 kW; *d)* 83,3%; **3.** *a)* 0,43 A; *b)* 0,93 Ω; *c)* 0,823 A; *d)* 9,68 A; **4.** *a)* 18 V; 8 Ω; *b)* 10 V.

2. VEZETÉSI JELENSÉGEK

2.1. Elektromos áram folyadékokban. Az elemi töltés meghatározása (125. o.)

G.k.: 1. A kéreg belső rétegeiben van a legtöbb anyagcserét biztosító elektrolit. A villám árama itt nagy nyomású gőzt fejleszt. **2.** Az akkumulátor töltésénél galvánelem előállítása (polarizáció) történik. **3.** Mindkettő

elektromos árammal feltölthető, és kisüléskor ellentétes irányú áramot indít. A töltéskor betáplált elektromos energiát a kondenzátor elektromos energia formájában, az akkumulátor viszont kémiai energiaként tárolja. Az akkumulátor lényegesen hosszabb ideig tud áramot szolgáltatni, mint a feltöltött kondenzátor.

2.2. Elektromos áram gázokban és vákuumban (128. o.)

G.k.: *a)* A fotocellával. Például a hangosfilmvetítők egyik megoldásánál a filmen lévő és a felvett hang tulajdonságai szerint változóan fényáteresztő hangcsík egy fényforrás és egy fotocella között halad. A fotocella árama az eredeti hangnak megfelelően fog ingadozni. *b)* A katódsugárcső. A katóddal szemközti, megfelelő bevonattal rendelkező üvegfalon az elektronok az áramerősségnek megfelelő erősségű felvillanásokat okoznak. Ezzel a módszerrel hozzák létre a hagyományos tévé képernyőjén a pontonként változó erősségű (és színű) felvillanások összességeként a látható képet.

F.: 2. $6{,}3 \cdot 10^6 \frac{\text{V}}{\text{m}}$; $1{,}5 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

2.3. Elektromos áram félvezetőkben (130. o.)

G.k.: 1. Mindkettőnél elektronok mozognak, csak elektronvezetésnél szabadon, lyukvezetésnél pedig gyenge kötéseken keresztül. Az utóbbit egyszerűbb úgy kezelni, mint pozitív lyukak ellenkező irányú mozgását. **2.** Tiszta félvezetőnél negatív elektronok és pozitív lyukak, elektrolitoknál negatív és pozitív ionok a töltéshordozók. **4.** A tiszta félvezetőnél jelentősebb a változás. A szennyezéses vezetésnél a már meglévő vezetőképesség módosul. **5.** A félvezető kristályba jutó szennyező atomok, molekulák lényegesen megváltoztatják a vezetési tulajdonságokat.

2.4. Félvezető eszközök (134. o.)

G.k.: 1. *a)* Dióda. *b)* Tranzisztor. *c)* Termisztor. *d)* Megvilágítható határrétegű dióda (fényelem). *e)* Fotoellenállás. *f)* Világító dióda (LED).

IV. A MÁGNESES MEZŐ, ELEKTROMÁGNESES INDUKCIÓ

1. A MÁGNESES MEZŐ

1.1. Emlékeztető (140. o.)

G.k.: 1. *a)* Hasonlóságok: azonos pólusok taszító, ellentétesek vonzó kölcsönhatása; megosztás és megosztott test vonzása; mező közvetíti a hatást, árnyékolás. *b)* Különbségek: elektromos pólusok szétválaszthatók, a mágnes pólusai nem; elektromos test minden semleges testet vonz, érintkezés után el is taszít; mágnes csak bizonyos anyagokat vonz, és nem taszít utána; elektromos mezőt mindig létrehoz elektromos töltés, mágneses mezőt csak mozgó töltés. **2.** A mágnesrúd közepe nem hat a vasrúdra. **3.** Elektromos megosztás vezetőknél, polarizáció szigetelőknél, mágneses megosztás ferromágneses anyagoknál. **4.** *a)* Az elektromágnes berántja a vaslemezt és vele a kalapácsot, de ekkor megszakad az áramkör, és a rugó visszaállítja a kezdeti állapotot. Ez ismétlődik. *b)* A túláram hatására behúz az elektromágnes, és megszakad az áramkör. Önmagától nem áll vissza a kezdeti állapot. **5.** Áramforrás energiája, elektromos mező energiája, mágneses mező energiája, mozgási energia, hő (belső energia) és hang energiája. **6.** Mágneses árnyékolás érdekében.

1.2. A mágneses indukcióvektor, indukcióvonalak, fluxus (144. o.)

G.k.: 1. *a)* A mágneses déli pólusnál (a földrajzi északi sarok közelében). *b)* A mágneses északi pólusnál (a földrajzi déli sarok közelében). Amilyen irányban az iránytű északi pólusa mutat. **2.** *a) A*; *b) B*; *c) B*; **3.** *a)* Az É-i pólustól a D-i pólus felé mutat. *b)* Az *a)* és *d)* egyensúlyi a *b)* és *c)* maximális forgatónyomatékú helyzet. **4.** Növelni kell a magnetométer menetszámát, keresztmetszetét és áramerősségét. **5.** Növelni kell a forgótekercs menetszámát, keresztmetszetét, a mágneses mező (mágnespatkó) erősségét és csökkenteni kell a forgást akadályozó rugó erősségét.

F.: 2. 1,5 mA; **3.** *a)* 0,019 Nm; *b)* 0,016 Nm; **4.** *a)* 0,0025 T; *b)* 60°-kal. **5.** *a)* 0; *b)* 3 mWb; *c)* 3 mWb.

1.3. Egyenes áramvezető és tekercs mágneses mezője (148. o.)

G.k.: 1. Balra. **2.** Nem, a körvonalak közti távolságnak növekednie kell. **3.** Nagy menetszámú (vagyis kis átmérőjű) és rövid tekercset készítünk. **4.** Nem, a körüljárási irány számít. **5.** Igen, bifiláris tekercselésnél. Itt vezetékpárt tekercselünk, melynek a két vezetékében ellentétes irányú áram folyik. **6.** A tekercs körüli mágneses mező elhanyagolhatóan gyenge a tekercs belsejéhez képest. (Kívül sokkal ritkábbak az indukcióvonalak, mint belül.) **7.** Például olyan kísérleti elhelyezéssel, hogy a földi mágneses mező forgatónyomatéka zérus legyen. **8.** A tekercs tengelyét kelet-nyugati irányba fordítjuk, így tesszük a tekercsbe az iránytűt. Addig növeljük az áramerősséget, amíg az iránytű 45°-kal elfordul. Ekkor a Föld mágneses indukciója (vízszintes összetevő) egyenlő a tekercsével.

F.: 4. *a)* $1{,}25 \cdot 10^{-6}$ T; *b)* 0,5 A; **5.** 50 A; **6.** $2 \cdot 10^{-3}$ T. (Kb. 50-szer erősebb, mint a Föld mágneses mezeje.) **7.** *a)* $7{,}5 \cdot 10^{-4}$ T; *b)* 74,6 mA; **8.** *a)* 20,1 mT; *b)* $6{,}03 \cdot 10^{-6}$ Wb.

1.4. Elektromágnesek a gyakorlatban (152. o.)

G.k.: 1. A lágyvas csak addig mágneses, amíg az áram folyik. Az acél megtartaná mágnességét. **2.** Nem, mert a vas 768 °C (Curie-pont) felett elveszti ferromágneses tulajdonságát. **3.** Az egyik irányú áram erősíti, az ellenkező irányú gyengíti a mágnes membránra gyakorolt vonzását. Lágyvasnál mindkét irányú áram vonzást okozna. (2-szeres frekvenciát kapnánk.)

F.: 1. *a)* 2,51 mT; 2,51 μWb; *b)* 3,01 T; 3,01 mWb; **2.** *a)* 31,8 mA; *b)* Szintén 31,8 mA.

1.5. A mágneses mező hatása mozgó töltésekre (158. o.)

G.k.: 1. *a)* A papírra merőlegesen befelé. *b)* A mágnespatkó belseje felé. *c)* A papírra merőlegesen kifelé. *d)* A menetek síkjában felénk irányuló. *e)* Nem hat erő. **2.** Mert nő a mágneses indukció értéke. **3.** Nem függ. **4.** A kölcsönhatás törvénye szerint ugyanakkora, de ellenkező irányú (tehát szintén vonzó) erő hat.

F.: 1. *a)* 33,3 A; *b)* 2,74 N; **2.** *a)* Vízszintesen, keleti irányú áram; *b)* $4 \cdot 10^{-4}$ N; *c)* Például egy hajszálvékony Al-huzalt felemelne, de az azonnal meg is olvadna. **3.** *a)* 69,6 cm; *b)* Ellenkező körüljárású lenne és kisebb sugarú: $r = 0{,}379$ mm. **4.** $r_p = 7{,}22$ cm; $r_d = 10{,}2$ cm.

2. ELEKTROMÁGNESES INDUKCIÓ

2.1. A mozgási elektromágneses indukció (162. o.)

G.k.: 1. Elektromágnessel létrehozott erős mágneses mezőben tekercset (hosszú vezetőt) nagy sebességgel mozgatunk (forgatunk). Rövid ideig a mágneses indukcióra merőleges mozgásirány is biztosítható. **2.** *a)* Nem. *b)* Igen. **3.** Nagyobb sebességnél nagyobb feszültség indukálódik. **4.** Az energiamegmaradás értelmében. **5.** Az alumíniumcsőben indukált áram okozza Lenz törvénye szerint. **6.** Közelítésnél az óramutató járásával ellentétes, távolításnál pedig megegyező körüljárású. **7.** Közelítésnél a szakadás felső vége pozitív, távolításnál az alsó vége. **8.** Nem. Az *a)* esetben van, a *b)* esetben nincsen indukált áram. **9.** Mikrofon: hangrezgést alakít váltakozó árammá (mozgási indukció útján). Hangszóró: váltakozó áramot alakít hangrezgéssé (az áram mágneses hatása segítségével).

F.: 2. *a)* $62{,}5\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$; *b)* $125\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$; **3.** *a)* 2,4 V; *b)* 0,24 A; *c)* Nyitott áramkörnél: $F = 0$ N. Zárt áramkörnél: $F = 0{,}192$ N. *d)* A mi munkánk és az elektromos munka is 1,152 J. **4.** *a)* 0,136 V; *b)* $U = 0$ V; *c)* A vízszintessel 25°-os szöget bezáró sebességgel, észak felé felfelé, vagy dél felé lefelé. $U = 0{,}15$ V. *d)* Zárt vezetőkör haladó mozgásánál nem változik a körbezárt fluxus, nem indukálódik áram. (A részfeszültségek lerontják egymás hatását.) **5.** 9,6 μA **6.** *a)* $U_{AB} = 1{,}6$ V; $U_{BC} = 0$ V; $U_{CD} = 1{,}6$ V; $U_{AD} = 3{,}2$ V. *b)* Mindegyik szakaszon $U = 0$ V.

2.2. Nyugalmi elektromágneses indukció (168. o.)

G.k.: 1. *a)* Nem. *b)* Igen. *c)* Ellentétes előjelű feszültségeket. *d)* A menetszám növelésével. *e)* A menetszám növelésével, a tekercs ellenállásának és hosszának csökkentésével. **2.** Bekapcsolásnál I_2, kikapcsolásnál I_1. **3.** Addig nem, amíg a körvezető a tekercsen kívül halad. Azután csökken. **4.** *a)* Nyugvó elektromos töltések környezetében. *b)* Változó mágneses mező körül. *c)* Sehol. *d)* Minden mágneses mező ilyen.

F.: 1. *a)* –0,3 V; *b)* 0,3 V; *c)* 9,38 mA; **2.** 0–0,2 s: –80 V; 0,2–0,3 s: 0 V; 0,3–0,4 s: 320 V.

2.3. Az önindukció. A mágneses mező energiája (171. o.)

G.k.: 1. *a)* feszültség; *b)* áramerőssége; *c)* nyugalmi indukció; *d)* érvényes; *e)* akadályozza; *f)* áramának változását; *g)* nagy induktivitású tekercsben, kis idő alatt, nagy áramváltozást hozunk létre. **3.** Igen, feltéve, hogy nem változtatjuk a tekercset kitöltő anyag minőségét. **4.** Bifiláris tekercseléssel: vezetékpárt csévélünk fel, melynek két vezetékében ellentétes irányú áram folyik. **5.** Vasmag és nagy menetszám a döntő, de nagyobb keresztmetszet és kisebb hossz is növeli az induktivitást. **6.** Mozgási: $E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$; forgási: $E = \frac{1}{2} \cdot \Theta \cdot \omega^2$; rugalmassági: $E = \frac{1}{2} \cdot D \cdot x^2$; kondenzátornál elektromos: $E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$.

F.: 2. *a)* 6,4 V; *b)* 19,2 J; **3.** *a)* Legfeljebb 2,8 ms; *b)* 5,6 mJ; *c)* 1896; **4.** *a)* 113 V; *b)* 11,3 H; *c)* 0,226 J.

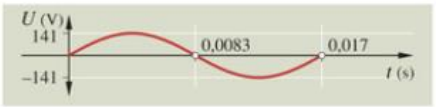
3. A VÁLTAKOZÓ FESZÜLTSÉGŰ ÁRAMKÖRÖK

3.1. A váltakozó feszültség előállítása és tulajdonságai (177. o.)

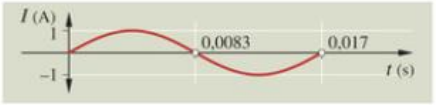
G.k.: 1. Rezgőmozgást. **2.** Áram folyik, de elektrolízis nem figyelhető meg. **3.** *a)* Az iránytű nem tudja követni a mágneses mező gyors változásait. *b)* Bármelyik pólus és a vasmag között vonzóhatás van. *c)* Vonzást (a lágyvas állandóan átmágneseződik). **4.** 6 V. **5.** $A - D_2$ – ampermérő – $D_3 - B$ vagy $B - D_4$ – ampermérő – $- D_1 - A$. **6.** Váltakozó áramú állásban a mérendő áram egyenirányítón halad át. **7.** Motor: a forgórész tekercseibe áramot vezetve, ezek az állórész mágneses mezejében elfordulnak. Generátor: az állórész mágneses mezejében forgatott tekercsekben feszültség indukálódik. **8.** A magára hagyott rendszer az energiaveszteségek miatt leáll.

F.: 2. *a)* 325,3 V; *b)* 0,02 s; *c)* 50 Hz; *d)* $314 \frac{1}{\text{s}}$; **3.** $\alpha_1 = \frac{\pi}{2}$, $U_1 = 325{,}3$ V; $\alpha_2 = \pi$, $U_2 = 0$ V; $\alpha_3 = 3\frac{\pi}{2}$, $U_3 = -325{,}3$ V; $\alpha_4 = 2\pi$, $U_4 = 0$ V;

4. $U_{\max} = 141$ V; $U_{\text{eff}} = 100$ V; $\omega = 377 \frac{1}{\text{s}}$; $f = 60$ Hz; $T = 0{,}017$ s.



5. $I = \frac{U}{R}$; $I = 1{,}41 \cdot \sin 377t$; $I_{\max} = 1{,}41$ A; $I_{\text{eff}} = 1$ A; $\omega = 377 \frac{1}{\text{s}}$; $f = 60$ Hz; $T = 0{,}0167$ s.



3.2. Ellenállások a váltakozó áramú áramkörben (181. o.)

G.k.: 1. Izzólámpa, villanyvasaló, villanybojler: ohmos ellenállások. Fojtótekercs: induktív ellenállás. Villanymotor: induktív és ohmos ellenállás. **2.** $X_L = L \cdot \omega = \frac{U \cdot \Delta t}{\Delta I} \cdot \omega$. Mértékegységben: $\frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}} \cdot \frac{1}{\text{s}} = \frac{\text{V}}{\text{A}}$.

$X_C = \frac{1}{C \cdot \omega} = \frac{1}{\frac{Q}{U} \cdot \omega} = \frac{U}{Q \cdot \omega}$. Mértékegységben: $\frac{\text{V}}{\text{C} \cdot \frac{1}{\text{s}}} = \frac{\text{V}}{\text{A}} = \Omega$. **3.** Nagy induktivitás szükséges, ami elsősorban zárt vasmaggal és nagy menetszámmal biztosítható. Az ohmos ellenállás csökkentése (jó vezető anyag, vastag vezető) és a frekvencia növelése is hozzájárul a tiszta induktív jelleghez. **4.** Az ohmos igen, az induktív és kapacitív ellenállást a felhasznált váltakozó feszültség frekvenciája is befolyásolja.

F.: 1. 19; **2.** 575 Ω; 1,83 H; **3.** 1,45 kΩ; 29 mA;

4. *a)*

U_{eff} (V)	4	8	10	12	16
I_{eff} (A)	0,001	0,002	0,0025	0,003	0,004

b) 795 nF; *c)* 4000 Ω ellenállásúnál; *d)* $L = 12{,}7$ H.

3.3. Teljesítmény a váltakozó áramú áramkörben (184. o.)

G.k.: 1. Nem. **2.** Ohmos és kapacitív. $0 < \cos\varphi < 1$. **3.** A teljesítménytényező ($\cos\varphi$) az áramköri ellenállások közül az elektromos energiát valóban felhasználók arányára utal. A hatásfok (η) azt fejezi ki, hogy a felhasznált elektromos energia milyen arányban fordítódik hasznos célra.

F.: 1. *a)* Az egyidejűleg használt fogyasztók összteljesítménye legfeljebb 2300 W lehet. *b)* A legkisebb ellenállású fogyasztó (egyedüli használatnál) 23 Ω-os lehet. **2.** *a)* 0,435 A; *b)* 529 Ω; *c)* 90 kJ; **3.** *a)* 0,192 A; *b)* $W = 0$ J; **4.** *a)* 496,8 kJ; *b)* 372,6 kJ; *c)* 36,9°; *d)* 153,3 Ω; **5.** *a)* 500 W; *b)* 5,14 A; *c)* 44,7 Ω.

3.4. A transzformátor (188. o.)

G.k.: 1. Feszültség, áramerősség. **2.** *a)* A szekunder feszültség megkétszereződik, az áramerősség feleződik. *b)* A szekunder feszültség feleződik, az áramerősség kétszereződik. **3.** A transzformátor. (A potenciométer a legrosszabb.) **4.** A primer tekercs fluxusának csak egy része megy át a szekunder tekercsen. **5.** A váltakozó átmágneseződés miatt rezgésbe jönnek a vasmag lemezei vagy egyéb vastartalmú rögzítőelemek. **6.** A szekunder áram kb. 200-szor erősebb a primer áramnál. **7.** 100-szor kisebb a veszteség. **8.** Nem (vagy csak nagyon keveset). **9.** A primer áramkör ismétlődő megszakításával.

F.: 2. 17 mA; **3.** 32,9 V; 82,1 V; 115 V; **4.** *a)* 13,3 mA; *b)* 52,5 V; *c)* 0,7 W.

3.5. Elektromos balesetvédelem és elsősegélynyújtás (191. o.)

G.k.: 1. A fázisceruza a fázishoz érintve világít, a földelt pólushoz érintve nem világít! **2.** Így lekapcsolt állásban a lámpafoglalat érintése (például villanykörte cseréjével) nem okozhat áramütést. **3.** A fürdőszoba gyakran nedves kövezete jó vezető, így a fürdőszobában egy hibás kapcsoló érintése fokozott balesetveszéllyel járna. **4.** A feszültség nem egy vezetéken, hanem két vezeték, vagy egy vezeték és a föld között van. **5.** A nagyfeszültségű távvezeték és a föld között elég jelentős térerősségű elektromos mező alakul ki. Ez az elektromos mező a távvezeték alatt elhelyezkedő testek között kis szikrakisüléseket is előidézhet, ami balesetveszélyt jelent (például benzingőz robbanása). A vízsugár vagy a nedves anyag (például a sárkány zsinórja) vezeti az áramot, ami halálos áramütést okozhat.

A könyv ábráihoz tartozó kérdések megoldásai

I. HŐTAN

11.1. Hézagok, görgők, fésűs illesztések, görbületek alkalmazásával. **14.1.** A kék a testek alacsony hőmérsékletét, a piros pedig a magasat jelképezi. **17.1.** A víz sűrűségének növekedését. **20.1.** A folyadékoszlop nyomása tart egyensúlyt a légnyomással. **21.1.** Mert a higanyszál elmozdulásával a gáz szabadon tágulhat. **24.1.** A hőlégballonra felhajtóerő hat, mert a meleg levegő, és így a ballon átlagos sűrűsége kisebb, mint a környezetéé. **25.1.** A jobb oldali üvegszár mozgatásával. **27.1.** A jobb oldali üvegszár mozgatásával. **27.2.** Hiperbolának. **30.1.** A térfogat és nyomás egyidejű változtatása. **35.1.** A megvilágítás erősségétől. **35.2.** A hangszóró rezgésének növelésével. **40.1.** Hőközléssel vagy munkavégzéssel. **43.1.** A munkavégzés nagyságát. **44.2.** A görbe alatti sárga terület mérőszáma. **45.1.** A görbe alatti terület mérőszáma. **52.1.** Kuktafazékban a nyomás növelésével, lombikban a nyomás csökkentésével. **53.1.** A molekuláris erőket.

II. ELEKTROSZTATIKA

64.4. Üvegből bőrre; szőrméről műanyagra. **65.3.** 1. semleges elektroszkópok; 2. megosztás; 3. ellentétes töltések elválasztása; 4. ellentétes töltések egyesítése. **65.4.** Közelebb vannak hozzá az ellentétes előjelű töltések, mint az azonos előjelűek. **72.1.** A mezőt keltő töltések többsége közelebb van a B ponthoz, mint az A ponthoz. **72.2.** A térerősségek iránya ellentétesre változna, nagysága maradna. **75.2.** A B pontban sűrűbbek az erővonalak, mint az A pontban. **75.3.** $\Psi = 4\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}\cdot\mathrm{m}^2$. 90°-os elfordítás után $\Psi = 0\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}\cdot\mathrm{m}^2$. **83.1.** Mechanikai sérüléstől,

villámcsapástól. **83.3.** A csúcs átadja töltését a levegő molekuláinak, majd eltaszítja azokat. **86.1.** A lemezek között homogén, azon kívül nincs mező. **86.2.** A szemben álló lemezek nagyságával, távolságával és a szigetelő anyagi minőségével. **87.1.** Az első kondenzátornál nagyobb és közelebbi lemezek és más szigetelő.

III. AZ ELEKTROMOS ÁRAM. VEZETÉSI JELENSÉGEK

95.2. *a)* kémiai; *b)* hő és fény; *c)* mágneses; *d)* élettani. **97.2.** A fogyasztóval sorosan. **98.1.** A fogyasztóval párhuzamosan. **98.4.** Mindegyik egyenes arányosságot, de a piros grafikonnál nagyobb $\frac{U}{I}$ értéke. **102.1.** Kétszer hosszabb vezetőnél felére csökken az áramerősség, kétszer nagyobb keresztmetszet esetén kétszer nagyobb az áramerősség (miközben az áramforrás változatlan). **113.1.** Párhuzamosan. **116.3.** Ugyanazon áramforrás mellett a potenciométer csuszkáját jobbra mozgatjuk (R_1 növekszik). **127.1.** A fény színe a gáztöltés minőségével befolyásolható, a fényoszlop követi a reklámcső alakját, gazdaságos. **128.2.** Növekszik. Ez a feszültségugrás (erősítés után) számlálót, relét vagy egyéb berendezést hoz működésbe. **129.1.** Szabad töltéshordozók keletkeznek. **129.2.** Nincsenek benne szabad töltéshordozók. **132.1.** A napelemek segítségével feltöltött akkumulátorokat alkalmazzák. **132.4.** A tranzisztornak három lába (kivezetése) van. **133.1.** Kb. 70-szer. **133.2.** Ha a fotoellenállás nem kap fényt.

IV. A MÁGNESES MEZŐ, ELEKTROMÁGNESES INDUKCIÓ

138.4. Mágnes közelében rendeződnek a kulcsban lévő elemi mágnesek. **138.5.** Erős mágnes valamelyik pólusát ugyanabban az irányban többször végighúzzuk az acélrúdon. **142.3.** A jobbkéz-szabály szerint a hüvelykujjunk által mutatott tekercsvégnél. **146.1.** A jobbkéz-szabály szerint a behajlított ujjaink. **147.1.** A hüvelykujjunk mutatja a jobbkéz-szabály szerint. **150.1.** Balra. **152.1.** Az áram irányának vagy a mágnes pólusainak felcserélésével. **154.1.** Homogén mágneses mezőben egymásra merőleges mágneses indukció és sebesség esetén. **155.2.** Függőleges mágneses indukciójú mágneses mező. **159.2.** A Lorentz-erőtörvény szerint a mozgó vezető pozitív töltéseire $2 \rightarrow 1$ irányú erő hat. **160.2.** A folytonossal. A mágnes és a gyűrű közeledését és távolodását is akadályozza a köztük fellépő kölcsönhatás. **161.2.** Igen. Így működik a dinamikus hangszóró. **165.1.** A potenciométerrel egyszer növeljük, egyszer pedig csökkentjük a tekercs áramerősségét. **165.2.** Ha az indukált elektromos mező erővonalához körvezetőt illesztenénk, ebben az indukált áram iránya megfelelne a Lenz-törvénynek. **170.1.** Az 1 jelű tekercs nagyobb menetszámú, nagyobb keresztmetszetű, rövidebb, és vasmaggal rendelkezik. **173.2.** 0 a feszültség $\alpha = 0 + k \cdot 180°$-nál, maximális a feszültség $\alpha = 90° + k \cdot 180°$-nál. $k = 0, 1, 2, \ldots$ **185.3.** A közös vasmagban létrejövő mágneses mező. **186.1.** A generátor által leadott elektromos energiából kevesebb veszik el a távvezetéken, több jut a fogyasztókhoz. **190.1.** Víz kerülhet a hajszárítóba, ami vezeti az elektromos áramot. A fürdőkád vize pedig leföldeli az emberi testet. **191.1.** A leszakadt távvezeték és a talaj mélyebb rétegei között folyó áram a talajon mint ellenálláson feszültségesést eredményez. Életveszélyes „lépésfeszültség" keletkezhet.

	Olvadáspont t (°C)	Forráspont t (°C)	Olvadáshő $L_o\left(\frac{kJ}{kg}\right)$	Forráshő $L_f\left(\frac{kJ}{kg}\right)$	Közepes fajhő $c\left(\frac{J}{kg \cdot °C}\right)$	Lineáris hőtágulási tényező 20 °C-on $\alpha\left(\frac{1}{°C}\right)$
Alumínium	660	2450	360,5	10 886,2	900,21	0,000 0239
Ezüst	961	2210	104,3	2 177,2	234,47	0,000 0197
Nátrium	98	892	114,7	4 187,0	1235,17	0,000 072
Ólom	327	1725	23,9	879,2	129,79	0,000 0283
Vas	1536	3000	272,2	6 364,2	464,76	0,000 0117
Szén	3727	4830	–	50 244,0	690,86	–
Jég	0		334,96		2093,5	0,000 051

208.1. Szilárd anyagok hőtani adatai

	Olvadáspont ($\approx 10^5$ Pa) t (°C)	Forráspont ($\approx 10^5$ Pa) t (°C)	Olvadáshő $L_o\left(\frac{kJ}{kg}\right)$	Forráshő $L_f\left(\frac{kJ}{kg}\right)$	Fajhő 0 °C-on $c\left(\frac{J}{kg \cdot °C}\right)$	Térfogati hőtágulási tényező (18 °C-on) $\beta\left(\frac{1}{°C}\right)$
Etil-alkohol	–112	78,4	106,77	906,07	2 386,59	0,001 10
Etil-éter	–116,3	34,6	98,39	376,83	2 302,85	0,001 62
Glicerin	18	290	200,56	1 101,18	2 386,59	0,000 50
Higany	–38,87	357,0	11,72	284,72	1 381,71	0,000 181
Sósav (20%)	–14	110			3 140,25	0,000 30
Víz	0	100	333,70	2256,37	4 129,232[1]	0,000 13

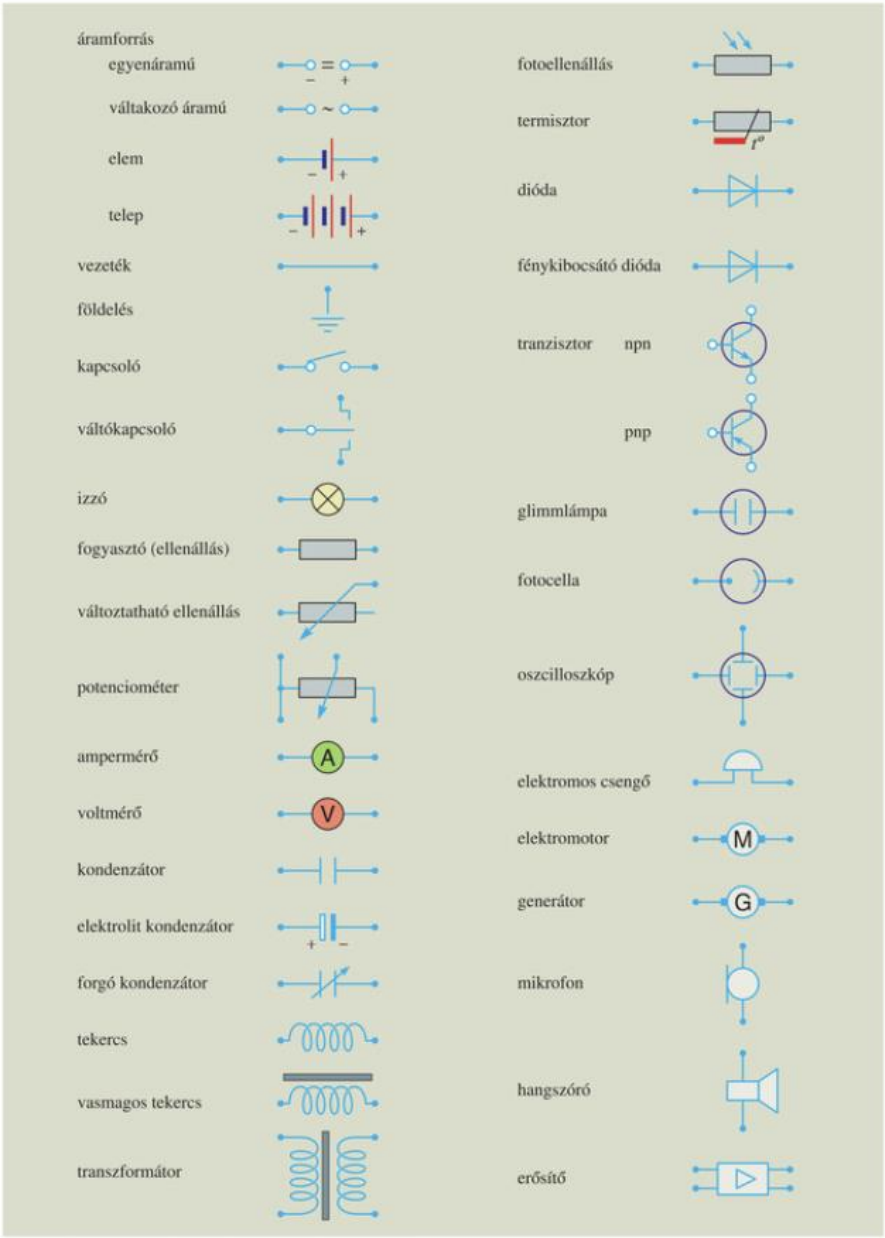
208.2. Folyadékok hőtani adatai

	Fajhő 101 325 Pa-nál és 273 K-nél $c_p\left(\frac{J}{kg \cdot K}\right)$	c_V	Térfogati hőtágulási tényező $\beta\left(\frac{1}{°C}\right)$
Ammónia	2,056	1,566	0,003 802
Hélium	5,234	3,161	0,003 66
Hidrogén	14,236	10,112	0,003 662
Levegő	0,997	0,712	0,003 675
Metán	2,161	1,637	
Neon	1,030	0,623	
Nitrogén	1,038	0,741	0,003 674
Oxigén	0,916	0,653	0,003 674
Szén-dioxid	0,821	0,632	0,003 726

208.3. Gázok hőtani adatai

Előtétszó	Jele	Szorzó
exa	E	10^{18}
peta	P	10^{15}
tera	T	10^{12}
giga	G	10^{9}
mega	M	10^{6}
kilo	k	10^{3}
hekto	h	10^{2}
deka	da	10^{1}
deci	d	10^{-1}
centi	c	10^{-2}
milli	m	10^{-3}
mikro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
piko	p	10^{-12}
femto	f	10^{-15}
atto	a	10^{-18}

208.4. SI-előtétszavak (prefixumok)



209.1. Az elektromos kapcsolások gyakoribb rajzjelei

Fizikatörténeti áttekintés

Életrajzi adatok	Munkásság	Megjegyzések
Evangelista **Torricelli** (1608–1647) olasz fizikus, matematikus, Galilei tanítványa	Torricelli zseniális ötlete az volt, hogy a víznél 13,6-szer nehezebb higanyt és átlátszó üvegcsövet használt. Így elsőként meg tudta mérni a légnyomást, amit egy 76 cm-es higanyoszlop nyomásával talált egyenlőnek (1643). A barométer feltalálója.	A görögök szerint a természet irtózik az űrtől, ezért nem lehet 10 m fölé szivattyúzni a vizet. De miért csak 10 m-ig van irtózás? Torricelli a légnyomással adta meg a magyarázatot.
Edmé **Mariotte** (1620–1684) francia fizikus, szerzetes	Függetlenül →*Boyle*-tól, kísérleti úton felfedezte a kettőjükről elnevezett gáztörvényt.	
Robert **Boyle** (1627–1691) angol kémikus, fizikus főúr	Mérései alapján megállapította, hogy állandó hőmérsékleten egy adott gáz térfogata és nyomása fordítottan arányos (1664; Boyle–Mariotte-törvény)	A kísérletekre építő természettudományos gondolkodás egyik elindítója. A tudományos kémia megalapítója.
Gabriel **Fahrenheit** (1686–1736) német üvegtechnikus	Az első gyakorlatban bevált hőmérő készítője (1714). A jég, a konyhasó és a szalmiákszó keverékének hőmérsékletét jelölte 0-val, az olvadó jégét 32-vel, a forrásban lévő vízét 212-vel.	Az Egyesült Államokban ma is a Fahrenheit-skála használatos. Hőmérséklet mértékegységet neveztek el róla.
Anders **Celsius** (1701–1744) svéd fizikus, csillagász	Higanyos hőmérőjén elsőként osztotta be a víz fagyáspontja és forráspontja közötti részt 100 fokra (1742; Celsius-skála).	Hőmérséklet mértékegységet neveztek el róla.
Segner János András (1704–1777) pozsonyi születésű magyar matematikus, fizikus és orvos	A merev testek és folyadékok mechanikájának kutatója. A Segner-kerék egy tengelyezett test, amely az oldalcsöveken kiáramló folyadék vagy az oldalcsúcsok által ellökött elektromos töltések ellenerejétől jön forgásba.	Folyadékos Segner-kerék figyelhető meg az öntözőberendezéseknél.
Benjamin **Franklin** (1706–1790) amerikai államférfi, természettudós	Elektrosztatikai kutatásokat folytatott. Kimutatta, hogy a villám is elektromos kisülés. A villámhárító feltalálója. Ő vezette be a pozitív és negatív elektromosság fogalmát.	Nyomdász, író és politikus volt. Részt vett az USA Függetlenségi Nyilatkozatának és alkotmányának kidolgozásában.
Charles Augustin **Coulomb** (1736–1706) francia fizikus, hadmérnök	Az általa szerkesztett érzékeny torziós mérleggel igazolta, hogy a pontszerű elektromos töltések közötti erő egyenesen arányos a töltések nagyságával és fordítottan arányos távolságuk négyzetével (1785; Coulomb-törvény). Hasonló törvényt mért ki a mágnesek pólusai között is. A súrlódási erő törvényét is meghatározta.	Coulomb törvénye az elektromosságtan területén kezdődő mennyiségi vizsgálatok első eredménye. Coulombról nevezték el az elektromos töltés SI-mértékegységét.
Alessandro **Volta** (1745–1827) olasz fizikus, Como szülötte, a páduai egyetem fizikaprofesszora	Felfedezte az első tartós áramot adó áramforrást (1800; Volta-oszlop). Bebizonyította, hogy folyadékkal érintkező kétféle fém mindig áramforrást alkot (galvánelem). Felállította az érintkező fémek feszültségsorát.	Volta áramforrása nagy lendületet adott az elektromos kutatásoknak. Nagyhírű előadó volt, Napóleon is élvezte előadásait. Voltáról nevezték el az elektromos feszültség SI-mértékegységét.

Életrajzi adatok	Munkásság	Megjegyzések
André Marie **Ampère** (1775–1836) francia fizikus, matematikus	1820-tól egymást követik a felfedezései: A párhuzamos áramvezetők mágneses kölcsönhatásának törvénye; érzékeny árammérő készítése; a tekercs mágneses tulajdonságainak vizsgálata; az áramvezetők által keltett mágneses teret meghatározó, ún. gerjesztési törvény; a mágnesség molekuláris köráram-elmélete, amely molekuláris mágnesekre vezeti vissza az egész test mágneses viselkedését.	Az elektromágnesség nagyhírű kutatója jelentős matematikus volt. Például a kártyajátékok matematikájáról is írt könyvet. Szórakozott professzornak ismerték, aki állítólag Napóleon ebédmeghívásáról is elfelejtkezett. Ampère-ről nevezték el az áramerősség SI-mértékegységét.
Hans Christian **Oersted** (1777–1851) dán fizikus, kémikus, a koppenhágai egyetem professzora	Nevéhez fűződik az áram mágneses hatásának nagy jelentőségű felfedezése (1820).	Oersted felfedezése azért mérföldkő a fizika történetében, mert eddig az elektromosságot és mágnességet két független jelenségkörnek tekintették.
Carl Friedrich **Gauss** (1777–1855) német matematikus fizikus, csillagász	Fizikai mértékegységrendszert alkotott. Közösen →*Weberrel* feltalálta az elektromágneses távírót. Meghatározta az elektromos töltésből kiinduló erővonalak számát (Gauss-tétel).	Minden idők egyik legnagyobb matematikusa. Az égitestek mozgásának vizsgálatával is eredményesen foglalkozott.
Louis Joseph **Gay-Lussac** (1778–1850) francia fizikus, kémikus	Felfedezte az ideális gázok állandó nyomásra és állandó térfogatra vonatkozó törvényeit (Gay-Lussac I. és II. törvénye). Eszerint minden gáz állandó nyomáson 1 °C-os hőmérséklet-emelkedéskor a 0 °C-on mért térfogat 1/273-ad részével tágul ki (1802). Analóg eredményt kapott az állandó térfogat melletti nyomásváltozásra.	Kémiai felfedezései is jelentősek. Számos vegyületet ő állított elő elsőként. Tudományos megfigyelések céljából léggömbbel több mint 7000 m magasságba emelkedett.
Georg Simon **Ohm** (1787–1854) német fizikus, matematikus	Felfedezte az elektromos feszültség, áramerősség és ellenállás kapcsolatát (1826; Ohm-törvény), valamint az ellenállás függését a vezető hosszától, keresztmetszetétől, anyagi minőségétől.	Az Ohm-törvényt még középiskolai tanárként fedezte fel, később lett a müncheni egyetem fizikaprofesszora Róla nevezték el az ellenállás SI-mértékegységét.
Michael **Faraday** (1791–1867) angol fizikus, kémikus. Könyvkötőinasból autodidakta módon jutott el a Royal Institution laboratórium igazgatóságáig.	Bevezette az elektromos és mágneses mezők fogalmát, amelyek az elektromágneses kölcsönhatásokat közvetítik. Felfedezte az elektromágneses indukció jelenségét és törvényeit: Változó mágneses mező körül elektromos mező jön létre, melynek erőssége arányos a mágneses fluxusváltozás sebességével (1831). Tisztázta az elektrolízis jelenségeit és megállapította alaptörvényeit (1833). Felfedezte a vezetők elektromos árnyékoló hatását (Faraday-kalitka) és a mágneses mező hatását a poláros fényre.	Faradayt a legnagyobb kísérletező fizikusnak tartják, eredményeit matematikai képzettség nélkül, kísérleti megfigyelésekkel érte el. Korszakalkotó felfedezése volt, hogy elektromosságot mágnesség segítségével is lehet kelteni (az elektromosság–mágnesség kapcsolat kiteljesedése). Róla nevezték el a kapacitás SI-mértékegységét.
Jedlik Ányos (1800–1895) magyar fizikus, bencés rendi szerzetes. Győrben, Pozsonyban és Budapesten tanított.	Legnagyobb felfedezése a dinamóelv: Indulásnál az állórész vasmagjának maradék mágnessége indukál áramot a forgórész tekercsében. Az indukált áramot részben visszavezetjük az állórészbe, így az indukáló hatás erősödik (öngerjesztés). Villanymotort és rendkívül finom optikai rácsot készített, feltalálta a szódavízgyártást. Magyar nyelvű fizikatankönyvet írt, fejlesztette a szakmai szókincset.	A fizikatörténet első jelentős magyar egyénisége. A dinamóelvet, sajnos nem szabadalmaztatta, így a világon a német Siemens egy évtizeddel későbbi felfedezése vált ismertté. A fizikatanítás magyar úttörője: az addig használatos latin mellett elsőként tanított fizikát magyarul.

Életrajzi adatok	Munkásság	Megjegyzések
Wilhelm Eduard **Weber** (1804–1891) német fizikus	Az elektromos mértékegységrendszer kidolgozója. Több elektromos és mágneses műszert is szerkesztett.	Róla nevezték el a mágneses fluxus SI-mértékegységét.
Heinrich Friedrich Emil **Lenz** (1804–1865) német származású orosz fizikus	Felismerte az indukált áramok irányára vonatkozó törvényt (Lenz törvénye). Függetlenül →*Joule*-tól felfedezte az elektromos áram hőhatásának törvényét.	
James Prescott **Joule** (1818–1889) angol fizikus és sörgyáros	Felfedezte az áram hőhatásának törvényét (1840). Meghatározta a hő és a mechanikai munka közti összefüggést (1843).	A különböző energiafajták kapcsolatának kimérésével az energiamegmaradás törvényének egyik felfedezője lett. Róla nevezték el az energia SI-mértékegységét.
Rudolf **Clausisus** (1822–1888) német fizikus, matematikus	Egyik megfogalmazója a hőtan II. főtételének: Hőenergia magától nem megy alacsonyabb hőmérsékletű helyről magasabb hőmérsékletű helyre. A rendezetlenség matematikai jellemzésére bevezette az entrópia fogalmát.	
William **Thomson** (Lord Kelvin) (1824–1907) angol fizikus, 22 éves korától a glasgow-i egyetem tanára	Bevezette az abszolút hőmérsékleti skálát (1848). Megalkotta az elektromágneses rezgések elméletét, a periódusidő képletét (Thomson-formula). Érzékeny elektromos műszereket tervezett.	A tengeri kábelek és a hajózás területén is érdemeket szerzett. Munkásságának elismeréseként kapta a lord Kelvin címet. Róla nevezték el a hőmérséklet SI-mértékegységét.
Gustav Robert **Kirchhoff** (1824–1887) német fizikus	Az áramelágazások törvényeinek megfogalmazója. Bunsennel együtt kidolgozta a színképelemzés módszerét.	A csomóponti és a huroktörvény a töltés és az energia megmaradását fejezi ki tetszőleges áramkörre.
James Clerk **Maxwell** (1831–1879) skót fizikus	A kinetikus gázelmélet egyik kidolgozója. Az elektromágnesség elméletét egységes matematikai rendszerbe foglalta. Elméletéből következtetett az elektromágneses hullámok létezésére és tulajdonságaira.	Maxwell ugyanolyan korszakalkotó rendszerező tevékenységet végzett az elektromágnesség területén, mint Newton a mechanikában.
Ludwig **Boltzmann** (1844–1906) osztrák fizikus, matematikus	A kinetikus gázelmélet egyik megalapozója. Kimondta az ekvipartíció tételét: eszerint minden részecske minden szabadsági fokára $\frac{1}{2}\cdot k\cdot T$ energia jut, ahol T az abszolút hőmérséklet, k az általa bevezetett állandó. Elsőként alkalmazta a statisztika és a valószínűségszámítás módszereit a gázokra.	A 19. század egyik legnagyobb elméleti fizikusa. Atomisztikus felfogását a kor fizikusai nem értették meg. A tudósokkal folytatott vitái felőrölték idegzetét, és végül öngyilkos lett.
Thomas Alva **Edison** (1847–1931) amerikai feltaláló	Ezernél is több elektrotechnikai találmány fűződik a nevéhez (szénmikrofon, fonográf, szénszálas izzólámpa, filmfelvevőgép stb.). Felismerte, hogy az izzószálból elektronok lépnek ki (Edison-hatás).	

Életrajzi adatok	Munkásság	Megjegyzések
Hendrik Antoon **Lorentz** (1853–1928) Nobel-díjas holland fizikus	Az anyag elektronelméletének egyik kidolgozója. Megadta a mozgó elektronokra ható erő összefüggését (Lorentz-erő). A relativitáselmélet egyik előkészítője.	
Heike **Kamerlingh-Onnes** (1853–1926) Nobel-díjas holland fizikus	Az alacsony hőmérsékletek fizikájával foglalkozott, elsőként cseppfolyósította a héliumot (1908). Felfedezte a szupravezetést (1911), vagyis azt, hogy egyes fémeknek egy kritikus hőmérsékleti pont alatt zérusra csökken az elektromos ellenállása. (Pl. Hg 4,2 K hőmérséklet alatt.)	Mára már felfedeztek magasabb hőmérsékleten (120–150 K) szupravezetővé váló anyagokat is.
Zipernowsky Károly (1853–1942) magyar elektromérnök, műegyetemi tanár	Az első ipari célra alkalmas transzformátor feltalálója *→Bláthy Ottóval* és *→Déri Miksával* (1885).	A magyar erősáramú elektrotechnikai ipar megteremtője.
Déri Miksa (1854–1938) magyar mérnök a budapesti Ganz-gyárban	Az első ipari célra alkalmas transzformátor feltalálója *→Bláthy Ottóval* és *→Zipernowsky Károllyal* (1885). Egyéb jelentős elektrotechnikai találmányai is voltak.	
Nikola **Tesla** (1856–1943) szerb származású fizikus, elektrotechnikus. A budapesti Ganz-gyárban és az amerikai Edison-laboratóriumban is dolgozott.	Több száz szabadalma volt. Az általa feltalált és róla elnevezett transzformátor és nagyfrekvenciás áramok segítségével hozzájárult az elektromosság népszerűsítéséhez.	Róla nevezték el a mágneses indukció SI-mértékegységét.
Bláthy Ottó Titusz (1860–1939) magyar mérnök, az MTA tagja	Az első ipari célra alkalmas transzformátor feltalálója *→Déri Miksával* és *→Zipernowsky Károllyal* (1885). Egyéb jelentős elektrotechnikai találmányai is voltak.	
Robert Andrews **Millikan** (1868–1953) Nobel-díjas amerikai fizikus	Nagy pontossággal megmérte az elektromosság elemi töltését (1909), és igazolta Einstein fényelektromos egyenletét.	
Bródy Imre (1891–1944) magyar fizikus	Feltalálta a kriptontöltésű izzólámpát. Tervei alapján épült Ajkán a világ első kriptongyára. A statisztikus fizika területén is eredményes kutatásokat folytatott.	A második világháború idején származása miatt munkatáborba hurcolták, ahonnan nem tért vissza.

FELADAT

Keressünk szakirodalmat, és állítsunk össze kiselőadást, tablót vagy számítógépes bemutatót a legérdekesebb fizikai felfedezések történetéről, fizikusok életéről!

Új szakszavak jegyzéke

Középszint

abszolút hőmérséklet 22
adiabatikus állapotváltozás 44
állapotegyenlet 30
állapotjelző 19
állapotváltozás 19
általános állapotváltozás 30
automata áramkioldó 121
Avogadro-állandó 30
Brown-mozgás 34
Celsius-féle hőmérsékleti skála 10
chip (csip) 134
Coulomb-törvény 69
c_p fajhő 45
c_V fajhő 45
dinamikus hangszóró 151
dinamó 176
dióda 131
dipólus 65
disszociálás 124
effektív áramerősség 175
effektív feszültség 175
effektív teljesítmény 183
egyenirányítás 132
egyensúlyi állapot 19
egyesített gáztörvény 30
egyetemes (általános) gázállandó 31
elektrolit 124
elektrolitikus (elektrolit) kondenzátor 89
elektromágneses szaggató 150
elektromágneses távkapcsoló (relé) 151
elektromos árnyékolás 82
elektromos csúcshatás 83
elektromos erőtér 72
elektromos erővonal 75
elektromos generátor 173
elektromos mező munkája 78
elektromos polarizáció 65
elektromos térerősség 72
elektron-lyuk párok 130
elektronmikroszkóp 128, 155
elemi töltés 69
farad 86
Faraday-kalitka 82
fázisvezető 189
fázisszög 174
félvezető
n-típusú 130
p-típusú 130
egyrétegű 131
kétrétegű 131
háromrétegű 132
félvezető lapka (chip) 134
fényelem (napelem) 132
forgókondenzátor 89
forgótekercses mérőműszer 152
fotocella 128
fotodióda 132
fotoelektron-sokszorozó 128
fotoellenállás 131
fotoemisszió 128
földmágnesség 156
fúziós magreakció 155
galvanizálás 124
gerjesztett állapot 126
háromfázisú rendszer 189
határréteg 131
henry 170
hőkapacitás 46
hőmennyiség 40
hőtágulás 12
lineáris (vonal menti) hőtágulási tényező 12
térfogati (köbös) hőtágulási tényező 13
ideális gáz 21
ideális gázok fajhője 45
induktivitás 170
integrált áramkör (IC) 134
ionizáló hatás 126
ionmikroszkóp 155
irreverzibilis folyamatok 48
izobár állapotváltozás 21
izochor állapotváltozás 25
izotermikus állapotváltozás 27
jobbkéz-szabály 142, 147, 153
kapacitás 86
katódsugárcső 128
Kelvin-skála 22
kollektoráram 133
kondenzátor 86
kondenzátor energiája 87
lágyvasmag 150
Lenz törvénye 161
lézerdióda 132
Lorentz-erő 154
mágneses dipólus 138
mágneses erőtér 139
mágneses fluxus 143
mágneses indukció 142
mágneses indukcióvektor 141
mágneses indukcióvonalak 143
mágneses megosztás 138
magnetométer 142
méréshatár kiterjesztése 116
moláris térfogat 31
moláris tömeg 30
mozgási elektromágneses indukció 159
normál állapot 31
nullázás 190
nullvezető 189
nyitó irányú kapcsolás 131
nyugalmi elektromágneses indukció 165
ohmos ellenállás 179
oszcilloszkóp 128
önindukció 169
önindukciós együttható 170
párolgáshő 51
pillanatnyi feszültség 174
pontszerű töltés 72
potenciométer (feszültségosztó) 116
pozitív lyuk 129
próbatöltés 72
p–V diagram 22
rácsion 95
reverzibilis folyamatok 48
sajátvezetés 129
szennyezőatom 130
szikrainduktor 126
szikrakisülés 126
sztatikus elektromos állapot 82
tekercs mágneses energiája 170
térfogati munka 42
termisztor 131
termisztoros hőmérő 134
tesla 142
töltésmegmaradás törvénye 69
töltéssűrűség 82
tranzisztor
npn, pnp 132
emitter, bázis, kollektor 132
univerzális motor 152
ütközési ionizáció 126
valódi gáz 21
weber 143
záró irányú kapcsolás 131

Emelt szint

átlagos mozgási energia 39
átütési térerősség 89
belső ellenállás 120
Boltzmann-állandó 36
dielektromos állandó 70
EEG-készülék 128
egyenes vezető mágneses mezője 146
EKG-készülék 128
ekvipotenciális 82
elektromos energiasűrűség 88
elektromos fluxus 75
elektromotoros erő 121
Faraday-féle indukciós törvény 160
fáziseltolódás 179
fáziskésés 180
fázissietés 180
fénykibocsátó dióda (LED) 132
ferromágneses anyagok 150
gázok cseppfolyósítása 58
hőfokténvező 103
impedancia 179
induktív ellenállás 180
kapacitív ellenállás 180
kapocsfeszültség 120
Kirchoff I. törvénye (csomóponti törvény) 122
Kirchoff II. törvénye (huroktörvény) 122
külső ellenállás 120
légüres tér permeabilitása 146
Ohm törvénye teljes áramkörre 120
örvényáramok 162
örvényes elektromos mező 165
örvényes mező 146
párhuzamos áramvezető 157
permittivitás 70
pillanatnyi teljesítmény 182
plazma 126
potenciál 79
potenciálkülönbség 79
relatív permeabilitás 150
részecskefizikai kutatások 155
Segner-kerék 83
siemens 99
szabadsági fok 39
szalaggenerátor 75
szolenoid 147
szuperpozíció elve 73
szupravezetés 104
telítetlen gőz 59
telített gőz 59
teljesítménytényező 183
terheletlen áramforrás 120
termikus emisszió 128
torziós fémszál 69
tömegspektroszkópia 155
üresjárási feszültség 120
vezetőképesség 99
Wheatstone-féle mérőhíd 117

Irodalomjegyzék

Fizika 1–2. (Szerkesztette: Holics László; Műszaki Könyvkiadó, Bp., 1992.)
Simonyi Károly: *A fizika kultúrtörténete* (Gondolat Kiadó, Bp., 1978.)
George Gamow: *A fizika története* (Gondolat Kiadó, Bp., 1965.)
J. D. Bernal: *A fizika fejlődése Einsteinig* (Gondolat Kiadó, Bp., 1977.)
Fizika I–II. Egységes érettségi feladatgyűjtemény (Nemzeti Tankönyvkiadó, Bp., 2003.)
Fizikai kísérletek gyűjteménye 1–2. (Szerkesztette: Juhász András; Typotex Kiadó, Bp., 1995.)
Colin Siddons: Fizikai kísérletek (Novotrade Kiadó, Bp., 1991.)
http://www.csodakpalotaja.hu/



Kiadja a Mozaik Kiadó, 6723 Szeged, Debreceni u. 3/B • Telefon: (62) 470-101
E-mail: kiado@mozaik.info.hu • Honlap: www.mozaik.info.hu
Felelős kiadó: Török Zoltán • Műszaki szerkesztő: Horváth Péter, Szentirmai Péter
Készült a Dürer Nyomda Kft.-ben, Gyulán • Felelős vezető: Fekete Viktor
Terjedelem: 19,31 (A/5) ív • Tömeg: 416 g • 2018. május • Raktári szám: MS-2619