

Kontaktusjelenségek

Ha két különböző anyagot érintkezésbe hozunk egymással, akkor sajátos elektromos jelenségeket észlelhetünk. Ezeket a jelenségeket összefoglaló néven *kontaktusjelenségeknek* nevezik. A jelenségek létrejöttének pontos értelmezése a fizika speciális fejezeteihez tartozik, itt elsősorban magukat a jelenségeket vizsgáljuk.

Annyit előre bocsátunk, hogy a jelenségek hátterében az áll, hogy a különböző anyagok atomjaiban, molekuláiban az elektronok eltérő energiájú állapotokban vannak. Két anyag érintkezésénél az elektronburok legkülső elektronjai egyik anyagból a másikba átmehetnek, ha ott alacsonyabb energiájú állapotot találnak. Ennek az a következménye, hogy az elektronokat elvesztő anyag pozitív-, az elektronokat befogadó anyag negatív effektív töltésre tesz szert. A töltésszétválásnak az elektrosztatikus energia növekedése szab határt.

A töltések szétválása az érintkező testek között potenciálkülönbséget hoz létre, amit *kontaktipotenciálnak* neveznek. Az elnevezés nem túl szerencsés, hiszen itt valójában potenciálkülönbségről, vagyis feszültségről van szó, ezért jobb, bár kevésbé elterjedt az *érintkezési feszültség* elnevezés. A töltésátadás mértéke és iránya, és így a kontaktipotenciál nagysága és előjele az összeérintett anyagok tulajdonságaitól (elektronszerkezetétől) függ.

Kontaktusjelenségek szigetelőkben

Kontaktusjelenségekkel tulajdonképpen már az elektromos jelenségek tárgyalásának kezdetén találkoztunk, hiszen a szigetelő anyagok összedörzsölésekor keletkező töltések is ebbe a jelenségcsoportba sorolhatók. Két szigetelő összeérintésekor is végbemegy a fent említett töltésszétválás, de ez csak kis mértékű, mert a folyamatban csak a közvetlenül érintkező atomok vesznek részt. Ennek az az oka, hogy a szigetelőkben az elektronok hosszú távú mozgása korlátozott. Durván szólva azt mondhatjuk, hogy a két szigetelő közötti kontaktus nem jó.

A kontaktus javul, ha a két testet összedörzsöljük, mert így sokkal több atom kerül egymással közvetlen érintkezésbe. Az ilyen módon szétvált töltések a két szigetelő szétválasztása után is megmaradnak az egyes testeken, éppen azért, mert a töltések visszaáramlása a szigetelőkben gyakorlatilag nem lehetséges. Így tudunk egy szigetelő dörzsölésével elektromos töltést felhalmozni. Az, hogy melyik anyag milyen előjelű és milyen nagyságú töltésre tesz szert, a megdörzsölt és a dörzsölő anyag atomjainak elektronszerkezetében fennálló *különbségektől* függ. Ezzel magyarázható az, hogy ugyanazon a szigetelőn különböző anyagokkal történő dörzsölésekor különböző előjelű és különböző nagyságú töltés jelenhet meg.

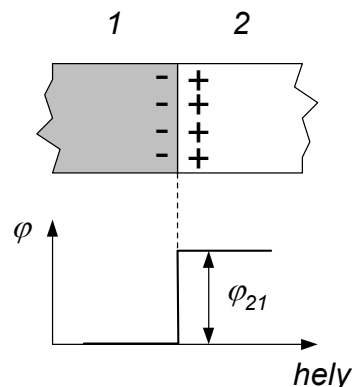
Kontaktusjelenségek vezetőkben

Vezetők érintkezésekor is létrejön érintkezési feszültség, amit úgy lehet egyszerűen demonstrálni, hogy szigetelő nyélre szerelt, elektrométerhez kapcsolt fémlemezket összeérintünk, majd hirtelen széthúzzunk. Ekkor az elektrométer kitér, ami a kontaktus potenciál által keltett töltések jelenlétét mutatja. Most részletesebben is megvizsgáljuk a vezetők érintkezésekor fellépő kontaktusjelenségeket.

Mivel egy vezetőben sztatikus esetben a potenciál mindenütt ugyanakkora, a két érintkező vezető *belseje* között kialakult potenciálkülönbség, az ún. *belső kontaktus potenciál* vagy más néven *Galvani-feszültség*¹ a kontaktus helyére korlátozódik. Ez a potenciál-ugrás úgy valósul

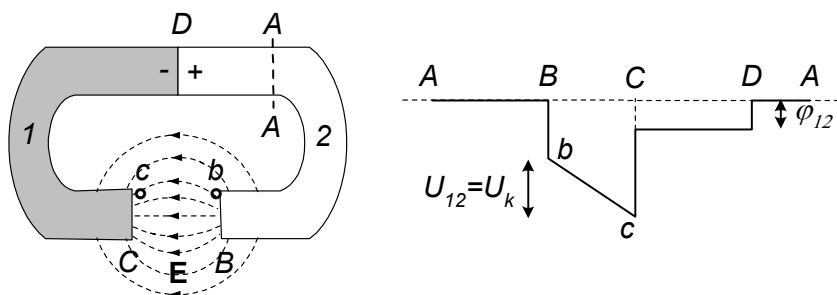
¹ Ezt a feszültséget *L. Galvani* olasz fizikusról nevezték el.

meg, hogy a pozitív és negatív többlet töltésekből az érintkezési felületen egy ún. elektromos kettősréteg alakul ki. Ilyen érintkezési felület egyensúlyi töltés- és potenciálviszonyait mutatja sematikusan a mellékelt ábra. A két vezető (1 és 2) érintkezésénél létrejött Galvani-feszültséget φ_{21} -vel jelöltük, a potenciál nullpontját a negatívan töltött (1) vezetőn vettük fel.



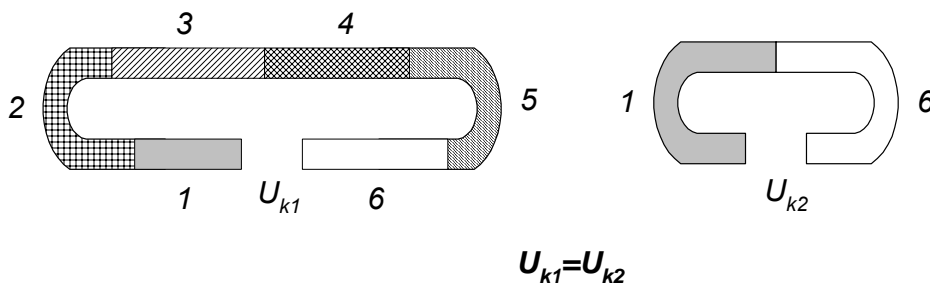
A Galvani-feszültség a vezetők belseje közötti potenciálkülönbség, amit közvetlenül megmérni nem tudunk. Meg tudjuk mérni viszont azt a potenciálkülönbséget ami a vezetőkön kívül kialakult elektromos erőterben a két vezetőhöz igen közeli két pont (az ábrán *b* és *c*) között jön létre, amit *külső kontakt potenciálnak* vagy más néven *Volta-feszültségnek*¹ neveznek. A Volta-feszültség általában nem egyezik meg a Galvani-feszültséggel.

A potenciálviszonyok vázlatja a mellékelt ábrán látható. Ha az *A-A* keresztmetszettől elindulva végigjárjuk az *ABbcCDA* útvonalat, és közben nyomon követjük a potenciál alakulását, akkor



az ábra jobboldalán látható változásokat tapasztaljuk. A 2 vezetőben (*AB* szakasz) a potenciál mindenütt azonos, a 2 vezetőből a *B* pontban kilépve azonban igen kis távolságon belül hirtelen potenciálesés következik be (*Bb*). Ezután a végek közötti **E** elektromos erőterben a potenciál a *bc* szakaszon fokozatosan tovább csökken (ez az U_{12} Volta-feszültség), majd az 1 vezetőbe történő belépéskor ugrásszerűen megnő (*cC*). Az 1 vezetőben (*CD* szakasz) a potenciál ismét állandó, majd a *D* pontban (a kontaktusnál) ismét ugrásszerű növekedés következik be (ez a φ_{12} Galvani-feszültség). Amikor *kontakt potenciálról* beszélünk, akkor ez alatt általában az $U_{12} = U_k$ Volta-feszültséget értjük.

A kísérletek azt mutatják, hogy ha több vezető összekapcsolásával hozunk létre a fentihez hasonló nyitott láncot, akkor a szabad végek között létrejött *kontaktpotenciál szempontjából csak a két szélső vezető számít*. Ez *Volta törvénye*. Az ábrán látható esetben tehát az U_{k1}



¹ Az elnevezés *A. Volta* olasz fizikus nevét őrzi, akiről a feszültség egységét (Volt) is elnevezték.

kontaktspotenciál ugyanakkora, mint az az U_{k2} kontakt potenciál, ami akkor jön létre, ha a nyitott láncban csak az 1 és 6 vezetők vannak jelen.

Ez az eredmény elméleti megfontolásokkal is megkapható. A fenti ábra esetében

$$U_{k1} = U_{21} + U_{32} + U_{43} + U_{54} + U_{65} = U_2 - U_1 + U_3 - U_2 + U_4 - U_3 + U_5 - U_4 + U_6 - U_5,$$

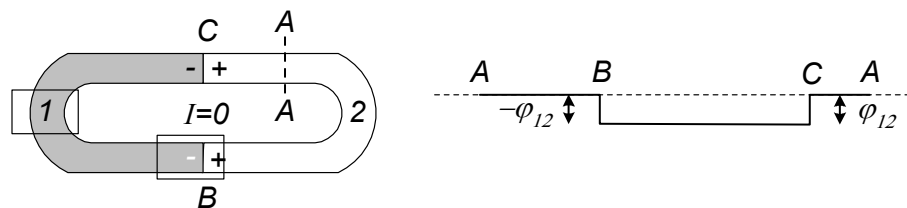
amiből következik, hogy

$$U_{k1} = U_6 - U_1 = U_{k2}$$

Ennek a ténynek az egyik következmény az, hogy ha a lánc két végén ugyanaz az anyag van, akkor az érintkezési feszültségek eredője nulla.

A másik következmény az, hogy ha a lánc két végén található azonos vezetőket összeérintjük, és ezzel egy zárt hurkot hozunk létre, akkor semmi változás nem következik be (azonos vezetők kontaktusa nem okoz érintkezési feszültséget), vagyis *a többféle vezetőt tartalmazó zárt hurokban az eredő érintkezési feszültség nulla*. Később látni fogjuk, hogy ezek az állítások csak akkor igazak, ha az *összes kontaktus azonos hőmérsékletű*.

A két vezetéből (1 és 2) létrehozott zárt hurokban kialakuló viszonyokat szemlélteti a mellékelt ábra. Ha mindkét kontaktus (B és C) hőmérséklete ugyanakkora, akkor a második kontaktusnál ugyanolyan nagyságú, de ellentétes előjelű érintkezési feszültség jön létre (ez



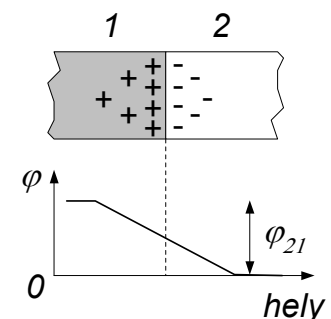
mind a Volta-, mind pedig az ábrán is látható Galvani-feszültségre érvényes¹). A zárt hurokban tehát az eredő elektromotoros erő nulla, áram a körben nem folyik.

Mindebből következik, hogy mindenütt azonos hőmérsékletű, többféle vezetőt tartalmazó zárt hurok *telepként nem használható*.

Kontaktusjelenségek félvezetőkben

Félvezetők kontaktusánál szintén fellép érintkezési feszültség. A vezetőkhez képest itt az az eltérés, hogy a töltések nagyobb tartományban oszlanak el, ezért az érintkezési feszültség is nagyobb tartományban jön létre (ábra). Különösen fontos az az eset, amikor az érintkező félvezetők különböző vezetési típusúhoz tartoznak, vagyis az egyik ún. *p*-típusú félvezető, amelyben a töltéshordozók zömmel pozitív töltésű lyukak, a másik pedig ún. *n*-típusú félvezető, amelyben a töltéshordozók zömmel elektronok.

A félvezetők kontaktusjelenségei alapvető szerepet játszanak az elektronikában és a mikroelektronikában (pl. félvezető diódák, tranzisztorok, fényelemek), újabban pedig szerepük egyre nő a napenergia felhasználásában (napelemek) is.



¹ A Volta-feszültséget nyitott láncnál vezettük be a két véghez nagyon közeli pontok közötti feszültségként. Zárt huroknál ilyen lehetőség nincs, de a Volta-feszültséget kapjuk akkor is, ha a szomszédos vezetőszakaszok egy-egy tetszőlegesen kiválasztott, felülethez közeli pontjai közötti feszültséget mérjük.

A félvezető kontaktusokkal és alkalmazásaikkal itt nem foglalkozunk, részletesebb ismereteket erre vonatkozó speciális tárgyak adnak.

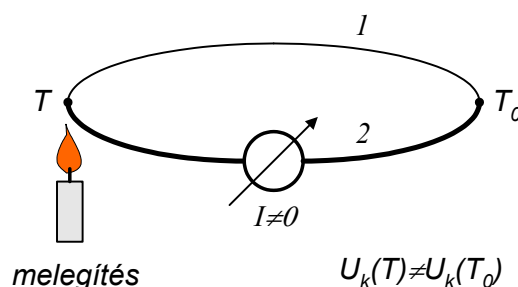
Termoelektromos jelenségek

Vezetők (és félvezetők) kontaktusainál az elektromos jelenségekkel együtt termikus jelenségek is megfigyelhetők, ezeket nevezik *termoelektromos jelenségeknek*.

A Seebeck-effektus¹

Említettük, hogy ha vezetőkől zárt hurkot készítünk, akkor az így kialakított áramkörben az érintkezési feszültségek összege nulla, ha a kontaktusok mind azonos hőmérsékleten vannak. A helyzet azonban megváltozik, ha valamelyik kontaktus eltérő hőmérsékletű, az érintkezési feszültség ugyanis *függ a hőmérséklettől*.

Ha például a mellékelt ábrán látható, két különböző vezetőből (1 és 2) kialakított kontaktus egyikét (pl. a baloldali) melegítjük, akkor az áramkörben áram jön létre. Ez annak a következménye, hogy most



már a két kontaktusnál létrejött kontaktpotenciál nem egyenlő egymással ($U_k(T) \neq U_k(T_0)$), így az áramkörben eredő feszültség, elektromotoros erő jön létre.

Ha a baloldali kontaktust melegítés helyett hűtjük, akkor a körben ellenkező előjelű elektromotoros erő és ellenkező irányú áram keletkezik. Ezt a jelenséget felfedezőjéről *Seebeck-effektusnak* nevezik. Mivel a fenti és a hozzá hasonló elrendezésekben elektromotoros erő jön létre, ezeket *termoelemeknek* nevezik. A létrejött elektromotoros erő elnevezése *termoelektromos feszültség* vagy rövidebben *termofeszültség*, a körben létrejött áramot pedig gyakran *termoáramnak* nevezik.

A fenti, két kontaktusból álló termoelem ε termofeszültségét az

$$\varepsilon = U_k(T) - U_k(T_0)$$

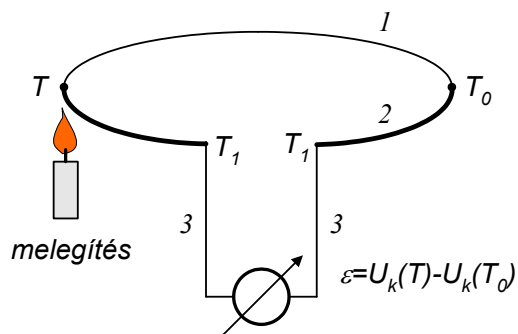
összefüggés adja meg. A gyakorlati felhasználás szempontjából fontos, hogy nem túl nagy hőmérsékletkülönbségek esetén a legtöbb anyagpárnál a termofeszültség közelítőleg arányos a kontaktusok hőmérsékletkülönbségével:

$$\varepsilon \approx \alpha(T - T_0),$$

ahol α az érintkező vezetők tulajdonságaitól függ.

A kontaktpotenciál sajátosságairól korábban szerzett ismereteink alapján könnyen belátható, hogy a termofeszültség nem változik, ha a körbe azonos hőmérsékletű vezetőszakaszokat iktatunk be. Ezért a fenti ábrán bemutatott áramkörben a mérőműszert (áram- vagy feszültségmérő) az 1 vagy 2 vezetőtől eltérő (pl. 3) anyagból készült vezetőkkel is csatlakoztathatjuk az áramkörbe, csupán arra kell ügyelni, hogy az így létrehozott új kontaktusok azonos hőmérsékleten (az ábrán T_1) legyenek.

A termofeszültség lehetőséget ad egyszerű

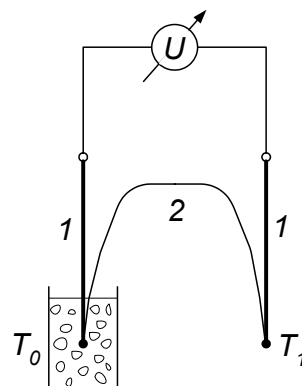


¹ Felfedezője T.J. Seebeck német fizikus.

feszültségforrások készítésére. Erre a célra a vezetőknél jobb a félvezető kontaktusok használata, mert a keletkező termofeszültség általában nagyobb, másrészt a félvezetők hővezetése rosszabb, így a hőmérsékletkülönbség fenntartása könnyebb.

KÍSÉRLET:

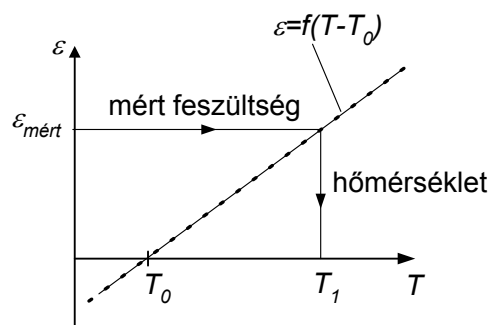
Az ábrán látható elrendezés az 1 és 2 vezetőből (pl. vas és konstantán drótból) készített két kontaktusból és a hozzájuk csatlakozó feszültségmérőből áll. Az egyik kontaktust ismert T_0 hőmérsékletű helyre (pl. olvadó jégbe) tesszük, a másik kontaktus pedig ennél melegebb helyre kerül (pl az ujjaink közé szorítjuk). Ekkor a feszültségmérő kitér. Ha a két kontaktus helyét felcseréljük, akkor a kitérés ellenkező irányú lesz, a kitérés nagysága pedig függ a két kontaktus hőmérsékletének különbségétől.



A kísérlet azt mutatja, hogy a mért termofeszültség függ a két kontaktus hőmérsékletkülönbségétől, ezért egy ilyen elrendezés *hőmérsékletmérésre* használható. Ez a termoelemek leggyakoribb alkalmazása.

Ha az egyik kontaktus hőmérsékletét (T_0) rögzítjük, és a termofeszültségnek a kontaktusok hőmérsékletkülönbségétől való $\varepsilon = f(T - T_0)$ függését ismert hőmérsékletek segítségével kimérjük – szokásos elnevezéssel a termoelemet *hitelesítjük* – akkor a másik kontaktus hőmérséklete (T) meghatározható.

A hőmérséklet mérésének menete a következő. Az egyik kontaktust ismert T_0 hőmérsékleten tartjuk, a másikat a mérendő helyre tesszük, majd egy feszültségmérővel meghatározzuk az $\varepsilon_{\text{mért}}$ termofeszültséget. Ezután az $\varepsilon = f(T - T_0)$ hitelesítési görbén megkeressük a mért termofeszültséghez tartozó T_1 hőmérsékletet (ábra).



Különösen egyszerű a hőmérsékletmérés, ha érvényes az $\varepsilon \approx \alpha(T - T_0)$ összefüggés. Ekkor a hitelesítési görbe egyenlete egyszerűen meghatározható:

$$\varepsilon = \alpha(T - T_0).$$

Ha a hitelesítési görbéből meghatározzuk az α állandót, akkor a továbbiakban erre a görbére nincs szükségünk, hiszen a megmért ε termofeszültség ismeretében a

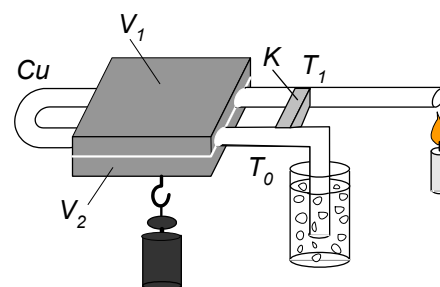
$$T = \frac{\varepsilon}{\alpha} + T_0$$

összefüggésből az ismeretlen hőmérsékletet kiszámíthatjuk.

A termofeszültség és az általa létrehozott áram látványos bemutatását teszi lehetővé az alábbi kísérlet.

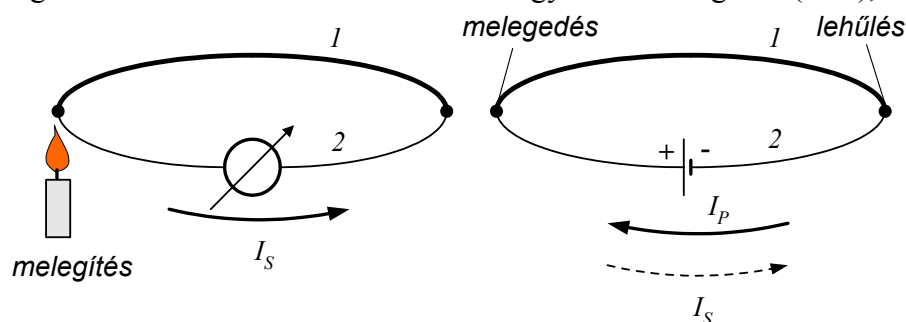
KÍSÉRLET:

Az alábbi ábrán látható elrendezés egyik része egy olyan termoelem, amely kb. 1 cm vastag, meghajlított rézrúdból (Cu) és annak két ágát áthidaló konstantán (K) rúdból áll. Ha a rézrúd egyik végét – és így az egyik kontaktust (T_0) – olvadó jéggel hűtjük, másik végét – és így a másik kontaktust (T_1) – melegítjük, akkor a keletkező néhány mV -os termofeszültség a nagyon kis ellenállású körben 40 A nagyságrendű áramot hoz létre. Ha a rézrudakra a rudakhoz és egymáshoz is jól illeszkedő lágymas lemezeket (V_1 és V_2) teszünk, akkor az áram mágneses erőtere a lemezeket mágnesezi, és köztük erős vonzás lép fel. Ez a vonzóerő olyan nagy, hogy az alsó lemez (V_2) több kg -os súlyt is megtart. Ha a hűtést és melegítést megszüntetjük, akkor az alsó lemez a súllyal együtt leesik.



A Peltier-effektus¹

Ez a jelenség a Seebeck-effektus megfordítása. Ha két vezetőlétről létrehozunk egy olyan áramkört, amely két kontaktust tartalmaz (baloldali ábra), és az egyik kontaktust melegítjük, akkor a körben termoáram (I_S) jön létre (Seebeck-effektus). Ha ugyanebbe a körbe egy telepet teszünk be, és áramot (I_P) hozunk létre, akkor a tapasztalat szerint az eredetileg azonos hőmérsékletű kontaktusok egyike felmelegszik (ábra), a másik



pedig lehül. Ezt a jelenséget *Peltier-effektusnak*-, a kontaktusoknál leadott vagy felvett hőmennyiséget pedig *Peltier-hőnek* nevezik.

Az ábrán azt is jeleztük, hogy az adott esetben melyik kontaktus melegszik, és melyik hűl le. Energetikai megfontolásokkal könnyen belátható, hogy az I_P áram hatására az a kontaktus melegszik, amely *melegítés hatására* a körben folyó árammal ellentétes I_S termoáramot hoz létre. Csak ebben az esetben alakulhat ki egyensúlyi helyzet, hiszen ekkor a melegedés hatására létrejött termoáram korlátot szab a körben folyó áramnak és a kontaktusok melegedésének illetve lehűlésének. Ez a jelenség tulajdonképpen a

¹ Az effektus felfedezője *J.C.A. Peltier* francia tudós.

korábban (pl. Lenz-törvény) már említett Le Chatelier–Braun-elv egy újabb megnyilvánulása.

A Peltier-effektust a gyakorlatban legtöbbször hűtésre használják. Erre a célra a félvezető kontaktusok a legalkalmasabbak nagyobb effektusuk és a vezetőkénél rosszabb hővezetőképességük miatt.

A Thomson-effektus¹

Ha egy vezető mentén változik a hőmérséklet (hőmérséklet gradiens van), akkor a vezetón átfolyó áram hatására a Joule-féle hőtől különböző hőfejlődés figyelhető meg, ami megváltoztatja a hőmérsékleteloszlást a vezetőben. Ezt a jelenséget nevezik *Thomson-effektusnak*. Ez a szó szoros értelmében nem kontaktusjelenség, de létrejötte olyan folyamatokra vezethető vissza, amelyek a kontaktusjelenségeknél is szerepet játszanak. A Thomson-effektus felfogható úgy is, mint egy sajátos Peltier-effektus, ahol nem két különböző vezető kontaktusánál létrejött inhomogenitáson, hanem a hőmérséklet gradiens miatt folytonosan változó tulajdonságú, inhomogén vezetőszakaszon folyó áram okozza a hőfejlődést.

Kontaktusjelenségek elektrolitokban

Az előzőekben tárgyalt esetekben elektronvezetőket (más néven elsőfajú vezetőket) vizsgáltunk. Új jelenségek lépnek fel akkor, ha az egymással kontaktusban lévő anyagok között legalább egy elektrolit (másodfajú vezető) van.

Ha egy elektrolitba vezetőt (az ábrán 1) teszünk, a vezető és az elektrolit között U_{k1} érintkezési feszültség jön létre. Ez a feszültség függ a vezető és az elektrolit anyagától, ezért ha ugyanebbe az elektrolitba egy másik vezetőt (2) teszünk, akkor általában ettől eltérő U_{k2} érintkezési feszültség alakul ki. A teljes érintkezési feszültség

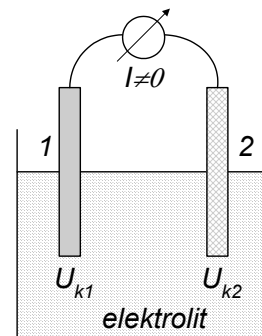
$$U_k = U_{k1} + U_{k2} + U_{12},$$

ahol U_{12} a két fém között fellépő érintkezési feszültség (ez gyakran elhanyagolható).

Ha az elektrolitba merülő két különböző vezető végeit az elektroliton kívül vezetővel összekötjük, akkor a körben áram jön létre, amit a körbe bekötött árammérővel mutathatunk ki (ábra). Ez a tapasztalat azt mutatja, hogy különböző vezetőkből és elektrolitból álló zárt hurokban a kontaktpotenciálok összege nem nulla, hanem a körben

$$\varepsilon \approx U_{k2} - U_{k1} \neq 0$$

eredő elektromotoros erő jelenik meg. Ezen alapul a *kémiai áramforrások* működése.



¹ Az effektust *W. Thomson (Lord Kelvin)* elméleti megfontolások segítségével megjósolta.