

Cursus Vacuümtechniek

Week 5: Totale drukmeting I

Kenniscentrum Mechatronica
Eindhoven

Het waarom van drukmeting

- In een te evacueren ruimte is de mogelijkheid tot **drukmeting** een essentiële noodzaak.
 - ◆ Ten eerste om tijdens het leegpompen te kunnen bepalen of het gebruikte pompsysteem naar **behoren werkt**.
 - ◆ Ten tweede of de gewenste druk wordt **bereikt** en het systeem **vrij is van lekken en ongewenste desorpties**.
- Daarnaast is bij experimenten in geëvacueerde ruimtes een **vacuümbeveiliging**, die de druk in het systeem controleert en bij een eventuele calamiteit de meet- en vacuümapparatuur uitschakelt, in veel gevallen onontbeerlijk.

Drukmeters

directe drukmeters

indirecte drukmeters

absolute drukmeters

Directe drukmeters

(verplaatsing van een wand)

vaste wand

vloeibare wand

membraan

Bourdon

radiometer

compressiemanometer

vloeistof manometer

diafragma met rekstrookje

capaciteitsmanometer

Indirecte drukmeters

(meting van gaseigenschap)

impulsoverdracht
(viscositeit)

quartz

rotatie

opwekken van lading
(ionisatie)

hete kathode

triode

Bayard-Alpert

Shultz-Phelps

koude kathode

Penning

(geïnverteerd) magnetron

energie-overdracht
(warmtegeleiding)

thermokoppel

Pirani

thermistor

Absolute drukmeters

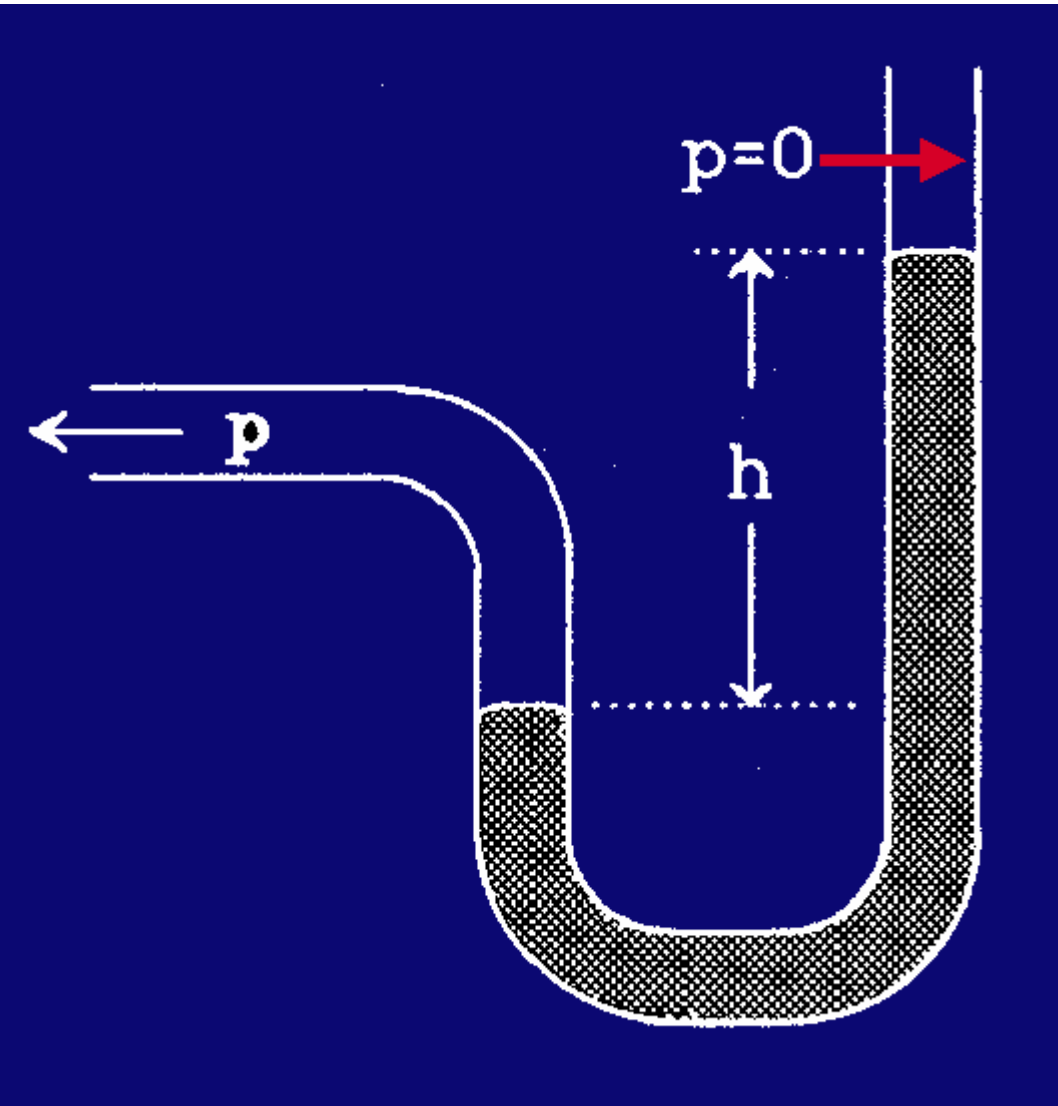
- Onder een **absolute drukmeter** wordt verstaan een drukmeter waarvan de **meterconstante** (= factor tussen druk en aanwijzing) **bekend** is of **eenvoudig** kan worden **berekend**; **drukmeting is dan mogelijk zonder voorafgaand ijken**.
- Instrumenten met deze eigenschap zijn per definitie te karakteriseren als **primaire standaard**.
- Tot deze categorie behoren in strikte zin slechts een drietal drukmeetsystemen, namelijk:
 - ◆ de **U-buis manometer**,
 - ◆ de **McLeod manometer**,
 - ◆ de **Knudsen manometer**.

Overzicht te behandelen drukmeters

Tabel 5.1 Overzicht van de te behandelen drukmeters, indeling in hoofdgroepen, meetbereiken en verdere bijzonderheden (o = gassoortonafhankelijk, a = gassoortafhankelijk, p = meting drukkracht, n = meting dichtheid)

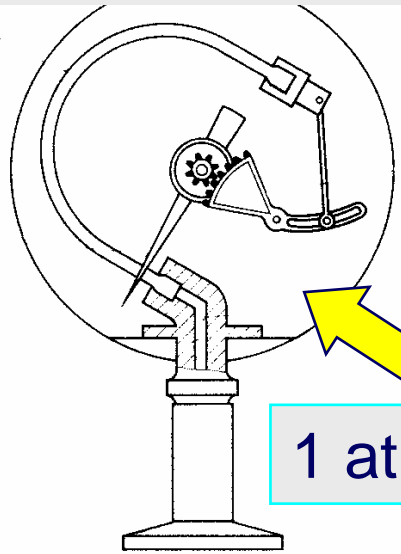
Meetbereik (Pa)	10^5	10^2	10^{-1}	10^{-4}	10^{-7}	10^{-10}	10^{-13}			
Type								o/a	p/n	Hoofdgroep
U-buis manometer	[Bar chart: 10 ⁵ to 10 ² Pa]							o	p	Absolute drukmeters
McLeod manometer	[Bar chart: 10 ² to 10 ⁻¹ Pa]							o	p	
Knudsen manometer	[Bar chart: 10 ⁻¹ to 10 ⁻⁴ Pa]							o	p	
Bourdon manometer	[Bar chart: 10 ⁵ to 10 ² Pa]							o	p	Mechanische manometers
Mechanische membraan manometer	[Bar chart: 10 ⁵ to 10 ² Pa]							o	p	
Piëzo-elektrische membraan manometer	[Bar chart: 10 ⁵ to 10 ² Pa]							o	p	
Condensator-membraan manometer	[Bar chart: 10 ⁵ to 10 ⁻¹ Pa]							o	p	
Wrijvings manometer	[Bar chart: 10 ⁻¹ to 10 ⁻⁴ Pa]							a	n	Viscositeits manometer
Pirani manometer	[Bar chart: 10 ⁵ to 10 ² Pa]							a	n	Warmtegeleidings manometers
Convectie manometer	[Bar chart: 10 ⁵ to 10 ² Pa]							a	n	
Thermokoppel manometer	[Bar chart: 10 ⁵ to 10 ² Pa]							a	n	
'Conventionele' manometer	[Bar chart: 10 ⁻¹ to 10 ⁻⁴ Pa]							a	n	Ionisatie manometers met hete kathode
Hoge druk manometer	[Bar chart: 10 ⁵ to 10 ² Pa]							a	n	
Bayard-Alpert manometer	[Bar chart: 10 ⁻¹ to 10 ⁻⁷ Pa]							a	n	
Modulatie manometer	[Bar chart: 10 ⁻¹ to 10 ⁻¹⁰ Pa]							a	n	
Extractor manometer	[Bar chart: 10 ⁻¹ to 10 ⁻¹⁰ Pa]							a	n	
Lafferty manometer	[Bar chart: 10 ⁻⁴ to 10 ⁻¹⁰ Pa]							a	n	
Penning manometer	[Bar chart: 10 ⁻¹ to 10 ⁻⁶ Pa]							a	n	Ionisatie manometers met koude kathode
(Geïnverteerd) magnetron	[Bar chart: 10 ⁻¹ to 10 ⁻¹⁰ Pa]							a	n	
Meetbereik (mbar)	10^3	10^0	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}			

U-buis



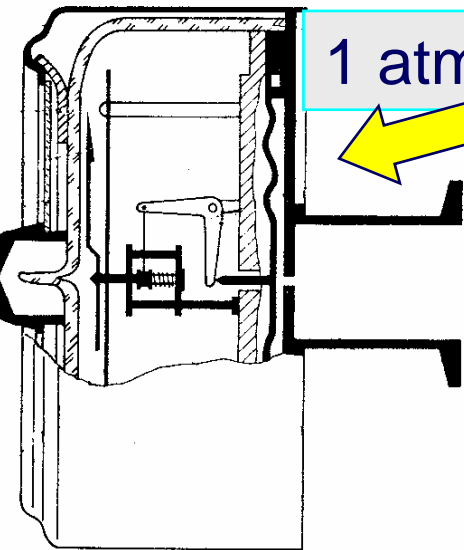
- Twee types:
- Gesloten U-buis: is **absolute** drukmeter als ruimte in gesloten deel vacuüm is ($p = 0$); de absolute druk is dan gelijk aan h [cm of mm vloeistofdruk]; is de vloeistof kwik dan wordt de druk opgegeven in ***mm Hg = Torr***
- Open U-buis: meet **drukverschil**

Mechanische vacuümmeters



Bourdon buisveer manometer: platte gebogen buis met elliptische doorsnede, gemaakt van metaal en zo dun dat hij veren kan.

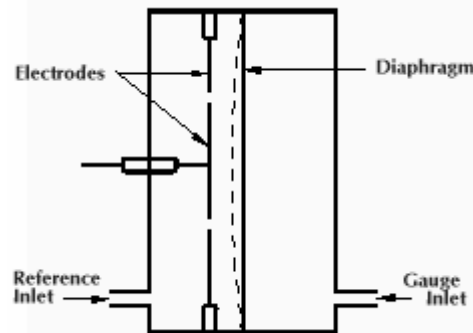
1 atm - 10^3 Pa



1 atm - 10^2 Pa

Membraanvacuümmeter

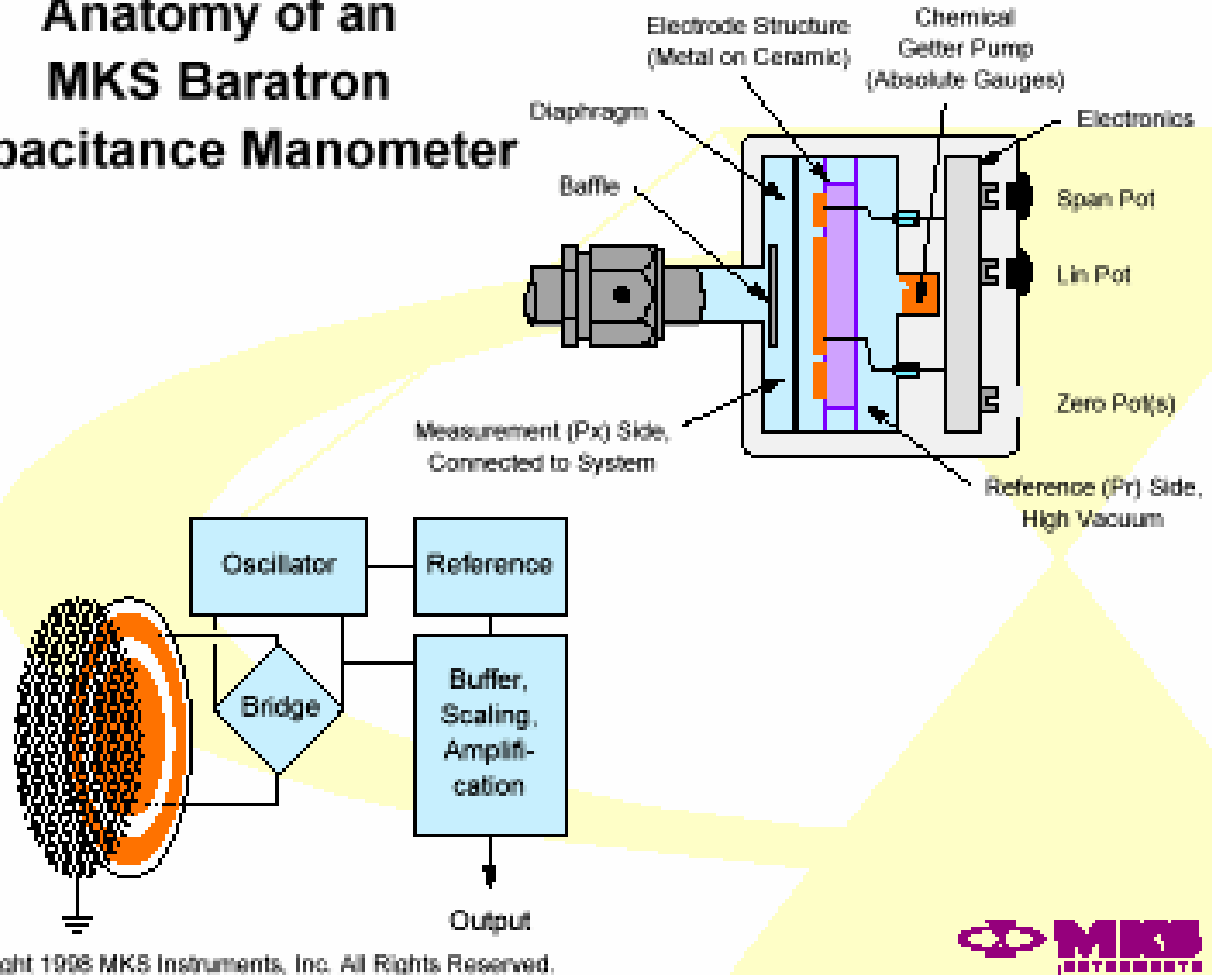
Condensator-membraanvacuümmeter



1 atm - 10^{-3} Pa in verschillende uitvoeringen, elk over drukgebied van factor 10^5 (dus bv. 10^2 - 10^{-3} Pa)

Werking capaciteitsmanometer

Anatomy of an MKS Baratron Capacitance Manometer



Copyright 1998 MKS Instruments, Inc. All Rights Reserved.



Met dank aan MKS

Piëzo-elektrische membraanmanometer

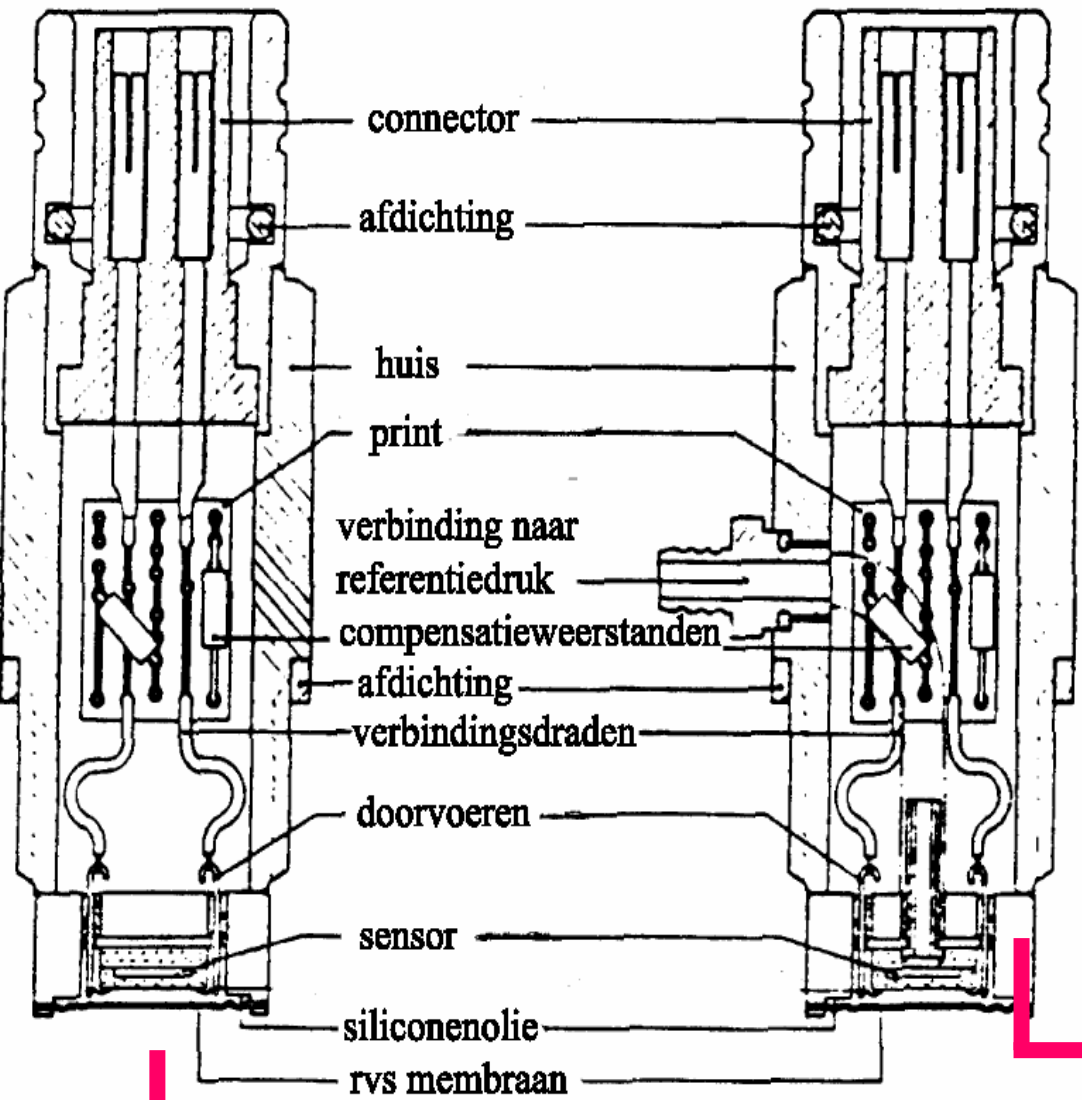
$$\rho = (n \cdot q \cdot \mu)^{-1} \rightarrow R = \rho \frac{4}{\pi} \frac{l}{d^2} \rightarrow \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - 2 \frac{\Delta d}{d}$$

Via constante van Poisson μ

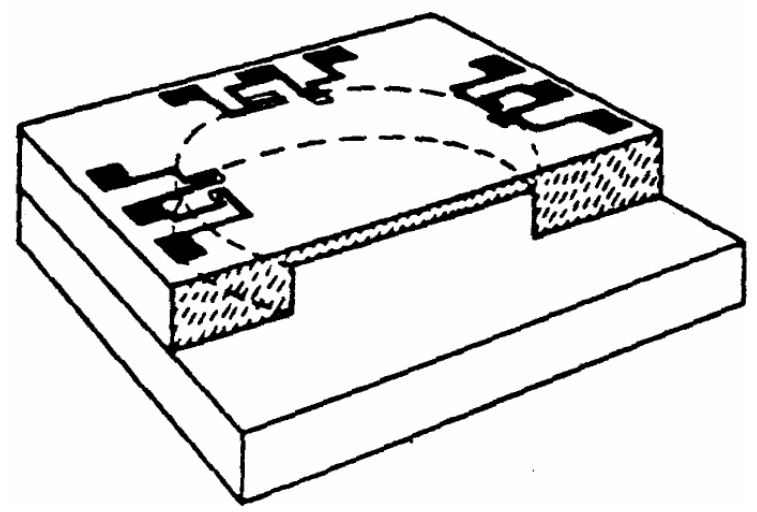
$$\frac{\Delta d}{d} = -\mu \frac{\Delta l}{l}$$
$$\rightarrow \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} (1 + 2\mu) = \frac{\Delta l}{l} G$$

- **Halfgeleidende materialen** zoals bijv. Si vertonen onder mechanische belasting een **meetbare verandering van de soortelijke weerstand**. Dit effect staat bekend onder de naam "**piëzo-resistief effect**".
- In de vacuümtechniek wordt het effect gebruikt door de gemeten **weerstandsvierandering in een dun membraan** van het betreffende materiaal als gevolg van **drukbelasting** om te zetten in een **drukschaal**.

Si membraanconfguratie met weerstandspaden



$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} (1 + 2\mu) = \frac{\Delta l}{l} G$$

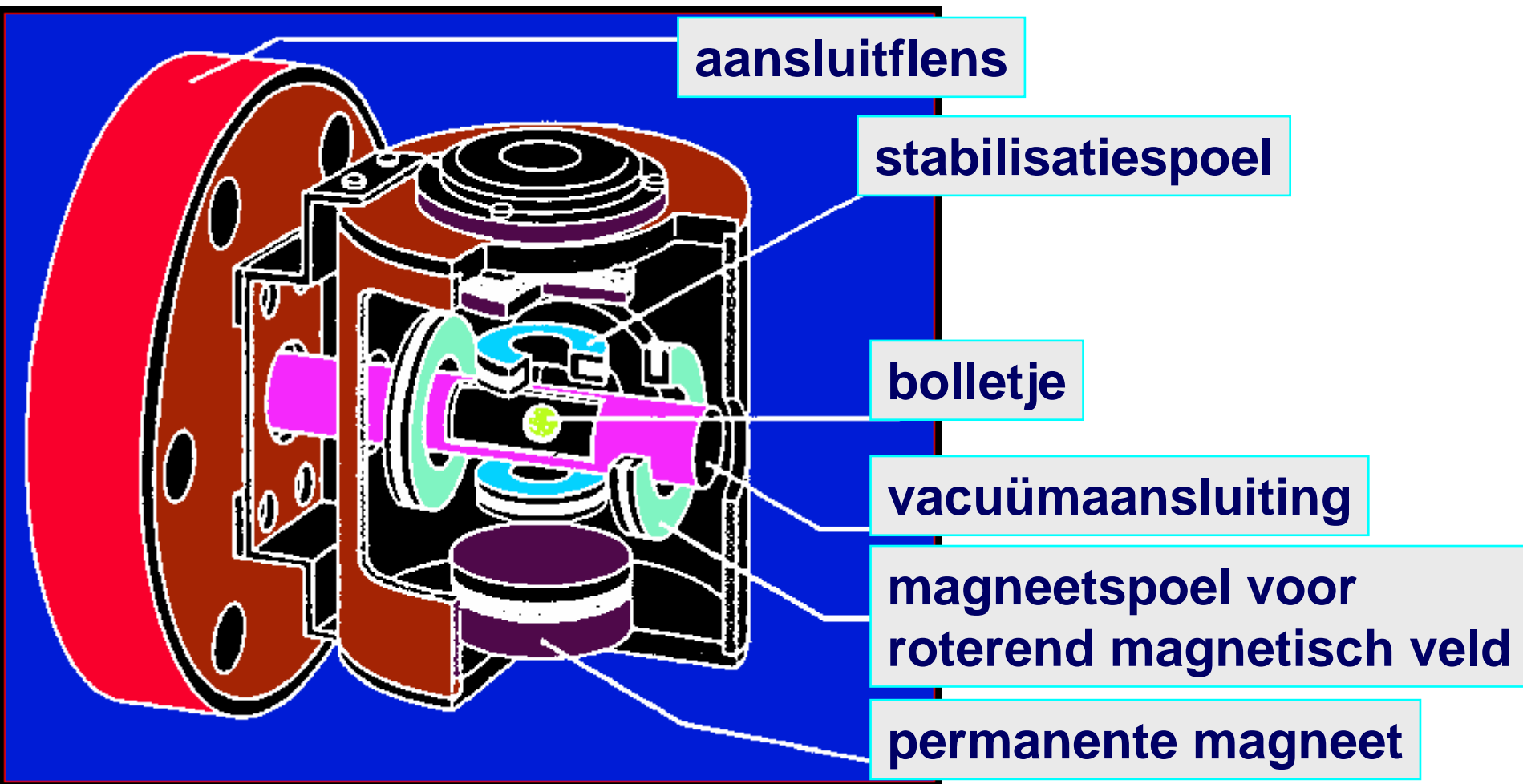


drukmeting met referentievacuüm



differentiële drukmeting

Wrijvingsmanometer



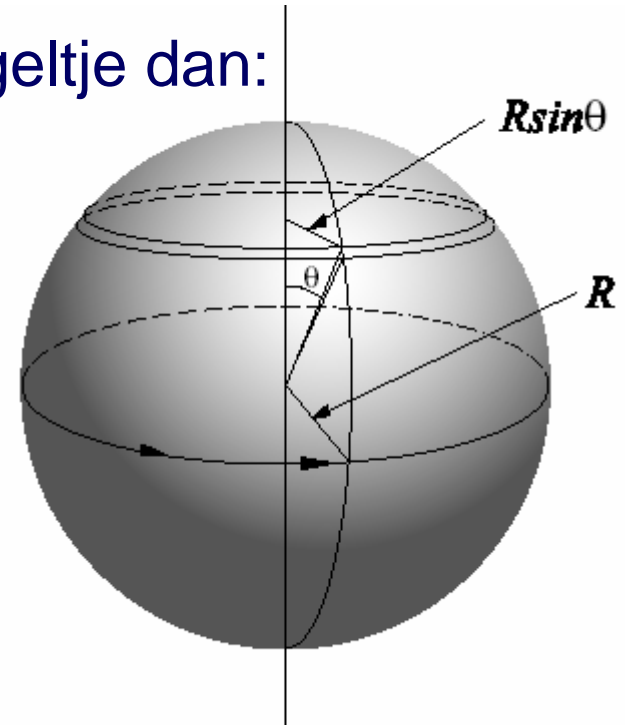
Afremmende kogel t.g.v. wrijving gas

Als vrije weglengte gas \gg diameter kogeltje dan:

$$\nu(t) = \nu_0 \exp\left(\frac{10pt}{\pi \bar{v} R \rho}\right)$$



$$p = \frac{\pi \bar{v} R \rho}{10t} \ln \frac{\nu(t)}{\nu_0}$$

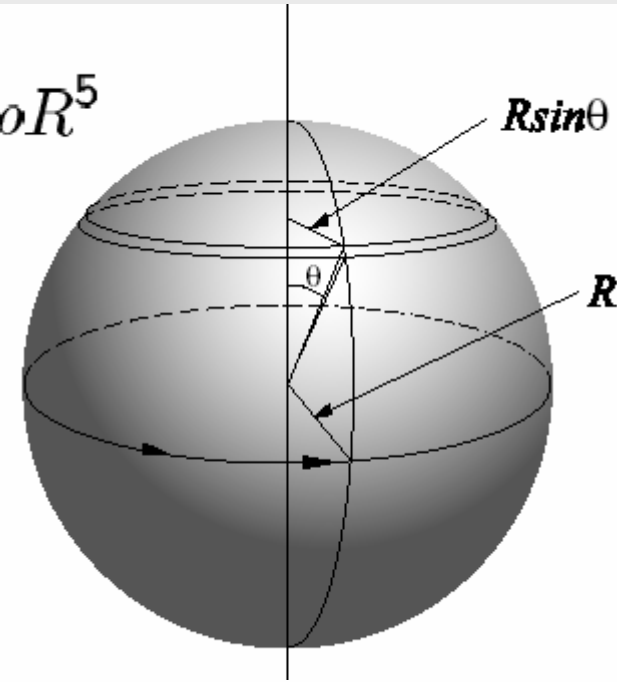


- $\nu(t)$ = omloopfrequentie na een tijd t , ν_0 = omloopfrequentie op $t = 0$,
- R = straal kogeltje,
- ρ = dichtheid kogeltje,
- \bar{v} = gemiddelde snelheid van de gasmoleculen.
- Uit meting van de verhouding $\nu(t)/\nu_0$ kan derhalve de gasdruk p worden afgeleid.

Afleiding rotatiesnelheid ÷ gasdruk

$$F = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} p u_0$$

$$I = \frac{8}{15} \pi \rho R^5$$



$$F_r = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} p 2\pi \nu R \sin \theta \cdot 2\pi R \sin \theta \cdot R$$

$$dN = F_r \cdot R \sin \theta = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} p 2\pi \nu R \sin \theta \cdot 2\pi R \sin \theta \cdot R d\theta \cdot R \sin \theta$$

$$N = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{8\pi m}{kT}} R^4 p 2\pi \nu$$

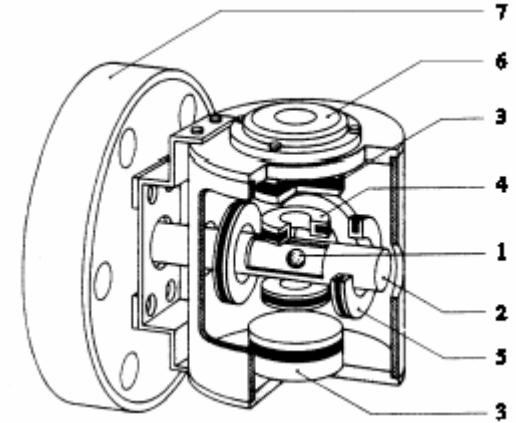
$$N = -I \frac{d\omega}{dt} = -2\pi I \frac{d\nu}{dt}$$

$$\frac{d\nu}{\nu} = -\frac{10}{\pi} \sqrt{\frac{\pi m}{8kT}} \frac{p}{\rho R} dt$$

$$\frac{d\nu}{\nu} = -\frac{10p}{\pi \bar{v} \rho R} dt$$

Wrijvingsmanometer T - onafhankelijk

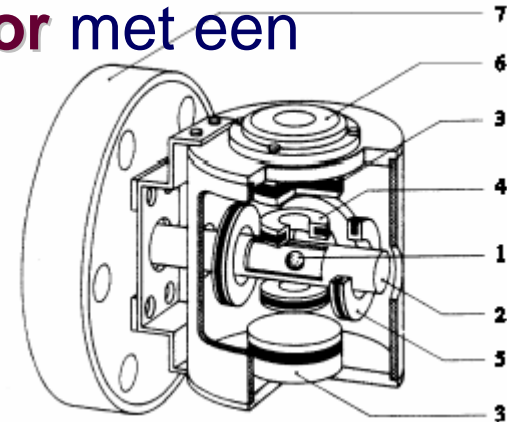
$$\frac{1}{\nu} \frac{d\nu}{dt} = -\frac{5}{4} \frac{nm\bar{v}}{\rho R}$$



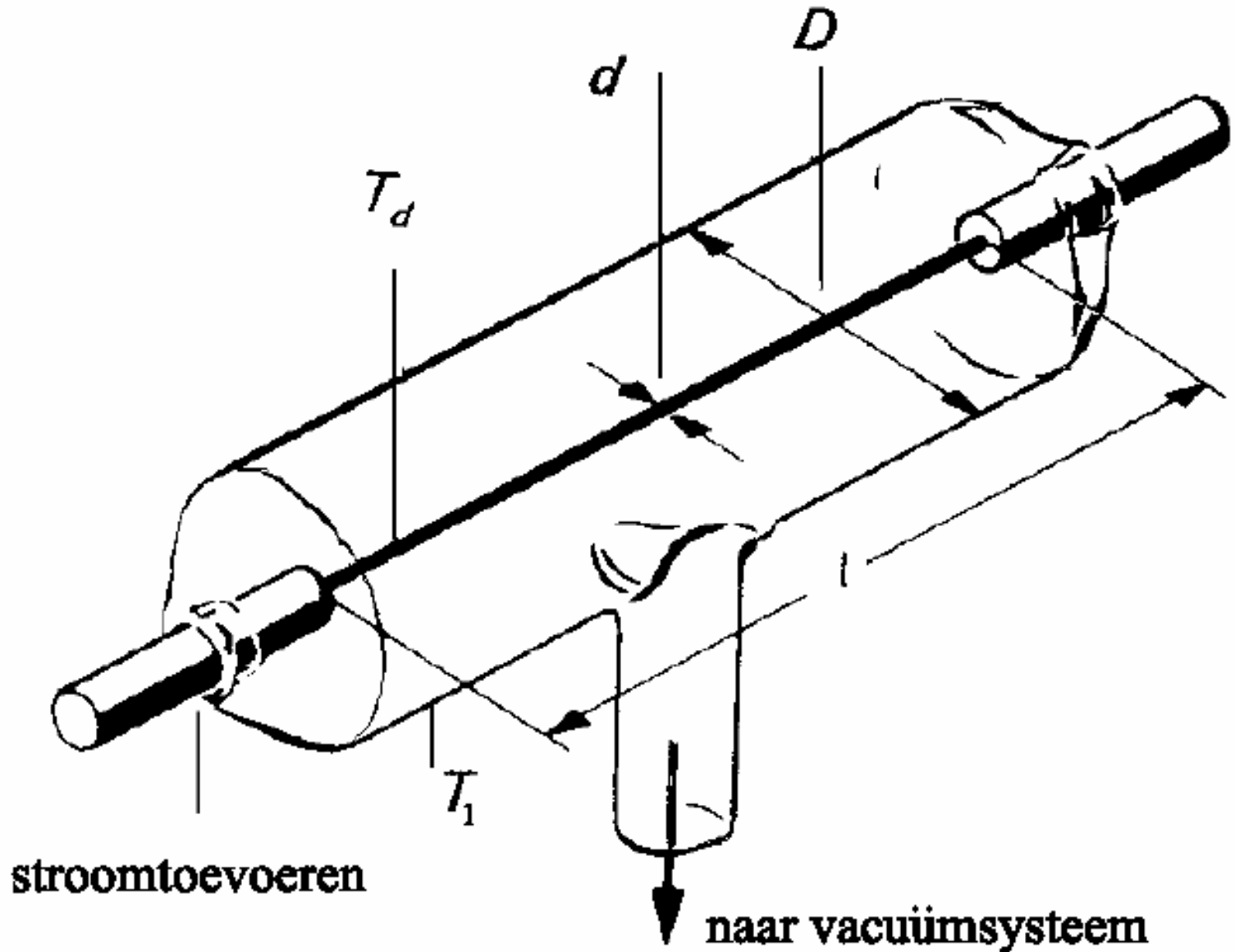
- De **relatieve frequentie-afname** als gevolg van de optredende wrijving hangt, afgezien van dichtheid en straal van het kogeltje, **uitsluitend af van de massastroomdichtheid $\frac{1}{4}nm\bar{v}$** van het gas.
- Deze grootte moet, als er geen stroming is, **overall en in alle richtingen gelijk** zijn. Dit betekent dat een wrijvingsmanometer ongeacht lokale temperatuurverschillen overall in een vacuümsysteem dezelfde druk aanwijst. **De aanwijzing wordt dus niet beïnvloed door thermomoleculaire drukverschillen**

Wrijvingsmanometer

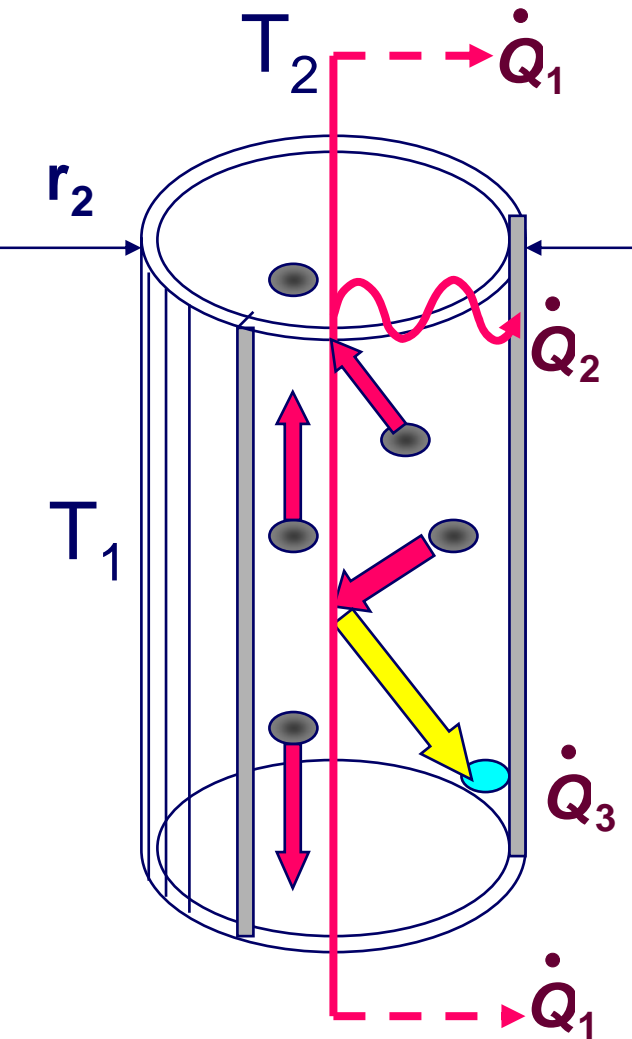
- De **wrijvingsmanometer** is een **gassoortafhankelijke** drukmeter, want de druk p wordt bepaald door de gemiddelde snelheid van het gas en deze is afhankelijk van de moleculaire massa.
- De drukbepaling is vrij **nauwkeurig**. De dichtheid en de straal van het kogeltje kunnen namelijk met grote nauwkeurigheid worden bepaald. De gemiddelde snelheid hangt **uitsluitend af van de massa van het beschouwde gas en de temperatuur** en valt dus ook nauwkeurig te berekenen. Tijdmeting vindt plaats met een **kwarts gestabiliseerde oscillator** met een frequentie van ca. 10 MHz.



Warmtegeleidingsmanometer



Warmtegeleidingmanometers



Energiebalans:

vermogen in = vermogen uit

$$P = RI^2 = \frac{U^2}{R}$$

Eindverliezen: $\dot{Q}_1 = A_1(T_2 - T_1)$

Stralingsverliezen: $\dot{Q}_2 = A_2(\varepsilon_2 T_2^4 - \varepsilon_1 T_1^4)$

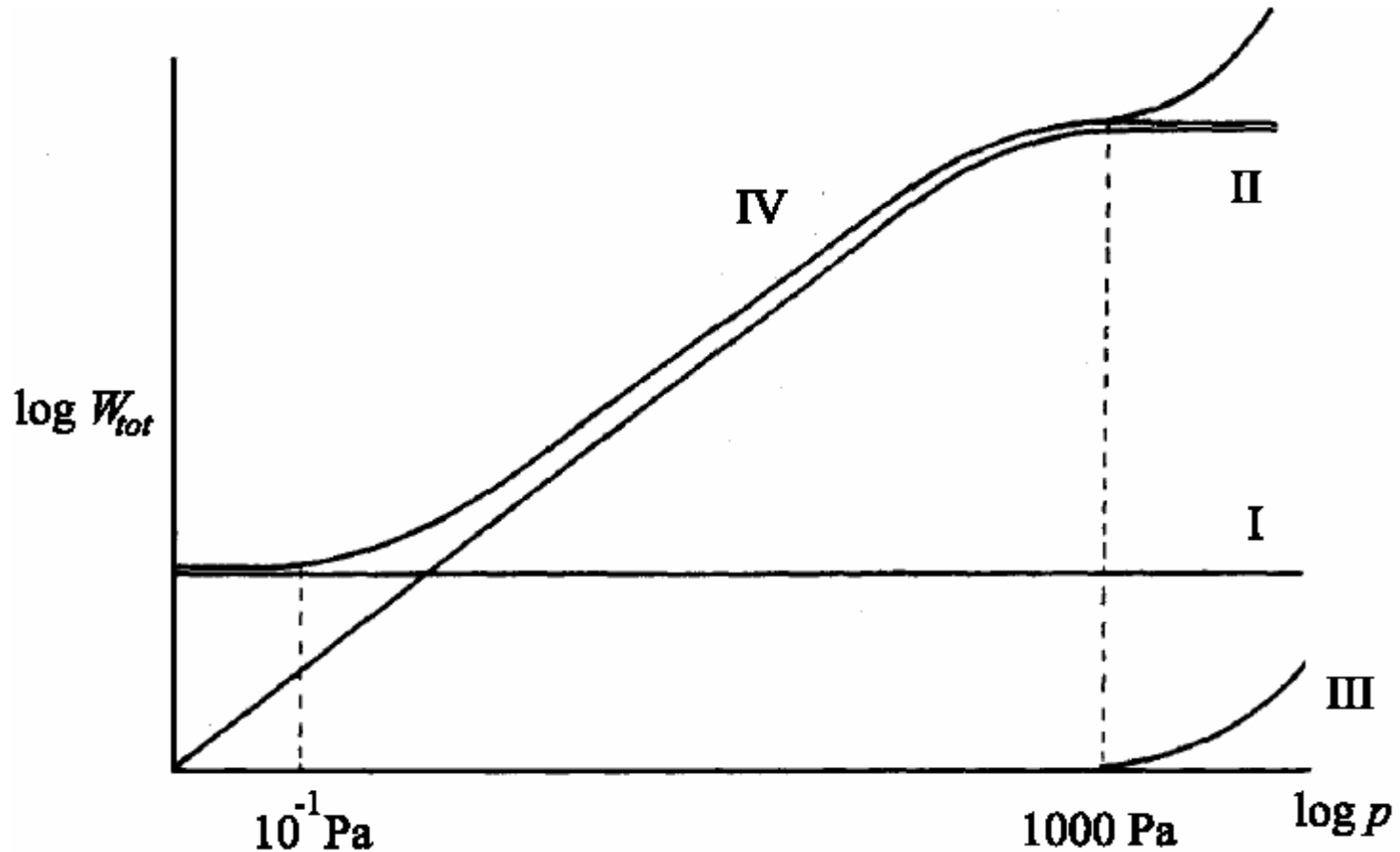
Thermische geleiding door gas:

$$\dot{Q}_3 = A_3 \frac{(T_2 - T_1)p}{B + p}$$

Balans: $P = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3$

A1, A2, A3, B constanten, met
 $B \div 1/r^2$, verder $p \div 1/\lambda$

Warmteverlies in warmtegeleidingsmanometer

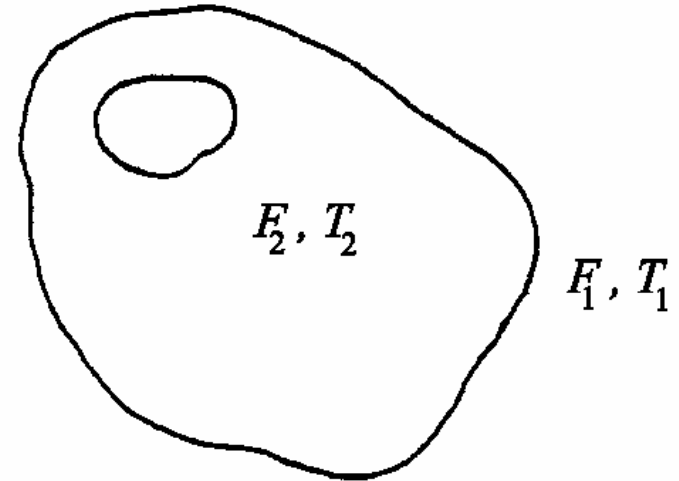


- I - warmteverlies a.g.v. straling en geleiding via de draadtoevoeren ($W_s + W_{gt}$),
- II - warmteverlies a.g.v. geleiding via het gas (W_g),
- III - warmteverlies a.g.v. convectie in het viskeuze gebied (W_c),
- IV - verloop van de totale warmte-afgifte als functie van de druk (W_{tot}).

Warmteverlies door straling en geleiding

Straling: $W_s = C_s F_2 (T_2^4 - T_1^4)$

met: $C_s = \frac{\sigma}{\left(\frac{1}{\epsilon_2} + \frac{F_2}{F_1} \left(\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1}\right)\right)}$



$F_2 = F_d \ll F_1 \rightarrow C_s \approx \epsilon_d \sigma$

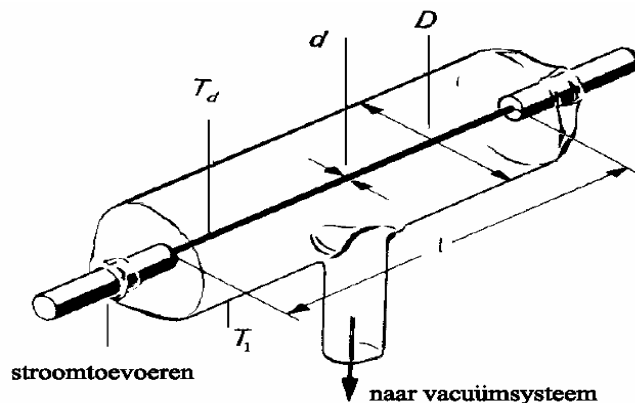
$$W_s \approx \epsilon_d \sigma F_d (T_d^4 - T_1^4)$$

Geleiding:

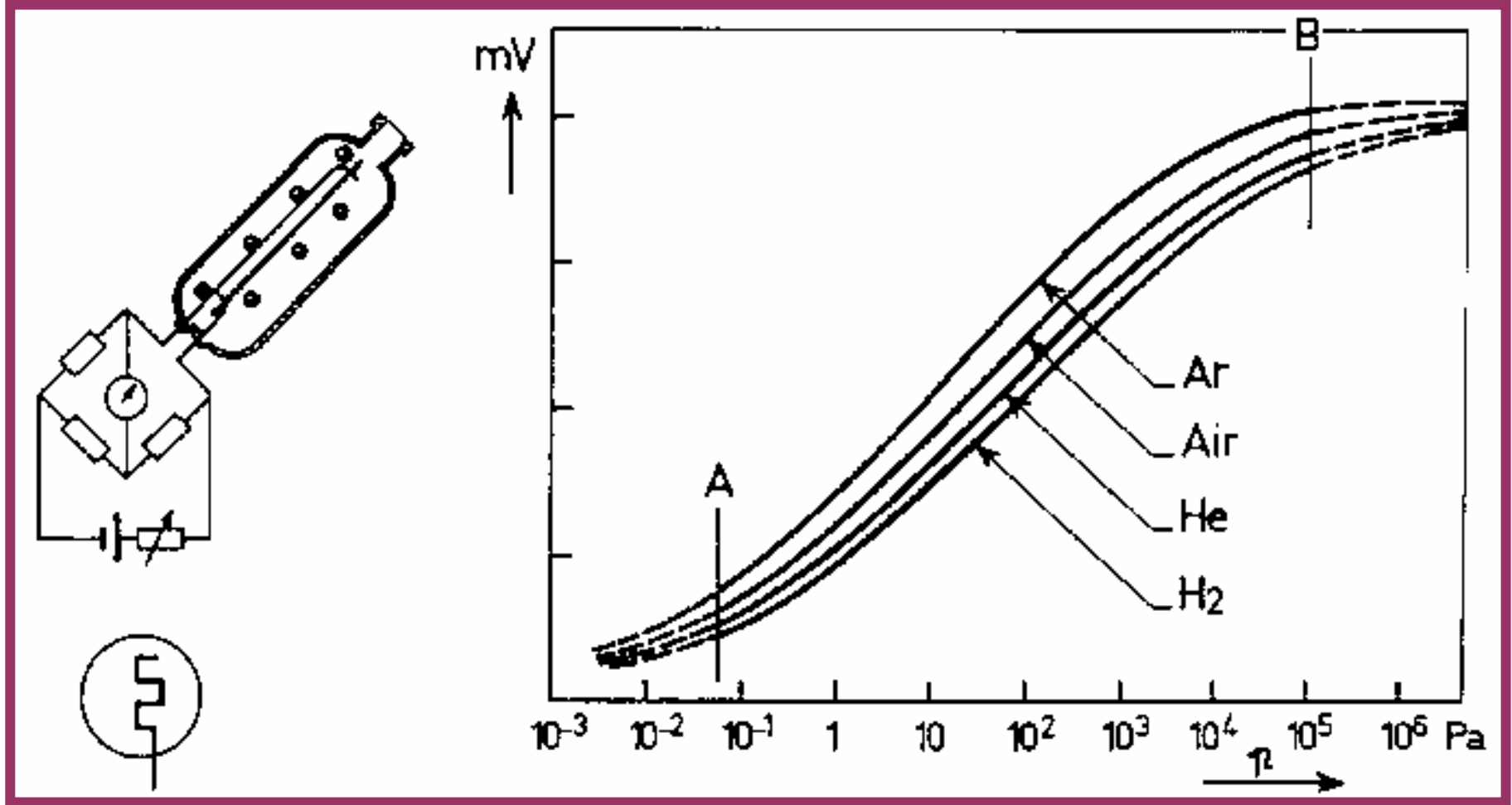
$$W_{gt} = 2\Lambda \cdot \frac{1}{4} \pi d^2 \left| \frac{dT}{dx} \right|$$

Warmteverlies door convectie

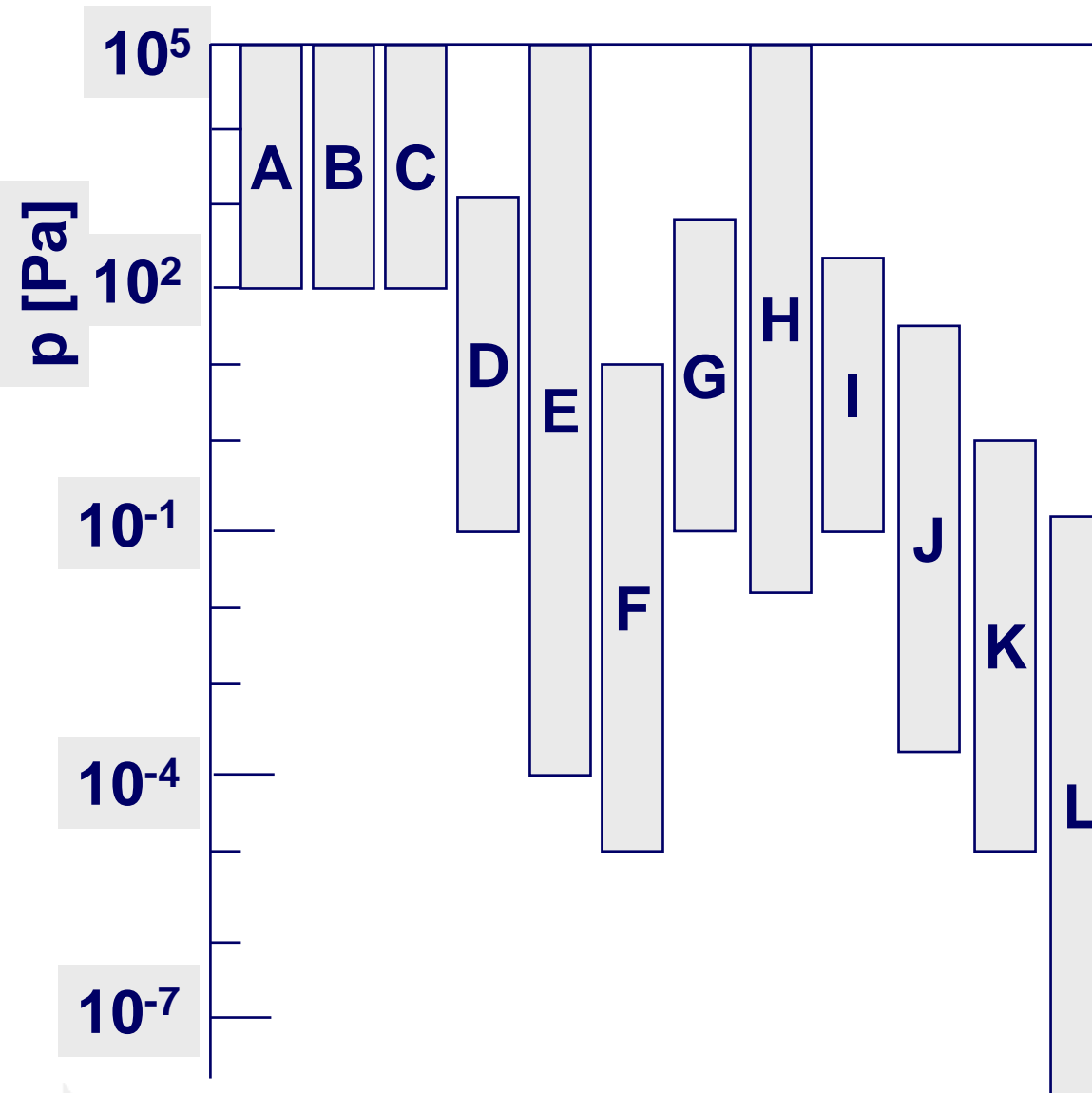
- Warmteverlies door **convectie** W_c treedt alleen op in het **viskeuze** gebied. Warmteverlies via **gasconvectie** is, afgezien van draadtemperatuur en druk, sterk afhankelijk van de **dimensies en positionering** van de meetcel en derhalve niet eenvoudig analytisch kwantificeerbaar. Heel algemeen geldt dat deze verliesterm alleen bij **voldoende grote diameter D** een rol speelt en kan worden gebruikt voor drukmeting. Voor **kleine D** blijft **W_c verwaarloosbaar klein**.



Calibratiecurves Piranimanometer



Drukbereiken vacuümmeters



- A U-buis
- B Bourdon
- C membraanmanometer
- D McLeod
- E capaciteitsmanometer
(diverse uitvoeringen,
meetbereik maximaal 5
decades)
- F wrijvingsmanometer
- G klassieke Pirani
- H verfijnde Pirani
- I thermokoppel
- J Penning
- K Schulz-Phelps IM
- L Bayard&Alpert IM