Fizika-biofizika laboratóriumi gyakorlatok

Laczkó Gábor, Szabó M. Gyula (szerk.), Bohus János, Makra Péter, Szakáts Róbert, Szalai Tamás, Székely Péter

SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék

2008

A hallgatói laboratórium

A gyakorlatok célja

A laboratóriumi gyakorlatok célja az, hogy bevezetést nyújtson a fizikai mérések világába, a hallgatóknak kifejlődjön a kísérletezéshez és a méréshez szükséges manuális készségük. A laboratóriumi mérések során megismerkednek az alapvető laboratóriumi eszközökkel, berendezésekkel és ezek rendeltetésszerű használatával. Meg kell tanulniuk a méréseket és az eredmények kiértékelését önállóan elvégezni.

A laboratóriumi gyakorlatokon való részvétel:

A gyakorlati órákon a részvétel kötelező. Bármiféle indokkal való távolmaradást igazolni kell, és a gyakorlatot be kell pótolni. A félév során maximum 3 gyakorlat pótolható.

Felkészülés, laboratóriumi munkarend

A laboratóriumi gyakorlatokra való felkészülés a kiadott jegyzetanyag alapján előzetes otthoni munkával történik. A hallgatók az elméleti felkészültségükről – eseti jelleggel – néhány laboratóriumi gyakorlat elején egy 10 perces írásbeli dolgozatban adnak számot.

A hallgatónak a gyakorlatok megkezdésekor a munkahelyén észlelt esetleges hiányosságokról, hibás, hiányzó eszközökről a gyakorlatvezetőt tájékoztatnia kell. A gyakorlatok alatt a hallgató anyagi felelősséggel tartozik a használt eszközök, műszerek épségéért. A műszerek fokozottabb védelme érdekében a méréshez szükséges kapcsolást először az áramforrás nélkül kell összeállítani. Az összeállított elektromos kapcsolásokat feszültség alá helyezni csak a gyakorlatvezető engedélyével lehet. Működő, mérőállapotban levő készüléket felügyelet nélkül hagyni nem szabad.

A hallgatók a laboratóriumi gyakorlaton a méréseket párban végzik, de munkájukról külön jegyzőkönyvet kell készíteniük. A mérési jegyzőkönyv elméleti összefoglaló részét az otthoni felkészülés során kell elkészíteni. A gyakorlatvezető által meghatározott formátumú mérési jegyzőkönyvet a laboratóriumi gyakorlatok végén le kell adni.

A jegyzőkönyv gyakorlaton elkészülő része tartalmazza a gyakorlatok során mért és az ezekből számított mennyiségeket (táblázatos formában), a szükséges ábrákat (milliméter-papíron, kézzel kidolgozva), illetve ezek alapján a kérdésekre adott szóbeli válaszokat. Fontos, hogy a jegyzőkönyv alapján a hallgató gondolatmenetét pontosan reprodukálni, követni lehessen (minden cselekedetét, következtetését indokolja)!

Amennyiben a hallgató a kitűzött feladatokat a gyakorlat vége előtt befejezi, a jegyzőkönyvének beadása után a gyakorlatvezető engedélyével távozhat a laboratóriumból. A távozás előtt a hallgatónak mérőhelyét az eredeti állapotban, rendben (elektronikus eszközök kikapcsolása, elektromos kapcsolások megszüntetése), tisztán kell átadnia.

A laboratóriumi helyiségben csak az a hallgató dolgozhat, aki a tűzrendészeti és munkavédelmi előírásokat ismeri, és azt a félév elején aláírásával elismeri.

Értékelés

A hallgató az esetlegesen óra elején írt dolgozatára és a gyakorlat elvégzésére érdemjegyet kap. Utóbbi a mérési jegyzőkönyv értékelése mellett laboratóriumi munkáját is tükrözi.

1. fejezet

Hosszúság mérése. A statisztika alapfogalmai

Talán a legegyszerűbb mérési feladat a hosszúságok mérése; ezért ez a gyakorlat különösen alkalmas arra, hogy az adatok kiértékelésének folyamatával is mélyebben megismerkedjünk.

A hosszúság mértékegysége a méter: 1 méter – 1986-ban megadott új definíciója szerint – annak az útnak a hosszúsága, amelyet a fény vákuumban a másodperc 299 792 458-ad része alatt megtesz.[1]

Az egyetlen, méternél nagyobb, használatos SI mértékegység a kilométer. A csillagászat nagy távolságaihoz további egységeket használnak, pl. a fényévet ($9,45 \cdot 10^{15}$ méter). A Galaxisunk mérete kb. 150 ezer fényév; a hozzánk legközelebbi nagy galaxis távolsága 2 millió fényév, a Világegyetem legtávolabbi látható égitestjei mintegy 13 milliárd fényév távolságban vannak.

Méternél kisebb egységek: a milliméter, ill. ennek ezredrésze, a mikrométer (µm). Egy mikrométer körüli a baktériumok mérete, a látható fény hullámhossza kb. 0,4–0,7 µm közötti. A mikrométer ezredrésze a nanométer (nm); az atomi méretek a 0,1 nm mérettartományba esnek.

A gyakorlat eszközei

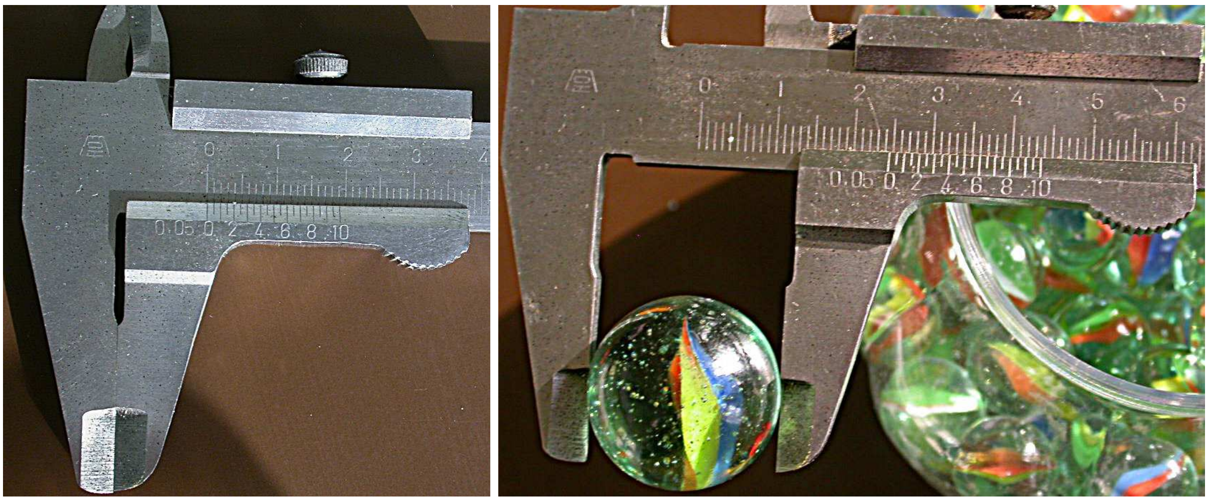
[1]A definíció érdekessége, hogy a fénysebességet adja meg számszerűen, és ehhez rögzíti a métert. Vagyis a fénysebesség többé nem mérés eredménye, hanem definíció! E definíciót 1965-ben Bay Zoltán (1900–1992) javasolta, aki korábban, 1930–1936 között Szegeden, az Elméleti Fizikai Tanszéken dolgozott.

1.1. Tolómérő, mikrométercsavar

A fentebb bemutatott mérettartományból legkönnyebben az emberi test hozzávetőleges nagyságrendjébe eső, kb. a milliméter–kilométer tartományban tudunk egészen egyszerű módszerekkel is elfogadható pontossággal távolságot mérni. A mérés legegyszerűbb eszközei a mérőszalag, méterrúd, vonalzó, melyek használata magától értetődő: leolvassuk, hogy a mérendő hosszúság két végpontja közé hány távolságegység esik a mérőműszeren. A pontosabb mérésekhez precízebb eszközökre van szükség. A gyakorlat keretein belül ezek közül kettővel, a tolómérővel és a mikrométercsavarral ismerkedünk meg.

1.1.1. Tolómérő

A tolómérő két részből áll: egy „fejesvonalzóhoz” hasonlítható álló részből, és egy ezen hosszirányban elcsúsztatható mozgó részből. Ha egy tárgy méretét meg kívánjuk mérni, a tárgyat az álló és mozgó rész érintkező pofái közé kell fogni. A tolómérő álló részén egy mm beosztású skála található, a mozgó részen szintén van skála – ezt nevezzük mellékbeosztásnak (nóniusznak). A képen bemutatott nóniuszskála teljes hossza 39 mm, amely 10×2 egyenlő részre van beosztva. Ha a tolómérő mozgó részének érintkezőpofáját nekitoljuk az állórész érintkezőjének, akkor a két skála 0 pontja egybeesik, az összes többi osztásvonal azonban eltér. Az eltérés az első vonal esetén a legkisebb, majd egyre nagyobb. A nónius



Balra: a tolómérő 0 állásban. Jobbra: a gömb átmérője 24,55 mm

utolsó osztásvonala az álló skála 39 mm-es vonalával esik egybe, azaz a két skála eltérése 1 mm. A nónius minden osztásvonala $1/20 = 0{,}05$ mm-rel kisebb az 1 mm-nél. Ha a két pofa közé egy 0,05 mm vastag lapot csúsztatunk, akkor a nóniuszskála éppen 0,05 mm-rel eltolódik el a kiinduló helyzethez képest. Ekkor a nóniuszskála első vonala éppen a főskála egy osztásvonalával kerül szembe. Ha 2×0,05 mm-es lapot fogunk a tolómérő pofái közé, akkor a nóniuszskála eltolódása pont akkora, hogy a második vonala (1-es jelzés) esik egy vonalba a főskála egyik osztásvonalával. Általában, ahányszor 0,05 mm a lap vastagsága, a nóniusznak is ugyanannyiadik osztásvonala esik egybe a főbeosztás valamelyik osztásvonalával.

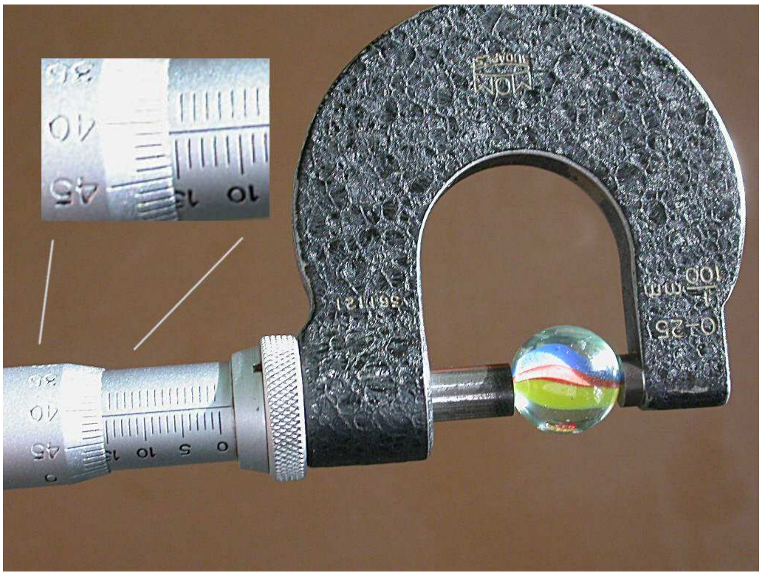
A bal oldali ábra a mérésre kész tolómérő mérőpofáit és skáláját mutatja. A mérőpofák érintkeznek egymással, a tolómérő álló részén látható milliméterskála 0 pontja és a csúszó pofán lévő „nónius” 0 osztásvonala egybeesik. A nóniuszskála 10 nagyobb és 10 rövidebb osztásvonallal 20 egyenlő részre van felosztva. A nónius utolsó osztásvonala az álló skála 39 mm-t jelző vonalával esik egybe. A jobb oldali ábrán látható, hogyan mérhető meg tolómérővel egy golyó átmérője. A golyót a mérőpofák közé fogjuk. A pofák enyhén szorítják a golyót. A tolómérő két skálája, amelynek kezdőpontja a műszer alapállásánál egybeesett, most annyival csúszott el egymáshoz képest, mint a golyó átmérője. Ennek értéke milliméteres pontossággal az álló skálán olvasható le. Az ábrán ez majdnem 25 mm, azaz 24 mm + 1 mm-nél kevesebb. A nónius segítségével ezt a távolságot 0,05 mm-es pontossággal határozhatjuk meg.

Ehhez le kell olvasnunk, hogy a nóniusz osztásvonalai közül melyik esik egybe a tolómérő szárán látható álló mm-skála valamelyik osztásával. Esetünkben ez a nóniusz 4. számú és 6. számú közötti, azaz a nullától számított 11. osztásvonala. Az a távolság tehát, amellyel a golyó mérete nagyobb, mint 24 mm, éppen $11 \times 0{,}05 = 0{,}55$ mm. A golyó átmérője tehát 24,55 mm.

Megjegyzés:

Tolómérőt gyakran készítenek úgy is, hogy a nóniuszskála teljes hossza 9 mm, ami 10 egyenlő részre van felosztva. Az ilyen tolómérővel nem lehet 0,05 mm pontossággal mérni, mint a fent bemutatott esetben. A tolómérő leolvasási pontossága ilyenkor 0,1 mm.

1.1.2. Mikrométercsavar



A mikrométercsavar – a gömb átmérője 15,41 mm

Kis hosszúságok, távolságok pontos mérésére igen alkalmas a mikrométercsavar vagy csavarmikrométer. Ha a csavar vége egy teljes fordulatnál 1 mm-rel tolódik el, és a dob pereme 100 egyenlő részre van osztva, akkor egy ilyen dobosztással való elforgatásnak 0,01 mm eltolódás felel meg. Mivel egy dobosztás tizedrésze még becsülhető, vagy nóniusz alkalmazásával leolvasható, a fenti csavarral kb. 0,001 mm pontossággal mérhetünk. A mérésnél a tárgyat a mérőfelületek közé tesszük, és a csavart **a racsnis** állítóval addig forgatjuk, amíg a tárgyat a mérőpofák enyhén megfogják, és a racsni megcsúszik. Ekkor az egész milliméterek számát a tok meghosszabbítására vésett skálán, a milliméter törtrészeit pedig a dobosztáson olvassuk le. Ha a tárgy kivétele és a mérőcsavar teljes becsavarása után, vagyis a mérőpofák közvetlen érintkezésekor az osztás nem pontosan 0-n áll, az eltérést (az ún. nullhibát) figyelembe kell venni. Ha a csavart nem a racsnis áttéten keresztül, hanem közvetlenül kézzel forgatjuk, a megcsavarás különböző erősségéből adódó különböző mértékű megszorítások 0,01–0,05 mm mértékben deformálják a tárgyat, és a mérésünk nem fog pontos eredményhez vezetni!

A mikrométercsavarnál és általában a mérési célokra használt mérőcsavaroknál, a csavar és a csavaranya laza érintkezéséből származó holtmenet hibákat okozhat. Ezeket úgy kerülhetjük el, hogy a végleges beállításokat a csavarnak mindig ugyanolyan irányú forgatásával közelítjük meg.

1.2. Szisztematikus és véletlen hiba

A mérés a valós világ tárgyainak és eseményeinek fizikai összehasonlításából áll. A mértékegységek olyan tárgyak vagy események, amelyek segítségével a megfigyelt folyamat számszerűleg jellemezhető.

A mérés eredménye legalább **két** szám és egy mértékegység. Az első, a mérőszám megadja, hogy a mért dolog mekkora a megadott mértékegységhez viszonyítva, míg a második megmutatja, hogy milyen pontossággal sikerült a nagyságot megmérni. Ez az utóbbi szám a **mérés hibája.** A mérőszám és a hiba közé általában $\pm$ jelet szoktak írni.

A hiba a mérésben ugyanolyan fontos adat, mint maga a mérőszám. Ebből tudjuk meg, hogy mennyire megbízható adatot kaptunk; ennek függvényében beszélünk pontos, tájékoztató jellegű, vagy „csak nagyságrendi pontosságú” mérésről.

Ha hibával terhelt mennyiséggel számolunk, az eredménybe is átterjed a hiba. Ezért fontos, hogy a számítások alkalmával kiszámítsuk az eredményben jelentkező hibát is.

A hibákat természetük szerint két csoportra oszthatjuk: szisztematikus és véletlen hibákra. A szisztematikus hiba oka az, hogy nincs tökéletes műszer, a valódi fizikai értékek a mutatottnál általában kicsit nagyobbak vagy kisebbek. A műszerek kalibrációja („beállítása”) arra irányul, hogy a mutatott érték nagyon közel essen a valóságoshoz. A szisztematikus hibák azonban optimálisan beállított műszer esetén is jelentkeznek, mert számos egyéb körülmény (pl. hőmérséklet, légnyomás, páratartalom, a műszer pozíciója a mérés alatt, a levegő összetétele a mérés alatt, a nehézségi gyorsulás értéke stb.) befolyásolhatja a műszer beállítását. Mivel a mérés körülményei nem azonosak a kalibráció körülményeivel, valamekkora szisztematikus hibával mindig számolnunk kell.

A **szisztematikus hibákat** kiszámíthatjuk pl. egy nagyon pontosan ismert tárgy méretének és mérésünk eredményének összehasonlításával. Ha a műszerünk szisztematikus hibáit megismertük, a mért eredményeket a pontos értékre korrigálhatjuk.

A **véletlen hibák** egyik oka a műszer vagy a leolvasás korlátozott pontossága. A másik oka az, hogy a mért tárgy csak jó közelítéssel illeszkedik a mérés módszeréhez. Például nincs tökéletes gömb: ezért ha egy golyó átmérőjét nagy pontossággal többször megmérjük, az értékek különbözni fognak, annak megfelelően, amennyire a golyó átmérője helyről-helyre kicsit változik.

A véletlen hibákat nem lehet korrigálni, de kellően sok méréssel „ki lehet átlagolni” őket.

1.3. Eloszlás, kumulatív eloszlás

A mérési folyamat során ezért általában sok mérést végzünk. Ezek együttes jellemzésére grafikusan az oszlopdiagramot és a kumulatív eloszlást használjuk - mindkettő arra utal, hogy adott mérőszámhoz tartozó mérésből hány darabot készítettünk.

Ha oszlopdiagramot készítünk, a vízszintes tengelyt szakaszokra osztjuk, és ezek fölé olyan magas oszlopokat rajzolunk, ahány darab mérés esett az oszlop alapja által jelzett intervallumba. (Szokás az egyedi darabszámokat leosztani az összes mérés darabszámával – normálás –, így az oszlopdiagram összes oszlopának összege pontosan egy lesz. Ez utóbbi módszer előnye, hogy ha több mérést végzünk, az oszlopok kb. ugyanakkorák maradnak.)

Az oszlopdiagram általában harang alakú, egy néhány oszlop által kirajzolt magas csúcs és ennek „szárnyai” jellemzik az alakot.

Az oszlopdiagram alakja függ az oszlopok alapjának beosztásától: ezt sem túl durvára, sem túl finomra nem szabad választani. A jó kompromisszum kb. az, ha a mérések 90%-a annyi darab oszlopba esik, mint az összes mérés darabszámának a köbgyöke. Vagyis, pl. 80 mérés esetén 4 oszlopban, 1000 mérés esetén 10 oszlopban kell ábrázolni a mérések zömét.

A kumulatív eloszlás azt mutatja meg, hogy hány mérési eredményt kaptunk, amely **kisebb** volt, mint a vízszintes tengelyen ábrázolt érték. A kumulatív eloszlás tehát monoton növekvő görbe (alakja nagyjából az oszlopdiagram integrálgörbéje). A kumulatív eloszlást is normálni szokták. Az oszlopdiagram inkább illusztratív szerepű, a kumulatív eloszlás viszont alapvető fontosságú bizonyos statisztikai mérőszámok (pl. medián) meghatározásánál.

Ha ezeken a diagramokon a mérési sorozat egyedi eredményeit ábrázoljuk, a mérések hibáját meg tudjuk határozni. Minél pontosabb a mérés, az oszlopdiagram annál keskenyebb, a kumulatív eloszlás annál meredekebb lesz. A pontos definíciókat az alábbiak adják meg.

1.4. Átlag, szórás, medián, kvantilisek; az átlag hibája

A mérések hibáját általában a szórással jellemzik: n mérés esetén a szórás az x_i egyedi mérések és az X pontos érték eltérésének négyzetes közepe. Definíciója:

$$\sigma = \sqrt{\sum \frac{(x_i - X)^2}{\mathrm{dof}}},$$

ahol dof a szórás szabadsági fokát jelenti. Ha a pontos értéket előre ismerjük, és a méréssel csak a mérési módszer pontosságát teszteljük,

$$\mathrm{dof} = n.$$

Abban a gyakoribb esetben, amikor a pontos értéket az $X \approx \sum x_i/n$ mintaátlaggal helyettesítjük, a szabadsági fok eggyel csökken,

$$\mathrm{dof} = n - 1.$$

Ha tehát a „pontos érték" is a mi mérésünkből származik:

$$\sigma = \sqrt{\sum \frac{(x_i - X)^2}{n-1}}.$$

A szórást felhasználva a mérési sorozatot jellemezhetjük az $X \pm \sigma$ számpárral; ennek szemléletes jelentése nagyjából az, hogy a mérési adatok legalább 2/3-ad része a $X \pm \sigma$ intervallumba esik.

Ettől a mennyiségtől eltérő jellegű az átlag hibája: adott szórás esetén is, minél többet mérünk, annál pontosabban megismerjük a mintaátlagot. Ha a hiba csak véletlen jellegű, az átlag pontossága a mérések számának növelésével annak **négyzetgyökével** nő, bár σ értéke változatlan marad, hiszen a mérési eljárás nem lett jobb. Ezt úgy fejezzük ki, hogy az átlag Err konfidencia-intervalluma,

$$Err \approx \frac{\sigma}{\sqrt{n/10}}.$$

Itt a nevezőben lévő szám értéke függ a mérési adatok eloszlásának jellegétől is, a 10-es érték gyakorlati célokra általában megfelelő kompromisszum. (Tehát kb. tíz mérés esetén az adatok szórása és a mintaátlag hibája nagyjából megegyezik.) Az Err jelentése az, hogy ha még nagyon sokszor megismételnénk a mérési sorozatot, az egyedi X átlagok az esetek legalább 95%-ában az általunk megadott $X \pm Err$ érték közé esnének.[2] Ha a mérési sorozat végén $X \pm \mathrm{valami}$ érték áll, meg kell mondani, hogy a $\pm$ után a mérési sorozat szórását (σ) vagy az átlag konfidencia-intervallumát (Err) tüntettük fel; az utóbbi esetben a konfidencia szintjét is meg kell jelölni.

A medián az az érték, amelynél a mérések legföljebb a fele kisebb, és legföljebb a fele nagyobb értékű. Ha nagyság szerint rendezzük a méréseket, a medián (páratlan számú mérés esetén) a középre eső érték, vagy (páros számú mérés esetén) a középen szimmetrikusan elhelyezkedő két érték átlaga.

A mediánt egyszerűen leolvashatjuk a kumulatív eloszlásról: a medián a kumulatív eloszlás 50%-os értékének megfelelő hely.

Ugyanilyen értelemben definiáljuk a kvantiliseket. Az 5, 10, 25, 75, 90, 95%-os kvantilis a kumulatív eloszlás 5, 10, 25, 75, 90, 95%-os értékének megfelelő hely. Természetesen tetszőleges (pl. 99,5%-os) kvantiliseket is definiálhatunk ennek analógiájára.

Ha a középértéket az M mediánban adjuk meg, az ehhez tartozó hibát a Q interkvartilissel, vagyis a 25%-os és a 75%-os kvantilis különbségének felével jellemezzük ($M \pm Q$).

1.5. Hibaterjedés

Ha a számított f érték a mért p_i paraméterek függvénye, és a paramétereket csak adott mérési hiba erejéig ismerjük meg, az f értékére is csak adott hibával következtethetünk. Ekkor $f = f(p_1, p_2, ...p_n)$, f hibája a

[2] Ha ezt a konfidencia-szintet más, pl. 99% értéknek állítjuk be, a mérések darabszámát 10 helyett más számmal, az adott esetben kb. 4-gyel kell osztani, annak megfelelően, hogy szélesebb „hibatartományt" kell kijelölnünk. A különböző típusú eloszlások különböző konfidencia-szintjeihez tartozó faktorokat statisztikai könyvek táblázatai (ún. t-táblázatok) tartalmazzák.

következőképpen számolható:

$$\sigma_f = \frac{\partial f}{\partial p_1}\sigma_{p1} + ... + \frac{\partial f}{\partial p_n}\sigma_{pn}.$$

Ha a különböző paraméterek hibái egymást nem befolyásolják (függetlenek), az alábbi formulát is használhatjuk:

$$\sigma_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial p_1}\sigma_{p1}\right)^2 + ... + \left(\frac{\partial f}{\partial p_n}\sigma_{pn}\right)^2}.$$

Összeg esetén például, $f = a + b$, $\frac{\partial f}{\partial a} = \frac{\partial f}{\partial b} = 1$, vagyis

$$\sigma_f = \sigma_{a+b} = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2},$$

vagyis **összeg esetén a hibák négyzetei összegződnek.** Szorzat esetén, pl. $f = a \cdot b$, $\frac{\partial f}{\partial a} = b$, $\frac{\partial f}{\partial b} = a$, vagyis

$$\sigma_f = \sigma_{a \cdot b} = \sqrt{a^2\sigma_b^2 + b^2\sigma_a^2}.$$

Ezt az összefüggést $a \cdot b$-vel leosztva a jobb oldalon $a \cdot b$ relatív hibáját, $\frac{\sigma_{ab}}{ab}$ értékét alakítjuk ki:

$$\frac{\sigma_{ab}}{ab} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_b}{b}\right)^2}.$$

Ez utóbbi eredmény szerint **szorzat esetén a relatív hibák négyzete összegződik** (nem szorzódik!). Vagyis, ha pl. a értékét 6%, b értékét 8% hibával ismerjük, ab értékét $\sqrt{(6\%)^2 + (8\%)^2} = 10\%$ hibával fogjuk ismerni.

1.6. Feladatok

Eszközök: 1 db tolómérő, 1 db mikrométer, 1 db téglatest vasból, üveggolyók, mérőpohár, víz

1. A tolómérővel mérje meg a kiadott téglatest oldalait, mindegyiket három-három különböző helyen! Számítsa ki a szórást, az átlagot és az átlag hibáját! Számítsa ki a téglatest térfogatát és annak hibáját!

2. Mérje meg mikrométercsavarral a kiadott 25 üveggolyó átmérőjét! Számítsa ki a szórást, az átlagot és az átlag hibáját!

3. Rajzolja föl a mérések eloszlását és kumulatív eloszlását! Az eloszlásdiagramon jelölje az átlag helyét és a szórás tartományát! A kumulatív eloszlásdiagramon jelölje a mediánt és a 25, valamint 75%-os kvantiliseket!

4. Tételezze fel, hogy mindegyik golyó tökéletesen gömb alakú. Az átlagos átmérő alapján számítsa ki az összes üveggolyó együttes térfogatát! Mennyi ennek a hibája?

5. Mérje meg digitális mérleggel az imént mért üveggolyók össztömegét. Mennyi a golyók sűrűsége? Mennyi a sűrűség hibája?

6. Helyezze a golyókat a mérőpohárba, jegyezze meg a golyóhalom magasságát. Ürítse ki a mérőpoharat, öntsön bele kb ugyanannyi vizet, mint ameddig a golyók értek az előbb. Mennyi víz van a mérőpohárban most? Helyezze vissza a golyókat is; a vízszint emelkedésével mérje meg közvetlenül a golyók össztérfogatát. Hogyan viszonyul ez az imént számított értékhez, és annak hibájához? Milyen okok miatt tapasztalható eltérés a számított össztérfogattól?

2. fejezet

Sűrűség mérése Mohr–Westphal-féle mérleggel és piknométerrel

A sűrűség az egységnyi térfogatban lévő tömeg értékeként definiált fizikai mennyiség. Egy homogén test ρ abszolút sűrűségén tehát a

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{2.1}$$

hányadost értjük, ahol m a test tömege, V pedig a térfogata. A sűrűség SI-mértékegysége: $[\rho] = \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$. Inhomogén testek esetén az $\frac{m}{V}$ hányados a test átlagsűrűségének értékét adja meg.

A sűrűség az anyagok egyik legfontosabb jellemzője, mérése pedig a kémiai analízis egyik legegyszerűbb módszere. A gyakorlatban igen elterjedt bizonyos anyagok azonosítása ill. minőségének megítélése céljából; ezen kívül alkalmas lehet pl. oldatok koncentrációjának gyors meghatározására is.

A szilárd, folyékony és gáz halmazállapotú anyagok sűrűsége egyaránt függ a hőmérséklettől és a nyomástól. A sűrűség hőmérséklettől való függése általánosan a következő formulával adható meg:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta \cdot T}, \tag{2.2}$$

ahol ρ_0 a $273{,}16\,\mathrm{K}$-en mért, ρ pedig az adott T hőmérséklethez tartozó sűrűség; β az ún. *térfogati hőtágulási tényező.*

Fontos még megjegyezni az ún. *barometrikus magasságformula* fogalmát is. Eszerint állandó hőmérsékletű gázban a nyomás és a sűrűség a magassággal exponenciálisan csökken:

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{\rho_0 g}{p_0} h} \tag{2.3}$$

$$\rho = \rho_0 \cdot e^{-\frac{\rho_0 g}{p_0} h} \tag{2.4}$$

Bár a légkör nem állandó hőmérsékletű és nem ideális gáz, nem túl nagy magasságok esetén az előbbi formulák közelítőleg jól használhatóak.

A *relatív sűrűség* fogalmán két anyag (test) abszolút sűrűségének hányadosát értjük:

$$\rho_{\mathrm{rel}} = \frac{\rho_1}{\rho_2}. \tag{2.5}$$

2.1. Eszközök leírása, mérési eljárás

2.1.1. A Mohr–Westphal-mérleg

A Mohr–Westphal-mérleg működése Archimédesz elvén alapszik: a ρ ill. ρ_0 sűrűségű folyadékba merülő testre ható felhajtóerők viszonya egyenlő a sűrűségek viszonyával:

$$\frac{F}{F_0} = \frac{\rho}{\rho_0} \tag{2.6}$$

A Mohr–Westphal-mérleg. Egy-egy egységlovas (0,1 g/cm^3) van az 1 és 9 osztásokon, az összesen 10×0,1 = 1,0, a százados helyiértéket mérő lovas nincs fölrakva (a száron lóg a lovastartón) – eddig 1,00, az ezredes helyiérték pedig a 4-es osztáson van, vagyis a sűrűség 1,004 g/cm^3

A módszer a folyadékok – ill. közvetve akár szilárd testek – relatív sűrűségének meghatározására szolgál. A mérleg egyik karján – egymástól egyenlő távolságra – mélyedések helyezkednek el, míg a végére egy üvegtest akasztható. A test által kifejtett súlyerőt a mérleg másik karján lévő nehezék – megfelelő beállítás esetén – levegőn kiegyensúlyozza.

Az egyik mérlegkaron lévő mélyedésekbe a mérleghez tartozó, ún. *lovasok*ból álló súlysorozat tagjait helyezhetjük el. Az ezekkel történő mérés a forgatónyomaték elvén alapszik. A karra elhelyezett testek forgástengelyre kifejtett összes forgatónyomatéka az egyes testek súlyának és a tengelytől mért távolságuk szorzataként adódó értékek összege lesz. Egyensúly esetén a másik karon lévő nehezék forgástengelyre vett forgatónyomatéka a másik karéval azonos nagyságú, de ellentétes forgatási irányú lesz, így **az eredő forgatónyomaték értéke nulla**. Ha az üvegtestet folyadékba merítjük, akkor a testre felhajtóerő hat, melynek iránya ellentétes a test súlyerejének irányával – ezért a tengelyre vett forgatónyomaték értéke megváltozik. Az egyensúly visszaállításához van szükség a lovasokra.

A legnagyobb (vagy egység-) lovas tömege úgy van megválasztva, hogy a tengelytől tíz egységnyi távolságba helyezve éppen kiegyensúlyozza azt a felhajtóerőt, amely a 15 ^{o}C-os (azaz ρ = 0,999$\cdot 10^3$ $\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$ sűrűségű) vízbe merülő üvegtestre hat (a gyakorlaton használt mérleg megfelelő karján csak kilenc beosztás található, ezért két egységlovassal lehet megoldani a feladatot). A súlysorozat kisebb tagjai az egységlovas tömegének tized ill. század részei. A Mohr–Westphal-mérleg előnye, hogy a ráhelyezett lovasok pozíciója alapján egyből leolvasható a vizsgált folyadék sűrűsége. Ha pl. egy 1254 $\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$ sűrűségű oldatba merítjük az üvegtestet, akkor a két egységlovassal összesen 1200 $\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$ sűrűséget tudunk beállítani (pl. a kilences és a hármas beosztáshoz helyezve őket), míg a tized-lovast az ötös, a század-lovast pedig a négyes beosztáshoz helyezve kapjuk meg a kívánt egyensúlyi helyzetet.

Ha a 15 ^{o}C-ostól eltérő hőmérsékletű (pl. szobahőmérsékletű) víz ill. oldatok állnak rendelkezésünkre, akkor a mérleg egyensúlyi helyzete nem állítható be pontosan pusztán az egységlovas használatával. Ekkor egy korrekciót kell alkalmaznunk, és a meghatározott korrekciós faktorral **minden további mérést korrigálnunk kell!** A korrekciós faktort (K) a következőképpen határozzuk meg. Táblázatból kikeressük a víznek az adott hőmérséklethez tartozó ρ_{val} valódi sűrűségét, és ezt elosztjuk az egyensúly beállításához szükséges lovasok értékével, azaz az adott hőmérsékleten mért $\rho_{\mathrm{mért}}$ sűrűséggel:

$$K = \frac{\rho_{\mathrm{val}}}{\rho_{\mathrm{mért}}}. \tag{2.7}$$

Így – a korrekciós faktor felhasználásával – az anyagok abszolút sűrűsége adott hőmérsékleten:

$$\rho_{\mathrm{absz}} = K \cdot \rho_{\mathrm{mért}}. \tag{2.8}$$

2.1.2. Mérések piknométerrel

Piknométerrel többnyire folyadékok ill. kis méretű szilárd testek sűrűségét határozhatjuk meg. A piknométer rendszerint egy 10–100 cm^3-es üvegedény, melynek egyik szárába csiszolattal ellátott hőmérő, a másikba üvegdugó illeszkedik. A dugó furata szűk csőben folytatódik, így az ebbe karcolt jel a térfogatot igen pontosan definiálja (állandónak tekinthető hőmérsékleten). A piknométerrel való sűrűségmérés alapja az, hogy azonos térfogatú anyagok sűrűségeinek aránya egyenlő az azonos térfogatban foglalt tömegeik arányával:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \rho_{\mathrm{rel}} = \frac{\frac{m}{V}}{\frac{m_0}{V}} = \frac{m}{m_0}. \tag{2.9}$$

Folyadékok sűrűségének meghatározása

Az m_0, azaz a piknométer térfogatával azonos térfogatú víz tömegének meghatározásához meg kell mérni a piknométert üresen ($m_{\mathrm{ü}}$) és vízzel telve ($m_{\mathrm{ü+v}}$). A két mérési adatból:

$$m_0 = m_{\mathrm{ü+v}} - m_{\mathrm{ü}}. \tag{2.10}$$

Hasonló meggondolással, az ismeretlen sűrűségű folyadék (f) tömegére (m) felírhatjuk:

$$m = m_{\mathrm{ü+f}} - m_{\mathrm{ü}}. \tag{2.11}$$

Az ismeretlen folyadék vízre vonatkozó relatív sűrűsége:

$$\rho_{\mathrm{rel}} = \frac{m}{m_0} = \frac{m_{\mathrm{ü+f}} - m_{\mathrm{ü}}}{m_{\mathrm{ü+v}} - m_{\mathrm{ü}}}. \tag{2.12}$$

Ebből – a víz adott hőmérséklethez tartozó abszolút sűrűségének ismeretében – a folyadék abszolút sűrűsége meghatározható.

Szilárd testek sűrűségének meghatározása

Az előző pontban említettekhez hasonló módon eljárva kell megmérni a szilárd test és a vele azonos térfogatú desztillált víz tömegét. A mérést több lépésben kell elvégezni.

1. Meg kell mérni a szilárd test tömegét (m_{sz}).
2. Meg kell mérni a desztillált vízzel jelig töltött piknométer tömegét ($m_{\mathrm{ü+v}}$).

3. A szilárd testet a piknométerbe helyezve, majd jelig töltve az üvegedényt desztillált vízzel, mérjük meg az együttes tömeget ($m_{\text{ü+v+sz}}$).

Határozuk meg m_0 és ρ_{rel} értékét:

$$m_0 = (m_{\text{ü+v}} + m_{\text{sz}}) - m_{\text{ü+v+sz}}, \tag{2.13}$$

$$\rho_{\text{rel}} = \frac{m_{\text{sz}}}{m_0} = \frac{m_{\text{sz}}}{(m_{\text{ü+v}} + m_{\text{sz}}) - m_{\text{ü+v+sz}}}. \tag{2.14}$$

Ebből – az előző módon – meghatározható a szilárd test abszolút sűrűsége.

2.2. Feladatok

Eszközök: 1 db Mohr-Westphal mérleg (állvány, mérlegkar, súly, két egységlovas, egy-egy tizedegység- és századegység-lovas), mérőhenger, oldatsorozat, 1 db szilárd test (parafadugó rajzszögekkel), konyhasó.

1. Határozza meg a Mohr–Westphal-mérlegnél használt oldatokra vonatkozó korrekciós faktor értékét!
2. Határozza meg a kiadott oldatsorozat(ok) sűrűségét három méréssorozat alapján! Számolja ki az egyes oldatok sűrűségének átlagos értékét, valamint a szórást!
3. Ábrázolja a koncentráció függvényében a sűrűségek átlagos értékeit! Határozza meg az ismeretlen oldat koncentrációját!
4. Határozza meg a 2. feladatban szereplő oldatsorozat(ok) sűrűségét piknométer segítségével! Adja meg az egyes oldatokra vonatkozó relatív eltéréseket a 2. feladatban kapott átlagértékekhez képest!
5. Határozza meg a kiadott szilárd test sűrűségét víz, konyhasó és a Mohr–Westphal-mérleg segítségével!

3. fejezet

Viszkozitás mérése

A Höppler-féle viszkoziméter (jobbra) a gyakorlaton használt termosztáthoz csatlakoztatva (balra)

A folyadékok áramlását leírhatjuk úgy, hogy megadjuk az áramló folyadékrészecske helykoordinátáit az idő függvényében, azaz az ún. pályavonalat, vagy úgy, hogy a folyadékrészecskék sebességét adjuk meg a hely és az idő függvényében, azaz egy sebességteret definiálunk:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}(x, y, z, t).$$

Ezt a vektorteret az áramvonalakkal szemléltethetjük, azaz azokkal a görbékkel, melyek érintői az érintési pontban a sebesség irányát adják meg. Az áramlást stacionáriusnak nevezzük, ha az áramlási tér egy adott helyén a sebesség időben állandó. Az áramlás lamináris, ha az áramló folyadék egymással párhuzamos vékony rétegekre osztható, amelyek egymás mellett különböző sebességgel mozognak. Ha ezek a felületek síkok, és az áramlás stacionárius, a sebességtér csak az egyik térkoordináta függvénye:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}(z).$$

Ha az áramló folyadékokban belső sebességkülönbségek lépnek fel, a gyorsabb molekulákat a hozzájuk kötődő lassabb molekulák folyamatosan fékezik. Ez a fékezőerő a szilárd testek súrlódásához teljesen hasonlóan működik, és lassítani igyekszik a folyadék áramlását a szilárd felületek között. Ez a „belső súrlódás” a viszkozitás. Két, egymástól z távolságban lévő, párhuzamos, v relatív sebességgel elmozduló, q felületű folyadékréteg között ható belső súrlódási erő nagysága arányos q-val, és a $\mathrm{d}v/\mathrm{d}z$ sebességeséssel:

$$F = \eta q \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}z}.$$

A folyadék anyagi minőségétől és a T abszolút hőmérséklettől függő arányossági tényező, η a viszkozitási együttható, pontosabban a dinamikai viszkozitás. A dinamikai viszkozitás és a folyadék sűrűségének hányadosa,

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

a kinematikai viszkozitás.

A dinamikai viszkozitás SI egysége a pascalmásodperc, jele: Pa·s. A kinematikai viszkozitás SI egysége m^2/s. A dinamikai viszkozitás hőmérsékletfüggése az

$$\eta(T) = A \cdot \mathrm{e}^{E/RT}$$

összefüggéssel irható le, ahol A és E a folyadékra jellemző állandók, R az egyetemes gázállandó ($R = 8,314$ J/(mol K)), T pedig a folyadék abszolút hőmérséklete. A T az A együtthatóban is szerepel, de ez a függés 100 °C-ig gyakorlatilag elhanyagolható, tehát A állandónak tekinthető.

A belső súrlódási együttható függ a folyadék anyagi minőségétől. Pl. az éter viszkozitása a vízének kb. a negyede, a ricinusolajé a vízének kb. 10-szerese, az emberi véré 38°C-on ötszöröse a vízének. Sok szilárd testnek tekintett anyagnál is fellép a belső súrlódás. Pl. egy pecsétviaszrúd eltörésénél éles szélek keletkeznek. Ha viszont a rudat végeihez közel, vízszintes helyzetben két pontban alátámasztjuk, hónapok múltán a végek függőleges helyzetbe hajolnak le. A pecsétviasz belső súrlódási együtthatója kb. 1010 Pas. A gázok viszkozitása sokkal kisebb, pl. a hidrogéné a vízénél ezerszer kisebb.

A viszkozitás mérésére több módszert alkalmazhatunk, ezek közül az egyik legpontosabb a Höppler-féle viszkoziméter használata. Lamináris áramlás esetén a folyadékban kis sebességgel mozgó testre a viszkozitással arányos fékezőerő hat. A viszkoziméter ejtőcsövét a mérendő folyadékkal megtöltjük, és a cső átmérőjénél alig kisebb üveg- vagy vasgolyót helyezünk el benne. A golyó helyes megválasztásával az esés 20-30 mp-ig tart, vagyis létrehozhatóak azok a feltételek, amelyek mellett a közegellenállás fékezőereje nagy pontossággal arányosnak tekinthető a viszkozitással.

3.1. Viszkozitás mérése Höppler-féle viszkoziméterrel

A Höppler-féle viszkoziméterben egy folyadékkal feltöltött csőben esik egy golyó, a viszkozitásra az esés idejéből következtetünk. Az η viszkozitású, nagy kiterjedésű folyadékban állandó v sebességgel mozgó r sugarú golyóra a folyadék

$$F = 6\pi\eta \cdot r \cdot v$$

akadályozó erőt, ellenállást fejt ki. Ez az ún. Stokes-féle ellenállástörvény.

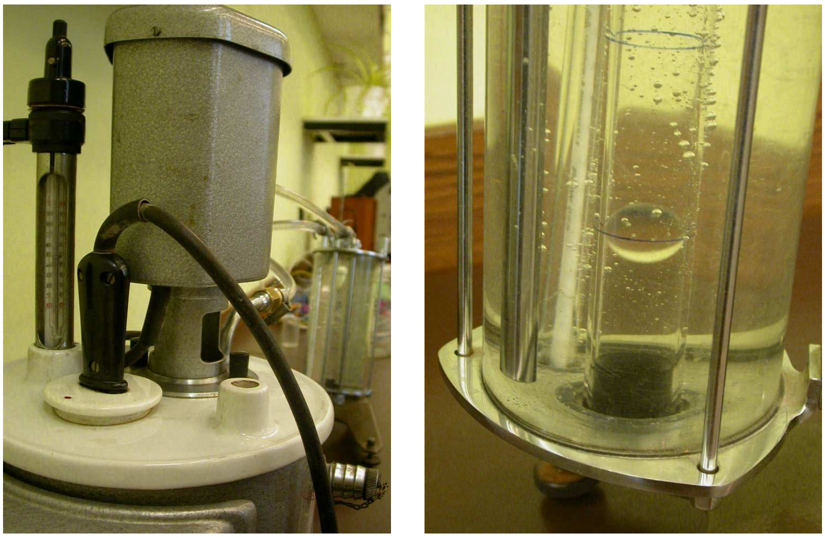
A ρ_G sűrűségű és r sugarú golyó ebben a folyadékban egy bizonyos ideig gyorsulva esik, majd eléri az állandó sebességét, amelyben az akadályozó erő és a gravitációs erő kioltja egymást, ezek után pedig állandó sebességgel mozog. Ennek értéke:

$$v = \frac{2g}{9\eta} \left(\rho_G - \rho\right) r^2.$$

Ez az egyenlet azon a feltevésen alapul, hogy a golyó végtelen kiterjedésű közegben mozog. Ha a golyó egy R sugarú henger belsejében mozog, különböző egyéb korrekciókat is figyelembe kell vennünk.

A Höppler-viszkoziméterben azt a t időt mérjük, amely alatt a golyó a vizsgálandó folyadékot tartalmazó, kissé ferdén álló csőben a két szélső jel közötti utat megteszi. Mivel a cső átmérője csak alig nagyobb a golyónál, a Stokes-törvény ebben az esetben nem alkalmazható, hanem ehelyett egy hasonló alakú összefüggésből számítható a viszkozitás:

$$\eta = K' \left(\rho_\mathrm{G} - \rho\right) t,$$



Balra: a hőmérséklet-szabályozó a termosztáton a motor mellett foglal helyet. Jobbra: a golyó mozgása az ejtőcsőben

ahol K' a készülékhez tartozó, mindegyik golyóra gyári hitelesítés alapján állandó golyókonstans; ρ_G a golyó, ρ pedig a folyadék sűrűsége. Az abszolút mérésekre alkalmas Höppler-féle viszkoziméter nagy előnye, hogy széles mérési intervallumon alkalmazható, a mérések jól reprodukálhatók, pontosságuk 0,1–0,5% között van. Ehhez természetesen a folyadék hőmérsékletét adott értéken kell tartani.

A méréshez a készüléket vízszintezzük, az ejtőcsövet megtöltjük a mérendő folyadékkal, és behelyezzük a megfelelő golyót, amit úgy kell megválasztani, hogy az esési idő jól mérhető legyen; majd lezárjuk a csövet. Ezen folyamat során buborék ne kerüljön a csőbe! Ezután a készülék átbillentésével többször mérjük az esési időt.

A hőmérséklet ismerete és adott értéken tartása a méréskor alapvető. Ezt a viszkoziméterhez csatlakoztatott termosztáttal lehet szabályozni. A termosztát lényeges alkotóeleme egy víztartály, amely kb. 2 liter vizet tárol és keringet. A belemerülő fűtőszál és a hőmérő együttesen gondoskodik arról, hogy ez a vízmennyiség a kívánt hőmérsékletű legyen. A termosztát hőmérőjén előre beállítható a kívánt hőmérséklet, amelyet pár perc fűtés alatt elér a folyadék. A folyadék a viszkoziméter köpenyében áramolva hamarosan a mérendő közeget is beállítja a kívánt hőmérsékletre. A közeg hőmérsékletét egyszerűbb termosztátoknál nem mérhetjük közvetlenül, de lehetőség van a köpenybe nyúló hőmérőn meggyőződni a keringő folyadék hőmérsékletéről.

3.2. Feladatok

Eszközök: 1 viszkoziméter, hozzá csatlakozó termosztáttal, 1 db stopperóra.

1. A viszkoziméterben glicerin található. Mérje meg a viszkozitását szobahőmérsékleten! Ötször mérjen mindkét irányba ejtve!

2. Átlagolja az azonos irányhoz tartozó esési időket! Különbözik-e ez a két különböző irányban?

3. A golyókonstans ismeretében számítsa ki a viszkozitást!

4. Kapcsolja be a termosztátot, és mérje meg a glicerinelegy viszkozitását 25, 30, 35, 40, 45, 50 °C hőmérsékleten!

5. Ábrázolja a mérés eredményét milliméterpapíron!

6. Számítsa ki és ábrázolja a viszkozitás logaritmusát a hőmérséklet függvényében (linearizált ábrázolás)! A meredekségből számítsa ki E értékét glicerin esetében!

4. fejezet

Egyenáramú alapmérések. Elektrolitok vezetőképességének mérése

Ha egy áramköri elemre (pl. fémes vezetőre vagy elektrolitbe merülő elektródák közé) eletromotoros erőt, azaz feszültséget kapcsolunk, az áramkörben elektromos áram indul meg. A tapasztalatok szerint ez az áram arányos a körre kapcsolt feszültséggel, A feszültség és a hatására létrejövő áram hányadosa állandó, vagyis Ohm törvénye szerint

$$U = R \cdot I.$$

Az R arányossági tényező az áramköri elem ellenállása. Az ellenállás SI egysége $1\,\Omega$ (ohm), az az ellenállás, amelyen 1 amper erősségű áram folyik át, ha a feszültség 1 volt. Az ellenállás reciprokát vezetőképességnek nevezzük, mértékegysége 1/Ω = 1 siemens.

Elektromos áramkörökben az egymás után – sorba – kapcsolt R_1, $R_2\ldots$ ellenállások eredője az egyes ellenállások algebrai összege, míg a párhuzamosan kapcsolt R_a és R_b ellenállások eredő ellenállásának reciproka az egyes ellenállások reciprok értékének összege lesz:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_\mathrm{a}} + \frac{1}{R_\mathrm{b}}.$$

Ez utóbbi eredményt úgy is interpretálhatjuk, hogy soros kapcsolásnál az ellenállások, párhuzamos kapcsolásnál a vezetőképességek adódnak össze.

Az előző eredmény alapján az is látszik, hogy valamely l hosszúságú és mindenütt egyenlő A keresztmetszetű fémhuzal ellenállása az l hosszúsággal egyenesen, A-val fordítottan arányos,

$$R = \rho \frac{l}{A},$$

hiszen a huzalt elemi (nagyon vékony és nagyon rövid) huzaldarabkák összességének képzelhetjük el, amelyek egymással l hosszúságon keresztül sorba, míg A keresztmetszeten keresztül egymással párhuzamosan vannak kötve. Itt ρ az anyagi minőségtől függő fajlagos ellenállás; egysége $\Omega\mathrm{m}$. Ennek reciproka a fajlagos elektromos vezetőképesség, $\kappa = 1/\rho$; egysége $\Omega^{-1}\mathrm{m}^{-1}$. A vezetők (pl. a legtöbb fém) fajlagos vezetőképessége nagy, ellenállása kicsi; míg a szigetelők esetében az ellenállás nagy, és a vezetőképesség kicsi.

Ha az elektromos hálózat elágazásokat, csomópontokat, vagy zárt áramköröket, hurkokat is tartalmaz, az Ohm-törvény mellett a hálózat leírására használhatjuk az (elektromos) Kirchoff-törvényeket. Kirchoff I. törvénye szerint a csomópontokba befutó és az onnan távozó áramok erősségének összege zérus,

$$\sum I = 0.$$

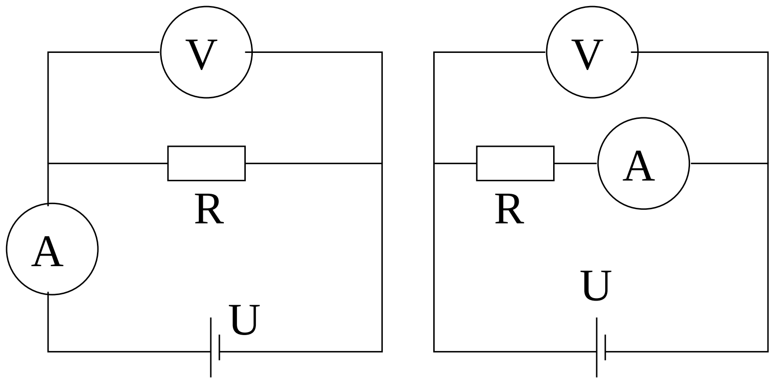
Kirchoff II. törvénye zárt áramkörben a részfeszültségek összege megegyezik az áramkörben lévő elektromotoros erők összegével,

$$\sum (R \cdot I) - \sum U = 0.$$

4.1. Árammérők használata

A vezetők ellenállásának abszolút mérése Ohm-törvénye alapján történhet, ha lemérjük a vezető két pontja között a potenciálkülönbséget és a rajta áthaladó áramot. Az ábra szerint U_0 feszültségű telepből, a kis R_A belső ellenállású A ampermérőből és a mérendő R_x ellenállásból áramkört alakítunk ki, a nagy R_V belső ellenállású V feszültségmérőt pedig az R_x ellenállás végpontjaira kötjük. A mért I és U segítségével az R_x ellenállást kiszámítjuk:

$$R_\mathrm{x} = \frac{U}{I}$$



Ellenállás mérése az árammérő kétféle elhelyezésével

Ez akkor érvényes, ha a voltmérő ellenállása végtelen. Műszereink azonban véges belső ellenállással rendelkeznek, a mérendő R_x ellenállás pontos meghatározásakor ezeket az ellenállásokat is figyelembe kell vennünk. Az ábra bal oldalán vázolt kapcsolással ugyanis az ampermérővel a voltmérőn átfolyó áramot, a voltmérő „fogyasztását” is mérjük:

$$I = I_\mathrm{R} + I_\mathrm{V}$$

Mivel:

$$I_\mathrm{R} = \frac{U}{R_\mathrm{x}}$$

és

$$I_\mathrm{V} = \frac{U}{R_\mathrm{V}},$$

$$I = U\left(\frac{1}{R_\mathrm{x}} + \frac{1}{R_\mathrm{V}}\right)$$

és ebből:

$$R_\mathrm{x} = \frac{U}{I - \frac{U}{R_\mathrm{V}}}, \tag{4.1}$$

ahol U a feszültségmérő által mutatott feszültségérték. Az előző hibát elkerülhetjük másik kapcsolással. A jobb oldai ábra szerint itt a voltmérő fogyasztását nem mérjük, ellenben az ellenálláson eső feszültséghez hozzámérjük az ampermérőn létrejött feszültséget.

Most

$$U = I \cdot R_\mathrm{x} + I \cdot R_\mathrm{A},$$

amelyből a mérendő ellenállás helyes értéke:

$$R_\mathrm{x} = \frac{U}{I} - R_\mathrm{A}. \tag{4.2}$$

Azt, hogy mikor melyik kapcsolást használjuk, a használt műszerek döntik el. Ha a voltmérő ellenállása nem sokkal nagyobb, mint a mérendő ellenállás, az első módszer, míg ha elegendően nagy ellenállású a voltmérő, a második módszer alkalmazása célszerűbb.

Ha kis R_0 belső ellenállású áramforrás áll rendelkezésünkre (pl. akkumulátor), egyetlen ampermérővel is mérhetünk ellenállást. Lényegében ezt a módszert alkalmazzák a kombinált analóg mérőműszerekbe beépített áramkörök. A feszültséget ilyenkor egyenlőnek vesszük az áramforrás feszültségével, és az ellenállást az

$$R = \frac{U_0 - I \cdot (R_\mathrm{b} + R_0)}{I}$$

összefüggéssel számoljuk, ahol R_b a műszer belső ellenállása.

E műszer skáláját ellenállásértékre is hitelesíthetjük. Ha $R_\mathrm{x} = 0$, akkor a műszer az előzőleg beállított végkitérésig tér ki, Ha $R_\mathrm{x} = \infty$, akkor a műszer mutatója a skála 0-pontján áll. A közben lévő skálarészekhez:

$$I = \frac{U_0}{R_0 + R_\mathrm{b} + R_\mathrm{x}}.$$

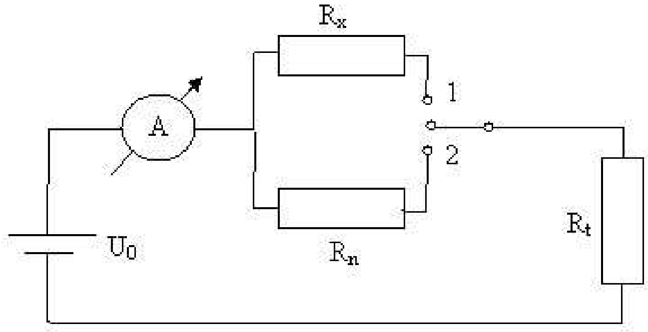
Az U_0, R_0 és R_b ismeretében az egyes skálarészekhez tartozó R_x értékek kiszámíthatóak, vagyis a műszer skálája kísérletileg ellenállásra is skálázható, ha ismert R_x értékekkel ezt valóban meg is tudjuk tenni. Ezeket vehetjük pl. egy ellenállásszekrényből.

Mint látható, a mérési pontok egy hiperbolán fekszenek, a műszeren az Ohm-skála nem lesz lineáris.

Az előbbiekben R_x kiszámításához feltételeztük R_V, R_A és R_b ismeretét. Az alapműszerek belső ellenállását a műszerre ráírják, vagy mellékelik, az alapérzékenységekkel (pl. 1 mA, 100 mV; vagy 5 mA, 60 mV, stb.) együtt.

4.2. Ellenállásmérés helyettesítéssel

Az előbbinél valamivel egyszerűbb eljárás az ellenállásnak helyettesítő módszerrel történő meghatározása.



Ellenállásmérés helyettesítéssel – kapcsolási rajz

E célból készítsünk el egy kapcsolást, amelyben egy kétállású kapcsoló 1. állásában a mérendő R_x ellenállást, a 2. állásban egy ismert R_n ellenállást kapcsol az áramkörbe. Az áramkör zárása után az R_t ellenállással az A ampermérőn (melyet természetesen megfelelő méréshatárra kapcsoltunk, vagy megfelelő sönttel láttunk el) a skála kb. 2/3–3/4 részének megfelelő kitérést állítunk be.

Ezután a kapcsolót átkapcsolva a 2. helyzetbe, ismert ellenállásokkal (amelyeket általában egy dekádellenállásszekrényből veszünk) az előbbi műszer-kitérést állítjuk be. Mivel mindkét esetben ugyanaz az I erősségű áram folyik az áramkörben (U_0 állandó), nyilvánvaló, hogy

$$R_\mathrm{x} = R_\mathrm{n}.$$

(Megjegyzés: A K-nak 2. állásba váltása előtt az ampermérő kímélése érdekében R_n-en kb. akkora ellenállásértéket állítunk be, amekkora a mérendő ellenállás várható értéke.)

4.3. Elektrolitok vezetőképességének mérése

Az analitikai kémiában konduktometriás módszerrel elektrolitoldatok elektromos vezetőképességét mérjük, és ebből illetve ennek kémiai reakció hatására bekövetkező változásaiból származtatunk analitikai információkat. Az elektromos vezetéshez olyan töltéshordozók (pl. elektronok, ill. anionok és kationok) jelenléte szükséges, amelyek képesek arra, hogy az elektromos tér hatására elmozduljanak. Ennek alapján különböztetünk meg elektromos vezetőket és szigetelőket.

A tiszta víz, mivel benne a hidroxónium- és hidroxilion töltéshordozók csak igen kis, az autoprotolízisnek megfelelő 10^{-7} mol/l koncentrációban vannak jelen, csak nagyon kis mértékben vezeti az elektromos áramot, szigetelőnek tekinthető. Elektrolitok vizes oldataiban azonban a kationok és anionok koncentrációja jelentős lehet, emiatt azok az elektrolitikus disszociáció mértékétől függően többnyire vezetők.

A fajlagos vezetőképességet az oldatoknál a huzalokhoz hasonlóan definiáljuk. Így az elektrolitoknál mért R ellenállás felfogható az elektrolit anyagi minőségétől függő ρ fajlagos ellenállás és a mérőedény geometriai méreteitől függő $C = \frac{l}{A}$ ellenálláskapacitás, vagy más néven cellaállandó szorzataként,

$$R = \rho \cdot C.$$

Az oldatok vezetőképességét a fajlagos vezetőképességgel (κ) szokás definiálni. Ez jelenti az egymástól egységnyi távolságra levő egységnyi felületű elektródok között levő oldat vezetőképességét, azaz:

$$\kappa = \frac{1}{R} \cdot \frac{l}{A},$$

ahol $1/R$ a vezetőképesség, l az elektródák távolsága, A az elektródák felülete. A és l geometriai meghatározása nehézkes lenne, ezért relatív módszert használunk: első lépésként a mérőcellának ismert κ-jú oldattal meghatározzuk a cellaállandóját.

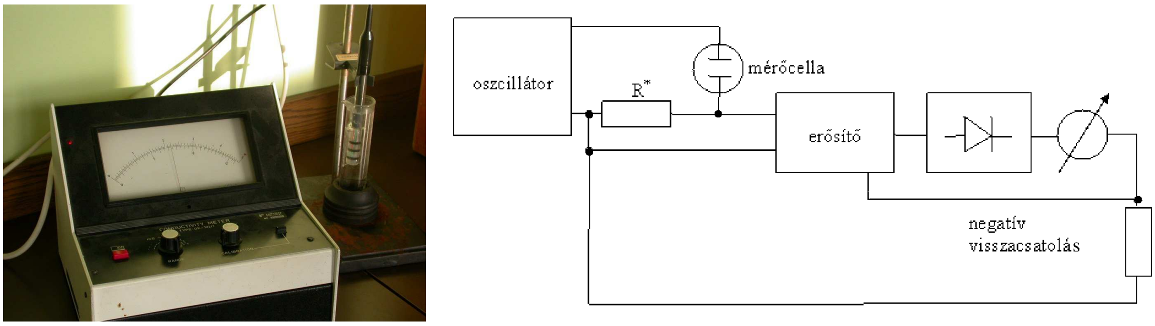
$$\frac{l}{A} = C.$$

Egy ismeretlen fajlagos vezetőképességű oldat fajlagos vezetőképességének meghatározása két lépésből, $1/R$ és C méréséből áll.

R ill. $1/R$ mérésére több lehetőség kínálkozik. A polarizációs jelenségek fellépte miatt nem alkalmazhatóak az egyenfeszültségű módszerek. E probléma kiküszöbölhető váltakozó feszültség alkalmazásával.

A gyakorlaton a vezetőképesség ($1/R$) mérésére egy gyári készüléket (típusa OK 102) alkalmazunk. Működési elve azon alapul, hogy az oldatba egy geometriailag jól definiált elektródapárt (mérőcella) merítünk és az ezen létrejövő feszültséget mérjük. A feszültség mérése az elvi kapcsolási rajz alapján történik. Az $R*$ ellenállás változtatása lehetővé teszi a méréshatár kiterjesztését is.

Az elektronikus rész speciális kialakítása a vezetőképesség siemensben (S) történő közvetlen kompenzálás nélküli leolvasását biztosítja. Minél nagyobb az oldat vezetőképessége, annál nagyobb frekvenciájú váltakozó feszültségre van szükség a mérésekhez. A készülékbe külön oszcillátort építettek be, amely



Vezetőképesség mérése. Balra: a műszer kijelzője, jobbra: az elvi kapcsolási rajz

Hőmérséklet (°C)	0,01 n	0,1 n	1 n
20	0,001276	0,01167	0,1020
21		0,01191	
22		0,01215	
23		0,01239	
24		0,01263	
25	0,001411	0,01288	0,1177
26		0,01311	
27		0,01335	
28		0,01359	
29		0,01384	
30		0,01407	

A különböző koncentrációjú KCl-oldatok fajlagos vezetőképessége különböző hőmérsékleten

80 Hz és 3 kHz közötti frekvenciaértékek előállítására alkalmas. A nagyobb frekvenciára történő átkapcsolás 500 µS fölött a méréshatár kiterjesztésével automatikusan történik meg.

A mérendő oldatot egy edénybe helyezzük, és a szabályszerűen csatlakoztatott mérőcellát vagy más néven harangelektródát az oldatba merítjük. Ügyeljünk arra, hogy az oldat a harangelektród mindhárom platinagyűrűjét tökéletesen ellepje. A méréshatár-kapcsolót a legnagyobb állásba állítjuk (500 mS) és fokozatosan kisebb méréshatárra kapcsolunk mindaddig, míg a műszer skáláján jól leolvasható értéket nem kapunk. Ezután ellenőrizzük a készülék beállítását, nyomjuk be a zérusponthangoló (piros) gombot, és a potenciométerrel állítsuk a mutatót a piros jelre. A gomb elengedése után olvassuk le a mutatott értéket. Először a harangelektróda C cellaállandóját határozzuk meg. Ehhez ismert fajlagos vezetőképességű oldat mérése révén juthatunk el. Ez esetünkben KCl-oldat, amelynek fajlagos vezetőképességét 20-30 °C hőmérsékletek között a táblázat tartalmazza.

Megmérjük a kiadott koncentrációjú KCl oldat hőmérsékletét és a készülék segítségével a vezetőképességét. Ismerjük a táblázatból az adott hőmérséklethez tartozó fajlagos vezetőképességet, ebből a cellaállandó meghatározható:

$$C = \frac{\kappa}{1/R}.$$

Az elektrolitok fajlagos vezetőképessége a hőmérséklet mellett függ az elektrolit koncentrációjától is. A fajlagos vezetőképesség a koncentráció növekedésével eleinte növekszik, mert egyre több ion kerül az oldatba, további koncentrációnövekedéssel azonban rendszerint csökken, mert a disszociáció foka töményebb oldatoknál általában kisebb. A $\kappa = \kappa(c)$ függvény tehát általában maximumon megy át. Mindazonáltal vezetőképességi mérésekből oldatok koncentrációjára következtethetünk, mert az eredeti koncentrációjú, majd a hígított oldat vezetőképességének összehasonlításával eldönthető, hogy a vezetőképesség nő vagy csökken a hígítás hatására; vagyis meghatározható, hogy melyik „ágon” helyezkedik el az oldatunk.

A koncentráció leolvasása ezután már egyértelmű.

Nagy pontosságú mérésekhez az oldatokat ún. vezetőképességi vízből ($\kappa = 10^{-6}$) kell készíteni, ugyanis a méréseket a közönségen víz relatíve nagy fajlagos vezetőképességi értéke meghamisítaná.

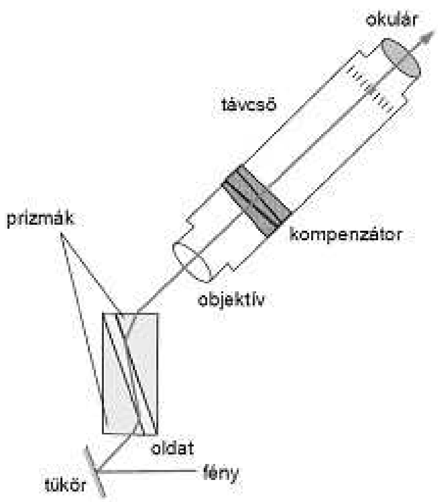
4.4. Feladatok

Eszközök: ellenállások, vezetékek, 2 db mérőműszer, OK102 típusú mérőkészülék, harangelektróda, oldatok

1. Mérje meg a kiadott ellenállást Ohm törvénye alapján, az (1) és (2) egyenletek felhasználásával.
2. Mérje meg a kiadott ellenállásokat helyettesítő módszerrel!
3. A kiadott koncentrációjú KCl-oldatok felhasználásával – többszöri mérés segítségével – határozza meg a harangelektróda cellaállandóját!
4. Határozza meg a kiadott oldatsorozat fajlagos vezetőképességét! A kapott eredményeket ábrázolja milliméterpapíron!
5. Határozza meg a grafikon segítségével az ismeretlen koncentrációjú oldat koncentrációját!

5. fejezet

Törésmutató mérése Abbe-féle refraktométerrel



Balra: az Abbe-féle refraktométer; jobbra: a műszer felépítése

A fénysugár két, optikailag különböző közeg határfelületén irányát megváltoztatja, ez a jelenség a fénytörés. A fénytörés törvényei:

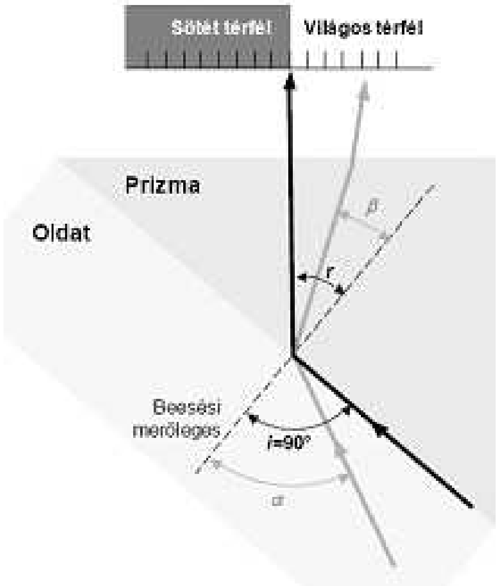
(i) megtört fénysugár a beesési síkban van,

(ii) A beesési szögek és az ezekhez tartozó törési szögek szinuszainak hányadosa állandó. Ezt az állandót, amely a két közeg anyagi minőségére jellemző, a második közegnek az első közegre vonatkoztatott **relatív törésmutatójának** nevezzük, jele $n_{2,1}$.

A fénytörést leíró Snellius-Descartes-féle törvény szokásos alakja:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n_{2,1}.$$

A vákuumra vonatkozó relatív törésmutatót **abszolút törésmutatónak** nevezzük. A törés oka a fény sebességének az adott közegben való eltérő volta. Pontosabban:



A törési törvény és a mérés elve

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n_{2,1} = \frac{c_1}{c_2},$$

ahol $c_1$ill. c_2 a fény terjedési sebessége az első ill. második közegben. Ha c a fény terjedési sebessége vákuumban, akkor az e1őzőek alapján az első közeg abszolút törésmutatójára érvényes:

$$n_1 = \frac{c}{c_1},$$

a második közeg abszolút törésmutatójára:

$$n_2 = \frac{c}{c_2}.$$

A relatív törésmutató definíciója alapján felírható:

$$n_{2,1} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{c/c_2}{c/c_1} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Azaz relatív törésmutató megegyezik a két közeg abszolút törésmutatójának hányadosával.

Azt a közeget, amelynek abszolút törésmutatója nagyobb, optikailag sűrűbbnek nevezzük. Haladjon fény optikailag sűrűbb közegből a ritkább felé ($n_1 > n_2$, azaz $n_2/n_1 < 1$)! Ekkor

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1} < 1,$$

ami csak akkor foroghat fenn, ha $\alpha < \beta$. β értéke határesetben derékszög lehet, az ehhez tartozó beesési szöget α_0-lal jelöljük. α_0-nál nagyobb beesési szögeknél a fény nem lép a második közegbe, hanem a ritkább közeg határfelületén visszaverődést szenved. A teljes visszaverődés határszögénél nagyobb szög alatt beeső fénysugarak tehát a sűrűbb közegben maradnak és ugyanakkora szöggel verődnek vissza, mint amekkorával beestek.

Az α_0 szöget a teljes visszaverődés határszögének nevezzük. Értéke:

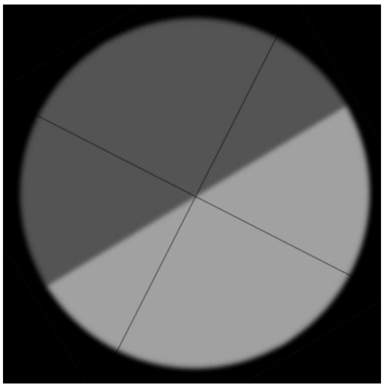
$$\sin\alpha = \frac{\sin\alpha}{\sin 90°} = n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Ez alapján egy közeg törésmutatója kiszámítható, ha a teljes visszaverődés határszögét megmérjük. A törésmutató több tényezőtő1, így pl. a hőmérséklettől, a nyomástól, a fény hullámhosszától, oldatoknál a koncentrációtól is függ. A törésmutató hullámhossz szerinti függését **diszperziónak** nevezzük. A diszperzió mértékéül két Fraunhofer-féle vonalra vonatkozó törésmutató különbségét veszik. Az $n_F - n_C$ (azaz 486,1 és 656,3 nm-re vonatkoztatva) értékét közepes diszperziónak nevezzük. A törésmutatót rendszerint a nátrium D-vonalra adtuk meg (589,3 nm).

A törésmutató meghatározását Abbe-féle refraktométerrel végezzük. A mérés a teljes visszaverődés határszögének mérésén alapszik, és 1,3–1,7 törésmutatójú anyagok vizsgálatára alkalmas. Mérési pontossága $\approx 10^{-4}$ törésmutatóegység. Az eszköz lényeges alkotórésze az ún. Abbe-féle kettősprizma, egy végtelenre beállított távcső és az ún. kompenzátor (l. következő ábra).

A prizmarendszerre egy K kar van erősítve, amelynek forgatásával elérhetjük, hogy a határvonal az okulárban lévő fonalkereszt metszéspontjára essék. A leolvasómikroszkóp látómezejében ekkor közvetlenül leolvashatjuk a törésmutató értékét. Használatba vétel előtt az eszközt ismert törésmutatójú folyadékkal (pl. desztillált víz) hitelesíteni kell. Ha a refraktométert összetett fénnyel világítjuk meg, a törésmutató hullámhossztól való függése miatt éles határvonal helyett vékony spektrum-sávot látunk. Ennek megszüntetésére a készülékbe a C kompenzátor van beépítve. Ez két ún. Amici-prizma, amely a Na D-vonalát nem téríti ki, a két prizma eredő színszórása viszont szabályozható azáltal, hogy a prizmák relatív helyzetét megváltoztatjuk. Észleléskor a készüléket úgy kell beállítani, hogy az Amici-prizmák színszórása a mérőprizmából és a köztük levő folyadékból álló rendszer színszórásával ellentétesen egyenlő legyen.

A műszer működési elvét a következő ábra szemlélteti. A prizmákon és az oldaton áthaladó fény két határfelületen törik meg, ezek közül számunkra az oldat és a második prizma közti határfelület az érdekes.



A teljes visszaverődés határszöge leolvasható a refraktométerben – helyesen beállított látómezőben

Mivel a prizma törésmutatója nagyobb, mint az oldaté, a beeső fény a beesési merőlegeshez törik. A határfelületet súroló, 90°-os beesési szög alatt érkező fénynyaláb határszög (r) alatt törik meg. A 90°-nál kisebb szögben beeső fénysugarak r-nél kisebb szögben megtörve a jobb oldali térfelet világítják meg, a bal térfél viszont sötét marad, mivel a határszögnél nagyobb szög alatt nem törik meg fény. A látóteret sötét és világos részre osztó határvonal helyzete a határszög (r), az pedig az oldat törésmutatójának, tehát koncentrációjának függvénye. A törésmutató arányos a határszög szinuszával ($n = k \cdot \sin r$), a koncentráció pedig közelítőleg arányos a törésmutatóval. A refraktométer egyik skáláján közvetlenül a mért anyag törésmutatója olvasható le (20 °C-on) 4 tizedes pontossággal, másik skáláján a tiszta nádcukoroldat százalékos szárazanyag-tartalmát adja meg a 0-85% intervallumban. Használatba vétel előtt az eszközt ismert törésmutatójú folyadékkal (pl. desztillált víz) hitelesíteni kell. Más oldat esetén a skálán leolvasott értéket korrigálni kell. A méréshez elegendő néhány csepp oldat. A mérőprizma átáramló vízzel termosztálható. Az Abbe-féle refraktométer zsírok, gyanták, szilárd, sőt, átlátszatlan anyagok vizsgálatára is alkalmas ráeső fényben. Lényeges része a flintüvegből (n_D = 1,75) készült kettős prizma. A mérendő 1-2 csepp folyadékot a prizmák közötti kb. 0,15 mm-es résbe helyezzük el. A törésmutató az anyagi minőségen kívül a hőmérsékletnek és az alkalmazott fény hullámhosszának is függvénye, ezért pontos méréseknél 0,2 °C pontosságú hőmérsékletszabályozás és monokromatikus megvilágítás (pl. a nátriumgőz által kibocsátott sárga színű, 589 nm-es fény (a Na D-vonala) szükséges. A refraktométert úgy kell megválasztani, hogy prizmájának törésmutatója nagyobb legyen a mérendő oldat törésmutatójánál. A refraktométereknek számos típusa ismeretes az egyszerű kis kézi eszközöktől a digitális kijelzésű automata hőszabályzós és nyomtatóval is ellátott nagypontosságú műszerekig.

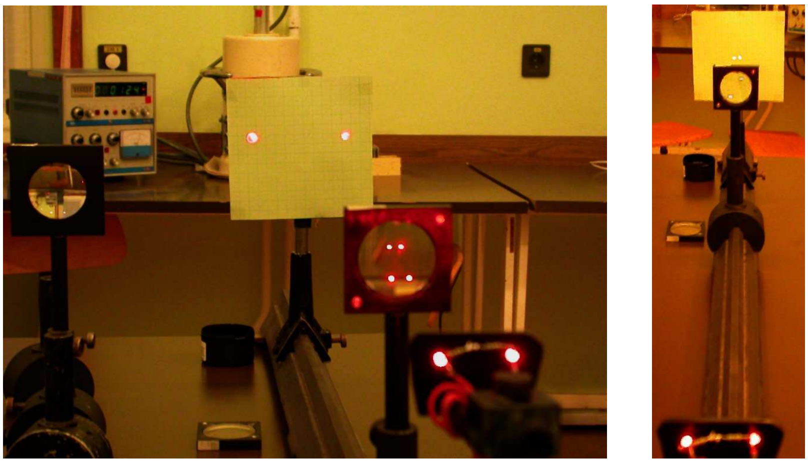
5.1. Feladatok

Eszközök: 1 db Abbe-féle refraktométer, 1 üveg desztillált víz, 10 üveg ismert koncentrációjú cukoroldat, 1 üveg ismeretlen koncentrációjú cukoroldat

1. Határozza meg a kiadott oldatok törésmutató értékeit! A hitelesítést a mérés előtt végezze el desztillált vízzel (szobahőmérsékleten $n_{víz}$ = 1,333)!
2. Készítse el a koncentráció-törésmutató grafikont!
3. A grafikon alapján határozza meg az ismeretlen oldat törésmutatóját!

6. fejezet

Lencsék optikai erősségének meghatározása



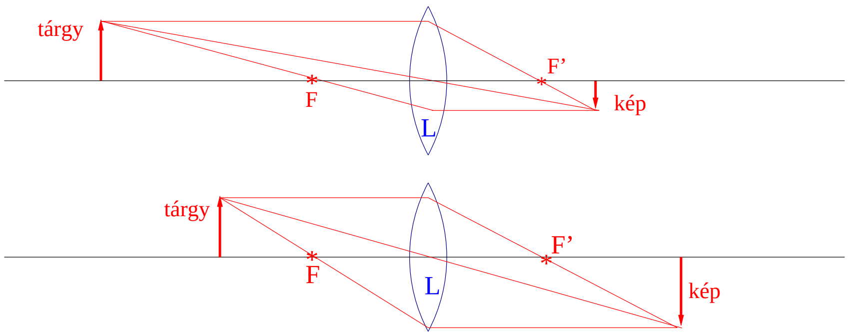
Nagyitott (balra) és kicsinyített (jobbra) kép előállítása gyűjtőlencsével

A lencséken áthaladó fény a lencse belépő és kilépő oldalán is fénytörést szenved. A két törés a geometriai egyenes vonalhoz képest azonos irányú, vagyis a lencse peremén haladó fénysugarak a lencse után összetartanak (gyűjtőlencse) vagy széttartanak (szórólencse). A gyűjtőlencsék felületeit úgy alakítják ki, hogy a lencséken áthaladó, az optikai tengellyel párhuzamos sugarak mind egyetlen pontban, a fókuszpontban egyesüljenek. Szórólencsék esetében az optikai tengellyel párhuzamosan belépő sugarak úgy haladnak tovább, mintha egy, még a lencse előtt lévő pontból indultak volna ki. Bár az utóbbi pont eltérő tulajdonságú, mint a gyűjtőlencsék fókuszpontja, az egyszerűség kedvéért a szórólencsék esetében is fókuszpontról szoktunk beszélni. A lencse és a fókuszpont távolságát a lencse fókusztávolságának nevezzük; a gyűjtőlencsék fókusztávolságát negatívnak tekintjük. A méterben mért fókusztávolság reciproka a törőerősség, más néven dioptria.

A fénytörés tulajdonságaiból következik, hogy ha a fénysugarak nem a végtelen messzi fényforrásból, párhuzamosan érkeznek, hanem egy közelebbi, a lencsétől t tárgytávolságra lévő forrásból, azok a lencsén áthaladva továbbra is egy k pontban egyesülnek, amit képnek hívunk, és ebben az esetben nem esik egybe a fókuszponttal, hanem messzebb van a lencsétől. A fénysugarak haladására a következő törvények érvényesek (vékony lencsék esetében):

- A lencse középpontján áthaladó fénysugár nem változtatja meg az irányát,
- Az F fókuszponton áthaladó fénysugár a lencsét az optikai tengellyel párhuzamosan hagyja el,

- Az optikai tengellyel párhuzamosan érkező fénysugár a lencsét úgy hagyja el, hogy áthalad a túloldali F' fókuszponton.
- Egy pontszerű fényforrás képe ott keletkezik, ahol ez a három fénysugár metszi egymást.



Lencse képalkotásának szerkesztése. Fent: a T tárgy messzebb van az F fókuszponttól, mint a LF fókusztávolság: kicsinyített, fordított állású kép keletkezik; a tárgytávolság nagyobb, mint a fókusztávolság, de kisebb, mint annak kétszerese. Lent: a T tárgy közelebb van a fókuszponthoz, mint a LF fókusztávolság: nagyított, fordított állású kép keletkezik; a képtávolság a tárgytávolság több mint kétszerese

Az f fókusztávolság, a t tárgytávolság és a k képtávolság között a jól ismert

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{t} + \frac{1}{k}$$

alakú összefüggés áll fenn. Vastag lencsék esetén a képlet hasonló, csak a tárgy- és képtávolságot nem a lencse középvonalától, hanem két, a lencséhez rögzítettnek tekinthető, képzeletbeli törősíktól mérjük. Ennek helyzete általában ismeretlen (bár méréssel meghatározható), ezért t és k a vastag lencséknél közvetlenül nem mérhető meg. Mivel a gyakorlatban használt lencsék általában vastag lencsék, a lencsék törési törvényét közvetlenül nem lehet pontos mérésre használni.

A következő két módszer ezt a nehézséget küszöböli ki, mert t és k mérését nem teszi szükségessé. Így vastag lencsék és lencserendszerek fókusztávolságának meghatározására is alkalmas.

6.1. Abbe-féle mérésnél

a lencsét rögzítjük, és két tárgyhelyzetnél megmérjük a keletkező kép nagyságát. Ha T a tárgy nagysága és K a kép nagysága, az N nagyítás

$$N := \frac{K}{T} = \frac{k}{t}.$$

Ezt a távolságtörvénybe helyettesítve, és abból t-t kifejezve kapjuk, hogy

$$t = f\left(1 + \frac{1}{N}\right).$$

Ez utóbbi összefüggést írjuk fel mindkét tárgyhelyzet esetén, majd képezzük a tárgytávolságok különbségét. Azt kapjuk, hogy:

$$d = t_1 - t_2 = f\left(\frac{1}{N_1} - \frac{1}{N_2}\right),$$

ahonnan

$$f = \delta \cdot \frac{N_1 N_2}{N_2 - N_1},$$

δ-val a két tárgyhelyzet távolságát jelöltük. A nagyítás mérését pontosabbá tehetjük, ha az ernyő helyére egy kis nagyítású mikroszkópot teszünk. A mikroszkóp belső skáláját élesre állítjuk, majd megkeressük a lencse által előállított képet. A skála és a tárgyról alkotott kép egymást fedi, ezért úgy mérhető meg a kép nagysága, mint ahogy a valódi tárgyat mérőszalaggal mérnénk. A nagyítás kiszámításához meg kell mérni a tárgy nagyságát is, amit a mikroszkóp elé helyezve szintén meg tudunk határozni.

6.2. Bessel módszere

Rögzítsük le a tárgyat és az ernyőt, a közöttük lévő távolságot jelöljük e-vel és legyen $e > 4f$. Ekkor a lencse mozgatásakor két éles képet kapunk: egy nagyítottat és egy kicsinyítettet. A lencse két helyzete közti távolságot jelöljük d-vel. Szerkesztéssel belátható, hogy a lencse két helyzete az e felezőpontjára nézve szimmetrikus:

$$k = \frac{e}{2} + \frac{d}{2},$$

$$t = \frac{e}{2} - \frac{d}{2};$$

t és k kifejezését a leképezési törvénybe helyettesítve, és az

$$\frac{1}{a+b} + \frac{1}{a-b} = \frac{a-b}{a^2-b^2} + \frac{a+b}{a^2-b^2} = \frac{2a}{a^2-b^2}$$

azonosság mintájára átalakítva kapjuk, hogy

$$f = \frac{1}{4}\left(e - \frac{d^2}{e}\right).$$

6.3. Szórólencse gyújtótávolságának meghatározása

A szórólencse valódi képet nem ad, így közvetlenül nem tudjuk meghatározni a gyújtótávolságát. Ezért összekapcsoljuk egy olyan (erősebb) gyűjtőlencsével, amellyel együtt gyűjtőlencsét alkot. A lencserendszer f fókusztávolságát az előző módszerekkel megmérjük. A gyűjtőlencse f_1 fókusztávolsága, a szórólencse f_2 fókusztávolsága és f között – ha a két lencse közel van egymáshoz – fennáll

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2},$$

vagyis egymással érintkező vékony lencsék esetén a törőerősségek összeadódnak. Így f_2 az f és az f_1 mérésével meghatározható.

Helyezzük az optikai pad sínjére a pontszerű fényforrást és a lámpaházhoz tartozó kondenzorlencse segítségével állítsunk elő párhuzamos fénynyalábot. Ezután a többi eszközt is elhelyezzük a sínen, ún. lovasokba befogva.

6.4. Mikroszkóp modelljének elkészítése

A mikroszkóp a látószög nagyítására alkalmas eszköz. Működési elve rendkívül egyszerű: a tubus tárgy felőli oldalán lévő rövid fókusztávolságú tárgylencse(rendszer) nagyított, valódi képet vetít a tubus belsejébe, amelyet egy második nagyítólencse, az okulár segítségével tovább nagyítva figyelünk meg. A mikroszkóp modelljét optikai padon egyszerűen megépíthetjük: a 100 mm fókusztávolságú lencsét használjuk objektívnek, a 28 mm fókusztávolságú lesz az okulár. A 28 mm-es lencse egyik oldala erősen domború, ez nézzen az objektív felé, és a sík felületen tekintsünk bele. A két lencsét helyezzük el egymástól kb. 30 cm-re, ez a távolság lesz a tubushossz. A szórt fényeket kizárandó, a tubust érdemes három oldalról letakarni. A tárgyat az objektívtől kb. 15 cm-re helyezzük el. Az okulárban a tárgy életlen képét látjuk; a tárgy távolságának változtatásával éles képet tudunk előállítani. Ha a tubushosszt növeljük vagy csökkentjük, ezzel arányban változik a nagyítás is. (Mi ennek az oka?)

Az így készített mikroszkóp képe értékelhető, bár a kép minősége hagy némi kívánnivalót. Ennek oka, hogy két egyszerű lencsét használtunk, amelyeknek mindenféle leképezési hibája megjelenik. Ezeket valódi mikroszkópok készítésekor úgy korrigálják, hogy több (2–16) tagból álló lencserendszereket használunk mind az objektív, mind az okulár helyén.

6.5. Egyszerű távcső készítése

A Kepler-távcső is két gyűjtőlencséből áll, amelyeknek egyik fókuszpontja egybeesik. A hosszabb gyújtótávolságú objektív a távoli tárgyakról kicsinyített, fordított állású képet alkot, amelyet egy rövidebb gyújtótávolságú objektívvel szemlélünk. A távcső nagyítása az objektív és az okulár fókusztávolságának hányadosa, $N = f_{\mathrm{obj}}/f_{\mathrm{ok}}$. 3,5-szörös nagyítású távcsövet készíthetünk az előbb használt lencsék felhasználásával: a 100 mm fókuszú lencsétől kb. 128 mm-re helyezzük és a tubust lezárjuk. Az okulárba tekintve a távoli tárgyak életlen képe tűnik fel, a képet az okulár mozgatásával állíthatjuk élesre. A kapott kép fordított állású.

6.6. Feladatok

Eszközök: 1 db optikai sín, 1 db nagyítólencse állványon, 1 db ehhez erősíthető kicsinyítőlencse, 1 db további nagyítólencse, 1 db tárgyobjektum (két LED állványon), 1 db 4,5 V-os elem, 1 db ernyő milliméterpapírral

1. Kösse össze a LED vezetékeit az elemmel, és vetítse a fényforrások képét az ernyőre! (Használaton kívül azonban szakítsa meg az áramkört, ne üzemeltesse fölöslegesen a fényforrásokat!)
2. Mérje meg a gyűjtőlencse fókusztávolságát Abbe-módszerrel! A nagyítást a LED fényforrások képének mérésével állapítsa meg, a panelen a fényforrások távolsága 30 mm.
3. Ismételje meg a mérést Bessel-módszerrel is! Átlagolja a két kapott értéket!
4. Illessze a szórólencsét a gyűjtőlencséhez, és mérje meg a lencserendszer fókusztávolságát mindkét fenti módszerrel! Átlagolja a kapott értékeket!
5. A két átlagérték felhasználásával számítsa ki a szórólencse fókusztávolságát!
6. Készítse el a mikroszkóp és a távcső modelljét az optikai padon, és mutassa be a gyakorlatvezetőnek! Mind a mikroszkóp, mind a távcső fordított állású képet alkot az elé helyezett tárgyakról. Miért?

7. fejezet

Mérések mikroszkóppal

A gyakorlathoz használt mikroszkóp

A mikroszkóp nagyítása azt adja meg, hogy a tisztánlátás távolságába (körülbelül 250 mm az a távolság, ahonnan egy egészséges felnőtt szemlencséje hosszabb ideig tudja kifáradás nélkül a tárgyat leképezni, ezt a távolságot nevezzük a tisztalátás távolságának) helyezett tárgy két kiszemelt pontjából a szemünkbe érkező sugarak által bezárt szög, a látószög hányszorosára növekszik. Mivel a tárgy egészen közel van az objektív gyújtópontjához, az objektív egy fordított állású, valódi, nagyított képet ad az okulárlencse fókusztávolságán belül. A keletkezett közbenső képet az okulár felnagyítja. Így a nagyítás az objektív és az okulár nagyításának szorzata:

$$N_{mikro} = N_{ok} \cdot N_{obj}$$

Belátható, hogy az objektív nagyítása;

$$N_{obj} = \frac{d}{f_1},$$

ahol f_1 az objektív fókusza, d az optikai tubushossz (az objektív és az okulár egymás felé eső fókuszpontjainak távolsága), illetve az okulár nagyítása:

$$N_{ok} = \frac{a}{f_2},$$

ahol f_2 az okulár fókusztávolsága, a a tisztánlátás távolsága. Tehát

$$N_{mikro} = \frac{d}{f_1} \cdot \frac{a}{f_2}.$$

A mikroszkóp felbontóképességén annak a két pontnak a távolságát értjük, amelyek a mikroszkópban még külön láthatóak. A felbontóképesség

$$\delta = 0,61 \frac{\lambda}{n \sin \omega}$$

ahol a λ a fény hullámhossza, n a tárgy és az objektív közötti közeg törésmutatója, ω az objektívbe jutó fénynyaláb félnyílásszöge. Az $n \sin \omega$ mennyiséget numerikus apertúrának hívjuk. A mikroszkóp annál „jobb", annál kisebb méretek megfigyelésére alkalmas, minél nagyobb a numerikus apertúrája, azaz minél nagyobb szög alatt gyűjti a mikroszkóp a tárgylemezről érkező fényt. A numerikus apertúra meghatározza a mikroszkóp legnagyobb „értelmes" nagyítását, bár kis numerikus apertúrájú mikroszkóp mögé is helyezhetünk nagy nagyítást adó okulárt, ennek nem lenne értelme, hiszen a megfigyelt képben úgysem válnak szét a nagyon közeli pontok: a kép „üres", „szétesik". A nagyítás növeléséhez szükséges a numerikus apertúrát is növelni: ez részben jobb optika beszerzését jelenti, vagy esetleg immerziós folyadék alkalmazását. A definícióból látható, hogy javul a numerikus apertúra, ha a mikroszkóp és a tárgy között nem levegő, hanem nagy törésmutatójú immerziós folyadék helyezkedik el.

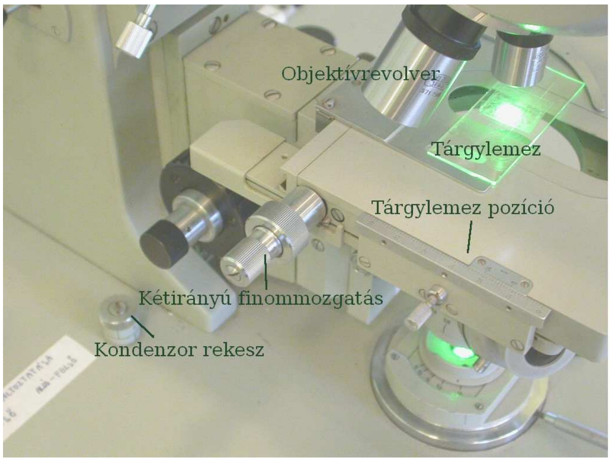
7.1. A nagyítás meghatározása

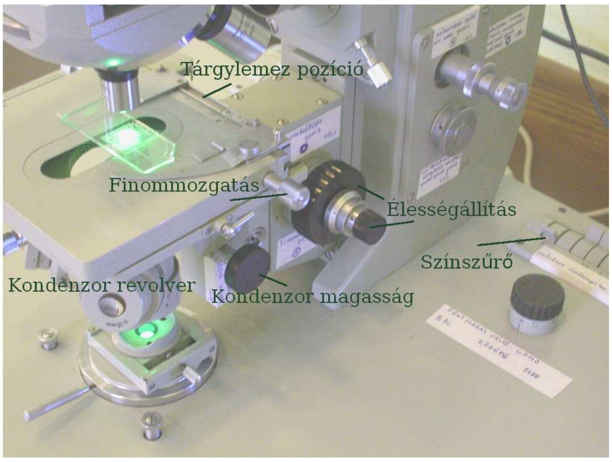
A mikroszkóp tárgyasztalára milliméterpapírt helyezünk, majd a képet élesre állítjuk. Ezután egyik szemünkkel a mikroszkóp képét, másik szemünkkel egy 25 cm-re (tisztánlátás távolságára) lévő másik milliméterskálát nézünk. Ahány mm esik egybe a nagyított skála egy mm-ével, annyi a mikroszkóp nagyítása. A mikroszkóppal hosszúságokat is lehet mérni, ehhez először szükséges az okulárban elhelyezett skála hitelesítése. A tárgy helyére egy finom és ismert beosztással ellátott tárgymikrométert helyezünk, így meg tudjuk állapítani, hogy az okulárskála egy beosztása hány milliméternek felel meg. (pl. ha a tárgymikrométer 2 mm-ének 10 okulár-skálarész felel meg, akkor 1 okulárskála beosztása 0,2 mm). Valódi tárgy méretének meghatározására hitelesített beosztású okulárt alkalmazunk. Megfigyeljük, hogy a meghatározandó méret az okulár skáláján hány osztásnak felel meg.

7.2. Kristályok megfigyelése mikroszkóppal

A különböző kristályos anyagok rájuk jellemző, a molekuláris szerkezet által meghatározott formákban kristályosodnak. Makroszkópikus méretekben is jellegzetes formák: a konyhasó kristálya kocka, a rézszulfáté rombos, a cukroké általában hexagonális formájú. Az oldószer elpárolgásával az anyagok híg oldatának kis (egy csepp vagy kevesebb) anyagmennyiségéből is kikristályosodik az oldott anyag, és ezek a mikrokristályok is ugyanolyan szimmetrikus formákat követnek, mint a makroszkópikus kristályok. A kristályok formáinak vizsgálata a molekulaszerkezeti vizsgálatoknak fontos része.

Mikroszkópban is megfigyelhetjük a különböző anyagok kristályosodását. Ennek különösen akkor van jelentősége, ha az anyag makroszkópikusan nem kristályosodik, ilyen pl. a koffein. Koffein kristályokat pl. láng fölött pörkölődő kávéból állíthatunk elő. A fölötte elhúzott hideg tárgylemezre ködös folt rakódik, amely kis nagyítású mikroszkópban is hosszú, de csak néhány molekularétegnyi vastagságú, apró tű alakú kristályok sokaságának bizonyul.





A mikroszkóp kezelőszervei

7.3. Távolság- és területmérés mikroszkóppal

A mikroszkóp szögnagyítását kis távolságok és kis területek mérésére is használhatjuk. Bürker-kamra alkalmazásakor a vizsgálandó anyagot egy üreges, az alján nagyon finom, hitelesített beosztásokkal karcolt tárgylemezbe helyezzük, a betekintéskor a méreteket a cella karcolatai mutatják. Mivel a cella két, egymásra merőleges osztásrendet is tartalmaz, ez a módszer területmérésre is alkalmas. A cella folyadékban lebegő részecskék számlálására is alkalmas: ha folyadékban lebegő részecskéket teszünk a Bürker-cellára, és ezeket egy kis ΔA területen összeszámoljuk, a cella T alapterületének ismeretében kiszámolhatjuk a tárgylemezre juttatott összes részecske N darabszámát,

$$N = \frac{nT}{\Delta A}.$$

Az elektronikus számlálók előtt ezt a módszert alkalmazták vérsejtek számlálására. A Bürker-kamrát szilárd preparátumok esetében is alkalmazhatjuk, az előbbihez hasonló módon távolság- és területmérés céljára.

Az okulármikrométer egy olyan skála, amelyet az okulárban helyeznek el, ezért léptéke különböző objektívek (azaz különböző nagyítások) alkalmával változik. Egy távolság-standarddal (sűrűn karcolt rács vagy Bürker-kamra) segítségével ezért a mikrométert minden egyes objektív esetén külön kalibrálni kell. Ha a mikrométerskála n osztása a valóságban d távolságnak felel meg, a mikrométerskála léptéke d/n [mm/skálarész]. Ha ezután a mért tárgyat m skálarész kiterjedésűnek találjuk, ennek l nagysága kiszámolható:

$$l = d\,\frac{m}{n}.$$

Digitális képalkotás esetén a távolságok és területek mérése igen egyszerű. A mikroszkóp objektívje nagyított képet vetít az érzékelő kamerafejre; ha geometriai képtorzítások nem lépnek fel, a keletkező kép minden egyes pixele egyenlő, pontosan meghatározható hosszúságegységnek felel meg. Ez a lépték könnyen meghatározható: ha a kép N darab pixelből álló oldalán a távolság-standard d [mm] hosszúságú szakasza fér, a kép léptéke d/N [mm/pixel, µm/pixel]. A kép két, tetszőleges (x_1, y_1) és x_2, y_2 pontjának l távolsága ezek után kiszámítható:

$$l = d\,\frac{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}{N}.$$

Az előző adatokból az egy pixelen megörökített ΔA területelem is kiszámolható: $\Delta A = (d/N)^2$ [mm^2/pixel, µm^2/pixel]. Ha egy kiterjedt objektum M darab pixelre terjed ki, annak valódi területe

$$A = M\,\left(\frac{d}{N}\right)^2.$$

7.4. Feladatok

Eszközök: 1 mikroszkóp, hozzá csatlakozó panelkamera, monitor, lámpatest, ezek tápegységei, 2 db tárgylemez

1. Kapcsolja be a mikroszkóp lámpáját! A kiadott tárgylemezek közül helyezzen egyet a mikroszkópba, és betekintve állítsa élesre a képet!
2. Kapcsolja be a kamerát és a monitort, helyezzen be egy tárgylemezt, és állítsa élesre a képet a monitoron!
3. Olvassa le a nóniuszon a tárgylemez pozícióját! A tárgylemezt mozgassa el úgy, hogy a monitor egyik szélén látszó részletek átkerüljenek a másik oldalra, és épp kilépjenek a képmezőből. Olvassa le ismét a mikrométerek állását! Ha szükséges, mozgassa a tárgylemezt több (5, 10, 20) képmezőnyi mértékben, és ismét olvassa le a tárgylemez állását!
4. Hitelesítse a mikroszkópot a különböző nagyítású okulárokkal! A képernyő 1 cm-e a valóságban hány mikrométernek felel meg? Ez hányszoros nagyítást jelent?
5. Rajzolja le a kiadott mikrokristályok (répacukor, só, réz-szulfát és koffein) formáját!
6. Mérje meg a kiadott drótok átmérőjét!
7. A kiadott preparátum gömb alakú gombákat (élesztő) tartalmaz. Mennyi a gombák átlagos átmérője, mennyi ennek a szórása? Az előző adatokból számolja ki az élesztőgombák átlagos térfogatát és a térfogat szórását is!

8. fejezet

Emissziós színképek és fluoreszcencia vizsgálata

Minden hőmérséklettel rendelkező test bocsájt ki elektromágneses hullámokat. Ilyenek például az izzó testek vagy forró folyadékok. A forró testek sugárzását általában hősugárzásnak nevezik, de sokszor ez a sugárzás nem csak az infravörös tartományban figyelhető meg. A klasszikus fizika nem tudta megoldani a hőmérsékleti sugárzás spektrális eloszlásának problémáját. A megoldásra a kvantumfizika kifejlődéséig kellett várni. Max Planck vezette le az abszolút fekete testek sugárzására vonatkozó analitikus egyenletet, amelyet azóta napjainkig használunk. Az egyenlet a következő formában adja meg a spektrális energiaeloszlást:

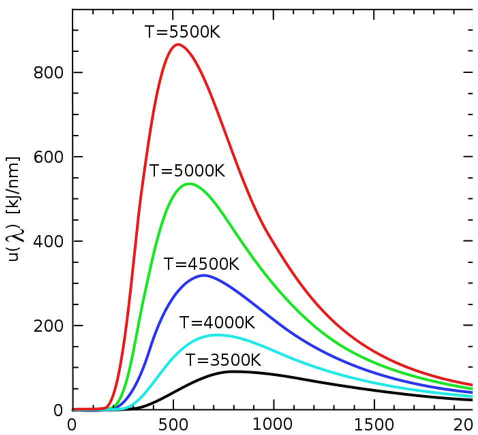
$$u(\lambda, T) = \frac{8\pi ch}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

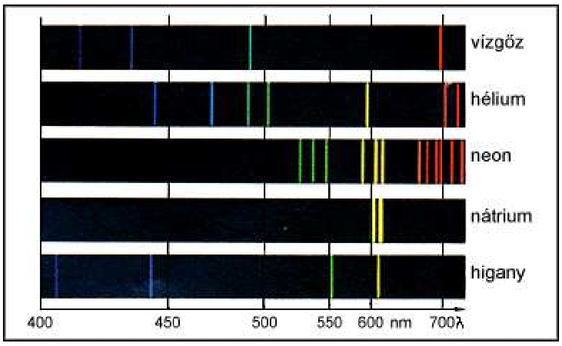
Ahol λ a sugárzás hullámhossza, T a test abszolút hőmérséklete, k a Boltzmann-állandó, h pedig a Planck-állandó. Ezen egyenlet segítségével meg tudjuk határozni adott hullámhossz és hőmérséklet esetén a kisugárzott energiát. Abszolút fekete testek a valóságban nem fordulnak elő, de sok esetben jó közelítéssel használhatóak valós testek sugárzásának leírására. Az 8.1. ábrán u(λ) látható, a különböző vonalak a különböző hőmérsékletű fekete testeket jelölik.

8.1. Az emissziós színképek

Az emissziós színkép egy sugárzási forrás egységnyi hullámhossztartományban kibocsájtott intenzitásának hullámhossz szerinti eloszlása. Emissziós színképe gerjesztett atomoknak vagy molekuláknak van. Az atomon belül az elektronok a különböző elektronhéjak között mozoghatnak, ha energiát kapnak, vagy adnak le. Az energiaelnyelés vagy -leadás általában egy foton formájában történik. Ha egy elektron egy magasabb energiaszintről egy alacsonyabbra kerül, fotont sugároz ki. Ennek a fotonnak az energiája megegyezik a két energiaszint közötti energiakülönbséggel. Einstein óta tudjuk, hogy egy foton energiája és hullámhossza (frekvenciája) között összefüggés van. Ez a következő formában írható fel: $E = h \cdot \nu$, ahol E a foton energiája, ν a foton frekvenciája, h pedig a Planck-állandó. Könnyen látható így, hogy az elektronhéjban adott energia különbség adott frekvenciájú (és hullámhosszú) fotont fog eredményezni. Mivel minden atomban más és más az az elektronhéjak energiaszintje, ezért minden atom más hullámhosszú fotont képes kibocsájtani, így a gerjesztett anyagok spektroszkópiai vizsgálata elárulhatja az adott anyag összetételét. Gerjesztett molekulák esetén kicsit másabb a helyzet, mivel a kötések miatt az elektronhéjak megváltoznak az eredeti atomos héjhoz képest. Ilyenkor a színképben nem emissziós vonalakat, hanem emissziós sávokat láthatunk. A sávok kialakulásába beleszólhat még a molekulák rotációja és vibrációja. Ezek változása illetve jelenléte befolyásolja a végső spektrumot.
Vonalas színképet lehet még létrehozni LED-ek, azaz fénykibocsájtó diódák segítségével is. A dióda n és p típusú anyagból, azaz elektronhiánnyal és elektrontöbblettel rendelkező félvezető anyagból áll. A legegyszerűbb diódákat egyenirányításra használják. A fénykibocsájtó diódák esetén ha nyitó irányú

áramot kötünk a diódára, akkor az elektronok a p rétegbe érve betöltik a lyukakat, rekombináció lép fel és így a dióda az anyagi minőségére jellemző hullámhosszúságú fényt bocsájt ki.





Balra: Planck-görbék különböző hőmérsékleteken. Jobbra: Néhány anyag vonalas színképe

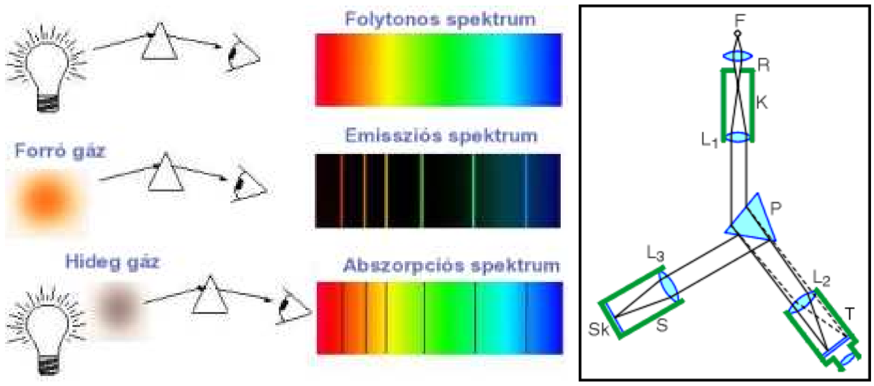
8.2. Abszorpció

Ha egy feketetest spektrumot úgy vizsgálunk, hogy a test által kibocsátott fény áthalad egy ritka gáz közegen vagy híg folyadékon, azt tapasztaljuk, hogy az egyébként folyamatos spektrumban fekete vonalak keletkeznek. Ezek a vonalak az abszorpciós, vagy elnyelési vonalak. Az atomban egy foton elnyelődése függ az atom elektronhéjaitól, ugyanúgy, mint a kibocsájtás. Adott energiájú fotont akkor tud elnyelni egy atom, ha van az elektronjai között olyan, amelyik képes két megfelelő elektronhéj között mozogni, amelyek energiakülönbsége megegyezik az elnyelt foton energiájával. Látható, hogy egy gáz emissziós és abszorpciós színképe pont kiegészíti egymást, vagyis ahol az emissziós színképben világos vonalak vannak, ott az abszorpciós színképben sötét vonalak. Ezt illusztrálja a 8.1. ábra.
Az abszorpció és az emisszió egyik igen érdekes „keveréke" a fluoreszcencia. Ekkor a beérkező fotonok gerjesztik az atomokat és a molekulákat, ezek elektronjai magasabb energiaszintre kerülnek, majd szinte azonnal vissza is ugranak egy alacsonyabb energiaszintre, de nem arra, amelyről elindultak. Így a beérkező, elnyelt fénynél kisebb hullámhosszúságú fényt bocsájtanak ki. Az effektus általában addig figyelhető meg, ameddig van megvilágítás.

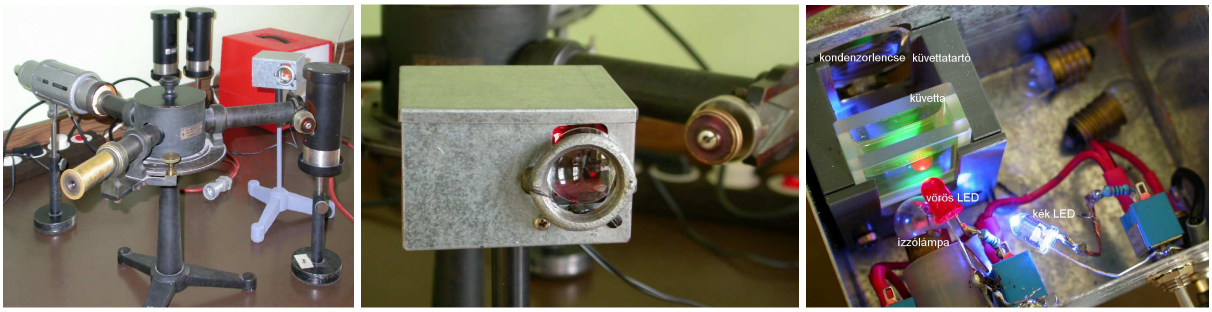
8.3. A spektroszkóp felépítése

Ahhoz, hogy a színképvonalakat vizsgálni tudjuk, fel kell bontani a fényt hullámhossz szerint. Ezt megtehetjük optikai ráccsal, vagy prizmával. Jelen gyakorlat során prizmás spektroszkóp áll a rendelkezésünkre. A prizma a diszperzió jelensége miatt képes felbontani a fényt. Mivel az üveg törésmutatója a fény hullámhosszától függ, a prizma a különböző hullámhosszúságú fénysugarakat más és más irányba továbbítja. A prizmás felbontás nagyobb fényerőt biztosít, de a felbontás nem lineáris. Ezt a típusú spektroszkópot Kirchoff és Bunsen fejlesztette ki 1859-ben. A műszer tökéletesen megfelel spektrumok vizuális tanulmányozására. A 8.1. ábrán látható a spektroszkóp sematikus rajza. Főbb részei: P a prizma, K a kollimátorcső, R a rés, L_1 az akromatikus gyűjtőlencse, az L_2 objektív és az okulár alkotja a T távcsövet, S a skálacső, S_k pedig az átlátszó skála.

A vizsgálandó fény az F fényforrásból érkezik a résre, ahonnan utána a prizmára, majd onnan a távcsőbe, aminek a végén elhelyezett okulár segítségével szabad szemmel is megvizsgálható a spektrum. Az S_k skálát megvilágítjuk egy külső fényforrással és az L_3 lencse segítségével a a távcsőbe vetítjük, így a megjelenő spektrumvonalakat a skálán is leolvashatjuk.



8.1. ábra. Balra: az emisszió és abszorpció összehasonlítása. Jobbra: a spektroszkóp felépítése



Balra: a gyakorlat eszközei; középen: a fényforrásokat és küvettát tartalmazó kombinált fényforrás a kondenzor felől; jobbra: ennek belső felépítése

A spektroszkóp egyenlő beosztású skáláját hitelesíteni kell a mérés megkezdése előtt. Ehhez ismert hullámhosszúságú spektrumvonalakat kell keresni. A laborban ezt legkönnyebben spektrállámpák segítségével tehetjük meg. A hitelesítéshez 3 féle spektrállámpa áll rendelkezésre, Hg–Cd, He–Ne- és Na-lámpa. Mindegyik lámpa ismert hullámhosszúságú emissziós vonalakat bocsájt ki. A spektroszkóp R rése elé helyezve valamelyik spektrállámpát, emissziós vonalakat látunk. Egy mellékelt táblázat segítségével minden egyes lámpa esetén be lehet azonosítani a fényesebb vonalakat. Ezután minden vonalhoz leolvassuk a hozzá tartozó skálaértéket, majd miliméter papíron ábrázoljuk a skálarész függvényében a hullámhosszt. Ezzel kész a hitelesítési görbe, így a későbbiekben egy ismeretlen vonal hullámhosszát meghatározhatjuk, ha leolvassuk a hozzá tartozó skálarészt, majd a skálarész értéke alapján a hullámhosszt a hitelesítési görbén.

8.4. Feladatok

Eszközök: spektroszkóp, 3 db spektrállámpa tápegységgel, 1 db kombinált fényforrás izzólámpával és két LED-del, az ehhez tartozó tápegység, 1 db küvetta, fluoreszceinoldat.

1. A He-Ne-, Hg–Cd- és Na-spektrállámpák segítségével vegye föl a spektroszkóp hitelesítési görbéjét, és ábrázolja milliméterpapíron!

2. A LED-eket tartalmazó dobozt helyezze a spektroszkóp rése elé, kapcsolja be a vörös LED-et, és állapítsa meg az emisszió hozzávetőleges hullámhosszát (-tól, -ig).

3. Vizsgálja meg az izzólámpa spektrumát! Milyen hullámhossznál helyezkednek el a látható fény különböző színű komponensei (vörös, sárga, zöld, kék)? A tapasztalatait írja le a jegyzőkönyvbe.

4. Helyezze a fluoreszceint tartalmazó vizes oldatot a küvettatartóba, majd kapcsolja be az izzót és írja le a jegyzőkönyvbe a tapasztalatait. Állapítsa meg a fluoreszcein abszorpciós sávjának hozzávetőleges hullámhosszát (-tól, -ig).

5. Az izzó kikapcsolása után a kék LED-del oldalról világítsa meg az oldatot, írja le, mit tapasztal, mérje meg a látott színképvonalak hullámhosszát és hasonlítsa össze őket a kék LED emissziós vonalainak hullámhosszával. Magyarázza meg a látottakat.

Megjegyzés:a mérést el lehet végezni „szabad szemmel” is, valamint a tévére kötött kamera segítségével is, amit a T távcső végére lehet helyezni az okulár helyett.

9. fejezet

Oldatok abszorpciós színképének felvétele spektrofotométerrel

Balra: A spektrofotométer kezelőszervei; jobbra: a küvettaház belülről: a fényforrás kilépő rekesze és a küvettatartó a küvettakocsin

A molekulák szerkezetének tanulmányozása szempontjából fontos a molekulák által elnyelt elektromágneses sugárzás vizsgálata, amelyből a molekulák lehetséges (rezgési-forgási) energiaállapotaira lehet következtetni. Hasonlóan az előző gyakorlatban megismert emissziós színképekhez, a kisnyomású gázok színképe diszkrét vonalakból áll, amelyet áthaladó fény esetén abszorpcióban figyelhetünk meg. A színkép vonalai háromféleképpen jöhetnek létre. A gázmolekula valamely elektronja egy foton felhasználásával magasabb gerjesztettségű állapotba kerülhet. Mivel a molekulában egy elektronnak csak véges számú energiaállapota lehetséges, csak bizonyos, jól meghatározott hullámhosszú fotonok tudnak a kölcsönhatásban részt venni. Ekkor az áthaladó fényből ezek a meghatározott hullámhosszú fotonok hiányoznak, a színképben néhány jellegzetes abszorpciós vonal jön létre. A fotonok azonban nemcsak az elektronokat tudják gerjeszteni: a molekula a kötések rezgési és forgási állapotaival is rendelkezik. Ezekre az energiaszintekre is vonatkoznak bizonyos kiválasztási szabályok, így ezeket a rotációs-vibrációs átmeneteket is csak bizonyos hullámhosszú fotonok gerjeszthetik. Végeredményben ritka gázokban jellegzetes, vonalas színképet figyelhetünk meg, az elektronállapotokhoz, valamint a rotációs-vibrációs átmenetekhez tartozó vonalsorozattal.

Nagy nyomású gázoknál a szomszédos molekulák kölcsönhatása egyre erősebbé válik, a szomszédos molekulák hatása miatt pedig az egyedi molekulák energiaszintjei bizonyos irányban módosulhatnak. Mivel a különböző molekulák lokális környezete különböző, az abszorpciós vonalak közelébe eső fotonok is egyre inkább részt vesznek a gerjesztésben: az abszorpciós vonal kiszélesedik, abszorpciós sávvá alakul. A rotációs sávszerkezet mindig, a rezgési sávszerkezet a legtöbb esetben eltűnik, és az abszorpciós színkép lényegében egy diffúz sávvá válik, amelyben azonban az intenzitásviszonyok a hullámhossztól függnek, és az oldat összetételére jellemzők.

Az abszorpciós színképek meghatározó szerepet töltenek be az analitikai kémiában anyagok azonosítása és koncentráció meghatározása céljából. Ám az alkalmazás egészen széleskörű: hasonló módon, abszorpciós színképekkel lehet pl. a csillagok anyagi összetételére, sőt, hőmérsékletére és felszíni gravitációs gyorsulására is következtetni.

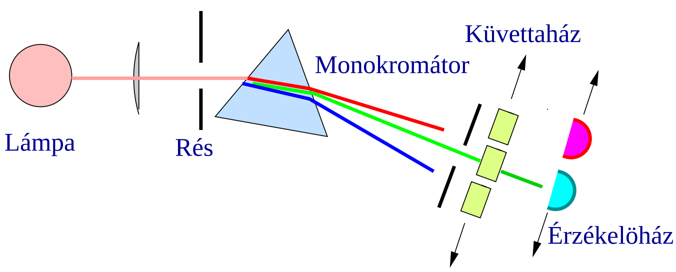
Az oldatok abszorpciós színképének kvantitatív leírására a κ_λ abszorpciós együtthatónak vagy ϵ_λ extinkciós koefficiensnek a hullámhossz szerinti függése (spektruma) szolgál. Ha d vastagságú plánparallel elnyelő rétegre I_0 intenzitású párhuzamos monokromatikus fénynyaláb esik, a d rétegből kilépő fény intenzitása I. Ha az elnyelő anyag koncentrációja (pl. mol/l-ben) c, akkor

$$I = I_0 \mathrm{e}^{-\kappa_\lambda \cdot d} = I_0 10^{-\epsilon_\lambda \cdot c \cdot d}.$$

Ebből az extinkció értéke $E_{10} = \log I_0/I$, ahol $\epsilon_\lambda = E_{10}/cd$ az egy mólnyi oldott anyagra eső abszorpciós együttható, amelyet moláris dekadikus extinkciós koefficiensnek nevezünk. Néhány esetben (ha az oldott anyag molekuláris állapota a a koncentráció változásával megváltozik) ϵ_λ a koncentrációtól függ, egyéb esetben azonban független attól. Ha ϵ_λ c-től függ, akkor koncentrációváltozás okozta kémiai változásra (pl. disszociációra, asszociációra, stb.) lehet következtetni. Ha az ϵ_λ c-től független, akkor az abszorpció méréséből az oldat koncentrációját lehet meghatározni.

A gyakorlaton használt Spektrumom 195 D spektrofotométer cseppfolyós és szilárd anyagok átbocsátási együtthatóinak mérésére alkalmas, a színkép 185-1300 nm-ig terjedő tartományában. A mérés nullmódszerrel történik; egy kompenzációs elven mérő potenciométer biztosítja a mérés megfelelő pontosságát. Az adott hullámhosszú fényt monokromátorral állítjuk elő, amely a prizmán felbomló fény egy keskeny szeletének kiválasztásán alapul.

9.1. A műszer felépítése



A spektrofotométer működési elve

A műszer 5 fő egységből áll.

Lámpaház: a fényforrás 6 V, 35 W-os wolframlámpa. Ennek fénye kerül a mérőrendszerbe, a résen keresztül.

Rés: A lámpa fényét optikai rendszer képezi le a belépő résre; ennek méretét állítva szabályozhatjuk a mérendő anyagra eső fény mennyiségét. A rés vezérlő berendezése nagy áttétel segítségével igen finom beállítást tesz lehetővé.

Monokromátor: A résen belépő nyalábot a kollimátortükör egy prizmára vetíti, amely azt felbontja. A tükörobjektív a felbontott fénynyalábot a kilépő résre vetíti, amely csak egy keskeny hullámhossztartományt enged át, előállítva azt a hullámhosszú fényt, amelyen az abszorpciót meg akarjuk határozni.

Küvettaház: A fénysugár ezután a küvettaházba jut, és a küvettákban lévő anyagokon halad keresztül. A váltókerékkel működtethető küvettakocsi négy minta mérését és összehasonlítását teszi lehetővé. A küvettaház oldallapjába egy zárszerkezet van beépítve. Ha a fedelet felnyitjuk, akkor egy lemez kerül a sugárútba, és lezárja az érzékelőház ablakát.

Érzékelőház: Csukott fedél esetén a fénysugár az érzéke1őházba jut, ahol egy fotocella megméri a fény intenzitását. A fotocellák hullámhosszonként változó érzékenysége miatt két fotocella választható a méréshez: ha a fotocellaváltó gombot a kék jelzésre állítjuk, akkor a kékérzékeny fotocella, ha a vörös jelzésre, akkor a vörösérzékeny fotocella van bekapcsolva.

9.2. A mérés menete

A műszert bekapcsoljuk, és pár percig várunk, hogy bemelegedjen. Ezek után a sötétáramot kell beállítani. A küvettaház felhajtott fedele mellett a sötétáram-állító (dark current) gombot addig forgassuk, amíg a kijelző pontosan 0 értéket mutat. Ezután kezdődhet a mérés. (A mérés alatt a sötétáram stabilitását célszerű időnként ellenőrizni, szükség esetén ismételten beállítani.)

A küvettahát fedelét lecsukjuk, és a váltókerékkel kiválasztjuk a desztillált vizet (mint tiszta oldószert) tartalmazó küvettát – ehhez fogjuk hasonlítani az oldat abszorpcióját. A hullámhossz-állító kerékkel *(wavelength)* beállítjuk a kívánatos hullámhosszat (az aktuális hullámhossz a leolvasóablakban látható nm-ben), majd az üzemmódkapcsolót transzmisszó (T%) módra állítjuk. Ezek után a rést addig állítjuk a durva- és finomállító gombokkal (*slit* és *100% fine*), amíg a desztillált víz transzmissziójára 100% érték jelenik meg a kijelzőn.

A különböző oldatokat ezek után lehet megmérni: a váltókerékkel egymás után beállítjuk a küvettákat, és egyszerűen leolvassuk a rájuk vonatkozó transzmissziót. Ha végeztünk, új hullámhosszra való áttéréskor ismét állítsuk be a desztillált vizet tartalmazó küvettát a fényútba, majd a hullámhossz-állítót és a rés szélességét kell beállítani a megfelelő módon, és leolvashatjuk a transzmissziót az új hullámhosszon.

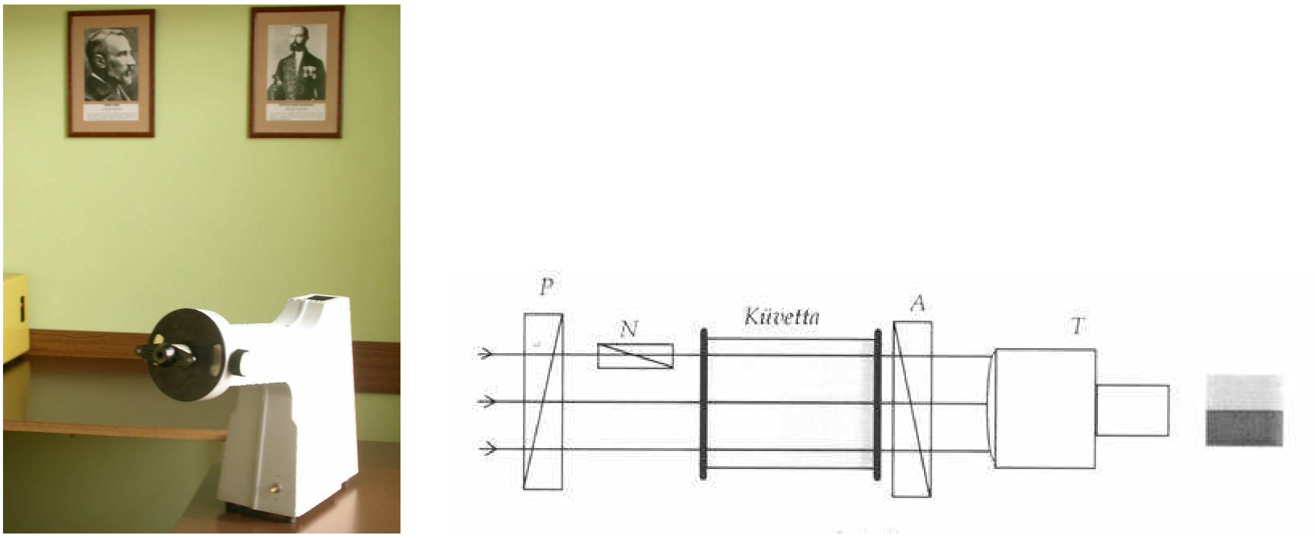
9.3. Feladatok

Eszközök: MOM 195 D spektrofotométer, küvettakocsi, küvetták, desztillált víz, fluoreszceinoldatok

1. Helyezze működésbe a szerkezetet, és kompenzálja a sötétáramot!
2. Mérje meg a fluoreszcein transzmisszióját 350–1000 nm között! 350–600 nm között 10 nm lépésközzel, 600–1000 nm között 20 nm lépésközzel dolgozzon!
3. Rajzolja föl a fluoreszcein transzmissziós spektrumát!
4. Egészítse ki a mérési sorozatot úgy, hogy 405–515 nm között 5 nm-es legyen a lépésköz! Rajzolja be az új pontokat is a transzmissziós grafikonra!
5. Számítsa ki a fluoreszcein moláris extinkciós koefficiensét a mért hullámhosszakon, és ábrázolja milliméterpapíron!

10. fejezet

Optikai forgatóképesség vizsgálata



A gyakorlathoz használt polariméter. Balra a műszer, jobbra a belső szerkezete látható

Egyes anyagok a rajtuk átbocsátott lineárisan poláros fény síkját elforgatják, ezt a tulajdonságot optikai aktivitásnak hívjuk. A rezgési sík elforgatása a következőképpen értelmezhető: a lineárisan poláros fény a közegbe való belépéskor két, cirkulárisan – jobbra és balra – poláros sugárra bomlik. Ezek sebessége az optikailag aktív anyagban különböző, úgyhogy az anyagból való kilépésnél fényvektoraik viszonylagos helyzete más, mint a belépésnél, és ezért ismét összetevődve más síkban poláros eredő rezgést adnak. A jelenség kristályoknál a kristályszerkezettel, más anyagoknál pedig az egyes molekulák felépítésével magyarázható. Így pl. optikailag aktívak mindazok a szerves anyagok, amelyeknek molekulái egy aszimmetrikus szénatomot tartalmaznak, olyan C-atomot, amelynek négy vegyértéke négy különböző atomcsoporttal kapcsolódik. Legyen a C-atomhoz kapcsolódó 4 különböző atomcsoport: A, E, D, E. Ekkor a vegyértékszögeknek megfelelően kétféle elrendezés lehetséges, amelyek egymásnak tükörképei. E kétféle molekula forgatóképessége egyen1ő nagyságú, de ellentétes irányú: optikai izomereknek nevezzük őket. Megállapodás szerint, ha az óramutató járásával egyező irányban forgat az anyag, akkor jobbraforgató, ellenkező esetben balraforgató. Ha a kétfajta molekula egyenlő arányban alkot egy keveréket, akkor – a két ellentétesen előidézett forgatás miatt – az anyag optikailag inaktív lesz, az ilyen anyagot racemátnak nevezzük.

Az elforgatás szöge függ a fény hullámhosszától, a réteg vastagságától, koncentrációjától és hőmérsékletétől. Ha 1 dm hosszúságú csőben olyan oldatot helyezünk el, amelynek 100 cm^3-ében c gramm oldott anyag van, az elforgatás szöge:

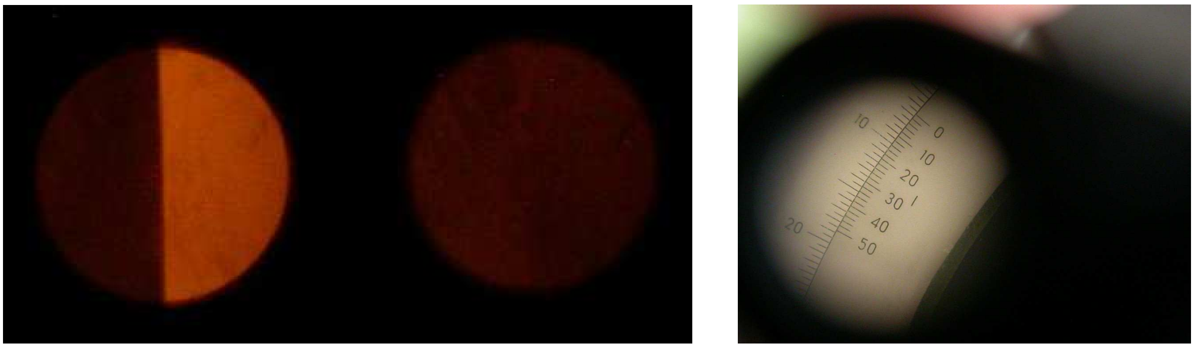
$$\alpha = \alpha_{\mathrm{NaD}}^{20^\circ\,\mathrm{C}} \frac{c \cdot l}{100\%},$$

ahol $\alpha_{\mathrm{NaD}}^{20^\circ\,\mathrm{C}}$ a specifikus vagy fajlagos forgatóképesség, amelyet a nátrium-színkép D-vonalának hullámhosszán (λ = 589,3 nm) 20 °C-on mérünk, amely az 1 dm hosszú, 1%-os koncentrációjú oldat által létrehozott szögelfordulással (α) számértékileg egyenlő (pl. nádcukor esetén ez 66,5 fok). Egyes esetekben az elforgatás szögének mérését 20 °C-tól eltérő hőmérsékleten és más hullámhosszon is előírhatják.

A fenti összefüggés alapján tehát az elforgatás szögének méréséből az oldatok cukortartalma meghatározható:

$$c = \frac{100\% \cdot \alpha}{\alpha_{\mathrm{NaD}}^{20^\circ\,\mathrm{C}} \cdot l}$$

Az elforgatás mérésére való készüléket polariméternek, speciálisan a cukortartalom mérésére szolgálót szacchariméternek hívják. Ennek működési elve a következő.



Bal panel: a polariméter látómezejének két lehetséges állása: balra a félhold alakú látómezőben átmenő fény mutatja, hogy a műszer átengedi a poláros fény egy részét – jobbra mindkét félkör félárnyékos, helyesen állapítottuk meg a poláros fény síkját. Ilyenkor a forgatás szögét a nóniusz segítségével lehet leolvasni (jobb panel; ebben a beállításban 6,74°)

A fényforrás párhuzamosított fényét a P polarizátor lineárisan polárossá alakítja. A P polarizátor után elhelyezkedő N polarizátor polarizációs síkja a P-ével néhány fokos (d) szöget zár be. A P-nél kisebb méretű N polarizátor csak a fényút egyik felében van elhelyezve, így a megfigyelő távcsőben a látótér két része általában különböző megvilágítású. Ha az A analizátort a fénynyaláb mint tengely körül forgatjuk akkor a P-hez képest a $d/2$ és a 180° + $d/2$, valamint a 90° + $d/2$ és a 270° + $d/2$ szögkülönbségű helyeken a látómező két fele egyező megvilágítású lesz. Az utóbbi két pozícióban a látótér sötétebb.

Vizuális megfigyelésnél a keresztezett polarizátorállás (teljesen sötét látómező) tökéletesen nem állítható be, mivel a keresztezett állás kis környezetében történő változásokat a szem nem tudja felfogni. Ezt a pontatlanságot kerülhetjük el a fentiekben ismertetett félárnyékészleléssel, amikor is a látómező két, egymással határos felét azonos megvilágításúra állítjuk be. Ezzel a technikával könnyen elérhető a $0{,}1^\circ$-os pontosságú beállítás is.

A mérés menete:

Kapcsoljuk be a műszer fényforrását. Keressük meg az egyenlően sötét látótérhez tartozó szöget (nullhelyzet). A mérendő oldatot öntsük buborékmentesen a tartócsőbe, zárjuk a fedőlemezt és töröljük szárazra külső felületüket. Helyezzük a megtöltött tartócsövet a szacchariméterbe és ismételten keressük meg az egyenlően sötét látótérhez tartozó szöget. A megadott összefüggés alapján számítsuk ki az $\alpha_{\mathrm{NaD}}^{20^\circ\,\mathrm{C}}$ fajlagos forgatóképességet.

10.1. Feladatok

Eszközök:

1 db polariméter, 2 db küvetta, 1 és 2 dm hosszúak, mindkét végére rászerelhető fej és tömítés, 1 tálca, 1 törlőkendő, 1 üveg desztillált víz, 4 üveg ismert koncentrációjú cukoroldat, 1 üveg ismeretlen koncentrációjú cukoroldat, 1 táblázat (anyagok optikai aktivitása)

1. Határozza meg a polariméter zéruspontját desztillált víz segítségével!
2. Mérje meg az ismert koncentrációjú oldatok elforgatási szögét mindkét küvettával! Miért célszerű különböző hosszúságú küvettákkal mérni?
3. Ábrázolja az elforgatás szögét a koncentráció függvényében (a két küvettával kapott értékeket ugyanazon a grafikonon), majd határozza meg az oldat fajlagos forgatóképességét! Állapítsa meg a kiadott táblázat alapján, milyen cukorból készült az oldat!
4. Mérje meg az ismeretlen koncentrációjú oldat elforgatási szögét, majd abból határozza meg a koncentrációját!

11. fejezet

Radioaktív sugárzás elnyelődésének vizsgálata

Az ólomtorony és a szcintillációs számláló

A természetes radioaktív anyagok esetében háromféle sugárzást lehet megkülönböztetni. Erre egyszerű kísérlet, hogy ólomtömbbe fúrt üregbe zárt radioaktív preparátumnak a doboz kis nyílásán kilépő sugárzását erős elektromos vagy mágneses tér hatásának vetjük alá. Kimutatható, hogy a sugárnyaláb mágneses térben három részre oszlik: az α-sugarak viszonylag kevéssé és olyan irányban térülnek el, mint a pozitív ionokból álló csősugarak, a β-sugarak eltérése jóval nagyobb, és olyan értelmű, mint az elektronsugaraké, végül a γ-sugarak irányváltozás nélkül haladnak, miként a röntgensugarak.

Az α-részecskék két pozitív elemi töltésű héliumionok (He^{++}-ionok). Az eltérítési mérések alapján az α-részecskék kezdeti sebessége a kibocsátó radioaktív anyagtól függően $1,4 \cdot 10^9\,cm/s - 2,1 \cdot 10^9\,cm/s$, azaz a fénysebességnek kereken 5–7%-a. A sebesség helyett rendszerint a kinetikai energiát ($m_\alpha v^2/2$) adják meg, millió elektronvolt (MeV) egységben. Így, mivel $1\,MeV = 1,602 \cdot 10^{13}$ joule, az α-részecskék kinetikai energiája 4 és 9 MeV között van.

A β-sugárzás az eltérítési kísérletek értelmében elektronokból áll, más szóval a β-részecskék elektronok. Egy meghatározott radioaktív anyag kibocsátotta β-részecskék sebessége tág határok között bármely értéket felvehet (a „sebességspektrum” folytonos), a maximális sebesség egyes anyagok esetében a fénysebesség 99%-át is meghaladja. A β-részecskék maximális kinetikai energiája a kibocsátó anyagtól függően néhány keV és több MeV közötti érték.

A γ-sugárzás a kristályokon fellépő elhajlás és más jelenségek tanúsága szerint igen kis hullámhosszúságú, azaz nagy frekvenciájú elektromágneses sugárzás, illetve nagy energiájú fotonokból, γ-fotonokból (γ-kvantumokból) álló sugárzás. A γ-fotonok energiája rendszerint 0,01–4 MeV között van.

Az α-, β-részecskék és γ-sugarak intenzitása az anyagon való áthaladásuk során – az anyaggal történő kölcsönhatás következtében – csökken. Erősebb ionizáló hatásnak nagyobb abszorpció, azaz kisebb áthatolóképesség felel meg. Nagy, >9 MeV energiájú α-részecskéket kb. 10 cm vastag levegő-, vagy 0,05 mm vastag alumíniumréteg, közepes, >1 MeV energiájú β-részecskéket kb. 4 m-es levegő, vagy 2 mm-es alumíniumréteg teljesen elnyeli. A γ-sugárzás viszont több száz méteres levegő-, vagy több deciméteres alumíniumrétegen is áthatol.

Az α-sugárzás I intenzitása a sugárforrástól mért x távolság függvényében eleinte állandó, majd hirtelen csökken. Azt a távolságot, amelyet az α-részecske az abszorbensben megtesz, hatótávolságnak nevezzük. A közepes hatótávolságot ($d_{1/2}$) azzal a távolsággal definiálják, amelynél a részecskék száma eredeti értékük felére csökken. A β-sugárzás I intenzitása az abszorbens x vastagságának függvényében eleinte exponenciálisan csökken, majd nagyobb távolságban (vagyis a legmesszebb hatoló legnagyobb energiájú β-részecskékre nézve) eléri a zérust. A maximális hatótávolság az a rétegvastagság, amelyen túlra a β-sugarak nem jutnak el. A γ-sugárzásnál az intenzitás exponenciális csökkenése mindvégig fennáll, ezért az előző értelemben vett hatótávolságról nem is lehet beszélni.

11.1. A β-sugárzás hatótávolságának meghatározása

Az alumíniumfóliák behelyezése és kivétele csipesszel történik! A preparátumot nem kell elmozdítani a gyakorlat folyamán!

A radioaktív magok β-sugárzása nagy sebességű elektronokból áll. A β-bomlás során az atommagban egy neutron átalakul protonná és közben egy elektron és egy antineutrínó keletkezik. Az antineutrínó keletkezése miatt a β-részecskék energiája nem lesz jól meghatározott, hanem folytonos energiaeloszlást mutat. A β-spektrum felső határa ($E_{\max}$) azon esetnek felel meg, amikor a teljes energiát az elektron viszi el. Meg kell jegyezni, hogy a β-bomlás során a leányelem (a végmag) gyakran gerjesztett állapotú, ekkor az elektron kibocsátását egy γ-kvantum emissziója követi.

Ha a β-részek anyagon haladnak keresztül, energiájuk lecsökken. A gyengülés három alapvető kölcsönhatás eredménye: a β-részek ionizálják vagy gerjesztik a közeg atomjait (ionizációs veszteség), rugalmas szóródást szenvednek a közeg atommagjain, illetve atomi elektronjain (Coulomb-veszteség), nagyobb energiáknál fékezési sugárzás révén kisugározzák energiájukat (radiációs veszteség).

A hatótávolság az az anyagvastagság, amely ahhoz szükséges, hogy az anyagréteg felületére merőlegesen beeső részecskék teljesen lefékeződjenek.[1]

Ha az abszorbens vastagságának függvényében ábrázoljuk az abszorbensen áthaladt β-részecskék számának a beesők számához viszonyított arányát, az ún. transzmissziós görbét kapjuk. A β-sugárzás intenzitásváltozására közelítőleg az

$$I = I_0 \mathrm{e}^{-\mu x}$$

összefüggés írható fel, ahol I_0, illetve I a sugárzás intenzitása az anyagon való áthaladás előtt és után, x az abszorbens rétegvastagsága [hosszúság], μ a lineáris abszorpciós együttható [hosszúság^{-1}].

Tapasztalat szerint kis rendszámú (Z $\leq$ 13) elemeknél a μ lineáris abszorpciós együttható arányosnak tekinthető az abszorbeáló közeg ρ sűrűségével. Ebből adódóan célszerű a kettő hányadosával számolni:

$$\mu' = \frac{\mu}{\rho},$$

amelynek neve tömegabszorpciós együttható, mértékegysége $\mathrm{m^2/kg}$. A tömegabszorpciós együttható közelítőleg független az abszorbens anyagi minőségétől. Ez szigorúan nem érvényes, de sok esetben a számításoknál megengedhető feltételezés, mivel a Z $\leq$ 13 rendszámú elemeknél a tapasztalat szerint

$$\mu' \approx \frac{35Z}{M_A E_{\max}^{-1,14}},$$

ahol a rendszám körülbelül a tömegszám fele:

$$Z/M_{\mathrm{A}} \propto 0{,}5,$$

ahol M_{A} az abszorbens relatív atomtömege. A Z $\geq$ 14 esetben

$$\mu' \approx \frac{7{,}7Z^{0,31}}{E_{\max}^{-1,14}}$$

azaz nagyobb rendszámú elemeknél már nem tekinthetünk el a rendszámfüggéstől (az anyagi minőségtől). A tömegabszorpciós együttható segítségével definiálhatjuk az elnyelő közeg felületi sűrűségét:

$$x' := \rho x,$$

ekkor

$$\mu\rho = \mu'\rho',$$

vagyis az elnyelési egyenlet

$$I = I_0 \cdot \mathrm{e}^{-\mu' x'}$$

alakba írható. A sugárzás intenzitása exponenciálisan csökken. Az $\ln(I/I_0)$–x (vagy –x') egyenes meredekségéből a μ (vagy μ') abszorpciós koefficiens meghatározható. A meredekségből a felezési rétegvastagság egyszerűen számítható:

$$d_{1/2} = \frac{0{,}693}{\mu},$$

$$d'_{1/2} = \frac{0{,}693}{\mu'}.$$

A valóságban a fenti egyenlet sohasem írja le pontosan a viszonyokat, az $\ln(I/I_0)$–x (–x') függvény nem egyenes, hanem a legtöbb esetben lefelé görbül. Ennek az a magyarázata, hogy az energia csökkenésével a fajlagos ionizáció nő, tehát a gyengülés rohamosabb. Sok esetben a görbe a hatótávolságnak megfelelő rétegvastagság közelében csaknem függőlegesbe megy át. Ilyen esetben a hatótávolság viszonylag pontosan meghatározható. Gyakran előfordul az az eset is, hogy a görbe vége a vízszintes felé hajlik. Ez a β-sugárzást kísérő, nagy áthatolóképességű γ-sugárzás jelenlétére utal.

[1]Ez a mennyiség azon nehéz töltött részecskék esetén tekinthető meghatározottnak, amelyek pályája az anyagban egyenes. Ugyanakkor a mag Coulomb-terében való többszörös szóródás következtében az elektron útja az anyagban zegzugos. Az intenzív szóródás következménye, hogy az egyenlő kezdeti energiájú β-részek különböző mélységet érnek el. A fentiekből érthető, hogy az elektronok hatótávolsága a részecskék energiájának nem olyan egyértelmű függvénye, mint a nehéz töltött részecskéké.

11.2. A β-sugárzás maximális energiájának meghatározása

A β-részecskék maximális energiájának meghatározására a legpontosabb módszer a β-részecskék energiaspektrumának felvétele. Erre a célra különböző spektrométereket alkalmaznak. Ez a módszer azonban nagy pontosságú berendezéseket igényel, ezért azokban az esetekben, amikor $E_{\max}$ igen pontos meghatározása nem követelmény, az abszorpciós módszert alkalmazzuk. Az abszorpciós együttható a sugárzás maximális energiájától függ. Alumíniumban különböző maximális energiájú β-sugárzókkal mérve $\mu' = \mu/\rho$ értékét, a (3) illetve a (4) egyenlet a következő egyszerűbb alakba írható:

$$\mu' = \mu/\rho = 17 \cdot E_{\max}^{-1{,}14}.$$

A D hatótávolság és a maximális energia között az alább felsorolt empirikus összefüggések állnak fenn: Az összefüggésekben az $E_{\max}$ energia MeV-ban, a D hatótávolság g/cm^2, a μ' tömegabszorpciós együttható

$D = \frac{2}{3}E_{\max}^{5/3}$,	ha	$E_{\max} < 0{,}2$
$D = 0{,}407E_{\max}^{1{,}38}$,	ha	$0{,}15 < E_{\max} < 0{,}82$
$D = 0{,}542E_{\max} - 0{,}133$,	ha	$0{,}8 < E_{\max} < 1{,}0$
$D = 0{,}571E_{\max} - 0{,}161$,	ha	$E_{\max} > 1{,}0$

cm^2/g egységben értendő. Az $E_{\max}$ és D a radioaktív anyagra jellemző és nem függ az abszorbeáló anyag anyagi minőségétől (Z $\leq$ 13). A $d = D/\rho$ a ρ sűrűségű (egysége g/cm^3) abszorbens cm-ben mért hatótávolságát adja. Az I. táblázatban néhány fontosabb β-sugárzó izotóp fontosabb paramétereit tüntettük fel.

Izotóp	Felezési idő (nap)	Maximális energia (MeV)
^{45}Ca	165	0,255
^{35}S	88	0,167
^{185}W	75	0,430
^{131}I	8,1	0,606
^{204}Tl	3,8 (év)	0,766

Az abszorpciós görbe felvételénél a β-részek számlálása szcintillációs számlálóval történik. A számláló egy mérőközegből (szcintillátor) és egy fotodetektorból áll: a beérkező elektronok felvillanásokat keltenek a szcintillátorban, amelyeket a fotodetektor elektromos jellé alakít. Ezt elektronikusan feldolgozva visszaalakíthatjuk beütésszámokká, amely megmutatja, hogy hány elektron keltett a közegben jól megfigyelhető felvillanásokat. A mérésnél az alumínium abszorbenseket két „vájattal" a preparátum fölé kell helyezni. A detektor kímélése érdekében a gyakorlat végén a legvastagabb fóliát kell elhelyezni a preparátum fölött két vájattal, és e fölött két vájattal egy második, mégpedig a második legvastagabb fóliát **A preparátumot a gyakorlat folyamán nem kell elmozdítani, az ólomtoronyból kivenni, különösen pedig megérinteni szigorúan tilos!**

11.3. Feladatok

Eszközök: 1 db ólomtorony, 1 db szcintillációs számláló, fóliasorozat

1. Mérje meg a kiadott β-sugárzó preparátum intenzitását az Al-abszorbens rétegvastagságának függvényében! Két perc integrációs időt válasszon! (A bal fölső panelen 120,00 másodpercet kell beállítani, a Time base = sec és a Preset = time beállítása mellett.)

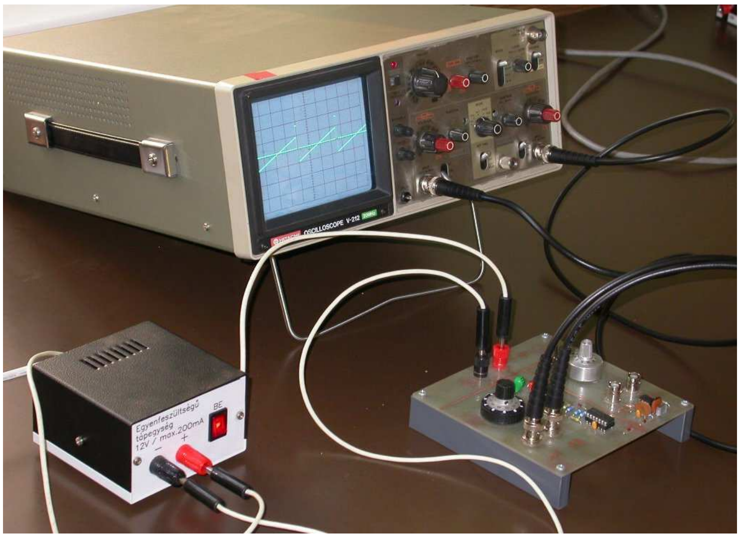
2. Linearizálva ábrázolja az intenzitást az abszorbens rétegvastagságának függvényében! Határozza meg az Al-abszorbens abszorpciós koefficiensét, és a felezési rétegvastagságot!

3. Határozza meg a kiadott preparátum β-sugárzásának tömegabszorpciós koefficiensét, maximális energiáját és D hatótávolságát!

4. D ismeretében számítsa ki a β részecskék hatótávolságát Al-ban és levegőben!

12. fejezet

Jelalakvizsgálat oszcilloszkóppal



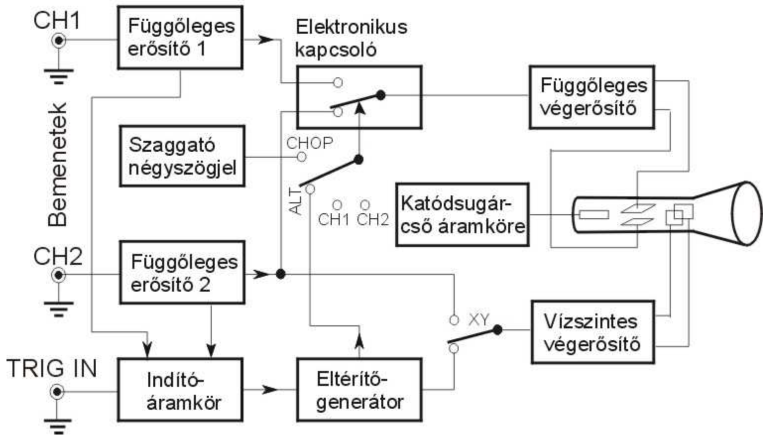
Fűrészjel és impulzusjel megjelenítése oszcilloszkóppal

Az oszcilloszkópok feszültség vagy bármilyen feszültséggé átalakítható mennyiség időbeli változásának vizsgálatára alkalmas mérőműszerek. Képernyőjükön a vizsgált feszültség értékének a függőleges irányú kitérés felel meg, míg az időtengely menti változást a vízszintes kitérés képviseli. A jelalak kirajzolásával az oszcilloszkópok a feszültségmérőknél részletesebb információt képesek nyújtani a vizsgált periodikus jelről, hiszen annak nemcsak az amplitúdóját tudják megjeleníteni, hanem a teljes időfüggését.

12.1. Szerkezeti egységek

Az oszcilloszkóp főbb egységei (12.1. ábra):

- a katódsugárcső és az azt kiszolgáló áramkörök;
- függőleges erősítők, feladatuk a vizsgált jelek megfelelő erősítése;
- eltérítő generátor, amely a vízszintes eltérítésről gondoskodik;
- indító áramkör, mely a megfelelő szinkronizációt végzi.

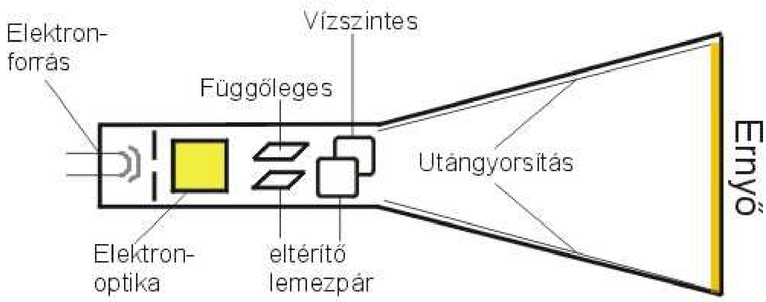


12.1. ábra. Az oszcilloszkóp blokkvázlata

12.1.1. A katódsugárcső

Az oszcilloszkóp megjelenítő egysége – a televízióhoz hasonlóan – az elektronsugárcső (katódsugárcső), míg ugyanezt a televízió esetében képcsőnek nevezzük. Lényeges különbség a két kijelző egység között, hogy az oszcilloszkóp eltérítése szinte kivétel nélkül elektromos, míg a tv-képcső mágneses eltérítésű.

A katódsugárcső fölépítésének vázlatát a 12.2. ábrán láthatjuk. A katódsugárcső izzókatódja elektronnyalábot hoz létre, és azt egy olyan ernyőre fókuszálja, melynek bevonata a becsapódó elektronok hatására fényt bocsát ki. Az elektronnyaláb két eltérítő lemezpár között halad át; ha a lemezpárokra feszültséget adunk, az elektromos tér eltéríti az elektronokat, így a képernyőn máshol jelenik meg képpont. A vízszintes eltérítő lemezpárra adott feszültség értelemszerűen a képpont vízszintes helyzetét, a függőleges lemezpárra adott feszültség pedig a függőleges helyzetet szabja meg.



12.2. ábra. A katódsugárcső

A képalkotás alapelvét a következőképpen érthetjük meg: ha egyik lemezpárra sem adunk feszültséget, akkor megfelelő fókuszálás esetén egy képpontot látunk az ernyőn. Ha a vízszintes elérítő lemezekre most az idővel egyenesen arányosan növekvő feszültséget adunk, akkor a képpont vízszintes irányban az idővel összhangban mozog, pontosabban, mivel az ernyő még egy ideig világít azután is, hogy az elektronsugár továbbment, pont helyett egy vízszintes vonalat látunk. Ha eközben a függőleges lemezpárra ráadjuk az általunk vizsgálni kívánt jelet, akkor összességében a vizsgálandó jel időfüggése jelenik meg az ernyőn, hiszen a képpont vízszintes koordinátája az idővel, a függőleges koordináta pedig a vizsgált jel adott időpontban fölvett értékével arányos.

12.1.2. A függőleges erősítő

A függőleges erősítőrendszer szabja meg, hogy a bemenetre adott feszültség mekkora kitérésnek felel meg az oszcilloszkóp képernyőjén. Ezt rendszerint egy **Volts/div** föliratú kapcsolóval állíthatjuk. Ha ez például az **5** jelzésű állásban van, az azt jelenti, hogy a bemenetre adott 5 V amplitúdójú feszültségnek egy osztás felel meg a képernyőn.

A kapcsoló mellett, vagy a kapcsoló tengelyében általában egy szabályozó potenciométer is található, amellyel az érzékenység folyamatosan állítható (**VARIABLE**). A potenciométer egyik szélső helyzetét **CAL** jelzéssel különböztetik meg; *csak ebben az állásban tekinthető hitelesnek a* **Volts/div** *kapcsolóval beállított érzékenység.*

Az oszcilloszkóp bemenetének közelében találunk egy háromállású kapcsolót (**DC | GND | AC**), amellyel azt szabhatjuk meg, hogy a bemeneti jel hogyan jut az erősítőrendszerbe:

- **DC** állásban bemeneti csatlakozóra vezetett jelek változás nélkül kerülnek a függőleges erősítő bemenetére. *Figyelem: ez nem azt jelenti, hogy ez az állás egyenfeszültségű jelek vizsgálatára használatos! A* **DC** *jelölés arra utal, hogy ha van a jelnek egyenfeszültségű (DC) összetevője, az is változtatás nélkül bekerül az erősítőbe.*
- **GND** állásban a függőleges erősítő bemenete földpotenciálra kerül, azaz az elektronsugarat nem térítjük el függőlegesen. Ezt az állást a referenciaszint beállítására használjuk.
- **AC** állásban a mérendő jel egyenfeszültségű összetevőjét leválasztjuk, így csak a váltakozó feszültségű összetevő kerül az erősítőre. Olyan jelek vizsgálatakor hasznos, amelyeknél kis változás adódik hozzá egy nagy egyenszinthez. Az erősítés növelése nem megoldás ilyenkor, hiszen az az egyenszinthez tartozó eltérítést is megnöveli, így „kilóghat" a kép a képernyőről. Ha viszont az egyenszintet levágjuk, az erősítő már csak a változást fogja kierősíteni. *Figyelem: ez nem azt jelenti, hogy ez az állás váltakozó feszültségű jelek vizsgálatára használatos! Az* **AC** *jelölés arra utal, hogy a jelnek csak a váltakozó feszültségű (AC) összetevője kerül az erősítőbe. Mivel az egyenfeszültség leválasztását végző áramkör óhatatlanul módosítja a jelek alakját is, ezért ezt az állást csak akkor használjuk, ha tényleg szükség van rá!*

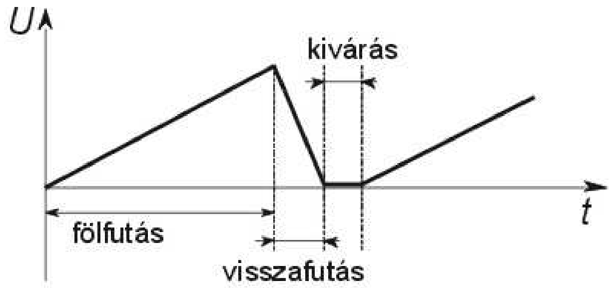
Nemcsak az erősítés és a csatolás módja szabályozható, hanem az is, hogy hol legyen az a referenciaszint a képernyőn, ami a bemenetre adott 0 V feszültségnek felel meg. Az ezt beállító potenciométer fölirata rendszerint **Position**. Ezzel a gombbal függőleges irányban tudjuk mozgatni a képernyőn megjelenő jelalakot.

A gyakorlaton használt oszcilloszkóp úgynevezett *kétcsatornás oszcilloszkóp*, azaz két jel egyidejű vizsgálatára alkalmas. Ennek megfelelően két bemenete van (jelölésük rendszerint **CH1** és **CH2**), mindkettőhöz külön **Volts/div** és **DC | GND | AC** kapcsolókkal.

12.1.3. A vízszintes eltérítőrendszer

A vízszintes eltérítőrendszer feladata, hogy a görbét rajzoló képpontot vízszintesen az idővel arányosan mozgassa. Az oszcilloszkóp leggyakrabban használt üzemmódjában a vizsgált jelek időbeli lefutását vizsgáljuk. Ebben az esetben az elektronsugár vízszintes *(X)* irányú eltérítésére időben lineárisan változó feszültséget, ún. fűrészfeszültséget használunk (12.3. ábra). A fűrészjelet, amelynek fölfutási szakaszának időtartama határozza meg az oszcilloszkópernyőn látható jelrészlet időtartamát, a vízszintes eltérítőrendszerhez tartozó fűrészjel-generátor állítja elő.

A fűrészjelen három tartományt különböztetünk meg, az ún. fölfutást, a visszafutást és a kivárást. A fölfutási szakasz az idővel arányos kitérítést, a kivárási idő az áramköri elemek nyugalmi helyzetbe történő visszaállását, a visszafutás pedig a fűrészjel alaphelyzetből történő indulását biztosítja. Mivel állóképet szeretnénk kapni a képernyőn, ezért a fűrészjel ezen szakaszai periodikusan ismétlődnek: a fölfutási szakasz alatt a jel balról jobbra kirajzolódik a képernyőn, a visszafutási szakasz visszaviszi a sugarat a képernyő bal szélére, és a kivárás letelte után az egész elölről kezdődik. A fűrészjel-generátor vezérli a kivilágító jelkeltőt is, amely az elektronsugarat a visszafutás és a kivárás ideje alatt kioltja, így a visszafutás nem zavarja meg a képalkotást.



12.3. ábra. A fűrészjel alakja

Az eltérítési idő, amely az eltérítő fűrészjel lineárisan fölfutó élének idejével azonos, az oszcilloszkóp előlapján lévő forgókapcsolóval változtatható. Ezzel az idő/osztás (**Time/div**) értékben kalibrált kapcsolóval választhatjuk ki a vizsgálandó jelnek legjobban megfelelő eltérítési sebességet. Ha a kapcsoló például az **1 ms** állásban van, a képernyőn 1 vízszintes osztás 1 ms időtartamnak felel meg. Az idő/osztás kapcsoló mellett ez az egység is rendelkezik az eltérítési sebességet folyamatosan szabályozó (**VARIABLE**), valamint az elektronsugár vízszintes pozicionálását biztosító potenciométerekkel, amelyek funkciója hasonló a 12.1.2. pontban leírtakéhoz.

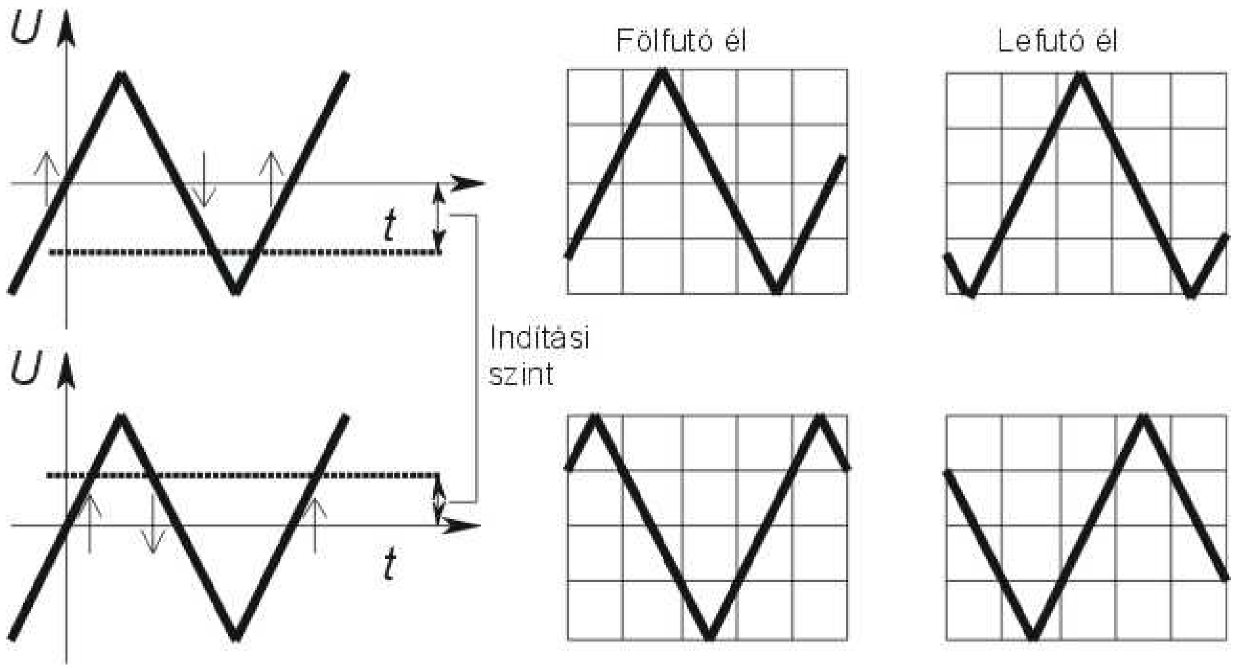
A kétcsatornás oszcilloszkópok képesek a két bemeneti jelet egyidejűleg fölrajzolni a képernyőjükre. Ezt vagy úgy érik el, hogy két külön elektronsugarat használnak *(kétsugaras oszcilloszkópok),* vagy úgy, hogy egyetlen elektronsugarat térítenek el fölváltva az egyik, majd a másik bemeneti jelnek megfelelően. A gyakorlaton használt típusok ez utóbbi csoportba tartoznak. A két jel egyidejű megjelenítésére ezeknél két üzemmód közül választhatunk: vagy nagyfrekvenciával váltakozva hol az egyik, hol a másik jelből rajzolunk ki egy-egy rövid jelrészletet (*chopped* üzemmód – **Chop**), vagy pedig végig kirajzolunk egy teljes periódust az egyik jelből, aztán egy teljes periódust a másikból (*alternate* üzemmód – **Alt**). A **Chop** üzemmód főként kis eltérítési sebességnél célszerű, míg az **Alt** gyorsabb eltérítésnél használatos.

12.1.4. Szinkronizáció

Tekintettel arra, hogy az elektronsugár által keltett fény csak rövid ideig áll fönn, és a vizsgálandó jelek (feszültségek) igen gyorsan változnak, hogy jól láthassuk őket, szükséges a periodikus jeleket újból és újból fölrajzoltatni. Ha ezek az egymás után fölrajzolt jelek nem „fedik egymást”, a képernyőn jobbra vagy balra futó képet láthatunk, ami az ábrát kiértékelhetetlenné teszi. *Tehát arra van szükség, hogy az időeltérítő fűrészjel a vizsgálandó jelnek mindig ugyanabban a pillanatában induljon.* Ez a szinkronizálás az *indító-*, vagy más néven a *triggeráramkör* feladata.

Az indítóáramkör szolgáltatja azokat az impulzusokat, amelyek hatására vége szakad a kivárásnak, és elindul a vízszintes eltérítő rendszer fűrészjelének fölfutási szakasza. Az impulzusok akkor keletkeznek, amikor a vizsgált jel meghalad egy adott feszültségszintet (*indítási-* vagy *triggerszint*). Ilyen módon biztosítható, hogy a vízszintes eltérítés mindig a vizsgált jel ugyanazon részéről induljon. Hogy melyik részéről, azt a fölhasználó az indítási szint beállítására szolgáló potenciométerrel szabályozhatja. A szinkronizációs áramkör azt is képes megkülönböztetni, hogy a vizsgált jel növekedés vagy csökkenés közben lépte-e át az indítási szintet, így azt is megadhatjuk, hogy az indítás a vizsgált jel fölfutó, avagy lefutó éléről történjen-e. E két lehetőség közti különbséget a 12.4. ábra szemlélteti.

Az indítójel különböző forrásokból származhat. Belső indításnál (**INT TRIG**) az indítójel magából a vizsgálandó jelből származik. Külső indítást (**EXT TRIG**) akkor használunk, ha van olyan külső indítójel, amely kijelöli a vizsgálni kívánt szakasz kezdetét. Hálózati indításnál (**LINE TRIG**) az indítójel a hálózati 50 Hz-es váltakozófeszültségből keletkezik.



12.4. ábra. Indítási módok

12.2. A mérés menete

A gyakorlathoz két áramkört használunk: egy fűrészjel-generátort és egy integráló áramkört. E kettő ugyanazon az áramköri panelen kapott helyet, amelyet a 12.5. ábra bal oldalán láthatunk. A panel bal oldali, az ábrán **A** jelzésű részén a fűrészjel-generátort, a jobb oldali, az ábrán **B** jelzést viselő részen az integráló áramkört találjuk. A két áramkör ugyanabból a forrásból veszi a tápfeszültséget, ezt a **T** jelzésű hüvelypárra kell kötni, ügyelve a föltüntetett polaritásra.

12.2.1. A fűrészjel-generátor

A fűrészjel-generátor két műveleti erősítő segítségével van megvalósítva. Az első műveleti erősítő kimenetén (az ábrán az **1** jelzésű csatlakozó) fűrészjelet, a másodikén négyszögjelet figyelhetünk meg. A jelek frekvenciája a **P1** potenciométerrel folytonosan szabályozható.

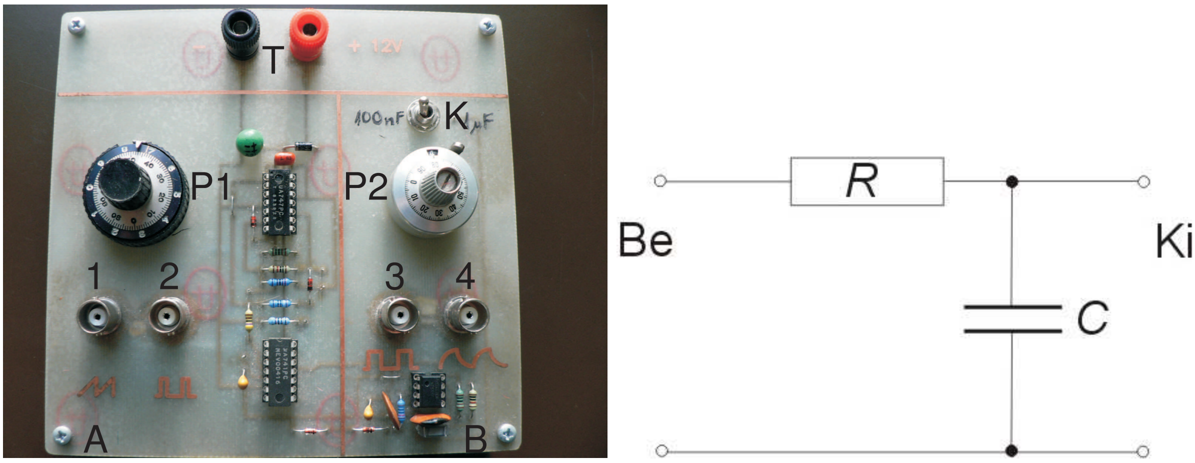
12.2.2. Az integráló áramkör

Az integráló áramkör egy ellenállásból és egy kondenzátorból áll; kimeneti jelének a kondenzátoron mérhető feszültséget tekintjük. Az áramkör elvi rajza a 12.5. ábra jobb oldalán látható.

A kondenzátor föltöltődéséhez, illetve kisüléséhez bizonyos idő szükséges, ezért az integráló áramkör nem képes tetszőlegesen gyors változásokat követni. Ennek következtében a kimeneten más alakú és amplitúdójú jelet kapunk, mint amit a bemenetre kötöttünk. Az amplitúdó és a jelalak megváltozása a jel frekvenciájától és az integráló kört alkotó ellenállás és kapacitás nagyságától függ.

A gyakorlaton a panel jobb oldalán megvalósított integráló áramkört használjuk. A bemenet magán a panelen van bekötve az integráló körbe, de a **3** jelzésű csatlakozón hozzáférhető és oszcilloszkóppal megfigyelhető. A kimenet a **4**-es csatlakozón érhető el. A **P2** jelzésű potenciométer az integráló áramkör ellenállásának értékét szabályozza folyamatosan, míg a **K** kapcsolóval két kondenzátor, egy 100 nF-os és egy 1 µF-os közül választhatunk.

Az integráló áramkör a rugalmas falú csövekben végbemenő lüktető áramlás elektromos modelljének is tekinthető. Ugyanúgy, mint ahogyan a véredények rugalmas fala rugalmas energia formájában tárolja



12.5. ábra. A méréshez használt panel (jelgenerátor és integráló áramkör). Balra: az integráló áramkör elvi rajza

a szív összehúzódásakor a vérnek átadott energia egy részét, majd az összehúzódások közötti nyomásminimumok idején az áramlás fenntartására fordítja azt, az integráló áramkör kondenzátora is tárolja a feszültségimpulzusok alatt általa felvett töltést, és fenntartja azzal a kimenő feszültségszintet, ill. a fogyasztó áramát a feszültségminimumok alatt is.

12.2.3. A fölfutási idő mérése

Fölfutási időnek azt az időtartamot nevezzük, amely alatt a jel teljes amplitúdójának 10%-áról 90%-ára fölfut. A definíció azért ilyen, mert ezt egyszerű mérni: a legtöbb oszcilloszkóp képernyőjén föltüntetik a 10, 90 és 100%-hoz tartozó vonalakat.

A mérés a következőképpen zajlik: a függőleges erősítést kalibrálatlan, folyamatos szabályzási módba kapcsoljuk (lásd 12.1.2. rész), és úgy nyújtjuk, illetve pozicionáljuk, hogy legalsó pontja a 0% jelzésű, míg a legfölső pontja a 100% jelzésű vonalon legyen. Ezután vízszintesen úgy toljuk el a jelet, hogy a megvastagított függőleges vonalat abban a pontban metssze, ahol a 10% jelzésű vonal. Ekkor a fölső, 90% jelzésű vonalon közvetlenül leolvasható a fölfutási idő mint a megvastagított függőleges vonaltól vett távolság.

Belátható, hogy ha az integráló áramkör bemenetére négyszögjelet adunk, a kimenő jel t_f fölfutási ideje a következő összefüggéssel adható meg:

$$t_\mathrm{f} \approx 2{,}2RC, \tag{12.1}$$

ahol R az ellenállás, C pedig a kondenzátor kapacitása.

12.3. Feladatok

1. Vizsgálja meg oszcilloszkópon a fűrészjel-generátor két műveleti erősítőjének kimenetén mérhető jeleket egyidejűleg, az oszcilloszkóp kétcsatornás üzemmódjában! Rajzolja föl a jelalakokat úgy, hogy az idő és a feszültség hitelesen szerepeljen a tengelyeken!

2. Határozza meg a fűrészjel frekvenciáját a **P1** potenciométer állásának függvényében 100 skálarészenként, 1000 skálarészig! Rajzolja föl e függvény képét! Az oszcilloszkópot e mérés alatt célszerű a fűrészjel lefutó éléről triggerelni, mert ez a mérés során nem változik. A periódusidőt a jel ilyen szempontból legjobban definiált pontján határozza meg, azaz két egymást követő lefutás között – ott, ahol a jel a legmeredekebb. A legpontosabb mérés annál az időalapnál végezhető el, amelyik a jel egy periódusát a képernyő majdnem teljes szélességére széthúzza.

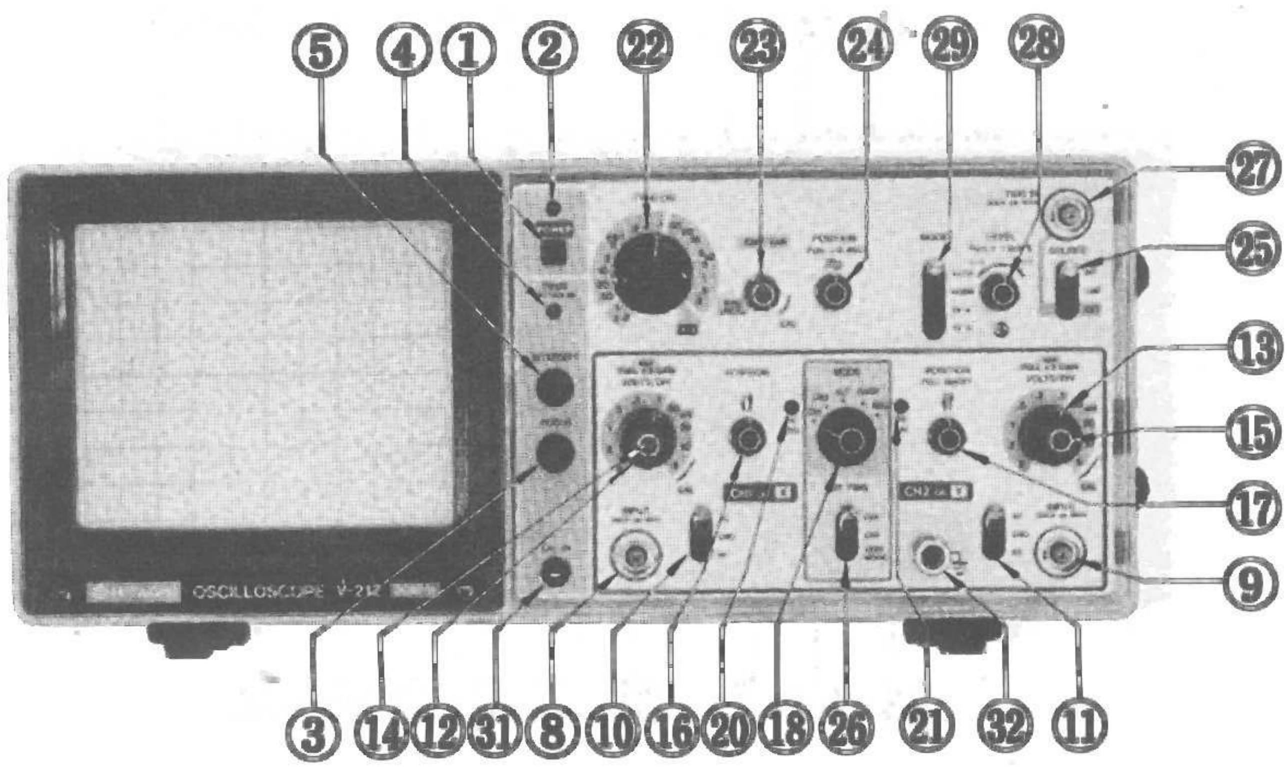
3. Az integráló áramkörbe a **K** kapcsolóval kösse be a 0,1 µF-os kondenzátort! Mérje meg, hogyan függ az integráló kör kimenő jelének fölfutási ideje a potenciométer állásától! A potenciométer értékállítójának 300 skálarészes értékéig növelje az integráló áramkörbe kötött ellenállást 30 skálarészenként, és ábrázolja a fölfutási időt az ellenállás függvényében! A potenciométer 10 kΩ-os, 1000 skálarészre osztott skálája lineáris, ezért 1 skálarésznek 10 Ω felel meg. A görbe alapján, az (12.1) képlet felhasználásával határozza meg a kondenzátor pontos kapacitását!

4. Az integráló áramkörbe most az 1 µF-os kondenzátort kösse be! Határozza meg, hogyan változik az integráló áramkör kimenő jelében a váltóáramú komponens csúcstól csúcsig mért amplitúdója a potenciométer állásának függvényében! A potenciométer értékállítójának 0-tól 1000 skálarészes értékéig növelje az áramkörbe kötött ellenállást 100 skálarészenként!

   Az oszcilloszkópot e mérés alatt célszerű a négyszögjel-generátor kimenetéről, kívülről triggerelni, mert az egyre kisebb amplitúdójú jel nem jó triggerforrás.

   Ábrázolja az amplitúdót az RC időállandó függvényében! Milyen következtetéseket tud levonni tapasztalataiból a rugalmas falú csövekben végbemenő lüktető áramlásra vonatkozóan?

Függelék: a Hitachi V-212 típusú katódsugár-oszcilloszkóp



Az oszcilloszkóp főbb kezelőszerveit az alábbiakban ismertetjük.

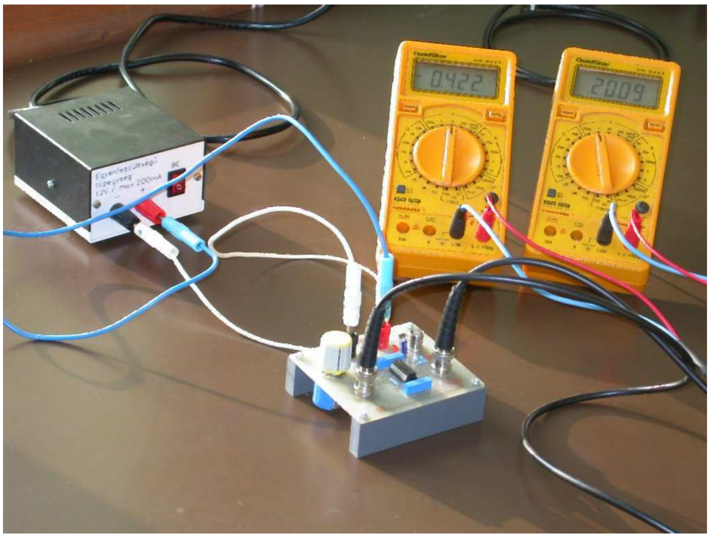
- **POWER (1):** hálózati kapcsoló.
- **FOCUS (3):** miután az **INTENSITY (5)** potenciométerrel beállítottuk a megfelelő fényerőt, a **FOCUS (3)** gombbal a képernyőn megjelenő rajzolat élessége állítható.

- **INPUT (8)** és **INPUT (9):** a függőleges erősítők BNC-csatlakozóval ellátott bemenetei; a **INPUT (8)** bemenet egyúttal az elektronsugár külső jellel történő x irányú eltérítését is szolgálja, ha a **TIME/DIV (22)** kapcsolót az `X-Y` jelzésű üzemmódba kapcsoljuk.
- **VOLTS/DIV (12, 13):** ezekkel a fokozatkapcsolókkal az egyes bemenetekre vitt jel feszültségének hiteles mérési tartományát állíthatjuk be a kapcsolók tengelyében elhelyezkedő szabályozó gombok **(14, 15)** jobb szélső `CAL` állásában.
- **(14, 15):** ezek a szabályozó gombok az előző pontban **(12, 13)** említett mérési tartomány folyamatos (de nem hiteles) beállítására szolgálnak. Ha ezek a gombok kihúzott állapotban vannak, akkor a megfelelő csatornán a függőleges eltérítés a **VOLTS/DIV (12, 13)** kapcsolóval beállított érték ötszörösére növekszik – ezzel érhető el a maximális 1 mV/osztás érzékenység.
- **POSITION (16, 17):** az oszcilloszkóp ernyőjén látható kép függőleges pozicionálására szolgáló gombok.
- **POSITION (17):** ha ez a gomb kihúzott állapotban van, akkor az **INPUT (9)** bemenetre adott jel polaritása a képernyőn ellenkezőjére változik.
- **AC-GND-DC (10, 11):** a bemeneti csatolás módjának választókapcsolói; `AC` állásban a jel egyenáramú komponense nem jut az eltérítő erősítőbe; `GND` állásban a függőleges eltérítő erősítő bemenete földelt állapotba kerül; `DC` állásban a jel közvetlenül jut az eltérítő erősítőbe.
- **MODE (18)**: üzemmód-kiválasztó kapcsoló:
  - `CH1`: csak az első csatorna jele jut az ernyőre;
  - `CH2`: csak a második csatorna jele jut az ernyőre;
  - `ALT`: a két csatorna jele felváltva jut az ernyőre (általában rövid eltérítési idők esetén használatos);
  - `CHOP`: a két csatorna jele kb. 250 kHz szaggatási frekvenciával jut az ernyőre (általában hosszabb eltérítési idők alkalmazása esetén használatos);
  - `ADD`: az első és második csatorna jelének algebrai összege jelenik meg az ernyőn.
- **TIME/DIV (22):** ezzel a fokozatkapcsolóval a vízszintes eltérítő rendszer hiteles időalapját állíthatjuk be az **SWP VAR(23)** szabályozó gomb jobb szélső, `CAL` állásában; ha a készülék vízszintes eltérítését az **INPUT (9)** csatornára vitt külső jellel kívánjuk vezérelni, akkor a fokozatkapcsolót `X-Y` állásba helyezzük.
- **SWP VAR(23):** ezzel a gombbal az előző pontban említett időalap folyamatos (de nem hiteles) beállítását végezhetjük el.
- **POSITION (24):** ez a szabályozó gomb az oszcilloszkóp ernyőjén látható kép vízszintes pozicionálására szolgál; a gomb kihúzott állapotában az eltérítési idő tizedrésze a **TIME/DIV (22)** fokozatkapcsolóval kiválasztott értéknek.
- **LEVEL (28):** az indítási (triggerelési) szint szabályzógombja; kihúzott állapotában a triggerelés a jel negatív meredekségű szakaszához igazodik.
- **MODE (29):** a triggerelési mód beállítókapcsolója:
  - `AUTO`: ha a triggerelés forrásjele nem éri el az indítási szintet, az indítás bizonyos idő elteltével automatikusan megtörténik;
  - `NORM`: az indítás csak a beállított (belső vagy külső) triggerelési forrásból történik, ha ez nem éri el az indítási szintet, nincs indítás;
  - `TV-V`: televíziókészülék vertikális,
  - `TV-H`: televíziókészülék horizontális jelének vizsgálata esetén használatos.

- **SOURCE (25):** triggerelési forrás választókapcsolója:
  - `INT`: az indítójel az **INT TRIG (26)** kapcsolóval kiválasztott jelből keletkezik;
  - `LINE`: az indítójel a hálózati 50 Hz-es váltófeszültségből keletkezik;
  - `EXT`: az indítójel külső forrásból, az **EXT TRIG IN (22)** bemenetre vitt jelből keletkezik.
- **INT TRIG (26):** a belső triggerelési mód választókapcsolója:
  - `CH1`: az indítójel forrása az első csatorna jele;
  - `CH2`: az indítójel forrása a második csatorna jele;
  - `VERT MODE`: az indítójel forrása felváltva a két bemenő csatorna jele (ezt akkor használjuk, ha a két bemenetet egyszerre, egymástól függetlenül vizsgáljuk).
- **TRIG IN (27):** a külső forrásból származó triggerjel BNC-csatlakozóval ellátott bemenete.

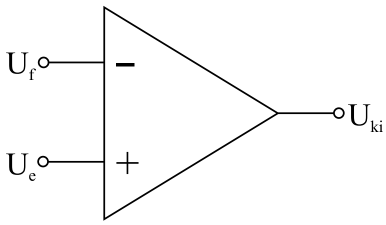
13. fejezet

A műveleti erősítők



Logaritmikus erősítő tanulmányozása

A műveleti erősítő olyan elektronikus áramkör, amely a két bemenete közötti potenciálkülönbséget igen nagy mértékben fölerősíti. A műveleti erősítő az analóg elektronika legfontosabb, univerzális alapeleme, amely szinte minden elektronikai feladat – összeadás, integrálás, differenciálás, szűrés, oszcillátor, áramgenerátor – megvalósításában fontos szerepet játszik.



13.1. ábra. A műveleti erősítő rajzjele

A műveleti erősítő rajzjele a 13.1. ábrán látható. A „+”-szal jelölt bemenet neve *egyenes* (más néven *neminvertáló*) *bemenet*, míg a „-” jelzésű bemenetet *fordító* (más néven *invertáló*) *bemenetnek* nevezzük.

A műveleti erősítők tranzisztorokból, diódákból, ellenállásokból és kondenzátorokból épülnek föl, azonban fölépítésüket a velük dolgozó tervezőnek általában nem szükséges ismernie. A műveleti erősítős kapcsolások tervezése gyakorlatilag az alábbi alapszabályokból megérthető:

1. Az ideális műveleti erősítő U_{ki} kimeneti feszültsége a következő képlettel adható meg:

$$U_{\mathrm{ki}} = A_u \cdot (U_{\mathrm{e}} - U_{\mathrm{f}})\,, \tag{13.1}$$

   ahol U_{e} az egyenes, U_{f} a fordító bemeneten mérhető feszültség, A_u pedig az erősítő úgynevezett *nyílthurkú erősítését* jelöli. Ideális műveleti erősítőre a nyílthurkú erősítés értéke végtelen, ám a valóságos műveleti erősítőknél is igen nagy érték (10^4–10^6).

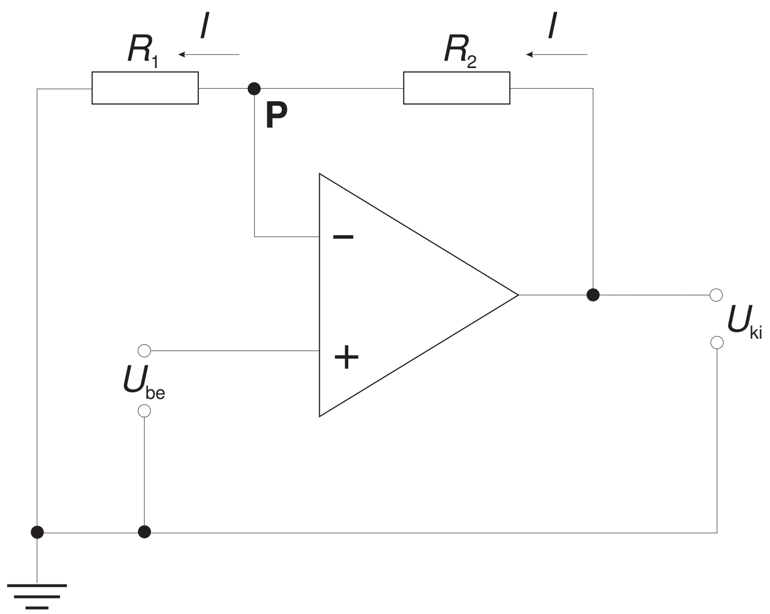
2. Az ideális műveleti erősítő bemenetein nem folyik áram. A valóságos műveleti erősítőknél a bemeneten folyó áramok értéke tipikusan nA nagyságrendű, a kis bemenő áramú erősítők esetében néhány pA.

13.1. A visszacsatolás

A *visszacsatolás* általános esetben az, amikor egy a szabályozó egység kimenő jelével arányos jelet visszavezetünk a szabályozó egység bemenetére. Ha a rendszer olyan, hogy a kimeneti jel növekedése tovább növeli a kimeneti jelet, akkor *pozitív,* ha pedig olyan, hogy a kimeneti jel növekedése csökkenti a kimenő jelet, akkor *negatív visszacsatolásról* beszélünk. A pozitív visszacsatolás öngerjesztő folyamatokat indukál, míg a negatív visszacsatolás rendszerek stabilizálására használatos.

A műveleti erősítő esetében visszacsatolás akkor valósul meg, amikor az erősítő kimenetét közvetlenül vagy valamilyen áramköri elemen keresztül visszakötjük valamelyik bemenetre. Ha ez a bemenet az egyenes bemenet, akkor a visszacsatolás pozitív, ha pedig a fordító, a visszacsatolás negatív. Ezt a (13.1) egyenletből könnyen láthatjuk, ha az egyenes, illetve a fordító bemenet feszültségének a helyére egy a kimenő feszültséggel arányos mennyiséget helyettesítünk.

13.2. Az egyenes erősítő



13.2. ábra. Az egyenes erősítő

A 13.2. ábrán látható kapcsolást *egyenes* vagy más néven *lineáris neminvertáló erősítőnek* nevezzük. A működése a bevezetőben ismertetett szabályokból könnyen megérthető: mivel az ideális műveleti erősítő bemenő áramai nullák, azaz a **P** jelzésű csomópontnál nem folyik el áram a fordító bemenet irányába, az R_1 és R_2 ellenálláson ugyanaz az I áram folyik. Az R_1 és R_2 ellenállásokból alkotott lánc egyik kivezetése földpotenciálon, azaz 0 V-on van, a másik kivezetés pedig a kimenetre van kötve, így az áramot a következőképpen számolhatjuk:

$$I = \frac{U_{\mathrm{ki}}}{R_1 + R_2}. \tag{13.2}$$

Ennek fölhasználásával a fordító bemenet feszültsége:

$$U_{\mathrm{f}} = I \cdot R_1 = U_{\mathrm{ki}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \tag{13.3}$$

Mivel ennél a kapcsolásnál az egyenes bemenet feszültségét tekintjük bemenő feszültségnek ($U_{\mathrm{be}} = U_{\mathrm{e}}$), a (13.1) egyenlet az előző eredményeket behelyettesítve a következő alakot ölti:

$$U_{\mathrm{ki}} = A_u \cdot \left(U_{\mathrm{be}} - U_{\mathrm{ki}} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right). \tag{13.4}$$

Ezt átrendezve:

$$U_{\mathrm{be}} = U_{\mathrm{ki}} \cdot \left(\frac{1}{A_u} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right). \tag{13.5}$$

Az egyenes erősítő visszacsatolt erősítését a következőképp definiáljuk: $A := U_{\mathrm{ki}}/U_{\mathrm{be}}$. U_{be} fönti kifejezését behelyettesítve a következőt kapjuk:

$$A = \left(\frac{1}{A_u} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)^{-1}. \tag{13.6}$$

Ha tekintetbe vesszük, hogy az ideális műveleti erősítő nyílthurkú erősítése végtelen, $1/A_u \approx 0$ adódik. Ezt kihasználva az egyenes erősítő visszacsatolt erősítése:

$$A = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)^{-1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}. \tag{13.7}$$

Vegyük észre, hogy az erősítést kizárólag a visszacsatoló ellenállások határozzák meg.

13.3. A logaritmikus erősítő

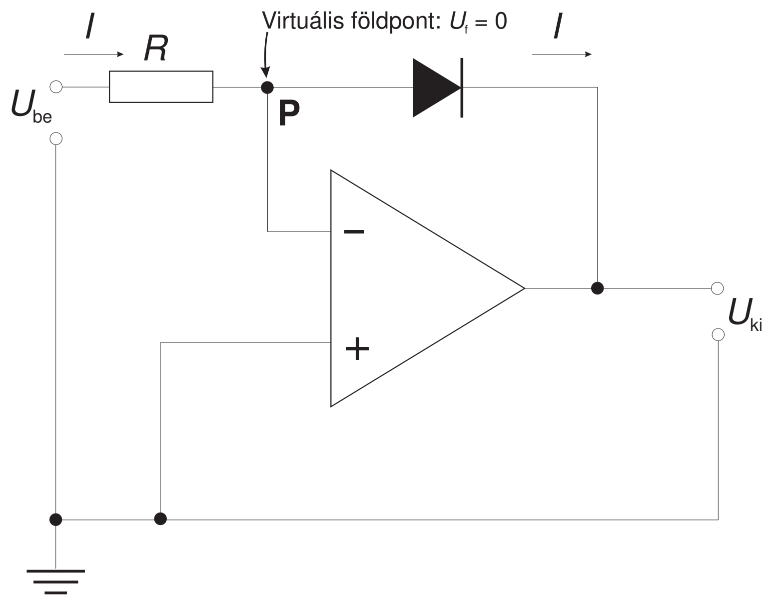
A 13.3. ábrán az úgynevezett *logaritmikus erősítő* rajza látható. Ahhoz, hogy a logaritmikus erősítő működését megérthessük, először be kell látnunk, hogy olyan kapcsolások esetén, ahol az egyenes bemenet feszültsége 0, és negatív visszacsatolást valósítunk meg, a fordító bemenet feszültsége is 0. A (13.1) egyenletet átrendezve, és tekintetbe véve, hogy az ideális műveleti erősítő nyílthurkú erősítése végtelen, a következőt kapjuk:

$$U_{\mathrm{e}} - U_{\mathrm{f}} = \frac{U_{\mathrm{ki}}}{A_u} \approx 0, \tag{13.8}$$

azaz negatív visszacsatolásnál a két bemenet feszültsége közti különbség eltűnik, a fordító bemenet az egyenes bemenetre kötött feszültséget követi. Ha az egyenes bemenetet a földre kötjük, a (13.8) egyenlet szerint a fordító bemenet feszültsége is 0 lesz. Ezt úgy szokás megfogalmazni, hogy ilyenkor a fordító bemenet *virtuális földpont*.

Mivel a műveleti erősítő bemenő árama igen kicsiny, ezért a **P** jelzésű csomópontnál nem folyik el áram a fordító bemenet irányába, azaz az R ellenálláson és a diódán ugyanaz az I áram halad keresztül. Ismeretes, hogy egy diódán átfolyó I áram és a diódán eső U feszültség között a következő összefüggés áll fönn:

$$I = I_0 \left(\mathrm{e}^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right), \tag{13.9}$$



13.3. ábra. A logaritmikus erősítő

ahol I_0 és U_T állandók. Szobahőmérsékleten U_T értéke kb. 26 mV, ami a legtöbb esetben jóval kisebb U értékénél, így az exponenciális kifejezés értéke nagy lesz, ami mellett az 1 elhanyagolható:

$$I \approx I_0 e^{\frac{U}{U_T}}. \tag{13.10}$$

Ebből a diódán eső feszültséget kifejezve:

$$U \approx U_T \ln\left(\frac{I}{I_0}\right). \tag{13.11}$$

Ha tekintetbe vesszük, hogy a fordító bemenet virtuális földpont:

$$I = \frac{U_{\mathrm{be}}}{R}, \tag{13.12}$$

másrészt

$$U_{\mathrm{ki}} = -U, \tag{13.13}$$

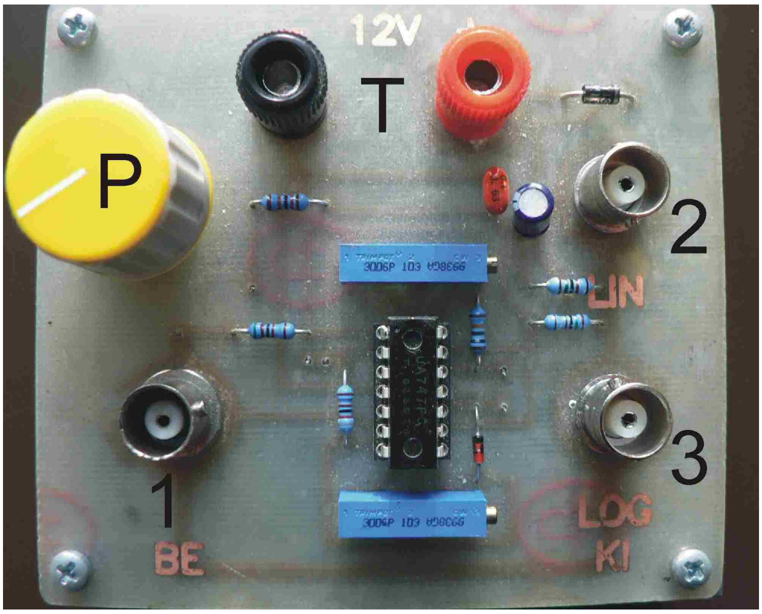
ahol U a diódán eső feszültséget jelöli. Ezt behelyettesítve a (13.11) egyenletbe, a következőt kapjuk:

$$U_{\mathrm{ki}} = -U_T \ln\left(\frac{U_{\mathrm{be}}}{I_0 R}\right), \tag{13.14}$$

ha $U_{\mathrm{be}} > 0$. Ez azt jelenti, hogy *a kimenő feszültség a bemeneti feszültség logaritmusával lesz arányos.*

13.4. Feladatok

A gyakorlaton az egyenes erősítő és a logaritmikus erősítő ugyanazon a panelen található (lásd 13.4. ábra). A két műveleti erősítő ugyanazt a tápfeszültséget használja (ezt az ábrán **T**-vel jelölt hüvelypárra kell kötni, polaritáshelyesen) és ugyanazt a bemenő feszültségjelet erősíti. Ez a jel az ábrán **P**-vel jelölt potenciométerrel 0-tól kb. 200 mV-ig változtatható. A bemenő jel értékét egy digitális voltmérővel mérjük az **1** jelzésű csatlakozón. Ugyancsak digitális voltmérővel mérjük az erősítők kimeneti feszültségét: a **2** jelzésű csatlakozón az egyenes erősítőét, a **3** jelzésű csatlakozón a logaritmikus erősítőét.



13.4. ábra. A műveleti erősítőket tartalmazó panel

1. Mérje meg az egyenes erősítő kimenő feszültségét a bemenő feszültség függvényében! A bemenő feszültséget 0-tól 200 mV-ig 10 mV-onként növelje! Ábrázolja az $U_{\mathrm{ki}}(U_{\mathrm{be}})$ függvényt, és a kapott egyenes meredekségéből határozza meg az A visszacsatolt erősítést!

2. A logaritmikus erősítő vizsgálatához készítsen logaritmikus feszültségbeosztást, azaz számítsa ki azon feszültségértékeket, amelyek logaritmikus skálán egyenletesen helyezkednek el a megadott tartományon. Ez azt jelenti, hogy az egymást követő U_i feszültségekre

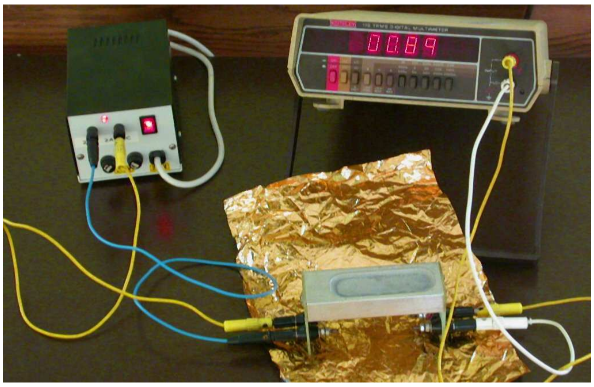
$$\ln(U_{i+1}) - \ln(U_i) = \text{állandó}.$$

   A feszültségértékeket 3 mV és 160 mV között, 12 pontban számolja ki!

3. Mérje meg a logaritmikus erősítő kimeneti feszültségét a bemeneti feszültség előző feladatban kiszámolt értékeinél! Ne törekedjen mindenáron arra, hogy *pontosan ezeket* az értékeket állítsa be a potenciométerrel – hiszen ez majdhogynem lehetetlen feladat –, de a táblázatában ne az előre kiszámolt értékeket rögzítse, hanem azokat, amelyeket ténylegesen sikerült beállítani! Alkalmasan választott linearizálási eljárással ellenőrizze, hogy valóban logaritmikus-e az erősítő! Határozza meg U_T értékét!

14. fejezet

Testek fűtési és hűtési kinetikájának tanulmányozása



A mérés eszközei és összeállítása

Tekintsünk egy testet, amely termikus (és csakis olyan) kölcsönhatásban áll (a sajátjánál jóval nagyobb hőkapacitású) környezetével, azaz hő formájában állandó energiatranszport zajlik le közöttük! Ha nincsenek termikus egyensúlyban (vagyis a test T_t hőmérséklete eltér környezetének T_k hőmérsékletétől), akkor a test melegszik vagy hűl. (Ha $T_\mathrm{t} < T_\mathrm{k}$, és emiatt a test nagyobb (hő)teljesítményt vesz fel környezetéből, mint amekkorát annak lead, tehát nettó hőfelvétele pozitív; ha $T_\mathrm{t} > T_\mathrm{k}$ a test környezetének leadott (hő)teljesítménye meghaladja az abból felvettet, vagyis nettó hőfelvétele negatív). A hőmérséklet mindaddig változik, míg a hőmérsékletek kiegyenlítődése meg nem teremti a termodinamikai egyensúlyt. Minél nagyobb az adott időpillanatban a test (előjeles!) nettó hőleadásának teljesítménye, hűlése ill. melegedése annál gyorsabb.

Minthogy a kinetikát a rendszer (hőtani) jellemzői határozzák meg, a kinetika analíziséből e jellemzőkre következtetni lehet.

A hőtranszport három jól ismert formájában (hővezetés, hőáramlás és hősugárzás) történő hőátadás teljesítményére jellemző, hogy a teljesítmény az első kettő esetében széles hőmérséklet-tartományban lineárisan függ a $T_\mathrm{t} - T_\mathrm{k}$ hőmérsékletkülönbségtől (és a test f felületétől)

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -\mathrm{konst} \cdot (T_\mathrm{t} - T_\mathrm{k}),$$

míg a sugárzás esetében a hőmérsékletfüggés sokkal erősebb:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -\mathrm{konst} \cdot (T_\mathrm{t}^4 - T_\mathrm{k}^4).$$

(Megjegyzés: noha e feladatlapon a hőmérsékletet T-vel jelöljük (hogy a t időtől megkülönböztessük), az utolsó formula kivételével nem szükséges abszolút hőmérsékletet használni, a hőmérsékletet megadható °C egységben (a hőérzékelők gyári adatlapjain is leggyakrabban így szerepel).

Ha $(T_\mathrm{t} - T_\mathrm{k})/T$ elég kicsi, akkor még a sugárzásos hőátadás is közelíthető a $T_\mathrm{t} - T_\mathrm{k}$ lineáris függvényével, így ilyen körülmények között közelítőleg a teljes hőtranszport teljesítménye is a $T_\mathrm{t} - T_\mathrm{k}$ lineáris függvénye,

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -\kappa' \cdot (T_\mathrm{t} - T_\mathrm{k}).$$

Itt a konstanst κ'-vel jelöltük, ez a három fajta hőcserére vonatkozó egyesített hővezetőképesség.

Ha a testet (külső forrásból származó energiával, pl. elektromos fűtőtest segítségével) még fűtjük is, akkor a hűlés/melegedés sebességét meghatározó energiamérlegbe természetesen a fűtés (pillanatnyi) teljesítményét is bele kell számítani. Ha a Q belső energia helyett rögtön a $T_\mathrm{t} = Q/c$ hőmérsékletet vezetjük be az egyenletekbe,

$$\frac{\partial T_\mathrm{t}}{\partial t} = \frac{P}{c} - \kappa \cdot (T_\mathrm{t} - T_\mathrm{k}),$$

ahol P a fűtés teljesítménye (J/s), c pedig a test hőkapacitása (J/K). Az egyenlet első tagja a fűtést írja le, ezért pozitív, a második a hűlést, ezért negatív. Ezt a differenciálegyenletet ebben a formában is könnyű megoldani, de a test melegedése/hűlése szempontjából tanulságosabb, ha az alábbi három, tovább egyszerűsített egyenletet vizsgáljuk.

Amikor a test hőmérséklete a környezetéhez hasonló, és csak éppen elkezdjük melegíteni, $(T_\mathrm{t} - T_\mathrm{k})$ közel 0-nak vehető, így ettől a tagtól eltekinthetünk. Ebben az esetben

$$\frac{\partial T_\mathrm{t}}{\partial t} = \frac{P}{c},$$

vagyis a hőmérséklet változása kizárólag azért következik be, mert a fűtőteljesítmény növeli a belső energiát. A melegedés első szakaszának képe tehát egy P/c meredekségű egyenes.

Ha a fűtést most kikapcsoljuk, a test melegebb, mint a környezete, viszont a fűtőteljesítmény 0. Ekkor a már ismert

$$\frac{\partial T_\mathrm{t}}{\partial t} = \frac{\partial T_\mathrm{t} - T_\mathrm{k}}{\partial t} = -\kappa \cdot (T_\mathrm{t} - T_\mathrm{k})$$

egyenlethez jutunk. Ennek megoldása egy exponenciális függvény (hiszen ez az a függvény, amelynek deriváltja saját magának egy konstansszorosa), a megoldás alakja

$$T_\mathrm{t} = T_\mathrm{k} + e^{-\kappa \cdot t},$$

ezt logaritmizálva

$$\ln(T_\mathrm{t} - T_\mathrm{k}) = -\kappa \cdot t.$$

Összefoglalva, a hűlési szakaszon a hőmérsékletkülönbség logaritmusának képe egy $-\kappa$ meredekségű egyenes.

Abban az esetben, ha a melegítést „végtelen" ideig folytatjuk, a hőfelvétel és a hőleadás egyensúlyba jut. Ebben az esetben a hőmérséklet elér egy konstans T_max egyensúlyi értéket. Vagyis, tha $T_\mathrm{t} = T_\mathrm{max}$, $\frac{\partial T_\mathrm{t}}{\partial t} = 0$, ezért

$$\kappa \cdot (T_\mathrm{max} - T_\mathrm{k}) = \frac{P}{c}.$$

Ebből az összefüggésből T_max könnyen kiszámítható,

$$(T_\mathrm{max} - T_\mathrm{k}) = \frac{P}{\kappa c}.$$

Az előző három eredmény birtokában megállapíthatjuk, hogy nem kell végtelen ideig melegíteni a testet ahhoz, hogy az egyensúlyi hőmérsékletét meghatározzuk, hiszen elegendő az előbb meghatározott két meredekséget elosztani egymással,

$$(T_\mathrm{max} - T_\mathrm{k}) = \frac{P}{\kappa c} = \left(\frac{\partial (T_\mathrm{t} - T_\mathrm{k})}{\partial t}\right)\Big|_{T_\mathrm{t} \approx T_\mathrm{k}, P>0} \Bigg/ \left(\frac{\partial \ln(T_\mathrm{t} - T_\mathrm{k})}{\partial t}\right)\Big|_{T_\mathrm{t} >> T_\mathrm{k}, P=0}.$$

Az emberi test hőegyensúlyának fenntartásában a párologtatásnak (verítékezés) fontos szerepe van. Baleseti sérültek sugárzásos hőleadását gyakran a beteg mentőfóliába burkolásával csökkentik (pl. a hegyi mentők). A mentőfólia (alumíniumréteggel bevont műanyag hártya) az infravörös sugárzás nagy részét (kb. 80%) visszaveri, emellett az áramlásos hőveszteséget is mérsékli. Az emberi test hőszabályozásának e két lehetőségét vizsgáljuk most.

Méréseinkhez egy műanyag lábakon álló alumíniumtömböt készítettünk (a továbbiakban: a „test”). A test az alulról rácsavarozott teljesítményellenálláson (ellenállása 15Ω, amelynek hőmérsékletfüggése a vizsgált hőmérséklettartományban elhanyagolható) átvezetett árammal fűthető („FUTES” feliratú banánhüvelyek, a polaritás tetszőleges); hőmérsékletét a bele fúrt lyukban elhelyezett termoellenállással mérhetjük. Az alkalmazott termoellenállás hőmérsékleti együtthatója pozitív (ún. PTK termoellenállás), vagyis ellenállása hőmérsékletének emelkedésekor nő; polaritásérzékeny, csatlakozói a „TERM+” ill. „TERM” feliratú (piros ill. fekete) banánhüvelyek. A viszonylag rossz hővezetőképességű műanyag lábak megakadályozzák, hogy a hővezetés túlsúlyba kerüljön a hőcsere többi fajtájához képest.

Készülékünk a fűtés/hűlés kinetikájának tanulmányozására készült, ennek valóságos körülményeit jól modellezi. Éppen emiatt azonban nem várható el tőle, hogy a kinetikát befolyásoló paraméterek (pl. hőkapacitás, párolgáshő) értékeit olyan pontosan meg tudjuk határozni, mint az ezek mérésére kifejlesztett speciális kalorimetriás módszerek.

Megjegyzések: A termoellenállás 175 °C felett tönkremegy, ezért a biztonság kedvéért soha ne melegítse fel annyira, hogy $R(T)$ ellenállása jelentősen meghaladja a 2 kΩ értéket! A felmelegített testet mindig a lábainál fogjuk meg, különben égési sérülést okozhat! A test elektromos alkatrészei (pl. a termoellenállás) nem vízálló szigetelésűek, ezért azokra nem kerülhet víz, a testet (pl. hűtés céljából) ne tegye vízbe! A felmelegített test viszonylag lassan hűl le, ami sok idejét elrabolhatja, ezért a fűtés bekapcsolása előtt jól gondolja meg, nem maradt-e még valami szobahőmérsékleten elvégzendő teendője!

14.1. Feladatok

Eszközök: 1 db test, 1 db árammérő, 4 vezeték, 1 alumíniumfólia

1. Vegye fel a test fűtési kinetikáját! Csavarja a testet a hőleadást csökkentő fóliába, és mérje meg a termofeszültség $V(T)$ értékét szobahőmérsékleten! Ezután kapcsolja be a fűtést (kösse a fűtőellenálláshoz a 24 V -os tápegységre csatlakozó kábeleket) 15 percre, és közben percenként mérje meg $V(T)$ értékét!
2. Mérje ki a test hűlési kinetikáját: az 1.1 pontban felmelegített testet fűtés nélkül hagyja a fóliában, és engedje hűlni 20 percig, ezalatt percenként mérje meg $V(T)$ értékét!
3. Távolítsa el a fóliát a testről (vigyázat, forró!), csap alatt teljesen hűtse le a testet, s törölje szárazra!
4. Pipettázzon 3 cm^3 vizet a test tetején lévő hengeres bemélyedésbe, és – immár fólia nélkül – ismét melegítse addig, amíg a víz felforr (kb. 17 perc), és jegyezze a termofeszültségeket.
5. Ismét hűtse 15 percig a testet.
6. A víz felforrása miatt a második esetben 100 °C értéknél megállt a melegítés, állapítsa meg az ehhez tartozó termofeszültséget! A szobahőmérséklet és a víz forráspontja közti különbség ismeretében állapítsa meg, hogy 1 mV termofeszültség hány fok hőmérsékletkülönbségnek felel meg! Ennek alapján számítsa át az összes mért termofeszültség-értékeket fokokba ($T_t - T_k$)! A hűlési szakaszokon számítsa ki a hőmérséklet-különbség logaritmusát is!
7. Ábrázolja a hőmérséklet időfüggését a melegedési szakaszokon, és a hőmérsékletkülönbség természetes alapú logaritmusát a hűlési szakaszokon! Olvassa le a meredekségeket!
8. Mennyi a test egyensúlyi hőmérséklete szárazon, fóliába csavarva; és mennyi vizesen, fólia nélkül? Mi a különbség oka?

A. Függelék

Felületi feszültség mérése

Tartalék gyakorlat!

A folyadékok felszínén lévő molekuláknak kevesebb szomszédja van, mint a folyadék belsejében. Ezért a felszínen lévő molekulák kevésbé kötöttek, azaz magasabb energiaszinten vannak a folyadék belsejéhez képest. Ezért a folyadék felszínén a felszínre merőleges irányú erő hat. Ez az erő alakítja ki például a cseppek gömb alakját (súlytalanságban, vagy kis méret esetén), illetve ez az erő olvasztja egybe az egymásnak ütköző folyadékcseppeket.

Felületi feszültségen a folyadék felszínén az egységnyi $\mathrm{d}l$ vonaldarabra eső $\mathrm{d}F$ erőt értjük. Ez az erő a folyadékfelszín érintősíkjában, az érintőre merőlegesen hat. A felületi feszültség definíciója tehát a következő:

$$\alpha = \frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}l}.$$

A fentivel ekvivalens megfogalmazás: a felületi feszültség megmutatja, hogy a folyadékfelszín $\mathrm{d}A$ területegységgel való megnöveléséhez mekkora $\mathrm{d}E$ energia szükséges.

$$\alpha = \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}A}.$$

A felületi feszültség független a felület nagyságától, amíg a hártya vastagsága nem túl kicsiny (kb. 0,00005 mm), erősen függ attól, hogy a szabad felszín milyen anyaggal érintkezik (ún. határfelületi feszültségek), valamint értékét jelentősen befolyásolja a hőmérséklet is.

A.1. Felületi feszültség mérése gyűrű leszakításával

A legegyszerűbb módszer esetén a folyadékba ismert kerületű gyűrűt helyezünk, és a folyadéktól való elszakításkor fellépő erőt közvetlenül mérjük meg – a felületi feszültség egyszerű osztással adódik. Az eljárás nedvesítő folyadékok esetén, abszolút és relatív mérésre egyaránt alkalmazható.

A folyadékfelszín alá egy gondosan megtisztított, zsírtalanított nikkelezett rézkarikát merítünk. A gyűrűt felfelé húzva a külső és belső peremhez folyadékhártya tapad. Alkalmas erőmérő eszközzel megállapíthatjuk azt az erőt, amely a gyűrűnek a folyadékhártyáról történő leszakításához szükséges. A leszakadás pillanatában a folyadékhártya függőlegesen tapad fel a gyűrű külső és belső peremére egyaránt. Így a gyűrűt

$$F = 2(r_1 + r_2)\pi\alpha$$

erővel húzza, amelyben r_1 és r_2 a gyűrű belső és külső sugara. Innen:

$$\alpha = \frac{F}{2(r_1 + r_2)\pi}.$$

Erőmérőként egy rugó szolgál. A fémgyűrűt egy tükörskála elé függesztett, leolvasó távcsővel ellátott érzékeny rugóra akasztjuk, s egyensúlyi helyzetét leolvassuk, ez az x_0 helyzet. Ismert m tömeget helyezve a serpenyőbe ismét leolvassuk a helyzetét (x). Hooke törvénye értelmében:

$$D(x - x_0) = m \cdot g,$$

ahol g a gravitációs gyorsulás, D a rugóra jellemző rugóállandó.
Innen:

$$D = \frac{mg}{x - x_0}.$$

Most már rugónk „hiteles”, erőmérésre alkalmassá vált. Ezt az eljárást célszerű három különböző tömeggel elvégezni és a kapott értékeket átlagoljuk. A fémgyűrűt száraz, puha ronggyal megtöröljük, zsírtalanítjuk. Merítsük a gyűrűt a folyadékfelszín alá, majd a folyadékot tartalmazó tálkát húzzuk lassan lefelé. A rugó megnyúlásának állandó figyelése mellett 3-5 leszakítást végzünk, azaz azon x megnyúlásokat olvassuk le, amikor a folyadékfelszín éppen elszakad a gyűrűtől. A leolvasott megnyúlásokat átlagoljuk (x) és kiszámítjuk az F erőt:

$$F = DX.$$

Így:

$$\alpha = K \cdot X, \qquad K = \frac{D}{2\pi(r_1 + r_2)}$$

összefüggést kapjuk. K nem túl nagy megnyúlások esetén az adott eszközre nézve állandó. Relatív mérésnél K értékének ismeretére nincs szükség.

A gyűrű leszakításán alapszik egy másik mérő eszköz: a Du Noüy-féle készülék is, csak az erőmérés lényegében egy torziós mérleg segítségével valósul meg. A torziós szál egyik végét rögzítették. A torziós szálra merőlegesen rudat rögzítettek, ennek végén található a platinagyűrű, és a központi jelet létrehozó lencse. A lencsét átvilágítva a központi jel megjelenik a tejüveg ernyőn. (A pontos méréshez a lencsének lényeges szerepe van.) A mérendő folyadékot a gyűrű alá egy kis üvegtálkába helyezzük. Alaphelyzetben a gyűrű a folyadékban van, majd mozgatjuk óvatosan lefelé a folyadékot tartó edényt.

A gyűrű mindaddig nyugalomban marad, míg bele nem ér a folyadék felületi rétegébe. Ezután együtt mozogna a felületi réteggel, de ezt kiküszöböljük a kör alakú skála elforgatásával, amin a szögelforduláshoz tartozó felületi feszültség din/cm egységekben leolvasható. A folyadékszintet és a skálát mindig úgy változtatjuk, hogy a központi jel helye változatlan maradjon az alapállapothoz képest. Abban a pillanatban kell leolvasni a skálát, amikor a két csavar mozgatásának eredményeképpen a központi jel kissé felfelé mozdul, majd a gyűrű elválik a folyadék felszínétől. A pontos mérés feltétele a gondos tisztítás, ugyanis kis mennyiségű idegen anyag nagyon káros irányban befolyásolja a mérési adatokat. A legkisebb koncentrációjú oldat mérésével célszerű a mérést kezdeni és úgy haladjunk a nagyobb koncentrációk felé.

A.2. Felületi feszültség mérése sztalagmométerrel

Tartalék gyakorlat!

A felületi feszültség mérésére számos módszer alkalmas, ezek közül a gyakorlatban a sztalagmométeres módszer is eléggé elterjedt. Ennek lényege, hogy a folyadék lassú lecsepegtetésével, a keletkező cseppek száma alapján számítjuk ki a felületi feszültséget. A sztalagmométeres eljárás csak mint relatív módszer alkalmazható.

A mérésekre a végén vastag falú kapillárissal ellátott pipettát, a sztalagmométert használjuk. A kapillárison lassan átáramló folyadék a kapilláris alsó nyílásán cseppeket képez, melyek mindaddig feltapadva maradnak, míg a csepp súlya egyensúlyt tart a felületi feszültségből származó erővel. A csepp maximális súlya:

$$G = 2r\pi\alpha,$$

ahol r a kapilláriscső külső sugara, G a csepp súlya.

Csepegtessünk le két, ρ_1 és ρ_2 ismert sűrűségű, valamint α_1 és α_2 felületi feszültségű folyadékból azonos V térfogatnyi mennyiségeket. Jelöljük a cseppek számát z_1 és z_2-vel, ekkor:

$$\rho_1 V g = z_1 G_1 = z_1 \cdot 2\pi r \alpha_1,$$

$$\rho_1 V g = z_2 G_2 = z_2 \cdot 2\pi r \alpha_2.$$

Relatív méréssel meghatározhatjuk a két folyadék felületi feszültségének arányát:

$$\alpha_2 = \alpha_1 \frac{z_1 \rho_2}{z_2 \rho_1}.$$

Ha az egyik folyadék felületi feszültségét pontosan ismerjük (pl. ez lehet desztillált víz), a relatív méréssel tetszőleges folyadék felületi feszültségét meg lehet határozni. A víz felületi feszültségét adott hőmérsékleten megadja az alábbi empirikus formula,

$$\alpha_1(T) = (72,9 - 0,155(T - 18°C))\, 10^{-3}\mathrm{N/m}.$$

A méréskor nagyon fontos, hogy a mért térfogatok azonosak legyenek! A sztalagmométer alsó nyílását minden esetben alkohollal zsírtalanítani kell. Minden mérés előtt a mérendő folyadékkal is át kell öblíteni a sztalagmométert. A kifolyási sebességet úgy állítsuk be, hogy az kb. 70 csepp/min legyen.