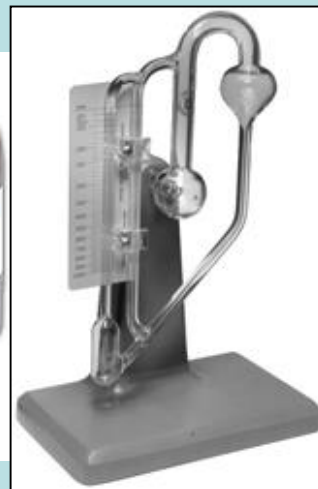
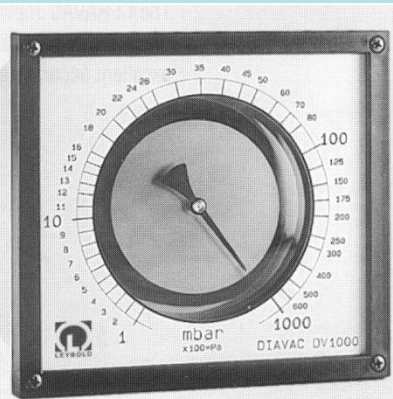


VÁKUUMTECHNIKA

Bohátka Sándor és Langer Gábor

6. VÁKUUMMÉRŐK



6. VÁKUUMMÉRŐK (ÖSSZNYOMÁSMÉRŐK – VACUUM GAUGES)

Az elméleti áttekintésben megismertük, hogy a gázok nyomását a felületre ütköző gázcsepscskék által a felületre merőlegesen kifejtett erők összegének és a felület nagyságának a hányadosával definiáljuk.

A nyomás SI egysége Nm^{-2} = pascal, jele: Pa, (6.1. táblázat.)

megengedett egység: bar, mbar. $1 \text{ mbar} = 0,001 \text{ bar} = 100 \text{ Pa}$.

Kimutattuk azt is, hogy a nyomás a $p = nkT$ állapotegyenlettel meghatározott módon szigorúan arányos a részecskeszám-sűrűséggel.

A nyomás mérésére a vákuumtechnikában használt módszerek:

- **direkt nyomásmérés**: a területegységre ható erőt mérik
független a gáz fajtájától! (folyadékos, membrános vm.),
- **indirekt nyomásmérés**: a részecskeszám-sűrűséget, illetve azzal arányos más fizikai mennyiséget mérnek, **általában függ a gáz fajtájától!** (viszkozitás, hővezetés, ionizáció).

A nyomás csökkenésével a direkt nyomásmérés lehetőségei egyre korlátozottabbak, nő az indirekt módszerek jelentősége.

Példa: egy 6,1 cm átmérőjű korongra $3,3 \cdot 10^{-5}$ mbar nyomás 1 mg tömeg súlyával; $3,3 \cdot 10^{-8}$ mbar nyomás $1 \mu\text{g}$ tömeg súlyával hat.

A nyomásmérő módszerek a viszonyítási érték szerint:

- **abszolút nyomásmérés**: amikor a tényleges nyomás nagyságát a 0 nyomás szintjétől mérve adjuk meg – a referencianyomás: 0;
- **relatív nyomásmérés**: a nyomásmérés viszonyítási alapja nem a 0 nyomás – a mért érték függ a referenciától (pl. légköri nyomáshoz viszonyítva adjuk meg a mért nyomást, amikor is a légköri nyomást nem feltétlen ismerjük pontosan).

A nyomásmérő módszerek a gáztól való függés szerint:

- **gázfajtától független** nyomásmérés (ilyenek a direkt nyomásmérők, pl. folyadékos, membrános).
- **gázfajtától függő** (viszkozitás-, hővezetési, ionizációs);

Ha külön nem jelzik, akkor a vákuummérőket nitrogénre hitelesítik.

A vákuummérők hitelesítésére használt eszközök (standardok):

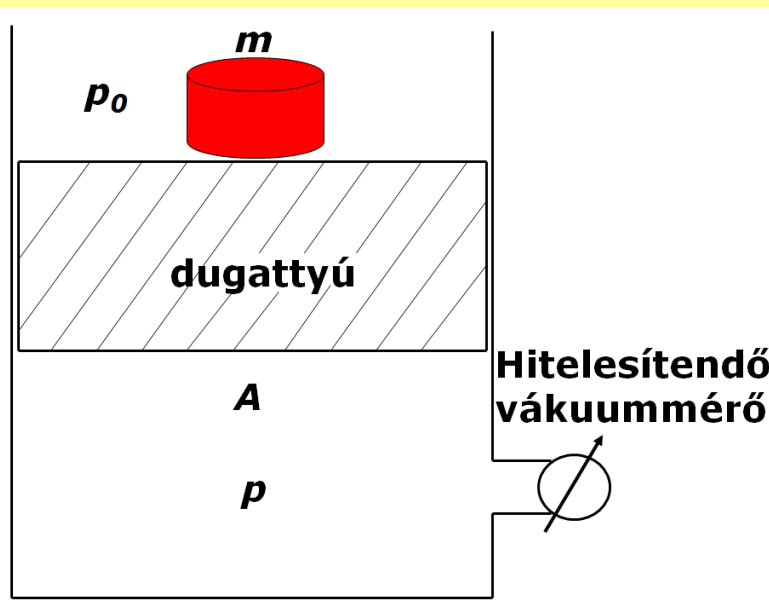
- **Elsődleges (vagy abszolút) standard**: amelynek a hitelesítését fizikai állandók és az eszköz meghatározó dimenzióinak ismeretére vezethetjük vissza. Egy X mérés során a nyomás: $p = \text{const.} \cdot X$, ahol a const. értékét a hosszúság és tömeg alapegységeivel fejezhetjük ki.

Fajtái:

- amelyek **MÉRIK** a nyomást a nyomás definíciójára alapozott módon: folyadékoszlopos manométerek ,
- amelyek **ELŐÁLLÍTJÁK** az állandó, ismert nyomást: dugattyús manométer (6.1. ábra), sztatikus és dinamikus gázexpanziós módszerek.

6.1. ábra. Dugattyús nyomásmérő (nyomást előállító eszköz) elvi elrendezése.

A hengerben nagy áramlási ellenállással illesztett m össztömegű, A keresztmetszetű dugattyú nehezedik a bezárt gázra $p = p_0 + F/A = p_0 + mg/A$



Ha $p_0 = 0$, a nyomás hosszúság mérésére (A), tömegmérésre (m) és természeti állandó (g) ismeretére visszavezetett mennyiségként határozható meg.

- Másodlagos (vagy transzfer) standard:

amely vagy a nyomás valamilyen hatását méri (pl. egy rugalmas membrán megnyúlását) vagy a nyomással (részecskeszám-sűrűséggel) a kinetikus gázelmélet szerint arányos más fizikai mennyiséget (pl. ionok áramát). Ezeket az elsődleges standardokhoz hitelesítik.

Ilyenek a membrános, forgógolyós és egyes ionizációs vákuummérők.

Megkülönböztetett nyomástartományok (a német szabvány szerint)

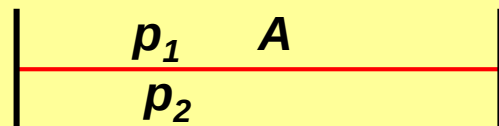
durvavákuum (<i>rough vacuum</i>):	$p \approx 1000 - 1 \text{ mbar}$
közepes (finom-) vákuum (<i>fine v.</i>):	$p \approx 1 - 10^{-3} \text{ mbar}$
nagyvákuum (<i>high vacuum – HV</i>):	$p \approx 10^{-3} - 10^{-7} (10^{-8}) \text{ mbar}$
ultranagy-vákuum (<i>ultra-high v. – UHV</i>):	$p < 10^{-7} \text{ mbar}$ (Amerika: $p < 10^{-8} \text{ mbar}$)
extrémnagy-vákuum (<i>extreme-high v. – XHV</i>):	$p < 10^{-12} \text{ mbar}$

6.1. táblázat. Nyomásegységek átszámítási szorzói.

	Pa	mbar	at	atm	torr	PSI
1 Pa = 1 N/m²	1	10⁻²	1,0197·10⁻⁵	9,8692·10⁻⁶	750,06·10⁻⁵	1,4504·10⁻⁴
1 bar = 0,1 MPa	10⁵	10³	1,0197	0,98692	750,06	14,5032
1 mbar = 10² Pa	10²	1	1,0197·10⁻³	0,98692·10⁻³	0,75006	14,503·10⁻³
1 at = 1 kp/cm²	98066,5	980,67	1	0,96784	735,56	14,2247
1 atm = 760 torr	101325	1013,25	1,03323	1	760	14,6972
1 torr = 1 Hgmm	133,322	1,333	0,00136	1,3158·10⁻³	1	0,01934
1 PSI (font/hü- velyk²)	6894,8	68,95	0,0703	0,06804	51,715	1

6.1. MECHANIKUS VÁKUUMMÉRŐK

A mechanikus nyomásmérőkben a feladatot erő mérésére vezetik vissza. Lényegi alkatrésze egy rugalmas membrán (felülete: A), amely elválasztja a mérendő nyomású (p_1) teret egy referenciaként használt ismert nyomású (p_2) tértől.



A két térfél közötti nyomáskülönbségből eredő erőt ($F = (p_1 - p_2) \cdot A$) méri az eszköz közvetlenül. A membrán elmozdulását egy mechanikus szerkezet alakítja át a skálabeosztás előtti mutató mozgására.

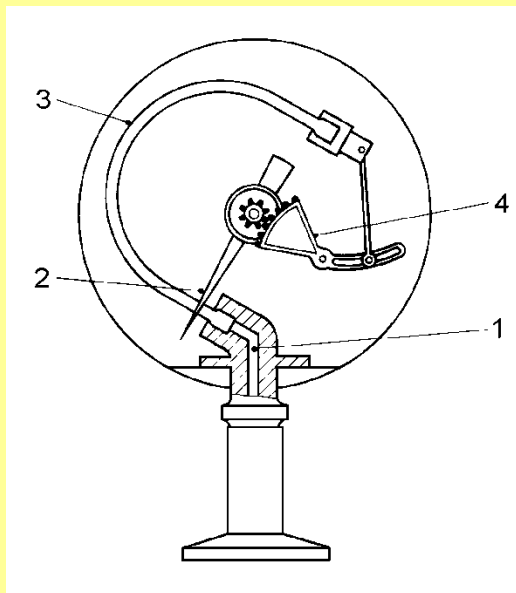
A MECHANIKUS VÁKUUMMÉRŐK

- NEM ABSZOLÚT ESZKÖZÖK, HITELESÍTENI KELL ŐKET, DE
- A MÉRT ÉRTÉKEK FÜGGETLENEK A GÁZOK FAJTÁJÁTÓL!

Fajtái a mérés és a szerkezet elvi különbözőségei szerint:

- I.) Referencia: atmoszférikus nyomás, a mechanikus szerkezet is ott van. A mért érték a légköri nyomással változik, a szerkezet nincs kitéve a mérendő közeg korrozív hatásának.
- II.) Referencia: $p = 0$ (vákuumon leforrasztott üres, vagy getteranyagot tartalmazó tér). A mechanikus szerkezet
 - a.) a referenciatérben (*nincs korrózió*) vagy
 - b.) a mérendő térben van (*korrózió veszélye*).
- III.) A referencianyomást és a kijelző szerkezetet magában foglaló teret külön szivattyú szívja. Ezzel tetszőleges referencianyomás állítható be.

6.1.1. Bourdon-csöves vákuummérő



6.1.1.1. ábra. Bourdon-csöves vákuummérő keresztmetszeti rajza. 1. vákuumcsatlakozás; 2. mutató; 3. rugalmas cső; 4. mozgásátalakító [L2].

Durvavákuumban használatos I. típusú, robusztus, nem kényes eszköz (referencia az atmoszféra – attól is függ).
Nyomástartománya: 1013 – 10 mbar,
pontatlansága: a teljes skála-kitérés (TSK) 1-2 %-a.
Spirálisan megtekert kvarccsővel precíziós műszert is készítettek, amelynek felbontása a végkitérés 0,001%-a!

6.1.2. Zárt terű (kapszula) vákuummérő

Élben összehegesztett, vékony falú, hullámosított, rugalmas fémlemezekkel zárják be a vákuumra szívott referenciateret (II.b. típusú vákuummérő). Korrozív gázokra érzékeny, mivel a mutatójához kapcsolódó szerkezete a mérendő térrel összeköttetésben áll.

A durvavákuum tartományra készül, de e tartomány alsó határára érzékenyített változatok is vannak.

Előnye a lineáris skála, de ennek alsó tartományában pontatlanabb.

A szokványos mérési tartomány: 1 – 100, 1013 mbar,
hiba: 1-2 % TSK.



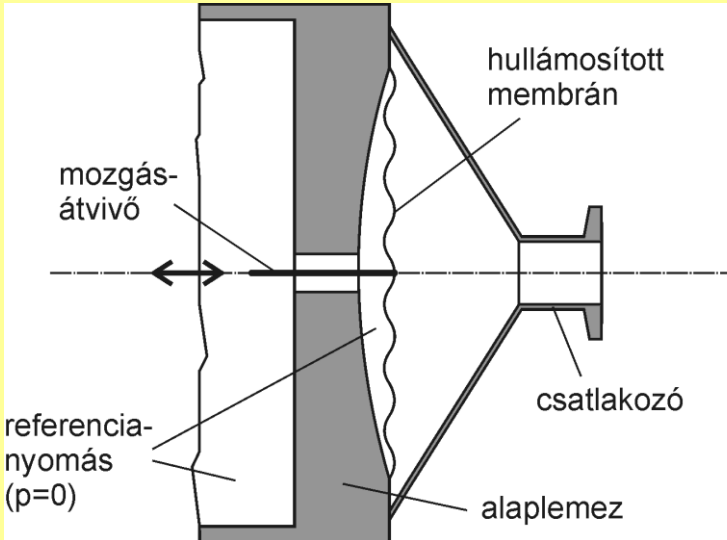
6.1.1.2. ábra. Zárt terű vákuummérő skálája [OL2].

6.1.3. Membrános (diafragma) vákuummérő

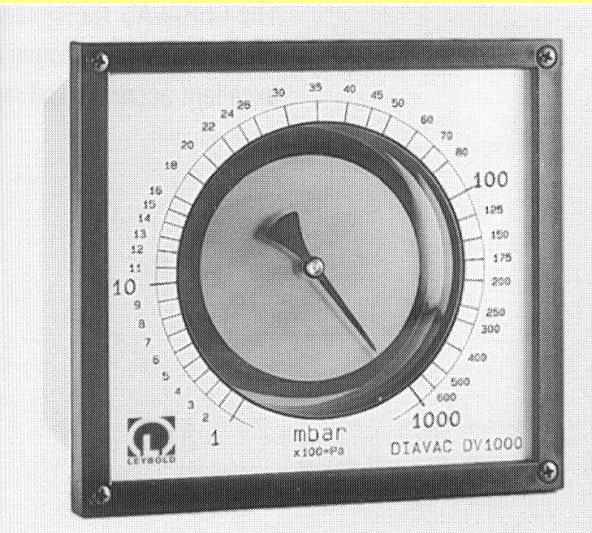
A kapszulás vákuummérőhöz hasonlóan rugalmas, hullámosított fémmembránt (diafragmát) tartalmaz a referenciaként szolgáló vákuumtér és a mérendő nyomás különbségének érzékelésére. Itt azonban egyetlen diafragma van, amely teljes felületével választja el a két teret. **A mozgásátalakító és kijelző szerkezet mechanikus**, és a vákuumozott referenciatérben van (II.a. típus), ezért a külső nyomásra és korrózióra nem érzékeny.

Nyomástartomány: 1 – 1013 mbar; hiba: 1 mbar, ill. a mért érték 10 %-a.

A kisebb nyomások érzékenyebb mérésére precíziós diafragma vákuummérőket is gyártanak, ezek felső nyomáshatára 20 mbar.



6.1.3.1. ábra. Membrános vákuummérő [L2].

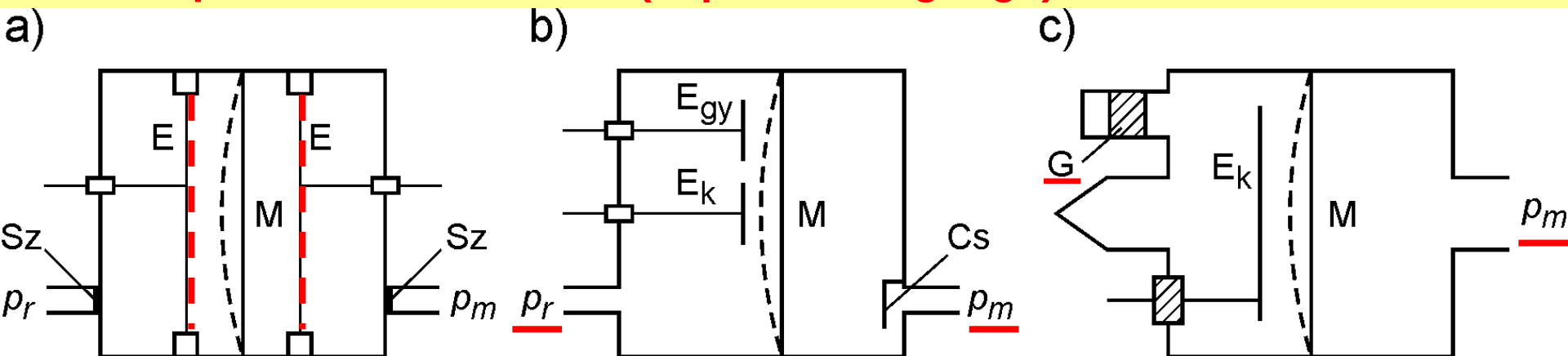


6.1.3.2. ábra. Digitális kijelzésű kis diafragma vákuummérő 1 - 2,000 mbar mérésére [KL1].

Egyéb elmozdulás-érzékelés: induktív, kapacitív és piezoelektr.



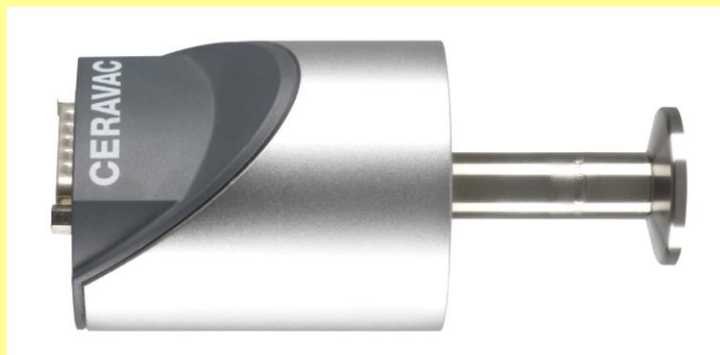
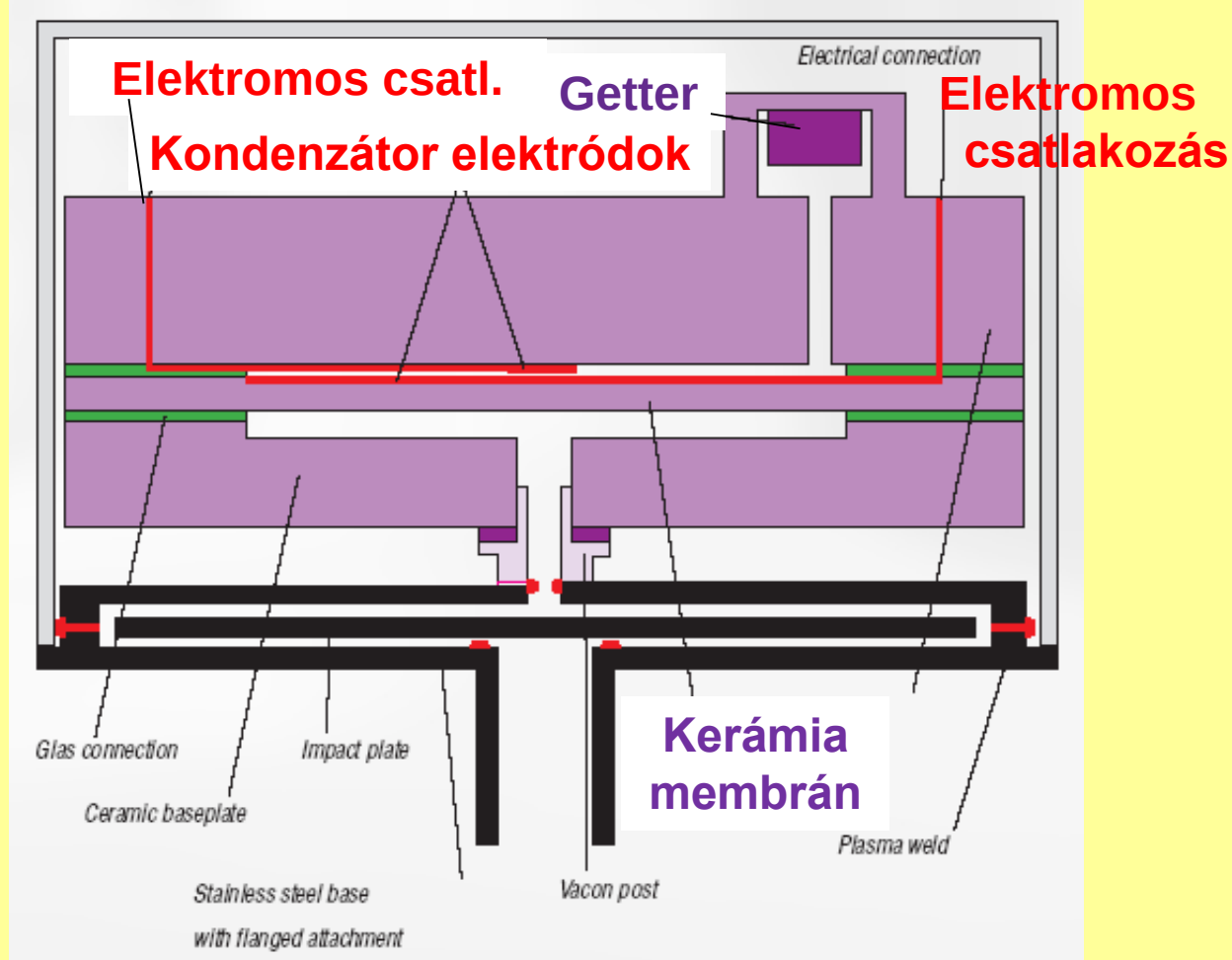
6.1.4. Kapacitás vákuummérő (capacitance gauge)



6.1.4.1. ábra. A kapacitás vákuummérő valóságos típusainak elvi felépítése:
a) kétoldalas relatív, b) egyoldalas relatív, c) egyoldalas abszolút.
Szennyeződhet. | Elektródok szembenéző felületei nem szennyeződnek.
 M : rugalmas membrán (fém vagy fémmel bevont kerámia), p_r : referencianyomás, p_m : mért nyomás, E : érzékelő ellenelektrod, E_k : kör alakú, E_{gy} : gyűrű alakú elektród (a gyűrű alsó felét nem mutatja az ábra), Sz: szűrő, Cs: csapda, G: getter [L1].

- Mai elektronikus eszközökkel $<10^{-9}$ m elmozdulás (~ néhány atom) is érzékelhető. Ennek révén akár 10^{-6} mbar nyomáskülönbséget is képesek mérni.
- Referenciatér: vagy állandóan szívják, vagy 10^{-6} mbar-nál alacsonyabb nyomásra szivattyúzva lezárják – a kereskedelmi mérőfejek ilyenek (6.1.4.2. c. ábra).
- Érzékenyek a hő- és hirtelen nyomásingadozásra, tartós túlnyomásra.
- A fém membránok maradandó alakváltozásra, korrózióra érzékenyebbek, az alumínium-oxid ellenállóbb, pontosabb és gyorsabb.
- Pontosabb a hőmérsékletváltozást elektronikusan kompenzáló mérőfej.
- Még pontosabbak a 45 °C -ra stabilizáltan fűtött mérőfejek.

6.1.4.2. ábra.
Egy kerámia
membrános
kapacitás
vákuummérő
összeállítási
rajza (L2).



6.1.4.3. ábra. Kapacitás vákuummérők fényképe [OL2], [MKS1].

**6.1.4.1. táblázat. Egy 1000 torr méréshatárú, fűtetlen, kerámia-membrános, kereskedelembe kapható kapacitás vákuummérő mérési pontatlanságát meghatározó tényezők és az eredő pontatlanság 5 nyomásnál, ha a mérőfej hőmérsékletingadozását 1 %-on belül tudjuk tartani (L2).
 10 torr alatt kisebb méréshatárú mérőfej ajánlatos!
 A stabilizált hőmérsékletre fűtött mérőfejek pontosabbak!**

Measured pressure		1000	100	10	1	0.1
Measurement uncertainty	0.2 % M.V.*	2	0.2	0.02	0.002	0.0002
Resolution	0.0015% F.S.**	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
Temperature effect on						
zero point	0.005 % F.S.**/°C	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
range	0.01 % M.V.* / °C	0.1	0.01	0.001	0.0001	0.00001
Error	absolute	2.165	0.275	0.086	0.067	0.0652
	of measured value	0.21 %	0.27 %	0.86 %	6.7 %	65.2 %
All data in Torr***		M.V.: mért érték, F.S.: teljes skála kitérés				
* M.V.: of measured value		** F.S.: full scale		*** 1 Torr=1.33 mbar		

A kapacitás vákuummérő mérési pontosságát és stabilitását befolyásolja:

- a membrán megnyúlása

- hirtelen nyomásugrás, nagy túlnyomás ($> 1,3$ bar) tilos,

- hőmérsékletváltozás okozta méretváltozások

- kis hőtágulású fémek (pl. inkonel) és különösen kerámia használata (6.1.4.2. ábra),
- hőkompenzáció (az ingadozás kb. tizedére csökken),
- fűtött, hőstabilizált mérőfej (kb. $45\text{ }^{\circ}\text{C}$) – legstabilabb,

- a gázok dielektromos állandója

- ha a nyomás nem túl nagy,
 - nincsenek töltéshordozók
- } a gázok dielektromos állandói alig különböznek } **gázfajtától független.**

A mérőfejeket adott nyomástartományra érzékenyítve készítik.

Egy mérőfejjel a méréshatár átfogása akár 4 nagyságrend is lehet, de az alsóbb méréshatárban már nagyon pontatlan, 2 – 3 dekád átfogás ajánlott.

Nyomástartomány: $1 \cdot 10^{-5}(10^{-6}) - 1300$ mbar,
de ugyanazzal a mérőfejjel 2 – 3 dekád;

Pontatlanság: a mért érték 0,15 – 1 %-a

(a mért érték 2 nagyságrendnyi átfogásakor, lásd a 6.1.4.1. tábl. példáját).

ÉRZÉKENY ($\sim 2 \cdot 10^{-5}$ TSK), PONTOS, GÁZFAJTÁTÓL FÜGGETLEN!

6.1.5. Piezoellenállás vákuummérő (piezo-resistive gauge)

A membrános vákuummérők ellenállás-érzékelős változata.

Korábban: a fém membránra helyezett érzékelőkkel mérték a behajlást. Újabban: maga a rugalmas lemez egy szilícium lapka, és erre viszik fel mikroelektronikai gyártástechnológiával a piezoellenállásokat, amelyek ellenállása változik a meghajlással. Wheatstone-hídba kapcsolják. Állandó árammal táplálva a nyomással arányos feszültséget (max. 10 V) mérik.

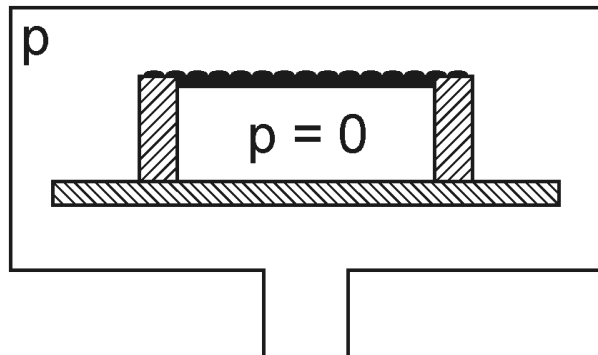
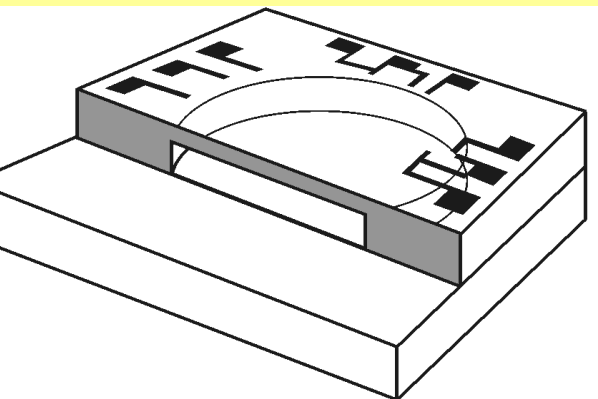
Mérési tartománya: 0,1 mbar – 50 bar; egy mérőfej átfogása: 10^4 .

Pontatlanság: max. 0,5 % TSK.

Pirani vákuummérővel közös házba építve kombinált mérőfej is létezik.

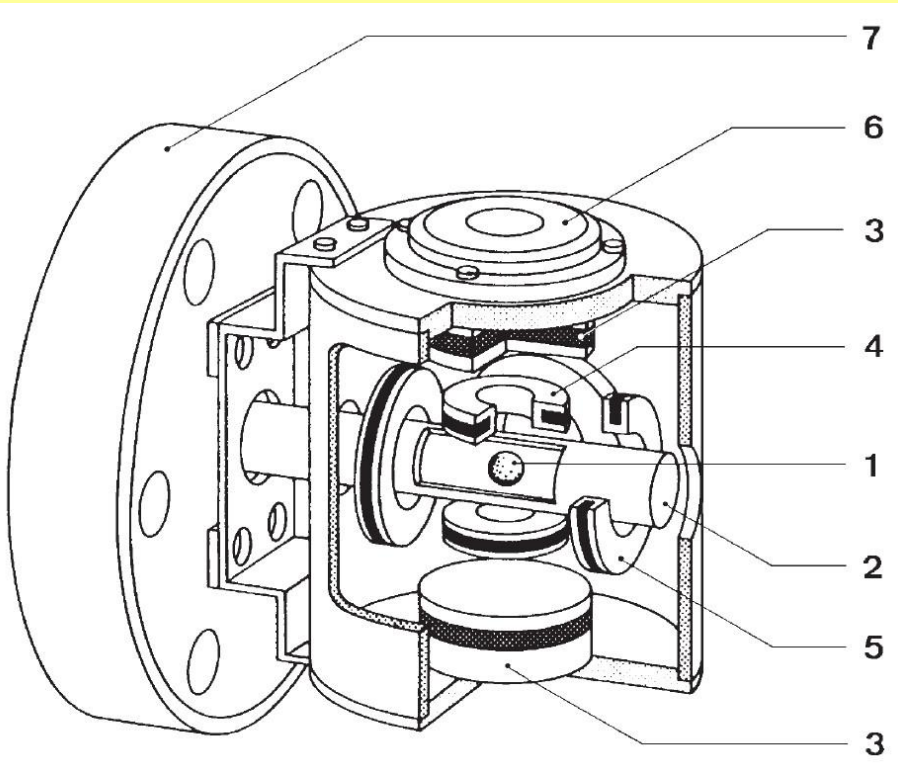
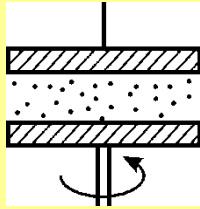
6.1.5.1. ábra. Egy piezoellenállásos diafragmás vákuummérő elvi rajza (P2).

6.1.5.2. ábra. Piezoellenállás vákuummérő fényképe (KL1).



6.2. VISZKOZITÁSON ALAPULÓ (FORGÓGOLYÓS) VÁKUUMMÉRŐ (spinning rotor gauge)

Emlékeztető: alacsony nyomáson a súrlódási erő arányos a nyomással!
Langmuir (1913) rezgő kvarcszál, Haber (1914): a megforgatott tárcsa.



6.2.1. ábra. Forgógolyós vákuummérő elrendezése.

1: inhomogén mágneses terű golyó,
2: mérőcső, 3: állandó mágnesek,
4: két tekercs a függőleges stabilizációra
(a vízszintesre való nem látszik), 5: négy
meghajtó tekercs (csak kettő látszik),
6: vízszintező, 7: csatlakozó perem a
vákuumrendszerhez (OL1).

Szakaszosan mér.

A mágneses tér segítségével
lebegtetett és megforgatott golyó
lassulása arányos a nyomással.

Kalibrációs transzfer standard Méréstartomány: $\sim 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-2}$ mbar .
Abszolút nyomás; gázfüggetlen, ha megelégszünk $\pm 3\%$ pontossággal.
Pontatlansága: $< \pm 3\%$, ha meghatározzuk a gázok összetételét.
Stabilitása $\pm 2 \%$ /év is lehet. Nincs melegedés, ionizáció $\longrightarrow$ nincs
gázdisszociáció és gázfogyasztás; nagyon alacsony a kigázosodás!

6.3. FOLYADÉKOSZLOPOS NYOMÁSMÉRŐK

Egy folyadékoszlop hidrosztatikai nyomása tart egyensúlyt az általa elválasztott két gáztér nyomása között.

Itt a folyadék a nyomás leolvasását elősegítő szerkezet szerepét is betölti.

A mért érték nem érzékeny a gázok fajtáira.

Abszolút nyomásmérő eszköz, ha a referencianyomás 0.

Folyadék: Hg: gőznyomása $T = 20\text{ °C}$ -on $p_{Hg} = 1,6 \cdot 10^{-3}$ mbar, mérgező!

Ga: $T = 907\text{ °C}$ -on $p_{Ga} = 1,33 \cdot 10^{-4}$ mbar, olvadáspontja 30 °C , kevésbé veszélyes.

Víz, olaj: nagyobb nyomáson, csak a relatív változás kijelzésére.

6.3.1. Nyitott végű folyadékoszlopos nyomásmérő (U-csöves manométer)

$$p_1 - p_2 = \rho \cdot g \cdot (h_2 - h_1) = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (6.3.1.)$$

ρ : a Hg sűrűsége,

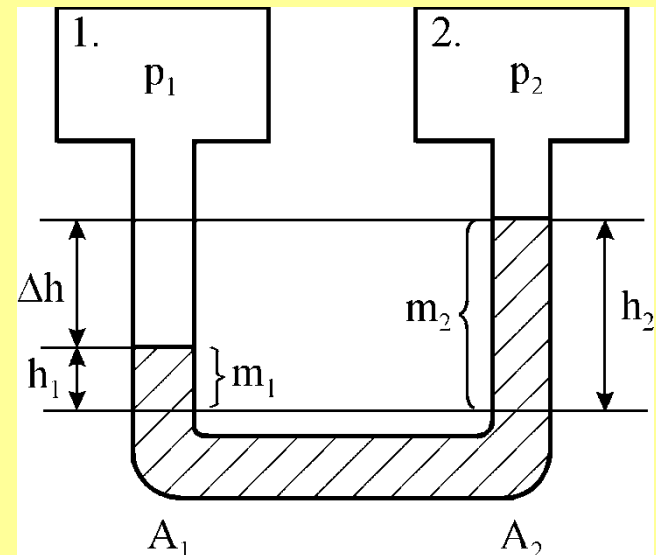
g : gravitációs állandó,

Δh : higanyszintek különbsége

$A_1 = A_2$: a cső keresztmetszete

Pontosságát meghatározó tényezők:

- a referencianyomás (legjobb, ha $p_2 = 0$),
- a meniszkusz beállása (szennyezés, kapilláris hatás 14 mm átmérő alatt),
- a meniszkusz leolvasási pontossága.



6.3.1.1. ábra. Nyitott végű folyadékos nyomásmérő elve.

A leolvasás pontossága:

- szabad szemmel kb. $\pm 0,1$ mm,
- optikai eszközzel vagy mikrométeres mozgató elektromos érintkezőkkel $\sim 0,01$ mm.
- interferometriás módszerekkel $\pm 1 \cdot 10^{-5}$ mm elérhető.

Méréshatár: átlagos körülmények között: 1013 - 1 (0,1) mbar
különlegesen gondos eljárással akár néhányszor 10^{-5} mbar-ig.

Pontosság: 0,1 – 10^{-5} mm, a leolvasás módszerétől függően.
Referencia-nyomásra érzékeny.

6.3.2. Zárt végű folyadékoszlopos nyomásmérő (zárt végű higanyos manométer)

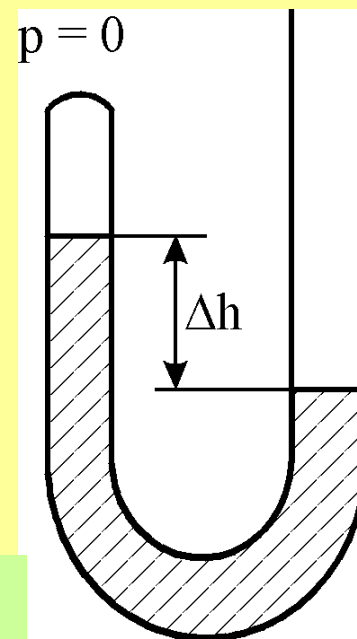
A nyitott típussal összehasonlítva:

- pontatlanságot okoz a Hg és a cső szennyezettsége (szennyező gőznyomása),
- kezelése viszont könnyebb, mint a nyitott végűé.

Méréshatár: 1013 - 1 (0,1) mbar.

Pontosság: 0,1 – 10^{-5} mm.

} Hasonló a nyitott végű manométeréhez.



6.3.2.1. ábra. Zárt végű higanyos vákuummérő.

6.3.3. Kompressziós (McLeod típusú) vákuummérő

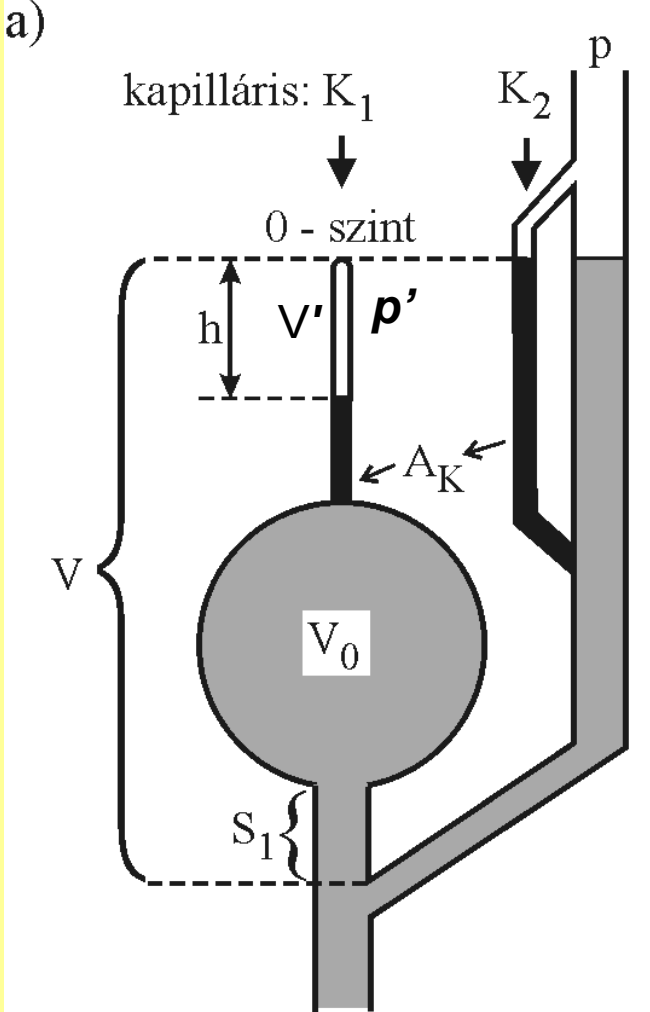
Elve: a p nyomású, V térfogatú gázt ismert V/V' mértékben összenyomjuk úgy, hogy az új p' nyomás jól mérhető tartományba essen.

Például $V/V' = 5000$ kompressziót alkalmazva, $p = 10^{-3}$ mbar eredeti nyomás helyett $p' = 5$ mbar = 3,75 Hgmm jól mérhető

$$p = \frac{V' \cdot p'}{V}$$

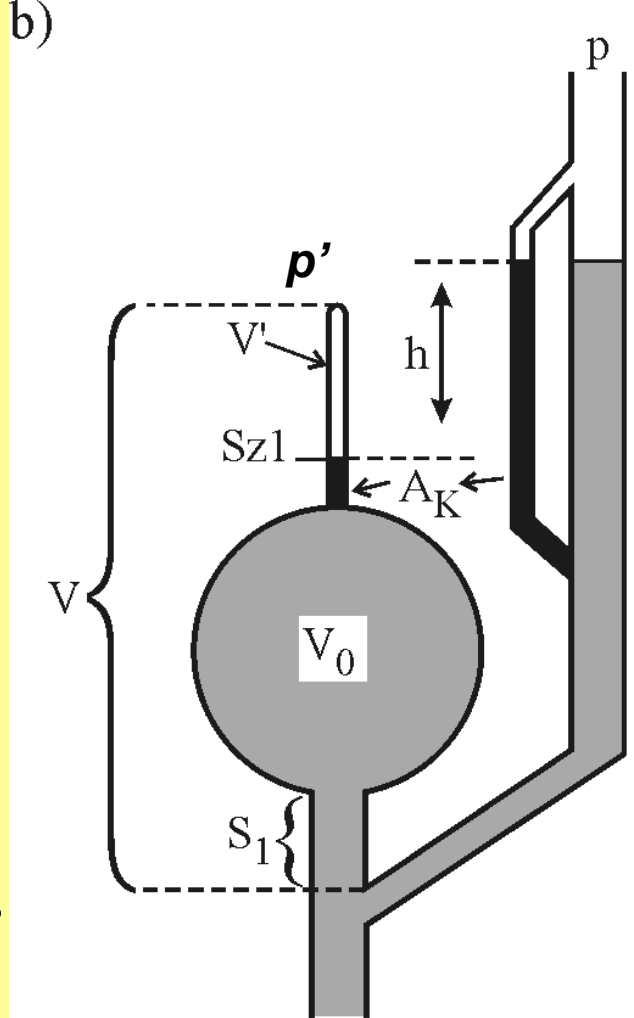
- Néhány ezerszeres kompresszió gond nélkül megvalósítható.
- A térfogatmérés pontossága az egész mérés pontosságát meghatározza.
- Nem méri a kondenzálódó gőzök nyomását – körültekintést igényel.
- A higanygőzt meg kell kötni a vákuummérő és a mérendő tér között. A hideg csapdázás következménye: Gaede-Ishi effektus: a mért nyomás (p_m) < a valódinál (p_v) ($1 < p_v/p_m < 2$). A mért értéket korrigálni kell a relatív molekuláris tömeggel (M_r) egyenesen, p -vel fordítottan arányos faktorról;
- Szennyezésekre érzékeny – ez minden higanyos vákuummérőre igaz. A szennyezők gázokat köthetnek meg, illetve a Hg tapadását okozhatják a kapilláris falán: leolvasási pontatlanság. Az elszennyezett higanyt desztillációval, az üvegedényt króm-kénsavas vagy hidrogén-fluoridos mosással kell megtisztítani;
- A higany mérgező – balesetveszély, óvatos kezelés.
- Sztatikus nyomást mér, használata időigényes.

ABSZOLÚT NYOMÁSMÉRŐ ÉS A GÁZFAJTÁKTÓL FÜGGETLEN!



$$V = V_0 + S_1 + V'$$

A_K : K_1 és K_2 kapilláris keresztmetszete



6.3.3.1. ábra. Négyzetes skálás (a.) és lineáris skálás (b.) McLeod vákuummérő elrendezése, középen egy McLeod vm. fényképe [KL3].

Ha $hA_K \ll V$, akkor

$$p = \frac{\rho \cdot g \cdot A_K}{V} \cdot h^2 \quad (6.3.3.1.)$$

Ha $V' \ll V$, akkor

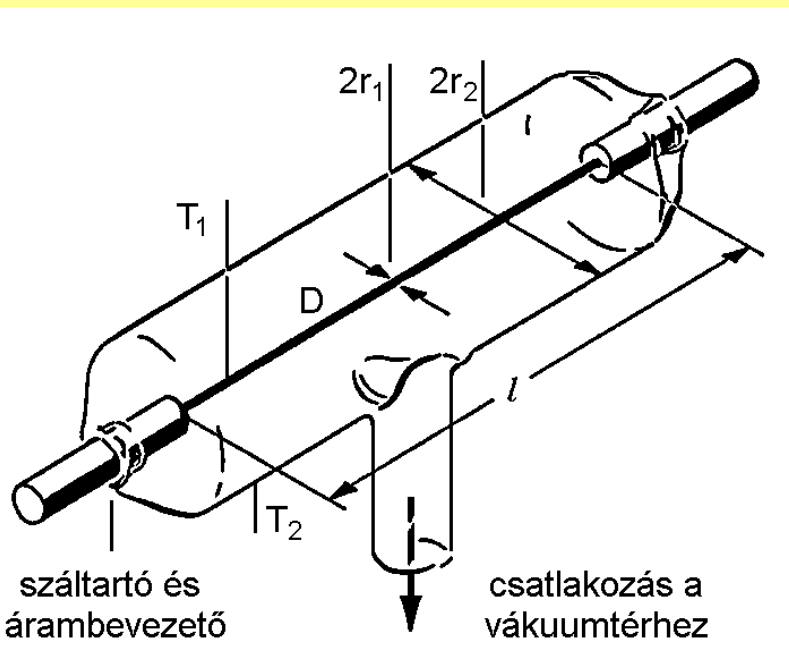
$$p = \frac{\rho \cdot g V'}{V} h \quad (6.3.3.2.)$$

A McLeod vm. mérési tartománya mindkét skálával: $10 - 10^{-5}$ mbar.

6.4. HŐVEZETÉSEN ALAPULÓ VÁKUUMMÉRŐK

Emlékeztető: a transzport jelenségek tanulmányozásakor megállapítottuk, hogy a hővezetési együttható alacsony nyomáson (< 100 mbar) függ a nyomástól, van lehetőség hővezetési vákuummérő készítésére.

Hengeres geometriájú rendszerben – a 6.4.1. ábra jelöléseivel élve – a vákuummérő cső tengelyében kifeszített r_1 sugarú, l hosszúságú **fűtött fémszálról a körülvevő gázok által elvitt hőmennyiség-áram, azaz a szál hővesztesége:**



$$\begin{aligned}\dot{Q} &= a_E \frac{n\bar{c}}{4} \frac{C_{mol,V}}{N_A} \cdot 2\pi \cdot r_1 \cdot l \cdot (T_1 - T_2) \\ &= L(T_1; p) \cdot (T_1 - T_2)\end{aligned}\quad (6.4.1.)$$

L magában foglalja a hővezetési együtthatót (λ), így a (3.3.5.) alapján **alacsony nyomáson** $L \propto p$.

Átmeneti nyomástartományban a tapasztalat szerint egy geometriai faktorról (g) is kell számolni. Ekkor

$$\dot{Q} = \varepsilon \frac{p}{1 + gp} \quad (6.4.1. a.)$$

6.4.1. ábra. Hővezetési (Pirani) vákuummérő cső elvi felépítése.

ahol ε a gáz tulajdonságaitól ($T, \bar{c}, C_{mol,V}$) és az eszköz geometriájától függ.

6.4.1. Pirani vákuummérő

A fűtött szál mérete: $r_1 = 5 - 15 \mu$, $\ell \approx 50 - 100 \text{ mm}$,
anyaga: W vagy Ni (korrozív közegben ajánlatosan Pt),
hőmérséklete: $100 - 150 \text{ }^\circ\text{C}$ (Az elektromos fűtés: $\dot{Q}_{el} = U \cdot I$)

Egyensúlyban $\dot{Q}_{el} = \dot{Q}_{gáz} + \dot{Q}_{vég} + \dot{Q}_{sug} + \dot{Q}_{áraml}$, ahol

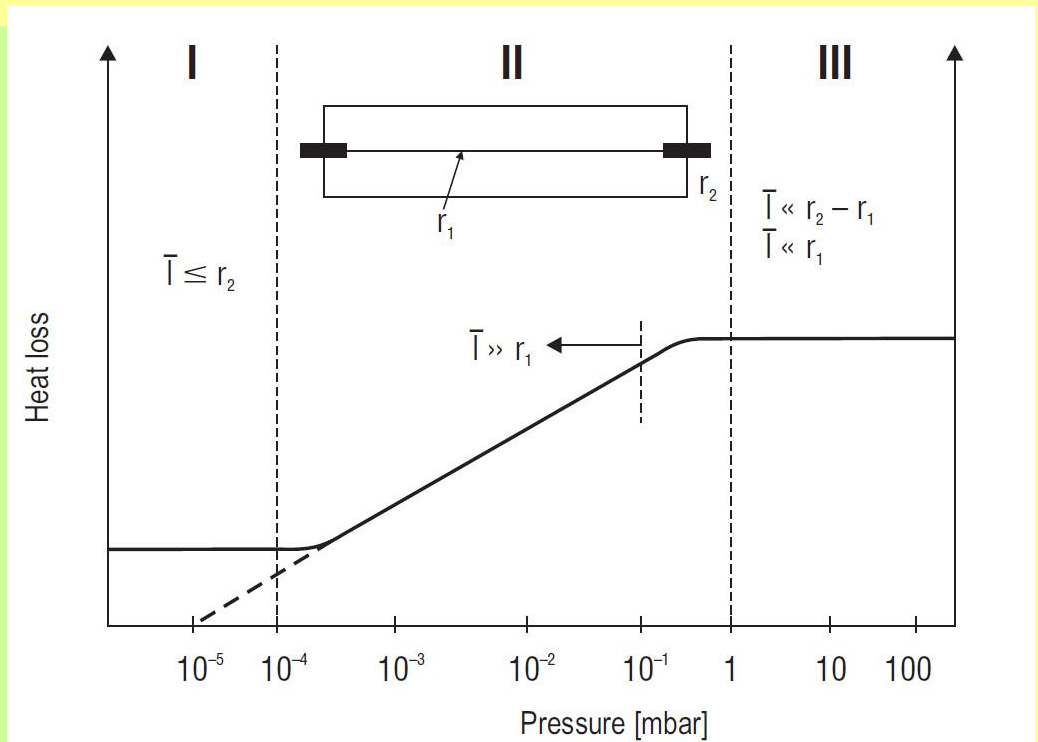
$\dot{Q}_{gáz} = \varepsilon \frac{p}{1 + g \cdot p}$: hővezetés a gázon át $\rightarrow$ nagy nyomáson $\dot{Q}_{gáz} = \text{állandó}$
 $\rightarrow$ kis nyomáson $\dot{Q}_{gáz} \sim k \cdot p$

$\dot{Q}_{vég}$: hővezetés a szál végeinél, a rögzítésen át,

$\dot{Q}_{sug}$: hősugárzás a fűtött szálról,

$\dot{Q}_{áraml}$: a sűrű gáz áramlásával közvetített hőáramlás.

6.4.1.1. ábra. Fűtött szál hővesz-
tesége a nyomás függvényében
[OL1]. Nagy nyomáson az állan-
dó $\dot{Q}_{gáz}$ és $\dot{Q}_{áraml}$ dominál (III);
kisebb nyomáson a hőáramlás
megszűnik, $\dot{Q}_{gáz}$ dominál:
mérésre alkalmas szakasz (II);
még kisebb nyomáson (I):
 $\dot{Q}_{gáz} < \dot{Q}_{sug} + \dot{Q}_{vég}$, az utóbbi
veszteségek szabják meg a
mérhető legkisebb nyomást.

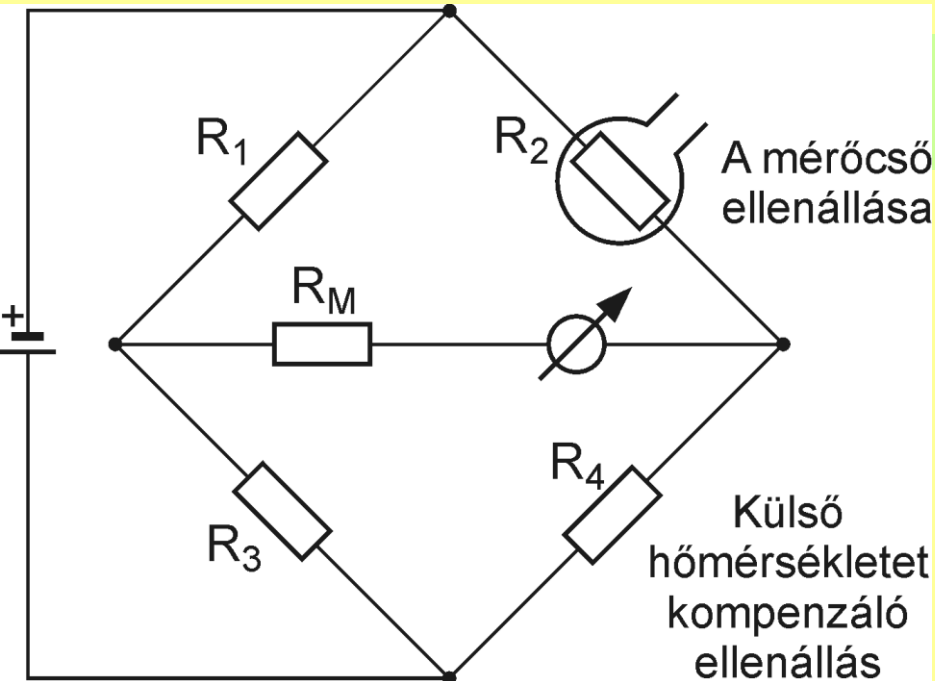


Az elektromosan fűtött szálba betáplált teljesítmény:

$$U_D \cdot I_D = U_D^2 / R_D = \dot{Q}_{el} = \dot{Q}_{vég} + \dot{Q}_{sug} + \dot{Q}_{gáz} + \dot{Q}_{áraml} = \varepsilon \left(p_0 + \frac{p}{1 + gp} \right)$$

$p \rightarrow 0$ nyomáson: $\dot{Q}_{el} = \dot{Q}_{vég} + \dot{Q}_{sug} = \varepsilon \cdot p_0$ (6.4.1.1.)

p_0 a nyomásmérés alsó korlátja.



6.4.1.2. ábra. A Pirani vákuummérő elvi kapcsolási rajza.

Mérési módszerek

1. állandó szálhőmérséklet (ellenáll.)

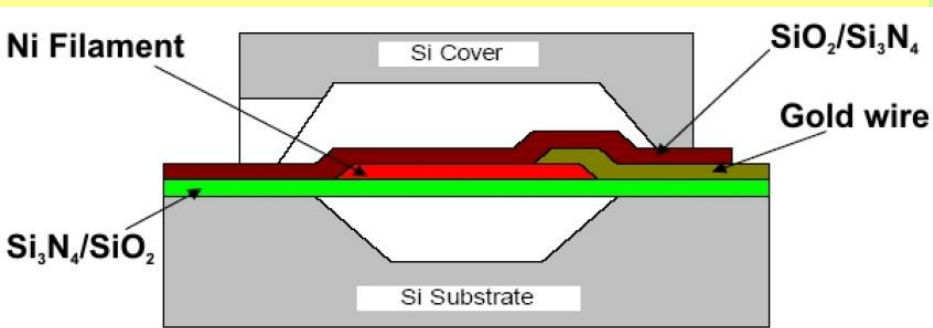
A Wheatstone-hídban a nyomás változásakor a szál hőveszteségének változását kompenzálja a betáplált elektromos teljesítmény változása: a szál állandó hőmérsékleten marad – állandó ellenállás. A fűtőfeszültség változik, és ez lesz a nyomás változásának mértéke.

Méréstartománya szélesebb (10^{-3} – 100 mbar), ezen belül 10^{-2} és 10 mbar között szélesebbre nyújtható. Minden Pirani vákuummérő skálája nemlineáris.

2. Állandó fűtőteljesítmény

A szál fűtő teljesítmény állandó, a szál hőmérséklete/ellenállása változik a nyomással. A szálon eső feszültséget mérik, ez Pirani eredeti megoldása is. Az átfogott méréstartomány kisebb, de a tartomány közepe (10^{-1} – 10 mbar) széles.

3. Szilárdtest Pirani mérőfej



- A Pirani vákuummérő fűtött mérőszálát, a mérőhíd további ellenállásait és a kompenzáló ellenállást integrált formában egyetlen szilícium lapocskára viszik fel vékonyréteg formájában (mikroelektromechanikai rendszer – MEMS).
- Miniatűr méretű, ezért a Knudsen szám nagy és nincs hőáramlás, felső méréshatára kitolódik.
- A korai gyártmányok hőkapacitása nagyobb, alsó méréshatára lényegesen rosszabb volt a hagyományos Piraniénál. Ma már sokkal kisebb méretű és jobb annál. Van olyan gyártmány, amely $1 \cdot 10^{-5}$ – 1000 mbar között mér, mégpedig $1,3 \cdot 10^{-3}$ – 100 mbar között 5% pontossággal (MicroPirani Vacuum Sensor Kit 905 [MKS1]).
- Előnyei: 8 nagyságrendet fog át, olajfilm szennyezés nem ég rá (alacsony hőmérsékl.), stabil a környezeti hőmérséklet változásával szemben.

6.4.1.3. ábra. Egy szilárdtest Pirani keresztmetszete és felépítése [MKS2].

Si fedél
Hőmérő ellenállások
Mérő ellenállás

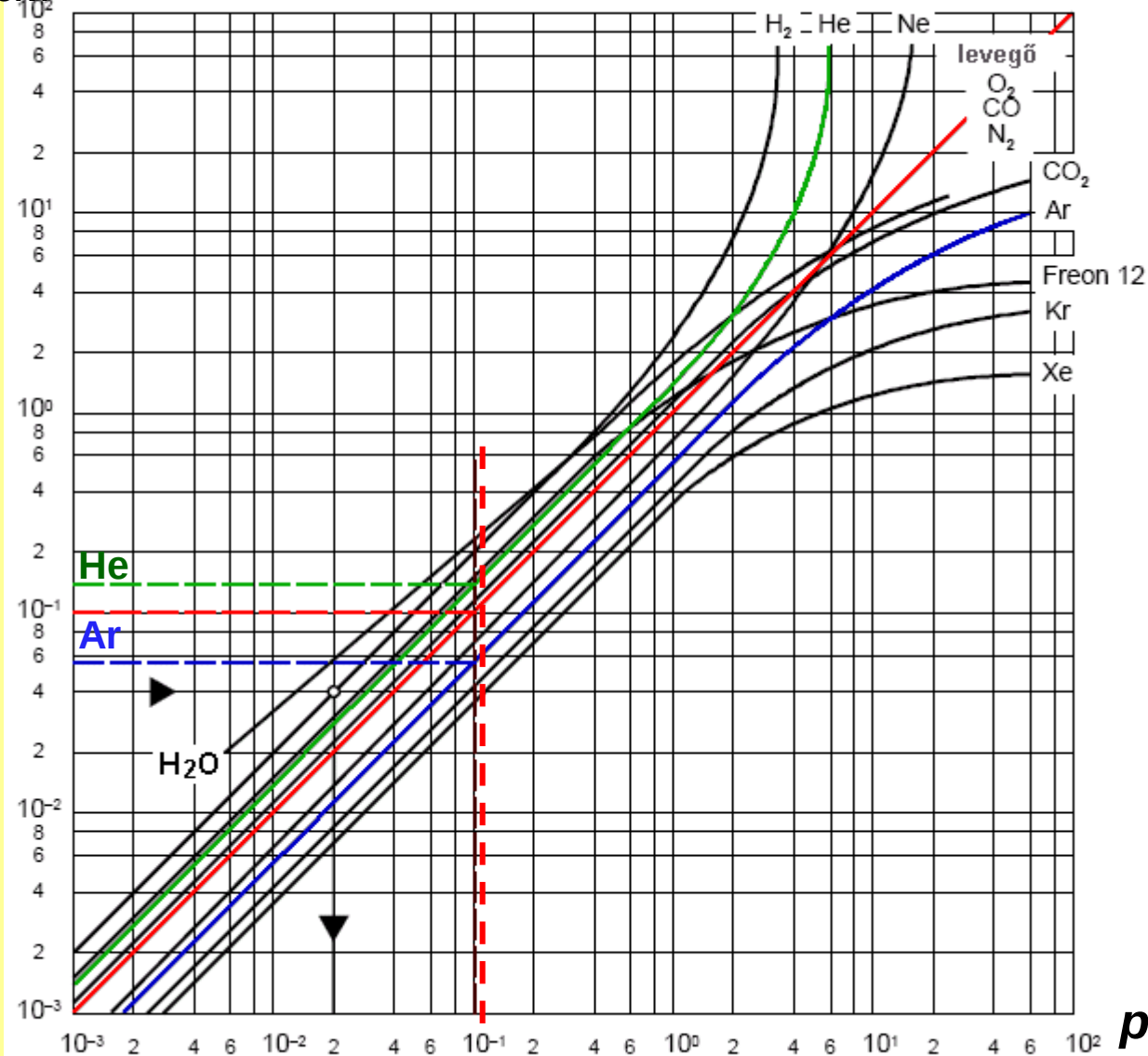


MKS 925
jeladó [MKS1]



6.4.1.4. ábra. MicroPirani
Vac. Sensor Kit 905 [MKS1]

$p_{leolv.} \text{ (mbar)}$



$p_{val.} \text{ (mbar)}$

- **Hitelesítés:**
N₂-re, esetleg
levegőre.
- **Lyukkeresés**
lehetősége.
- **Méréshatár**
kiterjesztése
felső határ:
a méretek
csökkentésével,
konvekcióval;
alsó határ:
 - a 6.4.1.1. kifeje-
zés p_0 értékét
elektronikusan
kompenzálva,
 - a szál átmérőjét
csökkentve.

6.4.1.4. ábra. Egy korszerű Pirani vákuummérőn leolvasott ($p_{leolv.}$) és a valódi nyomás ($p_{val.}$) [P1]. Bejelöltük a mért eltérést He és Ar esetében.

A Pirani vákuummérő

Szennyezésre érzékeny

(pl. kondenzált olajgőzök), mert a lerakódások a szál hőátadását megváltoztatják. Tisztítása a W-szál vékonysága miatt kockázatos.

Jeladó (transducer) kivitel

A Pirani kimeneti jele az erősítés után néhány V nagyságú, ezért zajosabb környezetben, illetve hosszú összekötő vezetékkel (akár néhány 100 m) is használható. A korszerű mérőfejekbe a szükséges elektronikát is beépítik. Ezek csak törpefeszültségű táplálást igényelnek, és logaritmikus egyenfeszültségű jelet adnak ki – jeladó (transducer) kivitel.

Folyamatosan mérnek

Az időbeni változások is regisztrálhatók velük. A Pirani vákuummérők válaszideje akár néhány ms nagyságú is lehet, ezért beavatkozó eszközök (szelepek, kapcsolók) jeladójaként is használhatók.

Tokozás

Régebben csak üvegbúrával, ma leginkább fémházas kivitelben gyártják.

A Pirani vákuummérők méréshatára: 10^{-3} (10^{-4}) – 1000 mbar.

A pontosság: tiszta mérőfejeknél ± 5 -10%-ra csökkenthető.

A szilárdtest-mérőfejek pontosabbak és stabilabbak, méréshatáruk tágabb (10^{-5} – 1000 mbar) lehet.

Kombinált Pirani – piezoellenállás vákuummérő (6.4.1.5. ábra).

Kombinált Pirani – kapacitív mérőfej .

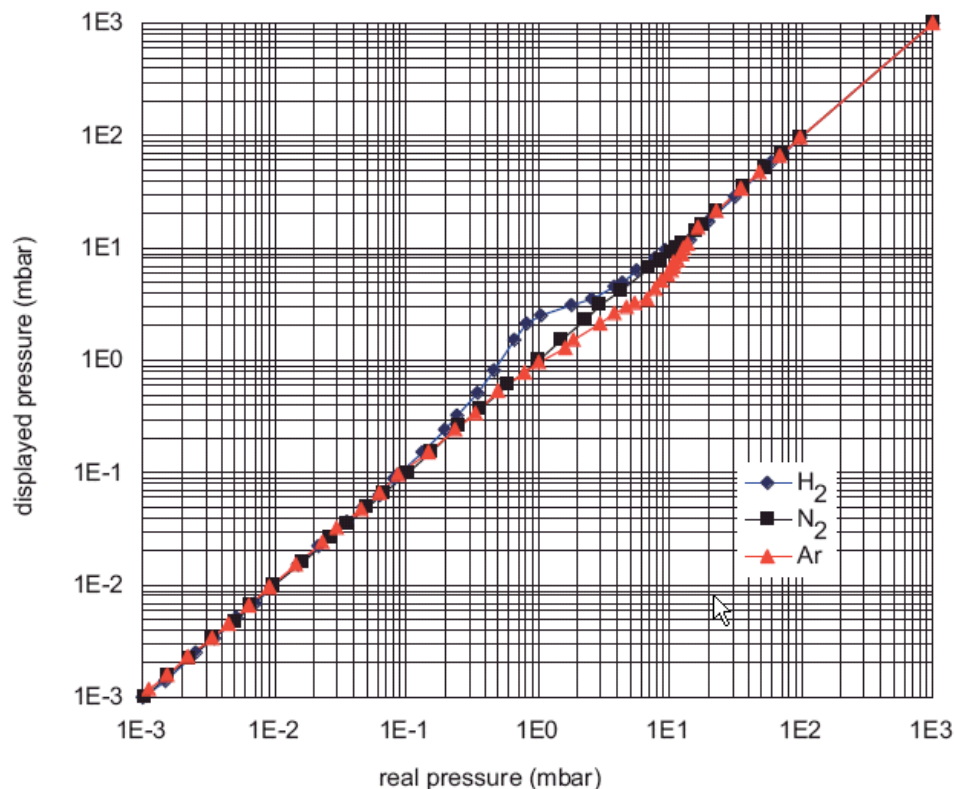
Kombinált Pirani – ionizációs mérőfej: lásd az ionizációs vm-nél.

Egy mérőházban helyezik el a piezo- (vagy a kapacitív) érzékelőt és a Pirani mérőszálat. Méréshatáruk átfedi egymást. A piezo (vagy a kapacitív) érzékelő a nagyobb nyomáson, a Pirani pedig a mérés határ alsó felében pontosabb.

Méréshatár: 10^{-4} – 1000 (2000) mbar, szilárdtest Piranival: 10^{-5} – 1000 mbar.

Pontosság: 5 mbar felett: 0,5 % TSK, 1 mbar alatt a mért érték 5 %-a.

Csak a Pirani-rész érzékeny a gázfajtákra.



Relative sensitivity in the molecular range (correction factor):

Nitrogen	1.00
Air	1.00
Hydrogen	0.58
Helium	1.02
Argon	1.59
Carbon dioxide	0.89

6.4.1.5. ábra.

Egy kombinált Pirani - piezoellenállás vákuummérő mért jele a valódi nyomás függvényében – gyári adat (P2).



6.4.1.6. ábra. Egy Pirani vákuummérő fej és meghajtó/kijelző elektronikája [KL1].

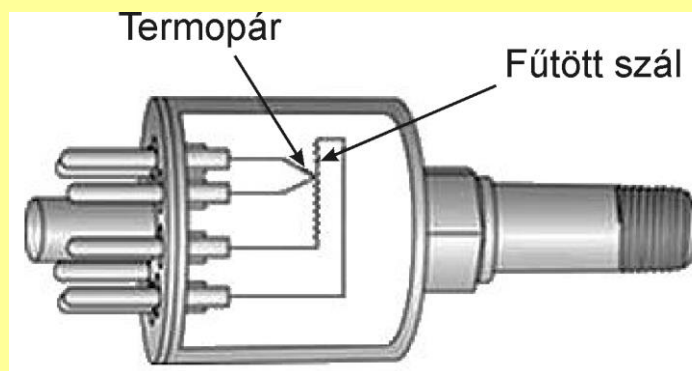
6.4.2. Termokeresztes (termopár) vákuummérő (thermocouple)

Ebben az állandó teljesítménnyel fűtött szál nyomással változó hőmérsékletét a szálhoz erősített termopárral mérik.

Kimeneti jele mV nagyságrendű.

Zajokra érzékenyebb, lassabb, pontatlanabb a Piraninál.

Olcsó és egyszerű mérőeszköz.



6.4.2.1. ábra. A termopár felépítése [KL4].

6.5. IONIZÁCIÓS VÁKUUMMÉRŐK

- Az eddigi vákuummérők 10^{-3} , legfeljebb 10^{-5} mbar-ig használhatók.
- Szükség van kisebb nyomások mérésére is.
- Csak közvetett módszer lehetséges. Ilyenek az ionizációs vákuummérők.

A vákuummérő terében létrehozott állandó elektronárammal ionizáljuk a gáztomokat, molekulákat, és a gázok részecskesűrűségével (azaz nyomásával!) arányos ionáramot mérjük.

- Az ionáram és nyomás közötti megfeleltetést **hitelesítéssel** (etalonra visszavezetve), ill. **kalibrációval** végezhetjük el (gyári műszernél ez adott).
- Az ionizáció az elektronok és a gáztom rugalmatlan ütközésével megy végbe. Keletkezhetnek:

- pozitív ionok: amikor az elektronok az atom elektronhéjáról elektronokat ütnek ki;
- negatív ionok: a bombázó elektron befogódik az elektronhéjba – ez az előzőnél kb. 100-szor kisebb valószínűségű folyamat.

A továbbiakban hallgatólagosan mindig egyszeres töltésű pozitív ionokra gondolunk, az esetleges eltérést külön megnevezzük.

- Az ionizációs vákuummérők a nagy-, ultranagy-, sőt extrémnagy-vákuum irányában terjesztik ki a mérés lehetőségét.
- Folyamatosan működtethetők, a változások követésére is alkalmasak.

6.5.1. Izzókatódos ionizációs vákuummérők tulajdonságai, hibaforrásai

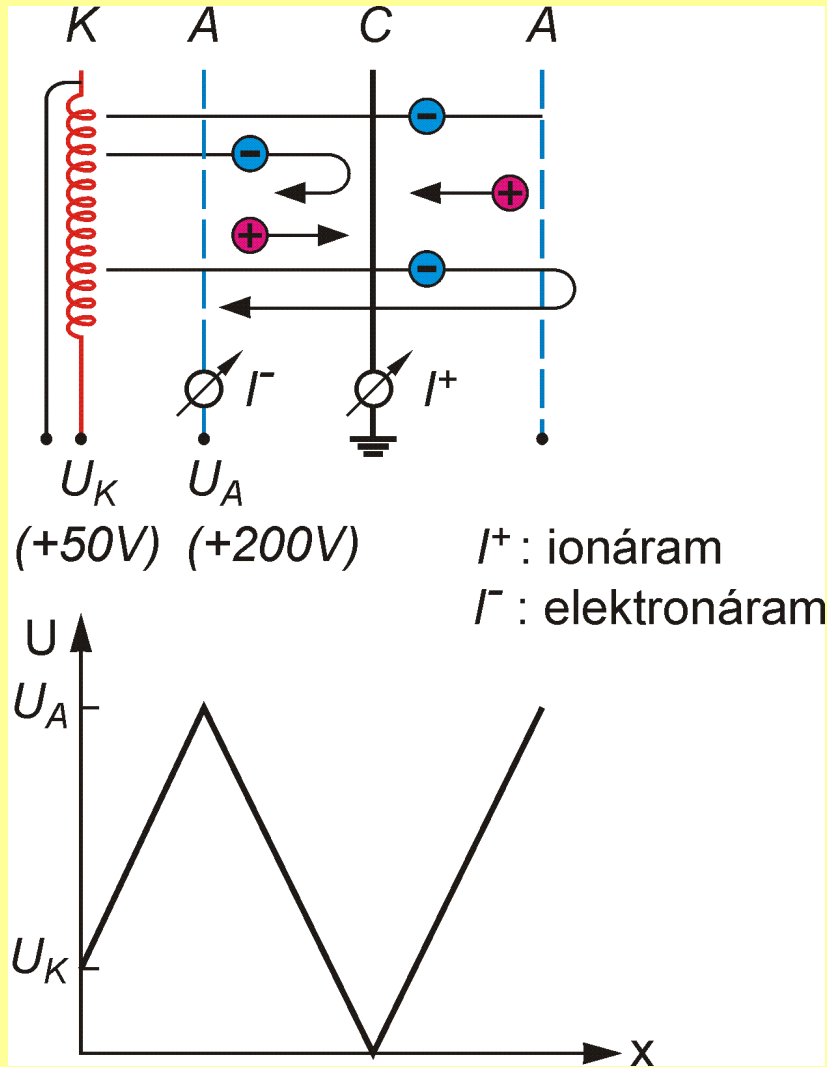
A katódból állandó (negatív visszacsatolással stabilizált) I^- elektronáram folyik az anódra, és eközben az elektronok gázatomokkal/molekulákkal ütköznek. Az ütközésekben az elektronok σ_i valószínűséggel ionizálják a gázcseccskéket (σ_i = ionizációs hatáskeresztmetszet).

A keletkező egyes pozitív ionok a (többnyire föld potenciálán lévő) vékony fémszálla, az ionkollektorra (C) futnak fel:
az így kialakuló I^+ áram a gáznyomással szigorúan arányos.

6.5.1.1. ábra. Izzókatódos ionizációs vákuummérő elvi felépítése és a potenciál hozzávetőleges alakulása a térben.

A: anód, K: katód,
C: ionkollektor.

Potenciálok:
katódé: U_K , anódé: U_A ,
 I^- : elektronáram, I^+ : ionáram.



Differenciális ionizációs együttható (S_0):
 az n részecskesűrűségű gázban egységnyi úthosszon egy elektron által létrehozott ionok száma $p_0 = 1,33$ mbar nyomáson, $T_0 = 273,15$ K hőmérsékleten.

S_0 értéke 10 – 20 eV elektronenergia érték körül kezd rohamosan nőni, majd egy 100 eV körüli tartományban maximumot mutat, utána lassan csökken. Minden gáz viselkedése hasonló, de S_0 értékei különbözőek.

6.5.1.1. táblázat. Néhány gáz tájékoztató S_0 értéke (ion/cm/elektron).

Hg	N ₂	Ar	Ne	H ₂	He
20	10	12	2,7	3,8	1,2

Az ionkollektoron mérhető pozitív ionáram:

$$I^+ = I^- \cdot \varepsilon \cdot p \tag{6.5.1.}$$

ahol $\varepsilon = \frac{S_o}{p_o} \cdot \frac{T_o}{T} \cdot \Delta l$

a vákuummérő cső állandója, $[\varepsilon] = \text{mbar}^{-1}$

(6.5.1.a)

$K = I^- \cdot \varepsilon$: a vákuummérő cső érzékenysége $([K] = \text{A} \cdot \text{mbar}^{-1})$.

- A gyártók vagy K , vagy ε értékét adják meg a vákuummérő jellemzésére.
- Nitrogénre ε értéke általában 10 mbar^{-1} érték körül van.
 - Legtöbbször $I^- = 1 \text{ mA}$, ekkor a mérőcső érzékenysége: $K = 10^{-2} \text{ A/mbar}$.

ε a nyomás függvényében állandó (a pontos nyomásmérés feltétele), de 10^{-4} mbar felett kissé, majd erősen csökken az ionok rekombinációja miatt.

A vákuummérő cső állandója (ε) függ:

- a geometriától (6.5.1. egyenletben $\Delta \ell$ révén),
- a hőmérséklettől (± 30 K-en belül elhanyagolható),
- a nyomástól,
- az elektronok energiájától (6.5.1.1. táblázat),
- a gázfajtától (6.5.1.1. táblázat) (lyukkeresés lehetősége)
- másodlagos hatásoktól – az ionkollektoron és a mérőcső falán keletkezett másodlagos elektronoktól (l. később)

A.) A mért nyomás nagyobb a valódinál, $p_{\text{mért}} > p_{\text{valódi}}$ (energetikai okok)

- gázfejlődés a meleg felületeken

- hő által keltett gázdeszorpció,
- kigázosodás: gázdiffúzió a meleg alkatrészek belsejéből,
- kémiai reakciók a forró felületeken (pl. $2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$);

- gázmolekulák disszociációja

Az izzókatód felületén, illetve elektronok, ionok és hő hatására máshol is létre jön, így növeli a gáZRészecskék számát (ezzel p -t is)

- gáz- és iondeszorpció elektronütközés hatására

Elektronok által keltett deszorpció (**electron-stimulated desorption, ESD**) – az egyik fő komponense a vákuummérő alsó méréshatárát megemelő maradékáramnak ultranagy-vákuumban. Az ESD-ionok energiája kb. 6 eV-tal nagyobb, mint az anódrács terében a gázmolekulák elektronbombázásával keltett ionoké. Precíziós mérésekben ez elegendő a megkülönböztetésükre.

- maradékáram a kollektoron (röntgenhatás**) – alsó méréshatárt emeli**

Az anódra érkező elektron ott lágy röntgensugárzást vált ki, amely az ionkollektorból elektronokat kelt. A kollektorról távozó elektronok árama olyan, mint egy beérkező I^+ ionáram, amelynek egy p_r nyomás felel meg. $\text{I}^+ \rightarrow p_r$; $p_{\text{mért}} = p_{\text{valódi}} + p_r$

$p_{mért} > p_{valódi}$ GYAKORLATI KÖVETKEZMÉNYEI:

- Minél kisebb legyen a mérőfejben a gázfelhalmozódás:
 - bemerülő mérőfej,
 - rövid, nagy keresztmetszetű csatlakozó cső a vákuummérőnek.
- A mérőfej kigázosítása kifűtéssel – hogy a későbbiekben ne legyen forrása a deszorpciónak:
 - legérzékenyebb az anódrács – direkt fűtés, ill. elektronbombázás
 - mérőcső fala

B.) A mért nyomás kisebb a valódinál, $p_{mért} < p_{valódi}$

- fordított röntgenhatás

A mérőfej fala és sok mérőfejben az ionkollektor is földpotenciálon van. A röntgen fotonok által a falból keltett elektronok egy része eléri az ionkollektort, ez az elektronáram csökkenti a pozitív kollektoráramot.

- ionok lekötése, azaz ionos szivattyúzás

Az ionkollektorra becsapódó ion α valószínűséggel ($0 < \alpha < 1$) megkötődik az ionkollektor felületén, ami által csökken a nyomás, azaz szívóhatás érvényesül. Ha K a mérőcső érzékenysége, ez az ionos szívósebesség:

$$S = 0,25 \cdot \alpha \cdot K \qquad [S] = \ell \, s^{-1}; [K] = A \cdot mbar^{-1} \qquad (6.5.2.)$$

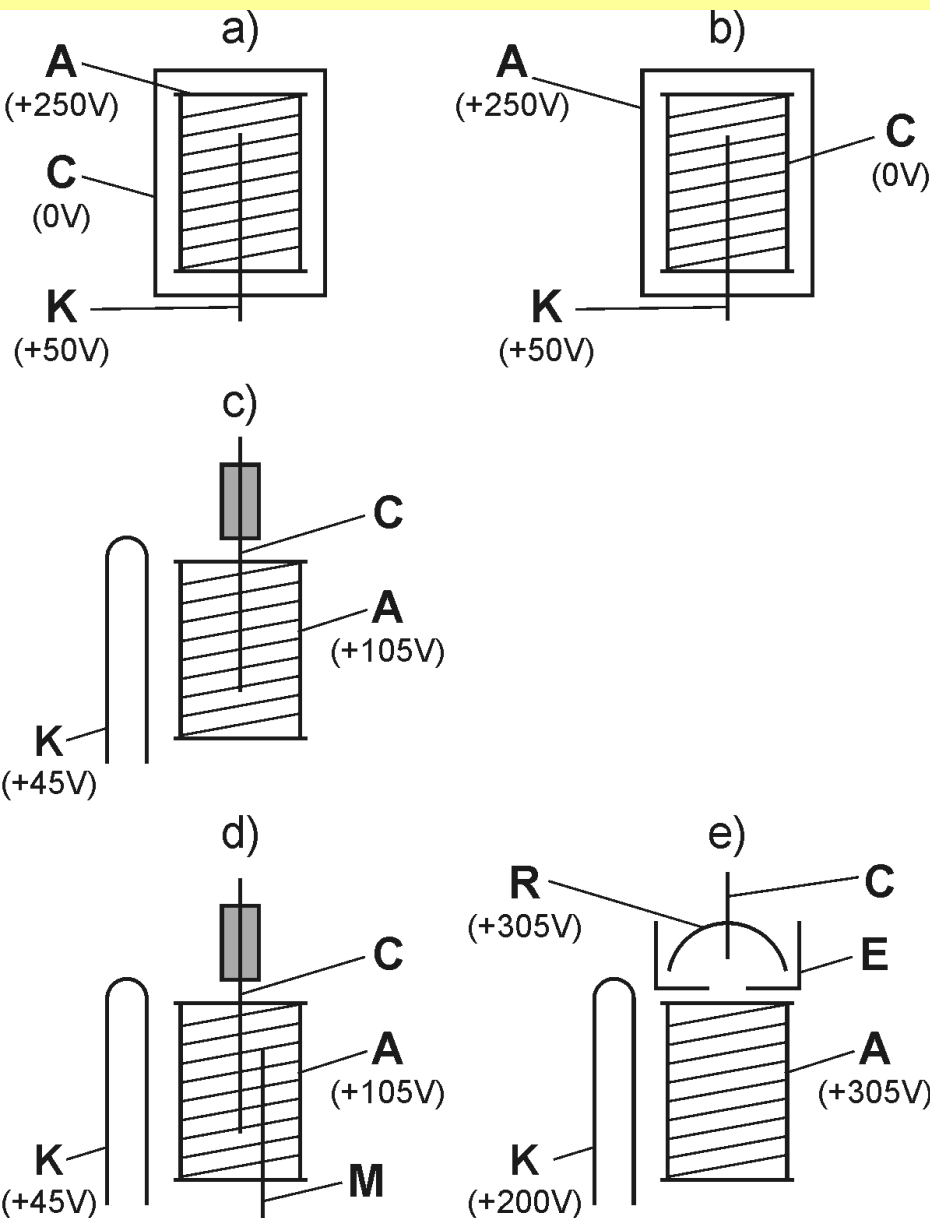
Felhasználását látjuk még a getter-ion szivattyúknál.

6.5.2. Izzókatódos ionizációs vákuummérők fajtái

Felsoroljuk azokat az ismert megoldásokat, amelyeket a gyakorlatban használunk. A sematikus ábránál példaként számszerűen is feltüntetjük az egyes elektródok potenciálját, de az adatok csak tájékoztató jellegűek.

- Az ionkollektor többnyire földpotenciálon van, ez az elektromos zaj szempontjából kedvező.
- Az izzókatódból tartalékot is építenek be.
- Használatos emissziós (elektron-) áramok: 0,1; 1; 10 mA
(nagyvákuumban leginkább 1 mA, UHV-ban 10 mA, nagynyomású változatokban 0,1 mA).
- Katódvédelem: a fűtőáramát egy egyszerű értékre korlátozzák, illetve ha a nyomás meghalad egy biztonságos értéket (az ionkollektor áramával érzékelhető), akkor egy védőáramkör a katódfűtés áramát megszakítja.
- A katód anyaga W, illetve rosszabb vákuumon vagy korrozív közegben használva oxidkatód: ittrium-oxid vagy tórium-oxid bevonatú irídium.
- A W katódot 10^{-3} mbar-nál nagyobb nyomáson nem szabad használni, de tartósan csak 10^{-4} mbar alatt.
- Az izzókatódos ionizációs vákuummérőket üvegbúrával is és (különösen UHV, XHV célra) fémházzal, fémperekes szereléssel is gyártják.

Izzókatódos ionizációs vákuummérők



6.5.2.1. ábra. Ionizációs vákuummérő csövek elvi elrendezése [L2].

K: katód, **A:** anód, **C:** ionkollektor,
M: modulátor, **R:** reflektor,
E: kivonó-árnyékoló (extraktor).

a) Koncentrikus trióda típusú

Legrégebbi. Nagy röntgen-effektus.
Méréstart.: $10^{-2} - 10^{-6}$ (10^{-7}) mbar.

b) Közepes vákuumra

Kis méretben is: rövidebb ionpályák,
nagyobb nyomás mérése is lehetséges.

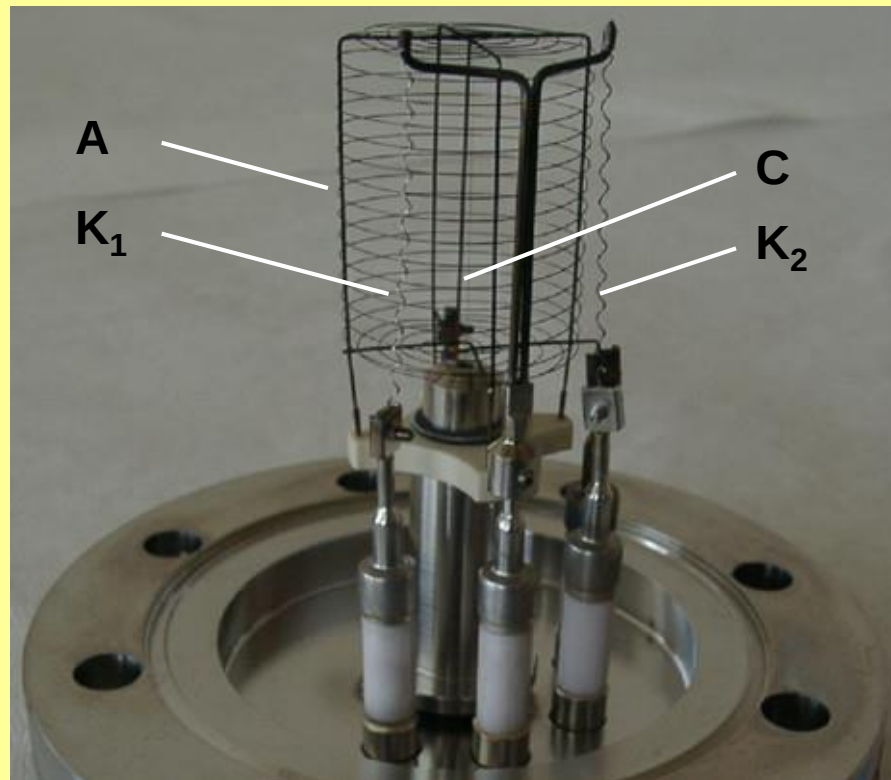
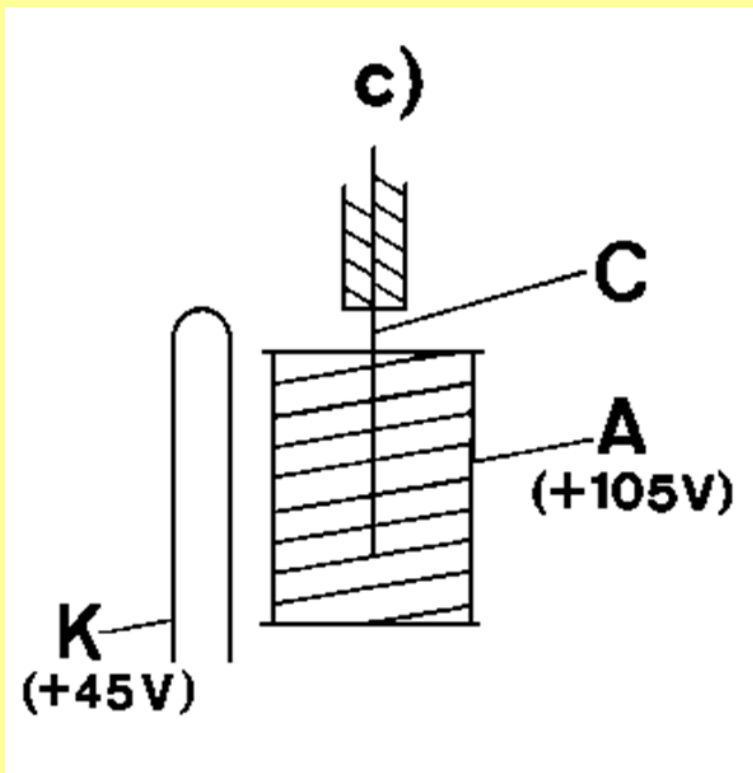
Platina-irídium vagy oxid-katód .
Méréstart.: $1(10) - 10^{-6}$ (10^{-5}) mbar.

c) Bayard-Alpert

d) Modulátoros Bayard-Alpert

e) Extraktoros

6.5.2.1. Bayard-Alpert típusú (BA) ionizációs vákuummérő



6.5.2.2. ábra. Bayard-Alpert mérőfej vázlata és fényképe (Tungsram).

Bayard és Alpert a katódot (K) kiemelték az anódrács (A) teréből, és vékony, kis felületű ionkollektort (C) tettek az anódrács tengelyébe.

A röntgen effektus és az alsó méréshatár 3–4 nagyságrenddel csökkent.

A BA-mérőfej a leginkább használatos, ez tekinthető alapeszköznek.

Méréshatára: $10^{-3} - 10^{-10}$ mbar (mérőcső típusától függően lehet eltérés), de gyártanak nagyobb nyomáson működőt is (oxid-katód, kis méret).



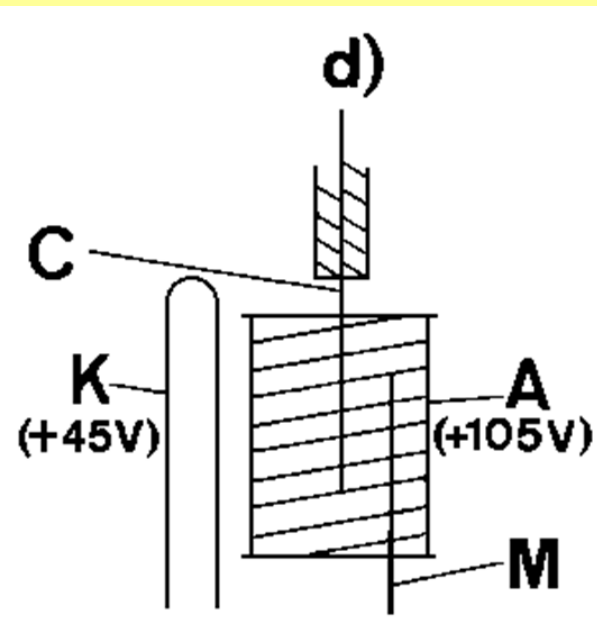
5×10^{-10} Torr

6.5.2.3. ábra. Bayard-Alpert típusú mérőfejek, a működtető elektronikával egybeépítve. Méréshatár: $6,6 \cdot 10^{-2} - 6,6 \cdot 10^{-10}$ mbar. Tápfesz. igény: 15 – 30 V egyenfesz. Teljesítmény: 7 W, kifűtéskor 14 W. Max. távolság: 100 m. [EV1]



6.5.2.4. ábra. Egy közepes vákuum tartományban használatos Bayard-Alpert ionizációs vm. részlete (Tungsram). Méréshatár: $10^{-1} - 10^{-5}$ mbar.

6.5.2.2. Modulátoros Bayard-Alpert ionizációs vákuummérő



6.5.2.1.d. ábra

A Bayard-Alpert mérőcső A anódrácsán belül, az anódhoz közel az M modulátor elektród (6.5.2.1.d. ábra).

Ha $U_M = U_A$, akkor a modulátorra ionáram nem folyik, az ionkollektor árama változatlan, a mért nyomás:

$$p_{\text{mért}, B-A} = p_{\text{valódi}} + p_{\text{röntgen}}$$

Ha $U_M = U_C$, akkor az ionkollektor áramának egy $(1-\alpha)$ részét a modulátor fogja fel, a röntgenhatás pedig ugyanakkora marad. A mért nyomás:

$$p_{\text{mért}, \text{Mod}} = \alpha \cdot p_{\text{valódi}} + p_{\text{röntgen}}, \text{ ahol } \alpha < 1.$$

Innen a valódi gáznyomás: $p_{\text{valódi}} = (p_{\text{mért}, B-A} - p_{\text{mért}, \text{Mod}}) / (1-\alpha)$.

Az α szorzót nagyobb nyomáson kísérletileg meghatározhatjuk, ahol a röntgenhatás már elhanyagolható. Más modulációs technikák is ismertek, de ezek is az itt leírt elvre vezethetők vissza.

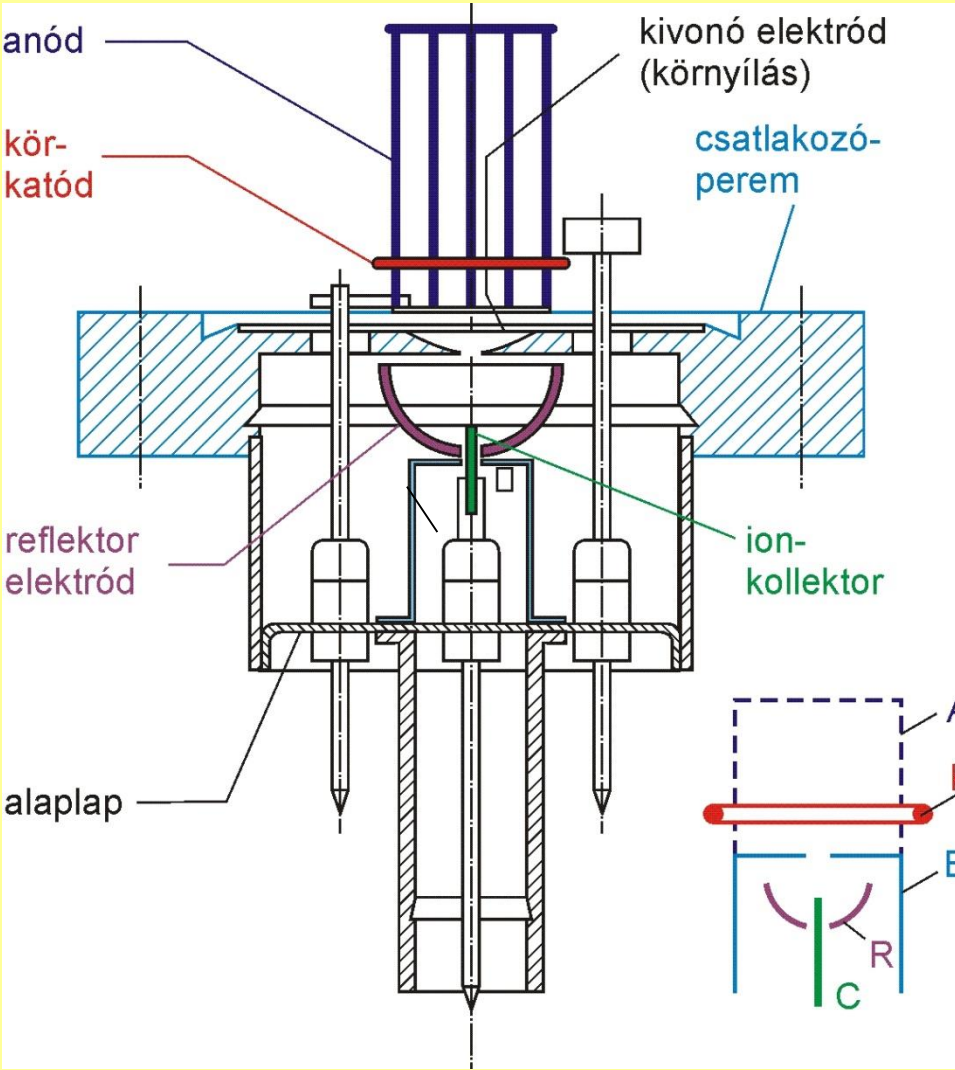
A kereskedelemben kapható modulátoros vákuummérők
méréstartománya: $10^{-3} - 10^{-12}$ mbar.

6.5.2.3. Extraktoros ionizációs vákuummérő

6.5.2.5. ábra. Az extraktoros ioniz. vm. egy lehetséges felépítése [L2].

- Az ionkollektor nagyon kicsi, az ionokat kivonó negatív potenciálú nyílás (extraktor) mögé tették.
- A katódnak nincs rálátása az ionkollektorra.
- Az extraktor erősen korlátozza a kollektorra jutó ESD ionok és röntgen fotonok térszögét, következésképpen intenzitását.
- Az ionok fókuszálását a reflektor elektród is segíti.
- Az extrémnagyo-vákuum (XHV) tartományban talán a legelterjedtebb vákuummérő.

Méréshatára: $10^{-4} - 10^{-12}$ mbar



6.5.2.4. Egyéb izzókatódos ionizációs vákuummérők

Szupresszoros vákuummérő	Izzókatódos magnetronos vm.
$2 \cdot 10^{-13} - 4 \cdot 10^{-15}$ mbar	$10^{-13} - 6 \cdot 10^{-15}$ mbar
Alsó mérőshatár (műhelyektől függően)	
csőállandó: $\varepsilon = 13 \text{ mbar}^{-1}$,	$5,3 \cdot 10^5 \text{ mbar}^{-1}$ is lehet.

Kombinált izzókatódos ionizációs és Pirani vákuummérő

- Egyetlen közös házban helyezik el a két mérőfejet.
- Automatikus átváltás a két érzékelő között.

Méréstartomány (N ₂ , levegő)	5·10 ⁻¹⁰ – 1000 mbar
A Pirani és ionizációs átfedése	
magasabb szinten (javasolt)	5,5·10 ⁻³ – 2,0·10 ⁻² mbar
alacsonyabb szinten	2,0·10 ⁻³ – 8,0·10 ⁻³ mbar
Pontosság (10 ⁻⁸ – 10 ⁻² mbar)	a mért érték ≈15%-a
Reprodukálhatóság (10 ⁻⁸ –10 ⁻² mbar)	a mért érték ≈5%-a



6.5.2.6. ábra. Egy kombinált izzókatódos ioniz. és Pirani vm. adatai és képe (P2).

Jeladó (transducer) kivitelű vákuummérők

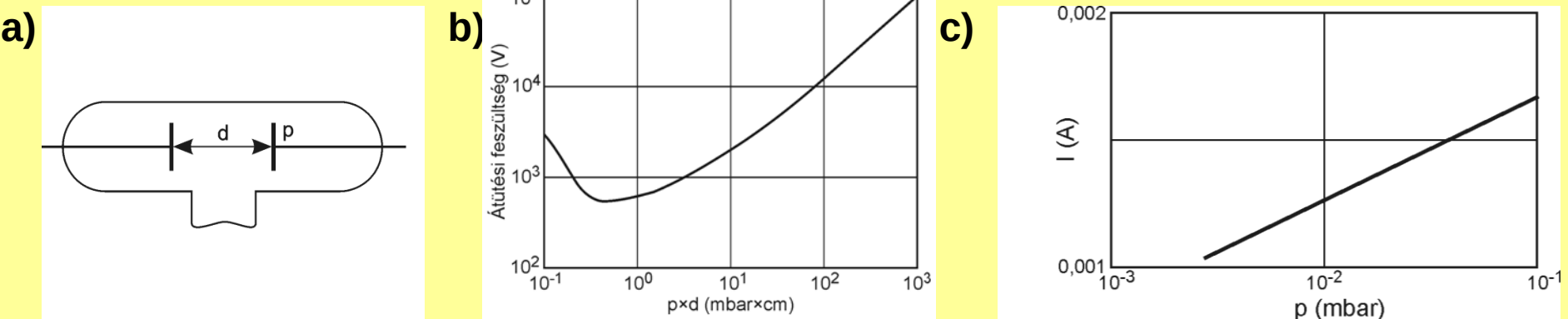


- Csak tápfeszültséget igényelnek.
- A meghajtó elektronikával egybeépítve.
- Kimenő jelük messzire is vezethető.
- Automatika jeladójaként is hasznosak.

6.5.2.7. ábra. Egy kombinált ionizációs – szilárdtest Pirani és egy kombinált ionizációs – szilárdtest Pirani – piezoellenállásos mérőfej fényképe [MKS1].
10⁻¹⁰ mbar-tól atmoszféráig mérnek.

6.5.3. Hidegkatódos ionizációs vákuummérők

A hidegkatódos (hidegkisüléses) ionizációs vákuummérőben önfenntartó gázkisülés részeként keletkező elektronáram ionizálja a gázokat.



6.5.3.1. ábra. (a) Légritkított térben az elektródok között feszültséget alkalmazva kisülés jön létre. (b) Az átütési feszültség ($p \cdot d$) függvényében – **Paschen-törvény**. (c) Egy szűk tartományban a kisülési áram arányos a nyomással - **nyomásmérés**.

Az izzókatódos vákuummérők

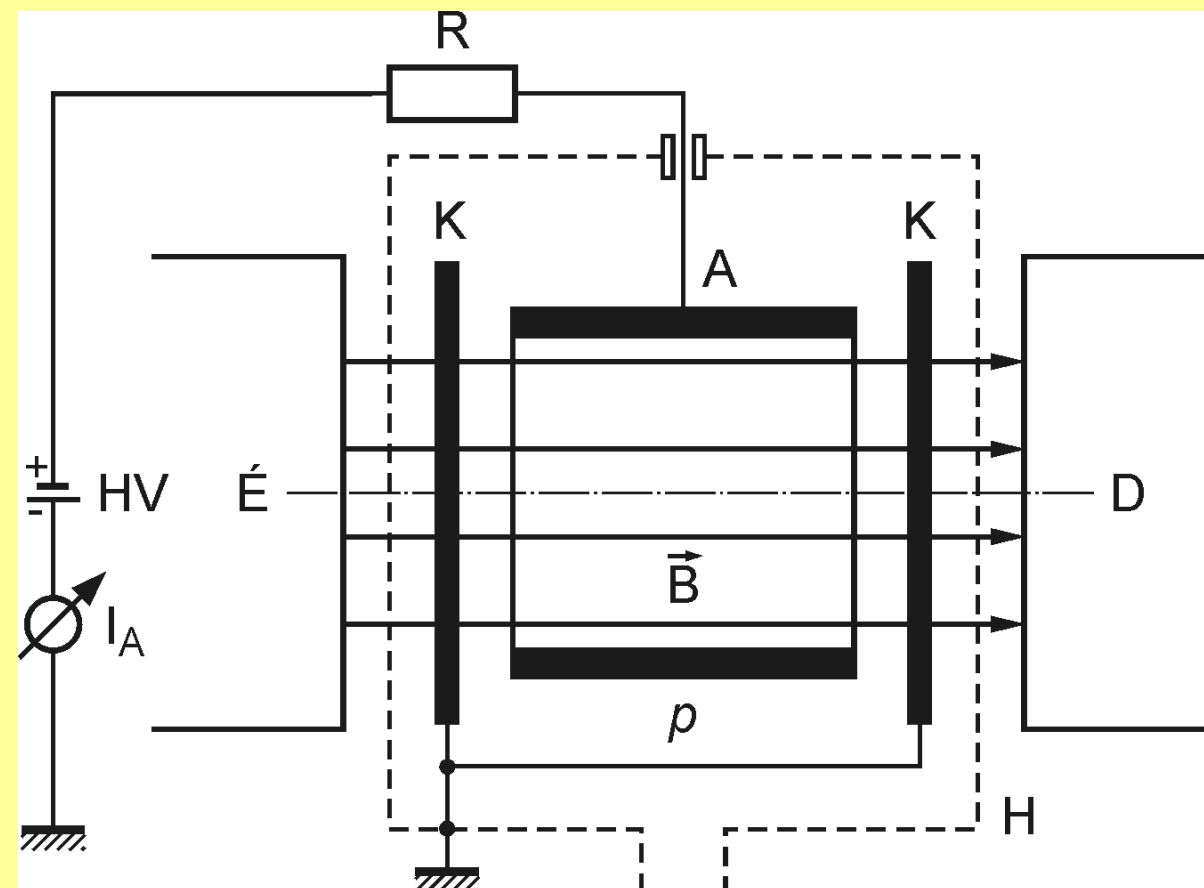
- elektronárama (0,1, 1, 10 mA) és röntgenhatása állandó;
- katódja, anódja 10 – 30 W teljesítményt emészt – meleg, gázleadás.

A hidegkatódos (hideg kisüléses) vákuummérők

- elektronárama kb. 1 A, ami 1000-szeres (!) – érzékenyebb.
- röntgenhatása a nyomással csökken,
- teljesítményfelvétele kb. 0,1 W – melegedése, gázleadása kisebb.

6.5.3.1. Penning-típusú vákuummérő

Penning mágneses térbe helyezte a parázskisülést (eredetileg gyűrű alakú anóddal), ezáltal a Lorentz-erő hatására alaposan megnövekedett az elektronok úthossza, az ionizáció hatásfoka.



6.5.3.2. ábra. Penning-típusú vákuummérő elvi rajza.

A: hengeres anód,
K: katódlemezek,
H: a vákuummérő házának fala,
E, D: a mágnes pólusai,
HV: nagyfeszültségű tápegység, ≈ 3000 V,
B: $\approx 0,1 \dots 0,2$ T

A katód elektromos tere betüremkedik az anódhengerbe a tengelyben: a látszat ellenére így az elektromos és mágneses tér merőleges egymásra.

6.5.3.3. ábra. A Penning-kisülés mechanizmusa $p < 10^{-4}$ mbar nyomáson [P2].

A: anódhenger,

$\vec{B}$: mágneses tér,

$\vec{E}$: elektromos tér,

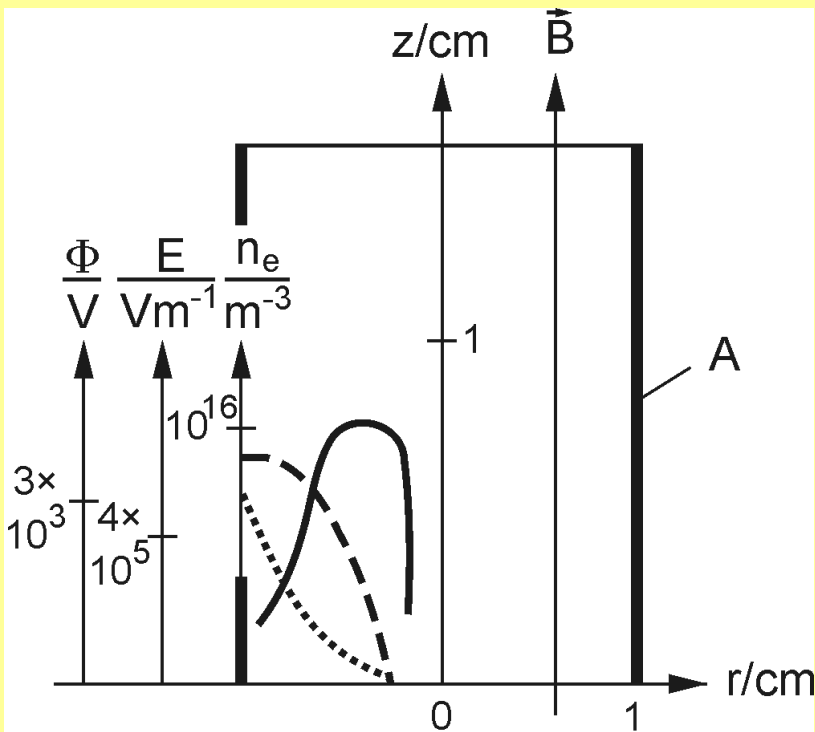
I_R : elektrongyűrűk összárama (≈ 1 A),
-az elektronok cikloid pályáján,
a kis körök sugara $\approx 10^{-4}$ m,

E : elektromos térerő, - - - -

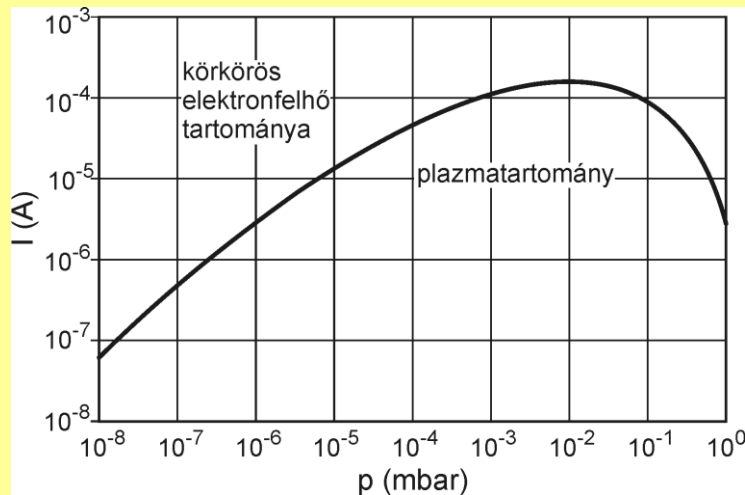
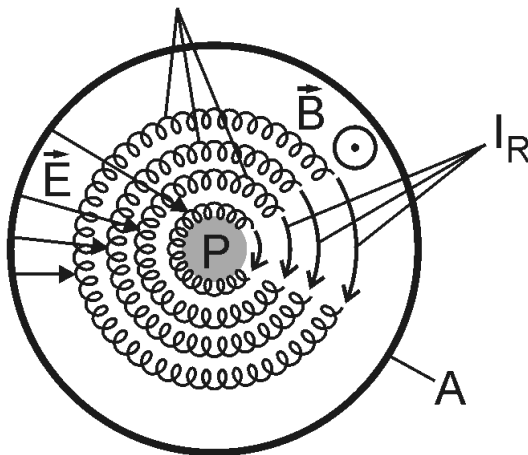
Φ : potenciál,

n_e : elektronsűrűség, ———

P : plazma.



Cikloid pálya



6.5.3.4. ábra. A Penning-típusú vákuummérők áramának jellegzetes nyomásfüggése.

Penning-típusú vákuummérő

$p < 10^{-4}$ mbar nyomáson a kisülési áramot az elektronok gyűrűárama dominálja, a kisülési áram arányos a nyomással (az előző 6.5.3.4. ábra).

$p \sim 10^{-4}$ mbar felett az ionok megnövekedett száma instabillá teszi az elektronok gyűrűáramát: **erős ingadozások a nyomásmérésben**. A plazmatartomány kiterjed az egész anódhengerre, a plazmából kijutó elektronok és ionok árama adja a kisülési áram többségét. Megkezdődik a töltésrekombináció, amely a **meredekség csökkenését** eredményezi.

$p \sim 10^{-2}$ mbar felett a töltés-rekombináció megnövekedése miatt a kisülési áram csökken a nyomás növekedésével (**negatív meredekség**).

A Penning-cső érzékenysége: $K \approx 3$ A/mbar, a kisülési áram könnyen mérhető.

A Penning-típusú vákuummérő érzékenysége függ a gázok fajtájától, akárcsak az izzókatódos vákuummérőké.

A Penning-típusú vákuummérő méréshatára: $10^{-3} - 10^{-6}$ mbar.

A méréshatárt és pontosságot az instabilitások korlátozzák.

Az eredeti Penning-féle elrendezés hátránya:

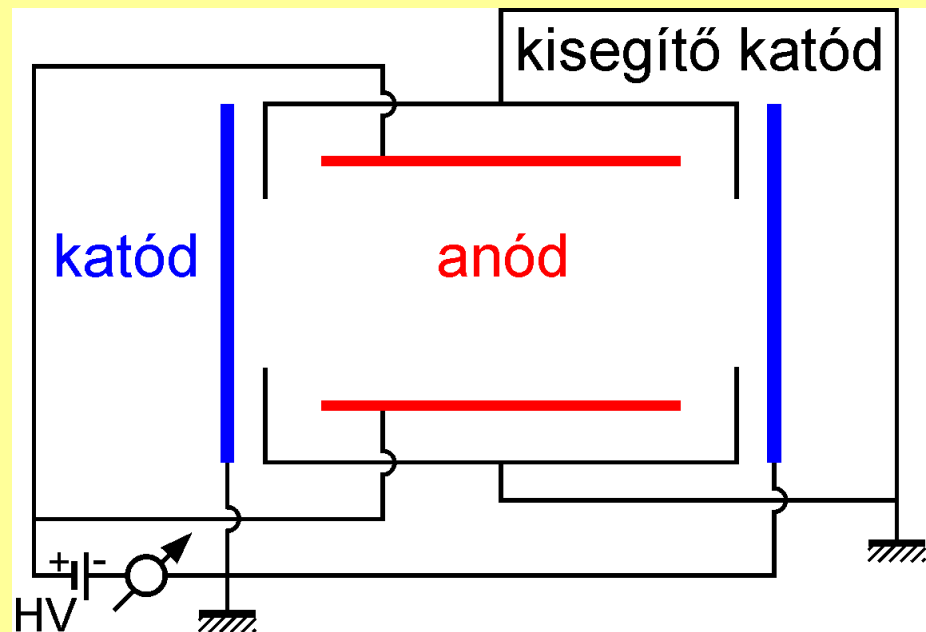
- $10^{-3} - 10^{-4}$ mbar között akár 50%-os ugrások is előfordultak a kimenő jelben,
- $10^{-5} - 10^{-6}$ mbar tartományban kialudt a kisülés.

6.5.3.2. Korszerű hidegkatódos vákuummérők

- Az ingadozások ellen és a kisebb áramok mérhetősége érdekében:

Penning elrendezéséhez képest az anód és katód közötti közvetlen kisülés áramát egy árnyékoló, földelt kisegítő elektródra viszik, a gázkisülés áramát pedig az igazi katódon mérik.

6.5.3.5. ábra.
Penning
vákuummérő
kisegítő
katóddal.



Hidegkatódos ionizációs vákuummérők

- Változatos geometriai alakzatokkal és elrendezéssel is működik:

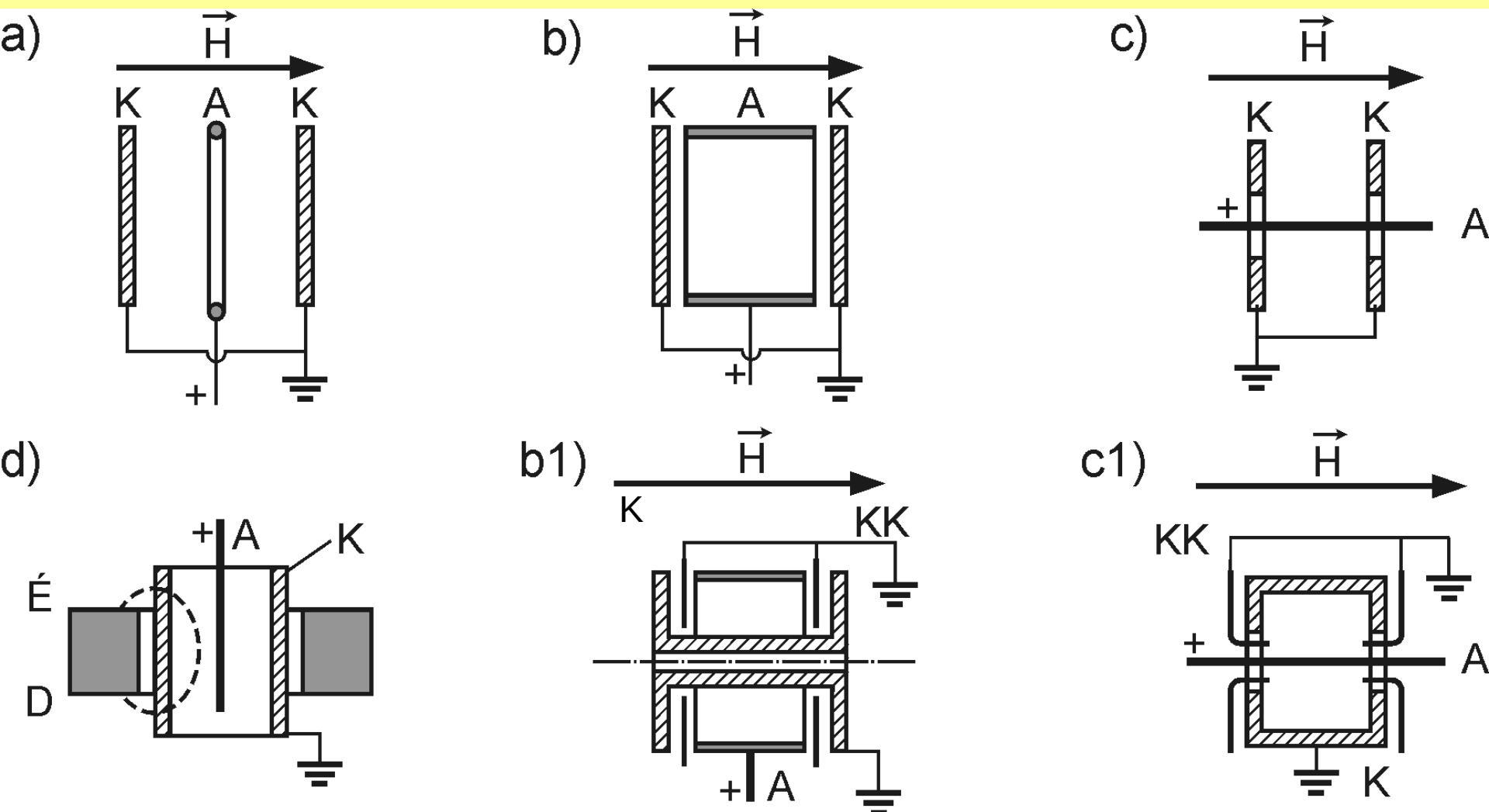
Kiderült, hogy az anód egy gyűrű vagy kiterjedt henger helyett akár egy fémszál is lehet, illetve az anód és katód pozícióját fel is lehet cserélni (invertált geometria). A valóságban sokféle megvalósítás ismert (6.5.3.6. ábra), de két alaptípusra vezethetők vissza:

magnetron típusú vákuummérő: a tengelye negatív potenciálú (akár a katód betüremkedő terétől, akár beépített fém elektródtól);

invertált magnetron típusú vákuummérő: a tengelye pozitív potenciálú.

- Hidegkisülékes ionizációs vákuummérők méréshatára:

a konstrukció technikai megoldásától függ, de **tipikusan: $10^{-2} - 10^{-10}$ mbar**. Készítettek olyan mérőfejet is, amellyel $10^{-5} - 10^{-13}$ mbar között lehetett mérni.



6.5.3.6. ábra. Példák a Penning-típusú hidegkisüléses vákuummérő változataira.

A: anód, K: katód, KK: kisegítő katód, H: mágneses térerő.

Magnetron: a, b, b1; invertált magnetron: c, d, c1.

6.5.3.3. *Megjegyzések a hidegkatódos vákuummérők használatához*

- Elektronok futási ideje:

A hidegkatódos ionizációs vákuummérőkben az elektronok hosszú utat tesznek meg a katódtól az anódig. Az út befutásának ideje 10^{-3} , illetve 10^{-12} mbar nyomáson $1,2 \mu\text{s}$, illetve 20 perc!

Az ionizációval járó két ütközés közötti időtartam ezeknek kb. a fele.

- Begyújtási idő:

Amikor nagyfeszültséget kapcsolunk a mérőcsőre, a kisülés a nyomástól függően késéssel gyúl be. A késés 10^{-6} mbar felett alig észrevehető néhány másodperc, míg 10^{-10} mbar alatt néhány óra vagy nap is lehet!

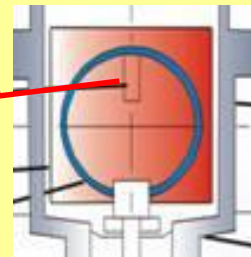
- A kisülés begyújtása segédeszközzel:

Alacsony nyomáson a bekapcsoláshoz vagy ideiglenesen megemeljük a nyomást gázbeeresztéssel, vagy a kezdeti ionizáció beindításához eleve valamilyen elektronforrást szerelünk be.

Ismert megoldások: elvileg lehetne izzókatód, radioaktív forrás vagy ultraibolya fény, de a gyakorlatban leginkább kis hegyes tűskét vagy más alakú segédelektrodát szoktak elhelyezni (téremissziós forrás).

- Kigázosodás:

Hőtermelése, így gázleadása is 10 – 100-szor kisebb az izzókatódosénál. Ez alacsony nyomáson előny.



- Szennyezés:

- Az erős elektromos kisülésben a szennyezőkből származó szerves gőzök, gázok polimerizálódnak, és a felületeken lerakódnak. A szabad szemmel színes bevonatként érzékelhető rétegek gátolják a katódfelület elektronemisszióját, meggátolják a kisülés beindítását, ill. áramingadozást okoznak.

- Karbantartás: tisztítással, fóliával
- Nem tiszta rendszerekben inkább izzókatódos vákuummérők ajánlottak!

- Pontosság, érzékenység fellevegőzésre:

- Szennyezetten a hidegkatódos ionizációs vákuummérő árama ingadozó, pontatlan a nyomásmérés.
- Alacsony nyomáson előny a hidegkatódos kisebb kigázosodása.
- A hirtelen levegőbetörésekre kevésbé érzékeny a hidegkisüléssel vákuummérő. Ezért ipari, folyamatvezérlési alkalmazása gyakori.

- Érzékenység, röntgenhatás:

- Az anódot elérő elektronáram a nyomással arányosan csökken, így a röntgenhatás is. A röntgenhatás kisebb, az érzékenység nagyobb a hidegkisüléssel ionizációs vákuummérőben, mint az izzókatódosban.
 - 3 nagyságrenddel nagyobb ionizáló elektronáram,
 - nyomással arányosan csökkenő kisülési áram az anódon – azaz nyomással arányosan csökkenő röntgenhatás).

- **Biztonságtechnika:** az alkalmazott feszültség ~ 3 kV – érintésvédelem.

Izzókatódos és hidegkatódos ionizációs vákuummérők összehasonlítása

IZZÓKATÓDOS

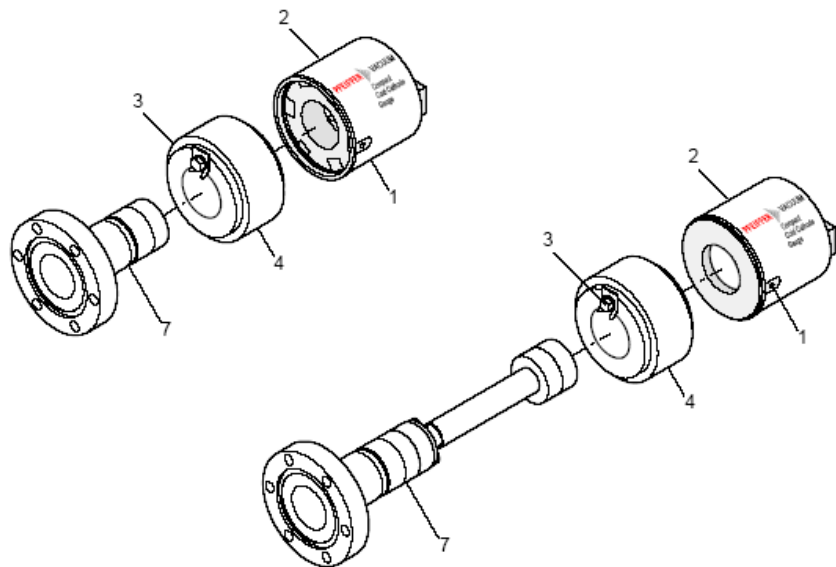
ELŐNY könnyű bekapcsolás,
jól kalibrálható,
szennyezéseket jobban elviseli,

HÁTRÁNY a katód kiéghet,
nagyobb teljesítményfelvétel,
kigázosítás szükséges,
hőmérsékleti egyensúly kell pontos mérés előtt,
röntgenhatás számottevő.

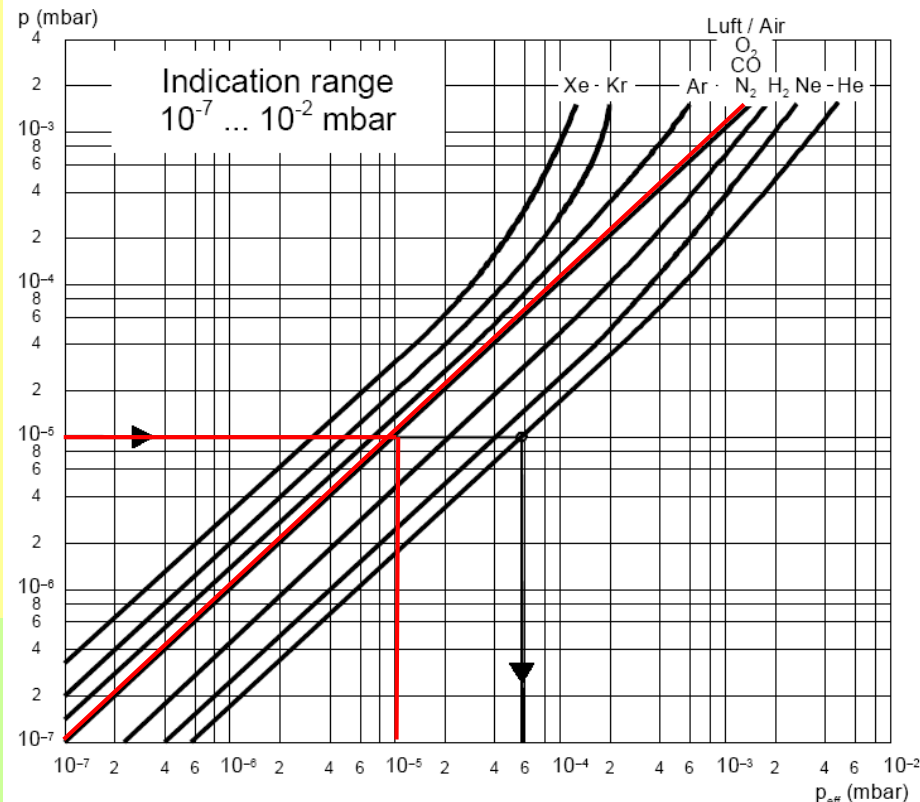
HIDEGKATÓDOS

rugalmas, hosszú életű,
alacsony teljesítményfelvétel,
nem szükséges kigázosítani,
röntgen-hatás nyomással arányos
(gyakorlatilag elhanyagolható),
levegőbetörésre nem érzékeny,

bekapcsolási idő nyomásfüggő,
a jel instabilitása,
szennyezésre érzékenyebb.



6.5.3.7. ábra. Egy kereskedelmi hidegkatódos mérőfej szokványos és 250 °C-ig kifűthető változatának összeállítása, gázfüggése és paramétereit [P2].



A begyújtási idő a nyomás függvényében.

$5 \times 10^{-11} \dots 1 \times 10^{-2}$ mbar **Méréshatár**
 $\approx \pm 30\%$ **Pontosság**
Tartomány: $1 \times 10^{-9} \dots 1 \times 10^{-3}$ mbar
 $\approx \pm 5\%$ **Reprodukálhatóság**
Tartomány: $1 \times 10^{-9} \dots 1 \times 10^{-3}$ mbar

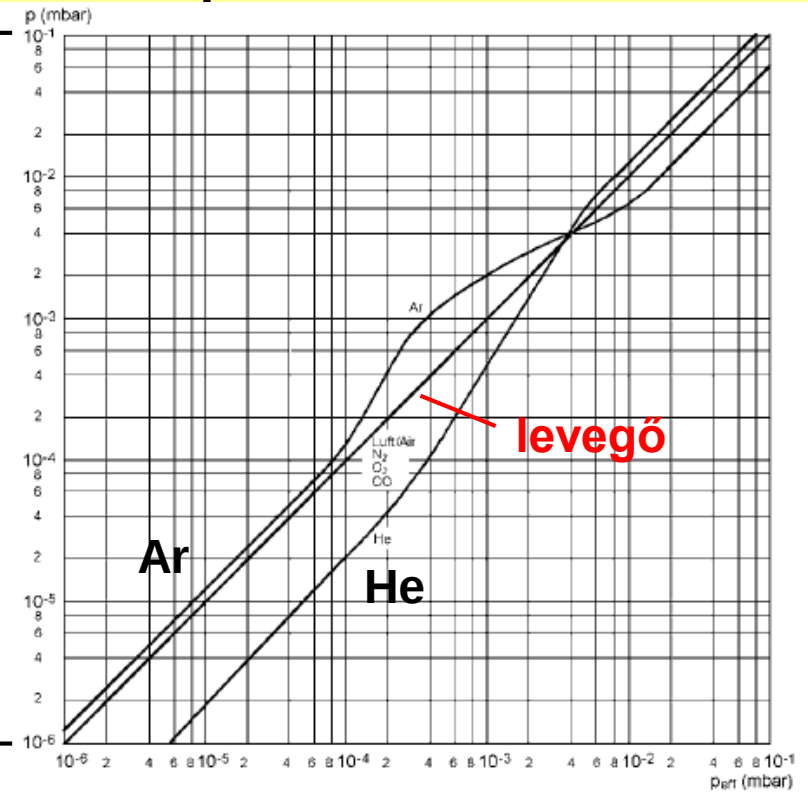
10^{-7} mbar	≈ 0.1 min
10^{-8} mbar	≈ 1 min
10^{-9} mbar	≈ 5 min
10^{-10} mbar	≈ 20 min
5×10^{-11} mbar	≈ 30 min

Kombinált hidegkatódos ionizációs - Pirani vákuummérő

Az hidegkatódos vákuummérő is közös házba építhető a Pirani és más vákuummérővel.

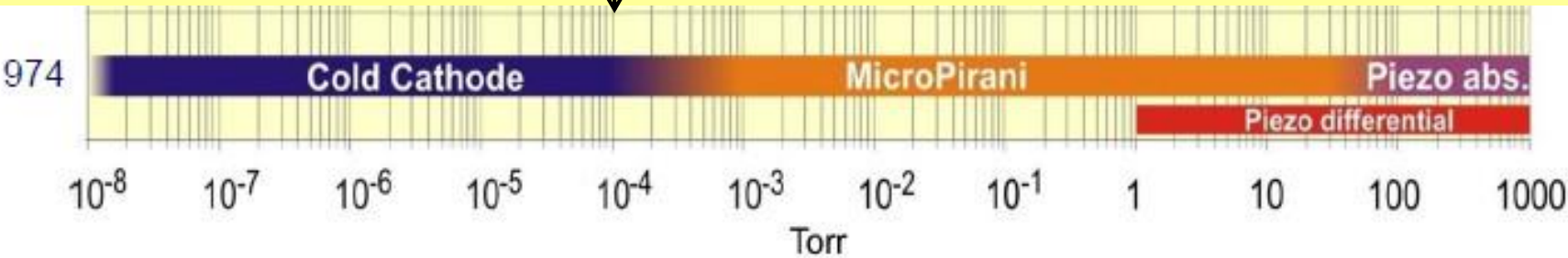
$5 \times 10^{-9} \dots 1000 \text{ mbar}$ **Méréshatár**
 $\approx \pm 30\%$ **Pontosság**
Tartomány: $1 \times 10^{-8} \dots 100 \text{ mbar}$
 $\approx \pm 5\%$ **Reprodukálhatóság**
Tartomány: $1 \times 10^{-8} \dots 100 \text{ mbar}$

6.5.3.8. ábra. Egy hidegkatódos-Pirani kombinált vákuummérő adatai és hitelesítő görbéi [P2].

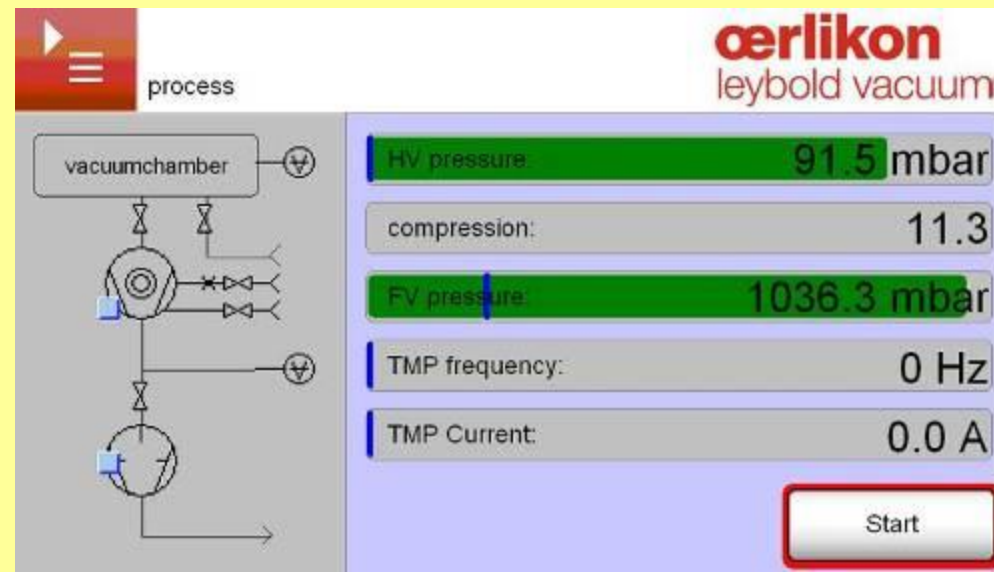


10^{-6} mbar —

6.5.3.9. ábra. Hidegkatódos ionizációs, szilárdtest Pirani és piezoellenállásos vákuummérőt egyesítő vm. jeladó fényképe és mérési tartománya [MKS1].



6.5.3.10. ábra. Vákuummérők, vákuumtechnikai eszközök informatikai fejlődése: mobil telefonnal, intelligens mobil eszközökkel távleolvasás, vezérlés [OL1].



6.6. VÁKUUMMÉRŐK HITELESÍTÉSE

A hitelesítés alkalmával

- figyelembe kell venni, hogy az adott mérőeszköz érzékeny-e a gázfajtákra;
- ismert nyomást kell előállítani abban a kalibrációs kamrában, amelyhez a mérőfej csatlakozik;
- a hitelesítést olyan nyomáson kell elvégezni, amely
 - végső soron egy nemzeti standardra van visszavezetve,
 - vagy dugattyús nyomásmérővel állították elő;
- nagy gondossággal stabilan kell tartani az eszközök hőmérsékletét;
- az elsődleges standardokat nemesgázokkal (főként Ar, néha N₂, H₂, He) használják – ezek a legjobb közelítései az ideális gázoknak;
- a geometria biztosítsa, hogy a vákuummérő helyén valóban a számított nyomás legyen.

A hitelesítés nem szokványos művelet, azt arra specializált laboratóriumokban végzik, ezért módszereit itt csak felsoroljuk.

Az elsődleges nyomásstandardok eszközei, módszerei:

Dugattyús nyomásmérő

$10^{13} \text{ mbar} < p < 10^{-1} \text{ mbar}$; pontatlanság: $10^{-5} - 10^{-4}$

Higanyos vákuummérők

- U-csöves manométer ($10^{13} - 10^{-2} \text{ mbar}$; pontatlanság: $10^{-5} - 10^{-3} \text{ mbar}$)**
- McLeod vákuummérő ($10 - 10^{-5} \text{ mbar}$; pontatlanság: $10^{-5} - 10^{-3} \text{ mbar}$)**

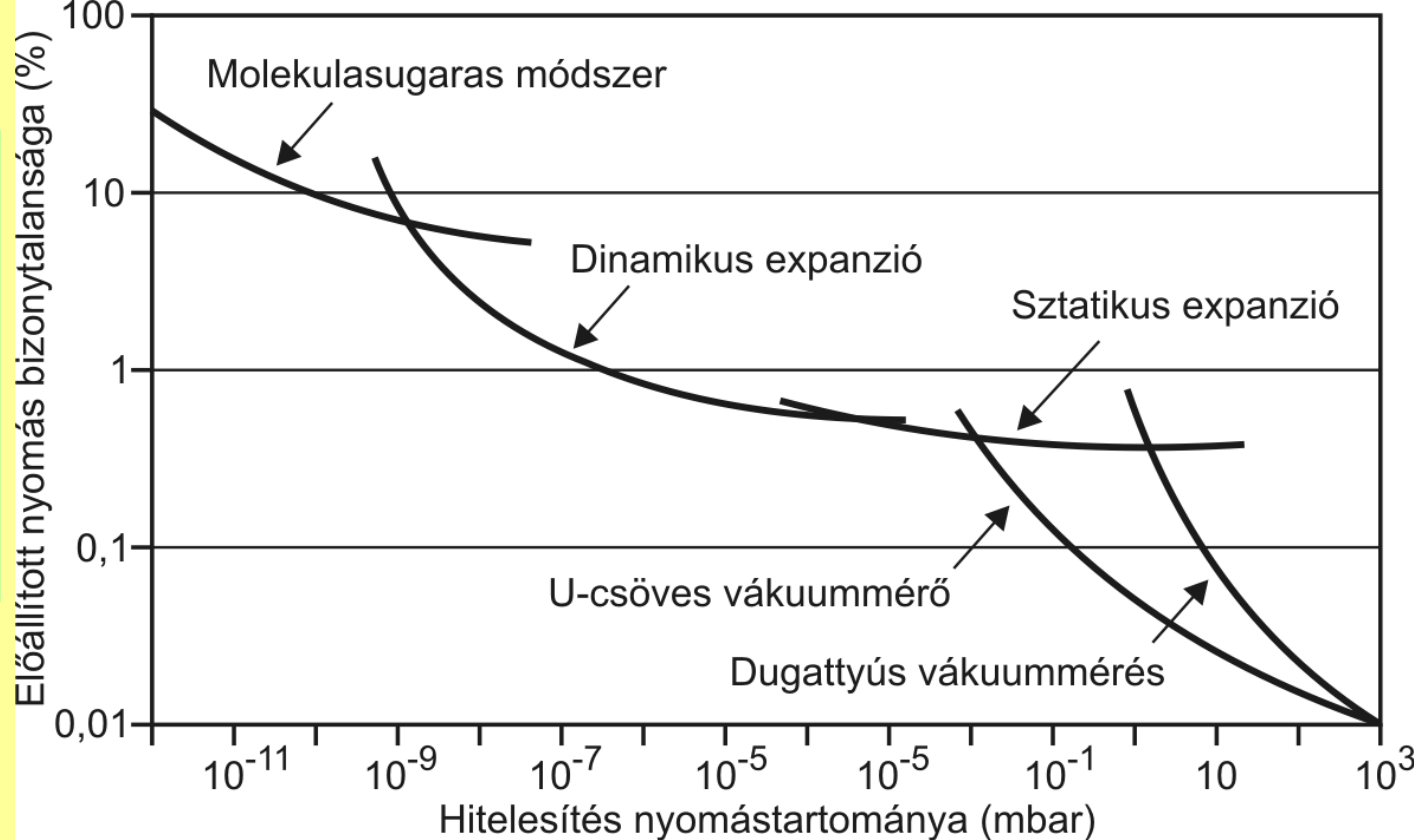
Sztatikus módszer

- *Direkt összehasonlítás nyomásstandarddal ugyanabban a térben.***
 $10^{-1} - 10^{-4} \text{ mbar}$ tartományban.
- *Sztatikus expanzió módszere***
 $10^{-6} \text{ mbar} < p < 10^{13} \text{ mbar}$; pontatlanság: $< 1 \%$

Dinamikus módszer

- *Direkt összehasonlítás nyomásstandarddal***
 $1 - 10^{-6} \text{ mbar}$ között.
- *Dinamikus expanzió módszere állandó vezetőképeséssel***
 $10^{-9} \text{ mbar} < p < 10^{-4} \text{ mbar}$; pontatlanság: néhány %
- *Molekulanyaláb módszere***
 $p < 10^{-9} \text{ mbar}$; pontatlanság $\sim \pm 30\%$

**6.6.1. ábra.
Elsődleges
nyomás
standardok
méréstartománya
és a kalibráció
hibája.**



A gyakorlatban inkább az elsődleges standardokkal hitelesített másodlagos (transzfer) nyomásmérő standardokkal kalibrálják a használt eszközöket.

Másodlagos nyomásmérő standardok és használati tartományuk:

- diafragma vákuummérő: $10^{-3} - 10^4$ mbar,
- viszkozitás (forgógolyós) vákuummérő: $10^{-6} - 10^{-2}$ mbar,
- különböző izzókatódos ionizációs vákuummérők: $10^{-12} - 10^{-4}$ mbar.