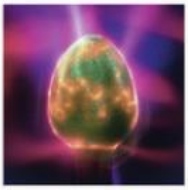
A TERMÉSZETRŐL TIZENÉVESEKNEK



FIZIKA

Elektromosságtan
Hőtan
10

Engedélyszám:

MOZAIK KIADÓ – SZEGED, 2013

Szerzők: dr. Jurisits József
dr. Szűcs József



FIZIKA

Elektromosságtan · Hőtan

10

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
gimnáziumi tanár, szaktanácsadó

DR. SZŰCS JÓZSEF
egyetemi adjunktus

Bíráló:

DR. MOLNÁR MIKLÓS
egyetemi docens

DR. SZEGEDI ERVIN
vezetőtanár

DR. HILBERT MARGIT
egyetemi adjunktus

MORÓNÉ TAPODY ÉVA
középiskolai tanár

Felelős szerkesztő: Tóth Katalin
Borítóterv, tipográfia: Deák Ferenc, Reményfy Tamás
Fotók: Juhász Ferenc, Vadász Sándor, képügynökségek, wikipedia
Rajzok: Ábrahám István
Ábrák: Szentirmai Péter, Végh Gyula

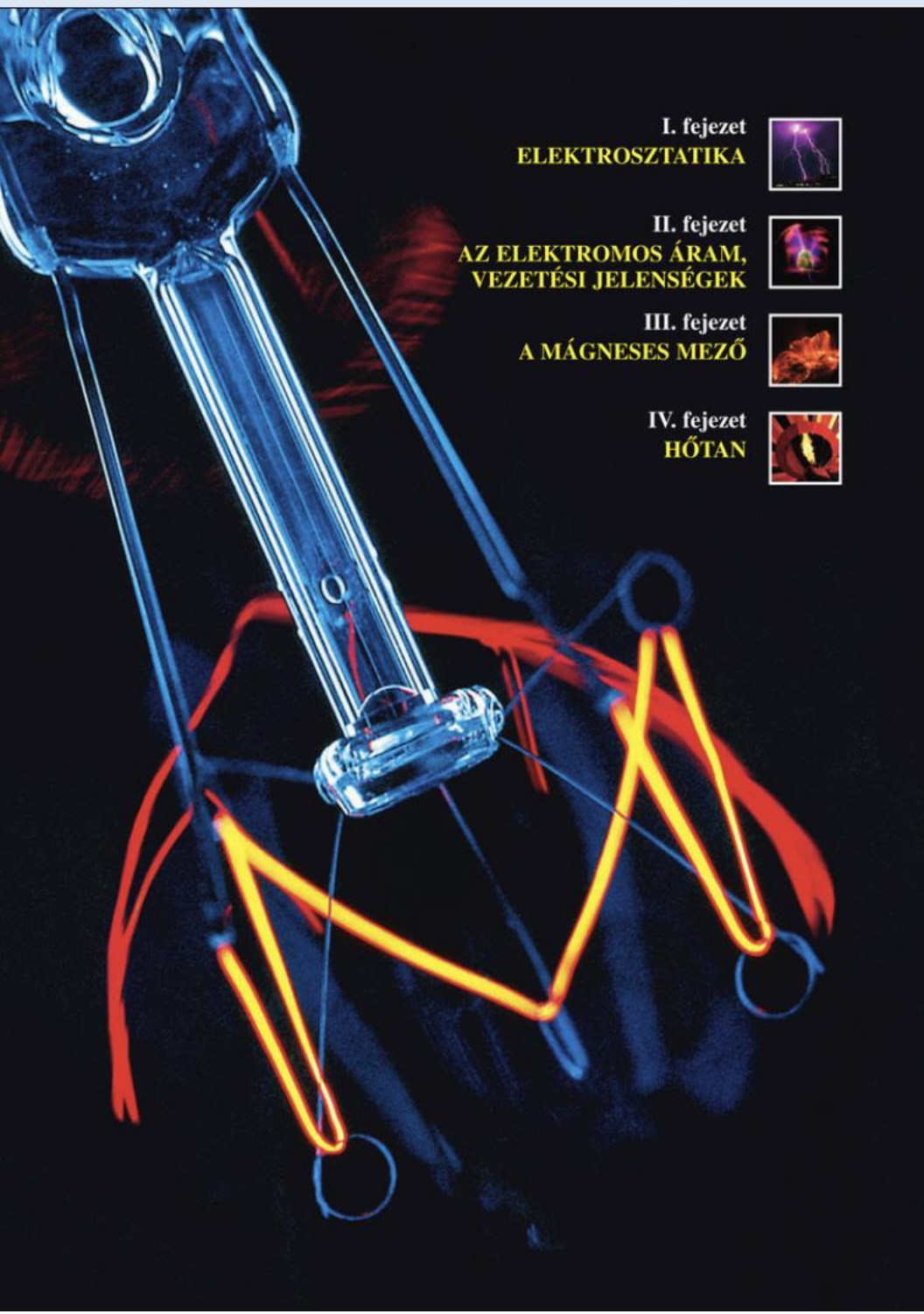
KERETTANTERV:
EMMI Kerettanterv 51/2012. (XII. 21.) EMMI rendelet 3. sz. melléklet (3.2.08.2), 4. sz. melléklet (4.2.09.2), 5. sz. melléklet (5.2.13.2), 6. sz. melléklet (6.3.4.2)

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.

magyar nyomdatermék

ISBN 978 963 697 362 9

© MOZAIK KIADÓ – SZEGED, 2002, 2012, 2013



I. fejezet
ELEKTROSZTATIKA

II. fejezet
AZ ELEKTROMOS ÁRAM, VEZETÉSI JELENSÉGEK

III. fejezet
A MÁGNESES MEZŐ

IV. fejezet
HŐTAN









Tartalom

ELEKTROSZTATIKA

1. Elektrosztatikai alapismeretek 10
1.1. Emlékeztető 10
2. Coulomb törvénye. A töltésmegmaradás törvénye 14
3. Az elektromos mező jellemzése 18
3.1. Az elektromos térerősség 18
3.2. Az elektromos mező szemléltetése erővonalakkal 23
3.3. Az elektromos mező munkája. Az elektromos feszültség 27
4. Elektromos töltések, térerősség, potenciál a vezetőn 34
5. A kondenzátor. Az elektromos mező energiája 42
6. Kondenzátorok kapcsolása 48
Összefoglalás 52

AZ ELEKTROMOS ÁRAM, VEZETÉSI JELENSÉGEK

1. Egyenáram. Áramköri alaptörvények 54
1.1. Emlékeztető 54
1.2. Az áramköri alapmennyiségek. Ohm törvénye 57
1.3. Mitől függ a fémes vezető ellenállása? 62
1.4. Az elektromos munka, teljesítmény és hőhatás 67
1.5. Fogyasztók soros kapcsolása 72
1.6. Fogyasztók párhuzamos kapcsolása 75
1.7. Soros és párhuzamos kapcsoláson alapuló eszközök 79
1.8. Áramforrások modellezése. Üresjárási feszültség, belső ellenállás 83
2. Vezetési jelenségek 89
2.1. Elektromos áram folyadékokban 89
2.2. Elektromos áram gázokban és vákuumban (kiegészítő anyag) 93
2.3. Az elektromos áram hatása az emberi szervezetre. Balesetvédelmi szabályok 96
Összefoglalás 99

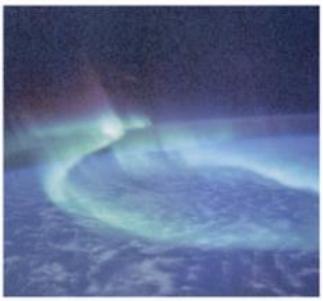
A MÁGNESES MEZŐ

1. A mágneses mező 102
1.1. Emlékeztető 102
1.2. A mágneses indukcióvektor, indukcióvonalak, fluxus 105
1.3. Egyenes áramvezető és tekercs mágneses mezője 110
1.4. Elektromágnesek a gyakorlatban 114
1.5. A mágneses mező hatása mozgó töltésekre 117
Összefoglalás 124

Tartalom

HŐTAN

1. Hőtani alapjelenségek **126**
1.1. Emlékeztető. Hőhatások a mindennapokban, hőmérők **126**
1.2. A szilárd testek hőtágulásának törvényszerűségei **129**
1.3. A folyadékok térfogati hőtágulása **134**
2. Gázok állapotváltozásai **138**
2.1. Emlékeztető. Állapotjelzők, állapotváltozások **138**
2.2. Gázok állapotváltozása állandó nyomáson (izobár állapotváltozás) – gázok szabad hőtágulása **140**
2.3. Gázok állapotváltozása állandó térfogaton (izochor állapotváltozás) – bezárt gáz nyomásának változása hőhatásokra **145**
2.4. Gázok állapotváltozása állandó hőmérsékleten (izotermikus állapotváltozás) – gázok nyomásának változása térfogat változtatás hatására **149**
2.5. Az ideális gázok általános állapotváltozása, egyesített gáztörvény, állapotegyenlet **154**
3. Molekuláris hőelmélet **159**
3.1. Emlékeztető. Testek részecskemodellje **159**
3.2. A gázok állapotváltozásainak molekuláris értelmezése **160**
3.3. Az állapotegyenlet molekuláris alakja. A hőmérséklet molekuláris értelmezése **164**
3.4. Az ideális gázok belső energiája. Ekvipartíció tétele **167**
4. Energia, hő és munka – a hőtan főtételei **171**
4.1. A hőtan I. főtétele. Az energiamegmaradás törvényének kiterjesztése **171**
4.2. Energiacserék az ideális gázok izobár és izochor állapotváltozásánál **176**
4.3. Az izoterm és adiabatikus állapotváltozások energiacseréi **181**
4.4. Testek fajhője, hőkapacitása **184**
4.5. A termikus folyamatok iránya, a hőtan II. főtétele **190**
4.6. Termikus körfolyamatok. Hőerőgépek, hűtő- és fűtőberendezések **194**
5. Halmazállapot-változások **201**
5.1. A halmazállapot-változások törvényszerűségei **201**
5.2. A halmazállapot-változások molekuláris értelmezése és energetikai vizsgálata **207**
6. Mindennapok hőtana **215**
Összefoglalás **219**











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

Eötvös József

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.

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

Az egyes fejezeteket elmélyítő, a tananyag és a mindennapi élet kapcsolatával foglalkozó 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.

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 megfelelően 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.

I. fejezet



ELEKTROSZTATIKA

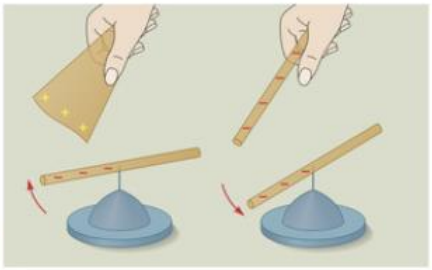


1. Elektrosztatikai alapismeretek

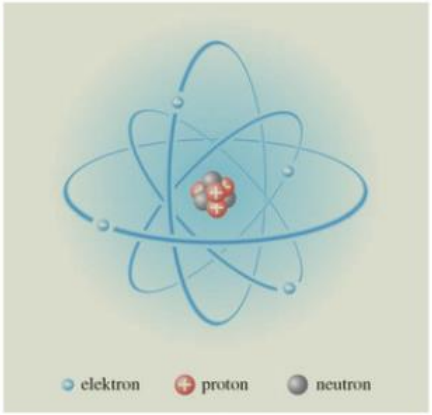
1.1. Emlékeztető



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



10.2. Az elektromos kölcsönhatás vonzásban vagy taszításban nyilvánul meg



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

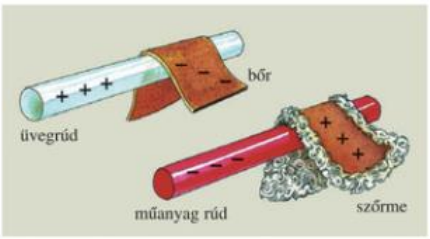
Gyakran tapasztaljuk, hogy az egymással szorosan érintkező anyagok szétválasztás után vonzzák egymást. Megfigyelhető ez fésülködésnél, öltözködésnél, vagy ha például műanyag irattartóból papírlapot húzunk ki. Ilyenkor azt mondjuk, hogy a kezdetben semleges anyagok **elektromosan feltöltődnek, elektromos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

Az elektromos állapotú testek közötti **elektromos kölcsönhatás** nemcsak vonzás, hanem taszítás formájában is megnyilvánulhat.

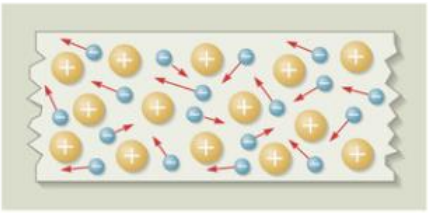
Középen támasszunk alá (vagy függesszünk fel fonálra) száraz papírral megdörzsölt műanyag rudat! Közelítsük a rúd megdörzsölt végéhez a dörzsölésre használt papírt! A két test vonzza egymást.

Ezután dörzsöljünk meg papírral egy másik műanyag rudat is, majd közelítsük egymáshoz a két rúd megdörzsölt végeit! A rudak taszítják egymást. (*10.2. ábra*)

A testeknek kétféle elektromos állapota, kétféle elektromos töltése lehetséges. Az egyiket **pozitívnak,** a másikat **negatívnak** nevezték el. Például száraz papír és műanyag rúd összedörzsölésekor a papír pozitív, a műanyag rúd negatív töltésű lesz. Üvegrudat bőrrel vagy selyemmel dörzsölve az üvegrúd lesz pozitív és a másik anyag negatív töltésű. Megfigyelhetjük, hogy az **azonos előjelű elektromos töltéssel rendelkező testek taszítják, az ellentétes előjelű elektromos töltéssel rendelkező testek vonzzák egymást.**



10.4. *Milyen irányban „vándoroltak" az elektronok az érintkező anyagok között összedörzsölés közben?*



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

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

Ma már ismerjük a testek elektromos állapotának atomszerkezeti magyarázatát. Az atomok **pozitív töltésű protonokból** és semleges neutronokból álló atommagot valamint **negatív töltésű elektronokból** álló „elektronfelhőt" tartalmaznak (*10.3. ábra*). **Semleges atomokban a protonok és az elektronok száma megegyezik,** ellentétes töltéseik éppen közömbösítik egymás hatását.

Különböző anyagok szoros érintkezésekor arról az anyagról, amelynek atomjai, molekulái gyengébben kötik az elektronokat, elektronok jutnak át a másik anyagra. **Az elektrontöbblet negatív töltésű, az elektronhiány pozitív töltésű anyagot eredményez.** A test elektromos töltésén mindig a negatív vagy pozitív **többlettöltést** értjük.

A dörzsöléses kísérleteknél megfigyelhetjük, hogy az üvegrúd vagy műanyag rúd csak a megdörzsölt végén kerül elektromos állapotba. A test többi része elektromosan semleges marad. Az üveg és a műanyag **szigetelők.** Az ilyen anyagok töltéshordozói helyhez kötöttek. Jó szigetelőanyagok például a porcelán, az olaj vagy a száraz levegő.

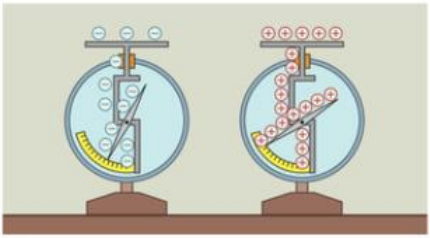
A dörzsöléses kísérletekben fémrudat használva csak akkor figyelhetünk meg az előzőekhez hasonló elektromos jelenségeket, ha szigetelő segítségével fogjuk meg a fémet. Egyébként a fém elektrontöbblete a kísérletező személy testébe távozik, elektronhiányát pedig a testből jövő elektronok szüntetik meg. Mindkét esetben azt mondjuk, hogy a test elvezeti a fém elektromos töltését. A fém és az emberi test is vezető.

A **vezetőkben** a töltéshordozó részecskék könnyen elmozdulnak, az elektromos állapot a vezető egészére szétterjed. Fémekben az atomok külső elektronjai, tehát a negatív töltések mozoghatnak szabadon. A pozitív töltések helyhez kötöttek. Az emberi testben, az elektrolitokban pozitív és negatív töltéshordozók (ionok) egyaránt mozoghatnak. A Föld belseje is nagy kiterjedésű vezető.

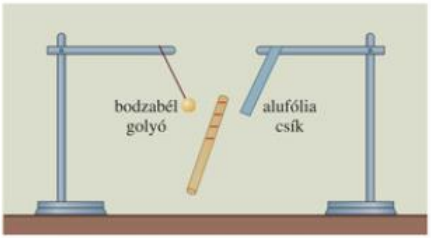
Földelésről akkor beszélünk, ha egy testet fémes vezető útján összekötünk a Föld nedves, vezető rétegével. Ezáltal megakadályozhatjuk a fémes anyagok elektromos feltöltődését. Az elektrotechnikában gyakran alkalmazott földelés rajzjele: ⏚

Az **elektroszkóp** elektromos töltések mennyiségi és minőségi vizsgálatára is alkalmas eszköz. Ha elektromos állapotú testet érintünk elektroszkóp tányérjához (gömbjéhez), az elektroszkóp is feltöltődik, mutatója kitér. Az elektroszkóp belső, álló része és mutatója a környezetétől elszigetelt fémes vezető. Az aszimmetrikus anyageloszlású mutatót a vele azonos töltésű állórész taszító hatása téríti ki eredeti helyzetéből.

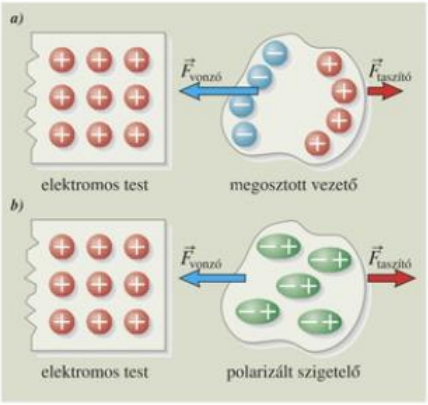
Közelítsünk elektromosan feltöltött testet olyan anyagokhoz, melyeket nem hoztunk elektromos állapotba (pl. papír, habszivacs darab, alufólia csík, fémgolyócska)! Megfigyelhetjük, hogy **az elektromos testek a semleges vezető- és szigetelőanyagokat egyaránt vonzzák** (*11.3. ábra*). Mi ennek a magyarázata?



11.2. A bal oldali elektroszkóp kevés negatív, a jobb oldali elektroszkóp több pozitív töltést tartalmaz



11.3. Az elektromos test a semleges szigetelőt és vezetőt is vonzza.



12.1. *Hogyan módosul az ábra, ha az elektromos test negatív töltésű?*

Az elektromos test a környezetében lévő **vezetőanyagokon elektromos megosztást** idéz elő. Például a pozitív töltésű test a hozzá közelebbi oldalra vonzza a semleges fémes vezető elektronjait. Így a fémnek az elektromos testhez közelebbi oldalán elektrontöbblet, a távolabbi oldalán elektronhiány jön létre. (*12.1/a ábra*)

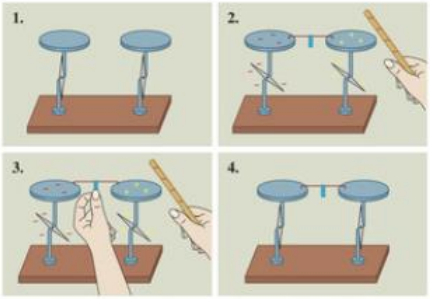
Szigetelőanyagoknál az elektromos test a molekulákon belül a szimmetrikus elhelyezkedésű töltések súlypontját eltolja, más szóval elektromos **dipólusokat** hoz létre. Az egyes anyagokban eleve meglévő, de rendezetlen dipólusokat pedig rendezett helyzetbe forgatja. **A szigetelő elektromosan polarizálódik.** (*12.1/b ábra*)

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.

Az elektromos testek magukhoz vonzzák a levegő – különösen a levegőben lévő vízgőz eleve dipólus állapotú – molekuláit, majd töltésük egy részét átadva eltaszítják azokat. Az elektromos testek ezért idővel elveszítik elektromos töltésüket.

Az elektrosztatikus jelenségek szerepet kapnak a legkorszerűbb technikai berendezésekben is.

Fénymásolóknál a másolandó képet fényérzékeny, pozitív töltésű forgó hengerre vetítik. A vetület világos helyein a fény az atomokból elektronokat lök ki, amelyek semlegesítik a helyi pozitív töltést. A szöveg vagy ábra sötét képpontjai



12.2. *Mi történik az ábra egymást követő képein?*

viszont megtartják töltésüket. A hengerrel forgó pozitív töltésű kép a festéktartályhoz érve magához vonzza a negatív töltésű festékszemcséket. Az így kapott elsődleges képet pozitív töltésű papírlapra nyomatják és hevítéssel rögzítik.

A **lézernyomtatató** hasonló módon, az ellentétes előjelű töltések vonzása alapján működik.

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

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

A fémtárgyak esztétikai célú és korróziógátló felületkezelésének korszerű eljárása az **elektrosztatikus festés,** amely során elektromos töltésű festékport földelt fémtárgyra szórnak, majd hevítéssel rögzítenek.

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



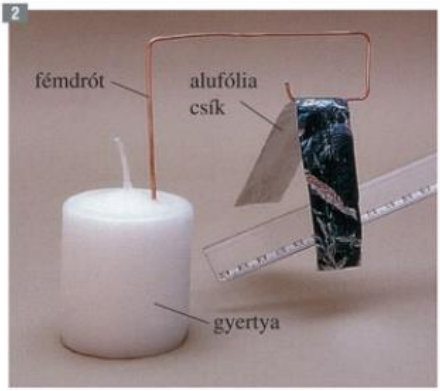
12.3. A lézernyomtató képalkotása is az ellentétes előjelű töltések vonzásán alapszik

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. Miért kevernek gumiabroncsok, ékszíjak anyagába elektromosan vezető anyagot is?
5. Mivel magyarázható, hogy benzinkutaknál műanyag kannákba kockázatos, fémkannákba viszont szabad benzint kiszolgálni?
6. Ha személyautóból kiszállunk, majd az ajtó kilincséhez érünk, néha gyenge „csípést" érzünk az ujjainkon. Mi ennek az oka?
7. Mivel magyarázható, hogy miután az elektromos testek magukhoz vonzották a semleges testet, gyakran el is taszítják azt?
8. Milyen következménnyel jár, ha a *11.2. ábra* két elektroszkópjának fémtányérját vezetővel összekötjük?
9. Miért tér ki az elektroszkóp mutatója már akkor is, amikor még csak közelítjük az elektromos testet az elektroszkóp gömbjéhez?
10. Vezető- vagy szigetelőanyagból készült a *12.2. ábra* szerinti kísérlet két elektroszkópját összekötő rúd és ennek a rúdnak a fogantyúja?

FELADATOK

1. Dörzsöljünk meg egy műanyag rudat száraz papírral! Közelítsük ezután az összedörzsölt testek mindegyikét csapból folyó keskeny vízsugárhoz! Adjunk magyarázatot a tapasztalatunkra!
2. Készítsünk egyszerű „házi" elektroszkópot! (Egy lehetséges példa látható a fotón.)
3. Adjunk az elektroszkópnak töltést például papírral megdörzsölt műanyag vonalzó segítségével! Ezután végezzünk megfigyeléseket arra vonatkozóan, hogy
   a) környezetünkben mely anyagok vezetők, és melyek szigetelők;
   b) különböző anyagok (pl. üvegpohár és bőr, üvegpohár és papír, műanyag flakon és papír) összedörzsölésénél melyik lesz pozitív, ill. negatív töltésű!
4. Tájékozódjunk Selényi Pál életéről és munkásságáról!



5. Keressünk az interneten a lézernyomtató szerkezetét ábrázoló képeket, és értelmezzük ezeket!
6. Keressünk szöveges és képes információt az interneten az elektrosztatikus festésről, és mutassuk be az osztályban!

2. Coulomb törvénye. A töltésmegmaradás törvénye

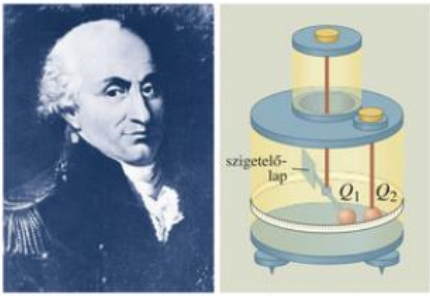
Bár az ókori görögök is megfigyelték már, hogy a megdörzsölt borostyánkő (görögül: elektron) könnyű testeket magához vonz, sokáig nem foglalkoztak e jelenségkör törvényszerűségeivel.

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

3D

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 egyforma nagynak, az eredetihez viszonyítva pedig feleakkorának lehetett feltételezni.



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

A mérések szerint **két pontszerű, elektromos töltésű test között ható vonzó- vagy taszítóerő nagysága (F)**

- **egyenesen arányos a töltések nagyságával (Q_1 és Q_2), és**
- **fordítottan arányos a testek 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):

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

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 $Q_1, Q_2, \ldots, Q_n$ töltést, akkor a mérések szerint:

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

A folyamatokban részt vevő töltéshordozó részecskék ugyanúgy viszik magukkal a 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. Mindig a szövegkörnyezetből derül ki az egyszerűsített fogalmazás pontos értelme.

   A töltés szó jelenthet elektromos tulajdonságot. (Pl. A test kétféle elektromos töltéssel rendelkezhet.)

   Ez a neve az elektromos tulajdonság mértékét jellemző fizikai mennyiségnek is. (Pl. Egy golyó töltése $Q = 3 \cdot 10^{-14}$ C.)

   Jelölheti magát az elektromos tulajdonságú 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 rendkívül kis erők mérésére is használható torziós mérleget. Mérésekkel meghatározta a rugalmas szálra ható forgatónyomaték és az elcsavarodási szög közötti függvénykapcsolatot. A torziós mérleg segítségével nemcsak az elektromos töltésű testek, hanem a mágnesek pólusai közötti erőhatás törvényét is felismerte. Nevéhez fűződik a csúszási súrlódási erő törvényének vizsgálata is.

3. A Coulomb-törvényt gyakran a következő formában írják fel:

$$F = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}.$$

   A törvénynek ebben a formájában szereplő ε_0 állandót a **vákuum dielektromos állandójának** (más néven **permittivitásnak**) nevezik. A dielektromos állandó használatával a Coulomb-törvény ugyan bonyolultabb formát kap, más, később szereplő összefüggések viszont egyszerűbbé válnak. ε_0 a fizikában alapvető állandó:

$$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \frac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2}.$$

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 a 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. Szigetelő nyelekre 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 képletekbe mindig csak a töltések nagyságát helyettesítjük. Az előjelet a feladat értelmezésekor vesszük figyelembe.

a) A golyók közötti vonzóerőt kell ellensúlyoznunk, amit a Coulomb-törvénnyel számolhatunk. 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. Becsüljük meg az 1 liter csapvízben található elektromos töltések mennyiségét!

MEGOLDÁS:

A csapból folyó víz elektromosan semleges, tehát összes töltése: $Q = 0$. A víz azonban nagyszámú negatív töltésű elektront és ugyanannyi pozitív protont tartalmaz. Határozzuk meg ezek töltését!

Egy elektron töltésének nagysága: $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C. Az atom protonjainak és egyben elektronjainak számát az atom rendszáma adja meg. Ez hidrogénnél 1, oxigénnél 16. Egy H_2O-molekulában tehát $N = 18$ elektron van.

A víz moláris tömege: $M = 18 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$.

Mólnyi mennyiségben (és így 18 g vízben is) a molekulák száma: $A = 6 \cdot 10^{23}$.

1 liter víz tömege: $m = 1$ kg $= 1000$ g. Ebben a mólok száma:

$$n = \frac{m}{M} = \frac{1000}{18} = 55{,}6.$$

Az előbbi adatok felhasználásával az 1 liter vízben lévő elektronok (és egyúttal protonok) töltésének nagysága:

$$Q = n \cdot A \cdot N \cdot e = 55{,}6 \cdot 6 \cdot 10^{23} \cdot 18 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C} = 9{,}6 \cdot 10^{7}\ \text{C} \approx \mathbf{10^8\ C.}$$

Miért csak becslésnek tekinthető ez a számítás?

3. Számítsuk ki az 1 C nagyságú töltéshez szükséges

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

Segítségül felhasználható a periódusos rendszer.

4. 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?

5. Két –1 nC (nanocoulomb) töltésű pontszerű test között 1 N nagyságú erő hat.

a) Mekkora a testek közötti távolság?

b) Hány elektrontöbblete van egy-egy testnek?

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

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

b) Miért tekinthető csak becslésnek az előbbi számítás?

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

8. Mekkora tömegű az a semleges alumíniumtest, amelyben az elektronok együttes töltése éppen 1 C? Használjuk fel a számításban a következő adatokat: az Al rendszáma 13, moláris tömege $27 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$, az 1 mólnyi alumíniumban lévő atomok száma: $6 \cdot 10^{23}$!

9. Tájékozódjunk Coulomb életéről és munkásságáról!

10. Nézzünk utána interneten a torziós mérleggel (más néven torziós ingával) történt nevezetes méréseknek! Hogyan lehet az eszközzel nagyon kis erőket is mérni?

3. Az elektromos mező jellemzése

3.1. Az elektromos térerősség

Ha meg akarjuk változtatni egy labda sebességét, akkor kezünkkel, lábunkkal vagy fejünkkel hozzáérve fejtünk ki rá erőt. Két elektromos töltésű test között viszont érintkezés nélkül, akár légüres téren át is fellép a vonzó vagy taszító erőhatás.

Hogyan képesek az elektromos testek a „semmin keresztül" is hatni egymásra?

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 például a levegőt. Csupán a belehelyezett elektromos töltésre ható erő észlelhető.

Mit jelent ezek alapján például az a megállapítás, hogy két azonos előjelű töltéssel rendelkező test taszítja egymást?

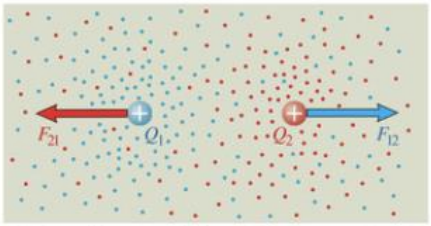
A *18.1. ábra* szerint a Q_1 töltés létrehoz maga körül egy kék színű pontokkal szemléltetett elektromos mezőt. Ez a mező fejti ki a benne elhelyezkedő Q_2 töltésű testre az F_{12} erőt.

Ugyanakkor a Q_2 töltés is létrehozza a maga elektromos mezőjét (piros színek), és ez a mező hat a Q_1 töltésű testre F_{21} erővel.

A mezőknek csupán a hatását tapasztaljuk a két töltésen fellépő ellentétes irányú, egyenlő nagyságú (taszító) erők formájában. Ezt a tapasztalatunkat fogalmazzuk röviden úgy, hogy a két azonos előjelű töltés taszítja egymást.

Ha egy harmadik Q_3 töltés is jelen lenne, erre a Q_1 és Q_2 töltés elektromos mezője is hatna. De a Q_3 töltés is létrehozna elektromos mezőt, amivel visszahatna a Q_1 és Q_2 töltésekre.

Az elektromosságtanban alapvető szerepet játszanak a különböző elektromos mezők. Ezek törvényszerűségeinek megfogalmazásához meg kell ismerkednünk a mezők mennyiségi jellemzésére szolgáló fizikai mennyiségekkel.

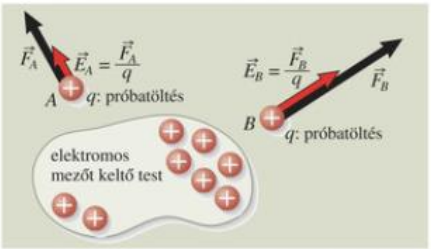


18.1. Egy elektromos töltés az elektromos mezője által fejt ki erőt egy másik töltésre

Gondoljuk át ezt a nyugvó töltések által keltett elektromos mező, az úgynevezett **elektrosztatikus mező** esetére!

Nyugvó töltések által létrehozott elektromos mező időben nem változik, de helyről helyre eltérő tulajdonságú lehet. Ezt egy tetszőlegesen megválasztott, úgynevezett **próbatöltéssel** mutathatjuk ki. A próbatöltésre a mező különböző pontjaiban általában eltérő nagyságú és irányú erő hat. (*18.2. ábra*)

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 hányadosa a mező egy pontjában már állandó, egyértelműen a mező erősségére jellemző mennyiség lesz.



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

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 térerősség számértékre megegyezik az adott pontba helyezett egységnyi töltésre ható erővel. A mező egy pontjában 1 $\frac{\text{N}}{\text{C}}$ a térerősség, ha ott 1 C próbatöltésre 1 N erő hat.

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 pontban az elektromos térerősség nagyságát! (*19.1. ábra*)

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

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

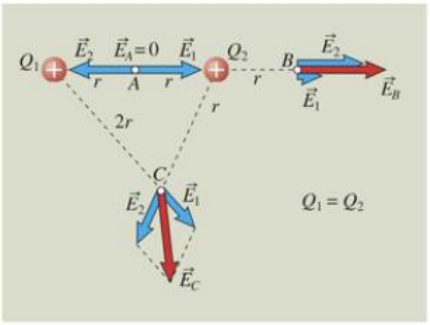
A térerősség:

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

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

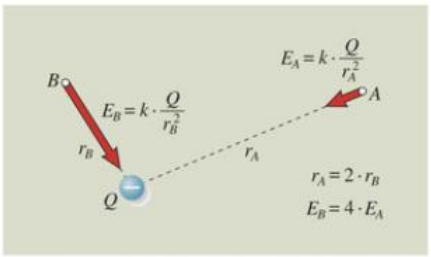
A térerősség pozitív Q esetén a töltéssel ellentétes irányban (kifelé), negatív Q esetén pedig a töltés felé mutat.

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. (*19.2. ábra*)

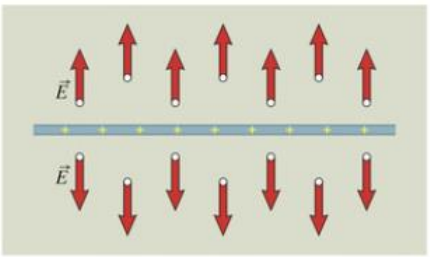


19.2. A szuperpozíció elvének alkalmazása pontszerű Q_1 és Q_2 töltések elektromos mezőjében. *Értelmezzük az ábrát!*

Az olyan elektromos mezőt, melynek minden pontjában a térerősség nagysága és iránya is megegyezik, **homogén elektromos mezőnek** nevezzük.



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

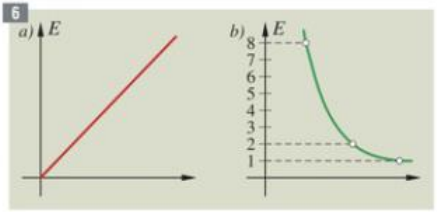


19.3. Elektromos töltésű sík fémlemez mindkét oldalán homogén elektromos mező van jelen.

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 adott töltés helyett egy háromszor nagyobb töltés háromszor kisebb térerősséget hozzon létre a környezetében?
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?
6. A grafikonok vízszintes tengelyéről letörlődött a jelölés. Mit írhatnánk oda, és milyen feltétel mellett?

6



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:

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

A porszemre felfelé irányuló elektromos erő és a porszemre lefelé ható gravitációs erő:

$$F_{\text{el}} = E \cdot q = 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}} \cdot 2 \cdot 10^{-7}\,\text{C} = 2 \cdot 10^{-3}\,\text{N}, \quad F_{\text{g}} = m \cdot g = 5 \cdot 10^{-8}\,\text{kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 5 \cdot 10^{-7}\,\text{N}.$$

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

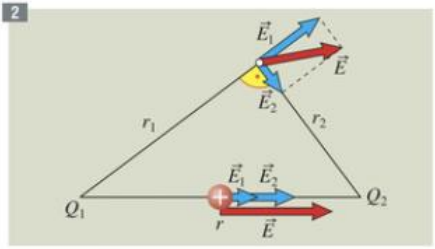
$$a = \frac{F}{m} = \frac{2 \cdot 10^{-3}\,\text{N}}{5 \cdot 10^{-8}\,\text{kg}} = 0{,}4 \cdot 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \mathbf{4 \cdot 10^4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}.$$

2. Egy derékszögű háromszög oldalai: 6 cm, 8 cm és 10 cm. Az átfogónak a hosszabb befogó felöli végpontján egy $2 \cdot 10^{-8}$ C töltésű, a másik végpontján -10^{-8} C töltésű részecske helyezkedik el. Határozzuk meg a két töltés elektromos mezőjének térerősségét

a) az átfogó felezési pontjában;

b) a derékszög csúcsában!

MEGOLDÁS:



$Q_1 = 2 \cdot 10^{-8}$ C

$Q_2 = -10^{-8}$ C

$r_1 = 8$ cm $= 8 \cdot 10^{-2}$ m

$r_2 = 6$ cm $= 6 \cdot 10^{-2}$ m

$r = 10$ cm $= 10^{-1}$ m

a) Az egyes töltésekből adódó térerősségek nagysága:

$$E_1 = k \cdot \frac{Q_1}{\left(\frac{r}{2}\right)^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-8}\,\text{C}}{\left(\frac{10^{-1}}{2}\,\text{m}\right)^2} = 7{,}2 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}.$$

Az E_2 térerősség nagysága fele lesz E_1-nek, mivel feleakkora töltés hozza létre ugyanakkora távolságban:

$$E_2 = 3{,}6 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}.$$

A térerősség-komponensek egyező irányúak, az eredő térerősség nagysága a szuperpozíció elve alapján:

$$E = E_1 + E_2 = 7{,}2 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}} + 3{,}6 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}} = \mathbf{10{,}8 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}}.$$

A térerősség irányát az ábra mutatja.

b) A térerősség-komponensek irányát és ezekből az eredő térerősség megszerkesztését az ábra szemlélteti.

A térerősség összetevőinek nagysága:

$$E_1 = k \cdot \frac{Q_1}{r_1^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-8}\,\text{C}}{(8 \cdot 10^{-2}\,\text{m})^2} = 2{,}8 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}},$$

$$E_2 = k \cdot \frac{Q_2}{r_2^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{10^{-8}\,\text{C}}{(6 \cdot 10^{-2}\,\text{m})^2} = 2{,}5 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}.$$

Az eredő térerősség nagysága Pitagorasz tételével számolható:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = \sqrt{\left(2{,}8 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}\right)^2 + \left(2{,}5 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}\right)^2} = \mathbf{3{,}75 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}}.$$

3. 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!

4. $10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}$ 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?

5. $2 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}$ térerősségű mezőben lévő elektromosan feltöltött porszemre $6{,}4 \cdot 10^{-13}$ N nagyságú elektromos erő hat. Hány elektron töltésével rendelkezik a porszem?

6. 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!

7. 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 kifelé irányul?

8. 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!

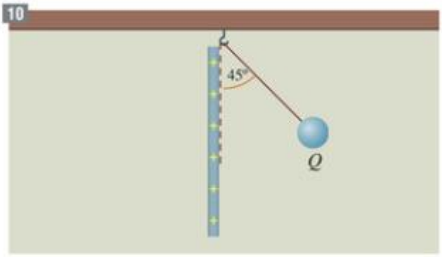
9. Egy He atommag elektromos mezője $4{,}61 \cdot 10^{-22}$ N lefelé irányuló erővel hat egy elektronra.

a) Határozzuk meg az elektromos térerősséget az elektron helyén!

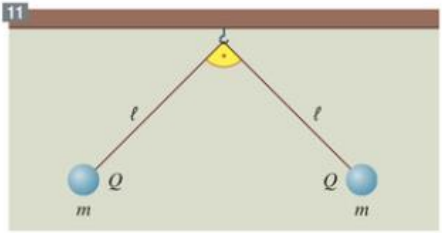
b) Az elektronhoz viszonyítva hol helyezkedik el ekkor a He atommag?

A hiányzó adatokat pótoljuk táblázatból!

10. Egy szigetelő fonálon függő 1,2 g tömegű fémgolyócskának elektromos töltést adtunk. Ezután elektromos töltésű, függőleges helyzetű fémlemez homogén elektromos terébe lógattuk, melynek térerőssége $6 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}$. A fonál a függőlegessel 45°-os szögű helyzetben maradt egyensúlyban. Határozzuk meg a golyó töltését!



11. 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!

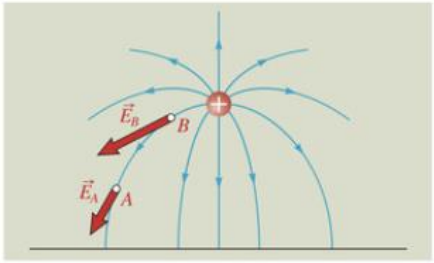
Szórjunk egyenletesen búzadarát az olaj felületére! Ha a dörzselektromos géppel elektromosan feltöltjük az olajba merülő elektródákat, a daraszemek az elektromos mezőre jellemző vonalakban rendeződnek. (*23.1. ábra*)

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

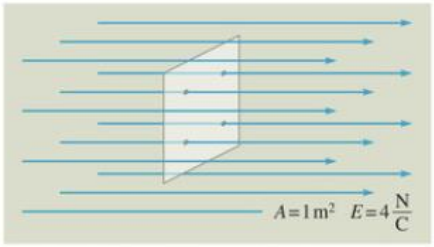
- **az erővonalak iránya megegyezik a térerősség irányával,**
- **az erővonalak sűrűsége megegyezik a térerősség nagyságával.**

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

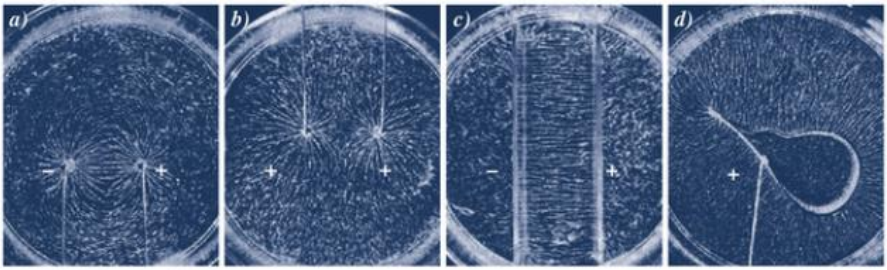
Egy felületen áthaladó összes erővonal száma a felület elektromos fluxusának számértékét adja. A fluxus betűjele: Ψ (ejtsd: pszi). Ha a felület merőleges az erővonalakra, az egységnyi felület fluxusa és a térerősség számértékre megegyezik, az A nagyságú felület fluxusa pedig ennek A-szorosa lesz: $\Psi = E \cdot A$. Az elektromos fluxus mértékegysége: $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}} \cdot \mathrm{m}^2$.



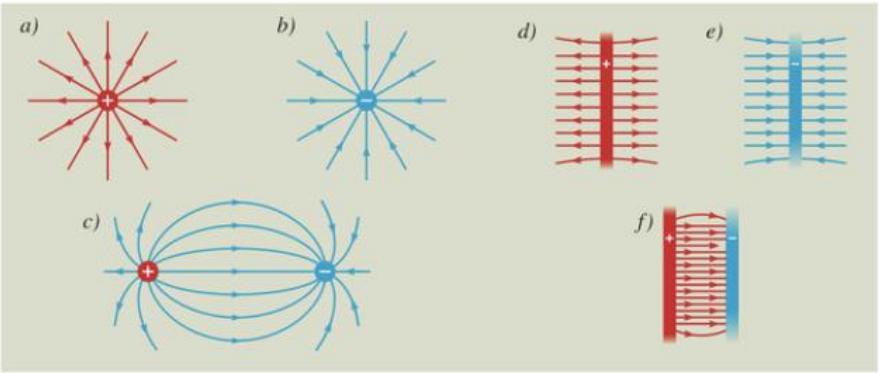
23.2. Az erővonal érintője adja a térerősség irányát az adott pontban. *Hogyan látszik az erővonalképből, hogy $E_B > E_A$?*



23.3. 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?*



23.1. Kísérleti erővonalképek



24.1. 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) A dipólus (két egyenlő nagyságú és ellentétes előjelű töltés) inhomogén erőterében a pozitív töltéstől a negatív töltés felé haladó erővonalak láthatók.

d) 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 minden pontban egyenlő. Itt az elektromos mező **homogén.**

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

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

A *c)* ábra az *a)* és *b)*, az *f)* ábra a *d)* és *e)* 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. A kísérletekben azért rajzolódnak ki az erővonalak, mert a mező a búzadaraszemeket dipólusokká alakítja, amelyek az egymásra gyakorolt vonzóerő miatt a mező által kifejtett erő irányában láncokká rendeződnek. A vonalak száma függ az olajba szórt búzadaraszemek számától is, így a kísérleti



erővonalak nem felelnek meg teljesen a megállapodás szerinti ábrázolási követelményeknek. Mégis sok minden megfigyelhető a kísérlet erővonalképein (*23.1. ábra*).

- Látszik a pontszerű töltés közvetlen környezetében a sugaras erővonalkép. Itt a másik töltés hatása elhanyagolható. (*a)* és *b)* kép)
- Látható, hogy az ellentétes előjelű töltések a köztük lévő térrészben erősítik, az egynemű töltések ugyanott gyengítik egymás hatását. (*a)* és *b)* kép)
- Két egyenlő nagyságú, de ellentétes előjelű töltéssel rendelkező fémlap esetén a lapok közötti térrészben a mezők erősítik egymást és homogén mező alakul ki, a lemezeken kívüli térrészben pedig az elektromos mezők kioltják egymást (ez a szuperpozíció elvének megnyilvánulása). (*c)* kép)
- Érdekes következtetést tehetünk a *d)* kísérleti ábra alapján. Egy feltöltött üreges vezető csak kifelé hoz létre elektromos teret, belül a térerősség zérus.
- Megfigyelhetjük azt is, hogy az erővonalak mindig merőlegesen indulnak a vezető felületéről.

3. Vizsgáljuk meg, hogy egy Q pontszerű töltésből hány erővonalat kell indítanunk, hogy az erővonalak számszerűen is helyesen jellemezzék a térerősség nagyságát!

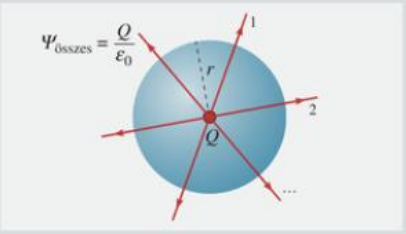
Vegyük körül a Q ponttöltést r sugarú gömbbel! Ennek felületén a térerősség:

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

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. A 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:

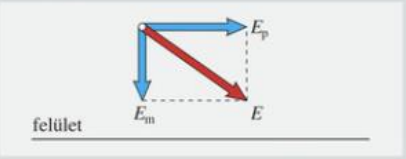
$$\Psi_{\text{összes}} = \frac{Q}{\varepsilon_0}, \quad \textbf{ez Gauss tétele.}$$

4. Ha a térerősség nem merőleges a felületre, akkor az A nagyságú felületet átdöfő erővonalak számát, azaz a fluxust a következőképpen számíthatjuk:

$$\Psi = E_{\text{m}} \cdot A,$$

ahol E_{m} a térerősség felületre merőleges összetevőjét jelenti.

Ennek helyességét könnyen beláthatjuk, ha az elektromos mezőt egy felülettel párhuzamos E_{p} térerősségű és felületre merőleges E_{m} térerősségű mező szuperpozíciójának tekintjük. Az E_{p} térerősségű mező erővonalai nem mennek át a felületen.



GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Az 1. ábra egy térrész erővonalait mutatja.

Az ábrán jelölt pontok közül

a) melyikben a legnagyobb a térerősség?

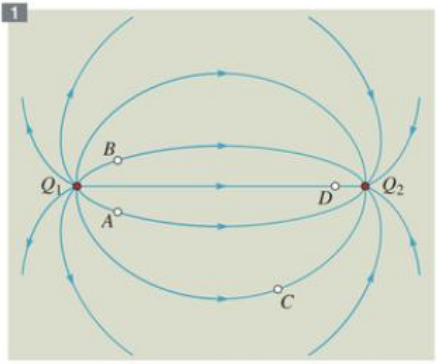
b) melyikben a legkisebb a térerősség?

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 *23.1 ábra* kísérleti erővonalképein az erővonalak irányát!

3. Ha egy szalaggenerátor feltöltött elektródájára habszivacs darabkákat szórunk, azok minden irányban szétrepülnek. Egybeesik-e pályájuk az erővonalakkal?

4. Milyenek egy véges méretű elektromos töltésű sík fémlemez mezőjének erővonalai a lemez méreteihez képest nagy távolságban? Párhuzamosak vagy sugarasan elhelyezkedők?

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?

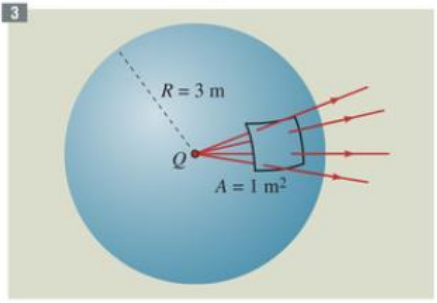
c) Mennyi lesz a lap fluxusa az eredeti helyzetből történt 30°-os elforgatás után?

3. Az ábra szerint egy 3 m sugarú gömb középpontjában lévő Q pontszerű töltésből induló erővonalak közül 4 erővonal halad át a gömbfelület 1 m^2-es darabján.

a) Határozzuk meg a Q töltés nagyságát!

b) Mennyi a teljes gömbfelület fluxusa?

3



33. Az elektromos mező munkája. Az elektromos feszültség

AZ ELEKTROMOS MUNKA ÉS FESZÜLTSÉG KAPCSOLATA

Mindennapi életünkhöz kapcsolódva gyakran hallunk, beszélünk másfél voltos elemekről, 230 voltos hálózatról, életveszélyes nagyfeszültségről. Mit is jelentenek ezek a kifejezések? Valóban életveszélyes minden nagyfeszültség? Nézzük meg az elektromos feszültség pontosabb jelentését!

Megismerkedtünk már az elektromos térerősséggel, amely az elektromos mezőt erőkifejtő képessége alapján jellemzi. Amikor a megdörzsölt test magához ránt apró tárgyakat, vagy a szalaggenerátor elektródájára szórt hungarocell golyócskák szanaszét repülnek, az elektromos mező nemcsak erőt fejt ki, hanem munkát is végez a mozgó elektromos töltésű részecskéken. 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, azzal egyenesen arányos. Hányadosuk tehát állandó.

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.



27.1. *Alessandro Volta* (1745–1827) olasz fizikus, és az általa alkotott első elem („elektromos oszlop")

Az elektromos munkát gyakran a feszültségből számoljuk:

$$W = U \cdot Q.$$

Közelítően 1 V a feszültsége a Volta által előállított első elektromos elemnek. Az autók ólomakkumulátorai 12 V-osak.

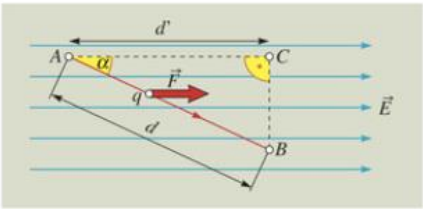
Az emberi szervezet biológiai folyamataiban millivolt nagyságrendű elektromos feszültségek lépnek fel. Az elektromos áramkörök 50 V feletti feszültségeit az emberre már veszélyesnek tartják. Egyes elektromos halfajták képesek több száz voltos feszültségű elektromos mezővel elkábítani vagy akár megölni az áldozataikat. A nagyfeszültségű távvezetékek 400–750 kV-osak. A villámban 100 MV feletti feszültségek is előfordulnak.

Érdekes jelenség, hogy az elektromos dörzsöléses kísérleteknél is gyakoriak a több kilovoltos feszültségek, és ezek mégsem veszélyesek. Ennek alapvető oka az, hogy az emberi szervezetben történő változások nem az elektromos mező feszültségével, hanem annak munkájával függenek össze.

A mező munkája:

$$W = U \cdot Q.$$

Az elektrosztatikus jelenségeknél – nagy feszültség mellett – igen kicsi a dörzsöléssel előállított és így áramlásba hozható töltésmennyiség. (Sok nagyságrenddel kisebb, mint az elektromos áramkörökben.) Így az elektromos munka is jelentéktelen nagyságúnak adódik az ilyen kísérletek többségénél.



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

Példaként határozzuk meg az elektromos feszültséget egy E térerősségű homogén mező d távolságban lévő A és B pontja között! Itt az F erő nagysága és iránya állandó. (*28.1. ábra*)

Vezessük a q pozitív próbatöltést az AB szakasz mentén az A pontból a B pontba! Mivel a mező által kifejtett erő iránya nem egyezik meg az elmozdulás irányával, a munkát úgy számíthatjuk, hogy az elmozdulás erő irányú összetevőjét (vetületét) szorozzuk az erővel:

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

ahol d' a d elmozdulás erő irányú vetülete. Az erő a térerősséggel kifejezve:

$$F = E \cdot q,$$

így a munka

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

A feszültség definíciója szerint:

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} = \frac{E \cdot q \cdot d'}{q} =$$

$$= E \cdot d' = E \cdot d \cdot \cos\alpha.$$

Mit kapnánk az A és B pont közötti munkára, ha más, például az ACB útvonalon vinnénk a próbatöltést az A pontból a B pontba?

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

$$W_{AC} = F \cdot d'.$$

A $\overline{CB}$ szakasz merőleges az erő irányára, ezért

$$W_{CB} = 0.$$

A munka a teljes útvonalon:

$$W_{ACB} = W_{AC} = F \cdot d' = F \cdot d \cdot \cos\alpha.$$

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 eletrosztatikus mező konzervatív.

A FESZÜLTSÉG ÉS A TÉRERŐSSÉG KAPCSOLATA

Ha homogén elektromos mezőben két pont d hosszúságú összekötő szakasza párhuzamos az E térerősséggel ($\cos\alpha = 1$), akkor az U feszültség:

$$U = E \cdot d.$$

Gyakran a feszültség ismeretében számoljuk a térerősséget:

$$E = \frac{U}{d}.$$

Az összefüggésből a térerősség SI-mértékegysége kétféleképpen is megadható:

$$1\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}} = 1\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}.$$

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

$$U_{BA} = -U_{AB}.$$

A POTENCIÁL

Gyakran egy közös O alapponthoz viszonyítva adunk meg minden feszültséget. Alappontnak a készülékek fémtestét, földelt pontját vagy az úgynevezett végtelen távoli pontot szokták választani (ahol a helyi töltések elektromos mezője már elhanyagolhatóan gyenge). Ilyenkor az U_{AO} helyett röviden csak az U_A jelölést használjuk. **A közös ponthoz viszonyított feszültség neve: potenciál** (földhöz viszonyítva: földpotenciál).

Bár a feszültséget két pont viszonylatában értelmeztük, a potenciál már pontonként jellemzi a mezőt.

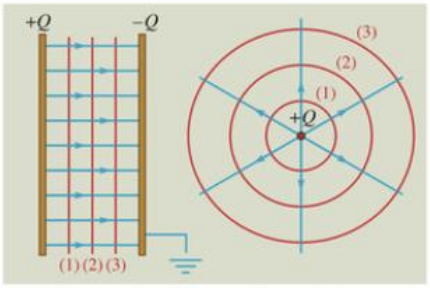
Bármely két pont közötti feszültséget felfoghatjuk úgy is, mint potenciáljaik különbségét.

Feszültség = potenciálkülönbség,

$$U_{AB} = U_A - U_B.$$

Ha valamely elektromos mezőben az erővonalakra merőleges irányban mozog a próbatöltés, akkor a mező által kifejtett erő és az elmozdulás merőlegesek egymásra. Az ilyen útvonal bármely két pontja között $W = 0$ és $U = 0$. Ezek a pontok azonos potenciálúak, más szóval *ekvipotenciális* pontok.

Az ekvipotenciális pontok együtt ekvipotenciális vonalat és ekvipotenciális felületet képeznek. Ezek a vonalak és felületek minden pontban merőlegesek az ottani erővonalakra.

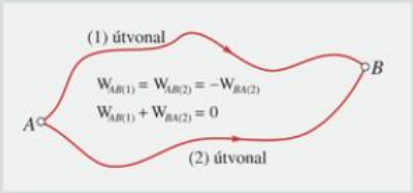


29.1. Erővonalak és ekvipotenciális vonalak homogén és inhomogén mezőben. *A mezők (1) vagy (2) jelzésű vonalán nagyobb a potenciál?*

MEGJEGYZÉSEK

1. Ha megváltoztatnánk a q próbatöltés előjelét, akkor a mező W_{AB} munkája is ellentétes előjelűre 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 fogalmazható, hogy **zárt görbe mentén a mező munkavégzése zérus. Ez az energiamegmaradás megnyilvánulása.** Ugyanis sztatikus mezőben egy görbét körbejárva a kiindulási állapotba jutunk. Ha a mező nem változott, nem végezhetett munkát, nem növelhette a próbatöltés energiáját.

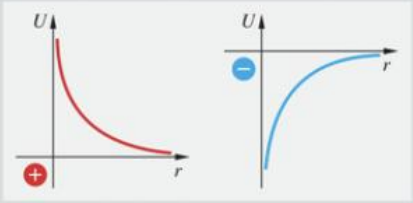


29.2. Zárt görbét körbejárva a mező munkája zérus

3. A pontszerű töltés elektromos mezőjében a töltéstől r távolságban, a végtelen távoli ponthoz viszonyítva a potenciál:

$$U = \frac{k \cdot Q}{r}.$$

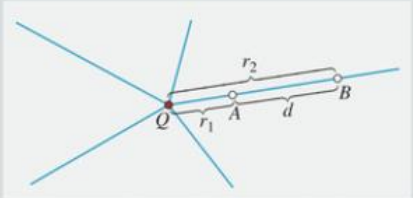
A potenciál előjele megegyezik a mező forrását képező Q töltés előjelével.



29.3. Potenciálgörbe + és – töltésnél

Q pontszerű töltés elektromos mezőjében a töltéstől r_1 és r_2 távolságú A és B pontok közötti feszültség:

$$U_{AB} = \frac{k \cdot Q}{r_1} - \frac{k \cdot Q}{r_2}.$$

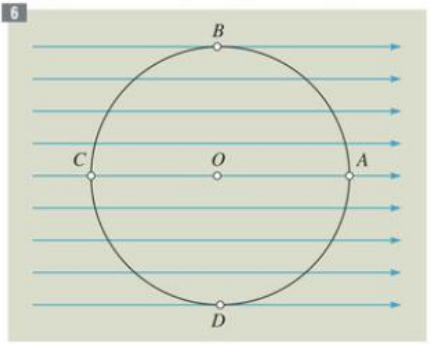


29.4. Ha B pont végtelen távolra tolódik, U_{AB}-ből U_A lesz

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 kört rajzolunk. Hogyan változik a körvonal mentén haladva a kerületi pontok és a középpont közötti feszültség?
7. Egyenlő távolságban követik-e egymást az ekvipotenciális vonalak, ha köztük a potenciálkülönbség állandó?

6



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:

$$W_{\text{elektron}} = \Delta E_{\text{mozgási}},$$

$$Q_e \cdot U = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2,$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot Q_e \cdot U}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 4{,}5\ \text{V}}{9{,}1 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}}} = \mathbf{1{,}26 \cdot 10^6\ \frac{m}{s}}.$$

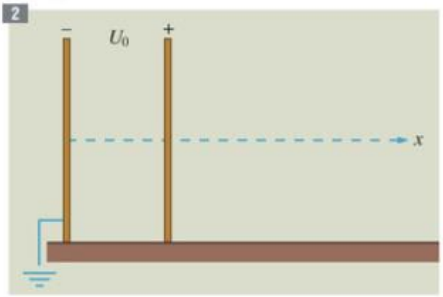
Látható, hogy az elektron végsebességét a kezdő- és végpont közötti feszültség határozza meg, a mező homogén volta és az út nem játszik szerepet.

2. Két fémlemezt az ábra szerint párhuzamosan, egymástól 4 cm távolságban, szigetelőlapon rögzítettünk, és a bal oldali lemezt földeltük. A lemezeket 200 V feszültségre feltöltöttük úgy, hogy a földelt lemez legyen negatív.

a) Ábrázoljuk a térerősséget és a potenciált a bal oldali lemeztől mért x távolság függvényében!

b) Mennyiben változnak a grafikonok, ha az áramforrást fordított polaritással kapcsoljuk a lemezekre?

2



MEGOLDÁS:

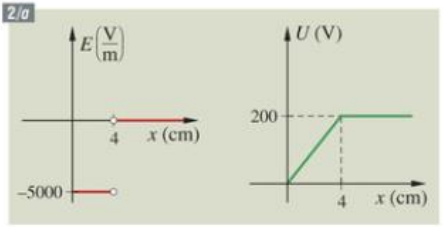
$d = 4\ \text{cm} = 0{,}04\ \text{m}$

$U_0 = 200\ \text{V}$

a) A lemezeknek egyenlő nagyságú, ellentétes előjelű töltése van. Így a lemezek között homogén elektromos mező jön létre, melynek térerőssége a pozitív lemeztől a negatív felé irányul. A lemezeken kívüli térrészben a térerősség zérus.
Az x tengellyel ellentétes irányú térerősséget negatív mennyiségként ábrázoljuk.

$$E = \frac{U_0}{d} = \frac{200\ \text{V}}{0{,}04\ \text{m}} = 5000\ \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

2/a



A földelt lemez 0 potenciálú. Ettől x távolságra a potenciál (feltéve, hogy $x \le d$):

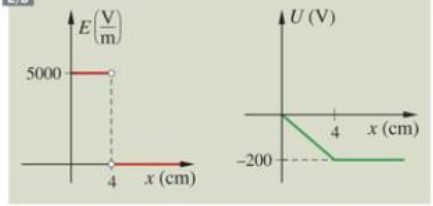
$$U = E \cdot x.$$

A potenciál tehát egyenes arányban nő az x távolsággal. Előjele pozitív.

A d távolságon túl nincs elektromos mező, a potenciál állandó.

b) A térerősségek és potenciálok nagysága mindenhol változatlan, előjelük ellentétesre változik. A grafikonok:

2/b



3. Egy akkumulátor két pólusa között áthaladó elektronon az elektromos mező $1{,}92 \cdot 10^{-18}$ J munkát végez. Mennyi az akkumulátor feszültsége?

4. 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?

5. 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 elmozdít.

a) Határozzuk meg, hogy 1 eV hány joule!

b) Mekkora sebességgel rendelkezik az elektron, ha 1 eV a mozgási energiája (az elektron tömege $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg)?

6. Homogén elektromos mezőben, melynek térerőssége $3 \cdot 10^5 \dfrac{\text{V}}{\text{m}}$, elengedünk egy $4 \cdot 10^{-3}$ C töltésű részecskét. Az elektromos mező a részecskén 30 J munkát végez.

a) Mekkora erő hat a részecskére?

b) Mennyi a befutott pálya végei között a feszültség?

c) Mekkora a megtett út?

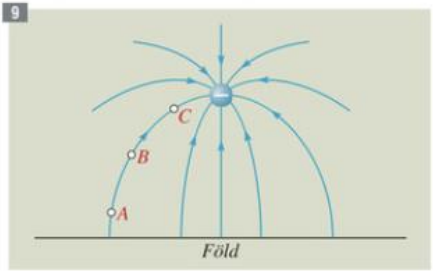
d) Mennyi az elért sebesség, ha a részecske tömege 0,2 g?

7. 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?

8. A *29.1. ábrán* az (1) jelű ekvipotenciális vonalak mindegyikén $U_1 = 90$ V. Határozzuk meg mindegyik mezőben az U_2 és U_3 potenciálok, valamint az U_{12} és U_{23} feszültségek értékét!

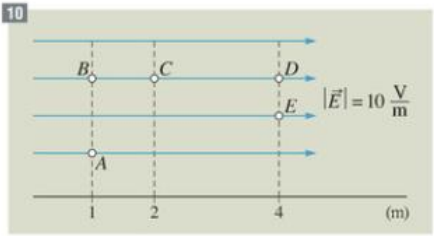
9. Másoljuk le a 9. sorszámú erővonalábrát, majd az A, B, C pontok mindegyikén át rajzoljunk ekvipotenciális vonalat! Az erővonal mentén az AB és BC utak egyenlő hosszúak. Hasonlítsuk össze az U_{AB} és U_{BC} feszültséget!

9



10. Keressünk az ábrán azonos potenciálú pontokat! Határozzuk meg a feszültséget azon pontok között, amelyek nem ekvipotenciálisak (nem azonos potenciálúak)!

10



11. Ismerjük az *A*, *B*, *C*, *D*, *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!*

12. Van de Graaf-féle [van dö gráf] szalaggenerátorral vagy Wimhurst-géppel [vimhörszt] végzett tanári kísérlet során mérjük meg a két elektróda legnagyobb szikrakisüléshez tartozó távolságát! Felhasználhatjuk, hogy normálállapotú levegőben, gömbelektródák között $3 \cdot 10^6\ \frac{V}{m}$ térerősség szükséges a szikrakisülés létrejöttéhez. Ezek alapján becsüljük meg a megosztógéppel előállítható maximális feszültséget!



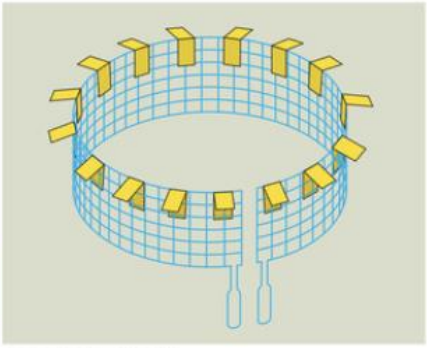
33.1. Dörzselektromos gépek elektrosztatikus kísérletekhez. Van de Graaf-féle szalaggenerátor (balra), és Wimhurst-féle influenciagép (jobbra)

13. A megfigyelések szerint Magyarországon évenként átlagosan 2,5 villámcsapás jut 1 km^2-re. A villámok feszültségét vehetjük átlagosan 100 kV-nak, az egy villám által szállított töltést pedig 10 C-nak. Becsüljük meg, hogy amennyiben sikerülne megoldani a villámok energiájának hasznosítását, kiválthatnánk-e ezzel a Paksi Atomerőművet! (Nézzünk utána a szükséges adatoknak!)



3D

4. Elektromos töltések, térerősség, potenciál a vezetőn



34.1. Feltöltött fémháló

Mindkét oldalán papírlovasokat tartalmazó, szigetelő nyéllel ellátott fémhálót (*34.1. ábra*) 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.

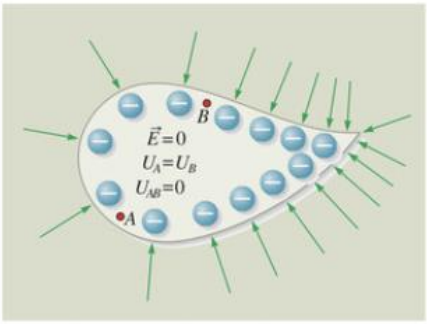
Az egynemű töltések a köztük fellépő taszító hatás miatt a lehető legnagyobb mértékben eltávolodnak egymástól. **A vezetőre vitt többlettöltés mindig a vezető külső felületén helyezkedik el.** A **csúcsokon nagyobb a töltéssűrűség.**

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.**

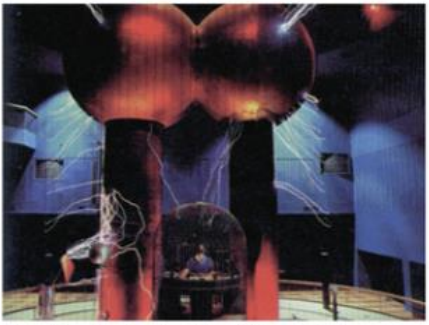
Ha a vezető felületén a térerősségvektornak lenne a felülettel párhuzamos összetevője, akkor a felület mentén még elmozdulnának a töltések, hiszen érintő irányú erő hatna rájuk. Ezért sztatikus állapotban a vezető környezetében **az erővonalak csak a vezető felületére merőleges helyzetűek lehetnek.**

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 nincs 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.



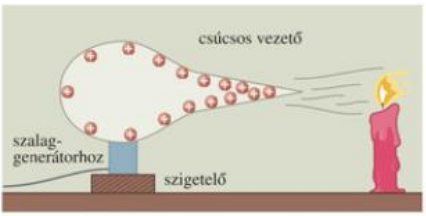
34.2. Töltés, térerősség és potenciál a vezetőn



34.3. A Faraday-kalitka véd a villámcsapástól



35.1. *Mitől védi a fémrács a gázpalackokat?*



35.3. *Miért fúj a szél az elektromos csúcsok felől?*

Faraday-kalitka például a gépkocsik fémkarosszériája. Ha az autót villámcsapás éri, a benne ülők nem érzékelnek elektromos hatást. A földbe lefutó villám persze kiégetheti a kerekek gumiköpenyét, és ez okozhat balesetet. Az álló gépkocsi belseje 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.

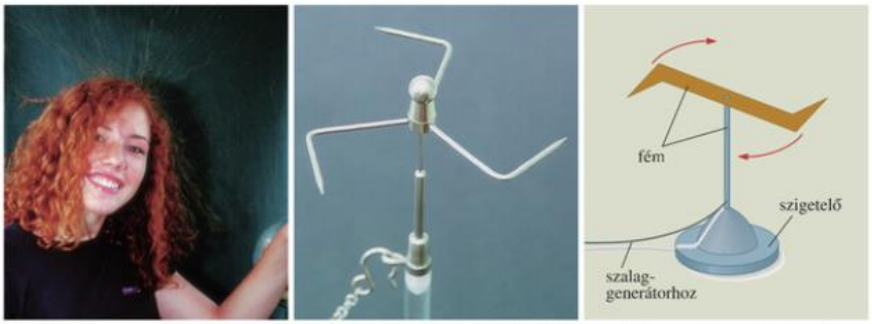
Az emberi test is vezető, és szalaggenerátorral akár több 10 kV-os potenciálra is feltölthető. Álljunk szigetelőzsámolyra, és helyezzük az egyik tenyerünket a generátor még semleges elektródájára! Ezután indítsuk a generátor motorját! A lágy és száraz haj vagy a zselézett haj fokozatosan égnek áll! A belső szerveket nem éri káros hatás, hiszen ott nincs elektromos mező. Ruhánkról, ujjunkról viszont ugorhat ki szikra a közeli tárgyakra vagy tanulókra. (Ez sem veszélyes, csak kis csípést okoz.)

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 vezető csúcshatás útján töltéseket ad át a környező levegőnek.

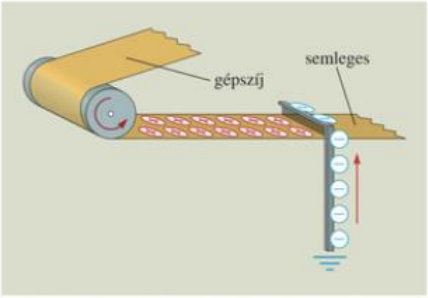
Töltsünk fel hegyes csúccsal rendelkező fémtestet szalaggenerátorral! A csúcs a közelébe vitt gyertya lángját „elfújja". Az elektromos szelet a csúcsnál feltöltődött és onnan nagy sebességgel eláramló levegőmolekulák keltik.

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).



35.2. Az elektromos töltések a vezető csúcsain sűrűsödnek az emberi hajban és az elektromos Segner-keréknél is



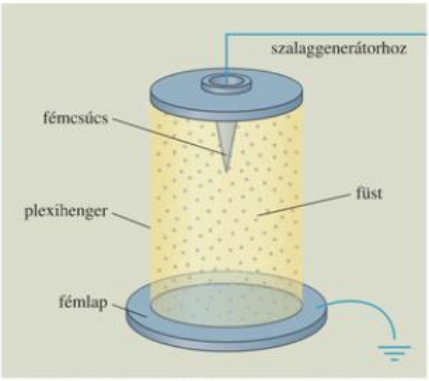
36.1. A feltöltött gépszíjat csúcshatás útján semlegesítik

A **villámhárító** csúcshatással adja le a hozzá kötött épületrészek töltéseinek egy részét, ezzel is csökkentve a villámveszélyt. (Lásd *38.1. 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 fedőlapjába 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.

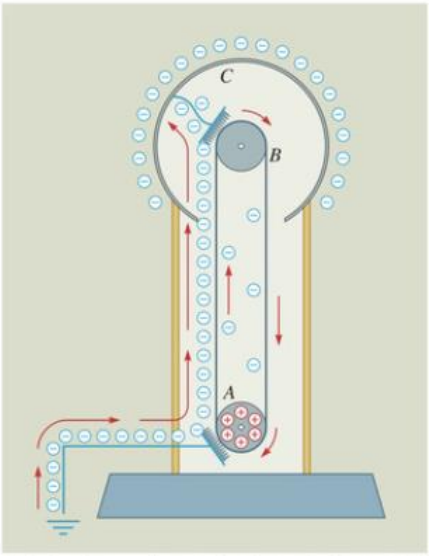


36.2. Csúcshatással történő elektrosztatikus légtisztítás kísérleti megvalósítása

Lényeges szerepe van a csúcshatásnak az iskolai elektrosztatikai kísérletekben használt **szalaggenerátor működésénél** is.

A *36.3. 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.



36.3. A szalaggenerátor csúcshatások segítségével a földből a *C* elektródára szállítja a negatív töltéseket

OLVASMÁNY

A villám, védekezés a villámcsapás ellen

A felhőkben kicsapódott vízcseppek vagy jégszemek esését a felfelé áramló levegő akadályozza. Eközben az egymással súrlódó, különböző anyagi minőségű részecskék elektromos töltésűvé válnak. A szél szétszakíthatja az eltérő 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, akár 30 000 °C-os felmelegedés miatt a levegő lökésszerűen kitágul. A hangnak a fényhez viszonyított késéséből és a hangsebességből a villám távolsága is megbecsülhető.



37.1. A villám óriási szikrakisülés

A fény $3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$-os sebessége olyan nagy a hang $340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$-os sebességéhez képest, hogy a fény terjedési idejét itt elhanyagolhatjuk. Így egyszerűen adódik, hogy a mennydörgésnek a felvillanás utáni minden 3 másodperces késése 1-1 km-rel távolabbi villámot jelent. Közeli villámnál rövid csattanó hangot, távoli villámnál – a felhőkről és földről történő hangvisszaverődések miatt – elnyújtott hangot hallunk.

A villámcsapás az embert is veszélyezteti, 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.

Könnyen érheti villámcsapás a hegytetőn álló, vagy sík terepből, tóból kiemelkedő embert. A villám haladási útvonala gyakran elágazik a környező vezetési pályák irányába is. Ezért zivataros időben ne álljunk 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.

A szabadban tartózkodó csoportnak villámcsapás veszélye esetén célszerű egymástól néhány méteres távolságra szétszóródni. Ezáltal csökken a tömeges sérülés veszélye, és így az esetleges sérültnek a társai segítséget nyújthatnak. Becslések szerint a villámcsapással sújtott emberek 80%-ának élete megmenthető, ha megfelelő segítségnyújtásban részesülnek.

Tévhit, hogy a villámsújtott emberhez veszélyes hozzáérni, mert elektromosan feltöltődött. Villámcsapásnál a villám elektromos árama áthalad az emberen ugyanúgy, mint más elektromos baleseteknél. Villámoknál ez csak a másodperc törtrészéig tart. A fő veszélyt az áram által okozott izomgörcs jelenti, ami életfontosságú szervek működését állíthatja le. Kisebb veszélyt jelentenek az áram be- és kilépési helyén keletkező égési sérülések.

A legsürgősebb tehát – a mentők azonnali értesítése mellett – a szívműködés és a légzés ellenőrzése, és hiányuk esetén ezek szakszerű visszaállítása (szívmasszázs, mesterséges lélegeztetés). A segítségnyújtásnál számolnunk kell azzal is, hogy a sérült a villám fényétől és hangjától átmenetileg elveszítette látását és hallását.

Villámveszéllyel járó időszakban lehetőleg ne tartózkodjunk a szabad ég alatt, hanem üljünk gépkocsiba vagy húzódjunk épületbe. Tökéletes a villámvédelmünk, ha felülről is fémborítású gépkocsiban ülünk (még akkor is, ha a villám belecsapna az autóba). A fémburkolat Faraday-kalitkaként elektromosan árnyékolja a belső teret.

Az épületek villámcsapás elleni biztonságos védelmét viszont csak szakszerűen megépített villámhárítóval érhetjük el. A villámhárító az épületek tetejére szerelt hegyes fémrúd, amelyet az épület több pontjával összekötött, vastag vezető útján földelnek. A villámhárító csúcshatással akadályozza, hogy az épületen a töltések felhalmozódjanak. Amikor elektromos felhő közelít, ennek megosztó hatása jól érvényesül a földelt és környezetéből kiemelkedő villámhárítón. Ezért a felhő töltése a villámhárítón át fog kisülni a föld felé. A villámhárító tehát nem tereli el, hanem ellenkezőleg, magába gyűjti a villámokat azért, hogy azok ne a környezetet károsítsák.



38.1. Villámhárító

A villámhárító fontos élet- és vagyonvédelmi szerepet tölt be, de nem védi meg az épület berendezéseit a vilámcsapás másodlagos hatásaitól. A környéken lecsapó villám áramának egy része a földelésen, az épület közelében lévő villanyoszlopról szabadon vezetett villanyvezetéken, telefon- vagy tévékábelen bejuthat az épületbe, ahol rövid ideig több száz vagy akár több ezer voltos túlfeszültséget is előidézhet. Ez elegendő egy számítógép, tévé vagy szórakoztató elektronikai berendezés tönkretételéhez. E károk ellen a legegyszerűbb védekezés, ha zivataros időben a készülékekhez tartozó minden vezetéket kihúzunk a fali csatlakozókból (a lekapcsolás nem elegendő). Érdemes megfontolni a másik lehetőséget: túlfeszültségvédő alkalmazását. A kereskedelmi forgalomban az ilyen célú eszközök többféle változata is megtalálható.

Az évezredeken át titokzatos természeti jelenségnek, a villámnak a kutatása csak a 18. században kezdődött. *Benjamin Franklin* [frenklin] (1706–1790) amerikai természetkutató 1752-ben papírsárkányt bocsátott fel zivatarfelhőkbe. (Ne utánozzuk, életveszélyes!) A sárkányt tartó nedves kötél aljára erősített kulcsból szikrák ugrottak át a tudós kezére.

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.

Franklin más elektromos kísérleteket is végzett, és ezek magyarázatával is próbálkozott. Ő vezette be az elektromosságtanban a pozitív és negatív elnevezéseket. Nagyon könnyű, pozitív elektromos folyadékot („fluidumot") tételezett fel a testekben, és ennek mozgásával magyarázta az elektromos jelenségeket. Bár ezt a feltételezést a következő évszázad anyagszerkezeti vizsgálatai megcáfolták, az elektromos áram irányának – hagyományos alapon – ma is a pozitív töltések áramlási irányát nevezzük.

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



38.2. Franklin és fia „befogják az ég villámait"

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK


3

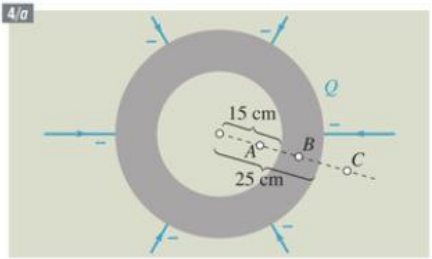
1. Egy vezetővel körülvett térrészben csak zérus lehet a térerősség?
2. Hogyan lehet egy szigetelő nyélen lévő, elektromos töltéssel rendelkező fémgolyó teljes töltését átadni egy üreges vezetőnek?
3. Miért veszik körül a mikrofont fémhálóval, vezetékét pedig a szigetelés alá helyezett fémszövettel?
4. Minden gépjármű védelmet biztosít a villámcsapás ellen?
5. Miért hallgatnak el egyes épületekbe, alagutakba érve a rádiók, mobiltelefonok?
6. Működne-e légüres térben
   a) az elektroszkóp? (*11.2. ábra*) *b)* az elektromos Segner-kerék? (*35.2. ábra*)
7. El kell-e szigetelni a villámhárítót az épülettől? (*38.1. 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!
3. Tartsunk bemutatót érdekes elektrosztatikai kísérletekből az osztályban!
4. Egy 25 cm-es külső és 15 cm-es belső sugarú vezető gömbhéjra -4 nC töltést viszünk.
   a) Szemléltessük rajzon a töltések elhelyezkedését és a létrejövő elektromos mező erővonalait!
   b) Határozzuk meg a térerősség nagyságát a középponttól 10 cm, 20 cm és 30 cm távolságban!
   **c)* Ábrázoljuk a térerősség nagyságát a gömb középpontjától mért r távolság függvényében!
   **d)* Ábrázoljuk a potenciált a gömb középpontjától mért r távolság függvényében!
   e) Mi történne, ha a gömböt földelnénk?

MEGOLDÁS:

a) Az erővonalakat a gömbhéj középpontján átmenő síkmetszeten (körgyűrűn) szemléltetjük. A töltések a külső felületen oszlanak el. A gömbön kívül olyan mezőt hoznak létre, mintha a töltések a gömb középpontjában lennének. Az erővonalak iránya megadja a térerősség irányát.



4/a

b) A vezető belsejében, az üregben is zérus a térerősség. A vezető befelé árnyékol.

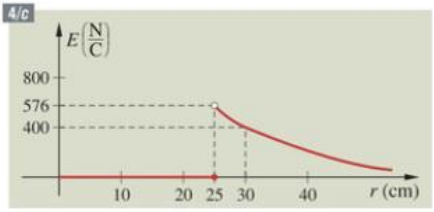
$$E_A = E_B = 0,$$

$$E_C = \frac{k \cdot |Q|}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{C^2}} \cdot \frac{4 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{C}}{(0{,}3\ \mathrm{m})^2} = \mathbf{400\ \frac{N}{C}}.$$

**c)* A térerősség a gömbhéj külső szélén:

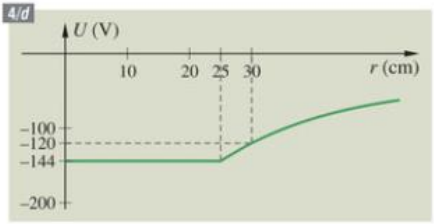
$$E = k \cdot \frac{|Q|}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{C^2}} \cdot \frac{4 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{C}}{(0{,}25\ \mathrm{m})^2} = \mathbf{576\ \frac{N}{C}}.$$

4/c



**d)* A gömb középpontjától $r < 25$ cm távolságú pontokban $E = 0$, így ezek a pontok ekvipotenciálisak. Potenciáljuk megegyezik az $r = 25$ cm távolságú pontéval, ahol kezdődik az elektromos mezőt tartalmazó térrész. Ebben a potenciál úgy számolható, mintha a Q töltés a gömb középpontjában helyezkedne el (mert itt ugyanolyan elektromos mező lenne):

4/d



$$U = k \cdot \frac{|Q|}{r} = 9 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{C^2}} \cdot \frac{-4 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{C}}{0{,}25\ \mathrm{m}} = \mathbf{-144\ V}.$$

Ugyanilyen számolással adódik, hogy $U_C = \mathbf{-120\ V}$.

A potenciál negatív értékei azt mutatják, hogy ebbe a térbe helyezett egységnyi pozitív töltés a végtelen távoli ponthoz (a 0 szinthez) képest alacsonyabb elektromos energiaszinten van. A pozitív próbatöltés csak külső munka árán juthat el a végtelen távoli pontba.

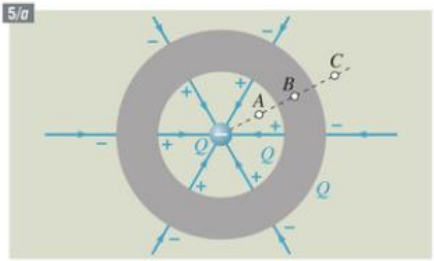
e) A földelés elvezetné a töltéseket, az elektromos mező megszűnne, a térerősség és a potenciál is minden pontban zérusra változna.

5. Oldjuk meg az előző feladatot azzal a módosítással, hogy a –4 nC töltést nem a fémgömbre, hanem annak középpontjába visszük! (Például a töltést a gömbön fúrt kis lyukon át szigetelő nyélen juttatjuk a középpontba.)

MEGOLDÁS:

a) A gömb középpontjában lévő töltés megosztja a vezető gömbhéjat úgy, hogy az eredő térerősség a vezető anyagában zérus legyen. A gömbhéjon kívül olyan a mező, mint a gömbhéj nélkül. Az erővonalkép (a gömbhéj anyagától eltekintve) a pontszerű töltés erővonalképével egyezik meg. A vezető kifelé nem árnyékol.

5/a



b) A keresett térerősségek:

$$E_A = \frac{k \cdot |Q|}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{C^2}} \cdot \frac{4 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{C}}{(0{,}1\ \mathrm{m})^2} = \mathbf{3600\ \frac{N}{C}},$$

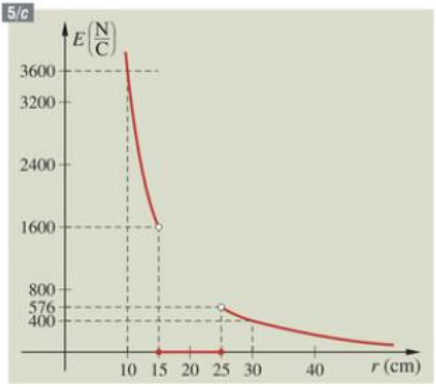
$$E_B = \mathbf{0},$$

$$E_C = \frac{k \cdot |Q|}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{C^2}} \cdot \frac{4 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{C}}{(0{,}3\ \mathrm{m})^2} = \mathbf{400\ \frac{N}{C}}.$$

**c)* A gömbhéjon kívül és a gömbhéj anyagában az előző (4.) feladatbeli térerősségek maradnak. A térerősség a gömbhéj belső szélén:

$$E = k \cdot \frac{|Q|}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{C^2}} \cdot \frac{4 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{C}}{(0{,}15\ \mathrm{m})^2} = \mathbf{1600\ \frac{N}{C}}.$$

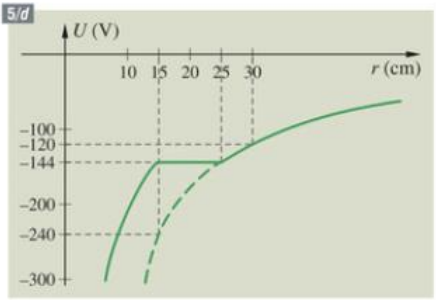
5/c



**d)* A gömbhéjon kívül és a gömbhéj anyagában ugyanolyan potenciálértékek jellemzőek, mint az előző (4.) feladatnál. Ha a Q töltés körül nem lenne gömbhéj (folyamatosak lennének az erővonalak), akkor a gömbhéj belső szélének 15 cm-es távolságában a potenciál a következő lenne:

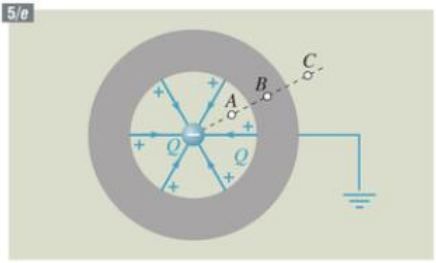
$$U = k \cdot \frac{|Q|}{r} = 9 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{C^2}} \cdot \frac{-4 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{C}}{0{,}15\ \mathrm{m}} = \mathbf{-240\,V}.$$

5/d



A vezető gömbhéj ezt az értékét a gömbhéj külső szélének potenciálszintjére, vagyis –144 V-ra emelte. A gömbhéjon belül a potenciálértékek mindenhol 96 V-tal emelkednek a gömbhéj nélkülihez képest.

5/e



e) A földelés elvezeti a megosztás miatt jelentkező külső felületi töltéseket. Csak az üregben marad elektromos mező. A földelt vezető kifelé is árnyékol. Az üregen kívül a térerősség és a potenciál is zérus.

$$E_A = \mathbf{3600\ \frac{N}{C}}, \qquad E_B = E_C = \mathbf{0}.$$

3D

5. A kondenzátor. Az elektromos mező energiája

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 mutatja az erővonalakról készült korábbi felvétel is. (*23.1. 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.

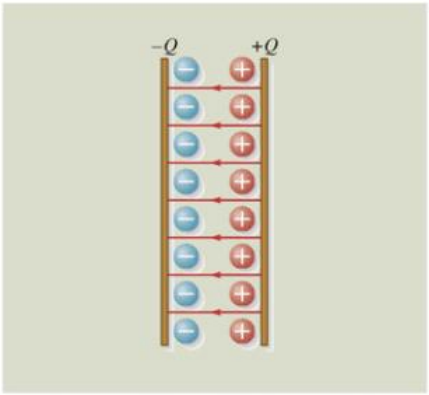
A kapacitás betűjele: C.

$$C = \frac{Q}{U}$$

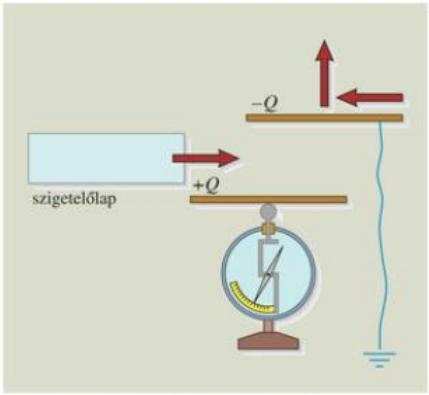
Minél nagyobb a kondenzátor kapacitása, annál több töltés befogadására képes ugyanakkora feszültség mellett.

A kapacitás mértékegysége Faraday tiszteletére a *farad* (ejtsd: farád), jele: F.

$$1\,\mathrm{F} = 1\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{V}}$$



42.1. *Milyen a feltöltött kondenzátor elektromos mezője?*



42.2. *Hogyan változtatható a kapacitás?*

Mitől függ a síkkondenzátor kapacitása? Keressük a választ kísérleti úton! (*42.2. 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):**

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d}.$$

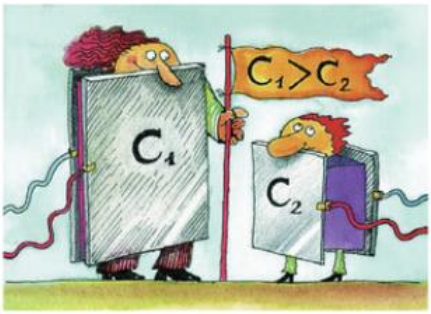
ε_0 a légüres tér **dielektromos állandója.**

ε_r a szigetelőanyag **relatív dielektromos állandója,** más néven permittivitása. 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 szükséges energiát az elektromos mező biztosítja.

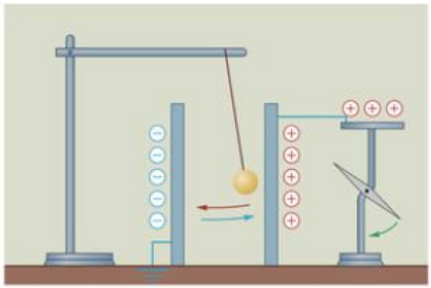


43.1. *Mi okozhatja, hogy $C_1 > C_2$?*

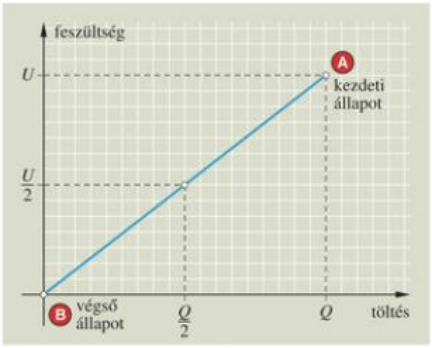
Végezzük el a *43.2. ábrán* látható kísérletet! Helyezzünk el egymástól néhány centiméteres távolságban párhuzamos fémlapokat úgy, hogy az egyik szigetelőállványon legyen, a másikat pedig földeljük. A szigetelt fémlemeznek adjunk valamilyen töltést, majd függesszünk a lemezek közé szigetelőfonálon alufóliából gyúrt golyót! A fonálinga először gyors, majd egyre lassúbb lengéseket végezve „átszállítja" a lemezek töltését a másik lemezre. A 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, amit a mező végezni tud a mező megszűnéséig, vagyis az egyik lemez töltéseinek a másik lemezre való átszállítása során.



43.2. Az elektromos mező munkát végez a töltéseket szállító alufólia golyócskán. *Hová lesz a megszűnő mező energiája?*



44.1. A kezdeti Q töltés csökkenésével együtt a kezdeti U feszültség is csökken



44.3. A gyakorlatban használatos kondenzátorok

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 átvitelekor már kisebb a mező munkája, hiszen addigra 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:

$$W = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot U.$$



44.2. A kondenzátor energiájánál fogva akár fel is tudna ugrani

Felhasználva a $Q = C \cdot U$ összefüggést,

a kondenzátorban lévő elektromos mező energiája, azaz a kondenzátor energiája:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2.$$

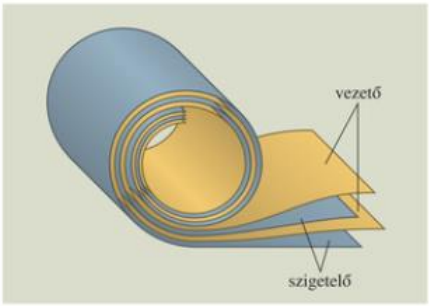
KONDENZÁTOROK A GYAKORLATBAN

Az elektrotechnikában sokféle kondenzátor használatos. Eltérhetnek a kondenzátorok alakjukban (sík-, gömb- vagy hengerkondenzátorok); és különbözhetnek a szigetelőanyagban (levegő, papír, csillám, olaj stb.) is.

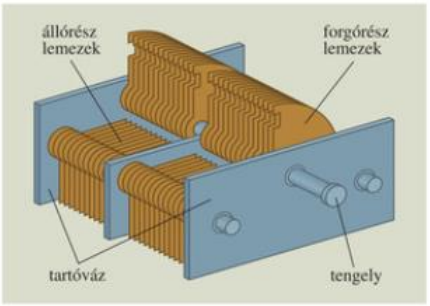
Gyakori a papírszigeteléssel elválasztott, alufólia csíkokat tartalmazó kondenzátor, amelynél ezeket a rétegeket hengeres formában felcsévélik, majd henger vagy téglatest alakú tokban tárolják (*45.1. ábra*). A nagy felület és a kis lemeztávolság miatt nagy kapacitás érhető el.

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, amelynél sérül a szigetelés. Az elektrolitikus kondenzátorra csak a feltüntetett polaritással szabad feszültséget kapcsolni, egyébként tönkremegy az elektrolízissel létrehozott szigetelőréteg (a kondenzátor fel is robbanhat a heves gőzfejlődés miatt!).

Napjainkban az érdeklődés középpontjába került az elektrolitkondenzátorok egy új típusa,



45.1. Egy hengeres kondenzátor szerkezete



45.2. Forgókondenzátor

a *szuperkondenzátor.* Az elnevezés arra utal, hogy a kondenzátor kapacitása a több kF értéket is elérheti, vagyis akár milliószorosa is lehet a hagyományos kondenzátorokénak.

A szuperkondenzátorok nagy mennyiségű töltést képesek tárolni és rövid idő alatt leadni, ezért nagy teljesítményű elektromotorok indításánál (pl. tank, kamion, vasúti mozdony) is alkalmazhatók.

Ígéretes a felhasználásuk az energiatakarékos járművek esetén is, mivel alkalmasak arra, hogy fékezéskor a mozgási energiát elektromos energia formájában tárolják, majd gyorsításkor mozgási energiává visszaalakítsák. Mindezt környezetszennyezés nélkül.

A korszerű elektronikai készülékek (tévé, videó, számítógép stb.) integrált áramköreiben is nagy számban találhatók miniatűr kondenzátorok. A számítógép memóriájában például egy bit aszerint 1 vagy 0, hogy egy-egy ilyen kondenzátor fel van töltve vagy sem.

Különösen a hagyományos, régebben divatos rádiókészülékekben használják a változtatható kapacitású *forgókondenzátort*. Ennek álló része olyan párhuzamos fémlemezekből áll, melyek közé fokozatosan beforgathatók a tőlük elszigetelt forgórész fémlemezei (*45.2. ábra*). A forgókondenzátor kapacitásának változását a szemben álló lemezfelületek nagyságának változása idézi elő. Általában ilyen forgókondenzátor gombját csavarjuk, amikor a rádiókészüléken más adóállomást keresünk. (Később még visszatérünk ennek magyarázatára.)

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 rendszerint 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 $\frac{\text{kV}}{\text{mm}}$.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Fejtenek-e ki erőt egymásra a feltöltött kondenzátor lemezei?
2. Mit értünk azon, hogy a 43.2. ábra kísérletében a fonálinga „átszállítja" az egyik lemez töltéseit a másik lemezre?
3. Mondhatjuk-e egy adott kondenzátorról, hogy amikor nagyobb feszültséget kapcsolunk rá, akkor *a)* nagyobb a kapacitása; *b)* kisebb a kapacitása; *c)* nagyobb a töltésmennyisége?
4. Hogyan változik egy kondenzátor töltése, kapacitása, feszültsége, térerőssége, energiája, ha
   a) feltöltés után, szigetelőanyag segítségével távolítjuk a lemezeit egymástól?
   b) állandó feszültségű akkumulátorra kapcsolva távolítjuk a lemezeit egymástól?
   Hogyan teljesül a két esetben az energiamegmaradás törvénye?
5. Mivel indokolható, hogy az érintőképernyő egyik típusát kapacitív panelnek hívják?

FELADATOK

1. Egy 100 nF kapacitású kondenzátorra 100 V feszültségű áramforrást kapcsolunk.
   a) Mennyi lesz a kondenzátor lemezeinek töltése?
   b) Mennyi munka árán töltődik fel a kondenzátor?
   c) Mennyi a lemezek területe, ha tudjuk, hogy a lemezek közötti távolság 0,2 mm és $\varepsilon_r = 4$ permittivitású szigetelőanyag van közöttük?
   d) Mennyi a lemezek között a térerősség?
   e) Mekkora erő hat a kondenzátor lemezeire?

MEGOLDÁS:

$C = 100\ \text{nF} = 10^{-7}\ \text{F}$;
$U = 100\ \text{V}$;
$d = 0{,}2\ \text{mm} = 2 \cdot 10^{-4}\ \text{m}$
$\varepsilon_r = 4$

a) $Q = C \cdot U = 10^{-7}\ \text{F} \cdot 100\ \text{V} = 10^{-5}\ \text{C}$. A lemezeknek $\mathbf{10^{-5}\ C}$, illetve $\mathbf{-10^{-5}\ C}$ töltése lesz.

b) A kondenzátor feltöltése munkát igényel az áramforrástól, mivel a kondenzátorra jutott töltések akadályozzák a további töltések odaáramlását. A befektetett munka megegyezik a kondenzátor energiájával:

$$W = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot U = \frac{1}{2} \cdot 10^{-5}\text{C} \cdot 100\ \text{V} = \mathbf{5 \cdot 10^{-4}\ J}.$$

c) $C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$ összefüggésből kifejezhetjük a lemez területét:

$$A = \frac{C \cdot d}{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0} = \frac{10^{-7}\,\mathrm{F} \cdot 2 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{m}}{4 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}\,\frac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{Nm}^2}} = \mathbf{0{,}56\ m^2}.$$

d) A homogén mező térerőssége:

$$E = \frac{U}{d} = \frac{100\,\mathrm{V}}{2 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{m}} = \mathbf{5 \cdot 10^5\ \frac{V}{m}}.$$

e) A lemezek közötti vonzóerő az egyik lemez töltése által létrehozott elektromos mező fejti ki a másik lemez töltésére. Az eredő térerősség fele származik az egyik lemeztől, tehát

$$F = E_1 \cdot Q = \frac{E}{2} \cdot Q = \frac{5}{2} \cdot 10^5\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}} \cdot 10^{-5}\,\mathrm{C} = \mathbf{2{,}5\ N}.$$

2. 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?

3. Egy 20 nF kapacitású kondenzátor egyik lemezét földeljük, a másikra 10^{-8} C töltést viszünk. Mennyi a lemezek közötti feszültség?

4. Mennyi munkával lehetne egy 47 μF kapacitású kondenzátort 50 V feszültségűre feltölteni? Mennyi lenne ekkor a töltése?

5. 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?

6. 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?

7. Egy síkkondenzátor 120 cm^2 területű lemezeit 1,5 mm vastag légréteg szigeteli el egymástól.

a) Határozzuk meg a kondenzátor kapacitását!

b) Mennyi a kondenzátor lemezei közötti térerősség, ha 1000 V feszültséget kapcsolunk rájuk?

c) Legfeljebb mekkora feszültség engedhető meg a lemezek között, ha 2000 $\frac{\mathrm{kV}}{\mathrm{m}}$ térerősség felett átütés következik be?

8. 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?

f) Mennyi a lemezek közötti vonzóerő?

6. Kondenzátorok kapcsolása

A kereskedelmi forgalomban kapható kondenzátorokat általában két adat jellemzi: a kapacitásuk, illetve az a legnagyobb feszültség, amelyre köthetők. Ha két vagy több kondenzátort egy áramkörben összekapcsolunk, akkor ezáltal egy újabb kondenzátort hozunk létre, amelynek tulajdonságait a felhasznált kondenzátorok jellemzőin kívül a kapcsolás módja is befolyásolja.

A párhuzamos és a soros kapcsolás valósítható meg a legegyszerűbben.

***a)* Párhuzamos kapcsolás** (*48.1. ábra*). Mivel az *A* pont és a *B* pont potenciálkülönbsége adja mindegyik kondenzátor feszültségét, a párhuzamosan kapcsolt kondenzátorok feszültsége megegyezik (U). Eltérő kapacitások (C_1, C_2) esetén tehát 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** (*48.2. ábra*). 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 (*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.

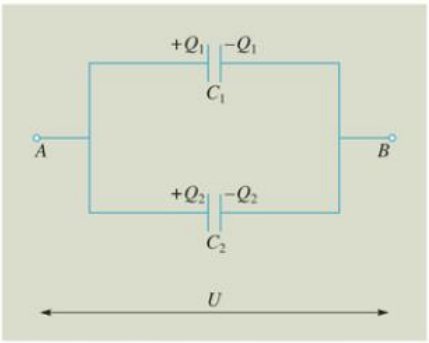
Az eredő kapacitást most is az egyik kivezetésre vitt töltés (Q) és a kivezetések közötti feszültség (U) hányadosa adja:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q}{U_1 + U_2}.$$

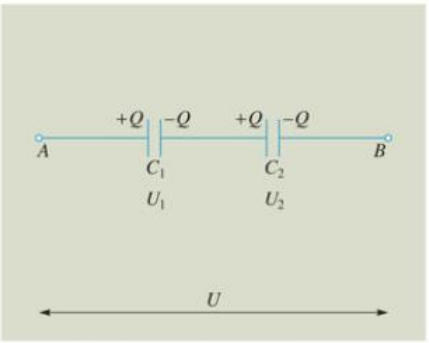
Az egyenlőség mindkét oldalának a reciproka is egyenlő:

$$\frac{1}{C} = \frac{U_1 + U_2}{Q} = \frac{U_1}{Q} + \frac{U_2}{Q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

Az eredő kapacitás reciproka megegyezik a részkapacitások reciprokainak összegével.



48.1. Kondenzátorok párhuzamos kapcsolása



48.2. Kondenzátorok soros kapcsolása

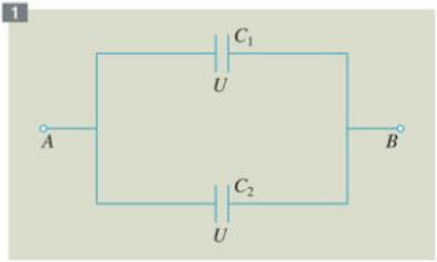
GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Sorosan kapcsolt két kondenzátor egyik végpontját földeljük, a másikra Q töltést viszünk. Miért töltődik fel mindkét kondenzátor Q és $-Q$ töltésekkel?
2. Melyik kondenzátoron lesz több töltés, ha párhuzamosan kapcsoljuk őket?
3. Melyik kondenzátoron lesz nagyobb a feszültség, ha sorosan kapcsoljuk őket?
4. Van két egyenlő kapacitású, 100 V feszültségre töltött kondenzátorunk, de nem ismerjük kivezetéseik polaritását. Milyen eredő feszültséget kaphatunk, ha a kondenzátorokat
   a) párhuzamosan kapcsoljuk? *b)* sorosan kapcsoljuk?

FELADATOK

1. Egy 100 V maximális feszültségű, 33 μF kapacitású és egy 200 V maximális feszültségű, 22 μF kapacitású kondenzátort párhuzamosan kapcsolunk egymáshoz.
   a) Mekkora feszültséget kapcsolhatunk a rendszerre?
   b) Mennyi töltést tud a rendszer tárolni?
   c) Mennyi az eredő kapacitás?

1



MEGOLDÁS:

$C_1 = 33\ \mu F = 3{,}3 \cdot 10^{-5}\ F$

$C_2 = 22\ \mu F = 2{,}2 \cdot 10^{-5}\ F$

a) Mivel mindkét kondenzátorra ugyanaz a feszültség jut, a kisebb feszültségtűréshez kell igazodni:

$$U_{AB} = U_1 = U_2 = \mathbf{100\ V.}$$

b) Az egyes kondenzátorok töltése:

$$Q_1 = C_1 \cdot U_1 = 3{,}3 \cdot 10^{-5}\ F \cdot 10^2\ V = 3{,}3 \cdot 10^{-3}\ C,$$

$$Q_2 = C_2 \cdot U_2 = 2{,}2 \cdot 10^{-5}\ F \cdot 10^2\ V = 2{,}2 \cdot 10^{-3}\ C.$$

A teljes tárolt töltés:

$$Q = Q_1 + Q_2 = 3{,}3 \cdot 10^{-3}\ C + 2{,}2 \cdot 10^{-3}\ C = \mathbf{5{,}5 \cdot 10^{-3}\ C.}$$

c) Az eredő kapacitás:

$$C = C_1 + C_2 = 33\ \mu F + 22\ \mu F = \mathbf{55\ \mu F.}$$

2. A 33 μF kapacitású kondenzátorra 100 V feszültségű áramforrást kötve feltöltjük, majd az áramforrást eltávolítjuk, és a kondenzátorral párhuzamosan kötjük a töltetlen 22 μF-os kondenzátort.
   a) Mennyi lesz a kondenzátorok töltése és feszültsége?
   b) Mennyi a kondenzátorok elektromos energiája kezdetben és az összekapcsolás után?

MEGOLDÁS:

$C_1 = 33\ \mu F = 3{,}3 \cdot 10^{-5}\ F$

$C_2 = 22\ \mu F = 2{,}2 \cdot 10^{-5}\ F$

$U_{01} = 100\ V$

a) A kondenzátorok párhuzamos kapcsolása után a feltöltött kondenzátorról töltések áramlanak a töltetlen kondenzátorra. A pillanatszerű folyamat végén az összekötött fegyverzetek azonos potenciálúvá válnak, vagyis a két kondenzátor feszültsége megegyezik (U). A két kondenzátor összekapcsolása közben töltések nem tudnak kilépni a rendszerből. A töltésmegmaradás törvénye szerint a kezdeti és a végső töltés kapcsolata:

$$Q = Q_{10} = U_{10} \cdot C_1 = 3{,}3 \cdot 10^{-5}\ \text{F} \cdot 100\ \text{V} = 3{,}3 \cdot 10^{-3}\ \text{C}.$$

Az eredő kapacitás:

$$C = C_1 + C_2 = 3{,}3 \cdot 10^{-5}\ \text{F} + 2{,}2 \cdot 10^{-5}\ \text{F} = 5{,}5 \cdot 10^{-5}\ \text{F}.$$

A közös feszültség:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{3{,}3 \cdot 10^{-3}\ \text{C}}{5{,}5 \cdot 1^{-5}\ \text{F}} = \mathbf{60\ V}.$$

A töltések:

$$Q_1 = C_1 \cdot U = 3{,}3 \cdot 10^{-5}\ \text{F} \cdot 60\ \text{V} = \mathbf{1{,}98 \cdot 10^{-3}\ C},$$
$$Q_2 = C_2 \cdot U = 2{,}2 \cdot 10^{-5}\ \text{F} \cdot 60\ \text{V} = \mathbf{1{,}32 \cdot 10^{-3}\ C}.$$

b) A kondenzátorok kezdeti energiája:

$$W_0 = \frac{1}{2} C_1 \cdot U_{01}^2 = \frac{1}{2} \cdot 3{,}3 \cdot 10^{-5}\ \text{F} \cdot (100\ \text{V})^2 = \mathbf{0{,}165\ J}.$$

A kondenzátorok végső energiája:

$$W_1 = \frac{1}{2} C_1 \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot 3{,}3 \cdot 10^{-5}\ \text{F} \cdot (60\ \text{V})^2 = 0{,}0594\ \text{J},$$

$$W_2 = \frac{1}{2} C_2 \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot 2{,}2 \cdot 10^{-5}\ \text{F} \cdot (60\ \text{V})^2 = 0{,}0396\ \text{J}.$$

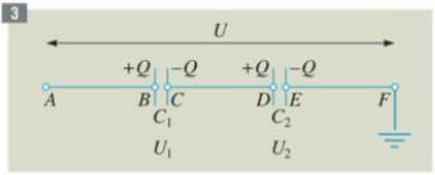
A kondenzátorok végső együttes energiája:

$$W_1 + W_2 = \mathbf{0{,}099\ J}.$$

A vezetőben történő töltésáramlás közben csökken a rendszer energiája (később visszatérünk a magyarázatra).

3. Egy 100 V maximális feszültségű, 33 μF kapacitású és egy 200 V maximális feszültségű, 22 μF kapacitású kondenzátort egymással sorba kötünk, majd a negatív végpontot földeljük.

3



a) Mekkora feszültséget kapcsolhatunk a rendszerre?

b) Mennyi a kondenzátorok töltése?

c) Mennyi az eredő kapacitás?

d) Ábrázoljuk a két végpont között a potenciált!

MEGOLDÁS:

$C_1 = 33\ \mu\text{F} = 3{,}3 \cdot 10^{-5}\ \text{F}$

$C_2 = 22\ \mu\text{F} = 2{,}2 \cdot 10^{-5}\ \text{F}$

a) A két kondenzátor töltése megegyezik: $Q = C_1 \cdot U_1$ és $Q = C_2 \cdot U_2$, ezekből:

$$C_2 \cdot U_2 = C_1 \cdot U_1,$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{3{,}3 \cdot 10^{-5}\ \text{F}}{2{,}2 \cdot 10^{-5}\ \text{F}} = 1{,}5.$$

A kapacitások már meghatározzák a feszültségek arányát. Tegyük fel, hogy az első kondenzátoron maximális feszültséget biztosítunk, tehát $U_1 = 100$ V. Ekkor $U_2 = 1{,}5 \cdot U_1 = 150$ V. Ez megengedhető, de nincs kihasználva a maximális terhelhetőség.

Ha ennél nagyobb feszültséget akarnánk a második kondenzátoron, akkor az elsőn is arányosan nagyobb lenne a feszültség. Ezzel viszont az első kondenzátort túlterhelnénk.

A megoldás tehát:

$$U_1 = 100 \text{ V}, \quad U_2 = 150 \text{ V}, \quad U = U_1 + U_2 = \mathbf{250\ V}.$$

b) A töltés mindegyik kondenzátoron:

$$Q = C_1 \cdot U_1 = 3{,}3 \cdot 10^{-5}\ \text{F} \cdot 100\ \text{V} = \mathbf{3{,}3 \cdot 10^{-3}\ C}.$$

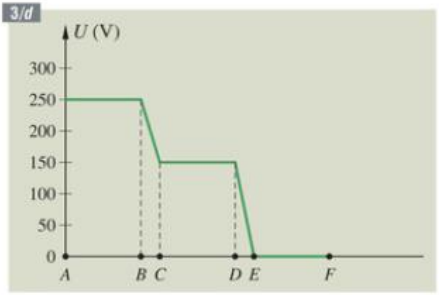
c) Az eredő kapacitás az $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$ összefüggéssel is számolható, de egyszerűbb most a $C = \frac{Q}{U}$ alkalmazása:

$$C = \frac{3{,}3 \cdot 10^{-3}\ \text{C}}{250\ \text{V}} = \mathbf{1{,}32 \cdot 10^{-5}\ F}.$$

d) A grafikon az ábrán látható.

Megjegyzés: A távolságok nem a valóságos méretekhez, hanem a kapcsolási rajzhoz igazodnak.

3/d



4. Határozzuk meg annak a két kondenzátornak a feszültségét, töltését, eredő kapacitását, amelyek 10 µF és 20 µF kapacitásúak, és 100 V külső feszültségen

a) párhuzamosan;

b) sorosan kapcsoltuk őket!

5. Egy 10 µF és 20 µF kapacitású kondenzátort sorba kapcsolás után 100 V feszültséggel feltöltünk. Ezután a rendszer pozitív töltésű végpontját, a 20 µF-os kondenzátor csatlakozását földeljük. Ábrázoljuk a két végpont között a potenciált!

6. A 100 V feszültséggel feltöltött, 50 µF-os kondenzátorhoz párhuzamosan kapcsolunk egy 25 µF-os kondenzátort. Mennyi lesz a kondenzátorok feszültsége és töltése?

7. Mi a kondenzátor szerepe a vaku és a defibrillátor működésében? (Nézzünk utána az interneten!)

8. Tájékozódjunk az interneten, hogy milyen elven működnek a digitális kapacitásmérők!

9. Ajánlott projektmunka: Kondenzátorok a gyakorlatban. (Pl. Milyen területeken, milyen céllal, milyen kondenzátorokat használnak? Lehet-e veszélyes a kondenzátor?)

7





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 a coulomb (C).

Zárt rendszerben a töltések előjeles összege állandó **(töltésmegmaradás törvénye).**

A pontszerű töltések közötti erőhatás egyenesen arányos a töltések nagyságával és fordítottan arányos a távolságuk négyzetével. A **Coulomb-törvény** matematikai formában:

$$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}, \quad \text{ahol légüres térben: } k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}.$$

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 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 **feszültség (*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 sztatikus elektromos mező két pontja közötti **feszültség független a két pont közötti útvonaltól.** Az elektrosztatikus mező **konzervatív.**

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 kondenzátor töltésének (Q) és feszültségének (U) hányadosával értelmezett **kapacitás (*C*)**:

$$C = \frac{Q}{U}, \quad \text{mértékegysége: farad (F)} = \frac{\text{coulomb (C)}}{\text{volt (V)}}.$$

A síkkondenzátor kapacitása függ a lemezek területétől, egymástól mért távolságuktól és a szigetelőanyag minőségétől.

A síkkondenzátor elektromos mezőjének **energiája:**

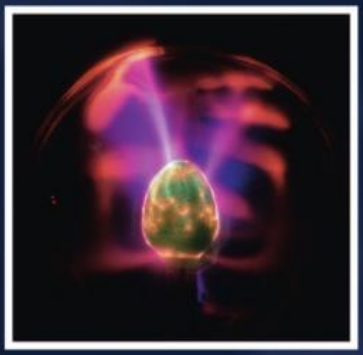
$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2.$$

Kondenzátorok **párhuzamos kapcsolásánál** a feszültségek megegyeznek, és a kapacitások összege adja az eredő kapacitást.

Kondenzátorok **soros kapcsolásánál** a töltések egyeznek meg, és a részkapacitások reciprokainak összege adja az eredő kapacitás reciprokát.

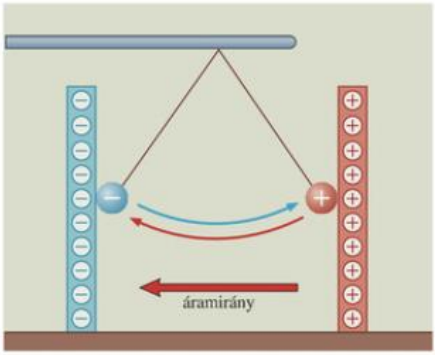
II. fejezet

AZ ELEKTROMOS ÁRAM, VEZETÉSI JELENSÉGEK



1. Egyenáram. Áramköri alaptörvények

1.1. Emlékeztető



54.1. Az áramirány a pozitív töltések mozgási iránya, vagy a negatív töltések mozgásával ellentétes irány

A *54.1. ábrán* bemutatott kísérlet giling-galang játékában az alufólia golyócska a negatív fémlemez töltését a pozitív fémlemezre, a pozitív fémlemez töltését a negatív fémlemezre 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.

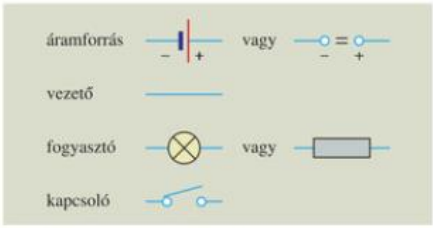
Az elektromos töltéshordozók meghatározott irányú rendezett mozgását **elektromos áramnak** nevezzük, és azt az **áramerősséggel** (I) jellemezzük.

Nagyobb az áramerősség, ha az áramlási keresztmetszeten

- **ugyanannyi idő alatt több az átáramlott részecskék együttes töltése, vagy**
- **ugyanannyi össztöltésű részecske kevesebb idő alatt áramlik át.**

Az elektromos áram **irányán** – egy régi megállapodás alapján – **a pozitív töltéshordozók áramlási irányát** (vagy a negatív töltéshordozók áramlásával ellentétes irányt) értjük.

Állandó elektromos áramot **áramkörrel** hozunk létre, amelynek fő részei: **az áramforrás, a vezető és a fogyasztó.**

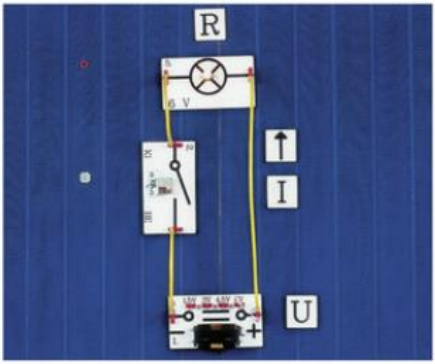


54.2. Egyszerű áramköri elemek

Kövessük az egyszerű áramkörben végbemenő folyamatokat a kölcsönhatások és energiaváltozások szempontjából! (*54.3. ábra*)

Az **áramforrás** negatív és pozitív pólusán lévő többlettöltések 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 (mező-elektron kölcsönhatás). A vezető belsejében tehát – a sztatikus állapottól eltérően – most van elektromos mező. Az áramforrás által létrehozott elektromos mezőt a **feszültséggel** (U) jellemezzük.

Az elektronok a fémrács helyhez kötött ionjaival ütközve lelassulnak, miközben azokat élénkebb rezgésbe hozzák (elektron-rácsion kölcsönhatás).



54.3. Egyszerű áramkör rajzjelekkel és a jellemző mennyiségekkel

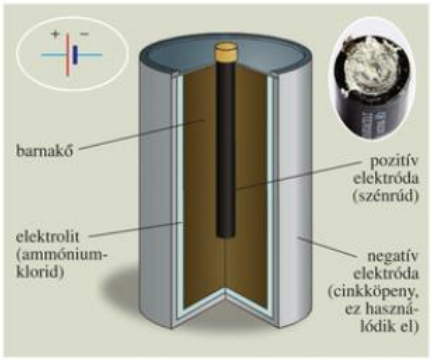
Az élénkebb rácsionrezgéseket tartalmazó, vagyis felmelegedett vezető hőt ad le a környezetének (vezető-környezet kölcsönhatás).

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? 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 (*55.1. ábra*). Elektromos generátoroknál a forgórészt meghajtó gőz vagy víz, napelemeknél az elnyelt fény energiája alakul át elektromos energiává.

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.

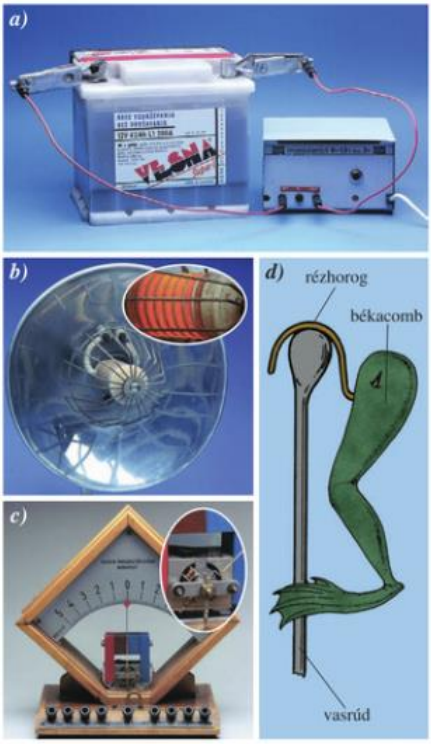


55.1. Hagyományos galvánelem (rúdelem) felépítése, rajzjele és lyukas elem fotója

Az áramkörben meghatározott irányú energiaátalakulás megy végbe:

áramforrás belső energiája ⇒ elektromos mező energiája ⇒ töltéshordozók mozgási energiája ⇒ a vezető anyagában a rácsionok rendezetlen mozgásának energiája (belső energia) ⇒ környezet energiája

Az elektromos áramot általában **hő-, fény-, kémiai, mágneses vagy élettani hatásai** alapján észleljük.



55.2. *Az elektromos áram milyen hatásait mutatják a különböző képek?*

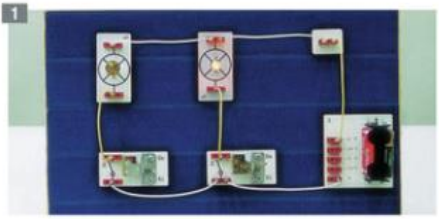
GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Mi a különbség a vezeték és a fogyasztó között? Válhat-e a vezeték is fogyasztóvá?
2. 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?

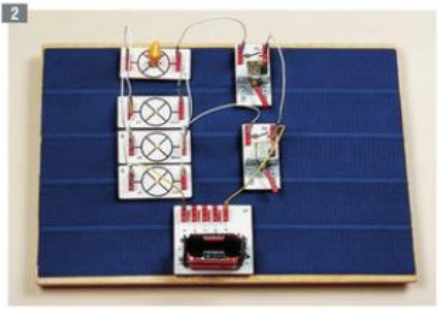
FELADATOK

Építsük meg az alábbi áramköröket iskolai felszerelésből vagy számítógépes áramkörépítő szimulációkkal!

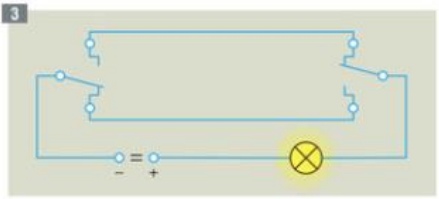
1. Állítsunk össze olyan áramkört, amelyben két izzót két kapcsolóval külön-külön tudunk be- és kikapcsolni (lakás világításának modellje)!


1

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!


2

4. Létesítsünk olyan kapcsolást, amelyben az izzó csak akkor világít, ha az áramkörben lévő
   a) *A* és *B* kapcsolót zárjuk (ÉS-áramkör);
   b) *A* vagy *B* kapcsolót zárjuk (VAGY-áramkör)!
   c) Nézzünk utána, hogy a gyakorlatban hol alkalmaznak ÉS-, illetve VAGY-áramkört!



3

5. Szúrjunk almába vagy burgonyába egy réz- és egy cinklemezt (pl. bádogos műhelyből)!
   a) Mérjük meg voltmérővel a lemezek közötti feszültséget!
   b) Ellenőrizzük, hogy világít-e a gyümölcselemre kapcsolt LED!
   c) Kapcsoljunk sorba két ilyen gyümölcselemet! (Vezetővel összekötjük az egyik réz- és a másik cinklemezét.) Ismételjük meg az előbbi megfigyeléseinket!
   d) Készítsünk kapcsolási rajzokat! (Rajzjelek a tankönyv végén.)
6. Keressünk irodalmat, és készítsünk kiselőadást, számítógépes bemutatót a galvánelemek felfedezéséről (Galvani, Volta)!

1.2. Az áramköri alapmennyiségek. Ohm törvénye



57.1. *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* [amper] 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.

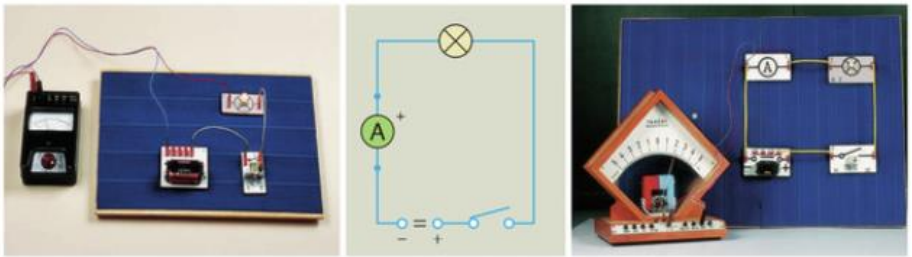
A feszültségmérő vagy **voltmérő** rajzjele:



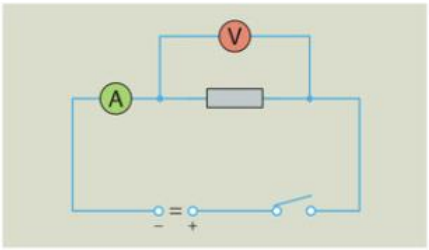
A feszültségmérő a rajta lévő (mondjuk így is: rajta eső) feszültséget mutatja. Egy fogyasztó feszültségének méréséhez tehát úgy kell kapcsolnunk a voltmérőt, hogy a rajta eső feszültség megegyezzen a fogyasztó feszültségével. Ez a két áramköri elem párhuzamos kapcsolásával valósul meg

Az áramerősség- és feszültségmérő műszerek hasonló elvi felépítésűek, legtöbbször mindkét mennyiség mérésére alkalmasak. Az áram hatásai alapján, többségében a mágneses hatás alapján működnek.

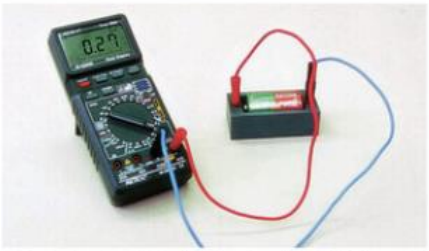
Ma még gyakran találkozunk – az iskolai szemléltetésnél is – mutatóval jelző, úgynevezett **analóg** műszerekkel. Ezeket azonban mindinkább felváltják az egyszerűbb, biztonságosabb mérési lehetőséget nyújtó számkijelzős, más néven



57.2. *Hogyan kapcsoljuk az ampermérőt a fogyasztóhoz?* (Elvi rajz és kísérleti megvalósítások.)



58.1. A fogyasztó feszültségének és áramerősségének egyidejű mérése



58.3. Az 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* [óm] német fizikus ismerte fel a 19. század elején.

Kapcsoljunk változtatható feszültségű áramforrást hosszabb, vékony, fémes vezetőre (pl. kantálhuzalra)! Növeljük a vezetőre jutó feszültséget, illetve mérjük és 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 az origón átmenő egyenesnek adódik. Különböző vezetőkre eltérő meredekségű egyenest kapunk.

Egy vezetőn átfolyó áram erőssége (I) egyenesen arányos a vezető két pontja közötti feszültséggel (U). Ez Ohm törvénye.

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.

$$R = \frac{U}{I}.$$

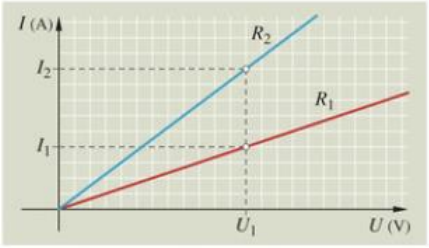
Az ellenállás mértékegysége *Ohm* tiszteletére: 1 Ω (ohm, Ω = görög nagy omega).

1 Ω az ellenállása annak a vezetőnek, amelyen 1 V feszültség hatására 1 A erősségű áram folyik.

$$1\,\Omega = 1\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}}.$$



58.2. *Georg Simon Ohm* (1787–1854); ő vizsgálta először a vezetők ellenállására vonatkozó törvényeket



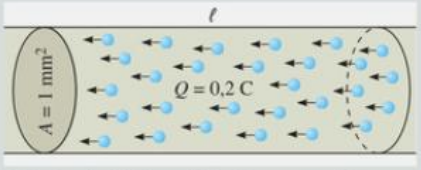
58.4. *Milyen kapcsolat áll fenn a feszültség és az áramerősség között? Melyik ellenállás a nagyobb?*

MEGJEGYZÉSEK

1. Az „ellenállás" szót az elektromosságtanban többféle értelemben is használják. Ellenállásnak nevezzük a vezető töltésáramlást akadályozó tulajdonságát és ennek mennyiségi jellemzőjét (az $R = \frac{U}{I}$ értéket) is. Jelentheti ezeken kívül a fogyasztót, tehát egy alkatrészt, amelyben az elektromos mező energiája fogy, és átalakul másfajta energiává (például a környezet belső energiájává).

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!



59.1. 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:

$$v = \frac{\ell}{t} = \frac{7{,}4 \cdot 10^{-3}\,\text{mm}}{1\ \text{s}} = 7{,}4 \cdot 10^{-3}\,\frac{\text{mm}}{\text{s}}.$$

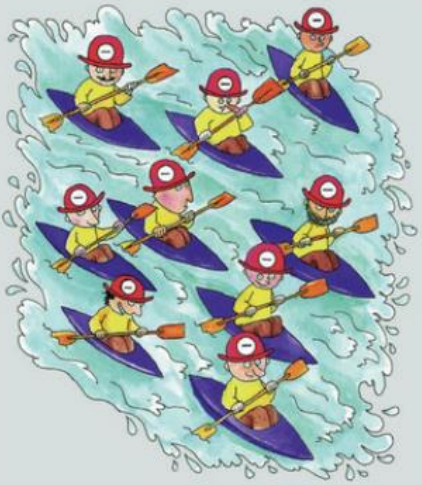
Ha például az izzót a zseblámpateleppel összekötő vezeték 20 cm hosszúságú, akkor az az időtartam, amíg a telep negatív pólusán kilépő elektronok az izzót elérik:

$$t = \frac{s}{v} = \frac{200\ \text{mm}}{7{,}4 \cdot 10^{-3}\,\frac{\text{mm}}{\text{s}}} = 27000\ \text{s} = 7{,}5\ \text{óra}.$$

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?

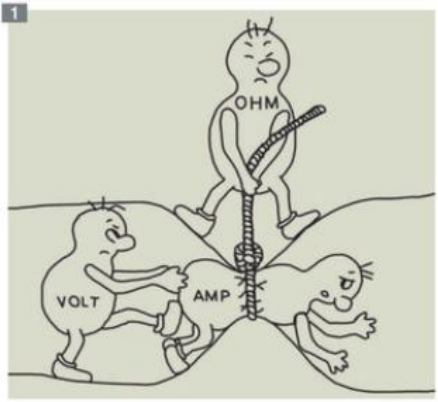
A szabad elektronok az áramkör minden részén, tehát az izzóban is jelen vannak. Nem az elektronoknak kell tehát gyorsan az áramforrástól az izzóhoz érniük, hanem az elektronokat elindító hatásnak, vagyis az elektromos mezőnek. Az utóbbi pedig valóban nagyon gyorsan (fénysebességgel) terjed.



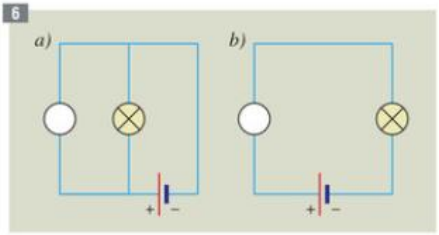
GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Mi a mellékelt karikatúra mondanivalója?
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. Hogyan lehetséges, hogy a több 10 000 V-os távvezetéken álló madár nem sérül meg, amikor a lakások 230 V-os hálózatának érintése halálos áramütést is okozhat?
4. Miért lehet ugyanazt a műszert áramerősség és feszültség mérésére is használni?
5. Nézzünk utána, hogy milyen elv alapján mér ellenállást a digitális multiméter!
6. Állapítsuk meg, hogy ampermérő vagy voltmérő szerepel a kapcsolási rajzokon!

1



6



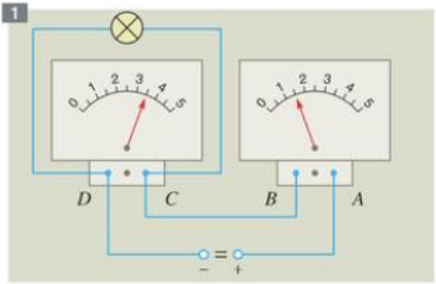
FELADATOK

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 pedig 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: $U = 7$ V; $I = 0{,}15$ A.

A fogyasztó ellenállása: $R = \dfrac{U}{I} = \dfrac{7\text{ V}}{0{,}15\text{ A}} = \mathbf{46{,}7\ \Omega}$.

2. Mennyi az átlagos áramerősség annál a 10^{-3} s ideig tartó villámnál, amelynek keresztmetszetén összesen 50 C töltésű részecske áramlik át?

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?

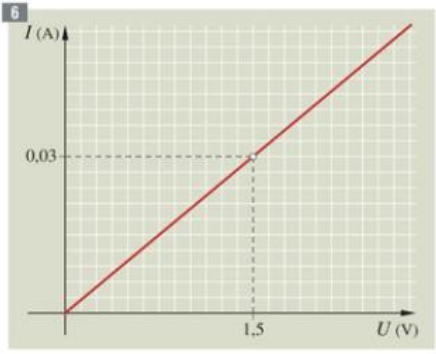
5. Egy villanyvasalón 230 V-os feszültség esetén 2,7 A erősségű áram folyik. Mennyi a fűtőszál ellenállása?

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! (*62.1. 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 a 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



62.1. *Miből látszik, hogy az ellenállás a hosszal egyenesen, a keresztmetszettel fordítottan arányos?*



63.1. Huzal- és rétegellenállások, színkódos ellenállások, tolóellenállás és változtatható ellenállás

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).

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* [kámerling ons] (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 szupravezetés alkalmazását bemutató cikkeket (pl. alkalmazás a CERN-ben)!*

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.

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.

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 $\frac{1}{°C}$. 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 20 °C-os kezdeti ellenálláshoz adják meg (α_{20}).

2. Ohm törvénye változatlan vezetési tulajdonságok mellett teljesül a vezetőre. A gyakorlatban csak akkora feszültségig alkalmazhatjuk, amíg az áram hőhatása miatt az ellenállás változása elhanyagolható mértékű.
3. Ellenálláshuzalokhoz takarékossági megfontolásból nagy fajlagos ellenállású anyagot választanak. Ilyen például a kantál (FeCrAl-ötvözet). Az ellenállás állandóságát igénylő eszközöknél kis hőfokténye zőjű anyagot alkalmaznak, mint például a konstantán (CuNi-ötvözet).

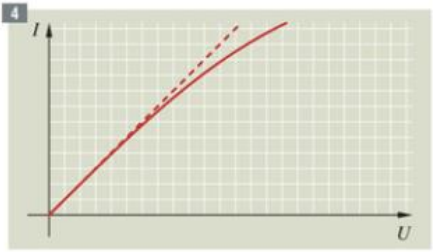
GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. 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 ellenállásértékekből? Az ezüst vagy a konstantán vezeti jobban az elektromos áramot?

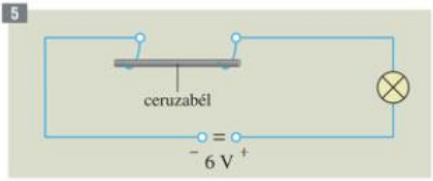
2. Higannyal töltött gumicsövet megnyújtunk. Miért és hogyan változik meg a higany ellenállása?

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?

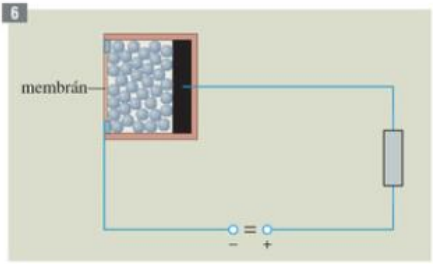


5. Zárjuk egy izzó áramkörét rögzített fémtartókra (például krokodilcsipeszre) fektetett ceruzabélen keresztül! Ha a ceruzabelet ujjunkkal óvatosan megnyomjuk, az izzó fényereje nő. Ha az izzót fejhallgatóra cseréljük, és a ceruzabélre rábeszélünk, a fejhallgatóban hallható a hangunk. Hogyan magyarázzuk ezeket a kísérleti tapasztalatokat?



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!



8. Mivel magyarázzuk a következőket?
   a) A villámvédelmi tájékoztatók a szabadban tartózkodó ember számára összezárt lábbal történő lekuporodást javasolnak.
   b) A négylábú állatok (például a szarvasmarhák) sokszor tömegesen pusztulnak el a közeli villámcsapástól.

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:

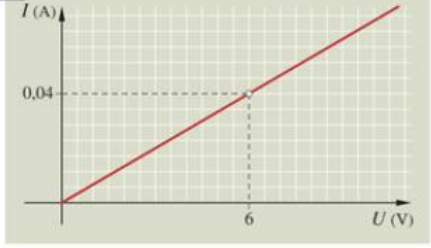
$$1\ \Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} = 10^{-6}\ \Omega \cdot \text{m}!$$

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 meg 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!

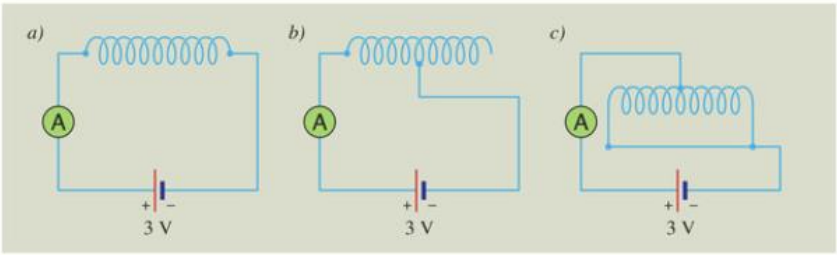
c) Határozzuk meg, hogy a fajlagos ellenállás számított értéke hány %-kal tér el a táblázatban található értéktől!

6. Egy tekercs elkészítéséhez 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:

$$P = I^2 \cdot R.$$



67.1. Az elektromos fogyasztást kilowattórában mérik

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 ezen a feszültségen a teljesítményük (névleges feszültség és teljesítmény). 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:

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3{,}6 \cdot 10^6 \text{ J}.$$



67.2. *Heinrich Lenz* (1804–1865): fontos szerepe volt az energiamegmaradás felismerésében (balra). *James Prescott Joule* (1818–1889): nevét viseli a munka mértékegysége

Ha beállt a fogyasztó állandó hőmérséklete, akkor energiája is változatlan. **Az elektromos mező által végzett munka megegyezik a fogyasztó által leadott hőmennyiséggel.**

$$Q_{hő} = W_{elektromos}.$$

A fogyasztó által leadott hőmennyiség

$$Q_{hő} = U \cdot I \cdot t.$$

Ez a Joule–Lenz-törvény, melyet James Prescott Joule angol és Heinrich Lenz [lenc] német származású orosz fizikus mérések alapján fedezett fel a 19. század közepén. Mindketten fontos szerepet játszottak az energiamegmaradás törvényének felismerésében.

TAKARÉKOSKODÁS AZ ELEKTROMOS ENERGIÁVAL

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 jövő nemzedékét is szolgáljuk.

Hogyan tudjuk mindennapi életünkben takarékosabban használni az elektromos energiát?

Gyakran kis odafigyelés is elég, máskor hosszabb távú gondolkodás szükséges.

1. Az üzemeltetési idő csökkentése

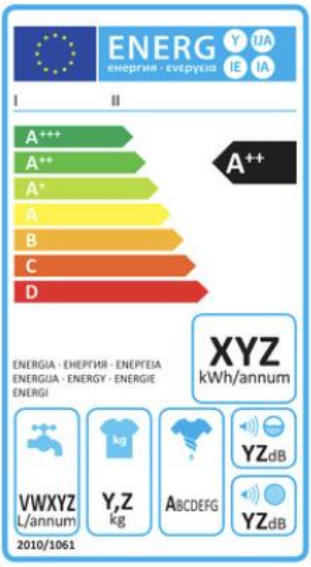
- Különösen fontos a nagy teljesítményű berendezések (villanybojler, elektromos főzőlap) üzemeltetési idejének rövidítése. Bojlernél elérhetjük ezt alacsonyabb hőfok beállításával, 2-3 évenkénti vízkőmentesítéssel és a fürdés helyett a kevesebb vizet igénylő zuhanyozás választásával. A főzőlapot hamarabb 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 (stand-by) 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 ($W_{elektromos}$, amiért fizetünk) csak részben fordítódik a kívánt energiaváltozásra ($\Delta E_{hasznos}$: vízmelegítés, a szoba megvilágítása, az élelmiszerek hűtését biztosító körfolyamat stb.). Érdekünk tehát, hogy a

$$\Delta E_{hasznos} = \eta \cdot W_{elektromos}$$

összefüggésben az $\eta < 1$ hatásfokot minél nagyobbra növeljük.
Bár lehet, hogy egy korszerűbb berendezés drágább, hosszabb távon olcsóbb lehet.
- Hagyományos izzólámpa helyett használjunk energiatakarékos kompakt vagy LED fényforrásokat!
- Vásárláskor lehetőleg a magasabb (A, A^+, A^{++} stb.) 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, az alacsonyabb hőfok beállításával, a jégréteg leolvasztásával, minél hűvösebb étel behelyezésével.
- A teli mosógép, hűtő lényegesen jobb hatásfokú, mint a félig üresen működő gépek.



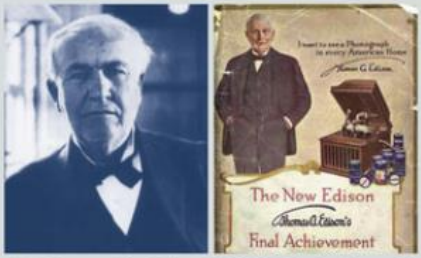
68.1. A mosógépek energiacímkéje

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 Alva 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 valamint az első villamos erőmű).



69.1. *Thomas Alva 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 fénycső esetén a csőben lévő gáz és a cső falát borító festék, LED-lámpánál félvezető anyag bocsátja ki a fényt alacsony hőmérsékleten.



69.2. 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. 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 rev/kWh felirat látható.
   Jól mér-e a villanyóránk?

MEGOLDÁS:

A fogyasztásmérő adatai:

$W = 1\ \text{kWh} = 3{,}6 \cdot 10^6\ \text{J}$;
$N = 375$ fordulat.

A mérésünk adatai:

$P_m = 1600\ \text{W}$;
$t = 1\ \text{min} = 60\ \text{sec}$;
$N_m = 10$ fordulat.

Mérésünk közben az elektromos munka:

$$W_m = P_m \cdot t = 1600\ \text{W} \cdot 60\ \text{s} = 9{,}6 \cdot 10^4\ \text{J}.$$

Ha $W = 3{,}6 \cdot 10^6$ J fogyasztást $N = 375$ fordulat jelez, akkor $W_m = 9{,}6 \cdot 10^4$ J fogyasztást $\frac{9{,}6 \cdot 10^4}{3{,}6 \cdot 10^6} \cdot 375 = 10$ fordulatnak kell jeleznie. Valóban $N_m = 10$ fordulatot mértünk.

A villanyóra tehát **helyesen mér.**

2. Egy hagyományos, 60 W elektromos teljesítményű izzó ára 80 Ft, élettartama 1000 óra. Egy ugyanolyan fényteljesítményt szolgáltató, 12 W elektromos teljesítményű, jó minőségűnek számító kompakt fénycső ára 1500 Ft, élettartama 8000 óra. 1 kWh elektromos energiáért 32 Ft-ot fizetünk. Melyik fényforrás használata jár kevesebb költséggel
   a) az izzólámpa élettartama alatt?
   b) a kompakt fénycső teljes élettartama alatt?

MEGOLDÁS:

Adatok az izzóra (i) és a kompakt fénycsőre (k):

A beszerzés költsége:	$B_i = 80$ Ft	$B_k = 1500$ Ft
Elektromos teljesítmény:	$P_i = 60\ \text{W} = 0{,}06\ \text{kW}$	$P_k = 12\ \text{W} = 0{,}012\ \text{kW}$
Élettartam:	$t_i = 1000$ h	$t_k = 8000$ h

Az elektromos fogyasztás egységára: $E = 32$ Ft/kWh.

a) A teljes költség (K) két részből adódik: a beszerzés (B) és a fogyasztás (F) költségéből.

$$K = B + F = B + E \cdot P \cdot t.$$

Hagyományos izzónál:

$$K_i = B_i + E \cdot P_i \cdot t_i = 80\ \text{Ft} + 32\ \text{Ft/kWh} \cdot 0{,}06\ \text{kW} \cdot 1000\ \text{h} = 80\ \text{Ft} + 1920\ \text{Ft} = 2000\ \text{Ft}.$$

A kompakt fénycsőnél:

$$K_k = B_k + E \cdot P_k \cdot t_i = 1500\ \text{Ft} + 32\ \text{Ft/kWh} \cdot 0{,}012\ \text{kW} \cdot 1000\ \text{h} = 1500\ \text{Ft} + 384\ \text{Ft} = 1884\ \text{Ft}.$$

A kompakt fénycső használatával **116 Ft** a megtakarítás.

b) Mivel $t_k = 8 \cdot t_i$, az elektromos fogyasztást mindkét izzónál 8-szor nagyobb idővel kell számolnunk, tehát az előzőnél 8-szor nagyobb fogyasztási költségek adódnak.

Hagyományos izzóból 8 db használódik el, itt tehát a beszerzés költsége is 8-szorosra nő.

Így a költségek hagyományos izzónál:

$$K_i = 80\ \text{Ft} \cdot 8 + 1920\ \text{Ft} \cdot 8 = 640\ \text{Ft} + 15\,360\ \text{Ft} = 16\,000\ \text{Ft}.$$

Kompakt fénycsőnél:

$$K_k = 1500\ \text{Ft} + 384\ \text{Ft} \cdot 8 = 1500\ \text{Ft} + 3072\ \text{Ft} = 4572\ \text{Ft}.$$

A kompakt fénycsővel **11 428 Ft-ot** takarítunk meg.

3. Egy villanybojler fűtőszálán 230 V feszültség mellett 7,8 A erősségű áram folyik.

a) Mennyi a fűtőszál ellenállása?

b) Mennyi a teljesítmény?

4. 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?

5. Egy gépkocsifényszóró izzójának felirata: 12 V; 45 W.

a) Mennyi az izzó üzemi áramerőssége?

b) Mennyi az üzemi ellenállása?

c) Mennyi energiát igényel az izzó félórás üzemeltetése?

6. Egy 2 kΩ-os rétegellenálláson a megengedett maximális teljesítmény 1 W.

a) Mennyi a megengedhető legnagyobb áramerősség?

b) Legfeljebb mekkora feszültség eshet a rétegellenálláson?

7. Projektfeladat. Digitális háztartási fogyasztásmérővel mérjük meg háztartási berendezések, elektronikai szórakoztató eszközök, töltőberendezések, számítógép fogyasztását! Vizsgáljunk különböző körülményeket, igénybevételeket, a stand-by állapotot is!

7



8. Csoportmunkában elemezzünk villanyszámlákat!

9. Tájékozódás után rendezzünk vitát arról, hogy milyen célra milyen fényforrást érdemes vásárolnunk! Érveinket számításokkal igazoljuk!

10. Keressünk irodalmat és készítsünk kiselőadást 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:**

$$I_1 = I_2 = I.$$

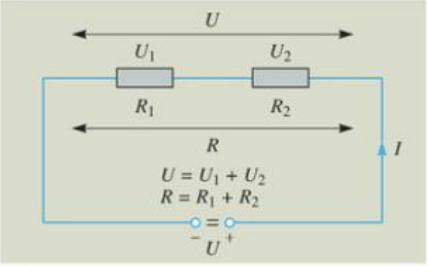
Soros kapcsolásnál **az áramforrás feszültsége egyenlő a fogyasztók feszültségeinek összegével:**

$$U = U_1 + U_2.$$

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

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2}.$$



72.1. 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, a 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. Régebben a karácsonyi fényfüzérek soros kapcsolású kis izzólámpákból álltak. Miért okozhattak ezek sok bosszúságot? Milyen megoldást alkalmaznak napjainkban?
2. Egy áramkörben sorosan kapcsolunk egy A és egy 3-szor nagyobb ellenállású B fogyasztót. Milyen arányban áll egymással a B fogyasztó és az áramforrás feszültsége?
3. Mit mondhatunk soros kapcsolás esetén 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. A fázisceruza egyik végét a dugaszoló aljzat (konnektor) fázis pólusához, a másik végét ujjunkhoz érintve, a fázisceruza világít. Miért nem érzékeljük ilyenkor az áramot, amikor a fázis közvetlen érintése életveszélyes áramütést is okozhat?
7. 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? (Vigyázzunk a kísérlet elvégzésekor! A 230 V-os hálózat érintése életveszélyes!)

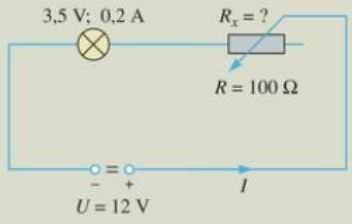
FELADATOK

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:

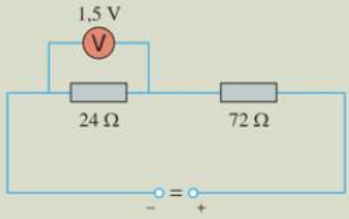
$$P = I^2 \cdot R = (0{,}2\ \text{A})^2 \cdot 100\ \Omega = 4\ \text{W}$$

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!

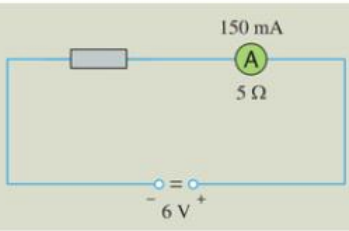
3. Egy áramkörben 24 Ω-os és 72 Ω-os fogyasztókat kapcsoltunk sorba. A kisebb ellenállású fogyasztón 1,5 V-os feszültséget mértünk. Határozzuk meg a másik fogyasztó és az áramforrás feszültségét, valamint az áramkörben folyó áram erősségét!

3



4. Egy 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?

4

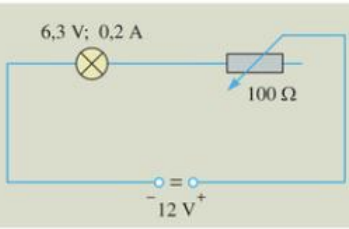


5. Egy izzót, amelyen 6,3 V; 0,2 A felirat olvasható, 12 V-os akkumulátorról üzemeltetünk egy maximálisan 100 ohmos változtatható ellenállás soros kapcsolásával.

a) Milyen értékűre állítsuk be a változtatható ellenállást?

b) Számítsuk ki a kapcsolás hatásfokát (az izzó teljesítményének és az áramforrás teljesítményének arányát)!

5



6. 1 kW teljesítményű, 6 A áramfelvételű fogyasztóhoz 500 m hosszú, 4 mm² keresztmetszetű, $3 \cdot 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m}$ fajlagos ellenállású alumíniumvezeték-pár szállítja az elektromos energiát. Az áramforrás által leadott energia hány százaléka vész kárba a vezetéken?

7. 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!)

8. 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:**

$$U_1 = U_2 = U.$$

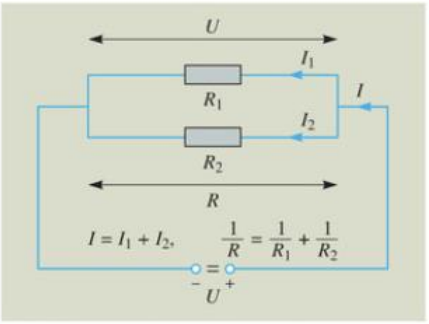
Az áram útját követve az áramkör főága párhuzamos mellékágakra válik szét. A töltésmegmaradás törvényéből következik, hogy **a főág áramerőssége egyenlő a mellékágak áramerősségeinek összegével:**

$$I = I_1 + I_2.$$

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.



75.2. 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!

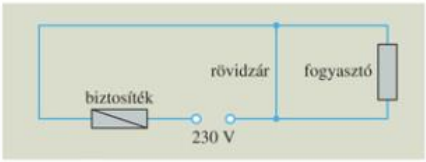
$$\frac{1}{R} = \frac{I_1 + I_2}{U} = \frac{I_1}{U} + \frac{I_2}{U} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Tehát **az eredő ellenállás reciproka megegyezik a részellenállások reciprokainak összegével:**

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$



75.1. A lakás elektromos hálózatának vázlata. *Hogyan kapcsolódnak a fogyasztók?*



76.1. Rövidzár

Egy fogyasztó rövidre zárása azt jelenti, hogy elhanyagolható ellenállású vezető kapcsolódik a fogyasztóval párhuzamosan (például két sérült szigetelésű vezeték érintkezése esetén). A fogyasztó és a **rövidzár** eredő ellenállása közelítően nulla lesz, az áramkörben az áramerősség pedig jelentősen megnő. Ez az áram a rövidzáron halad át, a rövidzárral párhuzamos fogyasztó 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.

MEGJEGYZÉSEK

1. Több fogyasztó párhuzamos kapcsolásakor is megegyeznek a feszültségek, összeadódnak az áramerősségek, valamint az ellenállások reciprokai.
2. 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 feszültség is. Minél nagyobb a voltmérő belső ellenállása a fogyasztó ellenállásához képest, annál kevésbé módosítja az eredeti feszültséget. Az ideális voltmérőt végtelen nagy ellenállásúnak, a rajta átfolyó áramot zérusnak tekintjük.
3. A fogyasztók soros kapcsolása felfogható az egyik fogyasztó hosszának, a párhuzamos kapcsolás pedig a keresztmetszetének növeléseként. Így soros kapcsolásnál az eredő ellenállás nagyobb, párhuzamos kapcsolásnál pedig az eredő ellenállás kisebb bármelyik részellenállásnál.

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. 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?
3. Hogyan lehet két egyforma fűtőspirál felhasználásával háromfokozatú melegítő eszközt készíteni? Milyen arányban állnak az egymást követő fokozatok teljesítményei?
4. A lakás elektromos hálózatában miért a fázisvezetőt szakítja meg a villanykapcsoló és a biztosíték? (Lásd a *75.1. ábrát*!)

FELADATOK

1. 230 V–os hálózaton egyszerre működtetünk egy 26,5 ohm üzemi ellenállású hősugárzót és egy 29,4 ohm üzemi ellenállású vasalót.

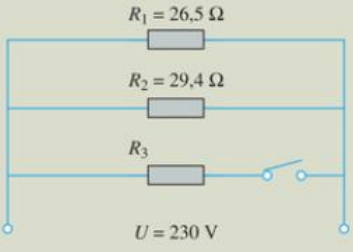
a) Mennyi a fogyasztók áramerőssége és teljesítménye?

b) Mennyi a fogyasztók eredő ellenállása?

c) Mennyi idő alatt mérne a villanyóra 1 kWh fogyasztást?

d) Használhatjuk-e egyidejűleg az 1200 W teljesítményű hajszárítót is, ha a fogyasztásmérőhöz 20 A-es megszakító tartozik?

1



MEGOLDÁS:

$R_1 = 26{,}5\ \Omega$

$R_2 = 29{,}4\ \Omega$

$U = 230$ V

$W = 1$ kWh $= 3{,}6 \cdot 10^6$ J

$P_3 = 1200$ W

$I_m = 20$ A

a) Az első és a második fogyasztó áramerőssége:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{230\ \text{V}}{26{,}5\ \Omega} = \mathbf{8{,}68\ A} \quad \text{és} \quad I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{230\ \text{V}}{29{,}4\ \Omega} = \mathbf{7{,}82\ A.}$$

A fogyasztók teljesítménye:

$$P_1 = U \cdot I_1 = 230\ \text{V} \cdot 8{,}68\ \text{A} = \mathbf{1996{,}4\ W} \quad \text{és} \quad P_2 = U \cdot I_2 = 230\ \text{V} \cdot 7{,}82\ \text{A} = \mathbf{1798{,}2\ W.}$$

b) Az eredő ellenállás az $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ összefüggésből kifejezve:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{26{,}5\ \Omega \cdot 29{,}4\ \Omega}{26{,}5\ \Omega + 29{,}4\ \Omega} = \mathbf{13{,}94\ \Omega.}$$

c) Az összteljesítmény:

$$P = P_1 + P_2 = 1996{,}4\ \text{W} + 1798{,}2\ \text{W} = 3794{,}6\ \text{W}.$$

A $W = P \cdot t$ összefüggés alapján:

$$t = \frac{W}{P} = \frac{3{,}6 \cdot 10^6\ \text{J}}{3794{,}6\ \text{W}} = 948{,}7\ \text{s} = \frac{948{,}7}{60}\ \text{min} = \mathbf{15{,}8\ min.}$$

d) A hajszárító áramerőssége:

$$I_3 = \frac{P_3}{U} = \frac{1200\ \text{W}}{230\ \text{V}} = 5{,}22\ \text{A}.$$

A három párhuzamos ág együttes áramerőssége:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = 8{,}68\ \text{A} + 7{,}82\ \text{A} + 5{,}22\ \text{A} = \mathbf{21{,}72\ A.}$$

Ha bekapcsoljuk a hajszárítót is, az automata lekapcsol, megszakítja az áramkört.

2. Egy 12 V-os áramforrásra párhuzamosan kapcsolunk egy 200 Ω és egy 300 Ω ellenállású fogyasztót. Számítsuk ki

a) az eredő ellenállást,

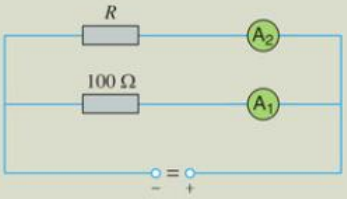
b) a főág áramerősségét,

c) az egyes fogyasztók áramerősségét,

d) a fogyasztók és az áramforrás teljesítményét!

3. Az ábra szerinti kapcsolásban az A_1 ampermérő 40 mA-es, az A_2 ampermérő 6,8 mA-es áramerősséget mutat. Mekkora az ismeretlen R ellenállás? Mekkora teljesítményt ad le az áramforrás? (A műszerek ideálisnak tekinthetők.)

3



4. Egy áramkörben párhuzamosan kapcsoltunk egy 400 ohmos és egy 250 ohmos ellenállást. A nagyobb ellenálláson 60 mA-es áram folyik. Határozzuk meg

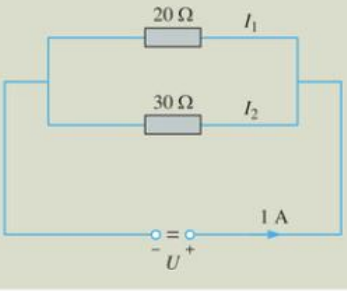
a) a másik fogyasztó és az áramforrás áramerősségét,

b) az áramforrás feszültségét,

c) a fogyasztók és az áramforrás teljesítményét!

5. Számítsuk ki az áramkörben az ismeretlen áramerősségeket és feszültségeket!

5



6. Két ellenállás soros kapcsolásával 200 ohm, párhuzamos kapcsolásával 40 ohm eredő ellenállást kaptunk. Mekkorák az ellenállások külön-külön?

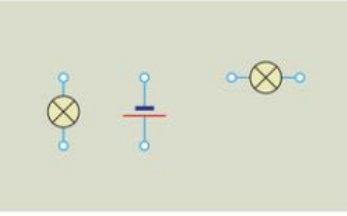
7. Egy szerelőtáblán az ábra szerint rögzítették az áramforrást és az izzókat. Egészítsük ki ezt az elrendezést a füzetünkben olyan áramkörré, hogy az izzók

a) sorosan kapcsolódjanak;

b) párhuzamosan kapcsolódjanak!

Állítsuk össze a kapcsolásokat, és ellenőrizzük a működésüket!

7

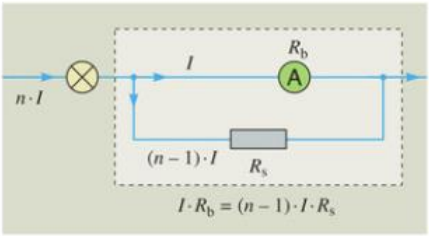


8. Ohmmérő felhasználásával ellenőrizzük a soros és párhuzamos kapcsolású fogyasztók eredő ellenállására bevezetett összefüggések helyességét!

9. Készítsünk kapcsolási rajzot olyan áramkörről, amelyben egy jelzőlámpás kapcsolót tartalmazó hálózati elosztóról (hosszabbítóról) üzemeltetünk három fogyasztót!

10. Csoportmunkában derítsük fel a tanterem vagy egy lakás elektromos hálózatát, és készítsünk róla kapcsolási rajzot!

1.7. Soros és párhuzamos kapcsoláson alapuló eszközök



79.1. Az ampermérő méréshatárának növelése

AZ AMPERMÉRŐ MÉRÉSHATÁRÁNAK KITERJESZTÉSE

Legyen egy árammérő alapműszer méréshatára I. Ez azt jelenti, hogy ha 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 $(n-1) \cdot I$ áramot a fogyasztó után el kell ágaztatnunk az alapműszerrel párhuzamosan kapcsolt úgynevezett sönt-ellenállás (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.

A VOLTMÉRŐ MÉRÉSHATÁRÁNAK KITERJESZTÉSE

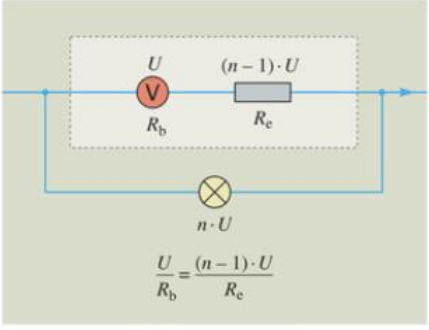
Legyen egy feszültségmérő alapműszer méréshatára U. Ez azt jelenti, hogy a mutató végkitérésénél U feszültség esik a műszer tekercsén. Azt szeretnénk, hogy a mutató akkor térjen ki teljesen, ha a vizsgált fogyasztó feszültsége $n \cdot U$. Ehhez az R_b ellenállású alapműszerrel $R_e = (n-1) \cdot R_b$ 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.

Amikor egy multiméteren megváltoztatjuk a méréshatárt, akkor tulajdonképpen a megfelelő sönt- (I) vagy előtét-ellenállást (U) állítjuk be.

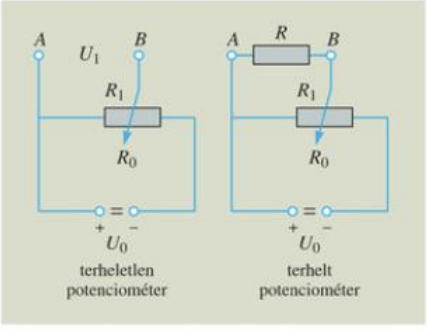
POTENCIOMÉTER (FESZÜLTSÉGOSZTÓ)

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:

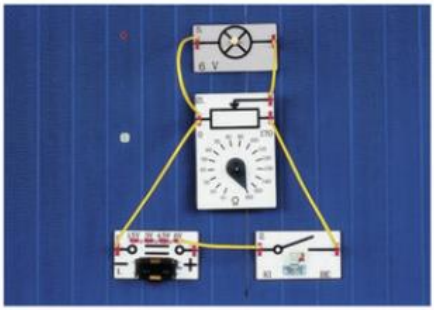
$$U_1 = U_0 \cdot \frac{R_1}{R_0}.$$



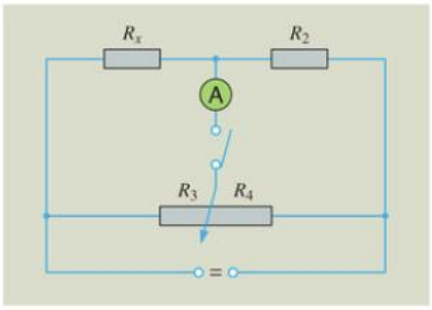
79.2. Voltmérő méréshatárának növelése



79.3. *Hogyan növeljük az U_1 kimeneti feszültségét?*



80.1. Izzó fényerejének szabályozása potenciométerrel



80.2. 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 *80.2. 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

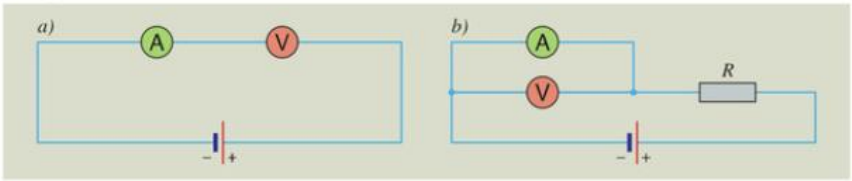
$$\frac{R_x}{R_2} = \frac{R_3}{R_4},$$

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_x 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 műszerről történik, ezért a műszer saját belső ellenállása nem hamisítja meg a mérési eredményt. Így ez a mérési eljárás rendkívül pontos.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

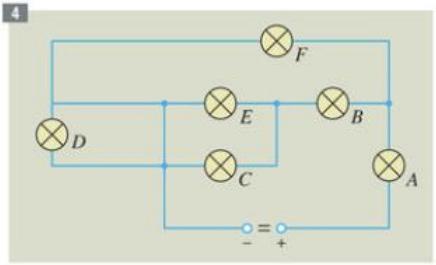
1. Hogyan változik az ampermérő belső ellenállása a méréshatár kiterjesztésekor? (*79.1. ábra*)
2. Hogyan változik a voltmérő belső ellenállása a méréshatár kiterjesztésekor? (*79.2. ábra*)
3. Mit határozhatunk meg az alábbi kapcsolások szerint a voltmérő által jelzett felszültség és az ampermérő által jelzett áramerősség hányadosaként? Mi a *b)* kapcsolásnál az R ellenállás szerepe? Miért nem kell az *a)* áramkörben?



4. Adjuk meg a kapcsolási rajzon szereplő egyforma izzók növekvő fényerősség szerinti sorrendjét!

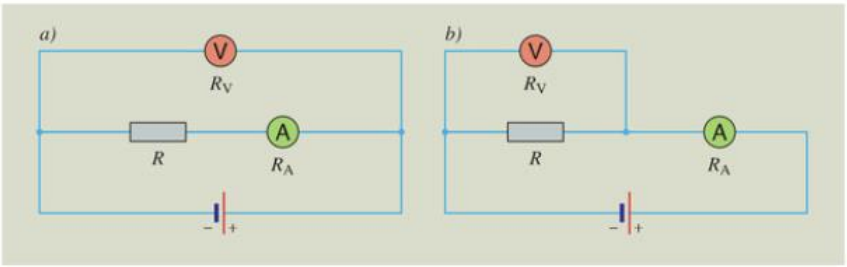
5. A *80.2. ábra* szerinti Wheatstone-hídon zárt kapcsolóállásnál akkor nem folyik áram (kiegyenlített Wheatstone-híd), ha a huzalpotenciométer mutatója az 50. skálabeosztásnál áll. A skála egyenletes beosztása balról jobbra 0-tól 250-ig terjed. Mit mondhatunk az R_x és az R_2 ellenállás értékéről?

4



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 valóban az R ellenálláson folyó áram erősségét mérjük. 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 erősségének 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?

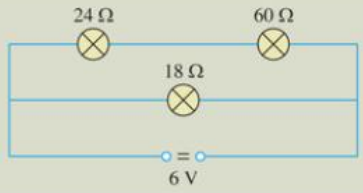
b) Hogyan készíthetünk belőle 10 V méréshatárú voltmérőt?

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

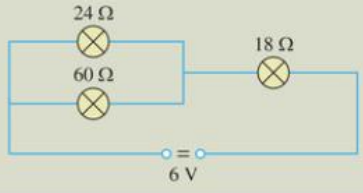


6. Egy 24 Ω, egy 60 Ω és egy 18 Ω ellenállású izzót az ábra szerint egy 6 V-os telepre kapcsoltunk.

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

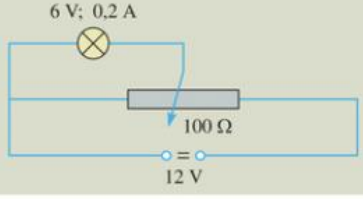


7. Egy 6 V; 0,2 A feliratú izzót 12 V-os áramforrásról 100 ohmos feszültségosztó (potenciométer) segítségével akarunk működtetni.

a) Hová állítsuk a potenciométer csúszkáját?

b) Az áramforrás által leadott energia hány százaléka jut az izzóra?

7



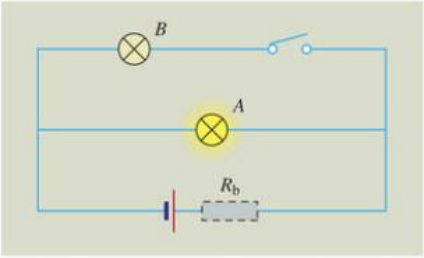
8. 12 V-os adapterrel táplált, 15 egyforma LED-ből álló kis fényfüzérhez tervezünk áramkört. A kapcsolás 5 teljesen megegyező párhuzamos ágat tartalmaz, mindegyikben 3 LED és egy előtét-ellenállás kapcsolódik sorosan. A LED-ek 3,5 V feszültségen, 20 mA áramfelvétel mellett világítanak megfelelően.

a) Készítsünk a tervhez kapcsolási rajzot! (Rajzjelek a tankönyv végén. A LED-en az áramirányt a rajzjelbeli nyíl mutatja.)

b) Mekkora előtét-ellenállásokat kell alkalmazni?

c) Milyen áramerősséget kell az adapternek biztosítania?

1.8. Áramforrások modellezése. Üresjárási feszültség, belső ellenállás



83.1. 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). (*83.1. ábra*)

A jelenség érthetővé válik, ha feltételezzük, hogy az izzókkal sorosan kapcsolódó más ellenállás is van az áramkörben (R_b). 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 (R_b) 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.

$$U_0 = U_k + U_b,$$

ahol

$$U_k = I \cdot R_k \quad \text{és} \quad U_b = I \cdot R_b.$$

Az U_k feszültséget **kapocsfeszültségnek** is nevezzük, mivel az áramforrás kapcsai között is ennyi a feszültség.

Növekvő külső ellenállás esetén nő a kapocsfeszültség is, és közelít az U_0 feszültség értékéhez. A legnagyobb kapocsfeszültséget az áramkör megszakításakor (más szóval az áramforrás üresjárása esetén) érjük el:

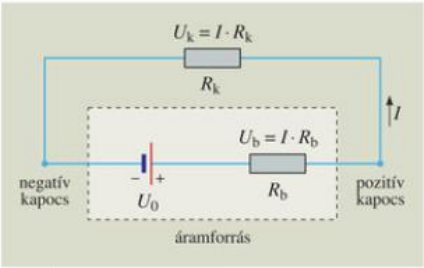
$$U_{k_{max}} = U_0,$$

ezért nevezzük az U_0 feszültséget **üresjárási feszültségnek.** (Ekkor $I = 0$ és $U_b = 0$.)

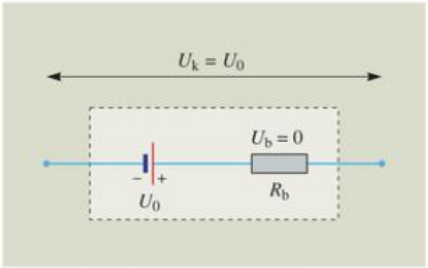
Egy áramkörben az áramerősség kiszámítására vonatkozó összefüggés, más néven

Ohm törvénye teljes áramkörre:

$$I = \frac{U_0}{R_k + R_b}.$$



83.2. Áramforrás modellezése

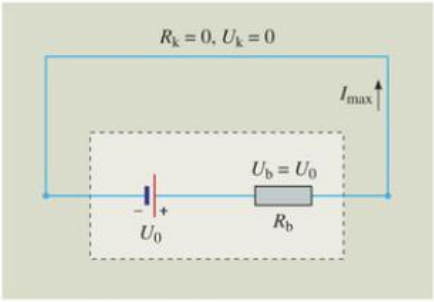


83.3. Terheletlen áramforrás (üresjárás)

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).



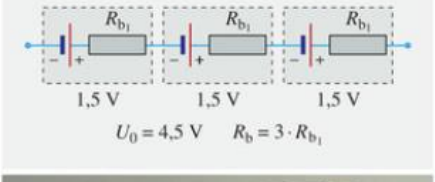
84.1. Rövidre zárt áramforrás

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.

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.

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 mind az üresjárási feszültségeik, mind a belső ellenállásaik összeadódnak. Új elemeknél 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.





84.2. A sorba kapcsolt elemek feszültsége és belső ellenállása is összeadódik

MEGJEGYZÉSEK

1. Az üresjárási feszültség helyett egy vele egyenlő nagyságú (de ellentétes előjelű) fizikai mennyiség, az *elektromotoros erő* is használatos. Az elektromotoros erő valójában nem erő, hanem feszültség jellegű mennyiség. Nem az áramforrás elektromos mezőjének, hanem az azt létrehozó, töltésszétválasztó hatásnak a jellemzője.

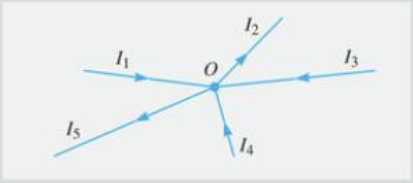
2. Egy áramforrás külső ellenállására jutó, hasznosnak nevezett (valójában csak hasznosítható) teljesítménye függ a külső ellenállás értékétől. Bebizonyítható, hogy egy adott áramforrásból akkor nyerjük ki a legnagyobb hasznos teljesítményt, ha a külső ellenállást a belső ellenállással egyenlő nagyságúnak választjuk. $R_k = R_b$ esetén beszélünk illesztett terhelésről. Például egy hangszórót működtető erősítő is modellezhető meghatározott belső ellenállású áramforrásként. Ha nagy hangszóró teljesítményt (nagy hangerőt) akarunk elérni, az erősítő belső ellenállásával közelítően megegyező ellenállású hangszórót kell alkalmaznunk, vagy úgynevezett illesztő transzformátort kell beiktatnunk.

3. *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:

$$I_1 + I_2 + I_3 + \ldots = 0.$$

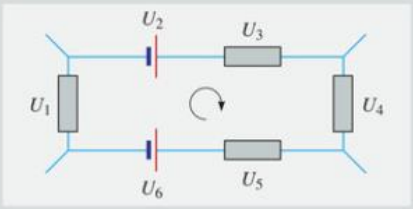
Ez Kirchhoff I. törvénye.



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:

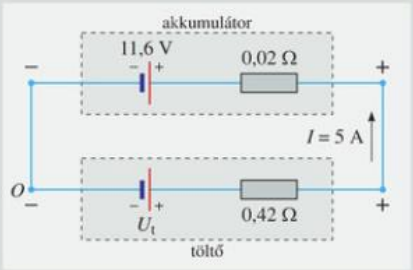
$$U_1 + U_2 + U_3 + \ldots = 0.$$

Ez Kirchhoff II. törvénye.



A két törvény a töltésmegmaradás és az energiamegmaradás kifejezője. A soros és a 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?

FELADATOK

1. 6 V üresjárási feszültségű, 2 ohm belső ellenállású telepre 4 ohm ellenállású fogyasztót kapcsolunk.
   a) Számítsuk ki a fogyasztó áramerősségét, feszültségét, teljesítményét és a kapcsolás hatásfokát!
   b) Az áramforrásra kapcsolt ellenállást 1 Ω-os léptékben 0–6 Ω-ig változtatjuk. Ábrázoljuk az áramerősséget, a kapocsfeszültséget, a fogyasztó teljesítményét és a hatásfokot a külső ellenállás függvényében!

MEGOLDÁS:

$U_0 = 6\ \text{V}$

$R_b = 2\ \Omega,\ R_k = 4\ \Omega$

$I = ?,\ U_k = ?,\ P_k = ?,\ \eta = ?$

a) Az áramerősség:

$$I = \frac{U_0}{R_k + R_b} = \frac{6\ \text{V}}{4\ \Omega + 2\ \Omega} = \mathbf{1\ A.}$$

A kapocsfeszültség:

$$U_k = U_0 - U_b = U_0 - I \cdot R_b = 6\ \text{V} - 1\ \text{A} \cdot 2\ \Omega = \mathbf{4\ V.}$$

A külső teljesítmény:

$$P_k = I \cdot U_k = 1\ \text{A} \cdot 4\ \text{V} = \mathbf{4\ W.}$$

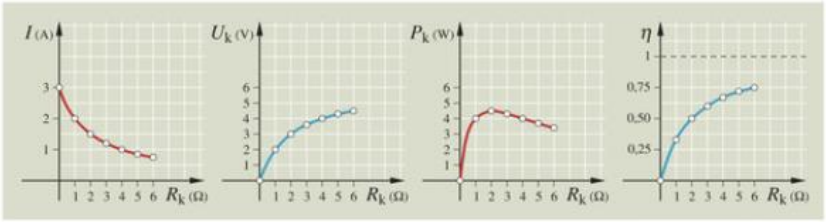
A hatásfok:

$$\eta = \frac{P_k}{P_ö} = \frac{I^2 \cdot R_k}{I^2 \cdot (R_k + R_b)} = \frac{R_k}{R_k + R_b} = \frac{4\ \Omega}{4\ \Omega + 2\ \Omega} = \frac{4}{6} = \mathbf{0{,}67.}$$

b) Az előbbi számításokat a külső ellenállás mindegyik értékére alkalmazva, az alábbi táblázat szerinti eredményeket kapjuk:

R_k (Ω)	0	1	2	3	4	5	6
I (A)	3	2	1,5	1,2	1	0,86	0,75
U_k (V)	0	2	3	3,6	5	4,28	4,50
P_k (W)	0	4	4,5	4,32	4	3,68	3,38
η	0	0,33	0,5	0,6	0,67	0,71	0,75

A grafikonok:



Értelmezzük fizikai ismereteink alapján a függvények menetét!

2. Egy ólomakkumulátor 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.

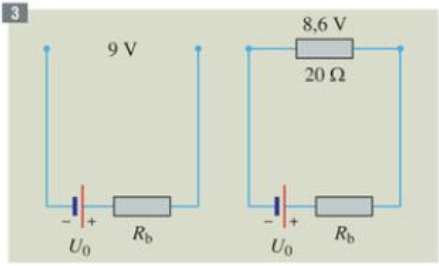
a) Számítsuk ki a 20 ohmos terhelő ellenálláson folyó áram erősségét!

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. A 4,5 V-os üresjárási feszültségű zseblámpatelephez 3,5 V; 0,2 A feliratú zseblámpaizzót használunk.

a) Mennyi az izzó ellenállása? (Vegyük ezt feladatunkban állandónak!)

b) Mekkora áram folyik az izzón, és mennyi lesz rajta a feszültség, ha 0,1 ohm belső ellenállású új zseblámpatelepet használunk?

c) A zseblámpatelep elhasználódása során az üresjárási feszültsége közelítéssel állandónak vehető, belső ellenállása viszont jelentősen változik. Milyen belsőellenállás-értéknél biztosítja a zseblámpatelep az izzó számára a feltüntetett (névleges) feszültséget és áramerősséget?

5. Milyen ellenállású fogyasztót kapcsoljunk a 12 V üresjárási feszültségű és 2 ohm belső ellenállású áramforrásunkra, ha a fogyasztón az igényelt teljesítmény

a) 16 W; *b)* 18 W; *c)* 20 W?

Értelmezzük az eredményeket az 1. kidolgozott feladat P_k–R_k grafikonja alapján!

6. Egy alkáli elem („tartós elem") üresjárási feszültsége 1,5 V, belső ellenállása 0,5 ohm. A nikkel-metálhidrid (NiMH) akkumulátor 1 cellájának üresjárási feszültsége 1,2 V, belső ellenállása 0,02 ohm.

a) Milyen áramerősségnél biztosít a NiMH akkumulátorcella nagyobb kapocsfeszültséget, mint egy alkáli elem?

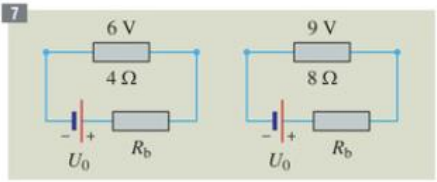
b) Milyen maximális áramot képes szolgáltatni a két áramforrás?

7. 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?

7

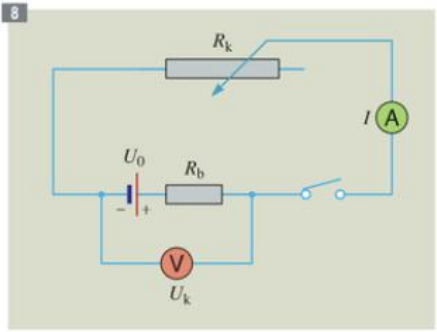


8. 4,5 V-os zseblámpatelep és 10-20 Ω-os, néhány amper erősségű árammal terhelhető, változtatható ellenállás felhasználásával állítsuk össze a kapcsolási rajz szerinti áramkört!

a) Változtassuk az ellenállás csúszkájának állásával az áramerősséget! Foglaljuk táblázatba az U_k kapocsfeszültség és az I áramerősség összetartozó értékeit! Készítsük el az $U_k - I$ grafikont! A telep lemerülésének elkerüléséhez csak a műszerek leolvasásának idejére zárjuk a kapcsolót!

b) Határozzuk meg az áramforrás üresjárási feszültségét és belső ellenállását!

8



9. Egy telep kapcsain 0,5 A-es terhelésnél 6 V, 3 A-es terhelésnél pedig 5 V feszültséget mértünk.

a) Határozzuk meg a telep üresjárási feszültségét és belső ellenállását!

b) Ábrázoljuk a kapocsfeszültséget az áramerősség függvényében!

c) Hol metszi a grafikon a kapocsfeszültség ill. áramerősség tengelyt?

d) Mennyi lenne a kapocsfeszültség 10 A-es ill. 20 A-es terhelésnél?

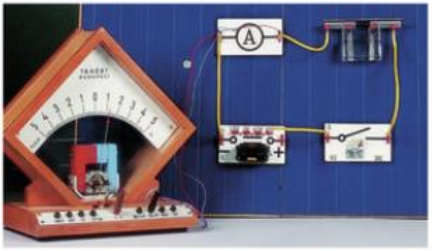
10. Tervezzünk olyan mérést, amellyel igazolni vagy cáfolni tudjuk, hogy érdemes az olcsó, hagyományos elemek helyett a reklámokban ajánlott drága, tartós elemeket vásárolni! Rendezzünk vitát a kérdésről!

10



2. Vezetési jelenségek

2.1. Elektromos áram folyadékokban



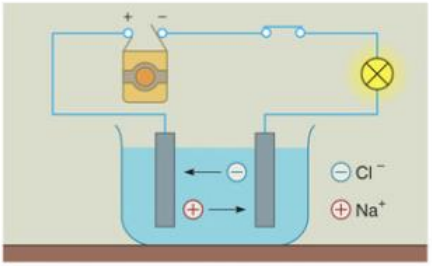
89.1. Az elektrolitok vezetik az elektromos áramot

Ha két szénrudat vagy két rézlemezt folyadékba merítünk, és a folyadékra néhány voltos feszültséget kapcsolunk, áramerősség-mérővel vagy érzékeny izzóval megfigyelhetjük, hogy a folyadékok között 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). A fémektől eltérően az elektrolitokban nem az elektronok, hanem **a pozitív és negatív ionok a töltéshordozók.** (Pl. a konyhasó vizes oldatában a Na^+- és a Cl^--ionok.)

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.**



89.2. A konyhasó vizes oldatának áramvezetése

Az elektrolízis fontos szerepet játszik a technikában, például esztétikai célú vagy korróziógátló fémbevonatok készítésénél (galvanizálás).

Az elektrolízis törvényeinek felfedezése *Michael Faraday* angol fizikus 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 az 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.

Kémiából tanultuk, hogy különböző anyagú elektródok elektrolitba merülésekor az elektródok között elektromos feszültség jön létre. Az ilyen áramforrást **galvánelemnek** nevezték el.

A galvánelem keletkezésének alapja az, 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 határfelülete mentén ellentétes előjelű feltöltődést eredményez. A töltésszétválasztás a létrejövő elektromos mező erőhatása ellenében történik. A **kémiai energia** csökkenése fedezi a felépülő elektromos mező energiáját. A szétválasztott töltések kiegyenlítődése csak a galvánelem kapcsait összekötő vezetőn keresztül valósulhat meg.

Az **akkumulátor** újratölthető galvánelem. Feltöltése olyan elektrolízis, melynek során

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.** Az akkumulátorok kapacitásán a kinyerhető töltésmennyiséget értik, amit amperórában (Ah) adnak meg.



90.1. *Hányféle akkumulátort használunk rendszeresen?*

OLVASMÁNY

3D

KÉMIAI ÁRAMFORRÁSOK

Az olyan áramforrásokat, amelyekben kémiai energia csökkenése árán töltésszétválasztás történik és ezáltal elektromos energia keletkezik, **kémiai áramforrásoknak** nevezzük.

1. Nem újratölthető elem

Az elsőként felfedezett áramforrás a nem újratölthető galvánelem volt, amit primer cellának, egyszer használatosnak vagy egyszerűen galvánelemnek, elemnek hívunk. Nevét *Luigi Galvani* [galváni] (1737–1798) olasz anatómiaprofesszortól kapta, aki híressé vált békacombkísérletében először figyelt meg galvánelemmel összefüggő jelenséget (*55.2. ábra*). Galvani még tévesen állati elektromosságra gondolt. Valójában a békacomb testnedvével mint elektrolittal érintkező rézhorog és vasrúd galvánelemet képezett, és ennek áramától rándult össze a békacomb. A helyes magyarázatot *Alessandro Volta* olasz fizikus adta meg, aki egyben az első, tartósan áramot szolgáltató galvánelemet is megalkotta (1800).

Az elektródok és az elektrolit anyagától függően sokféle galvánelem készíthető. 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 a negatív elektróda cinkhenger, a pozitív elektróda szénrúd. Az elektrolit nedvszívó anyagba itatott ammónium-klorid oldat. A kiszáradástól bitumenszigetelés védi. (*55.1. ábra*)

A hagyományos szárazelem használaton kívül is lemerül (önkisülés). A kilyukadó cinkhengeren átszivárgó elektrolit károsíthatja a készüléket és a környezetet.

A szárazelemeknek többféle továbbfejlesztett változata is létezik, ami sajnálatosan az árakban is megjelenik. Elterjedtek a köznyelvben „tartós elemként" ismert **alkáli elemek.** Cellafeszültségük a hagyományos szárazelemmel megegyezően 1,5 V, de kapacitásuk akár háromszorosa is lehet, tárolási veszteségük pedig csupán évi 7%. Már nagyobb áramfelvételű eszközökhöz (pl. vaku, elektronikus fényképezőgép) is használhatók.

A legkorszerűbbnek ma a **lítium-mangán-dioxid elemek** számítanak. Cellafeszültségük 3 V, nagy energiasűrűségűek, és csak évi 2% kapacitásveszteségük van.

2. Akkumulátor

3D

Az akkumulátorra az újratölthető elem vagy szekunder cella elnevezés is használatos.

Az **ólomakkumulátor** (*55.2. ábra*) 2 V névleges feszültségű cellákból áll. Higított kénsavba merülő elektródái feltöltött állapotban ólom és ólom-dioxid, 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 ólomakkumulátorok régen több figyelmet, gondozást igényeltek (feltöltés savval, árammal, elektrolitszint-ellenőrzés, pótlás desztillált vízzel, töltés közben fejlődő durranógáz miatt kár- és balesetveszély). Az utóbbi évtizedek fejlesztései (pl. új szerkezeti megoldások, ólomötvözetek alkalmazása) nagyobb

indítóteljesítményt és energiatárolást eredményeztek, egyúttal zárt, gondozásmentes ólomakkumulátorok forgalmazását is lehetővé tették. Ezeknél az akkumulátoroknál minimális a vízfogyasztás és az önkisülés. Így gépjárműben rendeltetésszerű üzemeltetés mellett nem igényelnek karbantartást.



91.1. Gondozásmentes ólomakkumulátor beszerelése

Ha valamilyen okból (pl. álló járműben égve hagyott lámpák miatt) mégis tölteni kellene az akkumulátort, akkor két fontos szempontot vegyünk figyelembe. Az akkumulátor töltőárama legfeljebb a névleges tárolóképesség 10%-a lehet. Pl. 54 Ah kapacitású akkumulátor legfeljebb 5,4 A árammal tölthető. Másrészt 14,4 V feletti kapocsfeszültségnél erőteljes gázfejlődés indul, ezért a töltést le kell állítani. (A mai autók generátorainak integrált áramkörös, túlfeszültség-védelemmel is ellátott szabályozói automatikusan megoldják ezt a feladatot.)

Az akkumulátorok fejlesztése elsősorban arra irányul, hogy minél kisebb méretekben minél nagyobb kapacitást érjenek el. Ilyen vonatkozásban előrelépést jelentett a **nikkel-metálhidrid** (NiMH) **akkumulátor,** amelyet többek között fotózáskor, laptopokban, mobiltelefonokban, hordozható szerszámgépekben, mérőkészülékekben használnak.

A NiMH akkumulátor 1,2 V-os cellafeszültsége kevesebb a hagyományos elemekénél, de a kb. 10-szer kisebb belső ellenállás miatt ez az érték alig változik. Az elemek kapocsfeszültsége viszont terheléskor már új állapotban is kisebb 1,5 V-nál, használat során pedig még inkább lecsökken. Így a NiMH akkumulátor alkalmas a ceruzaelem helyettesítésére. A hosszú élettartam érdekében ne süssük ki 1 V cellafeszültség alá! Lassan, 10 óránál tovább töltsük fel az 1,5 V-os végfeszültségre! Csak megegyező típusú és töltöttségű cellákat kapcsoljunk sorba!

A mai legkorszerűbb típusnak a **litiumion-akkumulátor** tekinthető. Nagy energiasűrűség, hosszú élettartam, a legkisebb önkisülés, gyors tölthetőség jellemzi, és a töltés részleges lemerülés esetén is végezhető. Ugyanakkor a cellafeszültsége is a legnagyobb: 3,7 V. Így a legtöbb modern mobiltelefon egy cellával táplálható. A mobiltelefonoktól, egyéb hordozható elektronikus eszközökön át az elektromos autókig széles körben használják. Például egy feltöltéssel az elektromos autók mintegy 100 km-es úton történő üzemeltetésére is alkalmas lehet.



91.2. Autó Li-ion akkumulátorának töltése

A Li-ion akkumulátorokba védő áramköröket építenek túltöltés, túlnyomás, túlmelegedés, alulmerülés ellen. A Li-ionos mobil akku egy óra alatt eléri a teljes töltöttség 70%-át, ami már elegendő a biztonságos működéshez. A hiányzó 30%-hoz még kb. kétórás töltés kellene. Nincs értelme tehát az egész éjszakai töltésnek. A teljes (4,2 V körüli) töltöttség az élettartamot is csökkenti.

A sokféle akkumulátor eltérő tulajdonsága miatt balesetvédelmi és takarékossági (élettartam-növelési) szempontból is indokolt, hogy mindig az akkumulátor saját töltőjét használjuk, és használat előtt a készülékhez mellékelt tájékoztatót is tanulmányozzuk!

Ha egy készülékhez (pl. digitális fényképezőgéphez) elem és akkumulátor egyaránt alkalmazható, hosszabb távon akkumulátort érdemes vásárolni. Az akkumulátor a töltővel együtt ugyan nagyobb egyszeri kiadást jelent, de az elem csak egyszeri lemerülésig használható, a korszerű akkumulátort pedig akár 1000-szer is újratölthetjük. Az akkumulátor többletköltsége már néhány újratöltés után megtérül, teljes élettartama alatt pedig a környezetvédelmi előnye is jelentősnek mondható.

Bár a hasonló külső megjelenés és a gyakran hasonló elnevezés (pl. alkáli elem és alkáli akkumulátor vagy litiumelem és litiumion akkumulátor) zavaró lehet, az akkumulátor és az egyszer használatos elem megkülönböztethető. Az akkumulátorokon mindig van utalás az újratölthetőségre, és a kapacitás is fel van tüntetve (pl. AKKU, Rechargeable, 2000 mAh), az elemeken pedig figyelmeztetés, hogy azok töltőre kapcsolása veszélyes.

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).

3D

3. Üzemanyagcella

Az **üzemanyagcellák** (tüzelőanyag-cellák) is a kémiai áramforrások közé tartoznak. Amíg azonban lemerülésük után az elemek használhatatlanokká válnak, az akkumulátorokat pedig legalább 1 órányi időtartamig fel kell tölteni, az üzemanyagcellák mindaddig állítják elő az elektromos energiát, amíg üzemanyagot biztosítunk számukra.

Az üzemanyagcella eredeti típusánál lényegében a vízbontás fordítottja játszódik le megfelelő katalizátorok alkalmazása mellett: hidrogénből és oxigénből víz, hő és elektromos energia jön létre (*William Grove*, 1839). A hidrogén üzemanyagcellákat már évtizedek óta alkalmazzák az űrkutatásban és a hadiiparban. Szélesebb körű elterjedésüket a hidrogén biztonságos tárolása és a magasabb költség akadályozta. A fejlesztések eredményeként ma már a hagyományos járművekkel versenyképes, nulla károsanyag-kibocsátású üzemanyagcellás járművek sorozatgyártása is napirenden van.

Nagy reményeket fűznek a magyar származású, Amerikában élő Nobel-díjas kémikus, Oláh György által felfedezett **direkt metanolos** üzemanyagcellákhoz. Ezekben metanol és oxigén felhasználásával víz, szén-dioxid, hő és elektromos energia keletkezik. A folyékony metanol előnyösebb, biztonságosabb a hidrogénnél, emellett szén-dioxidból is előállítható. Így a metanol mint reverzibilis energiahordozó alkalmazása még az üvegházhatás csökkentéséhez is hozzájárulhat.

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?

FELADATOK

1. Réz-szulfát- ($CuSO_4$) oldaton át 10 percig 20 mA erősségű áramot vezetünk.
   a) Melyik elektródon válik ki a réz?
   b) Hány két vegyértékű rézion válik ki az elektródon?
   c) Mennyi a kiváló réz tömege? (A réz moláris tömege 63,5 $\frac{g}{mol}$.)
2. Milyen tömegű ezüstbevonat keletkezik a katódon, ha ezüst-nitrát- ($AgNO_3$) oldatot fél órán át 50 mA erősségű árammal elektrolizálunk? (Használjunk táblázatot!)
3. Egy zseblámpatelep kb. 10 kJ elektromos energia leadására képes. A galvánelemben tárolt vagy a hálózati elektromos energia olcsóbb? (Nézzünk utána az áraknak!)
4. Részlet egy 2013-as újságcikkből:

   „Előadásában a Magyar Szolárszövetség elnöke kifejtette: 2050-re a járművek 15 százaléka használ majd fosszilis és bioüzemanyagot, 15-15 százalékuk lesz hibrid vagy hidrogénmeghajtású, míg az elektromos vagy plugin hibrid autók aránya megközelíti a 60 százalékot. […] Hangsúlyozta, az uniós törekvések nem kizárólag környezetvédelmi okokra vezethetők vissza, hanem gazdaságiakra is."

   Projektmunkában dolgozzuk fel a gépjárműfejlesztés lehetőségeit, eredményeit az egyes országokban, köztük hazánkban! Alakítsunk ki véleményt a fenti idézet megállapításairól!

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 között létrejövő 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. Ebből adódóan a gázok mindig tartalmaznak kevés töltéshordozót (ionokat és elektronokat). Gyengébb elektromos mezők hatására ezek a töltéshordozók áramlani kezdenek, de a levegőben és más gázokban is általában csak elhanyagolható erősségű, látható következményekkel nem járó áram folyik.

A gázok áramvezetése akkor válik jelentőssé, ha elegendően nagy 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.

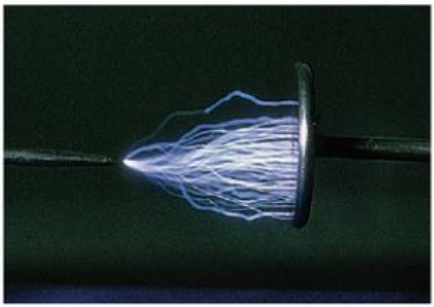
A kellően nagy sebességre felgyorsított töltéshordozók a semleges atomokkal, molekulákkal történő ütközéskor azokat ionizálják, a kisebb energiájú ütközések során pedig a gázrészecskék elektronjait magasabb energiájú (gerjesztett) állapotba hozzák. A gerjesztett elektronok fénykibocsátással kerülnek 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



93.1. A szikrainduktor elektródái közötti szikrakisülésben is elektromos áram folyik. *Hol a legnagyobb a térerősség?*



93.2. Kisülési csősorozat: a csövekben balról jobbra csökken a nyomás



94.1. Régebben sokfelé alkalmaztak neonfeliratokat



94.3. Plazmagömb

töltött részecskéi főként az erővonalak mentén haladva kényszerítik fénykibocsátásra a molekulákat.

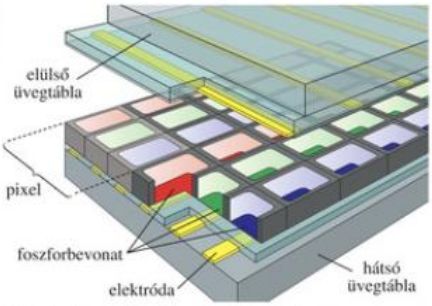
Az elektromos mező a gömbön kívül is folytatódik, ezért világít – meglepő módon – a gömbhöz közelített fénycső vagy kompakt fénycső. A gömbhöz érintett ujjunk, mint megosztott vezető, erősíti a helyi elektromos mezőt, így ujjunk felé irányul, ezáltal felerősödik a fényfonal.

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.

3D



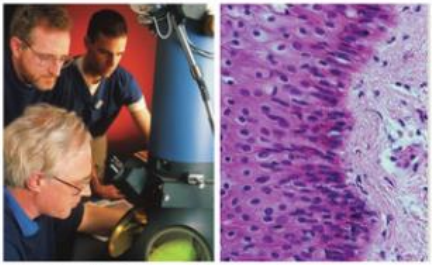
94.2. A plazmatévé képernyőjének szerkezete



94.4. Plazmatévé és a képernyő egy részlete



95.1. Szívvizsgálat EKG-készülékkel

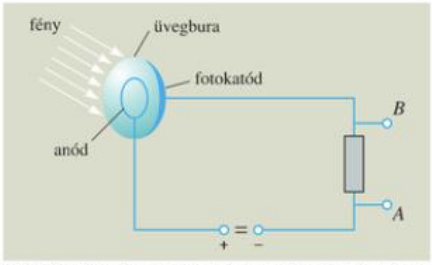


95.2. Nagyítás elektronmikroszkóppal

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.

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.



95.3. Fotocella elvi ábrája. *Hogyan változik a feszültség (U_{AB}) a megvilágítás hatására?*

3D

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. Az elektromos áram hatása az emberi szervezetre. Balesetvédelmi szabályok

Az emberi szervezet tömegének több mint 50%-a ionokat tartalmazó vizes oldat, vagyis elektrolit, ezért a test vezeti az elektromos áramot. **Az élő szervezeten áthaladó áramnak a vegyi, hő- és mágneses hatáson kívül az idegrendszert bénító, szív- és izomműködést befolyásoló élettani hatása is van.** Ezek a hatások hasznosak vagy károsak is lehetnek az ember számára.

Az **orvosi terápiában** számos olyan eljárás ismert, amelynél az elektromos áram különböző hatásait gyógyítási céllal alkalmazzák. Különböző mozgásszervi, sérüléses vagy neuralgiás betegségeknél elektroterápiás kezelésekkel többek között gyulladáscsökkentést, fájdalomcsillapítást, keringésfokozódást tudnak elérni. Galvánkezelésnél például gyenge (mA erősségű) egyenárammal a bőrön át gyógyszert juttatnak a beteg testrészbe. Kisfrekvenciás áram izomingerlő hatását használják ki a bénult, legyengült izomcsoportok tornáztatására. Nagyfrekvencián (100 kHz felett) több amper erősségű áram hőhatásával gyógyítják a beteg testrészt. A pacemaker (szívritmusszabályozó) külső elektromos impulzusokkal vezérli a nem megfelelő működésű szívizom összehúzódását. A defibrillátor elektromos impulzussal szünteti meg az életveszélyes szívkamralebegést.

Elektromos baleseteknél az emberi testen véletlenszerűen áthaladó elektromos áram ugyanakkor súlyos, életveszélyes károsodásokkal is járhat. Az egyenáram vegyi hatása a vérben, szövetnedvekben gázbuborék vagy vérrög képződését idézheti elő. A hőhatás égési sérüléseket, fehérje-kicsapódást okozhat. Áramütéseknél az életveszélyt rendszerint az okozza, hogy az áram izomgörcsöt, és ezáltal szív- vagy légzésbénulást idéz elő. Mivel az egyes izomcsoportokat az áram be-, illetve kikapcsolása ingerli, a váltakozó áram veszélyesebb az egyenáramnál, annak ugyanis minden félperiódusa kivált ilyen ingerhatást.

A veszélyes áramerősség nagyságát több tényező befolyásolja: az áram útja a testen át, az egyéni érzékenység (a gyerekeknél nagyobb a veszély), **az árambehatás ideje, az áram frekvenciája.**

A Magyarországon 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 áram erősségét a feszültség és az ellenállás együtt határozza meg.

Az emberi test belsejének ellenállása kb. 500 Ω. A bőrön be- és kilépő áram esetén a test ellenállása az 50 000 Ω 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.)

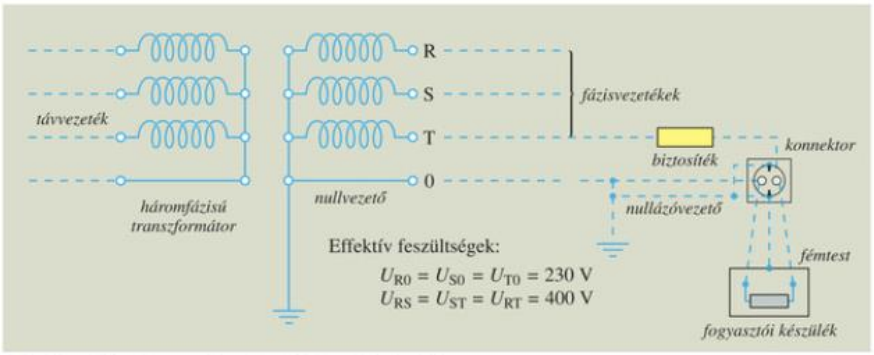
A bőrfelület viszonylag nagy ellenállása miatt a vezetővel való érintkezés helyén keletkeznek az égési sérülések.

Az áramerősség esetén 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 (*97.1. ábra*). Az 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 az előbbi feszültség $\sqrt{3}$-szorosa lép fel, amit kerekítve **400 V**-nak vehetünk.

A hálózati feszültség pillanatról pillanatra változik. A megadott értékek csak a hőhatás



97.1. Háromfázisú áramrendszer és nullázásos érintésvédelem

szempontjából vett átlagértéket (vagyis 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 feszültségű hálózat érintése életveszélyes!

A gyerekek védelmére helyezzünk vakdugót a konnektorba!

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 pólusának a talaj tekinthető.**

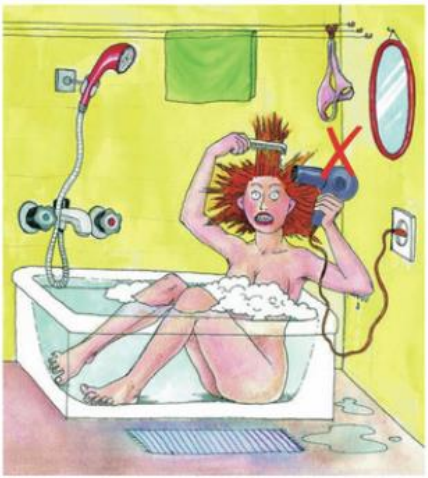
Különösen veszélyes a szíven (a két kéz között) és a fejen átfolyó áram. Nedves kézzel ne nyúljunk elektromos berendezésekhez! Ne irányítsunk vízsugarat feszültség alatt álló vezetőre, konnektorra (például tűzoltásnál)!

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.).



97.2. *Miért életveszélyes fürdőkádban hajszárítót használni?*

3D



98.1. Gyakori érintésvédelmi mód a nullázás

Az érintésvédelem másik, lakásokban is elterjedt módja a **nullázás** (*98.1. ábra*). Ennél a fogyasztói készülék érinthető fémtestét a **nullázóvezető** útján összekötik a hálózati földelt nullvezetékkel (*97.1. ábra*). Ha az üzemi szigetelés meghibásodása miatt a készülék fémteste és a földelés között 50 V-nál nagyobb feszültség lépne fel, akkor a nullázóvezető felé folyó zárlati áram megszakítja az áramkört (kismegszakító vagy olvadó biztosító működtetésével).

Olyan elektromos készüléket, amelyet védőérintkezős villásdugóval hoznak forgalomba, csak védőérintkezős dugaszolóaljzathoz csatlakoztassunk! Csak ezáltal valósul meg ezeknél a készülékeknél a nullázásos érintésvédelem. Ellenkező esetben a készülékek érintése életveszélyes áramütéssel járhat. Ugyanilyen veszélyt jelent a nullázóvezető és nullvezető felcserélése is. Ezért az áramvezető kábelekben a nullázóvezetőt (a védővezetőt) zöld-sárga szín, a nullvezetőt (az üzemszerinti áramvezetőt) pedig kék szín jelöli. A fázisvezető színe fekete.

Mit tehetünk, ha mégis bekövetkezik az elektromos baleset?

1. A legfontosabb a sérült azonnali kiszabadítása az áramkörből.
Megvalósítása többféle módon is történhet:
- az áramkör megszakításával (lekapcsolás, csatlakozó kihúzása, biztosíték kiiktatása);
- a sérültnek és a vezetéknek szigetelőanyag segítségével történő elválasztásával (száraz fa vagy ruha, kötél segítségével).

Közben ne érjünk a sérülthez vagy földelt fémtárgyhoz, mert bennünket is áramütés érhet!

2. Nyújtsunk elsősegélyt!
Ha a sérült nem lélegzik, azonnal mesterséges lélegeztetést kell alkalmazni, és mentőt kell hívni! Az orvosi megfigyelés kisebb áramütés esetén is indokolt, akkor is, ha a sérült jól érzi magát. Az áramütés következményei néha csak utólag jelentkeznek.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Mérjük ohmmérővel a test két kéz közötti ellenállását (száraz és nedves kéznél, az érintkező felület nagyságának és az összenyomás erejének változtatásával)! Mi az eltérések oka?
2. Mit jelent a poligráfos hazugságvizsgálat? Nézzünk utána interneten!
3. Nem kell semmilyen veszélytől tartanunk a nagyfeszültségű távvezeték alatt?



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):

$$W = U \cdot I \cdot t, \quad \text{mértékegysége: } 1\ \text{J} = 1\ \text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}.$$

A **Joule–Lenz-törvény** szerint ennyi a fogyasztó által leadott hőmennyiség is:

$$Q = U \cdot I \cdot t.$$

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 csomópontban az előjelezett áramerősségekre:

$$\sum I = 0.$$

A huroktörvény szerint bármely áramköri hurokban az előjelezett feszültségekre:

$$\sum U = 0.$$

E törvények speciális eseteivel találkozhattunk a fogyasztók soros és párhuzamos kapcsolásánál.

Soros kapcsolásnál:

$$I_1 = I_2 = \ldots = I_n,$$
$$U = U_1 + U_2 + \ldots + U_n,$$
$$R = R_1 + R_2 + \ldots + R_n.$$

Párhuzamos kapcsolásnál:

$$U_1 = U_2 = \ldots = U_n,$$
$$I = I_1 + I_2 + \ldots + I_n,$$
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}.$$

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 vezetik az elektromos áramot.

Két különböző fém elektrolitba merülésénél a kémiai energia elektromos energiává alakul, **galvánelem** jön létre. **Akkumulátoroknál** ez az energiaátalakulás megfordítható.

A **gázok** gyakorlatban is hasznosítható áramvezetésénél a mindig jelen lévő kevés töltéshordozó megfelelő felgyorsításával és ütközési ionizációval valósítjuk meg a töltéshordozó elektronok és ionok utánpótlását.

Vákuumban általában a katódból termikus emisszió vagy fotoemisszió útján kibocsátott elektronok biztosítják az áramvezetést.

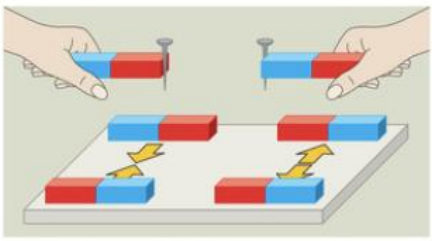
III. fejezet



A MÁGNESES MEZŐ

1. A mágneses mező

1.1. Emlékeztető



102.1. A mágneses kölcsönhatás vagy vonzásban, vagy taszításban nyilvánul meg



102.2. Pólus – görög szó, jelentése: sark



102.3. Az iránytű északi pólusa a földrajzi északi irányt jelzi

Bizonyára sokan érezzük úgy, hogy gyerekkorunk egyik legérdekesebb élménye volt, amikor az állandó mágnesekkel és azok újszerű, meglepő viselkedésével megismerkedtünk.

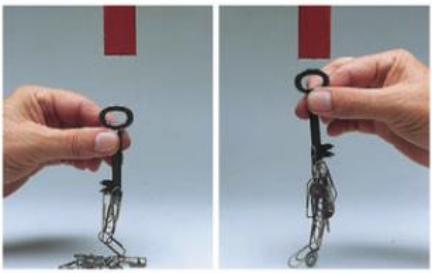
Ma már megszoktuk, hogy **a mágnesek egymásra és a vastárgyakra erőt fejtenek ki.** Természetes számunkra a hűtőszekrényhez tapadó üzenet, a varródoboz tűtartója, a mágneses zár a szekrényajtón vagy az iránytű beállása az észak–déli irányba.

Általános iskolai tanulmányainkban részletesebben is megismerkedtünk a mágneses kölcsönhatással.

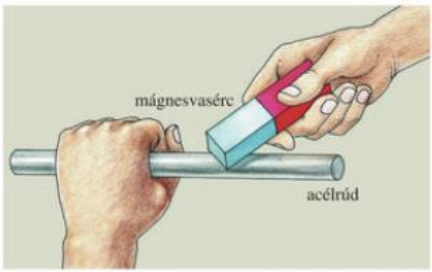
Tudjuk, hogy a mágnesrúd a végei közelében fejti ki a legerősebb hatást: itt vannak a mágneses pólusok. A mágneses dipólus egyik végét **északi,** a másikat **déli pólusnak** nevezzük. **Az egyforma pólusok taszítják, a különbözők vonzzák egymást.** (*102.1. ábra*)

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.

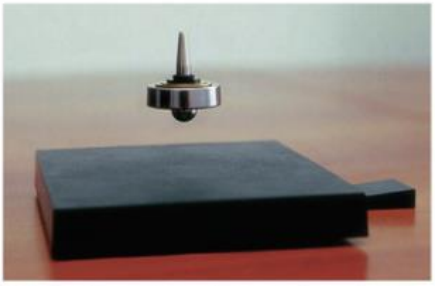
A mágnes közelébe vitt vastárgy mágnesként viselkedik: ez a **mágneses megosztás** jelensége (*102.4. ábra*). Azzal magyarázható, hogy a vasban rendezetlen kis mágneses tartományok találhatók, amelyek a mágnes hatására rendeződnek,



102.4. *Miért csak mágnes közelében mágneses a kulcs?*



102.5. *Hogyan készíthetünk acélrúdból állandó mágnest?*



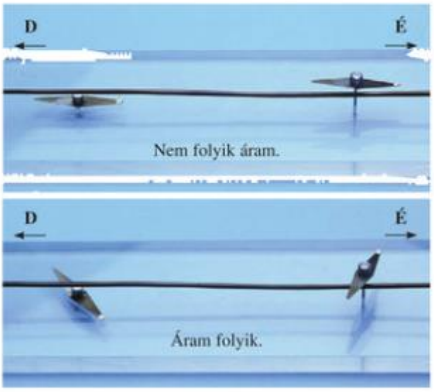
103.1. A mágneses pörgettyű lebeg a mágneses mezőben

így a vastárgy is 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 egy mező, a **mágneses mező (mágneses erőtér)** közvetíti.

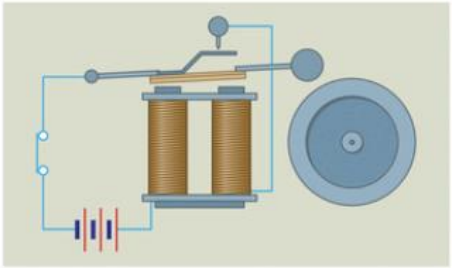
Mindennapi tapasztalatunk, hogy **mágneses mezőt** nemcsak állandó mágnessel, hanem **elektromos árammal is létrehozhatunk** (*103.3. ábra*). Az áram mágneses hatását *Oersted* [örszted] dán fizikus észlelte először (1820). Ma már otthonunkban is sokféle elektromos eszköz található, amelyek az áram mágneses hatása alapján működnek. Ilyen többek között az elektromos csengő, az automata biztosíték, valamint a hajszárító, a porszívó és a mosógép elektromos motorja.

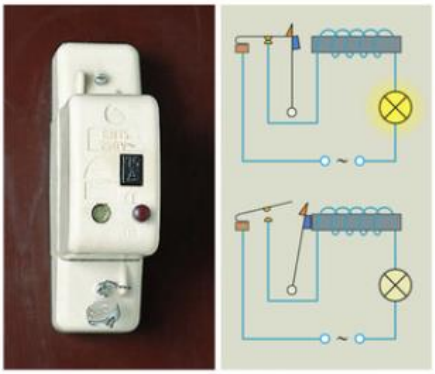


103.3. Az áramjárta vezető körül mágneses mező van

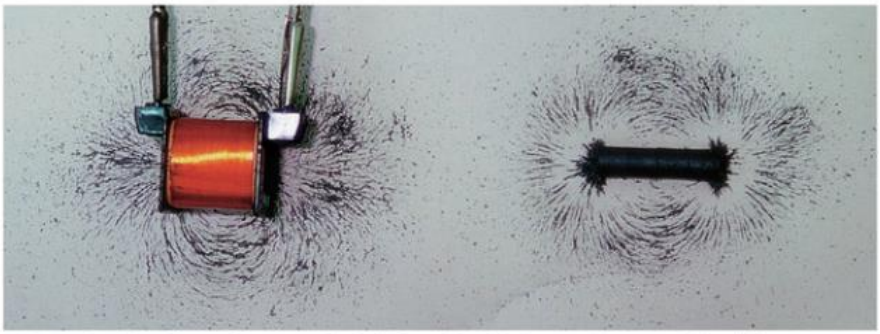


103.4. *Hans Christian Oersted* (1777–1851) bemutatja az áram mágneses hatását





103.2. *Magyarázzuk el a kapcsolási rajz alapján az elektromos csengő és az automata biztosíték működését!*

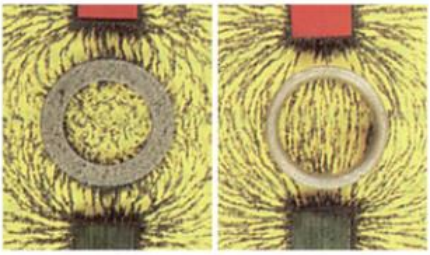


104.1. Az áramjárta tekercs mágneses mezője (balra) hasonló a rúdmágnes mágneses mezőjéhez (jobbra)

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. (*104.1. ábra*)

Vasreszelékkel az is szemléltethető, hogy a vasgyűrű árnyékolja a mágneses mezőt.



104.2. A vasgyűrű árnyékolja, az alumíniumgyűrű nem árnyékolja a mágneses mezőt

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Milyen hasonlóságokat és milyen különbségeket ismertünk meg az elektromos és mágneses jelenségeknél?
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. Milyen energiaátalakulások történnek egy elektromos csengő áramkörében?
5. Miért készítik a mágneses mezőre érzékeny készülékek (például a számítógépek) fémházát vasból?

FELADAT

1. Keressünk otthon minél több eszközt, amely állandó mágnest vagy elektromágnest tartalmaz!
2. Nézzünk utána az interneten a szupergyors mágnesvasút (Maglev) elvének és gyakorlati megvalósításainak!
3. Gyűjtsünk információkat a mágneses mező élőlényekre gyakorolt hatásáról!

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.

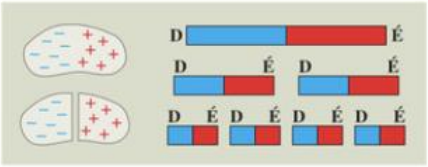
Az elektromos mezőt az egységnyi pozitív próbatöltésre gyakorolt erőhatása alapján jellemeztük. A mágneses mezőt így valamelyik egységnyi pólusra ható erő segítségével jellemezhetnénk. Bármennyire logikus azonban ez az elgondolás, megvalósítása többféle nehézségbe is ütközik.

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!

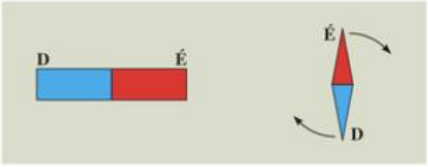
Azt tapasztaljuk, hogy ha egy mágneses dipólust kettévágunk, ismét dipólust kapunk. Hiába ismételjük ezt akárhányszor, nem tudjuk az egyik mágneses pólust a másiktól elválasztani. Így a mágneses mezőnek a mágneses pólusra gyakorolt hatása helyett mindig a mágneses dipólusra gyakorolt hatást figyelhetjük 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.**



105.2. A kétféle elektromos töltés szétválasztható, a kétféle mágneses pólus viszont nem



105.3. A rúdmágnes mágneses mezője forgatónyomatékot fejt ki a mezőt vizsgáló mágneses dipólusra

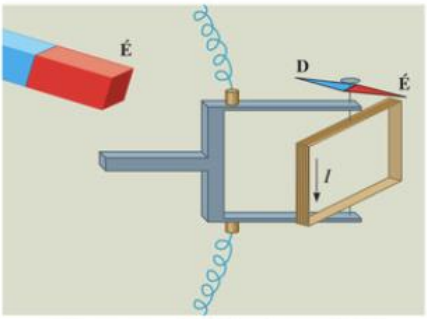
Ha a mágneses mező a vizsgáló dipólus egyik pólusát például balra húzza, akkor a másik pólust jobbra tolja, azaz forgatóhatást fejt ki a mágneses dipólusra. Ezért **a mágneses mező erősségét a dipólusra** (például iránytűre) **kifejtett forgatónyomatékával jellemezhetjük.**

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 jellemzésekor a vizsgáló dipólusra az adott helyen ható maximális forgatónyomatékot vesszük figyelembe.

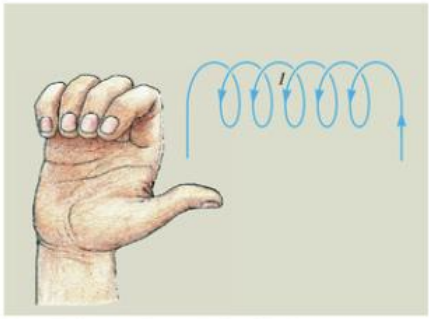


105.1. Maximális forgatónyomatékú (balra), illetve zérus forgatónyomatékú helyzet a Föld mágneses mezőjében

3D



106.1. Kézi magnetométer és iránytű egyensúlyi helyzete



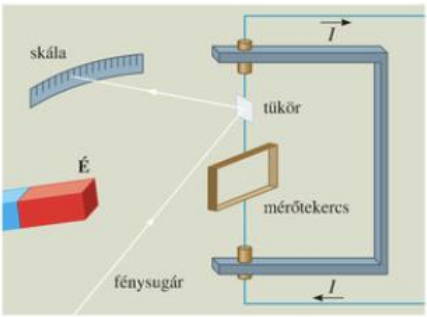
106.3. *Hol van a tekercs északi pólusa?*

A pontosság, megbízhatóság érdekében állandó mágnes helyett árammal átjárt lapos tekercset, úgynevezett **magnetométert** alkalmazunk vizsgáló dipólusként (*106.1. ábra*). A tekercs északi pólusát a **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 pólusát mutatja.**

Függesszük fel a magnetométert rugalmas fémszálra! A fémszál elcsavarodási szöge egyenesen arányos a forgatónyomatékkal. Így az elcsavarodás szögéből következtetni tudunk a forgatónyomaték nagyságára. (*106.2. ábra*)

Helyezzük a rugalmas szálon függő magnetométert a vizsgálandó mágneses mezőbe (például egy mágnesrúd vagy árammal átjárt tekercs közelébe)!

Vizsgáljuk meg, hogy egy mágneses mező adott pontjában mitől függ a magnetométerre ható legnagyobb forgatónyomaték!



106.2. Mágneses indukció vizsgálata magnetométerrel

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 a mágneses mező adott pontjában állandó, arra jellemző érték. A hányadosra olyan pontban kapunk nagyobb értéket, ahol az ugyanolyan menetszámú (N), keresztmetszetű (A) és áramerősségű (I) magnetométer tekercsre nagyobb maximális forgatónyomatékkal (M) hat a mágneses mező. Vagyis az adott pontban a hányados a mező erősségét jellemzi.

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 a szabadon elforduló, 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 adja a mágneses indukcióvektor irányát;
- az indukcióvonalakra merőleges egységnyi felületen annyi indukcióvonal halad át, amennyi ott a mágneses indukció számértéke.

Mágneses indukcióvonalak kísérleti képét úgy kaphatjuk meg, ha mágneses mezőben vízszintes lapra vasreszeléket szórunk. A vasszemcsék a mágneses mezőben mágneses dipólláncokat alkotnak, 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:

$$\Phi = B \cdot A.$$

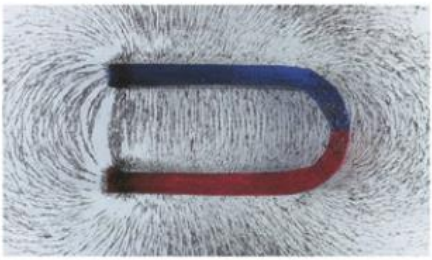
Ha a mágneses indukció nem merőleges a felületre, akkor az indukcióvektor felületre merőleges összetevőjével kell számolni a fluxust.

Ha 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.



107.1. 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. Az ilyen kísérletek során óriási szikraeső csapdos az ember körül, a kézben tartott légritka csövekben változatos fényjelenségek lépnek fel.



107.2. *Nikola Tesla*, akiről elnevezték a mágneses indukció mértékegységét

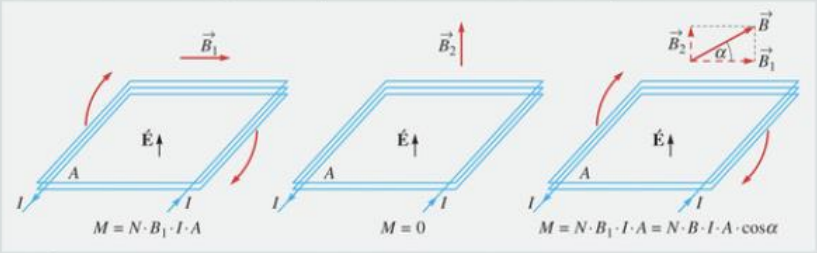
Keressünk Tesla-transzformátoros kísérleteket az interneten!

2. A magnetométeres mérésnél az elcsavarodó rugalmas szál forgatónyomatéka egyensúlyt tart a mágneses mező forgatónyomatékával. Pontos mérésnél a készülék utánállításával (visszaforgatásával) kell biztosítani, hogy a rugalmas szál legnagyobb elcsavarodási állapotában a mérőtekercs maximális forgatónyomatékú helyzetben legyen.

3. 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 ($B_1 = B \cdot \cos\alpha$).



108.1. Így határozható meg 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?

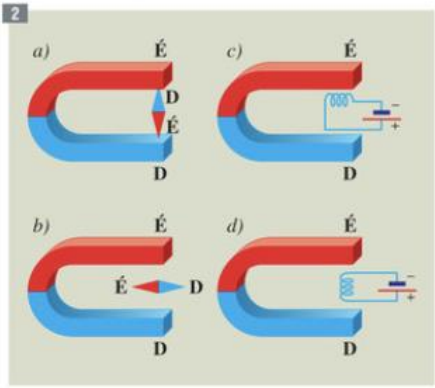
b) függőlegesen felfelé mutat?

Milyen irányú ezeken a helyeken a mágneses indukció vektora?

2. Az ábrán 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?



3. Hogyan lehet elérni, hogy gyengébb mágneses mező nagyobb hatást gyakoroljon a magnetométerre?

4. Az ampermérő szerkezetének milyen módosításával lehetne elérni, hogy már kisebb áramnál is teljesen kitérjen a mutató? (*55.2. ábra*)

FELADATOK

1. Egy mágneses mező ugyanazon 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.)

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	$4 \cdot 10^{-5}$

MEGOLDÁS:

$N = 80$

$A = 5\ \text{cm}^2 = 5 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2$

$I = 20\ \text{mA} = 2 \cdot 10^{-2}\ \text{A}$

$M = 4 \cdot 10^{-5}\ \text{N} \cdot \text{m}$

$B = ?$

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 ekkor a forgatónyomaték?

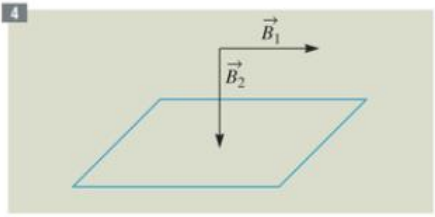
4. Az ábra szerinti 10 cm × 10 cm oldalú négyzet alakú vezetőkeret homogén mágneses mezőben helyezkedik el. Mennyi a keret fluxusa, ha

a) csak a $B_1 = 0{,}4$ T mágneses indukciójú mező van jelen?

b) csak a $B_2 = 0{,}3$ T mágneses indukciójú mező van jelen?

c) mindkét előző mező egyszerre jelen van?

4



5. Készítsünk vázlatos rajzot a Föld mágneses indukcióvonalairól!

6. Figyeljük meg, hogy a radiátor alja az iránytű déli, teteje viszont az északi pólust vonzza! Adjunk magyarázatot! Mit tapasztalnánk, ha megfigyelésünket a déli féltekén végeznénk?

1.3. Egyenes áramvezető és tekercs mágneses mezője

Az árammal létrehozott mágneses mezők nagy előnye az állandó mágnesekkel szemben, hogy erősségüket szabályozni tudjuk, és az áram kikapcsolásával meg is szüntethetők.

Nézzük meg az elektromos árammal létrehozott mágneses mezők két legegyszerűbb esetét!

HOSSZÚ EGYENES VEZETŐ MÁGNESES MEZŐJE

Fűzzünk át vízszintes, merev lapon egyenes vezetőt, majd kössük azt néhány amperes egyenárammal terhelhető áramforrás (áramátalakító vagy akkumulátor) kapcsaira! Zárjuk az áramkört, és szórjunk vasreszeléket a lapra (kicsit rázva vagy ütögetve a lapot)! A vasreszelék koncentrikus körök mentén rendeződik el a vezető körül.

Ha iránytűt viszünk a vezető környezetébe, megfigyelhetjük, hogy a vezető mágneses mezője annál nagyobb forgatónyomatékot fejt ki (annál inkább kitéríti az iránytű 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:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot r \cdot \pi}.$$

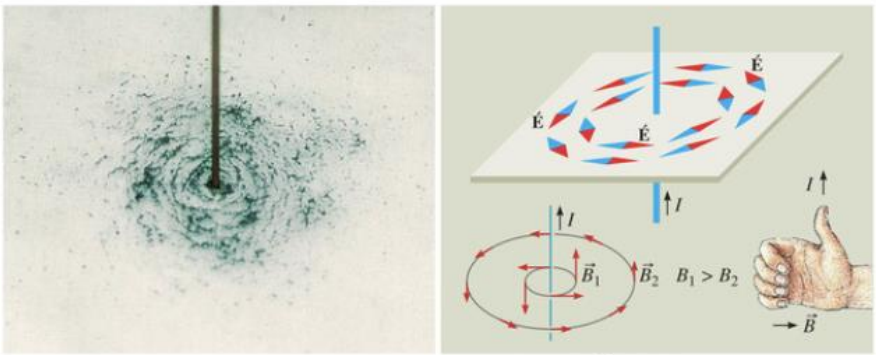
A μ_0 (mű-null) állandó a mágneses mezők elméletében gyakran előfordul, a **légüres tér permeabilitásának** [permeábilitás] nevezzük. Értéke:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\mathrm{V \cdot s}}{\mathrm{A \cdot m}}.$$

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. (*110.1. ábra*)



110.1. 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, ritka menetű 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:

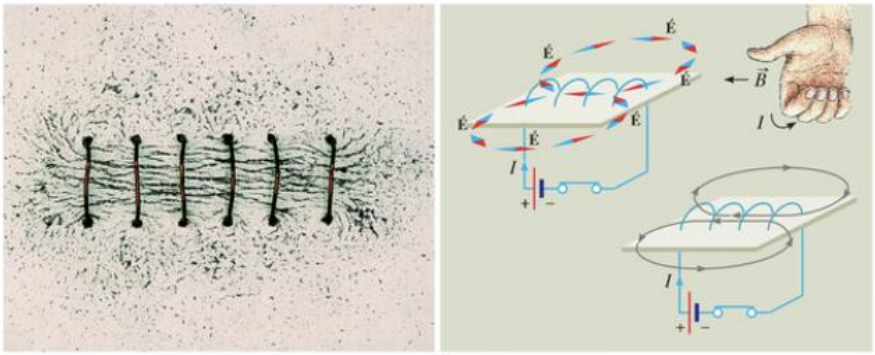
Ha jobb kezünkkel úgy fogjuk meg a tekercset, hogy behajlított ujjaink az áram irányába mutassanak, akkor kifeszített hüvelykujjunk a mágneses indukció irányát mutatja a tekercs belsejében.

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. (*111.1. ábra*)

Érdekes kérdés, hogy vajon milyen a mágneses indukció iránya egy mágnesrúd belsejében?

Mágnesrúd belsejébe nem tudunk iránytűt helyezni, és nem tudjuk mozgatni benne. De az atomok, sőt az atom építőkövei is kis mágneses dipólok. A kísérletek azt bizonyítják, hogy a mágnesrúd a belsejében is a tekercshez hasonló mágneses mezővel rendelkezik.

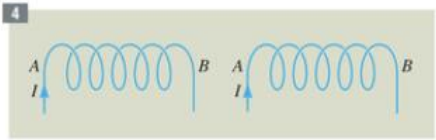
Bármilyen árammal keltett vagy állandó mágnessel létrehozott mágneses mezőt vizsgálnánk meg, azt tapasztalnánk, hogy **a mágneses mező mindig örvényes.**



111.1. Mágneses mező az áramvezető tekercsnél. *Milyen $\vec{B}$ iránya a tekercsben?*

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Balra vagy jobbra mutat az áramirány a *103.3. 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 ezek segítségével 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?



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. (Tanulság: aggódás előtt érdemes számolni!)

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

$\ell = 10$ 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?

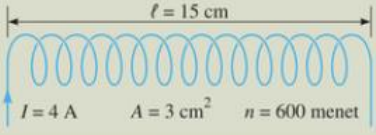
b) Mekkora áram folyik a tekercsben, ha az 1600 menetes és 20 cm hosszúságú?

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 puszta arányszám. Megmutatja, hogy a légüres térbeli mágneses mező mágneses indukciója hányszorosára növekszik, ha a légüres teret az adott anyaggal töltjük ki.

A vashoz hasonló, a mágneses mezőt jelentősen erősítő anyagokat **ferromágneses anyagoknak** nevezzük. A nem ferromágneses anyagok (közöttük a levegő) relatív permeabilitása közelítően 1.

Paramágneses anyagoknál $\mu_r > 1$, diamágneses anyagoknál $\mu_r < 1$. (Pl.: $\mu_{r,\text{levegő}} = 1{,}0000004$ és $\mu_{r,\text{víz}} = 0{,}9999901$.) Bizonyos ötvözeteknél (pl. permalloy, hyperm) a relatív permeabilitás maximális értéke 50 000 is lehet. Néhány ferromágneses anyag relatív permeabilitásának középértéke:

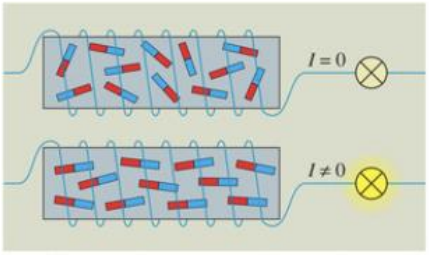
vas: 2000, nikkel: 270, kobalt: 170.

Az anyagok ferromágnessége melegítéskor csökken, és az anyagra jellemző hőmérsékleten, az ún. Curie-ponton [küri] meg is szűnik. A vas Curie-pontja: 769 °C. A lágyvas a külső mágneses mező megszűnte után elveszíti, az acél részben azután is megtartja mágnesességét. Lágyvasból van a tekercsek vasmagja. Acélból állandó mágnes készíthető.

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 a mágneses kölcsönhatást úgy felerősíti, mintha a tekercs áramerősségét több ezerszeresre növeltük volna. Vasmagos tekercsben a mágneses indukció:

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{I \cdot N}{\ell}.$$



114.1. Áram hatására a vasmag elemi mágnesei rendeződnek. *Merre felé folyik az áram az izzón?*

A lágyvasmagot tartalmazó tekercset elektromágnesnek nevezzük. Az elektromágneseket az elektrotechnika legkülönbözőbb területein alkalmazzák.

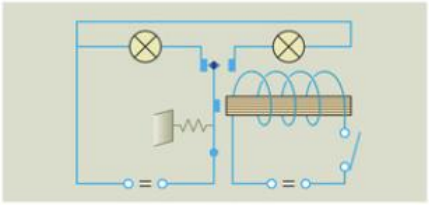
Nagy erőhatás kifejtésére szolgál az **elektromágneses emelődaru.**

Az emlékeztetőben már utaltunk az általános iskolában megismert elektromos csengőre (*103.2. ábra*), amelynek lényege az **elektromágneses szaggató.**

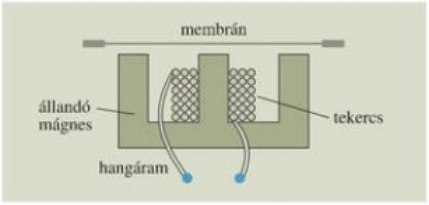
Ugyancsak volt szó a lakások áramköreiben is alkalmazott **automata biztosítékról** (*103.2. ábra*).



114.2. Elektromágneses daru



115.1. Kétállású relé kapcsolási rajza



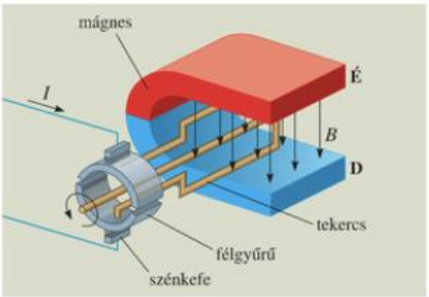
115.3. Hagyományos telefonhallgató működési elve

A *115.1. 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** (*115.3. 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.

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.

Forgótekercses mérőműszereknél (*55.2. 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** (*115.4. ábra*) a tekerccsel együtt forgó két félgyűrűn át, csúszóérintkezők (álló szénkefék) segítségével vezetnek áramot úgy, hogy az egyensúlyi helyzeten való átfordulás után az áramirány



115.4. Az egyenáramú motor elve. *Hogyan érhető el ellentétes forgásirány?*



115.2. Mikrofon, erősítő és hangfal nélkül koncertek sem lehetnének



116.1. Az univerzális motor forgórésze

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 állló- 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.

Az elektromos motoroknak a robbanómotorokkal szemben az egyik legnagyobb előnyük, hogy nem szennyezik a helyi környezetet. Ezért a jövőben még szélesebb körű alkalmazásuk várható (például a közlekedésben).

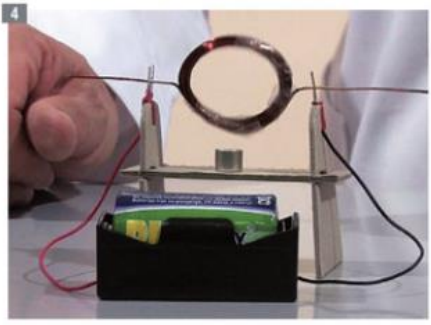
GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Miért használnak lágyvasat és nem acélt az elektromágnesek vasmagjaként?
2. Lehet-e az elektromágneses daruval izzó vasrudakat is emelni?

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. Mennyi a légmagos tekercs belsejében a mágneses indukció és fluxus? Hogyan változnak ezek $\mu_r = 1200$ relatív permeabilitású vasmagnál?
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) légmagos tekercs esetén?
   b) $\mu_r = 1200$ relatív permeabilitású vasmagos tekercs esetén?
3. Figyeljünk meg szimulációt az egyenáramú motorra (pl. *fizika.lap.hu*)!
4. Állítsunk össze a mellékelt ábra szerint egyszerű impulzusmotort, és magyarázzuk meg a működését!

   A szükséges alkatrészek:
   - 1,5 V-os elem, csatlakozó vezetékkel;
   - erős neodímium mágnes;
   - zománc szigetelésű rézdrótból néhány menetes tekercs celluxszal összefogva, melynek kivezetései adják a forgástengelyt; a kép szerinti helyzetben mindkét féltengely alsó oldaláról lekaparjuk a szigetelést);
   - fémes tengelytartók (pl. két gemkapocs).



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 nem lapos tévé képernyőjéhez)! A kép elmozdul, mert a mágneses mező eltéríti a képernyő felé haladó elektronokat. (Vigyázat! Használatban lévő 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.)

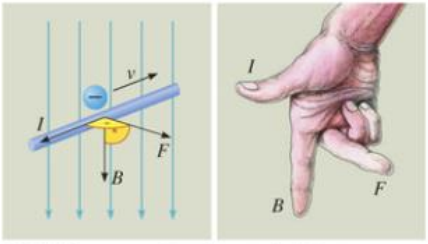
A katódsugár eltérülésének megfigyelésével irányszabályt is megfogalmazhatunk az elektromos töltésű részecske mozgása által képviselt áram iránya, a mágneses indukció iránya és az erő iránya között.

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.

Emlékeztető: az áramirány a pozitív töltés sebességével egyező vagy a negatív töltés sebességével ellentétes irány.

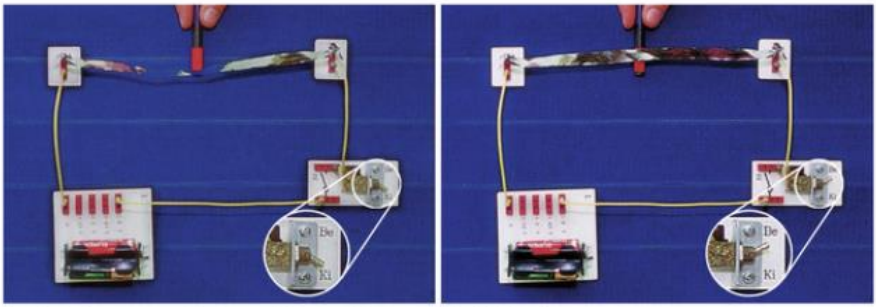
A mágneses mező által a mozgó töltésre gyakorolt erő irányát is **jobbkéz-szabállyal** szokás rögzíteni:

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.



117.2. 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.



117.1. A mágneses mező hatása az elektromos áramra (fotók a kísérletről)

Ellenőrizzük kísérlettel áramvezető esetén 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.

Kísérleti úton 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

$$F = B \cdot I \cdot \ell.$$

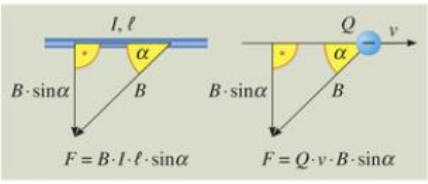
Az összefüggés átalakítható úgy, hogy a v sebességgel mozgó Q töltésre ható erő számítására legyen alkalmas.

Az $I = \frac{Q}{t}$ és az $\ell = v \cdot t$ összefüggések felhasználásával adódik, hogy

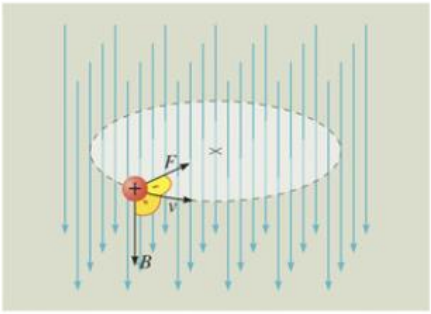
$$F = Q \cdot v \cdot B.$$

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 [lórenc] (1853–1928) holland fizikusról *Lorentz-erőnek* nevezzük.



118.1. A mágneses mező által kifejtett erő számítása



118.2. *Mikor mozog körpályán mágneses mezőben az elektromos töltésű részecske?*

ELEKTROMOS TÖLTÉSEK MOZGÁSA MÁGNESES MEZŐBEN

A **Lorentz-erő** mindig merőleges a sebességre, ezért a munkája zérus. A munkatételből következik, hogy a mozgási energiát és így a sebesség nagyságát sem változtatja meg ($W = \Delta E_{\text{mozgási}}$). **A Lorentz-erő hatása a mozgó töltés sebességének irányváltoztatásában nyilvánul meg.**

Nézzük meg az elektromos töltésű részecske mozgását homogén mágneses mezőben (*118.2. 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 erőt:

$$Q \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{r}.$$

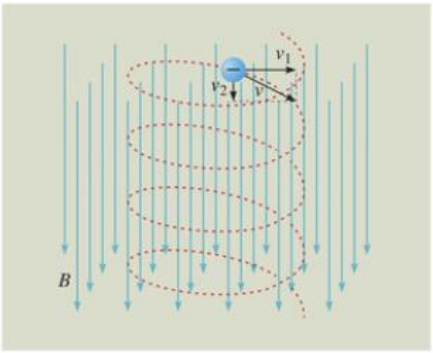
Ebből kifejezhető a körpálya sugara:

$$r = \frac{m \cdot v}{B \cdot Q}.$$

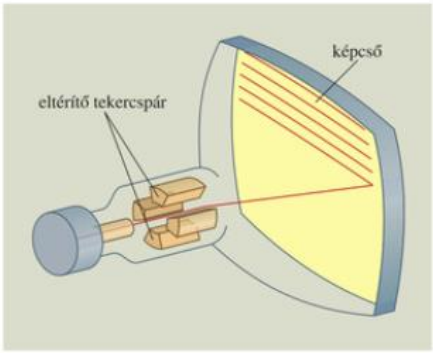
Ha a részecske sebessége nem merőleges a homogén mágneses mező indukcióvonalaira (*119.1. ábra*), akkor a sebességet felbonthatjuk a mágneses indukcióra merőleges v_1 és az indukcióval párhuzamos v_2 összetevőkre.

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.



119.1. Homogén mágneses mezőben az elektromos töltésű részecske általában spirálpályán mozog



119.2. 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** és a daganatos orvosi terápiában is szükség van nagy sebességű, célzott irányú elektromos részecskenyaláb előállítására. A **ciklotron** olyan részecskegyorsító berendezés, amelyben váltakozva elektromos mezőkkel gyorsítják és mágneses mezővel körpályára térítik a részecskéket. Így kis térrészben megnövelhető a gyorsítás útvonala és végsebessége. (Lásd *122.1.* kidolgozott feladat!) Magyarországon a legrégebbi és legnagyobb ciklotron az MTA Atommagkutató Intézetében, Debrecenben található.

A **tömegspektroszkópiának,** vagyis a részecskék tömeg szerinti szétválasztásának egyik fő módszere az ionizált részecskék mágneses mezőkkel történő eltérítése.

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 egyesülésük során 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.



119.3. A toroid tekercs belseje jó mágneses tárolóedény a magas hőmérsékletű plazmához

OLVASMÁNY

A földmágnesség

3D

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 földrajzi és mágneses pólusai nem esnek egybe. A kettő közötti eltérést a vízszintes síkban forgó iránytű által mutatott deklinációs szög (δ) adja meg. Ez hazánkban hozzávetőleg 3°.

Ha az iránytűt É–D irányba állítva úgy helyezzük el, hogy függőleges síkban (azaz vízszintes tengely körül) foroghasson, akkor 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.

Ha a földmágnesség lenyomatát összehasonlítjuk a különböző kontinensek kőzeteiben, arra következtethetünk, hogy a kontinensek vándorolnak. 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) zápora 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 [ven-elen] sugárzási zóna. A külsőben elektronok, a belsőben protonok mozognak nagy sebességgel.

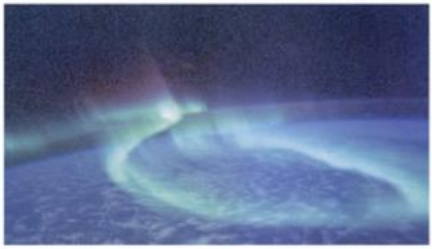
A Nap részecskesugárzása is elektromos áramot jelent, amelynek mágneses mezője jelentős zavarokat okoz a Föld mágneses terében (különösen napfolttevékenység idején).

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.

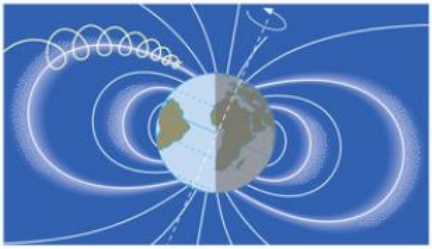
Az űrkutatás kiderítette, hogy a többi bolygónak is van kisebb-nagyobb erősségű mágneses mezője. A Holdnak nemcsak a légköre, hanem a mágneses mezője is hiányzik. Semmi sem védte a felszíni kőzeteket a napsugárzás és a kozmikus sugárzás romboló hatásától. Így alakult ki a felszínt borító finom porréteg. Érdekes felfedezés, hogy a holdkőzetekben viszont megtalálták egy régi mágneses mező nyomait.







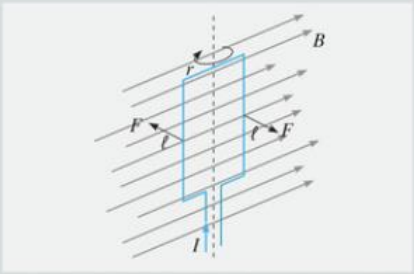
121.1. Sarki fény a világűrből



121.2. A van Allen-féle sugárzási övek

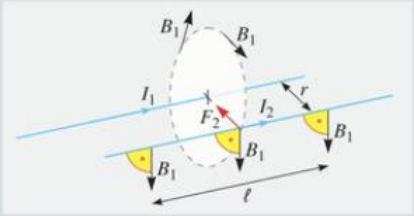
MEGJEGYZÉSEK

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 a B mágneses indukciójú mágneses mezőben, a 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 az egyirányú áramok vonzzák, az ellentétes irányúak taszítják egymást.

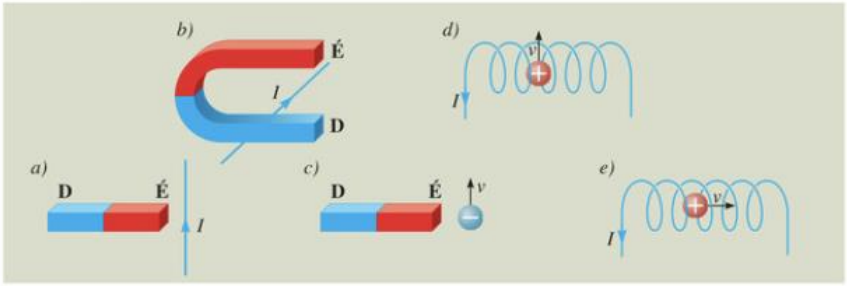


Az erők nagyságát is kiszámíthatjuk. Az I_1 áramú vezető a tőle r távolságban lévő vezető helyén $B_1 = \mu_0 \cdot \dfrac{I_1}{2 \cdot r \cdot \pi}$ erősségű mágneses mezőt hoz létre. Ez a mágneses mező az I_2 áramú vezető ℓ hosszúságú darabjára $F_2 = B_1 \cdot I_2 \cdot \ell = \mu_0 \cdot \dfrac{I_1}{2 \cdot r \cdot \pi} \cdot I_2 \cdot \ell = \dfrac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \dfrac{\ell}{r}$ 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 $\dfrac{\mu_0}{2 \cdot \pi}\ \mathrm{N} = 2 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{N}$ 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? (*121.2. ábra*)

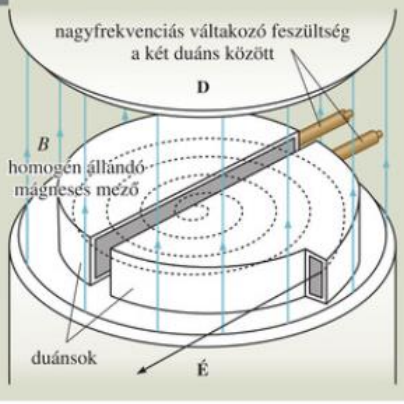
3. Hogyan függ a homogén mágneses mezővel körpályára kényszerített részecske periódusideje a részecske sebességétől?

FELADATOK

1. A mellékelt ábra egy részecskegyorsító ciklotron vákuumos belső terét szemlélteti. Az elektromos töltésű részecske gyorsítása a két fém félhenger, úgynevezett duánsok közötti részben történik, a közéjük kapcsolt, és félkörönként váltakozó polaritású feszültséggel. A duánsok belsejében homogén mágneses mező kényszeríti az egyre nagyobb sebességű részecskét egyre nagyobb sugarú félkör pályára, míg végül a részecske elhagyja a gyorsítót.

Példánkban a homogén mágneses mező indukciója 1,2 T. A gyorsító feszültség mindig 30 kV. Egy proton $4{,}38 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ sebességgel érkezik az egyik duánsba. Mekkora sugarú félkörön és mennyi ideig halad az első és a második duáns belsejében?

1



MEGOLDÁS:

$Q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C; $m = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg

$B = 1{,}2$ T

$U = 30$ kV $= 3 \cdot 10^4$ V

$v_1 = 4{,}38 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$r = ?$, $t = ?$

A körmozgás dinamikai alapegyenlete: $Q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{r}$. Ebből egyszerűsítés után kifejezhető a kör sugara:

$$r_1 = \frac{m \cdot v_1}{B \cdot Q} = \frac{1{,}67 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} \cdot 4{,}38 \cdot 10^6\ \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1{,}2\ \text{T} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C}} = 3{,}81 \cdot 10^{-2}\ \text{m} = \mathbf{3{,}81\ cm.}$$

A haladási idő a periódusidő fele:

$$t_1 = \frac{T_1}{2} = \frac{r_1 \cdot \pi}{v_1} = \frac{3{,}81 \cdot 10^{-2}\ \text{m} \cdot \pi}{4{,}38 \cdot 10^6\ \frac{\text{m}}{\text{s}}} = \mathbf{2{,}73 \cdot 10^{-8}\ s.}$$

A munkatétel: $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 = Q \cdot U$. Ebből kifejezhető a gyorsítás utáni v_2 sebesség:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot Q \cdot U}{m} + v_1^2} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 3 \cdot 10^4\ \text{V}}{1{,}67 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}} + \left(4{,}38 \cdot 10^6\right)^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = \mathbf{5 \cdot 10^6\ \frac{m}{s}.}$$

A pályasugár:

$$r_2 = \frac{m \cdot v_2}{B \cdot Q} = \frac{1{,}67 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} \cdot 5 \cdot 10^6\ \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1{,}2\ \text{T} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C}} = 4{,}35 \cdot 10^{-2}\ \text{m} = \mathbf{4{,}35\ cm.}$$

A körmozgásra vonatkozó $T = \frac{2r \cdot \pi}{v}$ és $r = \frac{m \cdot v}{B \cdot Q}$ összevetéséből adódik:

$$T = \frac{2\pi \cdot m}{B \cdot Q}.$$

Tehát a periódusidő független a sebességtől. (Ezért alkalmazható a ciklotronnál állandó frekvenciájú gyorsító feszültség.)

Így $t_2 = t_1 = \mathbf{2{,}73 \cdot 10^{-8}\ s.}$

2. 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?

3. 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 ahhoz, 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!

4. 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 és mennyi a periódusideje?

b) Mennyi lenne az ugyanilyen sebességű elektronnál a sugár és a periódusidő? Milyen lenne a keringési irány?

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 a szabadon elforduló, 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 megadja 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),

$$F = Q \cdot v \cdot B \quad \text{vagy} \quad F = B \cdot I \cdot \ell.$$

Az erő irányát jobbkéz-szabállyal adhatjuk meg.

IV. fejezet



HŐTAN

1. Hőtani alapjelenségek

1.1. Emlékeztető. Hőhatások a mindennapokban, hőmérők

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.**

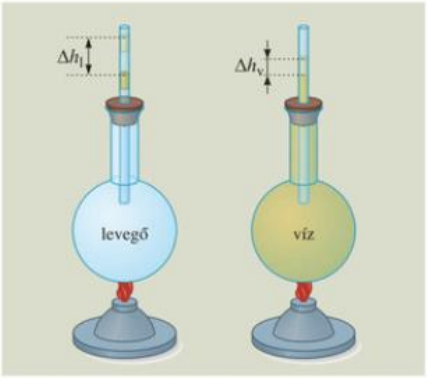
Az ember hőérzete azonban szubjektív: ha télen a kinti nagy hidegről a lakás előszobájába lépünk, akkor a helyiség levegőjét melegnek érezzük, ha pedig a jól fűtött belső szobából lépünk az előtérbe, akkor azt hűvösnek találjuk. Ezért a testek hőállapotának (hideg, meleg vagy esetleg langyos) objektív jellemzésére a mindennapi életben hőmérőket használunk, amelyek a testek **hőmérsékletét** mérik hőérzetünktől függetlenül, objektív módon.

Egy hőmérő csak akkor tekinthető jónak, ha a mérendő testhez képest kicsi a mérete, így elhanyagolható mértékben változtatja meg a test hőmérsékletét, amikor méréskor termikus kölcsönhatásba lép azzal.

Így pl. a közönséges szobai hőmérő egy gyűszűnyi víz hőmérsékletének mérésére nem alkalmas, de egy vödörnyi vízére már igen.

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 normális légköri nyomáson megolvad, 0 °C-kal jelöli. Azt a pontot pedig, amelyen a víz ugyanezen a nyomáson forr, 100 °C-nak veszi.

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.



126.1. Lombikba zárt levegő és víz hőtágulásának egyszerű vizsgálata

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 kezünkkel melegítjük a lombikot, a bezárt levegő gyors tágulásnak indul.

Ha a lombikot vízzel töltjük meg, és ugyanúgy melegítjük a kezünkkel, lényegesen lassúbb és kisebb mértékű változást figyelhetünk meg. Borszeszégővel melegítve a lombikot, gyorsabb térfogatváltozást kapunk. Figyeljük a vízszint alakulását kezdetben!

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 számolni kell a hőmérséklet-változással együtt járó hőtágulásokkal a káros deformációk, törések, repedések elkerülése végett. A hőmérők készítéséhez, a pontos műszaki tervezésekhez is szükséges, hogy ismerjük a hőtágulás mértékének mennyiségi törvényszerűségeit. A következőkben ezekkel fogunk részletesen megismerkedni.



127.1. *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, hogy a Föld a pólus közelében kismértékben lapult.

   Az ő nevéhez fűződik az 1737-ben általa tervezett, majd 1742-ben bevezetett Celsius-skála. Celsius eredetileg a víz forráspontját vette 0 °C-nak, és fagyáspontját 100 °C-nak. A skála megfordítását Martin Strömer svéd tudós javasolta 1750-ben.



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

2. Az amerikai kontinens több országában, így az Egyesült Államokban is 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

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

vagy 50 °F-nak megfelel

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

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

6



1. Egy bostoni időjárás-jelentésben azt halljuk, hogy a várható nappali hőmérséklet 39 °F, az éjszakai pedig 23 °F. Milyen évszak lehet ekkor Bostonban?

2. Hány Fahrenheit-foknál leszünk lázasok?

3. Hogyan választotta meg Fahrenheit a hőmérsékleti alappontokat és a skálabeosztást? (Interneten nézzünk utána!)

4. Mi az alkoholos hőmérő előnye és hátránya a higanyossal szemben?

3D **5.** Hol használnak gázhőmérőt és mikor előnyös ezek használata?

6. Hogyan működik a Galilei-féle hőmérő és mire használhatjuk? (Interneten keressük a leírását!)

7. Milyen fizika jelenségen alapszik a digitális hőmérők működése? A választ keressük az interneten!

8. Hogyan működik a bimetál hőmérő? (Internetről tájékozódjunk!)

9. Tájékozódjunk az internetről, hogyan működik a lázmérő és a minimum-maximum hőmérő!

3D







1.2. A szilárd testek hőtágulásának törvényszerűségei

A SZILÁRD TESTEK LINEÁRIS HŐTÁGULÁSA

Lineáris vagy hosszanti hőtágulásról akkor beszélünk, ha a test hőhatásra létrejövő valamely hosszméretének változását vesszük csak figyelembe.

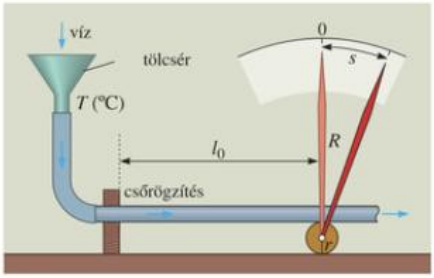
A gyakorlatban elsősorban azon testek lineáris hőtágulását vizsgáljuk, amelyek esetén a hosszméret jóval nagyobb a keresztirányú méreteknél. Ilyenek a huzalok, hosszú gerendák, hidak hosszú vasszerkezetei stb. Ezeknél a testeknél a hosszméret változása hőtáguláskor jóval nagyobb, mint a keresztirányú méretváltozások. A jelentős hosszváltozásokkal a szerkezetek tervezésénél számolni kell, hogy a hőtágulásra létrejövő maradandó deformációkat elkerüljék.

A *129.1. 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 leírt s ív hosszának és a ΔT hőmérséklet-változásnak összetartozó értékeit!

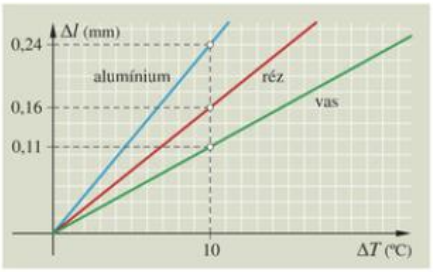
Ha az r sugarú görgőhöz erősített mutató R hosszúságú, és a mutató vége s hosszúságú körívenmozdul el, akkor a megnyúlást a $\Delta\ell = s \cdot \frac{r}{R}$ összefüggés alapján számíthatjuk ki.

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.



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



129.2. 1 méter hosszú, különböző anyagból készült fémcsövek hosszváltozásának függése a hőmérséklet változásától

Ezzel az eszközzel vagy a *130.1. ábra* készülékével is igazolható, hogy a testek lineáris hőtágulásának mértéke függ az anyagi minőségtől.

A mérési tapasztalatok alapján a **lineáris hőtágulás törvényszerűségei** a következőek:

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.**

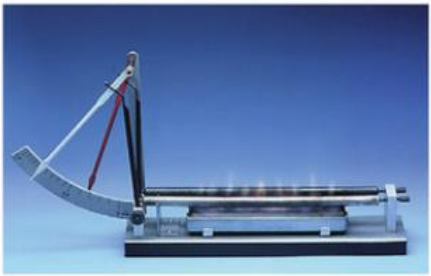
A $\Delta\ell$ hosszváltozást a következő összefüggésből számíthatjuk ki:

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

Az α anyagi állandót lineáris hőtágulási tényezőnek nevezzük.

Mértékegysége: $\frac{1}{°C}$.

A lineáris hőtágulási tényező számértéke megadja a test egységnyi hosszának 1 °C hőmérséklet-változás hatására bekövetkező megváltozását.



130.1. Szilárd testek lineáris hőtágulását vizsgáló kísérleti eszköz, ahol égő borszesszel melegíthetünk fémrudakat

Nézzük meg néhány szilárd anyag lineáris hőtágulási tényezőjének értékét (20 °C-on véve a kezdeti ℓ_0 hosszat):

Anyag neve	$\alpha\left(\frac{1}{°C}\cdot 10^{-5}\right)$
alumínium	2,4
arany	1,4
beton	1,2–1,4
ezüst	1,9
ólom	2,8
réz	1,6
üveg	0,4–0,5
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:

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

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

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.

SZILÁRD TESTEK TÉRFOGATI HŐTÁGULÁSA

A szilárd testek hosszúsága, szélessége és magassága gyakran azonos nagyságú ezért a hőtáguláskor mindhárom hosszméret azonos mértékben változik a hosszanti hőtágulás törvénye szerint. Ezért a szilárd testek **térfogati,** vagy más néven **köbös hőtágulásának** törvényszerűsége a lineáris hőtágulás törvényéhez hasonló.

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.**

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 tényező számértéke megadja, hogy az egységnyi térfogatú szilárd test térfogata mennyivel változik meg 1 °C hőmérséklet-változás hatására.

A megváltozott térfogatot, a hosszúsághoz hasonlóan közvetlenül is kiszámíthatjuk a következő összefüggésből:

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

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 az alábbi összefüggésből számíthatjuk:

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

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

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

A szilárd testek hőmérséklet-változása néhány 100 °C lehet. Így a szilárd testeknél az $\alpha \cdot \Delta T$ szorzat nagyságrendje $10^{-5} \cdot 10^2 = 10^{-3}$. Ezért a szorzat négyzete 10^{-6}, köbe 10^{-9} nagyságrendű. Így a zárójelen belül a harmadik és negyedik tag elhanyagolható az első két taghoz képest.

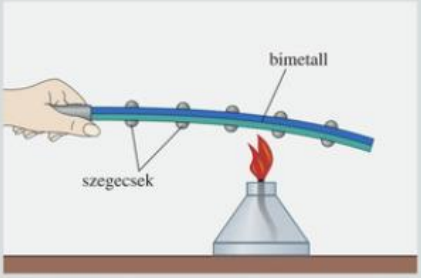
Ezért jó közelítéssel írhatjuk, hogy

$$V \approx V_0 \cdot (1 + 3\alpha \cdot \Delta T).$$

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

MEGJEGYZÉSEK

1. 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, hosszabb íven. Bimetallt olyan berendezéseknél használnak, ahol a hőmérséklet változásának hatására mechanikus szerkezetet (kapcsolót, szelepet stb.) akarnak vele működésbe hozni. Ezzel tűzhelyek, vízmelegítők, fűtőberendezések biztonságos üzemeltetése oldható meg.



131.1. A bimetall szalag melegítés hatására meggörbül

2. 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 beton talpakhoz rögzítik, ezek képesek ellenállni a táguláskor fellépő nagy erőknek. Így is előfordulhat, hogy nagy kánikulában a nem megfelelően rögzített vagy méretezett sínek elhajlanak.



131.2. Vasúti sínek régi összeillesztési módja

3. Mivel a homogén anyagok tágulása egyenletes – az anyagokban táguláskor nem keletkeznek belső feszítőerők –, ezért a lemezeken vágott lyukak vagy az anyagtömbökben lévő üregek mérete hőtágulásnál éppen úgy változik, mintha ott is anyag lenne. Azaz a lyukakat és az üregeket körülvevő anyag „nem érzékeli" tágulásnál vagy összehúzódásnál, hogy belül anyaghiány van. Egyszerűen szemléltethetjük ezt a 'S Gravesande (ejtsd: 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.



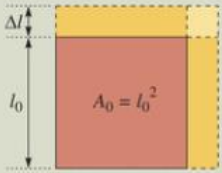
131.3. Kísérlet 'S Gravesande készülékkel

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? Hogyan jár nyári forróságban és téli nagy hidegben?
5. Hogyan illeszthetünk könnyedén egy csapágyat egy megfelelő méretű tengelyre?
6. Állapítsuk meg a *130. oldal táblázatából*, hogy mekkora az alumínium, a réz és a vas térfogati hőtágulási tényezője!
7. Igazoljuk – az ábra segítségével –, hogy hőtáguláskor a lemezek terület változása a $\Delta A = 2\alpha \cdot A_0 \cdot \Delta T$ képlettel számítható ki!

7



8. Miért repedhet meg a befőttes üveg, ha forró levet öntünk bele? Hogyan kerülhetjük el a jelenség bekövetkezését?
9. Létezik-e olyan anyag, amelynek mérete melegítéskor csökken, vagyis negatív a hőtágulási együtthatója? (Internetről tájékozódjunk pl. Fizikai kísérletek gyűjteménye címszónál!)
10. Vajon mi a „gumigép", és hogyan működik? (Válasz az interneten keresendő, lásd 9. kérdést!)

FELADATOK



1. Az 1933-ban épült vasszerkezetű Lakihegyi Rádióadó torony magassága 20 °C hőmérsékleten 314 méter.
   a) Mennyivel növekszik az építmény magassága a nyári tűző napon, amikor a vasváz 50 °C-ra melegszik fel?
   b) Mennyivel csökken a torony magassága téli –20 °C-os zord hidegben? (A vas lineáris hőtágulási együtthatóját vehetjük a 13. oldalon található táblázatból!)

MEGOLDÁS:

$\ell_0 = 314$ m

$\alpha_{vas} = 1{,}1 \cdot 10^{-5} \frac{1}{°C}$

$\Delta\ell = ?$

a) $\Delta T = 30\ °C$. Alkalmazzuk a lineáris hőtágulásra vonatkozó összefüggést! Helyettesítsük be az ismert adatokat!

$$\Delta \ell = \alpha \cdot \ell \cdot \Delta t = 1{,}1 \cdot 10^{-5}\ \frac{1}{°C} \cdot 314\ \text{m} \cdot 30\ °C = 1{,}0362 \cdot 10^{-1}\ \text{m} = \mathbf{10{,}36\ cm.}$$

Tehát a torony magassága a nyári napsütésben 10,36 cm-rel nő meg.

b) $\Delta T = -40\ °C$. Ismét használjuk a hosszváltozásra vonatkozó összefüggést! A behelyettesítés után kapjuk:

$$\Delta \ell = \alpha \cdot \ell \cdot \Delta t = 1{,}1 \cdot 10^{-5}\ \frac{1}{°C} \cdot 314\ \text{m} \cdot (-40\ °C) = -1{,}3816 \cdot 10^{-1}\ \text{m} = \mathbf{-13{,}8\ cm.}$$

Tehát a torony a zord téli hidegben 13,8 cm-rel rövidül meg.

2. Mennyivel növekszik meg a hossza annak a 100 m hosszúságú alumínium-huzalnak, amelynek a hőmérséklete 15 °C-ról 45 °C-ra nő meg? ($\alpha_{al} = 2{,}4 \cdot 10^{-5}\ \frac{1}{°C}$.)

3. Mekkora annak a rézrúdnak a hossza, amelyik 100 °C hőmérséklet-emelkedéskor 10 mm-rel lesz hosszabb? ($\alpha_{réz} = 1{,}6 \cdot 10^{-5}\ \frac{1}{°C}$.)

4. Egy 10 m hosszúságú vashuzal hőmérséklete 20 °C. A huzalt felmelegítve a hossza 12 mm-rel változik meg. Mekkora lett a huzal hőmérséklete? ($\alpha_{vas} = 1{,}1 \cdot 10^{-5}\ \frac{1}{°C}$.)

5. 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!)

6. Az 1 dm^3 térfogatú 20 °C hőmérsékletű alumíniumból készült kockát hány Celsius-fokra kell lehűteni, hogy a térfogata 1 cm^3-rel csökkenjen? ($\alpha_{al} = 2{,}4 \cdot 10^{-5}\ \frac{1}{°C}$.)

7. Maximálisan mennyivel növekedhet meg annak –15 °C hőmérsékletű jégtáblának a térfogata, amelynek mérete 6 m×4 m×0,2 m? ($\alpha_{jég} = 5{,}1 \cdot 10^{-5}\ \frac{1}{°C}$.)

8. A 'S Gravesande készülékkel a *131.3. ábra* kísérletét szeretnénk elvégezni. Szobahőmérsékleten (20 °C) a rézből készült gyűrű belső átmérője 25 mm, az ugyancsak rézből készült golyóé ennél 0,03 mm-rel kisebb.

a) Elvégezhető-e a kísérlet, ha melegítésre vizet használunk?

b) Ha igen, akkor legalább mekkora legyen a meleg víz hőmérséklete?

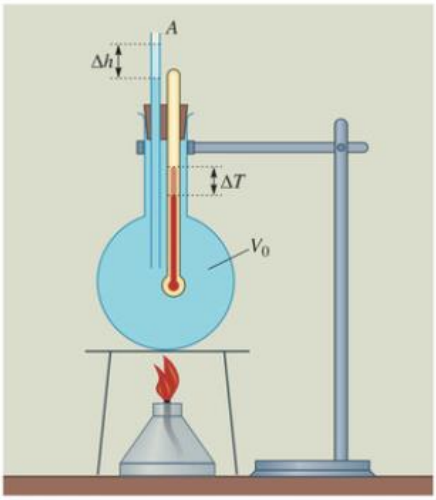
c) Mi a helyzet, ha az eszköz készítésénél vasat használtak?

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.



134.1. A folyadékok hőtágulását vizsgáló kísérleti eszköz

Vegyük fel a $\Delta V - \Delta T$ grafikont és illesszünk egyenest a mérési pontokra! (*134.2. ábra*)

A mérési adatok alapján a felvett grafikonból a folyadékok köbös hőtágulására a következő 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.**

Így a következő összefüggést írhatjuk fel:

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

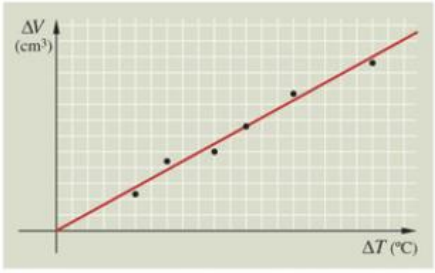
A folyadék hőtágulásának mértékét jellemző β anyagi állandót térfogati hőtágulási tényezőnek nevezzük. Mértékegysége: $\frac{1}{°C}$.

A térfogati hőtágulási tényező számértéke megadja, hogy az egységnyi térfogatú folyadék térfogata mennyivel változik meg, ha a hőmérséklet 1 °C-kal változik.

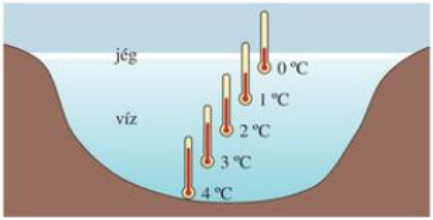
A megváltozott térfogat kiszámítására most is használhatjuk az alábbi összefüggést:

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

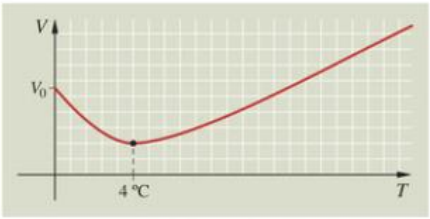
A folyadékok jobban tágulnak, mint a szilárd testek, térfogati hőtágulási együtthatójuk 10^{-4}–10^{-3} nagyságrendű, vagyis 1 °C hőmérséklet-változás esetén a folyadékok relatív térfogatváltozása 0,01–0,1%.



134.2. Folyadékok hőtágulásának $\Delta V - \Delta T$ grafikonja



135.1. A befagyott tó jege alatt a víz hőmérséklete lefelé növekszik. *Hogyan változik lefelé a víz sűrűsége?*



135.2. A víz V–T grafikonja a melegítés kezdetén 0 °C közelében

Néhány folyadék térfogati hőtágulási együtthatója 18 °C kezdeti hőmérsékletre 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 tágulás folyadék vékony csőben van, akkor a folyadékoszlop hosszának megváltozását úgy is kiszámíthatjuk, hogy a folyadék tágulását lineáris tágulásnak vesszük. Ekkor $\alpha = \frac{\beta}{3}$ lineáris hőtágulási tényezővel számolhatunk. A folyadékszál hosszváltozását a

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

lineáris hőtágulás képletével nyerjük.

A víz tágulásakor eltérően viselkedik a többi folyadékhoz képest, melegítéskor 0 °C-tól 4 °C-ig a térfogata csökken, és csak további hőmérséklet-növekedéskor tágul közelítőleg egyenletesen. Ezért a víz sűrűsége 4 °C hőmérsékleten a legnagyobb. A víznek ez a sajátos viselkedése teszi lehetővé, hogy a tavak, folyók télen ne fagyjanak be teljesen.

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, így a jégréteg lefelé vastagszik. A jég jó hőszigetelése révén (az eszkimók jégből készítik a kunyhójukat) a jég alatti víz további hűlése megszűnhet. Emiatt a vízi élőlények nem pusztulnak el télen a tavak, folyók jégpáncélja alatt sem (feltéve, ha elég mély a tó vagy a folyó).



3D

MEGJEGYZÉSEK

1. A folyadékos hőmérőkben korábban higanyt vagy más, alacsony fagyáspontú folyadékot (pl. alkoholt) alkalmaztak, így a hőmérséklet tág határok között volt mérhető. A higanyt mérgező hatása miatt 2009. óta uniós szabályozás szerint más folyadékkal (pl. folyékony galliummal) kell helyettesíteni. A galliummal akár 30–1000 °C tartományban is mérhetünk hőmérsékletet magas forráspontja miatt.
2. A testek sűrűségének hőmérséklettől való függését a köbös hőtágulási képletből kaphatjuk meg. A levezetéskor kihasználjuk, hogy hőtágulás során a testek tömege állandó marad. Így felírhatjuk a $V_0 \cdot \rho_0 = V \cdot \rho$ egyenlőséget. Ebből – felhasználva a $V = V_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta T)$ összefüggést – kapjuk a sűrűségekre vonatkozó képletet: $\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta \cdot \Delta T}$.

   A testek hőtágulással együttjáró sűrűségváltozásának nagy jelentősége van környezetünkben. Amíg a szilárd testek sűrűségének hőhatásra bekövetkező kismértékű változása kisebb gyakorlati jelentőségű, addig annál jelentősebb a folyadékok jóval nagyobb mértékű sűrűségváltozása.

Mindennapi tapasztalat, hogyha valamilyen folyadékokat edényben, alulról melegítjük, akkor állandó felfelé irányuló folyadékáramlás jön létre, mivel az edény alján felmelegedett, kisebb sűrűségű folyadékrész helyett cserél a fent elhelyezkedő hidegebb, nagyobb sűrűségűvel. Ezt nevezzük hőáramlásnak, amely elősegíti az edényben lévő folyadék gyors felmelegedését.

A természetben ugyanakkor – a felülről a napsugárzás által történő hőátadásnál – a tavak, folyók vizének felmelegedett felső rétegének kisebb a sűrűsége, mint a hidegebb alsó vízrétegeké, így a meleg felső folyadékréteg a felszínen marad, gátolva ezzel az alsó vízrétegek gyors felmelegedését. Ezt tapasztalhatjuk nyáron a természetes vizekben (például Balaton, Duna stb.) történő fürdőzésnél is.



136.1. Hőáramlás létrejötte melegítéskor

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. Télen hideg időben egy színültig gázolajjal teletöltött, nyitott bádogkannát a fűtött szerelőműhelybe visszük. Mit tapasztalunk? Magyarázzuk meg a jelenséget!
3. A folyadékos hőmérőben általában nem használnak vizet. Vajon miért? Soroljunk fel néhány érvet!
4. Mi lehet az előnye egy etil-alkohollal töltött folyadékos lázmérőnek a higanyossal szemben? (Használjuk a hőtágulási táblázatot!)
5. Milyen hatással járhat Földünk globális felmelegedése a tengerek, óceánok szintjének változására? Miért?
6. Hogyan fagynának be a tavak és a folyók, ha a víz 0 °C-tól végig egyenletesen tágulna?
7. Melegítsünk egy kb. 5 liter befőttes üvegbe öntött vizet felülről merülőforralóval! Mérjük a hőmérsékletet különböző mélységben! Milyen furcsaságot észlelünk? Magyarázzuk meg!

FELADATOK

1. A 2. gondolkodtató kérdésben szereplő kannát 20 liter térfogatú gázolajjal öntötték színültig a kinti 5 °C hőmérsékleten. A szerelőműhelyben 20 °C a hőmérséklet. 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 vaslemezből készült 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 $V_{ki} = \Delta V_g - \Delta V_ü =$ **0,29 dm³** lesz.

2. Mekkora a 10 dm³ 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 cm³. 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 térfogata 1,5%-kal növekedett. Mekkora a folyadék köbös hőtágulási együtthatója? Mi lehetett a folyadék?

5. A folyadékok tágulását vizsgáló kísérletben etil-alkoholt használunk, az edényben és a hozzá csatlakozó üvegcsőben a folyadék együttes térfogata 200 cm³. A cső keresztmetszete 0,25 cm². 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. Mekkora a víz sűrűsége 100 °C-on, ha a sűrűsége 4 °C-on 1000 $\frac{kg}{m^3}$?

8. Mi lehet az anyagszerkezeti magyarázata annak, hogy a víz a 0–4 °C hőmérsékleti tartományban hőtáguláskor rendellenesen viselkedik? (Keressük a választ az internetről!)

9. A meleg víz sűrűsége csökken. Elmerül-e egy jégkocka –mielőtt elolvadna – a 90 °C hőmérsékletű meleg vízben? Ha nem, akkor mekkora hőmérsékletű vízben következne be a jégkocka elmerülése? (A víz sűrűségének hőmérséklet-függését tág intervallumban interneten találhatjuk meg.)

2. Gázok állapotváltozásai

2.1. Emlékeztető. Állapotjelzők, állapotváltozások

A gázok hőhatásokra (ha térfogatuk változhat) kitágulhatnak vagy összehúzódhatnak. A gázok hőtágulásának mértéke mintegy százszorosa a szilárd testekének és a folyadékokénak. Ezért a gázok hőhatásokra létrejövő sűrűségváltozása is érzékelhetőbb. A szabadon táguló gázok melegedésekor jelentős hőáramlás jön létre. Ezt kísérletileg is könnyen bemutathatjuk papírkígyóval.

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.

Ha a gázokat melegítjük vagy hűtjük, akkor nem mindig változik meg a térfogatuk.

Ha például egy dugóval lezárt lombikot melegítünk, a benne lévő levegő is melegszik, de térfogata nem változik, megegyezik a lombik közel állandó térfogatával. A bezárt levegő nyomása melegítéskor növekszik, hűtéskor pedig csökken.

Az is előfordulhat, hogy a gáz lehűlés közben tágul ki, miközben a nyomása lecsökken. (Gondoljunk a szifonpatronban lévő CO_2 gázra.) A gázok térfogatát tehát nemcsak a hőmérsékletük, hanem a nyomásuk is befolyásolja.

GÁZOK ÁLLAPOTJELZŐI

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.

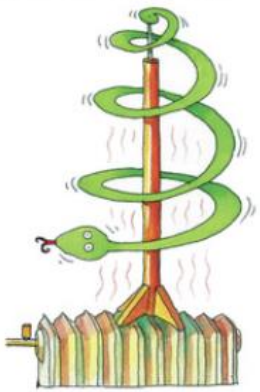
Adott minőségű gáz (levegő, O_2, H_2 stb.) állapotát az alábbi legfontosabb állapotjelzők határozzák meg:

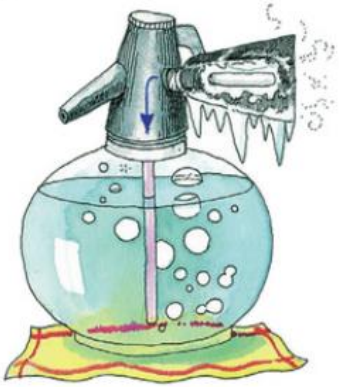
- a gáz ***T* hőmérséklete,**
- a gáz ***p* nyomása,**
- a gáz ***V* térfogata** és
- a gáz ***m* tömege.**

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.

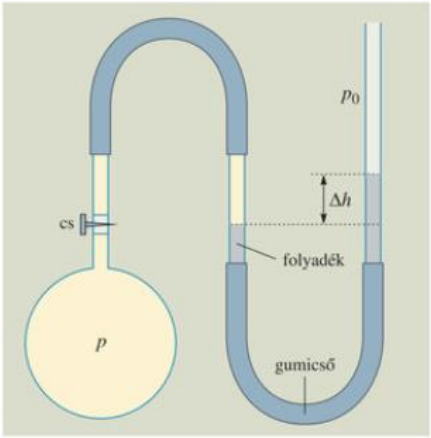
A gáz **tömegét** is mérni tudjuk olyan, csappal ellátott edény felhasználásával, amelyből ki lehet a gázt szivattyúzni. A gáz tömege a gázzal töltött edény és a légritkított teret tartalmazó edény tömegének különbsége.







139.1. A légköri nyomást barométerrel mérjük. *Miből származik a légnyomás?*



139.2. Gázok nyomásának mérése folyadékos manométerrel

A gázokkal végzett kísérletek során gyakran kell mérnünk a gázok nyomását. Ehhez legtöbbször szükségünk van a külső légnyomás értékére, melyet barométerrel mérhetünk meg.

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

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

A Torricelli-féle kísérlet alapján mért légnyomás értéke tengerszinten $h = 76$ cm higanyoszlop esetén:

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

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

Ezt a légnyomásértéket **normális légköri nyomásnak nevezzük** (pontos értéke: 101,325 kPa).

Mivel a légnyomás a fölöttünk lévő légkör súlyából származik, ezért értéke változik, függ a tengerszint feletti magasságtól és a levegő páratartalmától is. Ezért szükséges, hogy a méréskor a légnyomás pontos értékét ismerjük.

Csappal ellátott üvegedényben a gáz nyomását mérhetjük úgy, hogy az edényhez hajlékony csővel folyadékot tartalmazó U-alakú csövet csatlakoztatunk (az elrendezést manométernek nevezzük, *139.2. ábra*).

A csap (cs) kinyitása után létrejött Δh folyadékszint különbsége adja meg a gáznyomás és a külső légnyomás eltérését, a **túlnyomást** vagy a **nyomáshiányt.** A gáz nyomását a

$$p = p_0 \pm p_{\text{foly.}}$$

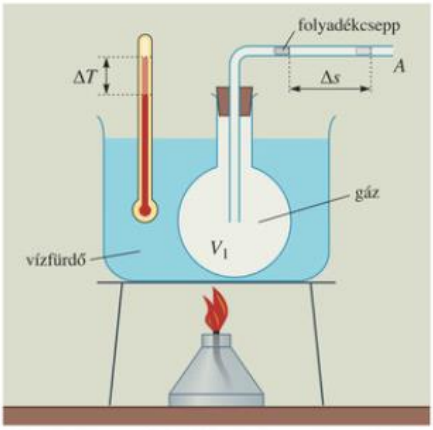
képlettel kapjuk meg.

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



139.3. Keréknyomás beállításakor túlnyomást mérünk

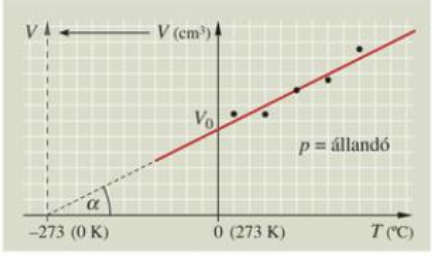
2.2. Gázok állapotváltozása állandó nyomáson (izobár állapotváltozás) – gázok szabad hőtágulása



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

A gázok állandó nyomáson történő – **szabad tágulását** – pl. úgy valósíthatjuk meg, hogy a gázt dugattyúval ellátott hengerbe helyezzük, ahol a dugattyú a külső és a belső nyomás egyezése miatt egyensúlyban van, így egyenletes mozgással szabadon mozoghat.

A gázok izobár állapotváltozásának vizsgálatára végezzük el a *140.1. ábra* szerinti kísérletet. Legyen a folyadékcseppel 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 folyadékcsepp 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!



140.2. Ideális gázok V–T grafikonja

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

A V–T grafikonon felvett mérési pontokhoz most is egy egyenes illeszthető. Ennek meghosszabbítása bármely gáz esetén közelítően –273 °C-nál metszi a hőmérséklet tengelyt. Ha a 0 °C-hoz tartozó térfogatot V_0-lal jelöljük, akkor a felvett egyenes meredeksége:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{V_0}{273\ °C}.$$

Így a V–T grafikon egyenesének egyenlete:

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

ahol T-t °C-ban mérjük.

Az egyenlet jobb oldalán V_0-t kiemelve kapjuk, hogy

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

A kifejezés formailag megegyezik a szilárd testek és folyadékok térfogati hőtágulási törvényével, ahol most a köbös hőtágulási tényező $\beta \approx \frac{1}{273}\frac{1}{°C}$ értéknek vehető.

Figyelemreméltó, hogy a **gázok köbös hőtágulási tényezője anyagi minőségtől alig függ.**

Így lehetőség kínálkozik arra, hogy a gázoknak egy általános, **minőségtől független modelljét** vezessük be.

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

Az olyan **valódi** (vagy reális) **gázokat,** amelyek hőtágulásánál a $\beta_{id.}$ értéke a fenti értéket jól megközelíti, ideális gázoknak tekintjük.

Gáz anyaga	$\beta\left(\frac{1}{°C}\right)$	$\beta_{id.}$-től való %-os eltérés
ammónia	0,003802	3,80
hélium	0,003660	0,10
hidrogén	0,003662	0,03
levegő	0,003675	0,32
oxigén	0,003674	0,30
nitrogén	0,003674	0,30

141.1. A valódi gázok hőtágulási tényezői normál állapotban jól egyeznek az ideális gázéval

Az ideális gázokra vonatkozó törvényszerűségek nagy pontossággal teljesülnek normál állapot közelében ($T \approx 0$ °C és $p \approx 10^5$ Pa) a valódi gázokra is (*141.1. táblázat*).

A KELVIN-SKÁLA BEVEZETÉSE

A gázok V–T grafikonja alapján 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.

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. Ebből adódik, hogy például a testek fajhőjének számértéke megegyezik akár $\frac{J}{kg \cdot °C}$, akár $\frac{J}{kg \cdot K}$ egységekben számoljuk azt. Tehát a víz fajhője $4{,}18 \frac{J}{kg \cdot °C} = 4{,}18 \frac{J}{kg \cdot K}$.

A $T = -273$ °C nemcsak 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 joggal nevezzük a 0 K-t **abszolút zéruspontnak.** Az abszolút zéruspont $T = -273$ °C értéke kerekített érték. **A pontosabb érték $T = -273{,}15$ °C.**

GAY-LUSSAC I. TÖRVÉNYE

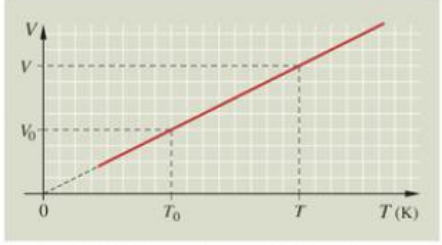
A **Kelvin-skálát** alkalmazva állandó nyomáson az ideális gázok térfogata és abszolút hőmérséklete között egyenes arányosság áll fenn. Ennek a képe az origóból kiinduló félegyenes.

Az egyenes arányosság tetszőleges összetartozó értékpárra is igaz, vagyis:

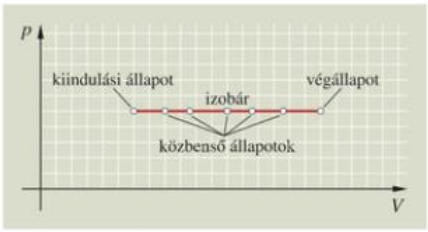
$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}.$$

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

A valódi gázok annál inkább ideális gázként viselkednek, minél **kisebb a sűrűségük,** és minél **magasabb a hőmérsékletük.** A valódi és az ideális gáz közötti különbség molekuláris magyarázatát a molekuláris hőelmélet tárgyalásánál adjuk meg.



141.2. Az izobár állapotváltozás V–T diagramja



142.1. Az izobár állapotváltozás p–V diagramja

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.

Megkülönböztetünk p–V, V–T és p–T diagramokat. Leggyakrabban közülük 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.**

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. Alacsony 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 *140.2.* és a *141.2. ábra* piros színű grafikonja, mielőtt a hőmérsékleti tengelyt metszené.
3. 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. **Nem lehet az abszolút hőmérséklet zérus és negatív!** Ennek anyagszerkezeti magyarázatát a molekuláris hőelméletben ismerhetjük meg.

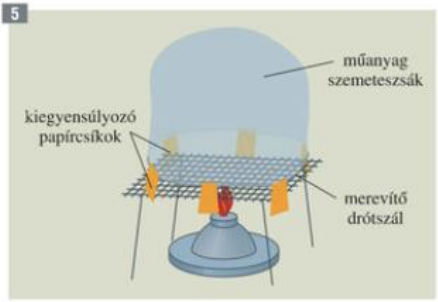
GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

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. Miért lehet poros a kályhák és légáramlásos kandallók fölött a szoba mennyezete? Hogyan gátolhatjuk meg a mennyezet elszennyeződését?
3. A természetben milyen nagy légáramlatokat ismerünk? Milyen hatással vannak ezek az adott földrész éghajlatára?
4. Az utasokat szállító hőlégballonok közlekedésénél miért kell időközönként a ballonban lévő levegőt forró gázlánggal melegíteni? Mi történik, ha útközben kifogy a melegítő készülékből a gáz?



5. Készítsünk léghajómodellt! Könnyű műanyag szemeteszsák szájához ragasszunk néhány kiegyensúlyozó papírcsíkot. Esetleg a szája köré könnyű merevítő drótszálat is erősíthetünk. Az így elkészített modellt a szájával lefelé tartsuk fémrácsos állvány fölé. Ha ezután borszeszégő lángjával alul középen (hogy a zsák meg ne olvadjon), a rács alatt melegítjük a levegőt, a zsák hamarosan emelkedni kezd, ha elengedjük. A modellünk kis idő múlva visszaereszkedik. Magyarázzuk meg az érdekes kísérletet!

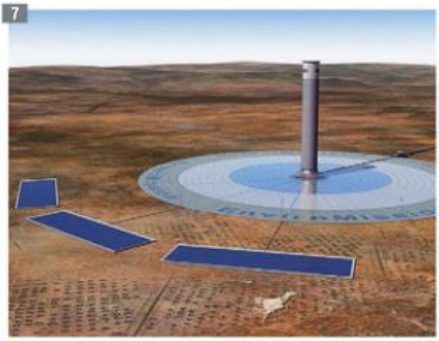
5



6. Mit jelentenek az anyagok abszolút zéruspont közelében mutatott olyan szokatlan tulajdonságai, mint a *szupravezetés, szuperfolyékonyság, szuperszilárdság?* Szerezzünk erről bővebb ismereteket az internetről!

7. A jövő energiatermelője lehet Nap–szél energia torony, amely a levegő hőhatásra bekövetkező sűrűségváltozását használná fel. Működéséről szerezzünk több ismeretet az internetről!

7



OLVASMÁNY

Földünk tenger- és légáramlatairól



143.1. Egy ciklonról készült műholdfelvétel

A Föld felszínének egyenetlen felmelegedése következtében a légkör, az óceánok és a tengerek vizeinek hőmérséklete különböző, ezért a hőmérsékletek kiegyenlítődésére hőáramlások jönnek létre a légkör és a vizekben egyaránt.

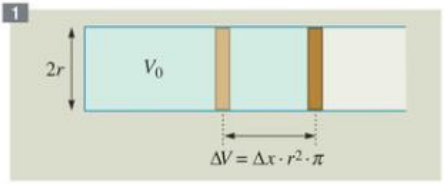
A vízszintes **irányú levegő áramlás a szél.** A levegő mozgási energiáját használják fel a szélerőművekben. Ezeknek legfőbb előnyük, hogy energiatermelésük nem jár káros szén-dioxid kibocsátással. Hátrányaikhoz sorolható a széljárástól függő egyenlőtlen energiaszolgáltatás, a viszonylagosan nagy területigény, a földrajzi helytől való függőség.

A jelentősebb **tengeri áramlatok** (pl. Golf áramlat), nagymértékben befolyásolják az adott földrajzi terület éghajlatát. Hideg és meleg áramlatokat különböztetünk meg. Az áramlatok vizének sűrűségétől függően hol az óceán (vagy tenger) mélyére süllyednek le, hol pedig onnan felemelkednek.

Az újabb kutatások szerint a globális felmelegedésnek várható következménye lehet az áramlatok megváltozása, amely éghajlat változáshoz is vezethet. Vannak tervek olyan vízierőművek létesítésére is, amelyek a tengeráramlatok mozgási energiáját használják fel.

FELADATOK

1. Egy $2r = 10$ cm átmérőjű hengeres edényben könnyen mozgó dugattyúval 5 dm³ 0 °C hőmérsékletű levegőt zárunk el. A külső légnyomás 100 kPa. Az edényt a fűtött szobába visszük, ahol a hőmérséklet 27 °C.



a) A levegő felmelegedése során a dugattyú mekkora elmozdulására számíthatunk, ha a levegőt ideális gáznak tekintjük?

b) Mennyi a levegőnek, mint valódi gáznak a térfogati tágulási együtthatója állandó nyomáson, ha a dugattyú ténylegesen 6,32 cm-t mozdult el a felmelegedés során?

c) A fenti eredmények alapján mennyire vehető ideális gáznak a levegő normálállapot közelében?

MEGOLDÁS:

a) $V_0 = 5$ dm³

$T_0 = 0$ °C = 273 K, $T_1 = 27$ °C = 300 K

$2r = 1$ dm

$V_1 = ?$, $\Delta x = ?$

Alkalmazzuk Gay-Lussac I. törvényét:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_0}{T_0} \rightarrow V_1 = V_0 \frac{T_1}{T_0} = 5\,\text{dm}^3 \frac{300\,\text{K}}{273\,\text{K}} = 5{,}4945\,\text{dm}^3.$$

Így a bezárt levegő várható térfogatváltozása és a dugattyú várható elmozdulása:

$$\Delta V = V_1 - V_0 = 0{,}4945\,\text{dm}^3 \rightarrow \Delta x = \frac{\Delta V}{r^2\pi} = \frac{0{,}4945\,\text{dm}^3}{0{,}5^2\pi\,\text{dm}^2} = 0{,}6296\,\text{dm}^3 = \mathbf{6{,}296\ cm.}$$

Tehát a dugattyú várható elmozdulása 6,30 cm két tizedesjegy pontossággal.

b) $V_0 = 5$ dm³

$T_0 = 0$ °C = 273 K, $T_1 = 27$ °C = 300 K

$2r = 1$ dm

$\Delta x = 6{,}32$ cm

$\beta_{lev} = ?$

Használjuk fel a térfogati hőtágulásra vonatkozó összefüggést:

$$\Delta V = \beta_{lev} \cdot V_0 \cdot \Delta T \rightarrow \beta_{lev} = \frac{\Delta V}{V_0 \cdot \Delta T} = \frac{r^2\pi \cdot \Delta x}{V_0 \cdot \Delta T} = \frac{0{,}25\pi\,\text{dm}^2 \cdot 0{,}632\,\text{dm}}{5\,\text{dm} \cdot 27\,°\text{C}} = \mathbf{3{,}675 \cdot 10^{-3}\ \frac{1}{°C}}.$$

c) A kapott érték mindössze 0,3%-kal tér el az ideális gázok $\beta = \frac{1}{273}\frac{1}{°\text{C}} = 3{,}663 \cdot 10\,\frac{1}{°\text{C}}$ hőtágulási együtthatójától. Tehát a levegő mormálállapot közelében jó közelítéssel ideális gáznak tekinthető.

2. 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?

2.3. Gázok állapotváltozása állandó térfogaton (izochor állapotváltozás) – bezárt gáz nyomásának változása hőhatásokra

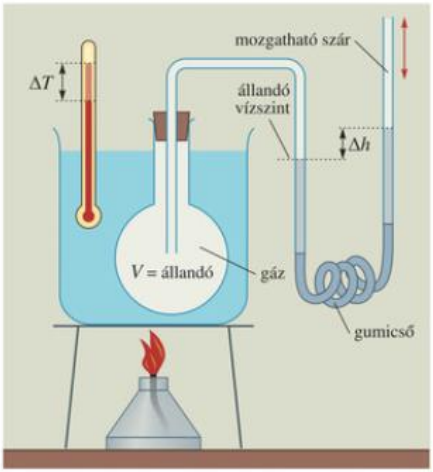
Mindennapos tapasztalat, hogy zárt edényben (amikor a gázok tágulását megakadályozzuk) a gázok nyomása melegítéskor megnő, hűtéskor pedig lecsökken.

GAY-LUSSAC II. TÖRVÉNYE

Állandó mennyiségű és térfogatú gáz melegítésekor vagy hűtésekor a gáznak csak a **nyomása** (p) és a **hőmérséklete** (T) változik. A **speciális állapotváltozást izochor** (ejtsd izokor) – állandó térfogatú – változásnak nevezzük.

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

A *145.1. ábrán* látható kísérletben a lombikban lévő gáz hőmérséklete a vízfürdőn keresztül változtatható. Hogy a gáz térfogata ne változzon a közlekedőedény bal szárában a folyadékot állandó szinten kell tartani. Ez a jobb szár le-fel mozgatásával érhető el. A gáz nyomását a Δh szintkülönbség mérésével, a $p_{gáz} = p_{légkör} \pm p_{foly.}$ képlet alapján számoljuk ki.



145.1. Az izochor állapotváltozás vizsgálata. *Hogyan biztosítható a térfogat állandósága?*



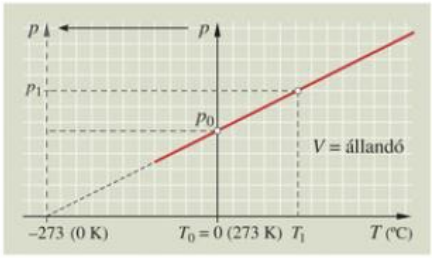
145.2. Lakástűz esetén a felforrósodott PB gázpalack „gyújtóbombaként" robbanhat fel

A p–T grafikonon a mérési adatok (p; T) pontjaira most is egy egyenes illeszthető, amelynek meghosszabbítása a T tengelyt a –273 °C-nál metszi (*145.3. ábra*). Ezúttal is célszerű a Kelvin-skálára áttérni. Az így kapott **p–T diagram** az **egyenes arányosság** képe.

A p–T diagramról leolvasható, hogy bármely összetartozó (p; T) értékpárra fennáll az alábbi összefüggés:

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

Vagyis az állandó térfogatra bezárt adott mennyiségű ideális gáz nyomása egyenesen arányos a gáz abszolút hőmérsékletével. Ez Gay-Lussac II. törvénye.



145.3. Az izochor állapotváltozás p–T grafikonja

OLVASMÁNY

Louis Joseph Gay-Lussac és Lord Kelvin

Gay-Lussac, Joseph-Louis (1778–1850) francia vegyész és fizikus főként a gázok viselkedését kutatta, de széleskörű kutatásokat végzett a kémiai analízis területén is. Nevéhez fűződik a bór és a jód elemek felfedezése. Nevezetes a róla elnevezett, gázokra vonatkozó Gay-Lussac-féle vegyülési törvénye is: mely szerint a vegyülő gázok térfogatainak aránya kis egész számok arányával egyezik meg. Így pl. a vízzé egyesülő hidrogén és oxigén gázok térfogataránya 2:1. Ez a vegyülési törvény, Dalton súlyviszonyok törvénye és Avogadro hipotézise (azonos térfogatú gázok azonos számú gázrészecskét tartalmaznak) tette lehetővé a vegyületeket alkotó molekulák tapasztalati képletének és az atomok tömegarányainak meghatározását.

Gay-Lussac-ot tekintik a meteorológia egyik megalapítójának is. Magas légköri kutatásokat végzett hidrogénnel töltött léggömbbel felemelkedve. 1804-ben 7016 méteres emelkedésével 50 évig tartó magasságrekordot állított fel.



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

Lord Kelvin – szül.: William Thomson – (1824–1907) skót matematikus, fizikus és mérnök. Kora jelentős nemzetközi hírű tudósa. A Magyar Tudományos Akadémia 1873-ban tiszteleti tagjává választotta. Kutatásait az elektromosság matematikai analízise és a termodinamika területén végezte. Nevéhez fűződik az anyagi minőségtől független abszolút hőmérsékleti skála – más néven termodinamikai hőmérsékleti skála vagy Kelvin-skála – bevezetése. Ennek egységét, a kelvint is az ő tiszteletére nevezték el. A tudós Glasgow egyetemén dolgozott, nemesi nevét az egyetemhez közeli Kelvin folyóról kapta.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Miért nehéz lecsavarni a befőttesüveg melegen lezárt fedelét? 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?

FELADATOK

1. Egy nyomószeleppel ellátott kiüresedett légfrissítő palackot (benne csak levegő van) először 12 °C hőmérsékletű vízfürdőbe helyezünk (ekkor a szelepet nyitjuk, majd újra zárjuk). Ezután a palackot 60 °C hőmérsékletű melegvíz fürdőbe tesszük át. (A külső légköri nyomás 100 kPa.)
   a) Mekkora lesz a palack belsejében a nyomás értéke termikus egyensúly kialakulásakor?
   b) Becsüljük meg, mekkora túlnyomás keletkezne a palackban, ha az üresen, zárt szeleppel szobahőmérsékletről 650 °C -os tűzbe kerülne!
   c) Mekkora feszítőerőt fejt ki a palackban lévő túlnyomásos levegő a palack palástjára, *a)* és *b)* esetben, ha a palack hossza 20 cm, átmérője 5 cm? Az eredmények alapján vonjuk le a megfelelő következtetéseket!

MEGOLDÁS:



a) $p_1 = 100\ \text{kPa}$

$T_1 = 12\ °\text{C} = 285\ \text{K}$

$T_2 = 60\ °\text{C} = 333\ \text{K}$

$p_2 = ?$

Alkalmazzuk Gay-Lussac II. törvényét:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \rightarrow p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 100\ \text{kPa} \frac{333\ \text{K}}{285\ \text{K}} = \mathbf{116{,}84\ kPa.}$$

Tehát a melegvíz fürdőben a palack belsejében a nyomás 116,84 kPa-ra növekszik.

b) $p_1 = 100\ \text{kPa}$

$T_1 = 20\ °\text{C} = 293\ \text{K}$

$T_2 = 650\ °\text{C} = 923\ \text{K}$

$p_2 = ?,\ \Delta p = p_2 - p_1 = ?$

Ismét alkalmazzuk az izochor állapotváltozásra vonatkozó összefüggést:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \rightarrow p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 100\ \text{kPa} \frac{923\ \text{K}}{293\ \text{K}} = \mathbf{315\ kPa.}$$

Így a palackban lévő túlnyomás $\Delta p = p_2 - p_1 = 215\ \text{kPa}$.

c) A palackban kialakuló túlnyomásból származó palástra ható feszítő

első esetben:

$$F_1 = \Delta p_1 \cdot A = \Delta p_1 \cdot 2r \cdot \pi \cdot \ell = 16{,}84 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 0{,}05\pi\ \text{m} \cdot 0{,}2\ \text{m} = \mathbf{528{,}7\ N.}$$

Ez kb. 1 zsák búza súlyának megfelelő erő, amelyet a vastag falú palack minden bizonnyal elvisel.

második esetben:

$$F_2 = \Delta p_2 \cdot A = \Delta p_2 \cdot 2r \cdot \pi \cdot \ell = 215 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 0{,}05\pi\ \text{m} \cdot 0{,}2\ \text{m} = \mathbf{6750\ N.}$$

Ez kb. egy 2700 kg tömegű kisteherautó egyik kereke nyomóerejének felel meg, amelyet már nem biztos, hogy elbír a palack fala. A palack szétrobbanhat és súlyos sérüléseket okozhat, ezért a figyelmeztető felhívás az ilyen palackon:

„A palackot 50-60 °C hőmérsékletnek, sugárzó hő hatásának kitenni, még üres állapotban is tűzbe dobni tilos!"

2. Egy nyári délelőttön a benzinkútnál, amikor a hőmérséklet 20 °C, az autó kerekeiben 200 kPa-ra állítjuk be a nyomást. 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?

3. Egy befőttesüveget melegen, légmentesen zárunk le kör alakú, 8 cm átmérőjű fedéllel. Ekkor a bezárt levegő hőmérséklete 80 °C. A légnyomás értéke 101 kPa. Mekkora erővel nyomódik rá a fedél az üvegre, ha a befőttesüveg kihűl, és a belső hőmérséklet 20 °C lesz?

4. 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.)

5. Egy hűtőszekrényből, ahol a belső hőmérséklet 10 °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 9 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?

5



6. Végezzük el a következő érdekes kísérletet! Egy héjától megtisztított, kemény főtt tojást helyezzünk egy előzőleg lánggal felmelegített hőálló lombik szájára. Kis idő elteltével a lombik egészben beszippantja a főtt tojást. A szájával lefelé fordított lombikból melegítéssel ismét visszanyerhetjük az egész tojást. Adjunk magyarázatot az érdekes jelenségre!

6



7. Helyezzünk két üres műanyagpalackot – egyiket nyitott, másikat csavaros fedéllel jól lezárt állapotban – a hűtőszekrényünk mélyhűtő részébe.

a) 10-15 perc múlva vegyük ki a palackokat a hűtőből! Mit tapasztalunk? Magyarázzuk meg!

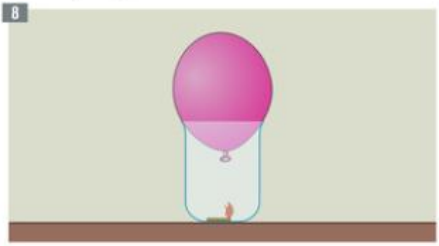
b) A kivétel után a nyitott palackot is jó erősen zárjuk le. Újabb 10-15 perc elteltével, kezünkkel ellenőrizzük a palackok feszességét! Magyarázzuk meg a jelenséget!

c) Becsüljük meg a feszesebb palackban a túlnyomást, ha a szoba hőmérséklete 27 °C, a mélyhűtő hőmérséklete pedig –13 °C és a légköri nyomás 100 kPa!

d) Mekkora erő feszíti a feszes palack 8 dm^2 területű palástját?

8. Dobjunk pohárba égő gyufát, majd szorítsunk a pohár szájához kissé felfújt lufit! Kis idő elteltével próbáljuk ezután a lufit felemelni! Adjunk magyarázatot a tapasztaltakra!

8

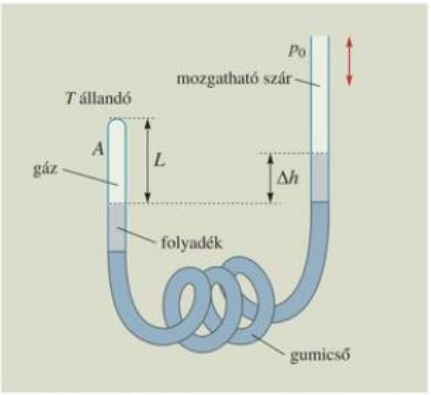


2.4. Gázok állapotváltozása állandó hőmérsékleten (izotermikus állapotváltozás) – gázok nyomásának változása térfogat változtatás hatására

Egy kerékpárpumpa dugattyúját állítsuk a henger közepére, majd fogjuk be ujjunkkal a tömlő végét! Ha ezután a dugattyút befelé nyomjuk, majd elengedjük, a dugattyú visszaugrik; ha pedig 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.



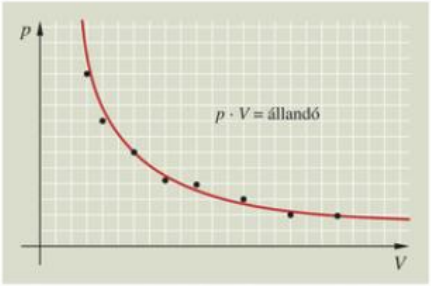
149.2. *Hogyan változtatjuk a bezárt gáz nyomását a gázok izoterm állapotváltozásának vizsgálatára szolgáló kísérleti összeállításnál?*

BOYLE–MARIOTTE TÖRVÉNYE

A gázok izotermikus állapotváltozását vizsgálhatjuk a *149.2. ábrán* látható kísérleti eszköz segítségével.

Tekintsünk egy U alakú, egyik végén zárt, másik végén nyitott üvegcsövet tartalmazó, alul hajlékony gumicsővel összekötött közlekedőedényt, amelyben folyadék található. Az összeállítás jobb oldali, felül nyitott szára függőleges irányban elmozdítható. Így a bal oldali zárt szárban található gáz térfogata a folyadékszint változtatásával csökkenthető vagy növelhető.

A bezárt gázoszlop L hosszát és a cső belső A keresztmetszetét mérve a térfogat: $V = A \cdot L$. A folyadékszintek Δh különbségéből a bezárt gáz nyomása a $p = p_0 + p_{\text{foly.}}$ összefüggéssel számítható ki.



149.1. A gáz nyomását a térfogat függvényében a fordított arányosság grafikonja, az **izoterma** mutatja. *Matematikában hogyan nevezzük a grafikon görbéjét?*

A mérésekből kapott $p \cdot V$ szorzatok közel állandónak adódnak. A p–V diagramon felvett (p; V) mérési pontokra jó közelítéssel a fordított arányosság görbéje illeszthető.

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.

3D



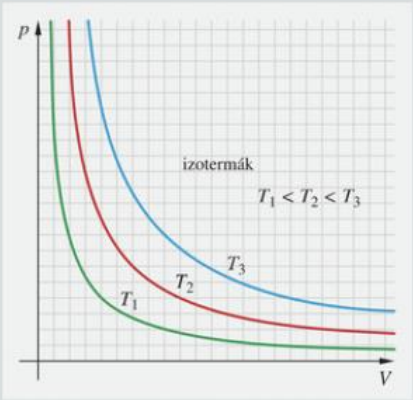
150.1. *Robert Boyle* (1627–1691) angol fizikus és kémikus és *Edmé Mariotte* (1620–1684) francia fizikus

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.

Az izoterm állapotváltozások törvényszerűségét egyszerű eszközzel, az ún. **Melde-csővel** is vizsgálhatjuk (*151.1. feladat ábrája*). A kísérleti eszköz egy vékony, egyik végén zárt, másikon nyitott üvegcső, melyben egy h hosszúságú folyadékoszlop levegőoszlopot zár be a csőbe. (Korábban folyadéknak higanyt használtak, melyet más folyadékkal, pl. vízzel helyettesíthetünk.) A kísérlet részletes leírását keressük az interneten!

MEGJEGYZÉSEK

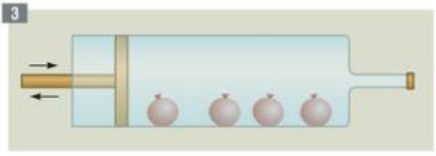
1. Ha különböző T hőmérsékleten akarjuk a kísérletet elvégezni (*149.2. ábra*), akkor a bezárt gázt tartalmazó bal oldali csövet változtatható hőmérsékletű vízfürdőbe helyezzük. Ekkor a $T_1 < T_2 < T_3$ hőmérsékletekhez tartozó $p \cdot V$ szorzatok értéke egyre nagyobb lesz, ezért az ábrázoláskor kapott hiperbolák – az **izotermák** – egymás felett helyezkednek el.
2. Ha a p–V síkon berajzoljuk az izotermák görbe-seregét, akkor azok – egy tereptérkép szintvonalaihoz hasonlóan – tájékoztatnak bennünket a síkon az egyes állapotváltozások hőmérsékleti viszonyairól.



150.2. 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 nagyobb méretű, átlátszó műanyag fecskendőbe apró, kissé felfújt és bekötött „vízibomba" lufikat. A dugattyúval – fecskendő végét befogva – préseljük és ritkítsuk a fecskendő hengerében a levegőt! Hogyan viselkednek az apró „gömböcskék" a hengerben? Magyarázzuk meg a látottakat!



4. Az előző kísérlet alapján magyarázzuk meg, miért keletkezhet a búvárok vérében légbuborék, ha hirtelen emelkednek fel a víz alól nagy mélységből?

5. Szereljünk szét egy kerékpárpumpát, tanulmányozzuk és értelmezzük a működését! Miért kell a dugattyút olajozással puhán tartani? Hogyan készíthetnénk belőle légszivattyút?

6. Töltsünk tele egy műanyagpalackot vízzel, majd helyezzünk a palackba egy vizet tartalmazó gyógyszeres fiolát szájával lefelé. Próbálgatással annyi vizet hagyjunk az üvegcsében, hogy az éppen ne merüljön el. Ezután jól zárjuk le a palackot, és gyakoroljunk kezünkkel erős nyomást a palack falára. Ha jól egyensúlyoztuk ki a „búvárunkat", akkor az engedelmesen lesüllyed, majd a nyomás megszűnte után felemelkedik.

   Magyarázzuk meg az érdekes jelenséget! A búvár mellé apró rézdróttal kiegyensúlyozott parafa darabkákat is tehetünk. Azok is együtt mozognak a búvárral. Miért?

6



7. Mi a hasonlóság és az eltérés a Cartesius-búvár és a tengeralattjáró merülési elvében?

8. Hogyan működik a légpuska és a légpisztoly? Interneten nézzünk utána! Készítsünk légpuskamodellt bodzafából és kenderkócból vagy krumpliból! (Keressük az interneten bodzapuska kulcsszónál!) Magyarázzuk meg a modell működését!

9. Vajon működne-e a Cartesius-búvár kísérlet a Föld körül keringő űrhajó kabinjában? Válaszunkat indokoljuk!

FELADATOK

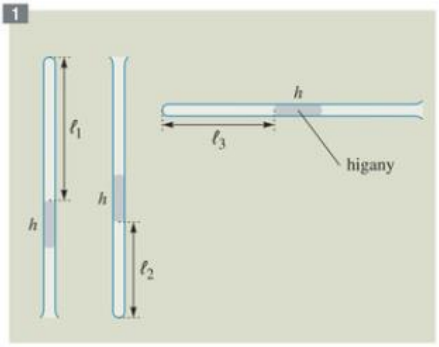
1. Egy higanyos Melde-csővel elvégzett kísérletben a cső két függőleges helyzetében a bezárt levegőoszlop hossza $\ell_1 = 45$ cm, illetve $\ell_2 = 30$ cm, a csőben lévő higanyoszlop hossza pedig $h = 15$ cm volt.

   a) Mekkora volt a külső p_0 légköri nyomás a kísérlet elvégzésekor Hgcm illetve kPa egységekben?

   b) Mekkora lehetett a vízszintes helyzetben tartott csőben a levegőoszlop ℓ_3 hossza?

   c) Mekkora légnyomásnál folyhatott volna ki a higany kísérlet közben a 75 cm hosszú csőből?

1



MEGOLDÁS:

a) Alkalmazzuk a Boyle–Mariotte-törvényt a függőleges csőhelyzetekben a bezárt levegőre:

$$(p_0 - p_h) \cdot \ell_1 \cdot A = (p_0 + p_h) \cdot \ell_2 \cdot A,$$

ahol p_0 a keresett légnyomás, p_h a h hosszúságú higanyoszlop nyomása, A a csőkeresztmetszet (mellyel egyszerűsíthetünk).

Fejezzük ki a légoszlopok $k = \frac{\ell_1}{\ell_2}$ arányát az egyenletből, majd a k-val és p_h-val a keresett p_0 légnyomást:

$$k = \frac{\ell_1}{\ell_2} = \frac{p_0 + p_h}{p_0 - p_h}.$$

Ebből p_0-ra kapjuk:

$$p_0 = \frac{k+1}{k-1} \cdot p_h = \frac{1{,}5+1}{1{,}5-1} \cdot 15 \text{ Hgcm} = 75 \text{ Hgcm}, \quad \text{ahol } k = \frac{45 \text{ cm}}{30 \text{ cm}} = 1{,}5.$$

A Hgcm-ben kapott légnyomásértéket kPa egységekbe átszámítva:

$$p_0 = 75 \text{ Hgcm} = 0{,}75 \text{ m} \cdot 13{,}6 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9{,}81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \mathbf{100{,}062 \text{ kPa}}.$$

b) Ismét alkalmazzuk a törvényt valamelyik függőleges és a vízszintes csőhelyzetben a bezárt levegőre, felhasználva az *a)* kérdésnél kiszámolt $p_0 = 75$ Hgcm légköri nyomás értéket:

$$(p - p_h) \cdot \ell_1 \cdot A = p_0 \cdot \ell_3 \cdot A.$$

Ebből kifejezhetjük a légoszlop keresett hosszát a vízszintes csőhelyzetben:

$$\ell_3 = \frac{p_0 - p_h}{p_0} \cdot \ell_1 = \frac{(75-15) \text{ Hgcm}}{75 \text{ Hgcm}} \cdot 45 \text{ cm} = \mathbf{36 \text{ cm}}.$$

c) Alkalmazzuk gáztörvényt a mostani légnyomás és keresett kritikus légnyomás értékre (amikor a higanyoszlop alsó vége eléri a nyitott csővéget) a cső alul nyitott függőleges kritikus helyzetére:

$$45 \text{ cm} \cdot (75 - 15) \text{ Hgcm} = 60 \text{ cm} \cdot p_{\text{min}},$$

ahol p_{min} a levegő megengedett (higanykiömlés mentes) legkisebb nyomásértéke.

Ebből $p_{\text{min}} = 45$ Hgcm, a kritikus légnyomásérték pedig:

$$p_0' = 45 \text{ Hgcm} + 15 \text{ Hgcm} = \mathbf{60 \text{ Hgcm}}.$$

Megjegyzés: Ilyen kis légnyomás a tengerszint közelében nem fordul elő, csak kb. 2 ezer méter magas hegységekben. Így csak ott kellene tartani a higany csőből való kiömlésétől.

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

3. 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 légnyomásával: $p_k = 100$ kPa.)

4. Egy függőleges állású, súlytalan dugattyúval ellátott henger alapterülete $A = 0{,}5 \text{ dm}^2$. 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.

5. Kísérletezzünk! Mérjük meg Melde-csővel a légnyomást! Készítsünk előzőleg vizes Melde-csövet! Vegyünk egy kb. 90-100 cm hosszúságú egyik végén lezárt, vékony (kb. 3-4 mm átmérőjű) üvegcsövet, melegítsük óvatosan a csövet gázláng fölött, majd lehűtéskor a cső nyitott végét helyezzük vízbe és várjuk meg, míg kb. 10-15 cm hosszú vízoszlop kúszik fel a csőbe. (Célszerű előzőleg a cső nyitott végét kb.10-15 cm hosszan étolajba mártani, hogy a víz ne nedvesítse az üvegcső falát, mert különben a csőbe került vízoszlop könnyen kicsúszhat a csőből.) A kísérlet pontos adatait felvéve számítsuk ki a légköri nyomást! Hasonlítsuk össze barométerről leolvasott értékkel!

6. 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 dugót behelyezzük a hengerbe, akkor az a dugattyútól 30 cm távolságra van. Ha a dugattyút lassan toljuk a hengerbe, akkor mekkora távolságra lesz a henger végétől, amikor a dugó kirepül a hengerből?

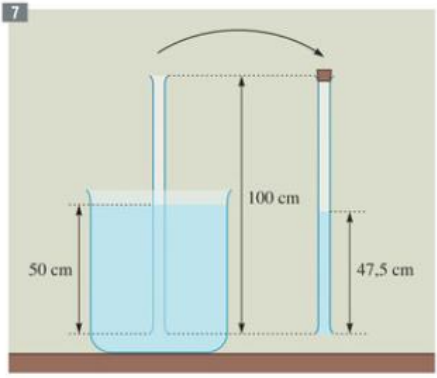


7. Függőleges helyzetben az 1 m hosszú mindkét végén nyitott üvegcsövet félig merítsük vízbe. A cső felső végének lezárásával emeljük ki a csövet a vízből. A cső függőleges állásánál 47,5 cm hosszú vízoszlop maradt a csőben.

a) Mekkora a külső légnyomás?

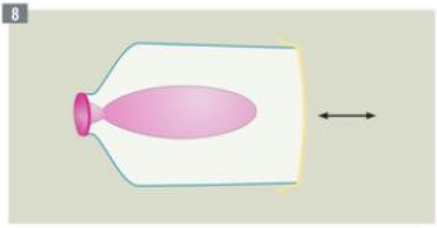
b) Végezzünk hasonló kísérletet, és az adatok alapján számítsuk ki a légnyomás értékét!

7



8. Készítsünk tüdőmodellt! Keményebb falú műanyag palacknak az alsó kb. kétharmadát levágjuk, és a megmaradó részbe egy felfújatlan lufit helyezünk. A lufi nyitott végét kivezetjük a palack szájnyílásán, és visszahajtva, kívülről ráfeszítjük a palack nyílására. A palack szélesebb nyitott végét pedig lezárjuk egy ráfeszített gumihártyával (pl. egy lufiból levágott részt feszítünk rá).

8



a) Húzzuk először a kifeszített gumihártyát kifelé, majd lassan engedjük vissza! Mi történik közben a lufival? Mivel magyarázható ez?

b) Hogyan modellezi a kísérlet a lélegzésünket? Mi feleltethető meg a mellkasnak, tüdőnek, rekeszizomnak?

2.5. Az ideális gázok általános állapotváltozása, egyesített gáztörvény, állapotegyenlet

Gyakran előfordul, hogy gázok állapotváltozásakor több állapotjelző is változik.

Így léggömb felfújásakor a léggömbbe zárt levegő tömege (nő), térfogata (nő), nyomása (nő) egyaránt változik. A kerékpártömlőbe zárt levegő nyomása, térfogata, hőmérséklete változik, ha Napra tesszük a félig felfújt kiszerelt belsőt.

A Diesel-motorok hengerében hirtelen összesűrített levegőnek nemcsak a térfogata és nyomása változik, hanem hőmérséklete is jelentősen megnövekszik, amely a hengerbe befecskendezett gázolaj üzemanyag öngyulladását okozza.

Ezek a tapasztalatok arra késztetnek bennünket, hogy tanulmányozzuk a gázok olyan állapotváltozásait is, amikor a gáznak egyszerre kettőnél több paramétere változik meg.

EGYESÍTETT GÁZTÖRVÉNY

Ha az állandó tömegű gáz mindhárom (p, V, T) állapotjelzője egyidejűleg változik, akkor általános állapotváltozásról beszélünk.

Az állapotváltozás törvényszerűségét kísérleti úton az izochor állapotváltozásnál használt kísérleti összeállítással (*145.1. ábra*) végzett mérésekkel állapíthatjuk meg úgy, hogy most az U-alakú cső jobb szárát rögzítjük, megengedve, hogy a gáznak ne csak a nyomása és hőmérséklete, hanem a térfogata is változzon melegítés közben.

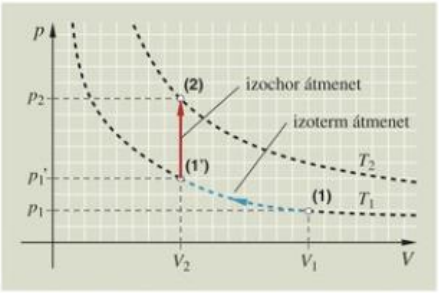
A pontosan végzett mérésekből az alábbi törvényszerűség állapítható meg:

Az állandó tömegű gázok **nyomásának és térfogatának szorzata egyenesen arányos a gáz abszolút hőmérsékletével,** vagyis a $p \cdot V$ szorzat és T hányadosa állandó:

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

Ezt nevezzük **általános** (vagy **egyesített**) **gáztörvénynek,** melyet az alábbi alakban is felírhatunk:

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



154.1. Egyesített gáztörvény levezetése izoterm-izochor állapotváltozásokból

Az egyesített gáztörvényhez a speciális állapotváltozások egyesítésével is eljuthatunk. Így például a Boyle–Mariotte és Gay-Lussac II. törvény egymás utáni alkalmazásával.

Vegyük fel az adott tömegű gáz egymástól minden paraméterben különböző (1) és (2) állapotát a p–V diagramon (*154.1. ábra*)! Az egyik állapotból a másikba különböző utakon juthatunk el (mivel a végállapotok függetlenek a közbenső úttól). Így haladjunk a p–V síkon az (1)→(1')→(2) úton, amely egy **izoterm** és egy **izochor** folyamatból tevődik össze. Ezekre az ismert összefüggéseket írhatjuk fel;

Boyle–Mariotte törvénye:

$$p_1 \cdot V_1 = p_1' \cdot V_2,$$

illetve Gay-Lussac II. törvénye:

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

A második egyenletből p_1'-t kifejezve, és azt az elsőbe helyettesítve rendezés után az egyesített gáztörvényhez jutunk:

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

Az eljárásból kitűnik, hogy az általánosabb törvényszerűség miért kapta az **„egyesített"** jelzőt.

A törvényhez más, egymást követő speciális állapotváltozásokon keresztül is eljuthatunk. (Szorgalmi feladatként próbáljuk ki! Használjuk fel a p–V diagramot!)

ÁLLAPOTEGYENLET

A mindennapi tapasztalatból tudjuk, hogy a gázok állapotváltozása során gyakran tömegük is megváltozik.

Ha propán-bután (PB) gáz gázpalackból gázt fogyasztunk, akkor a palackban lévő gáz tömege, nyomása és a hőmérséklete is egyidejűleg változhat. A palack megemelésével a tömegéből következtethetünk a gázpalack „állapotára", hogy mikor esedékes annak cseréje. Ezért az egyesített gáztörvényben (ahol a gáz m tömege nem változott) szereplő $\frac{p \cdot V}{T}$ hányados állandó értéke biztosan függ a gáz tömegétől, hiszen az üresedő gázpalackban egyre csökken a nyomás – erről a tűzhely pislákoló gázlángja is árulkodik –, és így a hányados is változik.

A fent felsorolt mindennapi tapasztalatok alapján beláthatjuk, hogy az egyesített gáztörvény **$\frac{p \cdot V}{T}$ hányadosa** és a gáz **m tömege** – vagy a tömeggel arányos **n anyagmennyisége** – között egyenes arányosság áll fenn.

Hogyan lehetne az arányossági szorzó értékét meghatározni?

Kémia tanulmányainkból ismert *Avogadro- törvény* szerint: bármely **normál állapotú** ($p_0 = 101\,325$ Pa, $T_0 = 273{,}15$ K) **1 mol anyagmennyiségű ideális gáz térfogata $V_0 = 22\,414$ cm^3.** Ezt a térfogatot **normál moláris térfogatnak** nevezzük.

Helyettesítsük be a törvényben szereplő értékeket a vizsgált törtkifejezésbe:

$$R = \frac{p_0 \cdot V_0}{T_0} = \frac{101\,325\ \text{Pa} \cdot 0{,}022414\ \text{m}^3}{273{,}15\ \text{K}} =$$

$$= 8{,}314\ \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}.$$

Az így kapott R konstans értéket **egyetemes gázállandónak** nevezzük, mivel a fent idézett törvény szerint bármely gázra teljesül.

A fenti gondolatmenetből következik, hogy ha 1 mol helyett n mol anyagmennyiségű gázt veszünk, akkor a törtkifejezés értéke is n-szeresére nő. Így tetszőleges anyagmennyiségű gázra, – az egyesített gáztörvényből adódóan – bármilyen p, V, T értékekre fennáll a $\frac{p \cdot V}{T} = n \cdot R$ egyenlőség.

Az n anyagmennyiség helyére az $n = \frac{m}{M}$ hányadost helyettesíthetjük, ahol **m a gáz tömege,** M pedig a gáz anyagi minőségére jellemző, mólnyi mennyiségének tömegét megadó **moláris tömeg.**

Így a $\frac{p \cdot V}{T} = \frac{m}{M} \cdot R$ egyenlethez jutunk, melyből a keresett arányossági szorzó az $\frac{R}{M}$ hányados lesz, melyet szokás a gáz anyagára jellemző **fajlagos gázállandónak** is nevezni.

Ha az egyenletben a T-t átrendezzük, akkor az ideális gázok p,V, T, m állapotjelzői közötti kapcsolatot megadó egyenlet ismert alakját kapjuk meg:

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

vagy az n anyagmennyiséget használva:

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

ahol $R = 8{,}314\ \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ arányossági szorzó az **egyetemes gázállandó.**

Az ideális gázok teljesen általános állapotváltozását leíró egyenletet állapotegyenletnek nevezzük.

Az ideális gázok állapotegyenletéből könnyen megkaphatjuk a speciális állapotváltozások törvényeit és az egyesített gáztörvényt is.

a) Az állandó tömegű gázok **T = állandó** *izotermikus* állapotváltozásánál az állapotegyenlet jobb oldala állandó értékű. Így az egyenlet:

$$p \cdot V = \text{állandó},$$

a *Boyle–Mariotte-törvényre* egyszerűsödik.

b) A **p = állandó** *(izobár)* esetben, az egyenlet átrendezésével az alábbi alakra jutunk:

$$\frac{V}{T} = \text{állandó}.$$

Ez *Gay-Lussac I. törvénye.*

c) A **V = állandó** *(izochor)* esetben pedig az állapotegyenlet a következő alakra hozható:

$$\frac{p}{T} = \text{állandó}.$$

Így az állapotegyenlet *Gay-Lussac II. speciális törvényéhez* vezet.

d) Ha pedig az állapotváltozás során csak a gáz **m tömege marad állandó,** akkor az állapotegyenlet az *egyesített gáztörvényt* adja vissza:

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

Fejezzük ki a állapotegyenletből a p nyomást, írjuk az $\frac{m}{V}$ hányados helyére a gáz ρ sűrűségét:

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

Az állapotegyenlet így kapott alakjából kiolvasható, hogy **állandó hőmérsékleten a nyomás és a sűrűség között egyenes arányosság áll fenn,** vagy **állandó nyomás mellett a gáz hőmérséklete és sűrűsége között fordított arányosság van.**

Későbbiekben a gáztörvények molekuláris értelmezésénél a nyomás és sűrűség kapcsolatára hivatkozunk, ezért érdemes megjegyezni a nyomás–sűrűség összefüggést.

MEGJEGYZÉSEK

1. Az egyetemes gázállandó R betűjele *Henry Victor Regnault* (1810–1878) francia fizikus, kémikus – *Gay-Lussac* (1778–1850) tanítványa – nevére utal.
2. Az állapotegyenlet n anyagmennyiséget tartalmazó alakjából az ismert **Avogadro-törvény** (1811) olvasható ki: **azonos V térfogatú, azonos állapotú (p, T megegyezik) ideális gázok azonos számú gázrészecskét tartalmaznak az anyagi minőségtől függetlenül.** Az olasz fizikus ezen fontos felismerése hozzájárult ahhoz, hogy az atomhipotézis és a molekuláris hőelmélet a 19. század közepétől jelentős fejlődésnek induljon.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Írjuk a táblázat megfelelő rovatába az alábbi állapotváltozások (kisbetűk) és azoknak megfelelő ábrák (nagybetűk) betűjeleit!

Izoterm	Izochor	Izobár	Általános

a) Egy könnyen mozgó dugattyúval elzárt edényben lévő gázt lassan melegítünk.

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

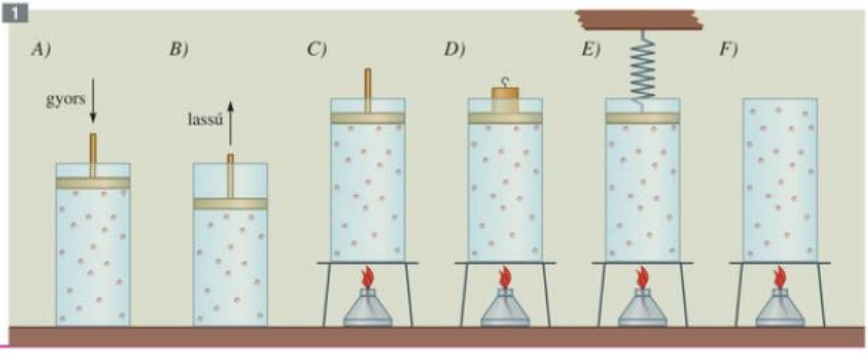
c) A dugattyúval gyorsan összepréseljük a hengerbe zárt levegőt (pl. kerékpár pumpálásakor).

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

e) A gázt tartalmazó palackot felmelegítjük.

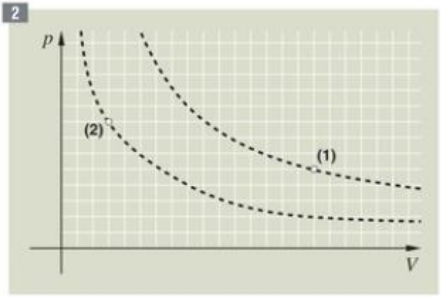
f) A függőleges helyzetű hengeres, dugattyúval ellátott edényt úgy melegítünk, hogy az emelkedő dugattyúra egy súlyos nehezéket helyezünk.

1



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!

2

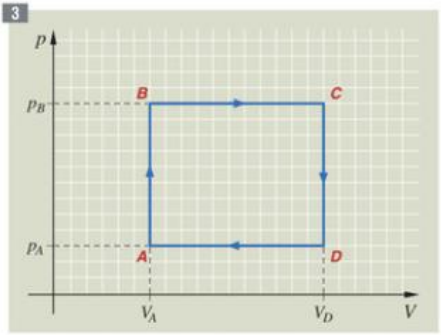


3. *a)* Tekintsük a 3. ábrán az $ABCD$ téglalapot a p–V diagramon. Értelmezzük, hogy mi történik a gázzal, és milyen állapotváltozásokon megy keresztül, ha a (p; V) állapotpont az $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ úton körbejárja a téglalap kerületét (vagyis a gáz körfolyamatot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

b) Ábrázoljuk a 3. ábrán látható körfolyamatot a p–T és a V–T diagramokon is!

4. Amikor lopóval a hordóból bort szívunk fel, hogyan változik a lopóban lévő levegő állapota? Miért áramlik fel a lopóba a folyadék?

3



5. Egy teli PB gázpalackból kevés gázt fogyasztottunk, mégsem csökkent a palackba zárt gáz nyomása. Vajon miért ?

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!)

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

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 $\Delta m = m_1 - m_3 =$ **0,133 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 növekszik?

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-ról 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 az állapotváltozást 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 a 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 gáz nyomása, ha 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?

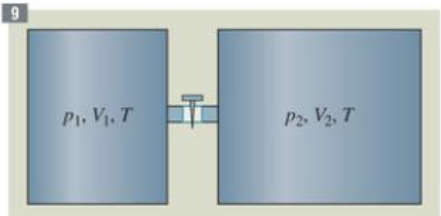
8. Számítsuk ki az állapotegyenlettel a hidrogén-, az oxigén- és a héliumgáz normálállapotú sűrűségét! A kapott értékeket vessük össze a táblázatban szereplő adatokkal!

9. Az ábrán látható – csappal összekötött – tartályok eltérő nyomású, de azonos hőmérsékletű és minőségű gázt tartalmaznak. Igazoljuk, hogy a csap kinyitása után a közös nyomás

$$p_k = \frac{p_1 \cdot V_1 + p_2 \cdot V_2}{V_1 + V_2}$$

lesz, ha a gáz hőmérséklete állandó marad.

9



3. Molekuláris hőelmélet

3.1. Emlékeztető. Testek részecskemodellje

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. (*159.3. ábra*)

Ezt a jelenséget először *Robert Brown* (1773–1858), angol botanikus írta le, aki vízben elkevert virágporszemcsék mozgását figyelte meg mikroszkóp alatt. A jelenséget mikroszkóppal mi is megfigyelhetjük, ha a mikroszkóp tárgylemezére vízzel hígított tejet vagy festékes vízcseppet helyezünk.

Ha egy vízzel teli üveghenger aljára szívószálon keresztül apró hipermangán szemecskéket juttatunk, akkor az oldódó hipermangán lassan megfesti a hengerben lévő vizet (*159.1. ábra*). A jelenséget a részecskék rendezetlen hőmozgásával magyarázhatjuk.

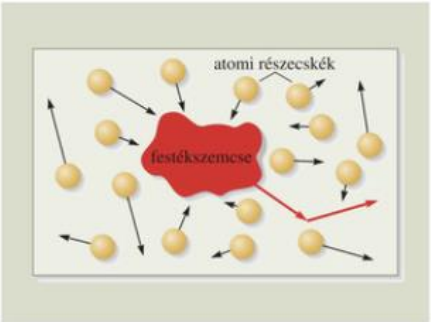
A porszemek, virágporok és más apró testecskék megfigyelt rendezetlen mozgását az atomi részecskék ugyancsak rendezetlen mozgásának következményeként értelmezhetjük. A kis testekre az atomi részecskék minden oldalról apró, véletlenszerű erőlökéseket fejtenek ki. Az erőhatások, a testek kicsiny mérete és tömege miatt nem egyenlítődnek ki, ezért a mikroszkóppal megfigyelhető testecskék zegzugos mozgást végeznek. (*159.2. ábra*)

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

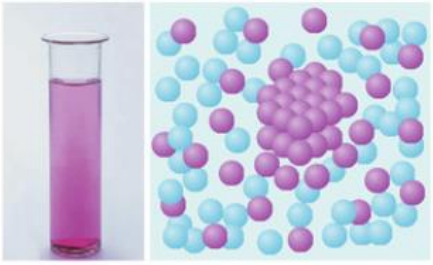
Albert Einstein (1879–1955) Nobel-díjas fizikus 1905-ben adta meg a Brown-mozgás egzakt matematikai leírását, ezzel nagyban hozzájárult ahhoz, hogy a tudós világ a múlt század elején az atomok létezését elfogadja.

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

A testek különböző halmazállapotainak sajátosságait is (állandó-változó alak, térfogat stb.) a testeket felépítő atomi részecskék viselkedésével magyarázhatjuk meg.



159.2. Részecskék rendezetlen mozgása: Brown-mozgás



159.1. A hipermangán vízben való oldódása



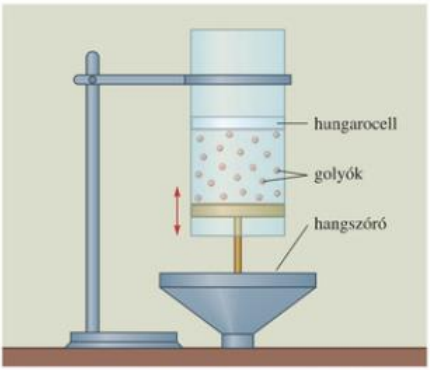
159.3. Apró porszemek Brown-mozgása a levegőben

3D

3.2. A gázok állapotváltozásainak molekuláris értelmezése



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



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

A „fénymalom" elnevezésű kísérleti eszköznél a gázzal töltött üveggömb jól csapágyazott, függőleges tengely körül könnyen forgó, lapátokkal ellátott kis 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, mint a fényes oldal. Ezért 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 sötétebb oldalon lévő gázrészecskék nagyobb nyomást fejtenek ki a lapátra, mint a túloldalon lévő részecskék a fényes felületre. Ezért a lapátos kerék forgásba jön.

A 19. század közepén létrejött *molekuláris hőelmélet* egyik nagy sikere volt, hogy a gázrészecskék rendezetlen mozgásával sikerült értelmezni az **ideális gázokra** vonatkozó **gáztörvényeket.**

A **részecske-modell** (másként **golyómodell**) alapján matematikailag levezethetők a gáztörvények mennyiségi összefüggései is.

A gázok **kinetikus gázelméletnek** is nevezett hőelméletében a golyómodell alapfeltevései a következők:

- A gázrészecskéket **oszthatatlan, rugalmas pontszerű golyóknak** kell tekintenünk, amelyek egymással és a gáztartály falával **csak rugalmas ütközések** révén vannak **kölcsönhatásban.**
- **A molekuláris erőktől eltekintünk.**
- A gáztartály térfogatához viszonyítva **a részecskék saját térfogata elhanyagolható.**

AZ ÁLLAPOTVÁLTOZÁSOK MODELLEZÉSE

A továbbiakban – a részletes matematikai levezetést mellőzve – értelmezzük a golyómodell alapján a gázok nyomását, hőmérsékletét és speciális állapotváltozásaikat.

Kvalitatív modellkísérleteket végezhetünk a gázok állapotváltozására a fenti ábra eszközével.
- 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 hangszóróra nagyobb feszültséget kapcsolunk.
- A nyomást a dugattyúra helyezett apró nehezékkel lehet változtatni.

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

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

Számos más jelenség (diffúzió, oldódás) is 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" kísérletet).

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.**

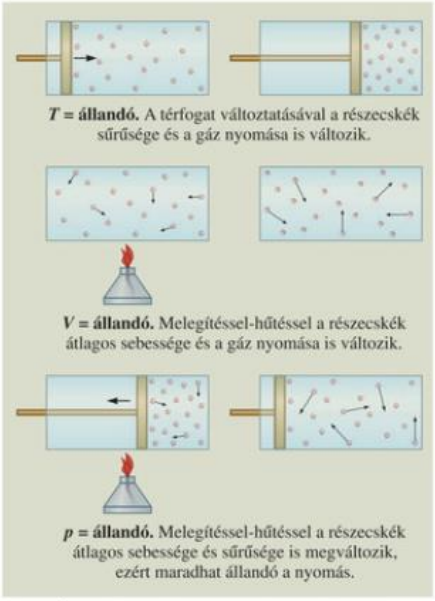
Melegítéskor a gázrészecskék hőmozgása fokozódik, a részecskék átlagos sebessége megnő. Ezért az edény falának ütköző részecskék nagyobb erőt fejtenek ki arra. Ezt a gáz nyomásának növekedéseként érzékeljük.

Hűtéskor pedig a hőmozgás intenzitása, és így a részecskék átlagos sebessége és az edény falára kifejtett erő is csökken, ezért a gáz nyomása is kisebb lesz.

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 (amely 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 ellensúlyozza.



161.1. Állapotváltozások molekuláris értelmezése

MEGJEGYZÉSEK

1. 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. (Lásd 1. feladat sörétszemes kísérletet!)

2. 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.



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

3. A molekuláris hőelmélet sikere ellenére az atomok létezésének elfogadására nem járt azonnali bizonyítékként a 19. sz. közepén. A tudósok közül sokan csak egy egyszerű munkahipotézisnek tekintették a részecskemodellt, mellyel a gáztörvények jól értelmezhetők.

   Bolztmann továbbfejlesztett statisztikus elméletét sem fogadta megfelelően a tudományos világ, így a tudós, csalódottsága közepette hunyt el.

4. A fénymalom működését gyakran tévesen a fény nyomásával magyarázzák. A fénynyomás jelenségét először *Lebegyev* orosz fizikus 1901-ben elvégzett kísérletével mutatta ki a fénymalomhoz hasonló eszközzel. Csakhogy Lebegyevnél a kerék az üvegburában erősen légritkított térben forgott megvilágítás hatására, és éppen ellenkező irányban, mint a fénymalom esetében. Ugyanis a lapátokról visszaverődő fény a fényes oldalra gyakorol nagyobb nyomóerőt.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Ha egy elég 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. Helyezzünk nehezéket a modellkísérlet hungarocell dugattyújára. Hogyan érhetjük el, hogy megterhelt dugattyú eredeti állásba kerüljön vissza?

4. Cseréljük ki a kísérleti eszközben a golyók egy részét nagyobb méretű golyókra. Elmozdul-e a dugattyú? Indokoljuk a tapasztaltakat!

FELADATOK

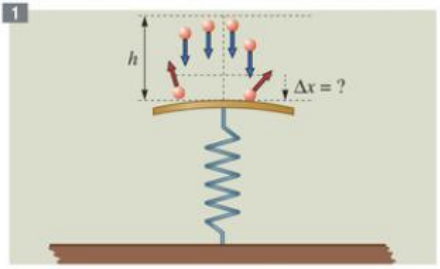
1. Egy függőlegesen rögzített rugó felső végére elhanyagolható tömegű, kissé domború acél serpenyőt erősítünk. Majd a serpenyőre $h = 1{,}25$ m magasságból egyenletesen apró acél golyókat szórunk 240 db/perc gyakorisággal. Egy-egy golyó tömege 10 g. A golyók rugalmasan visszapattanva elhagyják a serpenyőt.

a) Mekkora lesz a rugó átlagos összenyomódása a sörétszórás alatt, ha a rugóállandó $20\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$?

b) Mekkora átlagos nyomást fejt ki a „sörét zápor" a serpenyőre, ha annak területe 25 cm^2?

MEGOLDÁS:

1



$h = 20$ cm
$m = 5$ g $= 0{,}005$ kg
$N = 240$
$\Delta t = 1$ perc $= 60$ s
$D = 20\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$
$A = 25\ \mathrm{cm}^2 = 0{,}0025\ \mathrm{m}^2$

$\Delta x = ?,\quad p_{\mathrm{k}} = ?$

a) A rugó összenyomódását az $F = D \cdot \Delta x$ erőtörvényből kapjuk meg: $\Delta x = \frac{F}{D}$.

A lapra kifejtett F erőt a lapról visszapattanó sörétek által egységnyi idő alatt a lapnak átadott lendület nagyságából kapjuk meg: $F = \frac{N \cdot 2m \cdot v}{\Delta t}$. A rugalmas visszapattanás miatt $\Delta v = 2v$, ahol $v = \sqrt{2gh}$ a lapra h magasságról szabadeséssel érkező golyók sebessége.

Így a rugó átlagos összenyomódása:

$$\Delta x = \frac{N \cdot 2m \cdot \sqrt{2gh}}{\Delta t \cdot D} = \frac{240 \cdot 0{,}01\ \mathrm{kg} \sqrt{20\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}\, 1{,}25\ \mathrm{m}}}{60\ \mathrm{s} \cdot 20\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}} = 0{,}01\ \mathrm{m} = \mathbf{1\ cm.}$$

b) A lapra kifejtett átlagos nyomás:

$$p_{\text{á}} = \frac{F_{\text{á}}}{A} = \frac{D \cdot \Delta x}{A} = \frac{20\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}} 0{,}01\ \mathrm{m}}{2{,}5 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m}^2} = 80\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2} = \mathbf{80\ Pa.}$$

2. 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-egy lövedék a céltáblára, miközben 5 cm hosszú úton fékeződik le a táblában?

3. 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?

3.3. Az állapotegyenlet molekuláris alakja. A hőmérséklet molekuláris értelmezése

MOLEKULÁRIS ÁLLAPOTEGYENLET

Az ideális gázok részecskemodelljének mennyiségi vizsgálatát megkönnyíti, ha a gázok állapotegyenletét olyan alakra hozzuk, melyben a gázrészecskék N száma is szerepel.

Helyettesítsük az ideális gázok állapotegyenletének az n anyagmennyiséget tartalmazó alakjába az n mólszám helyére az $n = \frac{N}{N_A}$ hányadost, ahol N a gázrészecskék száma, $N_A = 6 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$ pedig az *Avogadro-állandó:*

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T = \frac{N}{N_A} \cdot R \cdot T.$$

Vezessük be a következő jelölést:

$$k = \frac{R}{N_A} = \frac{8{,}314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}}{6{,}02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}} = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}.$$

Így az **állapotegyenlet molekuláris alakja:**

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

A k univerzális fizikai állandót az osztrák elméleti fizikus, *Ludwig Boltzmann* tiszteletére **Boltzmann-állandónak** nevezik.

Az **állapotegyenlet** molekuláris alakjában **nem szerepel** a gáz **anyagi minőségére jellemző mennyiség,** hanem csak a **részecskék N száma,** ütközéseik révén az edény falára kifejtett p **nyomás** és a gáz T **abszolút hőmérséklete.**

A GÁZRÉSZECSKÉK ÁTLAGOS MOZGÁSI ENERGIÁJA

Az előző leckében – a gázok állapotváltozásának molekuláris értelmezésénél beláttuk, hogy a részecskék **rendezetlen mozgásának intenzitása szoros kapcsolatban áll a gáz hőmérsékletével.**

A továbbiakban ennek a kapcsolatnak mennyiségi összefüggését keressük meg, felhasználva az állapotegyenlet molekuláris alakját.

Fejezzük ki az állapotegyenletből a gáz nyomását:

$$p = \frac{N}{V} \cdot k \cdot T.$$

Ebből kiolvasható, hogy a **gáz nyomása** állandó hőmérsékleten **egyenesen arányos** az $n_r = \frac{N}{V}$ térfogati **részecskesűrűséggel,** amint azt az előző leckében a nyomás molekuláris értelmezésénél bizonyítás nélkül el is fogadtuk. (Nagyobb részecskesűrűségnél adott idő alatt több részecske ütközik az edény falával, így a nyomás is megnő.)

Ugyanakkor azt is beláttuk, hogy a részecskék hevesebb rendezetlen mozgásával is növelhetjük a gáz nyomását (amikor állandó térfogaton melegítjük a gázt).

- Az edény falára a részecskék ütközései által **kifejtett nyomás** egyrészt egyenesen arányos a részecskék $m_0 \cdot v$ **lendületével** (mivel ütközésekkor a részecskék lendületváltozása és az általuk kifejtett erőlökések nagysága $\Delta I = 2m_0 \cdot v$).
- Másrészt az apró erőlökések szaporasága – így az edényfalra kifejtett **átlagos nyomás** is – **annál nagyobb, minél nagyobb a v sebesség.**

Így végső soron a gáz p **nyomása arányos lesz** a részecskék mozgására jellemző $m_0 \cdot v \cdot v = m_0 \cdot v^2$ szorzattal, azaz a **részecskék mozgási energiájával.**

Mivel a részecskék sebessége a legkülönbözőbb lehet, ezért az edény falára kifejtett p **nyomásnál a részecskék** ε-nal jelölt **átlagos mozgási energiájával** kell számolnunk:

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot v^2\right)_{\text{átl.}},$$

ahol m_0 egy részecske tömege, v pedig a pillanatnyi sebessége.

A p nyomás így az $\frac{N}{V}$ **részecskesűrűség** és az ε **átlagos mozgási energia szorzatával** is arányos lesz.

További meggondolásokkal belátható, hogy arányossági szorzónak $\frac{2}{3}$ adódik, így a nyomásra a

$$p = \frac{N}{V} \cdot \frac{2}{3} \cdot \varepsilon,$$

vagy átrendezés után a következő kifejezést kapjuk:

$$p \cdot V = N \cdot \frac{2}{3} \cdot \varepsilon.$$

Vagyis a $p \cdot V$ szorzat egyenesen arányos a részecskék N számával és az ε átlagos mozgási energiájukkal.

A kísérleti úton nyert **molekuláris állapotegyenlet** szerint viszont $p \cdot V = N \cdot k \cdot T$.

A $p \cdot V$ szorzatra kapott két kifejezést egyenlővé téve megkapjuk a részecskék ε átlagos mozgási energiája és a gáz T hőmérséklete közötti összefüggést:

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

Vagyis

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

Az N darab részecskét tartalmazó ideális gáznál **az egy részecskére jutó ε átlagos mozgási energia arányos a gáz T abszolút hőmérsékletével, az arányossági szorzó a k Boltzmann-állandó $\frac{3}{2}$-szerese.**

MEGJEGYZÉSEK

1. Mivel az állapotegyenletben csak a részecskék N száma szerepel (függetlenül attól, hogy azok mely elem atomjai, vagy vegyület molekulái) megengedett, hogy az ideális gáz ne csak egynemű gázból, hanem azok keverékéből tevődjön össze. (Például a levegő is nagy részt az O_2 és N_2 gázok keverékéből áll.) Ilyen esetekben az állapotegyenletet így is felírhatjuk:

$$p \cdot V = (N_1 + N_2 + \ldots) \cdot k \cdot T,$$

ahol N_1, N_2, … az összetevő gázok részecskéinek (atomok, molekulák) számát jelenti. Ez összhangban áll a kémiában tanult gázkeverékekre vonatkozó Dalton-törvénnyel, mely szerint a gázkeverék teljes nyomását az összetevők rész (parciális) nyomásának összege adja. Ezért a keverékek állapotegyenletét így is felírhatjuk:

$$p \cdot V = (n_1 + n_2 + \ldots) \cdot R \cdot T = \left(\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \ldots \right) \cdot R \cdot T.$$

A fentiek szerint a parciális (rész) nyomások kiszámításánál az összetevő gázok térfogatának a keverék teljes térfogatát kell vennünk. (Azaz úgy tekinthetjük, hogy minden fajta gázrészecske „bejárja" a gáztartály teljes térfogatát.)

2. Egynemű gázok esetében is előfordulhat, hogy a két vagy több atomos molekulákból felépülő gázban magasabb hőmérsékleteken (1000 K felett) egyes molekulák disszociálnak (atomokra esnek szét). Ezzel a gáztérben a részecskék száma és vele együtt a nyomás is ugrásszerűen megnő. Ilyen esetben az egynemű gáz is atomok és molekulák keveréke lesz.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Zárt edényben lévő forró nitrogéngázt fokozatosan hűtjük. Ekkor nyomása is fokozatosan csökken, de egy bizonyos hőmérsékleti tartományban a nyomás ugrásszerűen esik vissza. Mi történhetett? Magyarázzuk meg a jelenséget!

2. Ha télen a hideg szobát lassan felfűtjük, milyen összefüggés van a szobában lévő levegőrészecskék N száma és a szoba T abszolút hőmérséklete között?

3. Egy osztályteremben a hőmérséklet 20 °C-ról 30 °C-ra növekszik. Hogyan változik meg a levegő molekuláinak átlagos mozgási energiája?

a) 50%-kal nő; *b)* 3,4%-kal nő; *c)* 6,9%-kal nő.

FELADATOK

1. Számítsuk ki a 27 °C hőmérsékletű szobában a levegő oxigén- és nitrogénmolekuláinak átlagos sebességét! (Egy oxigénmolekula tömege $5{,}31 \cdot 10^{-26}$ kg, egy nitrogénmolekuláé $4{,}65 \cdot 10^{-26}$ kg.)

MEGOLDÁS:

$m_{O_2} = 5{,}31 \cdot 10^{-26}\ \text{kg}$

$m_{N_2} = 4{,}65 \cdot 10^{-26}\ \text{kg}$

$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \frac{\text{J}}{\text{K}}$

$T = 27\ ^\circ\text{C} = 300\ \text{K}$

$v_{O_2\,\text{átl.}} = ?, \quad v_{N_2\,\text{átl.}} = ?$

Az egy részecskére jutó átlagos mozgási energia:

$$\varepsilon = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T = \left(\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \right)_{\text{átl.}}.$$

Ebből az átlagos sebességek:

$$v_{O_2\,\text{átl.}} = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m_{O_2}}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \frac{\text{J}}{\text{K}} \cdot 3 \cdot 10^2\ \text{K}}{5{,}31 \cdot 10^{-26}\ \text{kg}}} = \mathbf{483}\ \frac{\mathbf{m}}{\mathbf{s}},$$

$$v_{N_2\,\text{átl.}} = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m_{N_2}}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \frac{\text{J}}{\text{K}} \cdot 3 \cdot 10^2\ \text{K}}{4{,}65 \cdot 10^{-26}\ \text{kg}}} = \mathbf{517}\ \frac{\mathbf{m}}{\mathbf{s}}.$$

2. Egy 27 °C hőmérsékletű szoba szellőztetése után a benti levegőrészecskék átlagos mozgási energiája 3%-kal lecsökkent. A szabadból bejövő részecskéké pedig 3%-kal megnőtt. Mekkora volt a kinti hőmérséklet, és mennyi lett a szoba hőmérséklete szellőztetés után? Melyik a helyes eredménypár?

a) 26 °C és 25,4 °C *b)* 9,5 °C és 18 °C *c)* 6 °C és 20 °C

3. Hányszor nagyobb a héliumatomok átlagos sebessége – egy adott hőmérsékleten – az oxigénmolekulák átlagos sebességénél?

4. Két azonos térfogatú gáztartály különböző számú gázrészecskét tartalmaz. A tartályokban a hőmérséklet 300 K és 400 K. A nyomások 200 kPa és 400 kPa.

a) Adjuk meg a tartályokban lévő részecskék számának lehetséges arányát!

b) Melyik tartályban van mindenképpen kevesebb részecske?

5. Mekkora hőmérsékleten lehet a gázrészecskék átlagos mozgási energiája 1 eV?

6. Az uránatommagok hasítására leginkább alkalmasak az ún. „termikus neutronok", melyeknek halmaza szobahőmérsékletűnek tekinthető. Mekkora a termikus neutronok átlagos mozgási energiája?

7. Igazoljuk az állapotegyenlet molekuláris alakjának felhasználásával, hogy a normálállapotú ideális gáz mólnyi mennyisége kereken 22,4 dm^3 térfogatú!

3.4. Az ideális gázok belső energiája. Ekvipartíció tétele

A gyakorlatban sok helyen használjuk a gázokat munkavégzésre: a nagy nyomású, forró gáz hatalmas munkavégzésre képes.

Így pl. útfelbontásoknál légkalapácsokat működtetnek a nagy nyomású levegővel. A hordozható kalapácshoz vastag csöveken vezetik a nagy nyomású levegőt az azt előállító kompresszorból. Figyeljük meg kellő távolságból az eszköz működését egy lakóhelyünkön végzett útfelbontásnál!

Ugyancsak nagy nyomású levegővel működtetik a hatalmas kamionok, autóbuszok fékező berendezését a légféket. (Ezeket „szuszogó" hangjukról ismerhetjük fel, amikor időközönként a túlnyomásos levegő egy részét a szabadba engedik.)

A belső égésű motorokban, a gázturbinákban, de még a lőfegyverekben is a nagy nyomású forró gázok végeznek jelentős munkát: folyamatosan mozgatják a motorok hengereiben a dugattyút, hajtják az erőművek, repülőgépek turbinakerekeit, nagy sebességre gyorsítják fel a puska- vagy ágyúcsövekben a lövedékeket.

A gyakorlati példák azt bizonyítják, hogy **a gázok** jelentős munkavégzésre képesek, vagyis **energiával rendelkeznek,** amely a gázrészecskék rendezetlen hőmozgásából származik. Ezért a gázok ebből eredő munkavégző képességét **belső energiának nevezzük.**

AZ IDEÁLIS GÁZOK BELSŐ ENERGIÁJA

Korábban a golyómodell tárgyalásánál beláttuk, hogy a gázrészecskék átlagos mozgási energiája az abszolút hőmérséklettel egyenesen arányos:

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

Mivel az ideális gázok modelljénél elhanyagoltuk a részecskék közötti molekuláris erőket, ezért az N részecskéből álló T hőmérsékletű **egyatomos** (pontszerű atomokból álló) **gázok** belső energiáját **teljes egészében** a **részecskék hőmozgásából származó mozgási energiák összege adja.**

A belső energiát felírhatjuk az egy részecskére jutó ε átlagos mozgási energia és az N részecskeszám szorzataként:



167.1. Légkalapács működés közben és repülőgép turbinás hajtóműve

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

Felhasználva az állapotegyenlet molekuláris alakját az egyatomos gázok belső energiáját a következő alakban is írhatjuk:

$$E_b = \frac{3}{2} \cdot p \cdot V.$$

Az egyatomos ideális gáz belső energiája egyenesen arányos az abszolút hőmérséklettel és egyenlő a nyomás és térfogat szorzatának $\frac{3}{2}$-szeresével.

Gyakorlásként könnyen kiszámíthatjuk a mólnyi mennyiségű normál állapotú egyatomos gáz belső energiáját:

$$E_b = \frac{3}{2} \cdot 10^5\,\text{Pa} \cdot 22{,}4 \cdot 10^{-3}\,\text{m}^3 \approx 3{,}4\,\text{kJ}.$$

A belső energia képletével összhangban tapasztalatból is ismert, hogy a gáz hőmérsékletének változtatásával (melegítéssel, hűtéssel) tudjuk változtatni a gázok belső energiáját.

A mérések azt mutatják, hogy a **két vagy több atomos** (a részecskék több atomot tartalmazó molekulák, lásd kémia) **gázok nehezebben melegíthetők** (v. hűthetők), **mint az egyatomosak.**

A kétatomos, edénybe zárt gázzal több hőt kell közölni, mint az ugyanakkora tömegű egyatomossal, hogy ugyanakkora hőmérséklet-növekedést érjünk el. Így például a **kétatomos nitrogéngázzal** $\frac{5}{3}$-szor több hőt kell közölni, mint az ugyanakkora térfogatú és nyomású – vagyis azonos számú részecskét tartalmazó – egyatomos argon gázzal, hogy ugyanannyival nőjön a gázok hőmérséklete.

Ezért fel kell tételeznünk, hogy egy adott T hőmérsékleten a **kétatomos gázok molekuláinak átlagos energiája $\frac{5}{3}$-szor nagyobb,** mint a **nemesgáz atomoké,** vagyis a **kétatomos molekulák átlagos energiája:**

$$\varepsilon = \frac{5}{3} \cdot \frac{3}{2} \cdot k \cdot T = \frac{5}{2} \cdot k \cdot T.$$

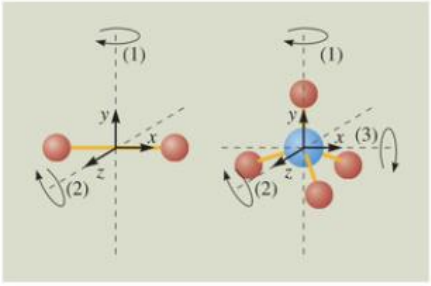
Egyes **háromatomos molekuláknál** pedig a mérések alapján feltételezhetjük, hogy a molekulákra jutó átlagos energia 2-szerese az atomokénak:

$$\varepsilon = 2 \cdot \frac{3}{2} \cdot k \cdot T = \frac{6}{2} \cdot k \cdot T.$$

EKVIPARTICIÓ TÉTELE

A fenti mérési tapasztalatokat a molekulák belső szerkezetével magyarázhatjuk meg, ha alkalmazzuk a statisztikus fizika általános érvényű **energiaeloszlási elvét.**

Feltehetjük, hogy a rendezetlen mozgáskor a **molekulák nem csak haladó** (transzlációsnak is nevezett) **mozgást,** hanem szimmetria tengelyeik körül **forgó mozgást is végeznek.**



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

Elég magas hőmérséklet esetében pedig akár rezgésbe is jöhetnek az atomokat összekötő egyenesek mentén a molekula alkotórészei.

A részecskék **rendezetlen haladó, forgó** (esetleg rezgő) mozgására jutó átlagos energiákat a mozgások **szabadsági fokának** bevezetésével adhatjuk meg.

A **háromdimenziós haladó mozgáshoz $f = 3$ szabadsági fokot** rendelünk az x, y, z tengely mentén való szabad elmozdulás miatt, vagy a mozgási energia képletében szereplő 3 négyzetes tagra hivatkozva:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2\right).$$

A **forgómozgásnál** (a szabadon választható molekula forgástengelyek számától függően) **2 vagy 3** lehet a szabadsági fokok száma. Az „atomi súlyzó" két egymásra merőleges tengely körül foroghat (az atomokat összekötő tengely körül nincs forgási energia, mivel az atomok pontszerűek.

Így az **egyatomos nemesgázoknál** (az atomok pontszerűsége miatt nincs forgási energia) a **szabadsági fokok száma $f = 3$.**

A kétatomos gázoknál $f = 3 + 2 = 5$ a szabadsági fokok száma.

A **kettőnél több atomot tartalmazó** térbeli kiterjedésű **molekuláknál** pedig $f = 3 + 3 = 6$.

Magasabb hőmérsékleteken létrejövő molekularezgésekkel további szabadsági fokok szabadulhatnak fel. Ezekkel nem foglalkozunk.

A részecskesokaságban az átlagos energia egyenletesen oszlik meg: **a részecskék minden szabadsági fokára $\frac{1}{2} \cdot k \cdot T$ átlagos energia jut.** Az f szabadsági fokkal rendelkező részecske teljes átlagos energiája:

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

Ezt nevezzük ekvipartíció tételének.

Így az **f szabadsági fokkal rendelkező** azonos részecskékből álló ideális gáz belső energiája:

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

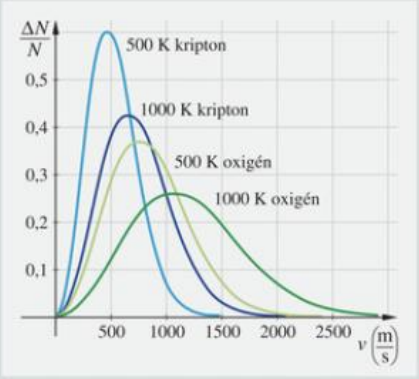
vagy

$$E_b = \frac{f}{2} \cdot n \cdot R \cdot T = \frac{f}{2} \cdot p \cdot V.$$

MEGJEGYZÉSEK

1. A **valódi gázok** abban térnek el az **ideális gáz modelljétől,** hogy figyelembe kell venni a részecskék között fellépő **vonzó jellegű molekuláris erőket,** melynek mértéke a gáz sűrűségétől és nyomásától függ. Az ebből származó **potenciális energiák összege** hozzáadódik a részecskék **kinetikus energiájához, ez alkotja a gázok teljes belső energiáját.** A valódi gázok ideális gázoktól való eltérésének mértékére a későbbi tárgyalás során még kitérünk.

2. Egy adott T hőmérsékletén a gázrészecskék a legkülönbözőbb sebességgel mozoghatnak. Nagyon nagy, vagy nagyon kicsi sebességek azonban elhanyagolhatóan kis valószínűséggel fordulnak elő. A részecskék sebesség szerinti eloszlását *J. Maxwell* skót elméleti fizikus határozta meg. A kapott eloszlásfüggvényt Maxwell-féle sebességeloszlásnak nevezzük. A függvény annak valószínűségét – a $\frac{\Delta N}{N}$ részecskehányadot – adja meg, hogy a részecske sebessége a $(v; v + \Delta v)$ sebességintervallumba esik. A függvény maximum helye (a legnagyobb valószínűséggel előforduló sebesség) a T hőmérséklettel növekszik, de függ a részecskék tömegétől is. (*169.1. ábra*)



169.1. A kripton és az oxigén Maxwell-féle sebességeloszlása 500 K és 1000 K hőmérsékleten

3. Gázmodell kísérletnél is szemléltethetjük, hogy minden részecskére a T-vel arányos azonos mozgási energia jut: ha a „gáz térbe" különböző tömegű golyókat rakunk, akkor megfigyelhető, hogy a nagyobb tömegűek lomhábban, a kisebb tömegűek élénkebben végzik a zegzugos mozgásukat.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Hogyan tudnánk hasznosítani a normál állapotú, 1 mol anyagmennyiségű gáz belső energiáját?

2. Lehet-e nagyobb egy mozgó gázpalackban a gáz mozgási energiája a gáz belső energiájánál?

3. Egy szoba levegőjének belső energiája befűtéskor miért nem változik? Miért érzünk mégis melegebbet a fűtött szobában?

4. Keressünk a természetben olyan jelenségeket, amelyek arra utalnak, hogy a gázrészecskék sebessége egy adott hőmérsékleten eltérő!

5. Állapítsuk meg a sebességeloszlás-függvény grafikonjából, melyik sebességérték nagyobb: az 1000 K hőmérsékletű kriptongáz részecskéinek legvalószínűbb sebessége, vagy az 500 K hőmérsékletű oxigéngáz részecskéinek leggyakoribb sebessége!

6. Következtessünk a sebességgrafikonról, hogy milyen kapcsolat lehet az oxigéngáz részecskéinek 500 K és 1000 K hőmérsékletekhez tartozó leggyakoribb sebességei között!

FELADATOK

1. 2 mol állandó térfogatra bezárt H_2 gáz hőmérséklete 1400 K.

a) Mennyivel növekszik a gáz belső energiája, ha a hőmérséklet 1600 K-re növeljük, miközben a molekulák 20%-a atomokra esik szét?

b) Tegyük fel, hogy 2500 K hőmérsékleten valamennyi molekula atomokra bomlik. Mekkora lesz ekkor a gáz belső energiája?

MEGOLDÁS:

a) A gáz belső energiája $T_1 = 1400$ K hőmérsékleten:

$$E_1 = N \cdot \frac{5}{2} \cdot k \cdot T_1 = 2 \cdot 6 \cdot 10^{23} \cdot \frac{5}{2} \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \cdot 1400 \text{ K} = 57960 \text{ J} = 57{,}96 \text{ kJ}.$$

A molekulák 0,2 részének szétesése után az atomok száma $N_1 = 0{,}4 \cdot N$ lesz, a megmaradt molekulák száma pedig $N_2 = 0{,}8 \cdot N$.

Így a gáz belső energiája $T_2 = 1600$ K hőmérsékleten:

$$E_2 = N_1 \cdot \frac{3}{2} \cdot k \cdot T_2 + N_2 \cdot \frac{5}{2} \cdot k \cdot T_2 = 0{,}4N \cdot \frac{3}{2} \cdot k \cdot T_2 + 0{,}8N \cdot \frac{5}{2} \cdot k \cdot T_2 = (0{,}6N + 2N) \cdot k \cdot T_2 =$$

$$= 5{,}2 \cdot 6 \cdot 10^{23} \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \cdot 1600 \text{ K} = 68889{,}6 \text{ J} = 68{,}890 \text{ kJ}.$$

Tehát a gáz belső energiájának megváltozása $\Delta E = E_2 - E_1 =$ **10 929,6 J = 10,93 kJ.**

b) A $T_3 = 2500$ K-en a teljes belső energia:

$$E_3 = 2N \cdot \frac{3}{2} \cdot k \cdot T_3 = 4 \cdot 6 \cdot 10^{23} \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \cdot 2500 \text{ K} = 124{,}2 \text{ kJ}.$$

Tehát 2500 K hőmérsékleten az atomokra disszociált gáz belső energiája: **124,2 kJ.**

2. Mennyivel változik meg 1 mol anyagmennyiségű kétatomos gáz belső energiája, ha hőmérséklete 3 °C-kal csökken?

3. *a)* Mekkora a 60 m^3 térfogatú üres raktárhelyiség 10^5 Pa nyomású és 20 °C hőmérsékletű levegőjének belső energiája?

b) Mennyivel változik meg a helyiség levegőjének belső energiája ha a raktárban a levegő hőmérséklete 20 °C-ról 27 °C-ra növekszik?

4. Egy bútorozott szobát kiszellőztetnek, a szellőztetés után a szobában a hőmérséklet néhány fokkal tartósan alacsonyabb lesz. Hogyan változott meg a bútorok és a szoba levegőjének belső energiája a szellőztetés hatására?

5. A 2 mólnyi kevert (atomokból és kétatomos molekulákból összetevődő) gázunk belső energiája 27 °C-on 11 224 J. Adjuk meg az atomok és molekulák számának arányát!

6. Hány százalékkal nagyobb a levegő részecskéinek átlagos mozgási energiája a nyári kánikulában 38 °C hőmérsékleten, mint a téli, –10 °C hőmérsékletű csikorgó hidegben?

7. Mekkora lenne annak a lövedéknek a sebessége, amelynek tömege egyenlő 1 mol héliumgáz tömegével, és mozgási energiája akkora, mint a gáz belső energiája normál állapotban?

8. Mekkora az 1 mol normál állapotú oxigéngázban a molekulák forgómozgásából származó belső energiarész?

4. Energia, hő és munka – a hőtan főtételei

4.1. A hőtan I. főtétele. Az energiamegmaradás törvényének kiterjesztése

IDEÁLIS GÁZOK BELSŐ ENERGIÁJÁNAK MEGVÁLTOZTATÁSA

Hogyan tudjuk egy adott mennyiségű gáz belső energiáját növelni vagy csökkenteni?

A korábbi leckében már láthattuk, hogy a **gázok belső energiáját** a **gázrészecskék** rendszertelen mozgásából adódó mozgási és forgási energiák összege adja, amiről tudjuk, hogy **egyenesen arányos a gáz T abszolút hőmérsékletével** és a **gázrészecskék N számával** (vagyis a gáz m tömegével). Ezért a belső energia megváltoztatásának egyik kézenfekvő módja, a gáz **melegítése vagy hűtése.**

a) Ha az adott mennyiségű gázt **állandó térfogaton** melegítjük, – vagyis **hőt közlünk a gázzal** – vagy hűtjük a gázt, – azaz **hőt vonunk el a gáztól** – akkor a gáz **hőmérséklete** és **belső energiája növekszik** illetve **csökken.**

A belső energia megváltoztatásának ezt a módját termikus kölcsönhatásnak nevezzük, és röviden hőcseréről beszélünk. A közölt hő mennyiségét egyenlőnek vesszük a belső energia megváltozásával:

$$Q = \Delta E_b.$$

Q-t **hőmennyiségnek** is nevezzük, amely a fent mondottak miatt egyenesen arányos a ΔT hőmérsékletváltozással és a gáz tömegével:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T,$$

ahol a c gáz anyagi minőségére (fajtájára) és a hőközlés módjára jellemző állandó, neve: **fajhő.**

Későbbiekben a testek fajhőjével, ezen belül külön a gázokéval részletesen is foglalkozunk.

b) Korábbi – gázok állapotváltozásának vizsgálatakor szerzett – tapasztalatunk az, hogy a **gázok hőmérsékletét mechanikai munkavégzéssel is meg lehet változtatni.**

Példa erre a korábban már említett kerékpárpumpa felmelegedése, vagy a szén-dioxiddal töltött szifonpatron gyors lehűlése. A kerékpárpumpa esetében



171.1. Külső munkavégzés: kerékpárgumi felpumpálása

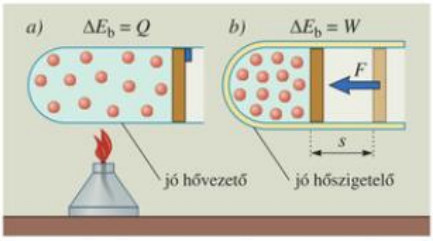
a pumpáló kerékpáros végez munkát, a szifonpatronnál pedig a hirtelen kitágult gáznak van munkavégzése.

Összenyomással – vagyis **külső munkavégzéssel** – a gázok **belső energiáját növelni** lehet. A gáz tágulásakor a gáz végez munkát, ezért belső energiája csökkenhet.

A gáz térfogatváltozáskor, ha közben nincs hőcsere, a gázon, vagy a gáz által **végzett munka a gáz belső energiájának megváltozásával egyenlő:**

$$W = \Delta E_b.$$

Ez valósul meg gázok **hirtelen térfogat változásakor** (nincs idő a hőcserére), vagy a gáztartály **jó hőszigetelésekor** (nincs mód a hőcserére).



171.2. A gázok belső energia változtatásának kétféle útja

Ha a gázok térfogatváltozásakor a hőátadás is létrejöhet, akkor az energiacsere mindkét módja egyszerre megvalósul.

Például összenyomjuk a gázt és közben melegítjük is. Ez történik a diesel-motorok hengerében a hirtelen összenyomott levegővel, amikor a gázolaj öngyulladás következtében begyullad. Vagy a hirtelen a magasba emelkedő forró vízgőz gyorsan kitágul és közben hűl is. Ilyen esetekben mindkét energiacsere módot figyelembe kell vennünk az energiamérleg felírásakor.

Általános esetben a gázok belső energia megváltoztatásának energiamérlege:

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

vagyis **a gáz belső energiájának megváltozása egyenlő a gázzal közölt Q hő és a gázon végzett W mechanikai munka előjeles összegével.**

Ezt nevezzük a hőtan I. főtételének, amely az **energiamegmaradásnak** termikus folyamatokra való **alkalmazását jelenti.**

A HŐTAN I. FŐTÉTELÉNEK ÁLTALÁNOSÍTÁSA

A szilárd testek és folyadékok is rendelkeznek **belső energiával,** amely a testeket alkotó **részecskék mozgási energiájából** valamint az **összetartó erők kölcsönhatási energiájából** tevődik össze.

A belső energiát most is kétféle módon változtathatjuk meg: vagy **termikus kölcsönhatással** (melegítéssel, hűtéssel, azaz hőcserével), vagy **mechanikai kölcsönhatással,** például súrlódási **munkavégzéssel.**

A szilárd testek és folyadékok hőcseréjére a gyakorlati életben, a természetben nap mint nap láthatunk példát (tea, fűrdővíz, jégkocka készítés, Balaton, Duna vizének felmelegedése, lehülése stb).

A szilárd és cseppfolyós halmazállapotú anyagok belső energiájának külső munkavégzéssel történő megváltoztatására is számos példát sorolhatunk fel:

- a villanyfúró munkát végezve felforrósítja a vasdarabot;
- a kovács a munkadarab kalapálásával melegíti fel a vasat (*172.1. ábra*);
- a gépkocsi fékezésekor a fék fém alkatrészei melegszenek fel súrlódási munka által;
- az ősember is használta ezt a „ belső energia növelő módszert" a tűzgyújtásnál.

A levegőben mozgó testeket a levegő nem csak hűti, hanem súrlódás (közegellenállás) következtében fel is izzíthatja azokat. Így a Földünk légkörébe jutó meteoritok a légkörben súrlódási munka révén izzásba jönnek elégnek vagy szétrobbannak. Ez figyelhető meg augusztus közepén, derült estéken „csillaghullás" jelenségként. (*172.2. ábra*)

A **hőtan I. tétele valamennyi testre** általánosan **érvényes.** Megfogalmazásával a mechanikai **energiamegmaradás elvét terjesztjük ki hőfolyamatokra.**

A 19. század közepén a tudósok még nem ismerték pontosan a hő mibenlétét: azt gondolták, hogy melegítésnél, hűtésnél valamilyen láthatatlan „hőfolyadék" (latinul fluidum) áramlik egyik testből a másikba a hőcsere során.

***J. P. Joule* angol fizikus** nagy érdeme, hogy híres kísérletével sikerült igazolni, hogy a **hő nem más, mint az energiacsere** egyik formája. Pontos mérésekkel sikerült meghatározni a hő **mechanikai**



172.1. Munkavégzéssel nő a test belső energiája

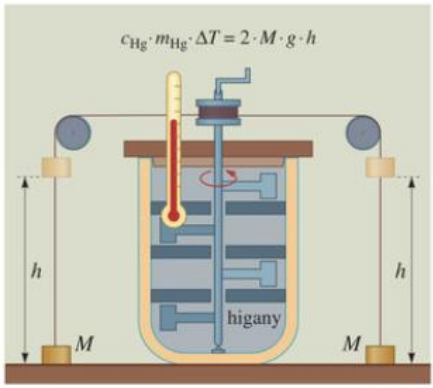


172.2. Légkörben elégő meteorit mint „hullócsillag"

egyenértékét, vagyis azt, hogy a korábban 1 **kalóriának** választott hőmennyiség egység hány **joule** energiaegységnek felel meg (1 cal = 4,18 J).

A kísérlet elvi rajzát az *173.1. ábrán* láthatjuk. A higannyal telített hőszigetelt edényben függőleges tengelyű lapátok forgásba jönnek a tengelyre szerelt tárcsára csévélt, csigákon átvetett fonalakra erősített, lefelé mozgó M tömegű nehezékek hatására. A munkavégzést a helyzeti energia csökkenéséből, a keletkezett hőt a higany hőmérsékletének változásából számolták ki.

Joule a korabeli kísérleteivel jelentősen hozzájárult az energiamegmaradás elvének felismeréséhez. Bebizonyosodott, hogy **első fajú perpetuum mobile** (első fajú örökmozgó) **nem szerkeszthető,** amely energia befektetése nélkül folyamatosan munkát végezne.



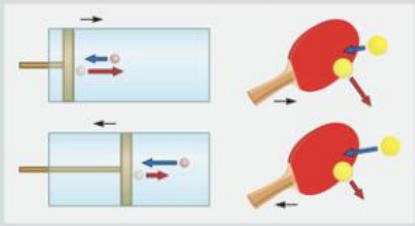
173.1. Joule-féle kísérlet a hő mechanikai egyenértékének mérésére

MEGJEGYZÉSEK

1. Korábban a hőmennyiség egységeként a kalóriát (jele: cal) választották úgy, hogy az 1 cal hőmennyiség az 1 g tömegű víz hőmérsékletét 1 °C-kal emeli. Napjainkban viszont már csak a J egységet használják, a kalória egység ételek energiatartalmát feltüntető táblázatokban fordulhat csak elő.

2. A gázok munkavégzéssel történő belső energiaváltozását (a felmelegedést, ill. a lehűlést) molekulárisan is értelmezhetjük. Ha a gáztartály dugattyúját állandó sebességgel lassan befelé mozgatjuk – **külső munkavégzéskor** –, akkor arról a gázrészecskék nagyobb sebességgel pattannak vissza, mint az álló falról, így **a részecskék mozgási energiája megnő.** Kifelé mozgó dugattyúnál – **a gáz munkavégzésekor** – fordított a helyzet: a gázrészecskék kisebb sebességgel, **mozgási energia csökkenéssel** pattannak vissza a mozgó dugattyúról. Mindkét esetben a részecskék energiaváltozása **egyenletesen szétoszlik** az összes gázrészecske között, ezért a **gáz belső energiája növekszik,** (ill. **csökken**), amit gáz melegedéseként (ill. hűléseként) észlelünk.

   Hasonló jelenséget magunk is tapasztalhatunk a sportban: a pingpong- vagy teniszlabda sokkal nagyobb sebességgel pattan vissza az ütőről akkor, ha azt a labdával szembe mozgatjuk, a visszapattanó labda sebessége viszont mérséklődik, –„megszelídül a labda"– ha az ütőt hátra fele mozgatjuk a labda fogadásakor.



173.2. Az ideális gázok munkavégzéssel történő belső energiaváltozásának molekuláris magyarázata

3. A fent leírtakon alapul, hogy a **munkavégzéssel** történő **energiaközlést rendezettnek** nevezik, ahol a közölt energia az ütköző részek közvetítésével végül **szétszóródik** (szakszóval disszipálódik). A **hőközlést,** ahol a melegebb test részecskéi eleve rendezetlenül mozognak **rendezetlen energiaközlésnek** hívják.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Tapasszuk a ruhával fedett karunkat az ajkunkhoz. Ruhán keresztül fújjuk erősen ki a levegőt! Mit érzünk? Értelmezzük a jelenséget az I. főtétel alapján!
2. Falusi disznóöléseknél gyakran használnak gázpalackot perzseléskor. Használat közben a palack fala erősen megderesedik, a palackban a nyomás lecsökken, a gázláng gyengül. Adjunk magyarázatot! Hogyan oldják meg a problémát?
3. Soroljunk fel további példákat arra, hogy szilárd testek és folyadékok belső energiáját munkavégzéssel változtatjuk meg! Csoportosítsuk a felhozott példákat hasznosság, károsság szempontból!
4. Vajon miért alkalmazott Joule a híres kísérletéhez folyadékként higanyt?

FELADATOK

1. A Boyle–Mariotte kísérlet igazolására dugattyúval lassan csökkentjük a gáz térfogatát, miközben 100 J munkát végzünk. Történik-e közben a gáz és környezete között hőcsere? Ha igen mekkora?
2. Keressük meg Joule-kísérlet leírását az interneten! Értelmezzük az I. főtételt a kísérletben szereplő folyadékra! Miért helytelen a kísérlet értelmezésével kapcsolatos munka átalakul hővé kifejezés?
3. Két érdes fadarabot 100 N erővel összenyomunk és egymáson 500-szor 20 cm úthosszon elcsúsztatjuk. Mennyivel növekszik a fadarabok belső energiája, ha köztük a súrlódási együttható 0,6?
4. Joule, hogy a munka–hő kapcsolatát igazolja, szerette volna megmérni, hogy egy vízesés alján hány fokkal emelkedik a víz hőmérséklete. Mekkora hőmérséklet-különbséget kellett volna mérnie egy 42 méter magas vízesésnél? (Joule mérése végül is sikertelen volt. Vajon miért? Nézzünk utána az interneten!)

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.



174.1. A Föld légkörének nincs éles határa

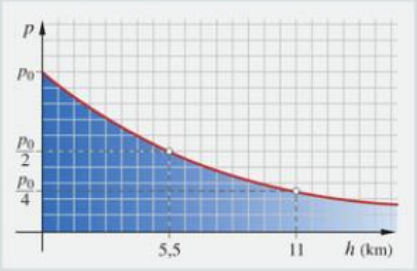
A Nap bolygói közül a Földön kívül mások is rendelkeznek légkörrel: így a Vénusz légköre túlnyomórészt szén-dioxidból áll. A bolygó felszínének átlagos hőmérséklete 470 °C, légköri nyomása pedig a földi légnyomás mintegy 100-szorosa. A Mars légkörét is nagyrészt szén-dioxid alkotja, amelynek hőmérséklete 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 a légkör súlya: $G_{\text{légkör}} = 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 510 \cdot 10^{12}\ \text{m}^2 = 5{,}1 \cdot 10^{19}$ N. Ebből a légkör tömegét úgy nyerjük, hogy a G súlyt osztjuk a $g = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ gravitációs gyorsulással: $m = \frac{G}{g} =$ $= 5{,}1 \cdot 10^{18}$ 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:

$$V_{\text{levegőoszlop}} = \frac{10^4\ \text{kg}}{1{,}3\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 7700\ \text{m}^3.$$

Ebből adódna a levegőoszlop $h = 7700$ m magassága. Csakhogy a levegő sűrűsége és nyomása a Föld felszínétől felfelé haladva nem állandó. A magassággal exponenciálisan csökken a levegő nyomása és sűrűsége úgy, hogy kb. 5500 méterenként feleződnek a kezdeti nyomás és sűrűség értékek (állandó hőmérsékletet feltételezve). (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.)



175.1. A levegő nyomásának csökkenése a magasság függvényében

A rendkívül ritka levegőt az emberi szervezet csak rövid ideig viseli el. Ezért esnek sokszor áldozatul a nagy magasságoknak hódoló hegymászók. Így járt szerencsétlenül a magyar hegymászó Erőss Zsolt társával Kiss Péterrel 2013 májusában a Himalája 8586 méteres Kancsendzönga nevű csúcsának megmászása közben. A tengerszint feletti magasság növekedésével járó légköri nyomás értékek sorozatos feleződései miatt a légkör tömegének egyre kisebb hányada található az adott magasság felett: így 5,5 km felett $\frac{1}{2}$, 11 km felett $\frac{1}{4}$ tömegrész, de már 7-szeres feleződés után $h = 38{,}5$ km magasság felett a légkör tömegének kevesebb, mint 1%-a található.

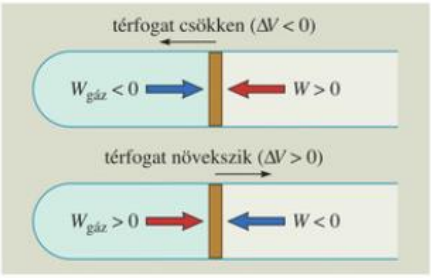


175.2. Hegymászó a Himalájában

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.

4.2. Energiacserék az ideális gázok izobár és izochor állapotváltozásánál



176.1. Gáz és a külső erők munkájának előjelei a gáz térfogatváltozásakor. Piros szín a „+", kék a „–" előjel

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 térfogatának változásakor **mechanikai kölcsönhatás során** a **külső erők** a gázon **pozitív** vagy **negatív** munkát végezhetnek.

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

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

Gondolatban melegítsünk egy dugattyúval ellátott hengerbe zárt gázt állandó nyomáson. A gáz nyomása az egyenletes tágulása közben megegyezik a p_k állandó külső légnyomással. (*176.2. ábra*)

A gáz melegítésekor $Q > 0$ hőmennyiséget közlünk a gázzal. Tágulás közben a gáz a kapott hő egy részét a külső légnyomással szemben munkavégzésre fordítja. Ezt **tágulási munkának nevezzük.**

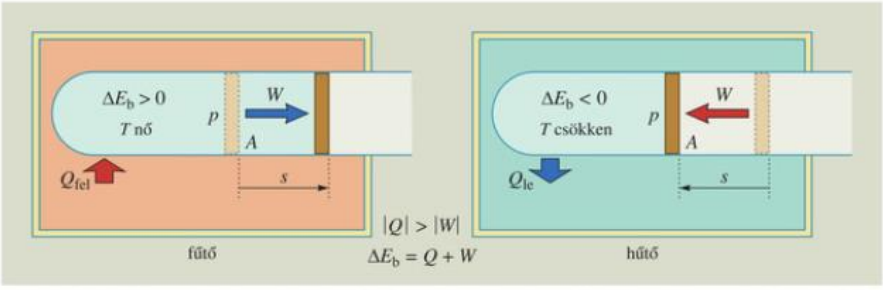
A gáz hűtésekor $Q < 0$ hőmennyiséget közlünk a gázzal (vagyis hőt vonunk el). A gáz hűlésekor **térfogata csökken,** a dugattyú a hengerben befelé mozdul el. A külső légnyomás a gázon pozitív munkát végez. Ezt a munkát **térfogati munkának** nevezzük.

A gáz tágulási munkája kiszámítható a $W_{gáz} = F \cdot s$ 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:

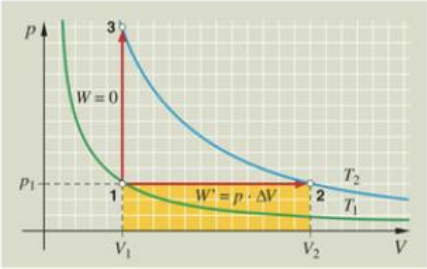
$$W_{gáz} = F \cdot s = p \cdot A \cdot s = p \cdot \Delta V.$$

A gáz térfogatváltozásakor a dugattyúra ható külső erő egyenlő nagyságú, de ellentétes irányú a gáz által kifejtett erővel. Ezért a külső munka (W) és a gáz által végzett munka ($W_{gáz}$) mindig egyenlő nagyságú és ellentétes előjelű:

$$W = -W_{gáz}.$$



176.2. Az izobár állapotváltozás energiacseréi. A piros szín a gáz energiafelvételét, a kék az energialeadását jelzi



177.1. Az állapotváltozások munkavégzésének szemléltetése a p–V diagramon

A külső erők gázon végzett munkája térfogat növekedéskor ($\Delta V > 0$) negatív, ezért kell negatív előjelet használnunk:

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

A gáz tágulási munkája a külső munkavégzés –1-szerese, ezért

$$W_{\text{gáz}} = p \cdot \Delta V.$$

A munkavégzések számértéke megegyezik a p–V grafikon alatti téglalap területének számértékével.

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 melegítéskor termikus úton energiát kap, akkor tágulási munkavégzéssel energiát ad le. Fordítva: ha hűtéskor energiát vonunk el a gáztól, akkor a környezet pozitív munkát végez a gázon.
- Mivel a **hőközlés** állandó nyomáson a gáz **belső energiájának növekedését,** a **hőelvonás** pedig annak **csökkenését** okozza, **ezért a hőcsere nagysága mindig nagyobb a mechanikai munkavégzés nagyságánál: $|Q| > |W|$.**

Izobár állapotváltozás során a gáz belső energiájának megváltozását az I. főtétel alapján a következő összefüggéssel határozhatjuk meg:

$$\Delta E_{\text{b}} = Q - p \cdot \Delta V.$$

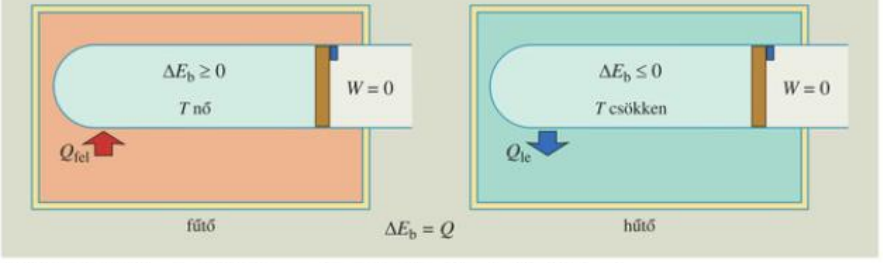
IZOCHOR ÁLLAPOTVÁLTOZÁSOK ENERGIACSERÉJE

Ha az előző gondolati kísérletben a henger dugattyúját egy adott helyzetben rögzítjük, akkor **izochor** (V = állandó) állapotváltozást hozhatunk létre a gáz melegítésével vagy hűtésével (*177.2. ábra*)

Ekkor a gáz térfogata állandó. Így sem **a gáz,** sem a **külső erők** nem végeznek **munkát** mivel nincs térfogatváltozás.

Ezért a gázok állandó térfogatú (izochor) állapotváltozásakor a gázok belső energiájának megváltozása az I. főtétel szerint egyenlő a gázzal közölt Q hőmennyiséggel:

$$\Delta E_{\text{b}} = Q.$$



177.2. A gáz és környezete közötti energiacsere izochor állapotváltozások során

MEGJEGYZÉSEK

1. Az állapotegyenlet és a belső energia összefüggéséből könnyen meghatározható, hogy ha **állandó nyomáson** melegítjük a gáz, akkor a gázzal közölt hő hányad része fordítódik belső energia növelésére és hányad rész tágulási munkára. Mivel $E_b = \frac{f}{2} \cdot N \cdot k \cdot T$, ezért a belső energia megváltozása $\Delta E_b = \frac{f}{2} \cdot N \cdot k \cdot \Delta T$. A gáz tágulási munkája pedig: $W_{gáz} = p \cdot \Delta V = N \cdot k \cdot \Delta T$. A kettő aránya $\frac{f}{2}$ lesz.
   - Az egyatomos gázoknál ($f = 3$) esetben másfélszer nagyobb a belső energia megváltozása, mint a gáz tágulási munkája. Így a felvett hő 60%-a belső energia növelésére, 40%-a pedig tágulási munkára fordítódik.
   - Kétatomos gázok esetében ($f = 5$) a felvett hőből 2,5-szer nagyobb rész jut a belső energia növelésére, mint tágulási munkára. A Q megoszlási aránya ekkor 71,4% és 28,6% lesz.
   - Háromatomos gázok esetében ($f = 6$) a gázokkal izobár módon közölt hő a fenti gondolatmenet alapján 3 : 1 arányban oszlik meg a belső energia változása és a munkavégzés között.
2. Mivel **állandó térfogaton** történő melegítésnél a gázok nem végeznek tágulási munkát vagyis „nem pazarolnak", így könnyebben melegíthetők mint állandó nyomáson. Ezért a testek melegíthetőségét mennyiségileg jellemző fajhő is kisebb lesz ekkor. A gázok tágulási munkájával kapcsolatos több féle fajhőjével későbbiekben részletesebben is foglalkozunk.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Egy függőleges állású súlyos dugattyúval ellátott hengerbe elzárt levegőt melegítünk. Mikor kell több hőt közölni a gázzal, hogy a térfogatváltozása ugyanakkora legyen: nagyobb súlyú vagy kisebb súlyú dugattyú esetén? Mire fordítódik a gáz tágulási munkája?
2. Egy függőleges állású A keresztmetszetű henger dugattyújára m tömegű nehezéket helyezünk. Kevesebb vagy több hőt kell a gáztól elvonni ahhoz, hogy ugyanakkora ΔV-vel csökkenjen a gáz térfogata, mint amikor a dugattyún nem volt nehezék? Mekkora a két esetben elvonandó Q hők különbsége?
3. Ugyanakkora nyomású, térfogatú és hőmérsékletű egyatomos és kétatomos gázunk van. A gázok izobár melegítésekor melyik gázzal kell több hőt közölni ugyanakkora térfogat-növekedés létrehozásához? Mekkora a gázokkal közölt Q hőmennyiségek aránya?
4. Ha az előző kérdésben szereplő egy- és kétatomos gázokat állandó térfogaton melegítjük, akkor melyiknél kell több hőt közölni ugyanakkora nyomásnövekedés eléréséhez? Mekkora most a közölt Q hők aránya?

FELADATOK

1. Egy dugattyúval elzárt edényben 2 mólnyi 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) Mennyivel változott meg a gáz belső energiája, és mennyi munkát végzett a gáz?
   c) Mennyi hőt közöltünk a gázzal a melegítés során?

Megoldás:

$n = 2$ mol

$T_1 = 27\ °C = 300\ K$, $T_2 = 57\ °C = 330\ K$

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

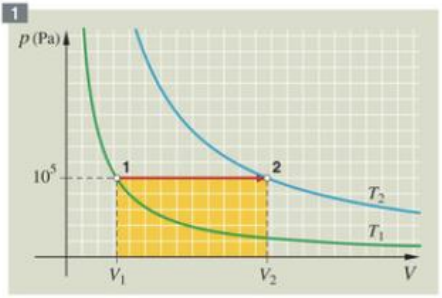
$R = 8{,}314\ \frac{J}{mol \cdot K}$

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

b) $\Delta E_b = ?$, $W_{gáz} = ?$

c) $Q = ?$

1



a) Az állapotegyenletből az (1) és (2) állapotok térfogatára kapjuk:

$$V_1 = \frac{n \cdot R \cdot T_1}{p} = \mathbf{4{,}98 \cdot 10^{-2}\ m^3},$$

$$V_2 = \frac{n \cdot R \cdot T_2}{p} = \mathbf{5{,}48 \cdot 10^{-2}\ m^3}.$$

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

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

A tágulási munkát pedig a nyomás és a térfogatváltozás ismeretében számíthatjuk:

$$W_{gáz} = p \cdot \Delta V = 10^5\ Pa \cdot 5 \cdot 10^{-3}\ m^3 = \mathbf{500\ J}.$$

c) Az I. főtételt szerint a felvett hő:

$$Q = \Delta E_b + W_{gáz} = \mathbf{1747\ J}.$$

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

3. 2 mólnyi kétatomos, normál állapotú ideális gázt állandó nyomáson 27 °C hőmérsékletre melegítünk.

a) Mennyivel változott meg a gáz belső energiája?

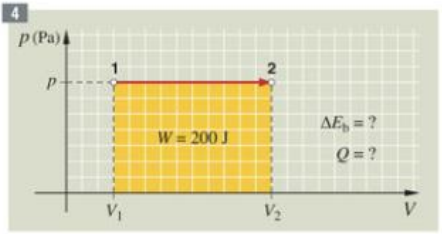
b) Mennyi hőt közöltünk a gázzal?

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?

4



5. Kétatomos gázt melegítünk állandó nyomáson, melynek munkavégzése 200 J.

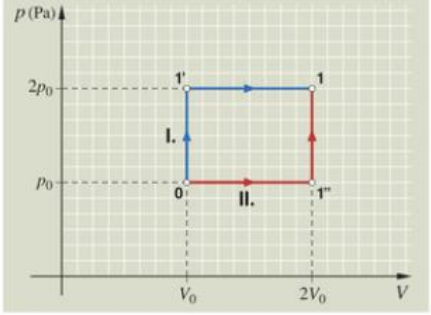
a) Mennyivel változott meg a gáz belső energiája?

b) Mennyi hőt közöltünk a gázzal?

c) Hányszorosára nőtt a gáz hőmérséklete és térfogata, ha kezdetben a belső energia 300 J volt?

6. 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. A folyamatot a p–V diagram mutatja.

6



a) Határozzuk meg a folyamat közbenső, (1') és (1") állapotaiban, valamint az (1) végállapotban a gáz hőmérsékletét!

b) Hányszorosára nőtt a végállapot belső energiája a kezdetihez képest?

c) Számítsuk ki a gáz $Q_{I.}$, $Q_{II.}$ hőfelvételét az (I.) és a (II.) úton!

d) Mivel egyenlő a $Q_{I.}$ és a $Q_{II.}$ különbsége?

MEGOLDÁS:

$m_O = 160\ \text{g}$, $M_O = 32\ \frac{\text{g}}{\text{mol}}$

$T_0 = 273\ \text{K}$

$p_0 = 10^5\ \text{Pa}$, $p_{1'} = 2p_0$

$V_{1''} = 2V_0$

a) $T_{1'} = ?$, $T_{1''} = ?$, $T_1 = ?$

b) $\frac{E_{b_1}}{E_{b_0}} = ?$

c) $Q_{I.} = ?$, $Q_{II.} = ?$

d) $Q_{I.} - Q_{II.} = ?$

a) Gay-Lussac I. és II. törvényéből:

$$T_{1'} = \frac{2p_0}{p_0} \cdot T_0 = 2T_0 = \mathbf{546\ K}, \quad T_{1''} = \frac{2V_0}{V_0} \cdot T_0 = 2T_0 = \mathbf{546\ K}, \quad T_1 = \frac{2V_0}{V_0} \cdot T_{1'} = 2T_{1'} = \mathbf{1092\ K}.$$

b) $$\frac{E_{b_1}}{E_{b_0}} = \frac{\frac{f}{2} \cdot p_1 \cdot V_1}{\frac{f}{2} \cdot p_0 \cdot V_0} = \mathbf{4}.$$

c) $$Q_{I.} = \Delta E + W_{I.} = 3 \cdot \frac{5}{2} \cdot p_0 \cdot V_0 + 2p_0 \cdot (2V_0 - V_0) = \frac{19}{2} \cdot p_0 \cdot V_0 = \frac{19}{2} \cdot \frac{m_O}{M_O} \cdot R \cdot T_0 = \mathbf{1{,}078 \cdot 10^5\ J},$$

$$Q_{II.} = \Delta E + W_{II.} = 3 \cdot \frac{5}{2} \cdot p_0 \cdot V_0 + p_0 \cdot (2V_0 - V_0) = \frac{17}{2} \cdot p_0 \cdot V_0 = \frac{17}{2} \cdot \frac{m_O}{M_O} \cdot R \cdot T_0 = \mathbf{9{,}646 \cdot 10^4\ J}.$$

d) $Q_{I.} - Q_{II.}$ a p–V diagram téglalapjának területével azonos számértékű:

$$Q_{I.} - Q_{II.} = p \cdot V = \frac{m_O}{M_O} \cdot R \cdot T_0 = \mathbf{1{,}135 \cdot 10^4\ J}.$$

4.3. Az izoterm és adiabatikus állapotváltozások energiacseréi

IZOTERM ÁLLAPOTVÁLTOZÁSOK ENERGIACSERÉJE

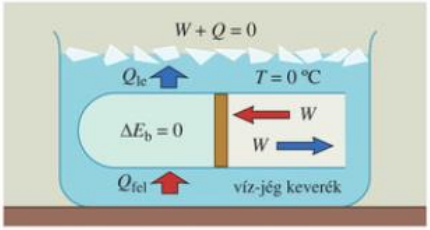
Az izoterm állapotváltozások során a gáz hőmérséklete állandó, így a gáz belső energiája nem változik, vagyis $\Delta E_b = 0$.

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.

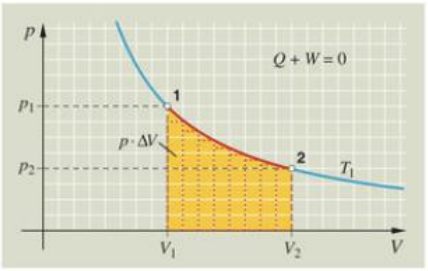
Ha a gázt a dugattyú segítségével lassan összenyomjuk, akkor a víz-jég keverékben a jég egy része megolvad. A gázon végzett külső munkát a gáz hő formájában adja le környezetének. Ha viszont az összenyomott gázt lassan tágulni hagyjuk, akkor a víz egy része megfagy. A gáz által a víztől elvont hő a gáz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

A gázok izotermikus állapotváltozására jellemző energiacsere-viszonyok:

- **A gáz és a környezete között kétfajta kölcsönhatás jön létre.**
- **A gáz összenyomásakor a külső erők pozitív munkát végeznek a gázon. Ezzel egyenlő nagyságú hőt ad le a gáz környezetének.**
- **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.**



181.1. Izotermikus állapotváltozások energiacseréi. A piros színű nyilak a gáz energiafelvételeit, a kékek az energialeadásait jelzik



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

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

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

A gáz tágulási munkáját (illetve a külső erők térfogati munkáját) kicsiny térfogatváltozások mellett – amikor a nyomást állandónak vehetjük – $\Delta W_i = p_i \cdot \Delta V_i$ elemi munkák összegeként számíthatjuk ki:

$$W_{gáz} = \sum p_i \cdot \Delta V_i = -W_{külső}.$$

A munkavégzés mérőszáma megegyezik a p–V diagram grafikonja alatti **terület mérőszámával** (*181.2. ábra*)

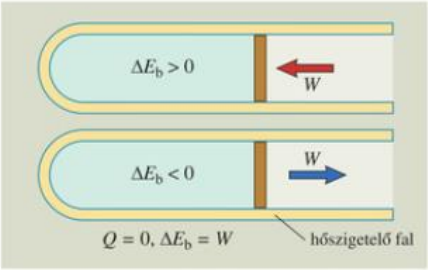
A GÁZOK ADIABATIKUS ÁLLAPOTVÁLTOZÁSAI

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.

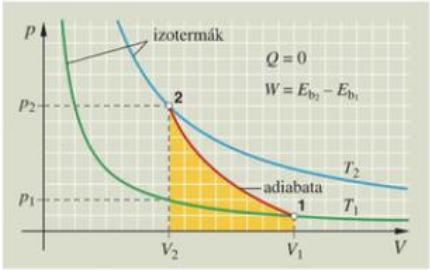
Ezt tapasztalhatjuk például, ha a kerékpártömlőt gyorsan pumpáljuk. Ekkor a pumpában lévő levegő és a pumpa hengerének fala felmelegszik. A szódakészítésnél a szifonpatron becsavarásakor láthatjuk, kezünkkel érzékelhetjük, hogy a patron külső fala megderesedik, jelezve, hogy a szén-dioxid gáz a gyors táguláskor lehűlt.

A dízelmotorban a hirtelen összenyomott levegő annyira felmelegszik, hogy az ekkor befecskendezett üzemanyag öngyulladással elég.

3D 3D 3D 3D 3D



182.1. A gázok adiabatikus állapotváltozásainak energiacsere-viszonyai



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

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.**

A munkavégzést most is a p–V diagramon láthatjuk: a végzett munka nagysága az **izotermánál** meredekebb görbe: az **adiabata** alatti terület mérőszámával egyenlő, melynek pontos értékét integrálszámítással kaphatjuk meg.

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 a folyamat során 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:

$$\Delta E_b = W.$$

MEGJEGYZÉSEK

1. Az izotermikus és adiabatikus állapotváltozások tárgyalt energiacseréi jól példázzák, hogy **a gázoknál előfordulhat hőmérséklet-változás nélküli hőcsere** és fordítva: **hőcsere nélküli hőmérséklet-változás** is.
   Megtörténhet az a meglepőnek tűnő jelenség is, hogy a gáz olyan hevesen tágul, hogy a melegítés ellenére is lehűl, vagy hirtelen összenyomáskor hűtés mellett is felmelegszik. Így a turista PB gázpalack fala nyári melegben is megderesedhet, ha a szelep megnyitásával a gáz gyorsan áramlik ki a palackból.
2. Az adiabatikus állapotváltozások jelentős szerepet játszanak a légköri jelenségeknél is. A magas hegységbe ütköző és gyorsan felszállni kényszerülő páradús légtömegek – a magassággal csökkenő légköri nyomás miatt – hirtelen kitágulnak és lehűlnek, a lehűlt légtömegben a pára kicsapódik és a hegy túloldalán eső formájában lehull. Ezzel magyarázható pl. az Alpokalján gyakori esőzés.
3. Az adiabatikus állapotváltozások a hőerőgépek körfolyamatainál játszanak fontos szerepet. Erről későbbiekben még lesz szó.

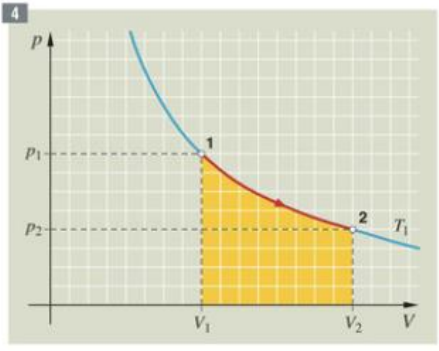
GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Az izotermikus állapotváltozásnál, miért jó hűtőközeg a víz-jég keverék? Hogyan ad át hőt a gáznak a keverék?
2. A gáz izoterm összenyomásakor mikor kell több hőt elvonni a gáztól, amikor a kezdeti térfogata $\frac{3}{4}$ részére csökken, vagy amikor a térfogata $\frac{3}{4}$-ről $\frac{1}{2}$ részére csökken? (A válaszadásban segít az izoterma görbe.)
3. Orvosi fecskendő végét befogva a dugattyú mozgatásával a hengerben lévő levegőt fele akkora térfogatúra préseljük össze. Mikor végzünk több munkát, ha a préselést gyorsan hajtjuk végre vagy ha lassan? (Most is segítenek az izoterma és az adiabata görbék.)
4. A gázok adiabatikus tágulása közben a gáz térfogata V-ről $2V$-re, majd $2V$-ről $3V$-re növekszik. Első vagy második esetben csökken nagyobb mértékben a gáz hőmérséklete? Indokoljuk meg válaszunkat! (Használjuk az adiabata görbét!)
5. Keressünk további példákat az internetről a gázok adiabatikus állapotváltozásának gyakorlati alkalmazására!

FELADATOK

1. Ideális gáz izotermikus tágulás közben 200 J hőt vett fel környezetéből. Mekkora volt a gáz tágulási munkája?
2. Dugattyúval ellátott hengerbe bezárt gázt préselünk össze. A kifejtett átlagos nyomóerőnk 500 N. A dugattyú elmozdulása 0,3 m. A dugattyú keresztmetszete 2 dm^2, a külső nyomás 10^5 Pa.
   a) Mennyi hőt kell a gáztól az összenyomás közben elvonni, hogy a gáz hőmérséklete állandó maradjon?
   b) Ha nem hűtjük összenyomás közben a gázt, akkor hogyan változna meg az átlagos összenyomó erő a dugattyú azonos elmozdulása esetén?
3. Egy mólnyi egyatomos ideális gázt adiabatikusan összenyomunk. A külső erők térfogati munkája 800 J.
   a) Mekkora a gáz belső energiájának megváltozása?
   b) Mennyivel növekszik a gáz hőmérséklete?
4. A p–V diagramon szemléltetett izotermikus állapotváltozásban az ideális gáz kezdő állapotában $V_1 = 80\ dm^3$, $p_1 = 10^5$ Pa, $T_1 = 300$ K.
   a) Mekkora a gáz anyagmennyisége?
   b) A méretarányosnak tekintett grafikonból becsüljük meg mennyi hőt vett fel környezetétől a gáz tágulása során, amíg az (1)-ből a (2) állapotba jutott!

4



4.4. Testek fajhője, hőkapacitása

SZILÁRD TESTEK ÉS FOLYADÉKOK FAJHŐJE

Az **I. főtétel** tárgyalása során foglalkoznunk kellett a **hőcserével,** mint a testek **belső energiaváltoztatásának** egyik módjával.

A főtétel energiamérlegének alkalmazásánál, fontosnak bizonyult, hogy hőcseréhez olyan fizikai mennyiséget rendeljünk, amely mérhető alapmennyiségekből tevődik össze.

Így jutottunk el a Q **hőmennyiség fogalmához,** amelyről beláttuk, hogy

- egyenesen arányos a testek **hőmérsékletének megváltozásával** (ΔT),
- a **test tömegével** (m),
- függ a test **anyagi minőségétől.**

Ezért a **hőmennyiséget,** az $m \cdot \Delta T$ szorzattal egyenesen arányos munka jellegű fizika mennyiségnek tekinthetjük.

Így a hőmennyiség képletére a

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

kifejezés adódik, ahol a c arányossági szorzó az anyagra jellemző állandó, melyet **fajhőnek nevezünk.**

Az **anyagok fajhője számértékileg megadja,** hogy **mekkora hőmennyiség** elvonása vagy felvétele **szükséges ahhoz,** hogy az **1 kg tömegű anyag hőmérséklete 1 °C-kal** (vagy 1 K-nel) **változzon meg.**

A **hőmennyiség mértékegysége: J (joule).**

A **fajhő egységét** a hőmennyiség kifejezéséből kaphatjuk meg, ha c-t kifejezzük, és az ott lévő mennyiségek egységeit behelyettesítjük:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \rightarrow \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{°C}} \text{ vagy } \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}.$$

TESTEK HŐKAPACITÁSA

A többféle anyagból készült testeknél elegendő azt ismerni, hogy mekkora Q hőmennyiségre van szükség ahhoz, hogy a test hőmérséklete egy fokkal változzon.

Ha egy test hőmérséklete nagy mennyiségű hő közlése (vagy elvonása) hatására is csak kis mértékben változik, akkor azt mondjuk, hogy a testnek nagy a **hőbefogadó** (hőleadó) **képessége,** szakszóval: nagy a **hőkapacitása.** Ha pedig kicsiny hőcsere révén is a test hőmérséklete jelentősen változik, akkor kis hőkapacitású a test.

Ezért célszerű a testek hőkapacitását

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

hányadossal megadni, jele C (*capacity* angol szó után), egysége: $\frac{\text{J}}{\text{°C}}$ vagy $\frac{\text{J}}{\text{K}}$.

Egy test **hőkapacitása megmutatja,** hogy **mekkora Q hőmennyiség szükséges** ahhoz, hogy **hőmérséklete 1 egységgel** (°C-kal vagy K-nel) **változzon.**

A fajhő és a hőkapacitás közötti kapcsolat homogén anyagú testeknél:

$$c = \frac{C}{m}.$$

Ebből származik a fajhő elnevezés: fajhő = **faj**lagos (azaz egységnyi tömegre vonatkoztatott) **hő**kapacitás.

A hőkapacitás definíciójából adódik, hogy különböző tömegű testek hőkapacitása is lehet azonos, pl. 1 kg tömegű víz hőkapacitása kereken 9 kg vas, 32 kg arany, 3 kg fa hőkapacitásával egyezik meg. Ezért mondjuk a vízről, hogy **„jó hőhordozó".** Ezt fűtő- hűtőrendszereknél gyakran fel is használják.

AZ IDEÁLIS GÁZOK FAJHŐJE

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 nevezni, hogy milyen állapotváltozás során jön létre a hőcsere.

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

A gázok állandó nyomáson nehezebben melegíthetők hűthetők, 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, amikor a közölt Q hőmennyiség teljes egészében a belső energiát növeli. Röviden azt mondhatjuk: a gáz ekkor a kapott hő egy részét munkavégzésre „pazarolja el".

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. Ehhez alkalmazzuk az I. főtételt, és használjuk fel az állapotegyenlet megfelelő alakját:

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

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

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

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. Az ideális gázok most tárgyalt kétféle fajhőjének fontos szerepe van a termodinamikában. Gyakran használják a két fajhő hányadosát, melyre külön jelölést vezettek be: $\kappa = \frac{c_p}{c_V}$ (görög ábécé kisbetűje, ejtsd: kappa). Amelyet *adiabatikus kitevőnek* neveznek, mivel segítségével az adiabatikus állapotváltozás törvénye felírható. ($p \cdot V^\kappa =$ állandó formában.)

3. Az ideális gázok további speciális állapotváltozásainál is meghatározhatjuk a gázok fajhőjét.
   - Így az adiabatikus állapotváltozásnál a $c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}$ definíciós képlet szerint a fajhő értéke zérus ($c_{ad} = 0$), mert $Q = 0$ hőcsere esetén $\Delta T \neq 0$, így a tört értéke 0 lesz.
   - Az izotermikus állapotváltozásnál a gáz és környezete között van hőcsere: $Q \neq 0$, mégis $\Delta T = 0$, ezért a fajhő és a hőkapacitás értéke végtelen nagynak tekinthető, mivel a gáz hőmérséklete nem változik meg hőcsere ellenére sem.

4. Az ideális gázok kétféle hőkapacitását megkapjuk, ha a megfelelő fajhő képletét helyettesítjük a $C = m \cdot c$ összefüggésbe:

$$C_V = m \cdot \frac{f}{2} \cdot \frac{R}{M} \quad \text{és} \quad C_p = m \cdot \left(\frac{f}{2} + 1\right) \cdot \frac{R}{M}.$$

   A hőkapacitás a tömegen kívül függ a gáz moláris tömegétől is: minél kisebb a gáz moláris tömege, annál nagyobb az azonos tömegű gáz hőkapacitása. Ezért használják gyakran gázhűtésnél az $M = 4 \frac{g}{mol}$ kis moláris tömegű veszélytelen semleges héliumgázt.

Kémiában gyakran használják a **mólhő** fogalmát, amikor egy mólnyi gáz hőkapacitására vagyunk kíváncsiak. Az ideális gázok kétféle mólhőjét a hőkapacitás és az n anyagnennyiség hányadosaként kapjuk:

$$C_{\text{mol}}^{V} = \frac{C_V}{n} = \frac{f}{2} \cdot R, \quad \text{illetve} \quad C_{\text{mol}}^{p} = \left(\frac{f}{2} + 1\right) \cdot R.$$

A **mólhőt** már **nem befolyásolja a gázok anyagi minősége,** értéke csak a gázrészecskék szabadsági fokszámától függ: így az egyatomos nemesgázok állandó térfogaton vett mólhője jó közelítéssel $\approx \frac{3}{2} \cdot R = 12{,}5 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$, a kétatomos valódi gázoké pedig $\approx \frac{5}{2} \cdot R = 20{,}8 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$. Ellenőrizzük hőtani táblázatokban!

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Tavaszi áradáskor miért nagyobb a Tisza hőkapacitása, mint nyáron?
2. Melyik anyagnak nagyobb a hőkapacitása: 1 t tömegű vasnak, vagy 1 m^3 térfogatú víznek? (Használjuk a függvénytáblázatot!)
3. A folyadékok közül a víz fajhője a legnagyobb. Mivel magyarázhatjuk ezt? Gondoljunk kémiában a víz szerkezetéről tanultakra!
4. A hidrogén állandó térfogaton vett fajhője több mint 15-szöröse az oxigén fajhőjének. Mire emlékeztet a fajhők aránya?
5. A fémek közül az alumíniumnak kiugróan magas a fajhője (pl. a rézének több mint duplája). Vajon mi lehet ennek az oka?

FELADATOK

1. Kaloriméteres mérésnél a kaloriméterbe $m_1 = 100$ g tömegű, $T_1 = 20$ °C hőmérsékletű vizet öntünk. Majd a hideg vízhez $m_2 = 50$ g tömegű, $T_2 = 60$ °C hőmérsékletű vizet adunk. A kaloriméterben a termikus egyensúly létrejöttekor a közös hőmérséklet $T_3 = 30$ °C lesz.
   a) Mekkora a leadott és a felvett hőmennyiség? Miért nem egyenlők?
   b) Határozzuk meg az adatokból a kaloriméter C_{kal} hőkapacitását!
   c) Mekkora tömegű vízével azonos a mérőeszköz hőkapacitása?

MEGOLDÁS:

$m_1 = 100$ g, $T_1 = 20$ °C
$m_2 = 50$ g, $T_2 = 60$ °C
$T_k = 30$ °C
$c_{\text{víz}} = 4{,}18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{°C}} = 4{,}18 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{°C}}$

a) $Q_{\text{le}} = ?, \quad Q_{\text{fel}} = ?$
b) $C_{\text{kal}} = ?$
c) $m_{\text{víz}} = ?$

a) A leadott és felvett hőmennyiségek:

$$Q_{\text{fel}} = c_{\text{víz}} \cdot m_1 \cdot (T_\text{k} - T_1) = 4{,}18 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{°C}} \cdot 100\ \text{g} \cdot 10\ \text{°C} = \mathbf{4180\ J},$$

$$Q_{\text{le}} = c_{\text{víz}} \cdot m_2 \cdot (T_2 - T_\text{k}) = 4{,}18 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{°C}} \cdot 50\ \text{g} \cdot 30\ \text{°C} = \mathbf{6270\ J}.$$

$Q_{\text{le}}^{\text{víz}} \neq Q_{\text{fel}}^{\text{víz}}$, mivel a kaloriméter is vesz fel hőmennyiséget, ezért $Q_{\text{le}}^{\text{víz}} = Q_{\text{fel}}^{\text{víz}} + Q_{\text{fel}}^{\text{kal}}$.

b) Így a kaloriméter hőkapacitása:

$$C_{\text{kal}} = \frac{Q_{\text{fel}}^{\text{kal}}}{\Delta T} = \frac{Q_{\text{le}}^{\text{víz}} - Q_{\text{fel}}^{\text{víz}}}{T_\text{k} - T_1} = \frac{2090\ \text{J}}{10\ \text{°C}} = \mathbf{209\ \frac{J}{°C}}.$$

c) A kaloriméterrel megegyező hőkapacitású víz tömege:

$$m_{\text{víz}} = \frac{C_{\text{kal}}}{c_{\text{víz}}} = \frac{209 \frac{\text{J}}{\text{°C}}}{4{,}18 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{°C}}} = \mathbf{50\ g}.$$

Megjegyzés: a kaloriméterrel azonos hőkapacitású víz tömegét a kalorimetrikus méréseknél szokás a **kaloriméter vízértékének** is nevezni. Tehát a kaloriméterünk **vízértéke 50 g.**

2. Az előző feladatban szereplő kaloriméterrel egy ismeretlen fémhenger fajhőjét szeretnénk meghatározni. Ezért a kaloriméterbe $m_1 = 50$ g tömegű, $T_1 = 15$ °C hőmérsékletű vizet öntünk. Majd a $T_2 = 80$ °C hőmérsékletű vízfürdőből kiemelt $m_2 = 60$ g tömegű – ismeretlen fajhőjű – fémhengert a kaloriméterbe helyezzük. A kialakult közös hőmérséklet $T_\text{k} = 20$ °C lesz.

a) A kaloriméter hőkapacitását is figyelembe véve határozzuk meg a fém fajhőjét!

b) Függvénytáblázat segítségével következtessünk a fém anyagára!

MEGOLDÁS:

$m_1 = 100$ g, $T_1 = 15$ °C

$m_2 = 60$ g, $T_2 = 80$ °C

$T_\text{k} = 20$ °C

$c_{\text{víz}} = 4{,}18 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{°C}}$, $C_{\text{kal}} = 209 \frac{\text{J}}{\text{°C}}$

$c_{\text{fém}} = ?$

a) Részletesen írjuk fel a termikus egyensúly létrejöttének $Q_{\text{le}} = Q_{\text{fel}}$ feltételét:

$$c_{\text{víz}} \cdot m_1 \cdot (T_\text{k} - T_1) + C_{\text{kal}} \cdot (T_\text{k} - T_1) = c_{\text{fém}} \cdot m_2 \cdot (T_2 - T_\text{k}).$$

Ebből a keresett $c_{\text{fém}}$-et kifejezve, az ismert adatokat behelyettesítve megkapjuk a keresett fajhő értékét:

$$c_{\text{fém}} = \frac{c_{\text{víz}} \cdot m_1 \cdot (T_\text{k} - T_1) + C_{\text{kal}} \cdot (T_\text{k} - T_1)}{m_2 \cdot (T_2 - T_\text{k})} = 0{,}87 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{°C}} = \mathbf{870\ \frac{J}{kg \cdot °C}}.$$

b) A négyjegyű függvénytáblázatban található fajhő táblázatban az alumínium fajhője esik legközelebb a kapott értékhez: $900 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{°C}}$. Tehát a fém minden bizonnyal **alumínium.**

3. Egy kovácsműhelyben felizzított vaskarikákat helyeznek edzés céljából hideg vízfürdőbe. Az egymás után behelyezett és a fürdőben hagyott karikák a fürdő vizének hőmérsékletét 15 °C-ról 55 °C-ra növelik. A víz fajhője: $4{,}18\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{°C}}$, vas fajhője: $0{,}465\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{°C}}$.



a) Mekkora lehetett a munkadarabok – azonosnak vett – hőmérséklete a vízbehelyezés előtt, ha összesen 30 db, egyenként $m_k = 500$ g tömegű karikát edzett a kovácsmester a $V = 25\ \text{dm}^3$ térfogatú vízben?

b) Melyik vaskarika hőmérsékletváltozása volt a legnagyobb, és melyiké a legkisebb a vízbehelyezéskor?

4. Egy átfolyós gázos vízmelegítő a rajta átfolyó hideg csapvíz hőmérsékletét 18 °C-ról 33 °C-ra növeli.

a) Mekkora a gázmelegítő teljesítménye, ha a meleg vizes kifolyó csapból a 2 cm átmérőjű vízsugár sebessége $40\ \frac{\text{cm}}{\text{s}}$, és a melegítés hatásfoka 80%-os?

b) Mennyi gázt használunk fel 3 perces zuhanyozás, illetve egy 80 liter térfogatú meleg vizet tartalmazó kádban való fürdés során? A gáz fűtőértéke $35\ \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$.

c) Melyik fürdési mód gazdaságosabb? Mennyit takarítunk meg 1-1 tisztálkodás alkalmával, ha a gáz ára $120\ \frac{\text{Ft}}{\text{m}^3}$?

OLVASMÁNY

A HŐTERJEDÉS MÓDJAIRÓL

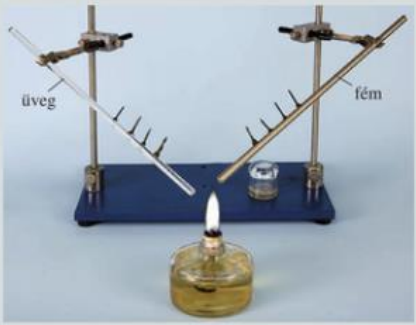
Hővezetés

Hővezetésről beszélünk, amikor a **testek szomszédos részecskéi között történik energiaátadás.** Az energiacsere annál gyorsabb, minél szorosabb a részecskék közötti kapcsolat.

Legjobb hővezető anyagok a szilárd testek, közülük is a fémek, melyek egyben jó elektromos vezetők is. A folyadékok kevésbé jól vezetik a hőt, legrosszabb hővezetők a gázok, mivel a gázrészecskék között nincs szoros kapcsolat.

Ezért a hőszigeteléseknél– ahol a hővezetés megakadályozása a cél – gyakran használnak laza szerkezetű, porózus anyagokat, ahol apró légzárványok gátolják a hőátadást. Így az állatok sűrű szőrzete közé szorult levegő is jó hőszigetelőnek bizonyul.

Az anyagok különböző hővezető képességét a képen látható kísérlettel mutathatjuk be.



188.1. A fémrúdról a parafinnal ragasztott szögek hamarabb potyognak le, jelezve, hogy a fémek jó hővezetők

Hőáramlás

Hőáramláskor a hőcsere az anyag részecskéinek jelentős elmozdulásával – áramlásával – valósul meg. Ez a hőáramlás **csak folyadékoknál és gázoknál jöhet létre.**

A hőáramlás a korábban tárgyalt hőtágulás hatására létrejött sűrűségváltozáson alapszik. A kisebb sűrűségű anyagok felfelé, a nagyobb sűrűségűek lefelé áramlanak.

A hőáramlás kialakulásában fontos szerepet játszik a testek súlya által létrehozott felhajtóerő. A Föld körül keringő űrhajóban, a súlytalanság állapotában, nincs hőáramlás sem. Ezt demonstrálhatjuk, ha egy égő gyertyát tartalmazó dobozt pár méter magasról ejtünk le: a gyertya esés közben elalszik oxigén utánpótlás hiányában.



189.1. Hőerőmű hűtőtornyai

A Föld klímájának kialakulásában, a légkör felmelegedésében jelentős szerepet játszik a hőterjedésnek ez a formája.

A folyadékok edényekben történő melegítésénél is célszerű a hőforrást az edény alján elhelyezni, hogy az áramlással segítsük a gyors hőátadást. Ugyanez a cél a lakóházak egyedi fűtésénél is, amikor a földszinten vagy az alagsorba helyezik el a fűtőkazánt.

Hősugárzás

A hőterjedésnek ez a formája **nem kíván közvetítő közeget** a hőt átadó test és a hőelnyelő test között. A **Napból a sugárzó energia Földünkre kizárólag ebben a formában érkezik,** mivel a közbenső **világűr** sem **hővezetésre** sem pedig **hőáramlásra nem képes.**

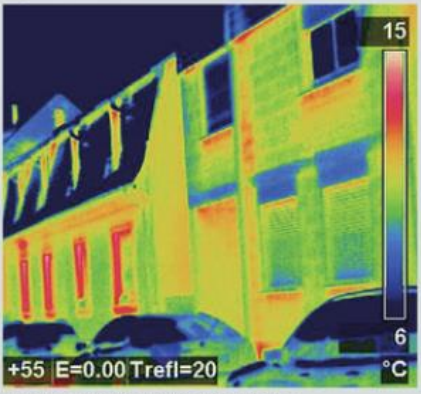
A hősugárzás jelenségével nemcsak a Nap sugárzásánál találkozunk, hanem mindennapi életünkben is előfordul: pl fűtésénél: kályha, radiátor, elektromos hősugárzóknál stb.

Bizonyos mértékben minden test bocsát ki magából láthatatlan hősugarakat, ugyanakkor más testekből érkezőket el is nyeli több-kevesebb mértékben.

A hősugárzás alapján készítenek lakásokról, emberi testről úgynevezett hőtérképeket, a hőszigetelés ellenőrzésére, a gyulladásos betegségek felderítésére.

Az állatvilágban is használják a hősugárzás jelenségét az állatok: társaik (ellenségeik) sötétben való felismerésénél. A hüllők nagyon jó hősugárzó érzékelők, amely kiegészíti a rossz látásukat, segíti az éjszakai tájékozódásukat.

A hősugárzás törvényszerűségét *J. Stefan* és *L. Boltzmann* fizikusok vizsgálták. A törvényt róluk **Stefan–Boltzmann-törvénynek** nevezik, mely szerint a fekete test egységnyi felületének sugárzási teljesítménye a test abszolút hőmérsékletének 4-dik hatványával arányos:



189.2. Lakóépületről készült hőtérkép

$$P = \sigma \cdot T^4, \quad \text{ahol } \sigma = 5{,}76 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}.$$

A törvény segítségével következtetni lehet a Nap felszíni hőmérsékletére (5800 K) kiindulva abból, hogy a Földünkre érkező napsugárzás teljesítménye 1370 W négyzetméterenként.

4.5. 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.

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.

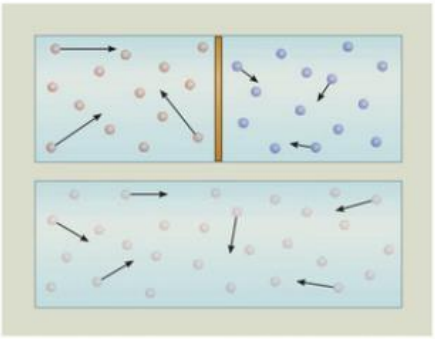
A HŐTAN II. FŐTÉTELÉNEK MOLEKULÁRIS ÉRTELMEZÉSE

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.



190.1. Megfordítható és nem megfordítható folyamat



191.1. Ha a gáztartályok közötti válaszfalat eltávolítjuk, akkor a hevesebben mozgó részecskék mozgása lassul, a lassabban mozgóké pedig gyorsabb lesz. A nagy számú véletlenszerű ütközések igen nagy valószínűséggel kiegyenlítődést hoznak létre

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 haladó vagy forgómozgást végző testek **mechanikai mozgási energiája a test részecskéinek** – valamilyen módon – **rendezett mozgási energiájából** tevődik össze.

A szilárd, csak haladó mozgást végző test részecskéi együtt mozognak a test tömegközéppontjával, **sebességük azonos nagyságú és irányú.**

A forgó merev testek részecskéinek is rendezett a mozgása: a forgástengelytől azonos távolságra lévő részecskék **azonos nagyságú kerületi sebességgel körpályán keringenek.**



191.2. *N. L. Sadi Carnot* (1796–1832) francia fizikus és matematikus, a hőtan II. főtételének megalapozója és *Max Planck* (1858–1947) Nobel-díjas német fizikus

Ezek a rendezett mozgások a súrlódás következtében teljesen megszűnhetnek. Ekkor a mozgási energia a rendezetlen hőmozgás energiáját növeli (szokás azt mondani, hogy a mechanikai energia szétszóródik – idegen szóval: disszipálódik – és belső energiává alakul át). **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.

A II. főtételnek még számos, az előzővel egyenértékű megfogalmazása ismeretes, amelyek közül mindegyik egyértelműen meghatározza a termikus folyamatok lejátszódásának lehetséges irányát.

Rudolf Clausius német fizikus – a molekuláris hőelmélet egyik megalapítója – röviden így fogalmazott:

A termikus energia hidegebb testről a melegebb testre nem mehet át önként. (1850)

Lord Kelvin skót fizikus – a Kelvin-skála atyja – a fizikai folyamatok megfordíthatóságával kapcsolatosan summázza röviden a főtétel lényegét:

Minden irreverzibilis folyamatnál egy bizonyos mennyiségű munka szétszóródik (belső energiává alakul). (1852)

Max Planck német fizikus pedig így összegzi a tapasztalatokat:

Nincs olyan periodikusan működő hőerőgép, amely hőt vonna el egy hőtartályból, és azt teljes egészében mechanikai munkává alakítaná. (1903)

Az ilyen – a II. főtétel alapján egyébként meg nem építhető – hőerőgépet **másodfajú perpetuum mobilének** (másodfajú örökmozgónak) nevezik.

MEGJEGYZÉSEK

1. A hidegebb hűtőszekrényből hő „megy át" a melegebb szobába. Ez az ellentétes irányú hőcsere azonban nem magától – spontán módon – következik be, hanem a hűtőgép kompresszorának munkavégzése következtében. A kompresszor azonban elektromos energiát fogyaszt. Ez is a II. főtétel Clausius-féle megfogalmazását igazolja: ha a hidegebb helyről a melegebb hely felé történik a hőátadás, annak nyoma és ára van (lásd a villanyszámlát), vagyis a folyamat önként nem megy végbe.
2. 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. Nem lehet megvalósítani azt, hogy az üzemanyag elégetésekor keletkezett hő teljes egészében a jármű gyorsítására, a közegellenállás ellen végzett munkára és egyéb súrlódási veszteségre fordítódjon. A motor – veszteséget jelentő melegedését – nem küszöbölhetjük ki teljesen.
3. A termodinamikában a rendezetlenség mértékének számszerű jellemzésére új fizikai mennyiséget vezetett be *Rudolf Clausius* – a hőelmélet egyik elindítója –, amelyet *entrópiának* (jele *S*) nevezett el. Ezzel a II. főtétel így is megfogalmazható: **Zárt rendszerekben csak olyan folyamatok jöhetnek létre, amelyekben a rendszer entrópia mindig növekszik.** (Részletesebben ezzel itt nem foglalkozunk.)
4. A **hőtan III. főtételének** nevezik *Nernst tételét* (1905), melynek egyik – már korábban említett – következménye, hogy az abszolút zérus fok nem érhető el, csak határesetben megközelíthető, mivel az anyagok fajhője is a 0 kelvin közelében zérushoz tart, így bármilyen kicsi ΔQ hőközlés az anyagok hőmérsékletét 0 K fölé emeli. (*Walther Nerst,* 1864–1941, Nobel-díjas német fizikokémikus.)

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. Hogyan változna meg az autónk utasterének hőmérséklete, ha a szerelő fordítva kötné be a klímaberendezést? Mikor lenne ez hasznos, és miért nem alkalmazzák ebben az esetben a fordított üzemelésű klímát az autóknál?
5. A gépkocsik üzemanyag fogyasztását befolyásolja-e a klímaberendezés működtetése? Ha igen, milyen módon?



OLVASMÁNY

Földünk legfőbb energiaforrása, a Nap

Naprendszerünkben a bolygók közül egyedül a Földön alakult ki magasabb rendű élet, amely lehetővé tette a földi civilizáció létrejöttét.

A Föld élővilágának legfőbb energiaforrása a központi csillagunk: a Nap. A Nap évmilliárdok óta sugároz közel állandó (kereken $3 \cdot 10^{26}$ W) teljesítménnyel. A minden irányba kibocsátott napenergiának egy kis hányada jut el a Földre hősugárzás útján.

A bolygónkra eljutott napenergia a földi élet kialakulásában, fejlődésében és fennmaradásában nélkülözhetetlen szerepet töltött és tölt be napjainkban is. Ez a hosszan tartó, közel állandó teljesítményű energiaforrás tette lehetővé az ugyancsak hosszú időt igénylő földi evolúció létrejöttét is.

A Föld légkörének felső határára érkező napsugárzás teljesítménye négyzetméterenként kereken 1370 W, ezt nevezik **napállandónak.** Ennek értéke a Föld Nap körüli keringése során a Naptól való távolságtól és a naptevékenységtől függően kis mértékben (néhány százalékban) változhat.

A napenergia egy részét a Föld légköre elnyeli, egy részét visszaveri, így a Föld felszínre – nap- és évszaktól, földrajzi helytől függően legfeljebb 50–70%-a érkezik meg. Ezt használja fel az élővilág közvetlen vagy közvetett formában. A növények a napenergia felhasználásával, **fotoszintézissel** építik be szervezetükbe a légköri szén-dioxidból a szén elemet, melyből az emberiség számára **energiahordozó nyersanyag:** fa, fosszilis fa (szén) keletkezik.

A Földünkre érkező napenergia „hajtja" a természetben a víz körforgását és a légáramlatokat is. Így végső soron a **szél- és vízi energia is a napenergiából származtatható.**

A napenergiát ipari méretekben felhasználó létesítmények a **naperőművek,** amelyekben a Nap hősugárzás útján a Földre eljutott energiáját, vagy közvetlenül **napelemek** segítségével elektromos energiává alakítják, vagy pedig termikus energia előállításával **gőzturbina – villamos generátor** közbeiktatásával közvetett úton nyerhetünk elektromos energiát. Naperőművek a világon már sok helyen létesültek, és számos helyen terveznek újabb naperőműveket.



193.1. A Nap évmilliárdok óta sugározza energiáját



193.2. Vízerőmű az USA-ban



193.3. Naperőmű (forrás: PA Pundits – International, *http://papundits.wordpress.com*)

4.6. Termikus körfolyamatok. Hőerőgépek, hűtő- és fűtőberendezések

KÖRFOLYAMATOK ÁBRÁZOLÁSA *p–V* DIAGRAMON

A gázok állapotváltozásánál **körfolyamatnak** nevezzük az olyan egymást követő folyamatokat, amikor a gáz végül a **kezdőállapotba jut vissza.** A *p–V* diagramon a **körfolyamat képe** egy **zárt görbe.**

Mivel a körfolyamat során a gáz visszakerül a kiinduló állapotába, ezért a részfolyamatok belső energiaváltozásainak előjeles összege zérus lesz:

$$\sum \Delta E_b = 0.$$

A gáz által végzett tágulási munkák előjeles összege a *p–V* diagramon a zárt görbe területének mérőszámával egyezik meg, így az összes munka nem lehet zérus:

$$\sum W_{gáz} \neq 0.$$

A **hőtan I. főtételéből** viszont az következik, hogy **a körfolyamat során a gázzal közölt *Q* hőmennyiségek algebrai összege sem lesz zérus.** Vagyis a a gáz által felvett hő vagy több, vagy kevesebb lesz, mint amennyit az lead környezetének:

$$\sum Q = \sum \Delta E_b + \sum W_{gáz} = \sum W_{gáz} \neq 0.$$

A teljes körfolyamatra számított hőmennyiségek előjeles összege egyenlő a gáz által végzett munkák előjeles összegével.

HŐERŐGÉPEK KÖRFOLYAMATA

Hőerőgépekkel már a korábbi hőtani tanulmányaink során is találkozhattunk, amikor hőközléssel történő munkavégzésről volt szó. A periodikusan működő hőerőgépekkel – valamilyen légnemű munkaközeg közvetítésével (gőz, levegő vagy gázkeverék) – hőközléssel munkát végeztetünk.

A 18–19. században az első hőerőgépek a gőzgépek voltak, ahol a munkaközeg a külső kazánban előállított vízgőz volt. A 19. században elterjedtek a belső égésű motorok, ahol a munkahengeren belül történt a gáz vagy folyékony üzemanyag (földgáz, benzin, gázolaj) eltüzelése. A 20. században a gőz- és gázturbinás megoldások nyertek teret elsősorban repülőgépek hajtásánál, ahol a felvett hő egy része közvetlenül forgómozgás forgási energiájává alakul, ezzel fokozva a gép hatásfokát. Gőzturbinát például hő- és atomerőművekben alkalmaznak villamos generátorok meghajtására.

Tapasztalat szerint viszont, a hőerőgépek hatásfoka még a legkorszerűbbeknél is (diesel motorok, gázturbinák) sem haladja meg a 35–40%-ot. Vajon mi ennek az oka?

Vizsgáljuk meg a hőerőgépek körfolyamatának energiacseréjét a hatásfok szempontjából. Tekintsünk olyan egyszerű modellt, ahol a körfolyamatotot ismert állapotváltozásokkal modellezhetjük.

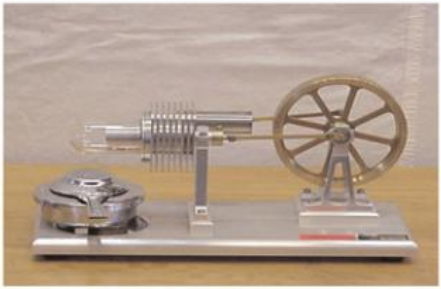
3D 3D 3D 3D

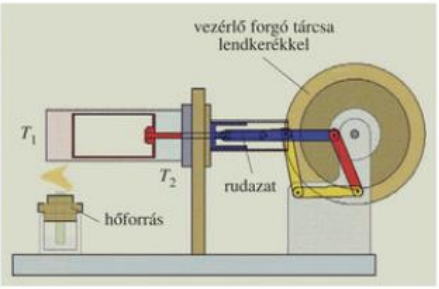




194.1. Személyszállító repülőgép gázturbinája és gázturbinás vadászgép

3D





195.1. A hűtőbordás hőlégmotor modell és működésének elvi vázlata

Vizsgáljunk egy olyan egyszerű felépítésű hőerőgépet, a **hőlégmotort,** amely külső hőforrással működik. Zárt, elszigetelt hengerben állandó mennyiségű gáz (levegő, hélium vagy hidrogén) végez periodikus módon termikus körfolyamatot, miközben a T_1 hőmérsékletű hőtartályból felvett hőmennyiség egy részét mechanikai munkaként hasznosíthatjuk. Ezt a gyakorlatban is előforduló hőerőgépet feltalálója (*Robert Stirling*, 1807) után Stirling-motornak vagy Stirling-gépnek is nevezik. (*195.1. ábra*)

A motor hengerében periodikusan mozgó egyik dugattyú a bezárt gázt összenyomja és tágítja. A másik, jó hővezető és lyukacsos terelő dugattyúnak a feladata pedig a gáz hőtartályok közötti átáramoltatása és a gáz gyors hőcseréjének elősegítése. A dugattyúk megfelelő együttmozgását egy speciálisan kiképzett vezérlőtárcsa végzi, amely közös tengelyen együtt forog a motor egyenletes járását biztosító lendkerékkel.

A hőlégmotorba zárt gáz körfolyamatát jól modellezhetjük izotermikus és izochor állapotváltozásokból összetevődő körfolyamattal, melynek p–V diagramja kettő izotermából és kettő izochorából tevődik össze (*195.2. ábra*).

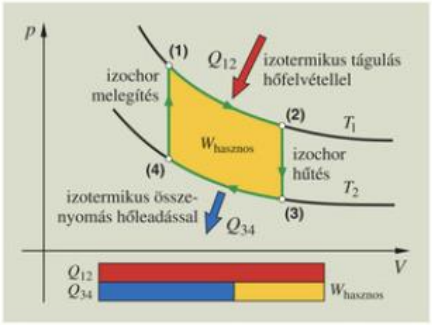
A hőlégmotor termikus ciklusa az alábbi négy szakaszból tevődik össze:

1. **Izotermikus tágulási szakasz (1)→(2).** A táguló gáz a T_1 hőmérsékletű hőtartályból *hőt vesz fel, amelyet teljes egészében munkavégzésre fordít.* Ennek nagysága az (1)→(2) izotermaszakasz alatti terület mérőszámával egyenlő.
2. **Izochor lehülési szakasz (2)→(3).** A gázt áteresztő dugattyú állandó térfogaton a gázt gyorsan lehűti T_2 hőmérsékletre. Az *elvont hő egyenlő a gáz belső energiájának csökkenésével,* mivel most nincs munkavégzés.
3. **Izotermikus összenyomásos szakasz (3)→(4).** A tovább mozgó dugattyú állandó T_1 hőmérsékleten a gázt összepréseli. A *külső munkavégzés nagysága* az izotermagörbe (3)→(4) szakasza alatti terület mérőszámával egyenlő, az *ezzel megegyező elvont hő* a hűtőközegbe kerül.
4. **Izochor felmelegedési szakasz (4)→(1).** Az összepréselt gázt a terelő dugattyú állandó térfogaton felmelegíti T_1 hőmérsékletre. A gáz által *felvett hő teljes egészében a belső energiát növeli,* mivel most nincs munkavégzés.

A körfolyamat energiamérlege: a gáz tágulása során több munkát végzett, mint amennyi a külső munkavégzés volt a gáz összenyomásakor. Így a **hasznosítható munka:**

$$W_{\text{hasznos}} = W_{\text{gáz}} - W_{\text{külső}} = Q_{12} - Q_{34}.$$

Az összes (a gáznak átadott) befektetett hőmennyiség viszont $Q_{\text{fel}} = Q_{12} + Q_{41}$ volt.



195.2. Stirling-gép körfolyamatának p–V diagramja és energiacsere viszonyai

Így a hőerőgépünk hatásfoka a gépeknél használt hatásfok értelmezés szerint:

$$\text{hatásfok} = \frac{W_{\text{hasznos}}}{Q_{\text{felvett}}} = \frac{Q_{12} - Q_{34}}{Q_{12} + Q_{41}} \leq 1.$$

Az összefüggésből és a diagramból is kiolvasható, hogy a hőerőgép hatásfoka mindenképpen 1-nél kisebb érték lesz.

Ez jól példázza a II. főtétel egyik megfogalmazását: **„nincs olyan 100%-os hatásfokú hőerőgép, amely teljes egészében a hőt mechanikai munkává alakítaná."**

3D

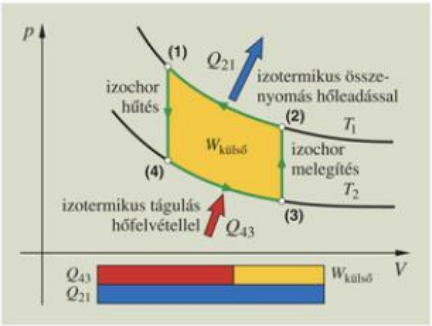
HŐLÉGMOTOR MINT HŰTŐGÉP MODELL

Ha a hőlégmotor dugattyújának periodikus mozgását egy **külső erőforrás** (pl. villanymotor) biztosítja, akkor **körfolyamat fordított irányban is végbemehet.**

Ennek ciklusai az alábbiak:

- A **(4)→(3)** folyamatnál a T_2 hőmérsékletű hideg gáz izotermikusan tágul miközben a tágulási munkával megegyező nagyságú Q_{43} hőt vesz fel a hidegebb tartályból.
- A **(3)→(2)** ütemben a gáz állandó térfogaton felmelegszik és Q_{32} hőt vesz fel a melegebb tartályból belső energiájának növelésére.
- A **(2)→(1)** szakaszon az izotermikus összenyomás történik a villanymotor munkavégzésével, eközben a gáz a munkával megegyező Q_{21} hőt ad át a melegebb hőtartálynak.
- Az **(1)→(4)** záró ütemben a gáz állandó térfogaton T_2 hőmérsékletre hűl le Q_{14} hőt adva le a hidegebb hőtartálynak.

3D



196.1. Hűtőgépek, hőszivattyúk termikus körfolyamata és az energiacserék arányai

A **körfolyamat végeredménye:** külső **munkavégzés árán** a **hidegebb hőtartályból hő került át** a **melegebbe.** A hidegebb hőtartály egy **hűtőgép belső terének,** a melegebb pedig a hűtőgép **külső környezetének** feleltethető meg, így a fordított üzemmódban működő **hőlégmotor a hűtőgép modelljének tekinthető.**

HŰTŐGÉPEK, HŐSZIVATTYÚK JÓSÁGI TÉNYEZŐJE

Mivel hűtőgépeknél a célunk az, hogy minél kevesebb külső munkavégzés árán, minél több hőelvonás történjen a hűtendő térből, ezért a berendezések „jóságát" egy hányadossal számszerűsíthetjük.

Ezt a hányadost jósági faktornak vagy tényezőnek szokás nevezni:

$$\text{jósági tényező} = \frac{\text{hűtőtérből elvont hő}}{\text{külső munkavégzés}},$$

$$k = \frac{Q_{\text{felvett}}}{\sum W} \geq 1.$$

A k jósági tényező értéke 1-nél nagyobb is lehet, korszerű hűtőgépeknél 5-6 körüli érték. Azaz 1 kWh elektromos munka árán 5-6 kWh ≈ 18-20 MJ hőmennyiséget von el a gép a hűtőtérből. Ezzel kb. 150 darab másfél literes palack ásványvizet hűthetünk le 30 °C-ról 10 °C-ra.

Hűtőgépeknek tekinthetők a **klímaberendezések** is, ahol a hűtőtér a hűtendő helyiség vagy autó utas- (és csomag-) tere. A melegebb hőtartály pedig a külső környezet.

A klímaberendezéseket (vagy külön erre a célra készült berendezéseket) azonban nemcsak hűtésre, hanem fűtésre is használhatjuk. Télen fűtésre állítva a berendezést a hűtött tér lesz a hidegebb külső környezet, a fűtött pedig a melegebb hőtartálynak megfelelő helyiség. Az ilyen berendezéseket **hőszivattyúknak** nevezzük. (Az elnevezés abból ered, hogy a hidegebb helyről hőt „szivattyúznak át" a melegebb helyre (természetesen befektetett munka árán).

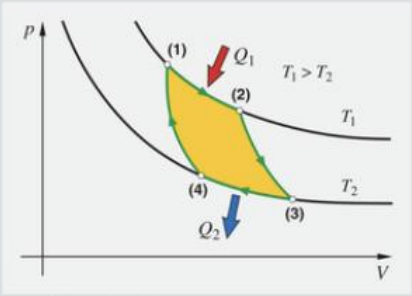
A hőszivattyú jósági tényezőjénél a fűtött helyiségnek leadott hőmennyiséget kell osztanunk az elektromos munkával:

$$k = \frac{Q_{\text{leadott}}}{\sum W}.$$

A jósági tényező értéke fűtés esetén is lehet 1-nél nagyobb, a hőszivattyúknál elérheti akár a 3-4 értéket is. Vagyis 1 kWh villamosenergia felhasználásával 3-4-szer több hőmennyiség juttatható a fűtendő térbe. Ezzel szemben a hagyományos hősugárzóknál, villany-kályháknál a leadott hő csak a felhasznált villamos energiával lesz egyenlő ($k = 1$).

MEGJEGYZÉSEK

1. A termodinamikában számos más körfolyamatot is szokás tárgyalni a hőerőgépek és a hűtőgépek jobb modellezésére. Ezek közül nevezetes a *reverzibilis Carnot-féle körfolyamat*, amely adiabatikus és izotermikus állapotváltozásokból tevődik össze. A körfolyamatban két – T_1 és T_2 ($< T_1$) – állandó hőmérsékletű (nagy hőkapacitású) melegebb és hidegebb hőtartály szerepel, melyek között az ideális gáz ill. a modellezett hőerőgép vagy hűtőgép hűtőközege (valamilyen valóságos gáz) létesít hőcserét a gépeknek megfelelő körüljárással. Az izotermikus és adiabatikus állapotváltozásokra vonatkozó összefüggések felhasználásával matematikai úton levezethető, hogy a Carnot-körfolyamattal modellezett hőerőgép hatásfoka $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$, a modellezett hűtőgép jósági tényezője pedig $k = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$. Továbbá elméleti úton belátható, hogy a Carnot-féle körfolyamatnál megadott hatásfok és jósági tényező az elméleti felső határt jelenti: azaz semmilyen más, ideális és valóságos körfolyamat ezen értékeket nem lépheti túl. Ez **Carnot tétele.**



197.1. Carnot-körfolyamat

N. L. Sadi Carnot, 1796–1832, francia hadmérnök és fizikus, a hőerőgépek hatásfokát tanulmányozta. Főműve: „Elmélkedések a tűz mozgató erejéről" 1824-ben jelent meg, amely a későbbi keletkezésű II. főtételnek adta elméleti megalapozását.

2. A Stirling-féle hőlégmotorok az új alternatív energiaforrások előtérbe kerülésével egyre nagyobb szerepet kapnak a gyakorlatban is. Az USA-ban 500 MW összteljesítményű naperőművet terveznek, ahol a 19 km^2 területű napfény farmon a napsugarakat tükrökkel a mintegy 20 ezer darab Stirling-motorra irányítják, melyek generátorokat meghajtva szolgáltatnák a villamos energiát. A Stirling-gépekről bővebben az internetről tájékozódhatunk.


197.2. Stirling-gépes naperőmű (Victorville, USA)

3. Az, hogy a **klímaberendezések** és a **hőszivattyúk jósági tényezője 1-nél** nagyobb értéket vesz fel, **nincs ellentétben az energiamegmaradás törvényével.** Hiszen a hidegebb helyről a melegebb helyre átszállított Q hőmennyiséget nem mi állítottuk elő, csak segítettük a W munkavégzéssel. Ez a **hőtan II. főtételének sem mond ellent,** amely csak azt mondja ki, hogy mindenképpen ehhez a nem spontán folyamathoz munkát kell végezni, azaz nincs végtelen nagy jósági tényezőjű gép.

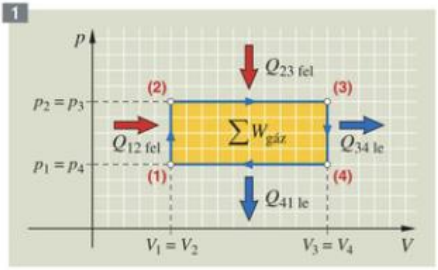
3D

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Hogyan növelhető egy hőerőgép termikus hatásfokának felső határa?
2. Hogyan változik egy hűtőgép jósági tényezőjének felső határa a gép beindulása után, amikor a hűtőben a T_2 egyre kisebb lesz miközben a helyiség T_1 hőmérséklete állandónak vehető?
3. Egy hőerőgép hatásfokának felső elvi határa mikor növekszik jobban: ha a melegebb hőtartály T_1 hőmérsékletét növeljük, vagy ha a hidegebb tartály T_2 hőmérsékletét ugyanannyival csökkentjük? Állításunk helyességét egy számpéldával ellenőrizzük! (Pl. legyen $T_1 = 500$ K, $T_2 = 300$ K és $\Delta T = 15$ K.)

FELADATOK

1. A p–V diagramon téglalappal ábrázolt körfolyamatban egyatomos 2 mólnyi ideális gázt alkalmazunk. Legyen $p_2 = 2p_1$ és $V_3 = 3V_1$.



   a) Mekkora a körfolyamat során a gáz legmagasabb hőmérséklete és nyomása ha a kiinduláskor normálállapotban van a gáz? (A normális légköri nyomást vegyük kereken 10^5 Pa-nak!)

   b) Mekkora a körfolyamatban a gáz által felvett hő?

   c) Mekkora a gáz által végzett hasznos munka?

   d) Mekkora a körfolyamat hatásfoka?

MEGOLDÁS:

$n = 2$ mol

$p_1 = p_4 = 10^5$ Pa

$p_2 = p_3 = 2 \cdot 10^5$ Pa

$V_1 = V_2 = 4{,}48 \cdot 10^{-2}$ m^3

$V_3 = V_4 = 3V_1 = 13{,}44 \cdot 10^{-2}$ m^3

$T_1 = 273$ K

---

a) $T_3 = ?$

b) $Q_{\text{fel}} = ?$

c) $W_{\text{gáz}} = ?$

d) $\eta = ?$

a) Legnagyobb a hőmérséklet és a nyomás értéke a (3) állapotban: $p_3 = 2 \cdot 10^5$ Pa.

$$T_3 = \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{V_3}{V_2} \cdot T_1 = 6 \cdot T_1 = \mathbf{1638\ K.}$$

b) A gáz által felvett hő:

$$Q_{\text{fel}} = Q_{12} + Q_{23} = \frac{3}{2} \cdot (p_2 - p_1) \cdot V_1 + \frac{3}{2} \cdot p_2 \cdot (V_3 - V_2) + p_2 \cdot (V_3 - V_2) = \mathbf{51{,}55\ kJ.}$$

c) A gáz által végzett hasznos munka:

$$\sum W_{\text{gáz}} = (p_2 - p_1)\cdot(V_3 - V_2) = \mathbf{8{,}97\ kJ.}$$

d) A körfolyamat hatásfoka:

$$\eta = \frac{\sum W_{\text{gáz}}}{Q_{\text{fel}}} = \frac{8{,}97\ \text{kJ}}{51{,}55\ \text{kJ}} = 0{,}174 = \mathbf{17{,}4\%.}$$

2. Adott mennyiségű kétatomos gáz kezdeti hőmérséklete $T = 300$ K, nyomása 60 kPa és térfogata $V = 10\ \text{dm}^3$. A gázt először állandó térfogaton melegítjük $T_2 = 500$ K hőmérsékletre, majd utána állandó nyomáson addig melegítjük tovább, míg térfogata másfélszeresére növekszik. Ezután állandó térfogaton addig hűtjük, míg nyomása a kezdeti nyomására le nem csökken. Végül izobár hűtéssel a gázt kezdeti állapotába visszük vissza.

a) Ábrázoljuk a gáz körfolyamatát a p–V diagramon és adjuk meg a hiányzó közbenső hőmérsékleteket!

b) A körfolyamat során mekkora a gáz által felvett és leadott hő?

c) Mekkora a gáz hasznos tágulási munkája?

d) Mekkora a körfolyamat termikus hatásfoka?

3. Végezzük el az előző feladatban megvalósított körfolyamatot fordított körüljárással!

a) Mekkora lesz a gáz által felvett, illetve leadott hő?

b) Mennyi összesen a gázon végzett külső munka?

c) Mekkora a modellezett hűtőgép jósági tényezője?

d) Mekkora a jósági tényező, ha a körfolyamattal hőszivattyút modellezünk?

4. Az ábra p–V diagramján látható egyatomos gáz „háromszög" körfolyamatában határozzuk meg

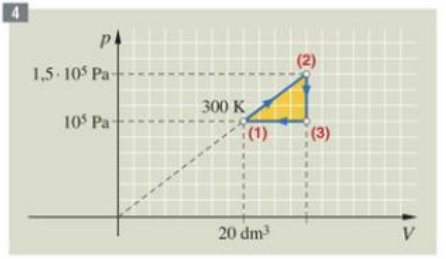
a) (2), (3) állapotokban a hőmérsékleteket!

b) A gáz által felvett hőt!

c) A gáz hasznos munkáját!

d) A körfolyamat hatásfokát!

4



5. Vegyük fel a 2. feladatban szereplő körfolyamat V–T és p–T diagramjait! Jelöljük be a körfolyamat körbejárási irányát, valamint tüntessük fel az állapotok sorszámát és az állapotjelzők értékeit!

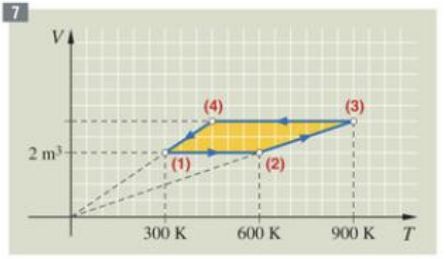
6. Készítsük el méretarányosan a 4. faladat körfolyamatának V–T és p–T diagramját!

7. Állandó mennyiségű ideális gázzal végzett körfolyamat V–T diagramját láthatjuk az ábrán. A gáz legkisebb nyomása a körfolyamat során 100 kPa.

a) Készítsük el adatok feltüntetésével a körfolyamat p–T és p–V diagramját is!

b) Mekkora a gáz anyagmennyisége?

7



OLVASMÁNY

Szervezetünk hőháztartásáról

Az eddigi hőtani tanulmányaink során már többször utaltunk szervezetünk hőjelenségekkel kapcsolatos működésére.

Valójában **testünket hőtani szempontból egy belső égésű hőerőgépnek tekinthetjük,** mivel tápanyag bevitelével kémiai reakciók révén szervezetünkbe lassú égés exoterm (energiatermelő) folyamata játszódik le, amely hőfelszabadulással jár. A keletkezett Q hőmennyiség **egy részét munkavégzésre** használja fel szervezetünk. (ez lehet fizikai munka, de szerveink működése (szív lüktető mozgása, tüdő mozgása lélegzéskor, vérkeringés stb) is munkavégzést igényel, így az egyszerű fekvés közben is valamekkora munkát végez szervezetünk az életfunkciók fenntartására. Eközben **hőleadás** is történik **kilégzés,** testünk felületén történő **hővezetés, hősugárzás** útján.

Mivel a szervezetünk olyan bonyolult hőerőgépnek tekinthető, amely meghatározott hőmérsékleten (kb. 37 °C-on) működik „normál üzemmódban", ezért a táplálkozásnál kell annyi energia bevitelt biztosítani, hogy a közel állandó hőmérsékleten történő hőleadást és az alap élettevékenységre fordított munkavégzést fedezze. Intenzív sportolásnál, külső fizikai munkavégzésnél ennél sokkal több táplálék bevitelre van szüksége a tevékenységet folytató személynek.

Testünk hőháztartásának biztosítása érdekében megfelelő módon kell öltözködnünk, hogy télen a **kihűlést,** nyáron pedig a **hőgutát** elkerüljük.

Az állatvilágban számos olyan állatfaj található, amely képes szabályozni testének hőmérsékletét a külső körülményeknek megfelelően.

A téli álmot alvó állatok megfelelő búvóhelyre vonulva lelassítják életfunkcióikat: csökken a testhőmérsékletük, és a létfontosságú szerveik működése is jelentősen lelassul. A tél elmúltával azután ismét helyreállnak a szokásos életfunkciók. A természet így is gondoskodhat egy élő szervezetnek a megváltozott külső körülményekhez való gazdaságos alkalmazkodásáról.

Ismerünk olyan madárfajokat is, amelyek képesek ezt a „testhibernálást" nap mint nap végrehajtani: az élőhelyük különösen hideg éjszakáin a testhőmérsékletüket jelentősen csökkentik, majd napfelkelte után visszaáll testük a normális hőmérsékletre.



200.1. Sportolás közben nagyon fontos a folyadék- és energiapótlás



200.2. Téli álmot alvó állatok

3D

5. Halmazállapot-változások

5.1. A halmazállapot-változások törvényszerűségei

3D

3D

EMLÉKEZTETŐ

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

Az anyagok halmazállapota termikus kölcsönhatások hatására 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. Az ionokból és elektronokból álló magas hőmérsékletű **plazmát** gyakran **negyedik halmazállapotnak** nevezik. Ezért 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.

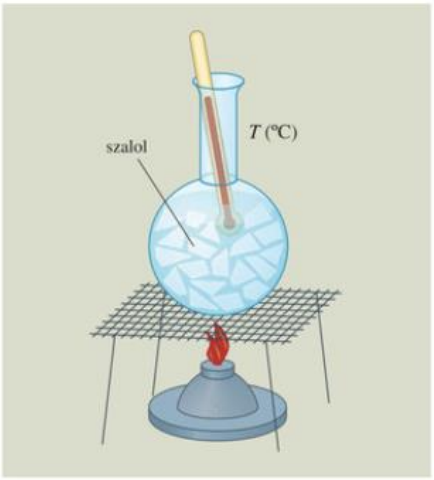
A halmazállapot-változások az energiacsere iránya szerint két csoportba sorolhatók.

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

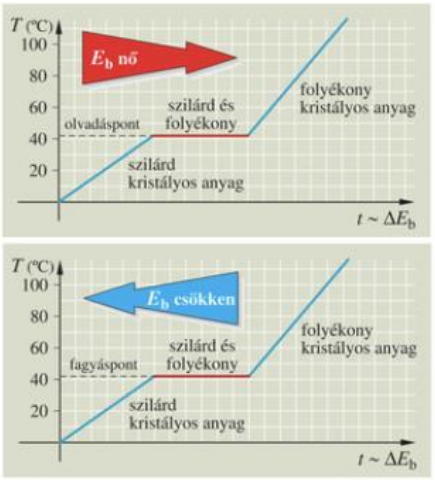
Energiafelszabadulással járó átmenetek:
- lecsapódás (légnemű ⇒ cseppfolyós),
- fagyás (cseppfolyós ⇒ szilárd),
- lecsapódás vagy megszilárdulás (légnemű ⇒ szilárd).

KRISTÁLYOS ANYAGOK OLVADÁSA ÉS FAGYÁSA

Az *201.1. ábra* szerinti kísérleti elrendezéssel vizsgáljuk meg a **szalol** (szalicilsavas fenil) vagy a **fixírsó** (nátrium-tioszulfát) kristályos anyagok olvadásának folyamatát. A kristályok várható olvadáspontja 40–50 °C közé esik. Egyenletes melegítés során egyenlő időközönként mérjük a kristályos anyag hőmérsékletét. Készítsünk hőmérséklet–idő grafikont! Vegyük fel a grafikont a megolvadt anyag hűtésekor is! Az idő arányos a kristály belső energiájának változásával: $t \sim \Delta E_b$.



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



201.2. A szalol olvadás- fagyás grafikonja

Ha különböző mennyiségű és fajtájú kristályos anyagok olvadás- fagyás grafikonját kísérletek alapján felvesszük, akkor ezekből az alábbi törvényszerűségek állapíthatók 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 az állandó hőmérsékleten (olvadáspont) a rendszerrel közölt (vagy a fagyáskor az attól elvont) 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 anyag olvadásponton történő megolvadásakor (megfagyásakor) a közölt (az elvont) hőmennyiséget a

$$Q = L_o \cdot m$$

összefüggésből számíthatjuk ki.

FOLYADÉKOK PÁROLGÁSA ÉS LECSAPÓDÁSA

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 víz és a szilárd jég is képes elpárologni.

Tapasztalatainkból megállapíthatjuk, hogy a folyadékok felszínéről kiinduló **párolgás minden hőmérsékleten végbemegy.**

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 vízből kijövünk, mivel a bőrünkön maradt párolgó vízréteg hőt von el testünktől.
- A párolgást „hasznosítja" a szervezetünk is, 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 testrészüket.

- 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.



202.1. Párolgás hűti az élő szervezetet is

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

FORRÁS ÉS FORRÁSPONT

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

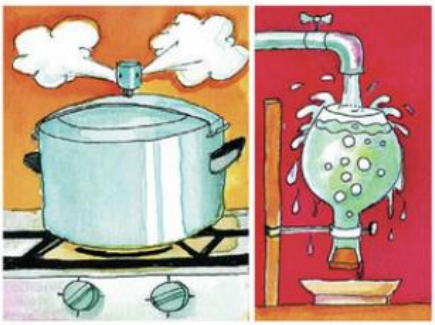
Forráskor a folyadék belsejében lévő levegő- vagy más gázbuborékok a folyadék gőzével telítődnek, térfogatuk megnő, ezért a felszínre emelkednek, ahol belőlük a gőz eltávozik.

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 forr. A jelenséget magunk is megvalósíthatjuk az *203.1. ábra* jobb oldalán látható kísérlettel.



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

Mindennapi tapasztalat, hogy nagyobb mennyiségű 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, ahol L_f az anyagi állandó, a **forráshő.**

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

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

Néhány anyag forráspontja és forráshője 10^5 Pa nyomáson:

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

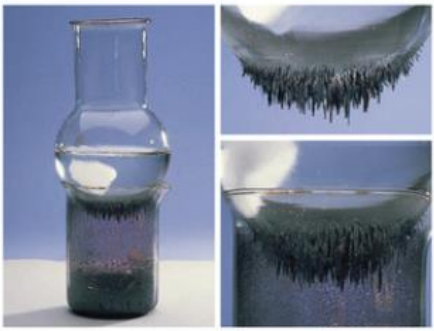
Amikor a gőz a forrásponton lecsapódik, akkor a forrásakor a környezetétől felvett hőmennyiséget a környezetének visszaadja ($Q_{le} = Q_{fel}$). Ezt használják fel a távfűtő rendszerekben, ahol a hőközpontokban előállított gőzt vezetik jól szigetelt csővezetékeken keresztül a lakásokhoz, ahol a gőz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

SZILÁRD TESTEK SZUBLIMÁCIÓJA

Szublimációnak nevezzük azt a jelenséget, amikor a **szilárd test párolog,** vagyis átlépve a cseppfolyós fázist – közvetlenül légnemű halmazállapotúvá válik. A kémia órákról jól ismert kísérlet a hevített jódkristályok szublimációja, melyet a kémcső hideg falára lecsapódott jódgőzök jeleznek.

Elvileg minden szilárd test kisebb-nagyobb mértékben szublimál. Így a jég, a hó is képes elpárologni. Erről tanúskodik a télen szabadba kihelyezett megfagyott ruha száradása, vagy erkélyünkön, úttesteken keletkező vékony jégréteg fagyos, de szeles időben való „eltűnése". A köztudatban jól ismert a kámfor szublimációja (innen ered a népi szólás: „eltűnt, mint a kámfor"). Az intenzíven szublimáló anyagok illatosak, ezért szagtalanításra és molyirtásra is gyakran használják ezeket.

A szublimáció inverz jelenségét – amikor a légnemű halmazállapotból közvetlenül szilárd halmazállapotba kerül az anyag –, szintén **lecsapódásnak** vagy **megszilárdulásnak** (idegen szóval: *deszublimációnak*) nevezzük. Ilyen jelenség a fent említett jód gőzök lecsapódása a hideg kémcső falán, vagy a természetben télen a vízpárából közvetlenül kristályos szilárd dér képződése a talaj közelében lévő tárgyakon.



204.1. A jód szublimálása



MEGJEGYZÉSEK

1. A fizika tudományában (szilárdtest fizikában) csak a kristályos anyagokat tekintjük szilárd anyagoknak (ezeket egybeírva szilárdtesteknek nevezzük, belső szerkezetükkel a szilárdtestfizika foglalkozik). A kristályszerkezet nélküli – bár a köznapi értelemben szilárdnak vett – 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.

2. A folyadékok forráspontjának a külső nyomástól való függését könnyen megérthetjük a forrás előzőkben leírt jelensége alapján. A folyadék belsejében lévő, annak gőzével telített légbuborékok akkor emelkednek a folyadék felszínére, ha a bennük lévő telített gőz nyomása megegyezik a külső légköri nyomás és a hidrosztatikai nyomás összegével: $p_{\text{t. gőz}} = p_{\text{külső}} + p_{\text{hidr.}}$ Mivel a telített gőz nyomása különböző hőmérsékleteken különböző (fizikai táblázatokban megtalálható a különböző hőmérsékletekhez tartozó víz telített gőzének nyomása), ezért változó külső nyomásértékekhez más és más **telített gőznyomás** és hőmérséklet érték, vagyis **forráspont** tartozik. Így pl. a kb. 1000 m magas hegységben – ahol a légköri nyomás a normális légköri nyomásnak mintegy 85%-ára csökken le – a kisebb nyomáshoz tartozó víz forráspontja 95 °C körüli érték. Ha pedig a nyomást légritkítással a normális légköri nyomás 0,6%-ára csökkentjük, akkor a víz forráspontja 0 °C-ra csökken le. A fagyáspont viszont a nyomás csökkentésével emelkedik, így már 0 °C fölötti hőmérsékleti értéken együtt forr és fagy a víz.

3. A forrás beindulásához nagyon fontos, hogy legyen a hevített folyadék belsejében – akár szabad szemmel nem is látható – megfelelő mennyiségű apró légbuborék. Ennek hiányában a folyadék túlhevülhet, hőmérséklete a forráspont fölé emelkedhet, ahol a forrás robbanásszerűen beindulhat. Ennek elkerülésére a vízforraló kazánokba légbuborékokat megkötő porózus anyagot helyeznek.

4. Folyadékok fagyásánál a túlhűtés jelensége fordulhat elő. Ez nyugalomban lévő, és a kristályosodáshoz szükséges kondenzációs magokat nem tartalmazó folyadékoknál fordulhat elő. Rázkódás, ütközés következtében a túlhűtött folyadék hirtelen fagy meg. Így keletkezik a természetben, szélcsendes időben túlhűtött köd szemecskékből a zúzmara.

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. 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 hirtelen összeroppan. Adjunk magyarázatot a történtekre!

2. Hogyan állapítható meg egy edényben megfagyott folyadék szilárd felszínéről, hogy térfogatnövekedés vagy -csökkenés történt-e fagyáskor?

3. Mi a szerepe a szélnek a folyadékok párolgásának elősegítésében?

4. Kukta fazékkal hogyan lehet szabályozni a benne lévő víz forráspontját?

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) Mekkora tömegű havat tartalmazott a vizes hó?

b) Legfeljebb mekkora tömegű gőz vezethető a termoszba, hogy a hőmérséklet ne emelkedjen?

MEGOLDÁS:

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

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

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

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. Az energiamérleg egyenletéből m_h-t kifejezhetjük:

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

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

Az adatok behelyettesítésével megkapjuk a hó tömegét:

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

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 hőmennyiségre 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. Legfeljebb mekkora tömegű 0 °C hőmérsékletű jeget tudunk megolvasztani 100 g 100 °C hőmérsékletű vízgőzzel?

OLVASMÁNY

A légkör hőjelenségei, csapadéktípusok

A Földi légkör átlagosan néhány tömegszázaléknyi vízpárát tartalmaz, amely a Nap „hajtotta" víz körforgásából származik.

A Föld felszíni vizei állandóan, a hőmérséklettől, széljárástól függő mértékben párolognak. A légkörbe kerülő légnemű víz: a vízpára a Föld felszínétől felfelé haladva nyomáscsökkenés következtében adiabatikusan kitágul, ezáltal lehűl (l. gázok adiabatikus tágulását), ezért a vízgőz telítetté válik és megindul a vízpára lecsapódása. Az apró, mikron méretű **vízcseppek alkotják** a már látható **felhőzetet.**



206.1. Gomolyfelhők

A felhőket alkotó parányi vízcseppek a közegellenállás miatt állandó (a csepp méretétől függő) nagyságú sebességgel lassan lefelé esnek.

A csapadék különböző formában akkor keletkezik és hull le a Föld felszínére, ha az apró ködszerű vízcseppek nagyobb cseppekké egyesülnek és **folyékony halmazállapotú esőcseppek,** vagy **megfagyott jégszemek** formájában jutnak le a felszínre.

Ha a nagy magasságban a **vízpára** elsődlegesen **szilárd** halmazállapotú **hópehely kristályokká szublimál** és a földet érésig nem olvad el, akkor **hó** vagy **hódara** a csapadék formája. Ezek az úgynevezett **hulló csapadék formák.**



206.2. Hópelyhek és zúzmara

Csapadék a földfelszín közelében is képződhet a levegő hőmérsékletének csökkenésekor. A hűvös éjszakán, a talaj közelében lévő túltelített vált vízpára **cseppfolyós harmattá** csapódik le. Ha pedig a vízpára egyből **szilárd halmazállapotú** lesz, akkor **dér** keletkezik. A fák ágain megjelenő **zúzmara** pedig **megfagyott köd szemecskékből** áll össze enyhén szeles időben.

A talaj mentén keletkező csapadékokat **nem hulló csapadék formáknak** nevezzük.

5.2. A halmazállapot-változások molekuláris értelmezése és energetikai vizsgálata

A testek halmazállapotait részecskékkel modellezhetjük (halmazállapot-modell). Így a halmazállapot-változások törvényszerűségei molekulárisan is értelmezhetők lesznek.

SZILÁRD TESTEK RÉSZECSKEMODELLJE

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

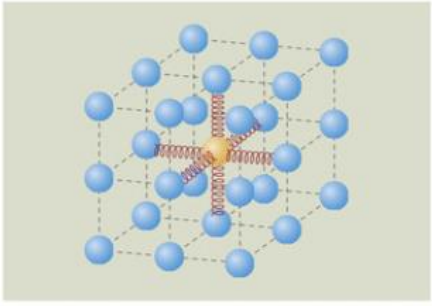
A modell alapján **a szilárd testek részecskéi** – egymáshoz közeli, helyhez kötött – **rezgőmozgást végeznek.**

A részecskék **rezgőmozgásának tágassága** (amplitúdója) **arányosan változik a test hőmérsékletével:** melegítéskor fokozódik, hűtéskor pedig csökken a részecskék rezgésének intenzitása.

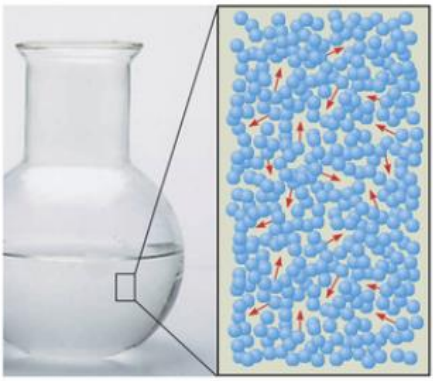
A modell segítségével megmagyarázhatjuk, hogy miért **állandó a szilárd testek térfogata és alakja.** Értelmezhetjük, miért változik meg kismértékben a térfogatuk a hőmérséklet változásával. **A modellel a hőtágulás is értelmezhető.**

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

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



207.1. *Mi felel meg a rugóknak a kristálymodellben?*



207.2. 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 felbomlik. **A kristályos szerkezet megszűnik, a szilárd test megolvad. A test folyékony halmazállapotú lesz.**

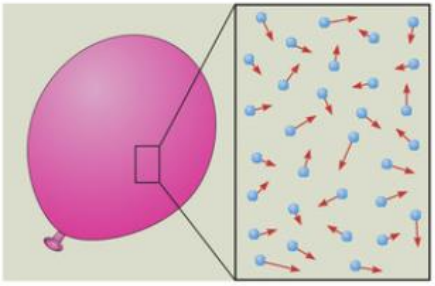
A folyadékokban **a részecskék között gyengébb, vonzó jellegű, rövid hatótávolságú, összetartó (kohéziós) erők** működnek, amelyek lehetővé teszik, hogy a részecskék egymáshoz képest rendezetlenül elmozduljanak, egymáson golyószerűen elgördüljenek. **Ez a folyadékok részecskemodellje.**

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:

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

A vonzó kohéziós erőkből származó kölcsönhatási (kötési) energiákat a fentebb említett okok miatt itt is negatív előjellel kell vennünk.



208.1. Légnemű anyag részecskemodelljének szemléltetése szabadon, rendezetlenül röpködő golyócskákkal

LÉGNEMŰ HALMAZÁLLAPOT RÉSZECSKEMODELLJE

Párolgáskor (forráskor) egyes folyadék részecskék képesek legyőzni az összetartó (kohéziós) erőt, és kilépnek a folyadékból.

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

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

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

TESTEK BELSŐ ENERGIÁJÁNAK VÁLTOZÁSA OLVADÁSKOR ÉS FAGYÁSKOR

A szilárd testek olvadásakor **a testekkel közölt vagy azoktól elvont hőmennyiség** jó közelítéssel **megegyezik a test két halmazállapotában meglévő belső energiák különbségével:**

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

Az **olvadás-fagyás** folyamata **közben** a testek **hőmérséklete állandó,** ezért az **olvadásponton lévő szilárd testnek** és az **ugyanakkora tömegű és hőmérsékletű folyadékának** belső energiája közötti **különbség** a részecskék közötti összetartó erők megváltozásából, **a kölcsönhatási energiák különbségéből származik.**

A szilárd test és folyadéka részecskéinek átlagos mozgási energiája az olvadás-fagyásponton megegyezik (T = állandó). Ezért fordítódik az olvadás-fagyás folyamata közben a felvett vagy leadott Q hőmennyiség a részecskék közötti kölcsönhatási energiák növelésére vagy csökkentésére.

Mivel általában kicsi az olvadás-fagyás folyamata közben a relatív térfogatváltozás – mert a szilárd test és folyadékának sűrűsége közel azonos – ezért a test tágulási munkája a belső energiaváltozáshoz viszonyítva elhanyagolható. Így az olvadás-fagyás energiamérlege a hőtan I. főtétele alapján jó közelítéssel:

$$Q \approx \Delta E_b.$$

Víz-jég esetében a tágulási munka és a belső energia változás aránya százezred nagyságrendű.

BELSŐ ENERGIA VÁLTOZÁSOK PÁROLGÁSKOR ÉS LECSAPÓDÁSKOR

A **folyadékok minden hőmérsékleten párologznak,** mivel mindig van olyan részecske, amelyik rendelkezik akkora mozgási energiával, hogy legyőzze a kohéziós erőt.

Nagyobb hőmérsékleten több folyadékrészecske rendelkezik kilépéshez szükséges energiával, ezért a **párolgás fokozódik, ha nő a hőmérséklet.**

Párolgáskor a folyadékkal **közölt Q hőmennyiség** nagyrészt a részecskék közötti **kohéziós erők legyőzésére fordítódik** (feltesszük, hogy a folyadék és gőze azonos hőmérsékletű) mivel ekkor a részecskék átlagos mozgási energiája megegyezik, így a **belső energia megváltozásában a kölcsönhatási energiák különbsége szerepel.**

Párolgás-lecsapódás során azonban – az előző fázisátalakulástól (olvadás-fagyás) eltérően – már a két fázis (folyadék és légnemű) sűrűsége között akár két-három nagyságrend különbség is előfordulhat. Így az elpárolgott folyadék jelentős tágulási munkát végez, amit a folyadékkal közölt Q hő egy – nem elhanyagolható – része fedez.

Így a párolgás energiamérlege a hőtan I. főtétele szerint:

$$Q = \Delta E_b + p \cdot \Delta V,$$

ahol az egyenlet bal oldalán a folyadékkal közölt Q hő, a jobb oldalon pedig az ugyanakkora tömegű és hőmérsékletű folyadék és gőze közötti **belsőenergia-különbség** és a gőz által végzett **tágulási munka** áll.

A víz esetében a 100 °C-on történő párolgáskor (ez egyben forrás is) a párolgási hő kb. 7,5%-a fordítódik tágulási munkára.

Mivel a **forrás** nem más, mint **a folyadék belsejében is meginduló párolgás,** ezért ennek energiamérlege megegyezik a párolgáséval, így ezzel külön nem foglalkozunk.

A **párolgás inverz jelensége a lecsapódás,** így ennek energiamérlege ellenkező előjellel véve megegyezik a párolgáséval:

$$Q = \Delta E_b + p \cdot \Delta V,$$

ahol az egyenlet bal oldalán a lecsapódáskor elvont hő szerepel (negatív előjellel), a jobb oldal első tagja a belső energia csökkenését (negatív előjellel), a második tag pedig a külső légnyomás térfogati munkavégzését jelenti (pozitív előjellel).

TELÍTETLEN ÉS TELÍTETT GŐZÖK

A légnemű halmazállapotú anyagokat **gőzöknek,** vagy **gázoknak** nevezzük. Egy adott hőmérsékleten a légnemű anyagot akkor nevezzük gőznek, ha az izotermikus összenyomással cseppfolyósítható, ellenkező esetben a **légnemű anyagot gáznak** hívjuk. Így szobahőmérsékleten a légnemű vizet **vízgőznek,** az oxigén, a nitrogén, a hidrogén és a hélium elemeket pedig **gázoknak nevezzük.**

A gőzök cseppfolyósításához szükséges minimális nyomás a p_t telített gőz nyomás. A telített gőz nyomásértéke a hőmérséklet exponenciális függvénye. A víz telített gőzének nyomásértékeit a *négyjegyű függvénytáblázat* tartalmazza.

A gőz akkor válik telítetté, ha a folyadékával együtt zárt térbe helyezzük. Ekkor a folyadék és gőze között **dinamikus egyensúly** alakul ki: a folyadékba azonos idő alatt **belépő (lecsapódás)** és a folyadékból **kilépő (párolgás)** részecskék száma megegyezik ($N_{ki} = N_{be}$, *209.1. ábra*).

Ha T állandó hőmérsékleten a telített gőztér dugattyúval összenyomjuk, akkor a gőz egy része lecsapódik, de a telített gőz nyomása nem változik. Vagyis a gőztér „telítődik": adott hőmérsékleten a gőzrészecskék sűrűsége nem növelhető tovább.

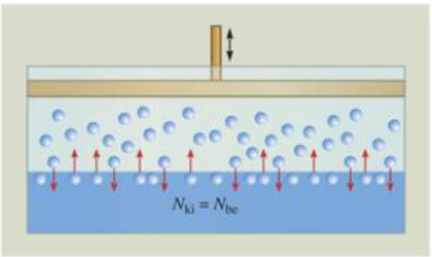
A folyadékától elválasztott **telített gőz telítetlenné válik,** ha a gőzt **izotermikusan tágítjuk,** vagy **melegítjük. A telítetlen gőz** viszont **izotermikus összenyomással** vagy **hűtéssel telítetté** tehető.

A **telítetlen gőzök** az izotermikus állapotváltozásuk során jó közelítéssel **ideális gázként viselkednek.** A telített nyomást elérve a gőz nyomása tovább nem növekszik, az összenyomást tovább folytatva megindul a gőz lecsapódása, vagyis a cseppfolyósodás (*209.2. ábra*).

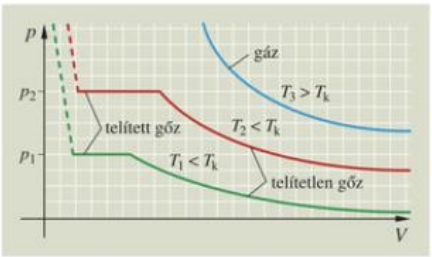
A p–V diagramon a meredek szaggatott vonalak a lecsapódás után a keletkezett folyadék összenyomásakor fellépő hirtelen nyomásnövekedését jelzik.

Elég magas T_k és p_t értéknél (amikor a gőz sűrűsége eléri a saját folyadékának sűrűségét) a gőz már nem cseppfolyósítható, mivel a folyadék és a gőz fázis összemosódik, eltűnik a folyadék és gőze közötti folyadékhatár. Ezért a **T_k kritikus hőmérséklet fölött a légnemű halmazállapotú anyagot nevezzük gáznak.**

A vízgőznél a kritikus hőmérséklet értéke $T_k = 374{,}2$ °C, a kritikus telített vízgőz nyomás $p_{kr} = 22{,}1$ MPa. Oxigén esetében viszont a kritikus paraméterek: $T_k = -118{,}9$ °C, és $p_{kr} = 5$ MPa. Ezért környezetünkben előforduló hőmérsékleten és nyomáson a légnemű vizet **vízgőznek,** a légnemű **oxigént gáznak** nevezzük.



209.1. Dinamikus egyensúlya telített gőz és folyadéka között



209.2. Telítetlen, telített gőzök és gázok izotermái a p–V diagramon

LEVEGŐ RELATÍV PÁRATARTALMA

A légköri levegő vízgőz tartalmának (másként: páratartalmának) jellemzésére a **százalékos relatív páratartalmat** szokás megadni. A relatív páratartalom megmutatja, hogy egy adott hőmérsékleten a légkörben jelenlévő vízgőz tömege, (illetve nyomása) hány százaléka az adott hőmérséklethez tartozó telített gőz tömegének (illetve nyomásának).

Így pl. 25 °C-on a 60%-os páratartalom esetén a vízgőz nyomása:

$$p_g = 0{,}6 \cdot p_{t_{25}} = 0{,}6 \cdot 3{,}1675 \text{ kPa} = 1{,}9 \text{ kPa}.$$

A Dalton-féle törvény szerint a jelenlévő vízgőz ennyivel járul hozzá a légköri nyomás értékéhez amely levegőben lévő többi gáz parciális nyomásaiból tevődik össze.

A légkör V térfogatában lévő vízgőz tömegét (vagyis az **abszolút páratartalmát**) jó közelítéssel megkaphatjuk, ha vízgőzre alkalmazzuk az ideális gázok állapotegyenletét. Így a fenti példában az 1 m^3 térfogatú légkörben található vízgőz tömege:

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

$$= 18 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot \frac{1{,}9 \cdot 10^3 \text{ Pa} \cdot 1 \text{ m}^3}{8{,}314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 298 \text{ K}} = 13{,}8 \text{ g}.$$



210.1. Szélsebességet, hőmérsékletet és páratartalmat is mérő készülék

Ez kb. 1%-a az ugyanekkora térfogatban lévő levegő tömegének (tehát nem 60%-a).

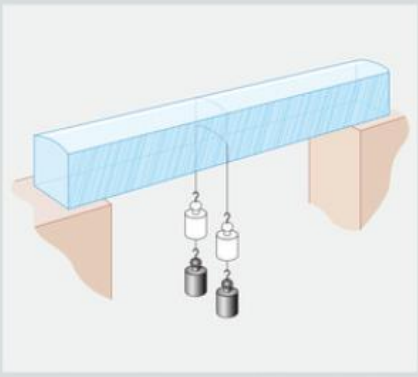
A levegő relatív páratartalmát mutatós vagy digitális műszerekkel mérik (nevük higrométer). Ezeket gyakran építik egybe hőmérőkkel, így táblázat felhasználásával könnyen kiszámíthatjuk, hogy mekkora az **abszolút páratartalom.**

MEGJEGYZÉSEK

1. A legtöbb anyag olvadáspontja külső nyomás hatására növekszik, ott ahol az olvadás térfogat növekedéssel jár. A jég olvadáspontja viszont, mivel olvadáskor a térfogat csökken, nyomás hatására 0 °C alá kerül.

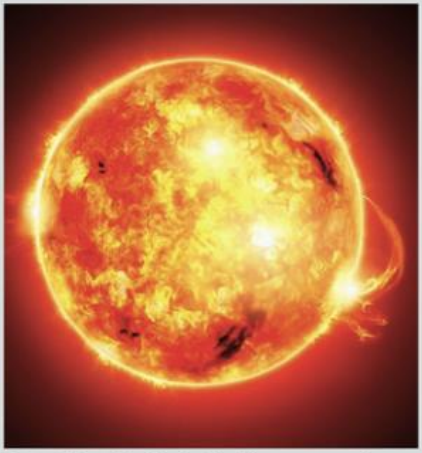
A jég olvadáspontjának csökkenését bemutathatjuk egy jéghasábbal: a hasábon átvetett, súlyokkal terhelt dróthuzal lassan „átrágja" magát a jégen, anélkül, hogy a hasábot kettészelné. A meglepő kísérletet a fent elmondottakkal értelmezhetjük!

Hasonló jelenség játszódik le a jégen történő korcsolyázáskor is, amikor a korcsolya éle által kifejtett nagy nyomás alatt a jég kissé megolvad, és a keletkező víz „olajozza" a korcsolya útját, elősegíti annak csúszását.



210.2. A dróthuzal lassan „átrágja" magát a jégen, pedig a jéghasábon ennek nincs nyoma!

2. Az anyag negyedik halmazállapotának nevezett plazmaállapotban több ezer, vagy akár millió fokos hőmérsékleten az atomok teljesen ionizálódnak. Ekkor a plazma atommagok és szabad elektronok keverékéből áll. 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. Erről a 11. osztályos fizikakönyvben az atommagfizika tárgyalásánál bővebben lesz szó. A plazmával mint jó elektromos vezetővel (plazmagömb, plazma-TV) az elektromosságtanban is találkozhattunk.



211.1. A Nap felszínén és belsejében az anyag plazmaállapotban van

GONDOLKODTATÓ KÉRDÉSEK

1. Miért láthatjuk hideg időben a leheletünket? Valójában mit látunk?

2. A telített vízgőz táblázat alapján állapítsuk meg, hogy mekkora külső nyomás mellett forr a víz 80 °C hőmérsékleten! A jelenség bemutatásához a 80 °C hőmérsékletű pohár vizet légritkító burája alá helyezve megindul-e a víz forrása, ha a zárt térből kiszivattyúzzuk a levegő felét?

3. Táblázat alapján állapítsuk meg, hogy a kuktafazékban hány kPa túlnyomást kell létesíteni, hogy a víz az edényben 125 °C hőmérsékleten forrjon!

4. Miért párásodik be a szemüvegünk, ha téli hidegből meleg helyiségbe lépünk?

5. Tájékozódjunk az internetről mi az a „szomjas kacsa" kísérlet! Adjunk a működésére magyarázatot a halmazállapot-változásokról tanultak alapján!

6. Nézzünk utána az interneten, hogy milyen elven működnek a páratartalom mérők! Mire utalhat az egyik típusnál a Haar Hygrométer felirat?

FELADATOK

1. Egy 30 °C hőmérsékletű, $V = 60\ m^3$ térfogatú üres ruhaszárító szobában a relatív páratartalom 30%. Vizes ruhák megszárításával a szoba levegőjének páratartalma 60%-ra növekedett, miközben a levegő hőmérséklete 25 °C-ra csökkent.

a) Mennyi víz párolgott el a ruhákból? (Használjuk a telített vízgőz nyomás-hőmérséklet táblázatát!)

b) Hányszor több azonos víztartalmú ruhát lehetne megszárítani a szobában, feltéve, hogy a szárítás végén a szoba hőmérséklete mindig 25 °C lesz?

MEGOLDÁS:

$T_1 = 30\ °C$; $q_1 = 40\%$

$T_2 = 25\ °C$; $q_2 = 60\%$

$V_{sz} = 60\ m^3$

$M_{víz} = 18\ \frac{g}{mol}$; $R = 8{,}314\ \frac{J}{mol \cdot K}$

---

a) $\Delta m_g = ?$

b) $\Delta m_{g_{max}} = ?$

a) Táblázat felhasználásával számítsuk ki a szobában lévő vízgőz nyomását szárítás előtt és után:

$$p_{g_1} = 0{,}4 \cdot 4{,}2364\ kPa = 1{,}69\ kPa \quad \text{és} \quad p_{g_2} = 0{,}6 \cdot 3{,}1675\ kPa = 1{,}90\ kPa.$$

Az állapotegyenletből a két esetben meghatározhatjuk az abszolút páratartalmak különbségét:

$$\Delta m_g = m_{g_2} - m_{g_1} = \frac{V_{sz} \cdot M_{víz}}{R} \cdot \left(\frac{p_{g_2}}{T_2} - \frac{p_{g_1}}{T_1} \right) = \mathbf{102\ g.}$$

Tehát a vizes ruhák **102 g tömegű vizet** tartalmaztak.

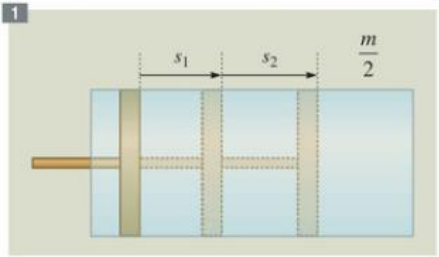
b) Maximális ruhamennyiség esetén a szárítás végén a szoba levegőjének relatív páratartalma 100% lesz, a $p_{tg_2} = 3{,}1675\ kPa$ telített gőz nyomásával számolva az abszolút páratartalom maximális növekedése:

$$\Delta m_{g_{max}} = m_{g_{2max}} - m_{g_1} = \frac{V_{sz} \cdot M_{víz}}{R} \cdot \left(\frac{p_{tg_2}}{T_2} - \frac{p_{g_1}}{T_1} \right) = \mathbf{654\ g.}$$

Vagyis maximálisan közel **6,5-szer nagyobb tömegű ruha** szárítható meg a helyiségben.

2. Egy dugattyúval elzárt 10 dm^3 térfogatú, 2 dm^2 keresztmetszetű hengerben 100 °C hőmérsékletű 70 kPa nyomású vízgőz található.

1



a) Izotermikus összenyomáskor mennyivel kell a dugattyút elmozdítani, hogy a vízgőz telítetté váljon?

b) Mennyivel kell a dugattyút tovább mozgatni a hengerben befelé, hogy a vízgőz fele lecsapódjon?

c) A *b)* esetben mennyi hőt vontunk el a gáztérből, ha a hőmérséklet végig 100 °C maradt?

d) Mennyivel csökkent a rendszer belső energiája a *b)* esetben?

MEGOLDÁS:

$V_1 = 10\ dm^3 = 0{,}01\ m^3$; $p_1 = 70\ kPa$

$A = 2\ dm^2 = 0{,}02\ m^2$

$p_2 = p_{tg} = 10^5\ Pa$

$T = 100\ °C = 373\ K$ (állandó)

---

a) $s_1 = ?$; *b)* $s_2 = ?$; *c)* $Q_{le} = ?$; *d)* $\Delta E = ?$

a) A Boyle–Mariotte-törvényből számíthatjuk ki a telitetté váló vízgőz térfogatát, ebből pedig a dugattyú elmozdulását:

$$V_2 = \frac{p_1}{p_2} \cdot V_1 = \frac{70\ \text{kPa}}{100\ \text{kPa}} \cdot 10\ \text{dm}^3 = 7\ \text{dm}^3 \quad \rightarrow \quad s_1 = \frac{V_1 - V_2}{A} = \mathbf{1{,}5\ dm.}$$

b) Mivel ekkor $p = p_{tg}$ = állandó, ezért az állapotegyenletből:

$$p_{tg} \cdot \Delta V = \frac{\Delta m}{M} \cdot R \cdot T \quad \rightarrow \quad \Delta V = \frac{V_2}{2} = 3{,}5\ \text{dm}^3 \quad \rightarrow \quad s_2 = \frac{\Delta V}{A} = \mathbf{1{,}75\ dm.}$$

c) A lecsapódott gőz tömege az állapotegyenletből:

$$\Delta m = \frac{p_{tg} \cdot \Delta V \cdot M}{R \cdot T} = 2\ \text{g}.$$

A gőz lecsapódásakor felszabadult hőmennyiséget kell elvonnunk:

$$Q_{elvont} = L_f \cdot \Delta m = 2256\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 2 \cdot 10^{-3}\ \text{kg} = \mathbf{4512\ J.}$$

d) A gőz összenyomásakor a külső munkavégzés:

$$W = -p_{tg} \cdot \Delta V = 10^5\ \text{Pa} \cdot 3{,}5 \cdot 10^{-3}\ \text{m}^3 = 350\ \text{J}.$$

Így a víz-gőz rendszer belső energia csökkenése az I. főtétel alapján:

$$\Delta E = Q_{fel} + W = -4512\ \text{J} + 350\ \text{J} = \mathbf{-4162\ J.}$$

3. A 20 m^3 térfogatú fürdőszobában a hőmérséklet 30 °C. A páratartalom 100%-os. Hány gramm vízgőz van a helyiségben? (A 30 °C-hoz tartozó telített gőznyomás táblázatból kikeresett értéke 4,2364 kPa.)

4. Mennyi víz csapódik ki az előző feladatan szereplő fürdőszobában, ha a hőmérséklet 20 °C-ra csökken? (20 °C-on a p_{tg} = 2,3339 kPa.)

5. Becsüljük meg a jég olvadáshőjéből, hogy a jégkristályban lévő vízmolekulákra mekkora kötési energia (rácsenergia) jut!

6. Becsüljük meg a víz forráshőjéből, hogy a 100 °C-os vízben a vízmolekulákra mekkora kohéziós erőkből származó átlagos kötési energia jut! A pontosabb becslésnél vegyük figyelembe a forráskor keletkező vízgőz tágulási munkáját is! (A 100 °C-os víz sűrűsége 958 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, a 100 °C-os gőzé pedig 0,60 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.)

7. Az 1 kg tömegű jég megolvasztásához az olvadásponton 334,96 kJ hőt kell a jéggel közölni. Elméletileg ennél több vagy kevesebb a keletkezett 1 kg tömegű 0 °C hőmérsékletű víz belső energiaváltozása? Mekkora az eltérés nagysága? (Vegyük a jég sűrűségét 0,92 $\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$-nek, a vízét 1 $\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$-nek 0 °C-on.)

8. *a)* Melyik esetben tartalmaz a szobánk több vízpárát? Akkor, amikor a higrométer 30 °C hőmérsékletet és 40% páratartalmat jelez, vagy akkor, amikor a szobában a hőmérséklet 20 °C és a relatív páratartalom 60%-os?

b) Adjuk meg a két esetben a szoba abszolút páratartalmának százalékos arányát!

OLVASMÁNY

A gázok cseppfolyósítása

Gáz anyaga	T_k (°C)	p_k (MPa)
ammónia	132,4	11,39
hélium	–267,9	0,23
hidrogén	–239,9	1,27
nitrogén	–147,1	3,39
oxigén	–118,8	5,04
szén-dioxid	31,1	7,38

Ha a gázok nyomását nagy mértékben megnöveljük, 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. (Lásd a táblázatot.)

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* (ejtsd: 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 helyikihasználás 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 hogy a folyékony hélium belső súrlódása elhanyagolható lesz (ezt a jelenséget nevezzük **szuperfolyékonyságnak**).



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

6. Mindennapok hőtana

Csoport és projekt munkára ajánlott témák, kísérletek

BEVEZETŐ

A *Fizika 10. tankönyv* ebben az utolsó fejezetében segítséget szeretne nyújtani témaajánlásokkal – *Ajánlott projekt témák* címmel – a tanév végi rendszerzésen túl a tanult hőtani ismeretek mindennapi életben történő felhasználásához, hasznosításához, egyes gyakorlati alkalmazások kidolgozásához.

Az ajánlott témák áttekintése után ki-ki a neki megfelelő témában további ismereteket, alkalmazási területeket kereshet és tanulmányozhat a rendelkezésre álló széleskörű források (internet, szakirodalom, kísérletezés) felhasználásával, egyszerű otthon elvégezhető számításos kísérletekkel ellenőrizheti, támaszthatja alá állításait.

Könnyebbé teszi a gyűjtő (kutató), feldolgozó munkát, ha az osztály tanulói érdeklődési körüknek megfelelően (projekt) csoportot alkotnak, ahol a csoport valamennyi tagja megtalálhatja a csoporton belül saját konkrét feladatát (gyűjtő munka, bemutató készítése, kísérlet tervezése, kivitelezése, becslés, számítás).

A csoportmunka végeztével, azok összegzésével, számítógépes bemutatók és beszámolók előadásával – osztályban vagy szélesebb körben (más osztályok, szülők stb) – mások számára is tanulságosak, elgondolkodtatók lehetnek az összegyűjtött új ismeretek, az ismertetett érdekes adatok, bemutatott kísérletek.

A) AJÁNLOTT PROJEKT TÉMÁK

1. Halmazállapot-változások a természetben és azok gyakorlati vonatkozásai

Résztémakörök:

a) Téli jégképződés a természeti vizeken – tavak, tengerek, folyók
- *Jégképződés hatása a vízi élőlényekre, helyi klíma alakulására, árvízvédelemre.*

b) Különböző halmazállapotú csapadékformák képződése és hatásaik
- *Védekezés jégeső ellen régen és ma (a védekezés fizikai, kémiai alapjai).*
- *Tavaszi fagykárok a növénytermesztésben, védekezési formák (füst, öntözés stb).*

c) Globális felmelegedés okozta sarki jégtakaró olvadása és globális hatásai a földi életre
- *Lehetséges tengerszint emelkedések, azok hatása települések életére.*
- *Tengeri áramlatok változása (útvonal módosulás, megszűnés, keletkezés) klimatikus hatások.*

d) Víz körforgása a bolygónkon
- *A globális jelenségek okozta halmazállapot-változások és azok hatásai a földi életre.*
- *A körforgást befolyásoló emberi tevékenységek: erdőirtás, urbanizáció stb.*

Feldolgozásra ajánlott tevékenységi formák:

Adatgyűjtés szakirodalomból könyvtár, internet útján. Beszámolók készítése prezentációval. Esetleg modell-kísérletek végzése, bemutatása. (Jégkocka olvadása sós vízben stb.)

2. Korszerű fűtés és hőszigetelés a lakásban, energiahasznosítások

Résztémakörök:

a) Lakásunk korszerű fűtése villannyal, gázzal, fatüzeléssel
- *Lakóház, lakás korszerű szigetelése, szellőzés biztosítása.*
- *A fűtési alternatívák korszerű tervezése, költségszámítások.*



b) Lakóházak és lakások energiaellátásának alternatív megoldásai
- *Geotermikus és szélenergia hasznosítása, hőszivattyús rendszerek típusainak tanulmányozása, költségelemzések.*



c) Passzív lakóházak tervezése, kivitelezése és működtetése
- *Az új építkezési forma előnyei és hátrányai, költségszámítások, új típusú élettér.*
- *Az építkezési forma elterjedése és jövője.*

Feldolgozásra ajánlott tevékenységi formák:

Adatgyűjtés szakirodalomból, könyvtár, internet útján. Beszámolók készítése prezentációval. Költségszámítások a tanult fizikai ismeretek felhasználásával: fűtéssel, vízmelegítéssel, napenergiával kapcsolatosan.

3. Hőkamerás felvételek a műszaki gyakorlatban és a gyógyászatban

Résztémakörök:



a) A hőkamerás technika gyakorlati alkalmazása a műszaki életben és tájékozódásban
- *A hőkamera működésének fizikai alapjai, felépítése. Műszaki jellemzői.*
- *Hőkamera alkalmazása lakóháza, lakások szigetelésénél.*
- *Műholdak hőtérképei a meterológiában, éjszakai tájékozódás(látás), felderítés.*

b) Hőkamera alkalmazása a gyógyászatban
- *Hőkamerák diagnosztikai felhasználása.*

c) Lehetséges visszaélések a technikával
- *Emberi test hőtérképe mint „bioenergia" és „test aura" felvételek, és értelmezésük.*

Feldolgozásra ajánlott tevékenységi formák:

Adatgyűjtés szakirodalomból könyvtár, internet útján. Beszámolók készítése prezentációval. Lehetőség esetén hőkamerás kísérleti bemutató az osztályban.

4. Napenergia hasznosítása kicsiben és nagyban



Résztémakörök:

a) A Nap energiájának hasznosítása a természetben
- *A Nap energiatermeléséről. Teljesítmény, földi napállandó, hasznosított energia.*
- *Növények, állatok, élőlények napenergia hasznosítása. Fosszilis energia mint tárolt napenergia.*
- *Napenergia mint az élet fenntartója. Földtörténeti múlt jelen és távoli jövő.*

b) Napenergia hasznosítása a lakóházak, lakások energiaellátásában
- *Napenergia hasznosítása napkollektorokkal, napelemekkel, költségszámítások.*



c) Napenergia ipari felhasználása, naperőművek
- *A naperőművek energiafelhasználásának megoldása :parabola tükrök, napkollektor, napelemek.*
- *Meglévő, épülő és tervezett naperőművek a világban.*
- *Naperőművek előnyei és hátrányai, számításos becslése.*

Feldolgozásra ajánlott tevékenységi formák:

Adatgyűjtés szakirodalomból könyvtár, internet útján. Beszámolók készítése prezentációval. Egyszerű számításos becslések költségekre, energia nagyságrendekre.

5. Hőtan a konyhában és házunk táján

Résztémakörök:

a) Korszerű és takarékos főzés a konyhában
- *Korszerű tűzhelyek kiválasztása: gáztűzhely, villanytűzhely (indukciós, hősugárzó), mikrohullámú készülék. Korszerű, energiatakarékos főzőedények (duplafalú, jó hővezető, fedős stb).*

b) Korszerű háztartási gépek, világítás és azok energiatakarékos üzemeltetése
– *Korszerű hűtő és mosógépek, lámpák, egyéb háztartási gépek, (porszívó, TV stb).*

Feldolgozásra ajánlott tevékenységi formák:

Adatgyűjtés szakirodalomból könyvtár, internet útján. Beszámolók készítése prezentációval. Egyszerű számításos becslések költségekre. Otthoni mérőkísérlet végzése gáz- villanytűzhely, mikrohullámú sütő hatásfokának vizsgálatára vízmelegítéssel.

6. Az élő szervezet mint hőerőgép

Résztémakörök:

a) Testünk energiatermelése és hasznosítása
– *Táplálkozás, mint energiaforrás, az ételek energia tartalma.*
– *Testünk hőháztartása, hősugárzása. Védekezés kihűlés és túlhevülés ellen.*
– *Helyes táplálkozás és öltözködés fizikai vonatkozásai.*



b) Élőlények (növények és állatok) energiatermelése és hasznosítása
– *Napenergiát hasznosító napraforgó, téli álmot alvó állatok, hibernáció, állatok szőrzete, tollazata, szárazságtűrő és trópusi növények.*

Feldolgozásra ajánlott tevékenységi formák:

Adatgyűjtés szakirodalomból könyvtár, internet útján. Beszámolók készítése prezentációval. Egyszerű számításos becslések. Videók bemutatása, lehetőség esetén hőkamerás mérések bemutatása.

7. Hőerőgépek a közlekedésben régen és ma



Résztémakörök:

a) Első gőzgépek alkalmazása vízen és szárazföldön
– *Gőzhajók elterjedése és fejlődése, a Titanic katasztrófája.*
– *Gőzautók, gőzbiciklik, gőzmozdony alkalmazások, elterjedése, megszűnése.*

b) Belső égésű motorok elterjedése, fejlődése és jövője
– *Otto- és diesel-motorok, gázüzemű motorok, hatásfok növelés, a jövő üzemanyaga.*

c) Turbina- és rakétahajtású hajtású közlekedési eszközök
– *Turbinahajtású autók, sebességrekordok, repülőgépek.*
– *Űrrepülők, kutató rakéták, bolygóközi utazások.*

Feldolgozásra ajánlott tevékenységi formák:

Adatgyűjtés szakirodalomból könyvtár, internet útján. Beszámolók készítése prezentációval. Videófelvételek keresése, bemutatása, néhány számításos becslés

8. „Örökmozgók" régen és ma



Résztémakörök:

a) Örökmozgók megjelenése a történelemben
– *Kétfajta perpetuum-mobile keresése a régmúltból, konkrét szerkezet működésének energetikai elemzése. (Például szomjas kacsa, folyadékos edény oldalába épített hengerkerék stb.)*

b) Modern örökmozgók napjainkban
– *Vízzel hajtott autók, térenergiát hasznosító berendezések, csoda fogyasztószerek, stb gyűjtése, kritikai elemzése.*

Feldolgozásra ajánlott tevékenységi formák:

Adatgyűjtés szakirodalomból könyvtár, internet útján. Beszámolók készítése prezentációval. Videók bemutatása, esetleg egy konkrét örökmozgó példány bemutatása, részletes elemzése (számításokkal igazolva).

9. Vízi-, szél- és hőerőművek összehasonlító vizsgálata

3D

Résztémakörök:

3D

a) Vízi-, szél- és naperőművek összehasonlítása hőerőművekkel
– *Előnyök, hátrányok, költségmegtérülési becslések.*

3D

b) Hőerőművek összehasonlítása tüzelőanyag és szén-dioxid kibocsátás mértéke szerint
– *Szén, olaj, földgáz, biomassza tüzelésű erőművek összehasonlítása gazdaságosság, környezetkárosítás szempontjából.*

Feldolgozásra ajánlott tevékenységi formák:

3D

Adatgyűjtés szakirodalomból könyvtár, internet útján. Beszámolók készítése prezentációval. Egyszerű számításos becslések végzése.

B) Otthoni elvégzésre ajánlott egyszerű hőtani mérő kísérletek

Ajánlások a projekt témákhoz kapcsolódó egyszerű számítást igénylő, otthon is könnyen elvégezhető mérőkísérletekre.

1. Gáz- és villanytűzhely, mikrohullámú sütő hatásfokának mérése kalorimetrikus úton vízmelegítéssel

a) Felvett energia mérése, számítása
– *Az elfogyasztott gáz mennyiségéből (1 m^3 térfogatú földgáz fűtőértékéből).*
– *Villanyóra állásából vagy fogyasztásmérő készülékkel történő méréssel (kereskedelemben kapható, ára 3-4 eFt).*

b) A melegített víz tömegének, hőmérsékletváltozásának mérése, felvett hőmennyiség kiszámítása

c) Hatásfokok kiszámítása a különböző melegítési módszereknél. Összehasonlítás, következtetések levonása, takarékossági ajánlások

2. Meleg víz előállításának költsége, gázbojler hatásfokának mérése

a) Fürdővíz előállítása, vízhőmérséklet mérése, Q számítása.

b) Felvett energia kiszámítása gázfogyasztásból (aktuális gázárból).

c) Költség összehasonlítás zuhanyozás, kádban való fürdés, villanybojleres melegítéssel.

3. Konyhai edények (fém, kerámia, műanyag) hőkapacitásának mérése kalorimetrikus keveréssel

a) Ismert mennyiségű és hőmérsékletű meleg és hideg vizet öntünk a mérendő edénybe. A közös hőmérséklet mérésével az edény hőkapacitása kiszámítható (érdemes nagy és kis hőkapacitású edényeket is választani)

b) Mérési eredmények elemzése, annak taglalása, hogy mikor előnyös a kis kapacitású edényt használni és mikor jó, ha nagy hőkapacitású az edényünk. Megtakarítási lehetőségek vizsgálata is ajánlott. (A mérés a kalorimetrikus leckénél kidolgozott feladatban szereplő mérés szerint történhet.)

4. Ételkészítésnél használt szilárd és folyékony anyagok fajhőjének mérése

a) Az előzőleg megmért homogén anyagú edények (fém, kerámia, agyag, üveg) fajhőjét is meghatározhatjuk, ha megmérjük a tömegüket. (Összetett anyagú edénynél a mérésnél átlagos fajhőt kaphatunk.)

b) A főzésnél gyakran használt cukor- vagy sóoldat, étolaj fajhőjét is mérhetjük keveréses módszerrel termoszban.

c) Hasonlítsuk össze a mért anyagok fajhőjét, és értékeljük a tapasztalatokat!

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. Számértékük megmutatja, hogy 1 °C hőmérséklet-változáskor a hosszúság vagy a térfogat megváltozásának nagysága hányadrésze a kezdeti értéknek. Vagyis a relatív hossz- illetve térfogatváltozást adják meg.

A valódi gázok izobár hőtágulásának köbös hőtágulási tényezője közel azonos értékű. Ezért a **modellnek** tekintett **ideális gáz** köbös hőtágulási tényezőjét $\beta = \frac{1}{273\ °C}$ állandó értéknek vesszük.

Ez lehetővé teszi az **abszolút hőmérsékleti** vagy **Kelvin-skála** bevezetését. A hőmérsékleti skálák közötti átváltási formula:

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

A GÁZOK ÁLLAPOTVÁLTOZÁSAI

A gázok egyensúlyi fizikai állapotát az állapotjelzőkkel adhatjuk meg. Az állapotjelzők lehetnek:
- összeadódó (extenzív) **állapotjelzők: a V térfogat, az m tömeg, az n anyagmennyiség,** illetve
- kiegyenlítődő (intenzív) **állapotjelzők: a p nyomás** és **a T hőmérséklet.**

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 $n = \frac{m}{M}$ a gáz anyagmennyisége mol egységben.

Ha az n mólszám helyett az $n = \frac{N}{N_A}$ hányadost helyettesítjük, akkor az **állapotegyenlet** molekuláris alakját kapjuk:

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

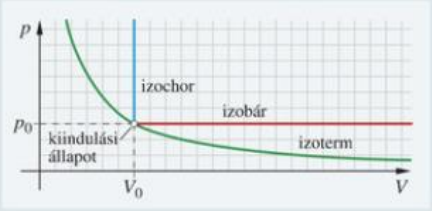
ahol N a gázrészecskék számát jelenti, a $k = \frac{R}{N_A}$ hányados a **Boltzmann-állandó.**

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

Az **állandó tömegű** gázok speciális állapotváltozásáról akkor beszélünk, ha **a hőmérséklet** (T), vagy a **nyomás** (p), vagy a **térfogat** (V) az állapotváltozás során állandó marad. Így megkülönböztetünk **izoterm, izobár** és **izochor** állapotváltozásokat. Ezen 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.**

Megoldások

(A terjedelem csökkentése érdekében a megoldásokat gyakran nem teljes mondatban fogalmaztuk meg, és néhány egyszerű kérdésre nem adtuk meg a választ.)

I. ELEKTROSZTATIKA

1. ELEKTROSZTATIKAI ALAPISMERETEK

1.1. Emlékeztető (13. o.)

G.k.: 1. Feltöltődik, és jobban porosodik. **2.** Gátolja a dörzsöléses feltöltődést. **3.** Levezeti a töltéseket a földbe, megakadályozza a szikrakisülést. **4.** A feltöltődés akadályozására. **5.** A műanyag feltöltődhet, a fém elvezeti a töltéseket. **6.** Az elektromos töltésűvé vált emberi test és az autó közötti kis szikrakisülés. **7.** Átvehetik a töltés egy részét. **8.** Mindkettő kisebb pozitív töltést mutat. **9.** Elektromos megosztás miatt. **10.** A rúd vezető, a fogantyú szigetelő.

2. COULOMB TÖRVÉNYE. A TÖLTÉSMEGMARADÁS TÖRVÉNYE (16. 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.: 3. *a)* $6{,}25 \cdot 10^{18}$; *b)* $6{,}25 \cdot 10^{18}$; *c)* $3{,}12 \cdot 10^{18}$; *d)* $6{,}8 \cdot 10^{16}$; **4.** $2{,}8 \cdot 10^{-3}$ N vonzóerő. **5.** *a)* $9{,}5 \cdot 10^{-5}$ m; *b)* $6{,}25 \cdot 10^{18}$; **6.** *a)* $3{,}73 \cdot 10^{-8}$ C; *b)* A testek nem pontszerűek. **7.** 1,34 km. (Érzékelhető, hogy az 1 C nagy töltésmennyiség!) **8.** 0,02 mg.

3. AZ ELEKTROMOS MEZŐ JELLEMZÉSE

3.1. Az elektromos térerősség (20. o.)

G.k.: 2. Lefelé. **3.** Igen, 3-szor nagyobb távolságban. **4.** $E = 0\ \frac{\text{N}}{\text{C}}$. **5.** Az A pontból induló, B-t nem tartalmazó félegyenesen. **6.** *a)* Q. Feltétel: az E térerősség a Q ponttöltéstől adott távolságban. *b)* r. Feltétel: az E térerősség adott ponttöltéstől r távolságban.

F.: 3. $1{,}5 \cdot 10^3\ \frac{\text{N}}{\text{C}}$ lefelé. **4.** *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. $1{,}76 \cdot 10^{15}\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ felfelé. **5.** 200; **6.** $4{,}5 \cdot 10^5\ \frac{\text{N}}{\text{C}}$ és a töltés felé irányul. **7.** *a)* $1{,}8 \cdot 10^{-7}$ C; negatív; *b)* $1{,}33 \cdot 10^{-9}$ C; pozitív; **8.** *a)* $6 \cdot 10^4\ \frac{\text{N}}{\text{C}}$ a negatív töltés felé. *b)* $1{,}56 \cdot 10^4\ \frac{\text{N}}{\text{C}}$ elirányul a töltésektől. **9.** *a)* $2{,}88 \cdot 10^3\ \frac{\text{N}}{\text{C}}$ felfelé; *b)* 1 mm-re lefelé. **10.** $2 \cdot 10^{-7}\ \frac{\text{N}}{\text{C}}$; **11.** $1{,}49 \cdot 10^{-8}$ C.

3.2. Az elektromos mező szemléltetése erővonalakkal (26. o.)

G.k.: 1. *a)* D; *b)* C; *c)* A és B; *d)* B és C; *e)* Q_1 pozitív, Q_2 negatív. **3.** Kezdetben közelítően, majd egyre kevésbé. (Két oka is van: nem a sebesség, hanem a sebességváltozás mutat az erő irányába. Nemcsak elektromos erő hat a testekre.) **4.** Sugarasak, mivel a mező forrása nagy távolságból már pontszerűnek számít.

F.: 1. *a)* $3000\ \frac{\text{N}}{\text{C}}$; *b)* $300\ \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}}$; *c)* 0; *d)* $150\ \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}}$; **2.** *a)* $15\ \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}}$; *b)* 0; *c)* $13\ \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}}$. **3.** $Q = 4 \cdot 10^{-9}$ C; *b)* $\Psi = 452\ \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}}$.

3.3. Az elektromos mező munkája. Az elektromos feszültség (30. 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. **7.** Homogén mezőben igen, inhomogén mezőben a nagyobb térerősség felé haladva csökken a távolság.

F.: 3. 12 V; **4.** $2{,}4 \cdot 10^{-13}$ J; **5.** *a)* $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J; *b)* $5{,}93 \cdot 10^{5}\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$; **6.** *a)* 1200 N; *b)* 7500 V; *c)* 2,5 cm; *d)* $548\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$; **7.** $577\ \frac{\text{V}}{\text{m}}$; **8.** Homogén mezőben: $U_2 = 60$ V, $U_3 = 30$ V; $U_{12} = U_{23} = 30$ V. Ponttöltés mezőjében: $U_2 = 45$ V, $U_3 = 30$ V; $U_{12} = 45$ V, $U_{23} = 15$ V. **9.** $U_{AB} \lhd U_{BC}$. **10.** *A* és *B*, *D* és *E*; $U_{BC} = 10$ V; $U_{CD} = 20$ V; $U_{BD} = 30$ V; **11.** $U_{AB} = 150$ V; $U_{BA} = -150$ V; $U_{BC} = 50$ V; $U_{BD} = 100$ V; $U_{DA} = -250$ V; $U_{DE} = 150$ V. **13.** A villámok energiája a Paksi Atomerőmű energiájának közelítően milliomod részét tudná csak pótolni.

4. ELEKTROMOS TÖLTÉSEK, TÉRERŐSSÉG, POTENCIÁL A VEZETŐN (39. o.)

G.k.: 1. Akkor nem, ha töltést viszünk e térrészbe. **2.** A fémgolyót az üreges vezető belsejéhez érintjük. **3.** Külső elektromos zavarokkal szemben árnyékolnak. **4.** Csak a fémfelületekkel határolt térrész védett (például a teherautó platója vagy a kívülről műanyag borítású utastér nem). **5.** A vezető anyagú burkolatok Faraday-kalitkát képeznek. **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 (46. o.)

G.k.: 1. Az ellentétes előjelű töltések itt is vonzzák egymást. **2.** Az alufólia golyó a negatív lemezt negatív töltéssel (elektrontöbblettel)hagyja el, a pozitív lemeztől pedig pozitív töltéssel távozik (a többlet elektronjain túl, további elektronokat is lead). **3.** *a)* Nem. *b)* Nem. *c)* Igen. **4.** *a)* A töltés és a térerősség állandó, a feszültség és az energia nő, a kapacitás csökken. Az energia növekedését a kondenzátor lemezeinek távolításakor befektetett munka fedezi. A munkát végző energiája ugyanennyivel csökken. *b)* A feszültség állandó, a kapacitás, a töltés, a térerősség és az energia is csökken. A kondenzátorból távozó töltések az akkumulátorba távoznak. Az akkumulátor energiája annyival nő, amennyivel a kondenzátoré csökken. **5.** A panelben lévő elektromos töltésű fémrács a testünkkel, mint földelt vezetővel kondenzátort képez, melynek kapacitása ujjunk közelítésekor növekszik.

F.: 2. 33 nF; **3.** 0,5 V; **4.** $5{,}9 \cdot 10^{-2}$ J és $2{,}35 \cdot 10^{-3}$ C; **5.** *a)* 10^{-9} C; *b)* $5 \cdot 10^{-8}$ J; *c)* $1{,}5 \cdot 10^{-9}$ C; *d)* $1{,}6 \cdot 10^{-2}$ V; **6.** *a)* $1{,}4 \cdot 10^{-4}$ C; *b)* $4{,}4 \cdot 10^{-3}$ J; **7.** *a)* 71 pF; *b)* $6{,}7 \cdot 10^{5}\ \frac{\text{V}}{\text{m}}$; *c)* 3 kV; **8.** *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; *f)* $1{,}1 \cdot 10^{-2}$ N.

6. KONDENZÁTOROK KAPCSOLÁSA (49. o.)

G.k.: 1. A Q töltés megosztó hatása következményeként. A vezetőkben addig tart a töltésszétválasztás (az elektronok mozgása), amíg a vezető belsejében a térerősség zérusra csökken. (Ez egy pillanat alatt bekövetkezik.) **2.** Amelyiknek nagyobb a kapacitása. **3.** Amelyiknek kisebb a kapacitása. **4.** *a)* 100 V vagy 0 V; *b)* 200 V vagy 0 V.

F.: 4. *a)* $U_1 = U_2 = 100$ V; $Q_1 = 10^{-3}$ C; $Q_2 = 2 \cdot 10^{-3}$ C; $C = 3 \cdot 10^{-5}$ F. *b)* $C = 6{,}7 \cdot 10^{-6}$ F; $Q_1 = Q_2 = 6{,}7 \cdot 10^{-4}$ C; $U_1 = 67$ V; $U_2 = 33$ V. **5.** A potenciál előbb −100 V-ról 67 V-tal, majd 33 V-tal 0 V-ig növekszik. **6.** $U = 67$ V; $Q_1 = 1{,}98 \cdot 10^{-3}$ C; $Q_2 = 1{,}32 \cdot 10^{-3}$ C.

II. AZ ELEKTROMOS ÁRAM, VEZETÉSI JELENSÉGEK

1. EGYENÁRAM, ÁRAMKÖRI ALAPTÖRVÉNYEK

1.1. Emlékeztető (56. o.)

G.k.: 1. A vezeték is fogyasztó, de ez általában elhanyagolható a „fő" fogyasztók mellett. Például rövidzár esetén a vezeték válik fogyasztóvá. **2.** A síelők a töltéshordozóknak, a drótkötélpálya az áramforrásnak, a havas lejtő a vezetőnek (fogyasztónak) felelnek meg.

1.2. Az áramköri alapmennyiségek. Ohm törvénye (60. o.)

G.k.: 1. A feszültség növelése az áramerősség növekedéséhez, az ellenállás növelése az áramerősség csökkenéséhez vezet. **2.** *a)* $U_A = 2 \cdot U_B$; *b)* $I_b = 2 \cdot I_A$; **3.** A nagyfeszültség nem egy távvezetéken, hanem két távvezeték között van. A lakás 230 V-os feszültsége viszont a fázisvezető és a földelt nullvezető között jelentkezik. Tehát közelítően ennyi a feszültség a földön álló és a fázist érintő ember keze és talpa között is. **4.** A műszeren az átfolyó I áramerősség helyett az $U = I \cdot R_b$ feszültség is feltüntethető, ahol R_b a műszer saját belső ellenállása. **5.** A műszerben lévő áramforrás ismert feszültségének és a mért áramerősségnek a hányadosát adja meg. **6.** *a)* Voltmérő. *b)* Ampermérő.

F.: 2. 50 000 A; **3.** *c)* 50 Ω; **4.** 3,5 V; **5.** 85,2 Ω; **6.** *a)* 50 Ω; *b)* 0,2 A.

1.3. Mitől függ a fémes vezető ellenállása? (64. o.)

G.k.: 1. 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. **8.** *a)* A villám árama a földi becsapódási ponttól szétágazva folyik tovább, és így útja mentén a talaj két pontja között az ellenállással arányos elektromos feszültség lép fel. Minél közelebb éri két lábunk a talajt, annál kisebb feszültség (és áram) veszélyeztet bennünket közeli villámcsapás esetén. *b)* A csoportosan legelésző négylábú állatok közé lecsapó villám esetén több állat is a becsapódási hely közelében van, és a nagyobb lábtávolságuk miatt nagyobb feszültség éri őket.

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 (70. o.)

G.k.: 1. 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.: 3. *a)* 29,5 Ω; *b)* 1794 W; **4.** *a)* 575 W; *b)* 690 kJ. **5.** *a)* 3,75 A; *b)* 3,2 Ω; *c)* 81 kJ; **6.** *a)* 22,4 mA; *b)* 44,7 V

1.5. Fogyasztók soros kapcsolása (73. o.)

G.k.: 1. A hagyományos izzósornál a többi izzó sem világít. Újabb megoldás szerint az izzószállal félvezető termisztort kapcsolnak párhuzamosan, így az izzószál kiégése után sem szakad meg az áramkör. **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 fázisceruzában kicsiny áramerősséget igénylő gázkisülési cső (glimmlámpa) világít. Az ember számára nem érzékelhető kis áramerősséget MΩ nagyságú ellenállás soros kapcsolásával biztosítják. **7.** 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.** 35 Ω; **5.** *a)* 28,5 Ω; *b)* 52,5%; **6.** 21,3%; **7.** 17 izzót (legalább). 3,16 W. **8.** *a)* 76 Ω; *b)* 5,4 V; 7,2 V; 11,4 V.

1.6. Fogyasztók párhuzamos kapcsolása (76. o.)

G.k.: 1. *a)* Párhuzamos. *b)* Soros. *c)* Párhuzamos. *d)* Soros. *e)* Párhuzamos. *f)* Párhuzamos. *g)* Párhuzamos. *h)* Bármelyik. **2.** Fogyasztók soros kapcsolásánál I állandó, P és R egyenesen arányos. Párhuzamos kapcsolásnál U állandó, P és R fordítottan arányos. **3.** Két fűtőszál soros kapcsolása, egy fűtőspirál, majd két fűtőspirál párhuzamos kapcsolása. 2-szeresre, majd 4-szeresre nő a teljesítmény. **4.** Így lekapcsolt lámpa vagy kiolvadt biztosíték esetén megakadályozhatjuk a fázisvezeték érintésekor bekövetkező áramütést.

F.: 2. *a)* 120 Ω; *b)* 0,1 A; *c)* 0,06 A; 0,04 A; *d)* 0,72 W; 0,48 W; 1,2 W; **3.** 588,2 Ω; 0,187 W; **4.** *a)* 96 mA, 156 mA; *b)* 24 V; *c)* 1,44 W, 2,3 W, 3,74 W; **5.** 12 V, 0,6 A, 0,4 A; **6.** 144,7 Ω és 55,3 Ω.

1.7. Soros és párhuzamos kapcsoláson alapuló eszközök (80. o.)

G.k.: 1. Csökken. **2.** Növekszik. **3.** *a)* A voltmérő ellenállását. *b)* Az ampermérő ellenállását. **4.** *D*, *C* és *E*, *B*, *F*, *A*; **5.** $R_2 = 4 \cdot R_x$.

F.: 2. *a)* $R_S = 2{,}04\ \Omega$; *b)* $R_b = 2\ \Omega$; **3.** *a)* $R_e = 4900\ \Omega$; *b)* $R_b = 5\ \text{k}\Omega$; **4.** *a)* $R_S = 0{,}4\ \Omega$; *b)* $R_e = 4960\ \Omega$; **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)* A bal oldali végétől 78,3 Ω; *b)* 36,2%. **8.** *b)* 75 Ω; *c)* 0,1 A.

1.8. Áramforrások modellezése. Üresjárási feszültség, belső ellenállás (86. 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.: 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)* 17,5 Ω; *b)* 0,256 A, 4,47 V; **5.** *a)* 4 Ω vagy 1 Ω; *b)* 2 Ω; *c)* Nem valósítható meg. A grafikonnal összhangban $R_k = R_b$ esetén maximális a leadott teljesítmény. Kisebb teljesítmény kétféle R_k mellett is elérhető. **6.** *a)* $I \rhd 0{,}625$ A; *b)* Alkáli elem: 3 A; NiMH akku: 60 A; **7.** *a)* 18 V; 8 Ω; *b)* 10 V; **9.** *a)* 6,2 V, 0,4 Ω; *b)* A grafikon egyenes szakasz. *c)* 6,2 V ill. 15,5 A; *d)* Első esetben 2,2 V, második eset nem lehetséges.

2. VEZETÉSI JELENSÉGEK

2.1. Elektromos áram folyadékokban (92. 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.

F.: 1. *a)* A katódon; *b)* $3{,}75 \cdot 10^{19}$ ion; *c)* $6{,}25 \cdot 10^{-5}$ mól; *d)* 4 mg; **2.** 0,101 g; **3.** A hálózati elektromos energia olcsóbb.

2.2. Elektromos áram gázokban és vákuumban (95. o.)

G.k.: 1. *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. Az elektromos áram hatása az emberi szervezetre. Balesetvédelmi szabályok (98. o.)

G.k.: 3. 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.

III. A MÁGNESES MEZŐ

1. A MÁGNESES MEZŐ

1.1. Emlékeztető (104. 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.** Áramforrás energiája, elektromos mező energiája, mágneses mező energiája, mozgási energia, hő (belső energia) és hang energiája. **5.** Mágneses árnyékolás érdekében.

1.2. A mágneses indukcióvektor, indukcióvonalak, fluxus (108. 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)* Az É-i pólustól a D-i pólus felé mutat. *b)* Az *a)* és *d)* egyensúlyi a *b)* és *c)* maximális forgatónyomatékú helyzet. **3.** Növelni kell a magnetométer menetszámát, keresztmetszetét és áramerősségét. **4.** 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; *b)* 3 mWb; *c)* 3 mWb.

1.3. Egyenes áramvezető és tekercs mágneses mezője (112. 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 (116. 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.

F.: 1. 2,51 mT és 2,51 μWb; illetve 3,01 T és 3,01 mWb; **2.** *a)* 31,8 mA; *b)* Szintén 31,8 mA.

1.5. A mágneses mező hatása mozgó töltésekre (122. 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.

F.: 2. *a)* 33,3 A; *b)* 2,74 N; **3.** *a)* Vízszintesen, keleti irányú áram; *b)* $4 \cdot 10^{-4}$ N; *c)* Például egy hajszálvékony Al-huzalt felemelne, de az azonnal meg is olvadna. **4.** *a)* 69,6 cm; *b)* Ellenkező körüljárású lenne és kisebb sugarú: $r = 0{,}379$ mm.

IV. HŐTAN

1. HŐTANI ALAPJELENSÉGEK

1.1. Emlékeztető. Hőhatások a mindennapokban, hőmérők (128. o.)

G.k.: 1. Késő ősz vagy tél, mivel a közölt hőmérsékletek kereken 4 °C-nak és –5 °C-nak felelnek meg. **2.** 98,6 °F fölött, kereken 100 °F-nál. **4.** Az előny az, hogy –30 °C alatti hőmérsékletek is mérhetők az alkoholos hőmérőkkel, és az alkohol nem mérgező. Hátrányuk az, hogy magas, 100 °C fölötti hőmérsékletek nem mérhetők az alkoholos eszközökkel.

1.2. A szilárd testek hőtágulásának törvényszerűségei (132. 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. **8.** Egyenetlen gyors hőtágulás miatt. Meleg vízfürdős előmelegítéssel kerülhetjük el a gyors hőtágulást.

F.: 2. $\Delta l = 72$ mm; **3.** $l_0 = 6{,}25$ m; **4.** $\Delta T = 109$ °C, $T = T_0 + \Delta T = 129$ °C; **5.** *a)* $\alpha = 1{,}84 \cdot 10^{-5} \frac{1}{°C}$. *b)* A rúd sárgarézből készült. **6.** $\Delta T = -13{,}9$ °C, $T = T_0 + \Delta T = 6{,}1$ °C; **7.** $\Delta V = 11{,}02$ dm^3; **8.** A kísérlet a rézből készült eszközzel még elvégezheto, legalább 95 °C-os meleg vízzel. A vasból készült eszköznél még a 100 °C-os forró vízzel sem, mert a vas hőtágulása kisebb a rézénél.

1.3. A folyadékok térfogati hőtágulása (136. 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.** Az olaj jobban tágul, mint a fémből készült kanna, ezért a melegebb műhelyben kitágult olaj kifolyik a kannából. Ez balesetveszélyes lehet. **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. **7.** A befőttes üveg alján hideg marad a víz, mivel nem indul meg lefelé a hőáramlás (lásd a természtes vizek felmelegedését!).

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.** $\rho_T = \frac{\rho_0}{1 + \beta \cdot \Delta T} = 987{,}7 \frac{kg}{m^3}$. **9.** A jégkocka még a 100 °C-os forró vízben sem merül el, mivel sűrűsége kisebb a forró vízénél. Csak 140 °C hőmérséklet felett lesz kisebb a víz sűrűsége a jégénél. (Ezt kísérletileg nehéz lenne ellenőrizni, mivel ilyen hőmérsékletű vizet kb. 450 kPa nyomás alatt tudnánk előállítani.)

2. GÁZOK ÁLLAPOTVÁLTOZÁSAI

2.2. Gázok állapotváltozása állandó nyomáson (izobár állapotváltozás) – gázok szabad hőtágulása (142. 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.** A fűtéskor létrejövő, felfelé irányuló légáramlás magával szállítja a port a mennyezetre. A kályha fölé helyezett üveglappal mérsékelhetjük az elszennyeződést. **4.** A ballonban lévő levegő melegen tartására, hogy a ballonra ható felhajtóerő kiegyenlítse a ballon és a teher összsúlyát. Ha a ballonban a levegő hűlni kezd, akkor a sűrűsége nő, és a léghajó lassan leereszkedik a földre. **5.** A zsákban felmelegedett levegő sűrűsége kisebb lesz, így a zsák léggömbként felemelkedik. A levegő lehűlése után a sűrűsége megnő, ezért a „léggömb" leereszkedik.

F.: 1. $\Delta V = V_0 \cdot \beta_{lev} \cdot \Delta T = 4{,}41\ \text{m}^3$

2.3. Gázok állapotváltozása állandó térfogaton (izochor állapotváltozás) – bezárt gáz nyomásának változása hőhatásokra (146. 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.

F.: 2. *a)* $\Delta p_2 = 230{,}7$ kPa; *b)* $\Delta p_3 = 189{,}8$ kPa; **3.** $F = 86{,}2$ N; **4.** $T_2 = 418{,}6$ K = 145,6 °C; **5.** *a)* 10,86 °C. *b)* Nem függ a térfogattól. **6.** 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. **7.** *c)* $\Delta p = 15{,}4$ kPa; *d)* $F = 1232$ N.

2.4. Gázok állapotváltozása állandó hőmérsékleten (izotermikus állapotváltozás) – gázok nyomásának változása térfogat változtatás hatására (150. o.)

G.k.: 1. A sűrűség a nyomással egyenesen arányos. **2.** A gáz cseppfolyósodhat. **4.** A vérben nagy nyomáson feloldódott gázok (oxigén, nitrogén) a nyomás gyors csökkenésekor buborékok alakjában kiválik. Ez akadályozza a véráramlást, amely súlyos egészségkárosodást okozhat. Ezt nevezik keszonbetegségnek. **5.** Az olajozás puhán tartja a bőrből készült dugattyút, így az szelepként jól működik. A dugattyú fordított felszerelésével a szelep működése fordított lesz: lenyomáskor nyit, felhúzáskor zár, ezért a pumpa szívni fog. **6.** A parafában lévő sok parányi légzárvány a fiolához hasonlóan viselkedik. **7.** A tengeralattjárónál is a jármű átlagos sűrűségváltozásával oldják meg a merülést és emelkedést, csak itt nem kívülről, hanem belső szivattyúkkal valósítják meg a víz ki-be áramlásához szükséges nyomásváltozásokat. **9.** Nem, mivel súlytalanság állapotában nincs hidrosztatikai felhajtóerő sem.

F.: 2. $p_2 = 1{,}67 \cdot 10^5$ Pa; **3.** $h_2 = 23{,}1$ cm; **4.** $\Delta h = 3{,}3$ cm; **6.** $s = 7{,}2$ cm távolságra a henger végétől. **7.** 99,76 kPa.

2.5. Az ideális gázok általános állapotváltozása, egyesített gáztörvény, állapotegyenlet (156. o.)

G.k.: 1. Izoterm: *d)* és *B)*; Izochor: *e)* és *F)*; Izobár: *a), f)* és *C), D)*; általános: *b), c)* és *A), E)*. **2.** Összesen hatféleképpen: izobár–izochor, izochor–izobár, izoterm–izobár, izobár–izoterm, izoterm–izochor, izochor–izoterm. **3.** $A \to B$: izochor melegítés, $B \to C$: izobár melegítés, $C \to D$: izochor hűtés, $D \to A$: izobár hűtés. **4.** A lopóban a levegő tömege, nyomása és térfogata változik. A folyadék a lopóban a külső és a belső nyomás különbség hatására áramlik fel. **5.** A palackban lévő folyékony propán-butánból pótlódik a felette lévő gáztérben az elfogyasztott gáz mennyisége.

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.** $M = 4\ \frac{g}{mol}$, a gáz hélium. **8.** $\rho_H = 0{,}089\ \frac{kg}{m^3}$; $\rho_{He} = 0{,}179\ \frac{kg}{m^3}$; $\rho_O = 1{,}428\ \frac{kg}{m^3}$. Az eltérés oka az, hogy a táblázat adatai valódi gázokra vonatkoznak. **9.** A bizonyítást az állapotegyenletek felírásával végezhetjük el, felhasználva a gázok tömegének és térfogatának összeadódását és a hőmérsékletek azonosságát.

3. MOLEKULÁRIS HŐELMÉLET

3.2. A gázok állapotváltozásainak molekuláris értelmezése (162. 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.** Növeljük a részecskék mozgásának intenzítását (ezzel a hőmérséklet növelést modellezzük). **4.** A dugattyú nem mozdul el, ha a részecskék száma és mozgásuk intenzítása nem változik, mivel ekkor a gáz nyomása sem változik meg.

F.: 1. $F_á = 20$ N; $F = 20\,000$ 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. Az állapotegyenlet molekuláris alakja. A hőmérséklet molekuláris értelmezése (165. o.)

G.k.: 1. A forró gázban a molekulák egy része atomokra esett szét. Hűtéskor az atomok ismét molekulává egyesülnek (rekombinálódnak), ezért a részecseszám és azzal együtt a nyomás is ugrásszerűen lecsökken. **2.** Fordított arányosság, mivel az $N \cdot T$ szorzat is állandó a $p \cdot V$ szorzat állandósága miatt (a szobában a nyomást és a térfogatot állandónak tekinthetjük). **3.** 3,4%-kal növekszik.

F.: 2. Helyes a *b)*. **3.** $8^{\frac{1}{2}} \approx 2{,}8$-szor; **4.** *a)* $\frac{2}{3}$ vagy $\frac{3}{8}$; *b)* Ott van kevesebb részecske, ahol kisebb a nyomás. **5.** 7700 K; **6.** $6 \cdot 10^{-21}$ J $\approx 0{,}04$ eV.

3.4. Az ideális gázok belső energiája. Ekvipartíció tétele (169. o.)

G.k.: 1. A gáztól alacsonyabb hőmérsékletű és nyomású környezetben hőt vonhatunk el, vagy tágulással munkát végeztethetünk a gázzal. **2.** Igen lehet, ha a mozgó gázpalacknak elég nagy a sebessége, pl. repülőgépen történő szállításnál. **3.** Mert a szobában lévő levegő térfogata és nyomása (így a $p \cdot V$ szorzata is) állandónak vehető. A hőérzetünk a testünk és a megnövekedett mozgási energiájú részecskék közötti kölcsönhatásból származik (nem az összes részecske együttes energiáját érzékeljük). **4.** Ilyen pl. a gázok edényből vagy a Föld gravitációs vonzásából való elszökése, amikor csak a nagyobb sebességű részecskék távoznak el. **5.** Az 500 K hőmérsékletű oxigéngázban nagyobb a legvalószínűbb sebesség, mint az 1000 K kripton gázban, mert az oxigénmolekulák kisebb tömegűek, mint a kripton atomok, így az előbbiek hevesebben mozognak (lásd ekvipartíció tételét). **6.** A leggyakoribb sebességek aránya: $1 : \sqrt{2}$ (lásd ekvipartíció tételt).

F.: 2. $\Delta E = \frac{5}{2} \cdot n \cdot R \cdot \Delta T = -62{,}35$ J; **3.** *a)* $E = \frac{5}{2} \cdot p \cdot \Delta V = 15$ MJ. *b)* Változatlan. **4.** A bútorok belső energiája csökkent, a bent lévő levegőé változatlan. **5.** A molekulák és atomok számának aránya 3 : 1 (1,5 mólnyi molekula, 0,5 mólnyi atom). **6.** 18,25%-kal lesz nagyobb a molekulák átlagos energiája kánikulában. **7.** 1305 $\frac{m}{s}$.

4. ENERGIA, HŐ ÉS MUNKA – A HŐTAN FŐTÉTELEI

4.1. A hőtan I. főtétele. Az energiamegmaradás törvényének kiterjesztése (174. o.)

G.k.: 1. Melegnek érezzük a ruhán keresztül kifújt levegőt, mivel a kifújt levegő a ruhában összenyomódik, ezért felmelegszik. **2.** A gáz gyors kiáramlása miatt a palack adiabatikusan lehűl. Ezen segíthetünk, ha langyos vízfürdőbe helyezzük a palackot. Gázlánggal melegíteni életveszélyes! **4.** A higanynak nagy a belső súrlódása, kicsi a fajhője, így súrlódáskor mérhetően jól felmelegszik.

F.: 1. Igen, $Q = 100$ J; **2.** A helyes kifejezés: munkavégzéssel belső energiát növelünk. **3.** $\Delta E = W = 6000$ J. **4.** $\Delta T = \frac{g \cdot h}{c} = 0{,}1$ °C.

4.2. Energiacserék az ideális gázok izobár és izochor állapotváltozásánál (178. o.)

G.k.: 1. A nagyobb súlyú dugattyú esetén, mert ekkor nagyobb a gáz munkavégzése. A gáz munkája a külső légnyomás elleni munkavégzésre és a dugattyú helyzeti energiájának növelésére fordítódik. **2.** Többet kell elvonni, mivel az m tömegű test súlya pozitív munkát végez a gázon hűléskor. Az elvont hők különbsége a nehezék helyzeti energiájának megváltozásával egyenlő. $Q_2 - Q_1 = m \cdot g \cdot \Delta h$. **3.** A kétatomos gázzal kell több hőt közölni, az arány 7 : 5. **4.** Most a kétatomos gázzal kell több hőt közölni, de a közölt hők aránya most 5 : 3.

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)* $\Delta E = 500$ J; *b)* $Q = 700$ J; *c)* A gáz térfogata és abszolút hőmérséklete $\frac{8}{3}$-szorosára nőtt.

4.3. Az izoterm és adiabatikus állapotváltozások energiacseréi (183. o.)

G.k.: 1. A keverék tartósan biztosítja az állandó (0 °C) hőmérsékletet. A keverék hőátadáskor a víz egy része megfagy, hő felvételekor pedig megolvad, miközben a hőmérséklet állandó marad. **2.** A második esetben, mivel ekkor a külső munkavégzés (az izoterma görbe alatti terület mérőszáma) nagyobb. **3.** A munkavégzés a gyors összenyomásnál lesz nagyobb, mivel ekkor a gáz fel is melegszik. Az állapotváltozás görbéje az izoterma görbe fölött helyezkedik el, így a görbe alatti terület is nagyobb, mint az izotermikus összenyomásnál. **4.** A görbe alatti terület a második esetben kisebb lesz, azaz ekkor az adiabatikusan táguló gáz kevesebb munkát végez a belső energiájának rovására, így ezen a szakaszon kisebb lesz a gáz hőmérséklet csökkenésének nagysága is.

F.: 2. $W_{gáz} = 200$ J; **2.** *a)* $Q = -750$ J; *b)* Az átlagos összenyomóerő nőne, mert a munkavégzés is nagyobb lenne a gondolkodtató kérdéseknél említett okok miatt. **3.** *a)* $\Delta E = 800$ J; *b)* $\Delta T = 64{,}1$ °C; **4.** $W \approx 5500$ J.

4.4. Testek fajhője, hőkapacitása (186. o.)

G.k.: 1. Nagyobb a folyóban lévő víz tömege az áradás miatt. **2.** A víznek nagyobb a hőkapacitása. **3.** A molekulák között erős hidrogén-híd kémiai kötések vannak. **5.** A fémek közül az alumíniumnak kicsi a moláris tömege (egységnyi tömegű alumíniumban kb. kétszer annyi atom van, mint egységnyi tömegű vasban).

F.: 3. *a)* $T_{vas} = 654$ °C; *b)* Az első hőmérsékletváltozása a legnagyobb, az utolsóé a legkisebb. **4.** *a)* 9,84 kW; *b)* 0,05 m. *c)* A zuhanyozás a gazdaságosabb, megtakarítás fürdésenként kb. 15,5 Ft.

4.5. A termikus folyamatok iránya, a hőtan II. főtétele (192. o.)

G.k.: 2. A nagy hőkapacitású tengerekből, óceánokból korlátlan mennyiségű hőt tudnánk kivonni munkavégzés nélkül is. **3.** A zárt térben a hőmérséklet mindkét esetben emelkedne. Első esetben a hűtött térből kivont hő, második esetben csak a kompresszor motorja által termelt hő melegítené a helyiséget. **4.** A klímaberendezés hőszivattyúként fűtené az utasteret. Erre télen sincs szükség, mivel a gépkocsi belső égésű motorja termel annyi „hulladékhőt", amivel fűthető az utastér is szükség esetén. **5.** Igen, a gépkocsi üzemanyag fogyasztását növeli (általában fél liter többletfogyasztással szoktak számolni 100 km-ként). Ez a többletfogyasztás abból ered, hogy a klímához szükséges elektromos áramot termelő generátornak, amelyet a gépkocsi motorja hajt, nagyobb teljesítménnyel kell útközben üzemelnie.

4.6. Termikus körfolyamatok. Hőerőgépek, hűtő és fűtőberendezések (198. o.)

G.k.: 1. T_2 hőmérséklet csökkentésével, vagy T_1 növelésével. **2.** A jósági tényező egyre csökken. **3.** Hatásfok szempontjából előnyösebb, ha a melegebb hőtartály hőmérsékletét növeljük.

F.: 2. *a)* 500 K, 750 K, 450 K; *b)* 2750 J, –2550 J; *c)* 200 J; *d)* 7,27%; **3.** *a)* 2550 J, –2750 J; *b)* 200 J; *c)* 12,75; *d)* 13,75. **4.** *a)* 675 K, 450 K; *b)* 5 kJ; *c)* 0,25 kJ; *d)* 5%. **7.** *b)* $n = 80{,}2$ mol.

5. HALMAZÁLLAPOT-VÁLTOZÁSOK

5.1. A halmazállapot-változások törvényszerűségei (205. o.)

G.k.: 2. Térfogatnövekedéskor a megszilárdult anyag felszíne domború lesz (l. a jeget), térfogat csökkenéskor a felszín homorú lesz (l. a parafint). **3.** A folyadék felszíne feletti térrészből a gőz eltávozik, így a lecsapódás csökken, a párolgás gyorsabb lesz. **4.** A záró szelep súlyának növelésével a forráspont emelhető, csökkentésével csökkenthető.

F.: 2. $Q = 1779{,}6$ kJ. **3.** 6,71-szer több időre van szükség a víz elforraláshoz, mint a felmelegítéshez. **4.** Legfeljebb 0,8 kg tömegű jeget olvaszthatunk fel 100 g 100 °C-os vízgőzzel.

5.2. A halmazállapot-változások molekuláris értelmezése és energetikai vizsgálata (211. o.)

G.k.: 1. A leheletben lévő vízgőz telítetté válik és kicsapódik a hidegben, ezért az apró ködszemecskéket látjuk. **2.** 47,35 kPa nyomáson. Nem indul meg, mert a bura alatt a nyomás csak a légköri nyomás felére (50 kPa) csökken le. **3.** 232,12 kPa-t . **4.** A szemüveg hideg lencséjével érintkező, vízgőzt tartalmazó levegő lehűl, a vízgőz telitetté válik, és a lencsére kicsapódik.

F.: 3. $m_{\text{gőz}} = 605$ g; **4.** $\Delta m_{\text{gőz}} = 272$ g. **5.** A rácsenergia kb. 10^{-20} J. **6.** $6{,}76 \cdot 10^{-20}$ J/molekula, 0,42 eV/molekula. Pontosabb becsléssel: $6{,}253 \cdot 10^{-20}$ J/molekula, 0,39 eV/molekula. **7.** Több, mivel a jég megolvadásakor kismértékű külső munkavégzés is növeli a belső energiát kb. 8,7 J-lal. Ez az olvadáshő mellett (335 kJ) elhanyagolható. **8.** A hidegebb szobában van kevesebb vízpára: 81,6% az abszolút páratartalmak százalékos aránya.

	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

232.1. 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

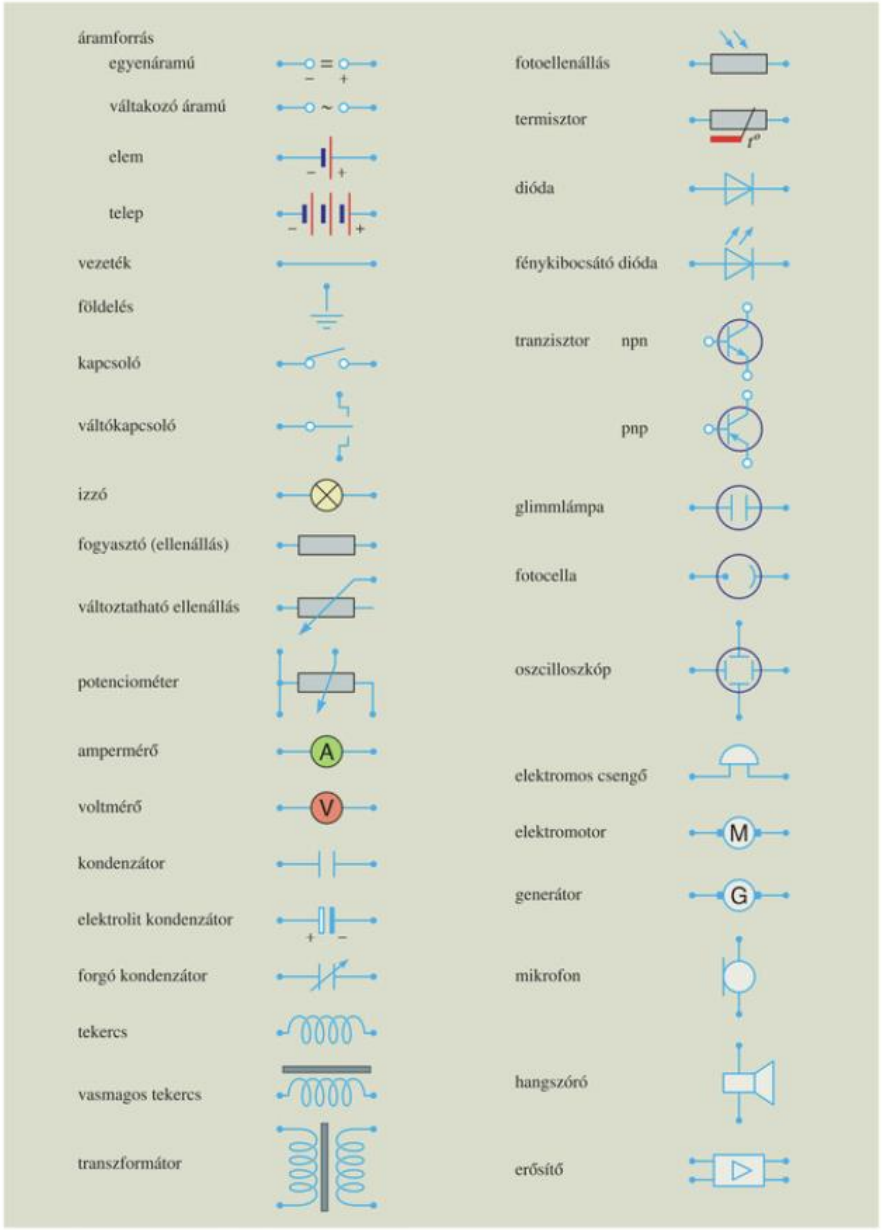
232.2. Folyadékok hőtani adatai

	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

232.3. 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}

232.4. SI-előtétszavak (prefixumok)



233.1. 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 addig 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 141
adiabatikus állapotváltozás 182
állapotegyenlet 155
állapotjelző 138
állapotváltozás 139
általános állapotváltozás 155
Avogadro-állandó 164
Brown-mozgás 159
Celsius-féle hőmérsékleti skála 126
Coulomb-törvény 14
c_p fajhő 185
c_V fajhő 185
dinamikus hangszóró 115
dipólus 12
disszociálás 89
egyensúlyi állapot 138
egyesített gáztörvény 154
egyetemes (általános) gázállandó 155
elektrolit 89
elektromágneses szaggató 114
elektromágneses távkapcsoló (relé) 115
elektromos árnyékolás 34
elektromos csúcshatás 35
elektromos erőtér 18
elektromos erővonal 23
elektromos generátor 55
elektromos mező munkája 27
elektromos polarizáció 12
elektromos térerősség 19
elektronmikroszkóp 95, 119
elemi töltés 14
farad 42
Faraday-kalitka 34
fázisvezető 96
fényelem (napelem) 55
forgókondenzátor 45
forgótekercses mérőműszer 115
fotocella 95
fotoelektron-sokszorozó 95
fotoemisszió 95
földmágnesség 120
fúziós magreakció 119
galvanizálás 89
gerjesztett állapot 93
háromfázisú rendszer 96
hőkapacitás 184
hőmennyiség 171
hőtágulás
  lineáris (vonal menti) hőtágulási tényező 129
  térfogati (köbös) hőtágulási tényező 130
ideális gáz 140
ideális gázok fajhője 185
ionizáló hatás 93
irreverzibilis folyamatok 190
izobár állapotváltozás 140
izochor állapotváltozás 145
izotermikus állapotváltozás 149
jobbkéz-szabály 106, 110, 111
kapacitás 42
katódsugárcső 95
Kelvin-skála 141
kondenzátor 42
kondenzátor energiája 43
lágyvasmag 114
Lorentz-erő 118
mágneses dipólus 102
mágneses erőtér 103
mágneses fluxus 107
mágneses indukció 106
mágneses indukcióvektor 107
mágneses indukcióvonalak 107
mágneses megosztás 102
magnetométer 106
méréshatár kiterjesztése 79
moláris térfogat 155
moláris tömeg 155
normál állapot 141
nullázás 98
nullvezető 96
oszcilloszkóp 95
párolgáshő 202
pontszerű töltés 14
potenciométer (feszültségosztó) 80
próbatöltés 18
p–V diagram 142
rácsion 55
reverzibilis folyamatok 190
szikrainduktor 93
szikrakisülés 93
sztatikus elektromos állapot 34
térfogati munka 182
tesla 106
töltésmegmaradás törvénye 14
töltéssűrűség 34
univerzális motor 116
üresjárási feszültség 83
ütközési ionizáció 93
valódi gáz 140
weber 107

Emelt szint

átlagos mozgási energia 164
Boltzmann-állandó 164
dielektromos állandó 15
EEG-készülék 95
egyenes vezető mágneses mezője 110
EKG-készülék 95
ekvipotenciális 29
elektromos energiasűrűség 45
elektromos fluxus 23
elektromotoros erő 84
ferromágneses anyagok 114
gázok cseppfolyósítása 214
kapocsfeszültség 83
Kirchhoff I.törvénye (csomóponti törvény) 85
Kirchhoff II. törvénye (huroktörvény) 85
külső ellenállás 83
légüres tér permeabilitása 110
Ohm törvénye teljes áramkörre 83
párhuzamos áramvezető 121
permittivitás 15
plazma 93
potenciál 28
potenciálkülönbség 29
relatív permeabilitás 114
részecskefizikai kutatások 119
Segner-kerék 35
siemens 59
szabadsági fok 168
szalaggenerátor 23
szolenoid 111
szuperpozíció elve 19
szupravezetés 63
telítetlen gőz 209
telített gőz 209
terheletlen áramforrás 83
torziós fémszál 14
tömegspektroszkópia 119
vezetőképesség 59
Wheatstone-féle mérőhíd 80

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: Kovács János
Terjedelem: 21,45 (A/5) ív • Tömeg: 375 g • 2013. december • Raktári szám: MS-2619U