VAKUUMTEKNIK

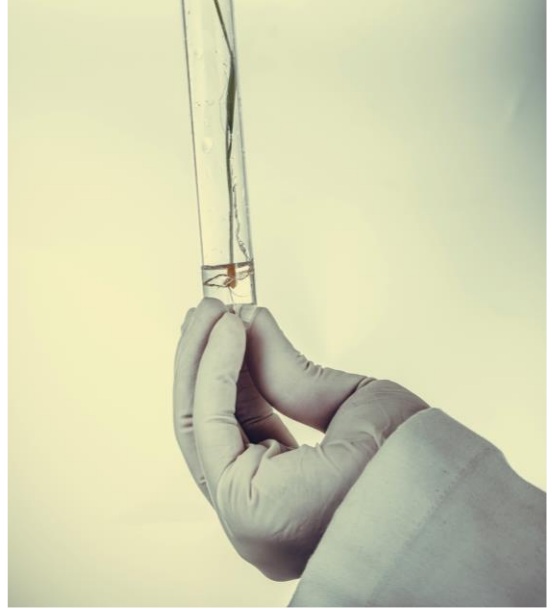
Fredrik Arrhén

November 2026

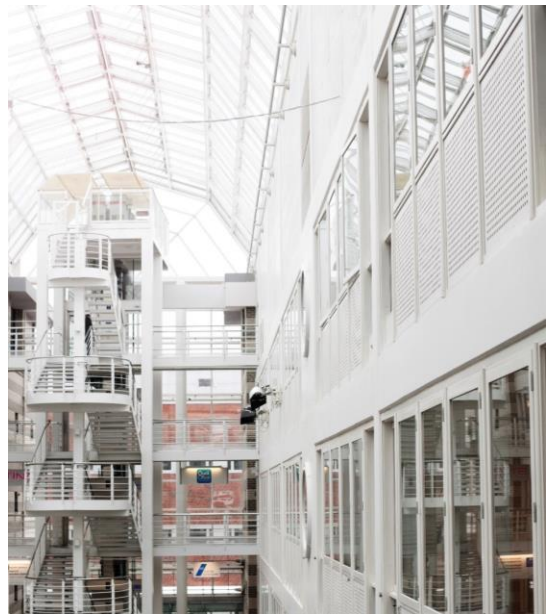
RISE Research Institutes of Sweden

SÄKERHET OCH TRANSPORT

MÄTTEKNIK









Mätteknik genom tiderna fram till SI

Metrolog – ett av de äldsta yrkena?

I skolen icke göra orätt i domen,
icke i fråga om mått, vikt eller mål.
Riktig våg, riktiga vikter, riktig efa,
riktigt hin-mått skolen I hava...

Tredje Mosebok
19:35-36

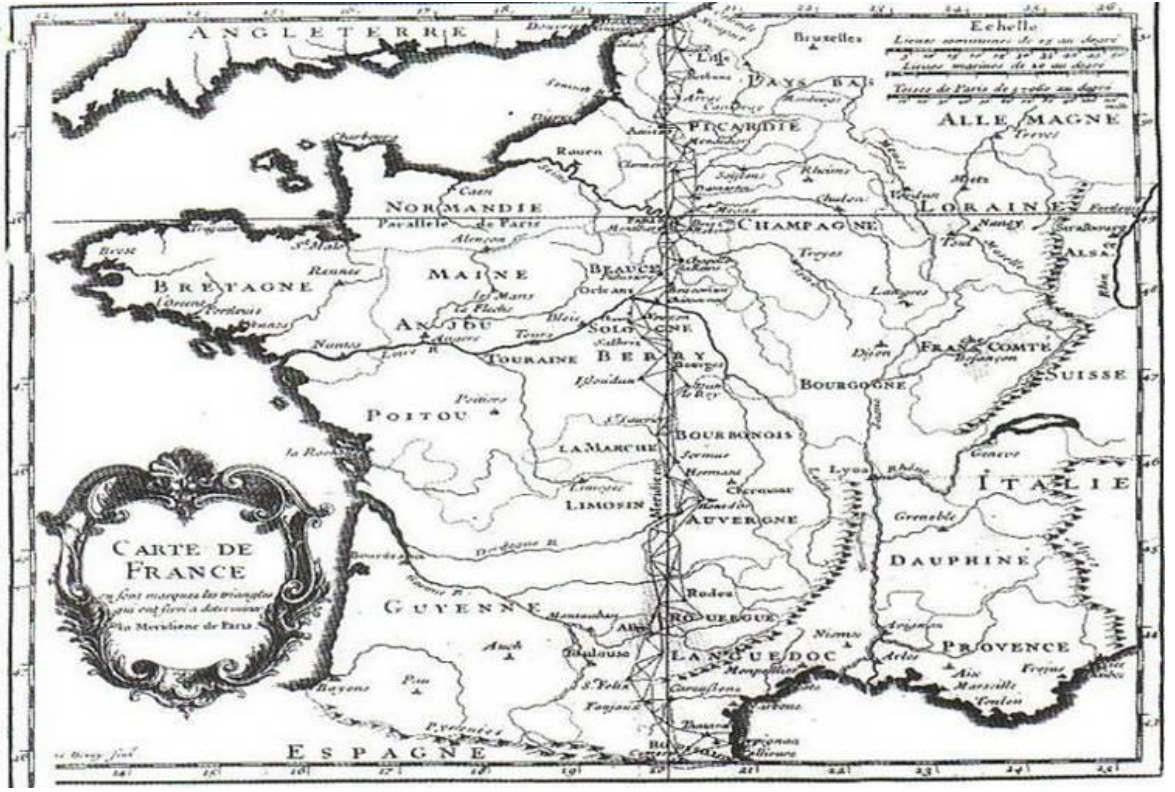


Svenska och holländska tum

Kan det vara därför vasa-skeppet sjönk?



Metersystemet, Frankrike 1799




Méchain


Delambre

RI. SE

Metersystemet, Frankrike 1799







Enhetliga mått i Europa???

Mål och Mått.

	En fot gör i millimeter.		En fot gör i millimeter.
Amsterdam	283,1066.	Hamburg	286,4903.
Augsburg	296,1904.	Hannover	292,1298.
Bayern	291,8593.	Leipzig	282,6555.
Berlin	313,7502.	Mähren	295,9648.
Böhmen	296,4160.	Nürnberg	303,8604.
Breslau	284,2345.	Portugal	338,6000.
Brüssel	291,0020.	Rhenländsk fot	313,8536.
Krakau	356,4211.	Rom	223,3282.
Dannemark	313,8536.	Ryssland	538,2409.
Dresden	283,1066.	Sverige	296,8672.
England	304,7625.	Spanien	282,6554.
Florenz	550,6371.	Tyrolen	314,1109.
Frankfurt am M.	286,4903.	Venedig	347,7588.
Frankrike (äldre Mått)	324,8394.	Warschau	356,4212.
Gotha	287,6183.	Wien	316,1023.
		Zürich	300,9275.

Ur Berzelius ”Lärbok i kemi”

1808 - 1818



THE 1875 DIPLOMATIC CONVENTION OF THE METRE

Etablerade Internationella byrån för mått och vikt (BIPM, Bureau International des Poids et Mesures)

Har idag 64 medlems-stater och 37 ascocierade medlemmar

Finns på internationell mark i Sévres utanför Paris med cirka 60 anställda

Samordnar 10 tekniska ‘konsultativa kommitteer’ av NMI experter och 5 “Joint Committees.”

www.bipm.org



Vakuumteknik

Inledning

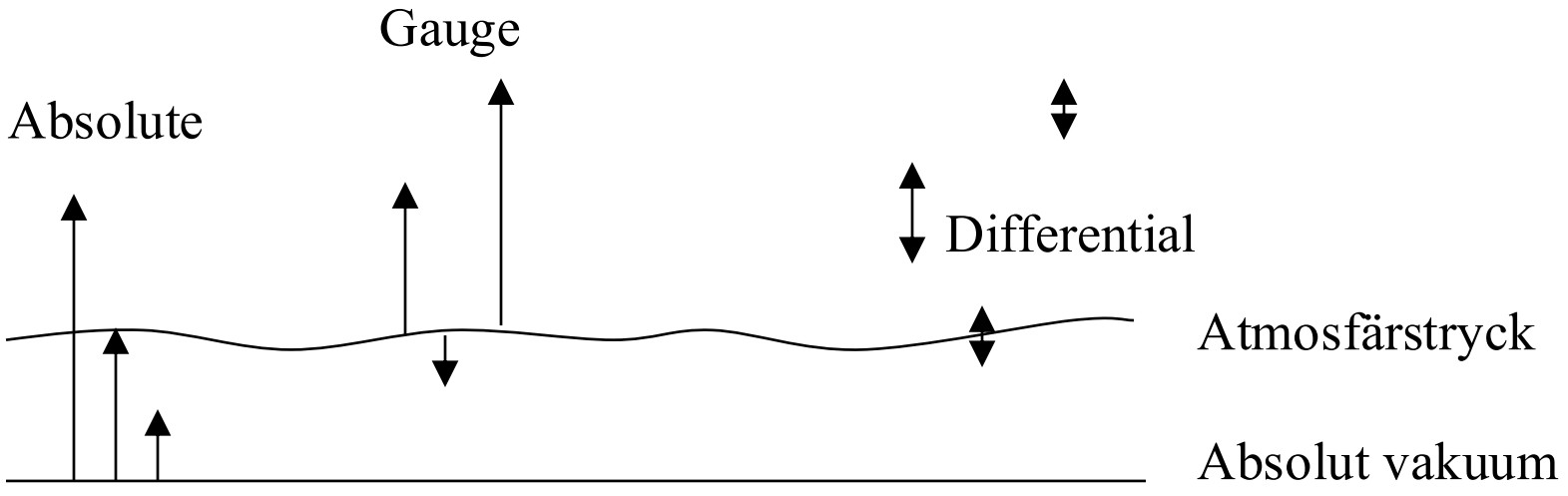
Introduktion

Absoluttryck: **Tryck med referensnivån vid absolut vakuum**

Gaugetryck: **Tryck med referensnivån vid atmosfärstryck**

Differentialtryck: **Skillnad I tryck mellan två godtyckliga nivåer**

Normal-atmosfärstryck är 1013 hPa



Tryckenheter

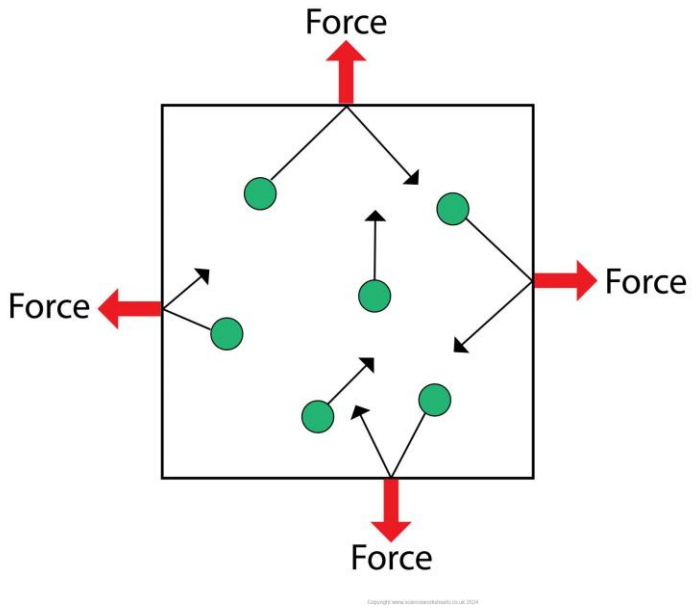
Pascal	**Pa**	**1 Pa**
Bar	bar	100 000 Pa
Hektopascal	**hPa**	**100 Pa**
Millibar	mbar	100 Pa
Millimeter Hg (Torr)	mmHg	133,322 Pa
millimeter Vp	mmVp	≈ 9,8 Pa
Normalatmosfär	atm	101 325 Pa
”kg per cm^2”	Kgf/cm^2	98 066,5 Pa

Vad är tryck?

- Tryck är den sammanlagda effekten av gasmolekylernas kollisioner mot väggarna, beräknat som kraft per ytenhet.

- Ju fler molekyler/volym, desto högre tryck

- Ju högre hastighet (temperatur), desto högre tryck



Ideal gas

En ideal gas har vissa egenskaper som inte finns i verkliga gaser:

- En mycket stor mängd molekyler som rör sig slumpmässigt med olika hastighet och i olika riktningar.
- Den totala volymen av molekylerna är mycket liten jämfört med den totala volymen av gasen.
- Molekylerna interagerar bara med varandra vid rena kollisioner. Den fungerar sedan som elastiska bollar.

Ideala gaslagar är ganska lätta att använda och fungerar som grova uppskattningar för gasbeteende

RI.
SE

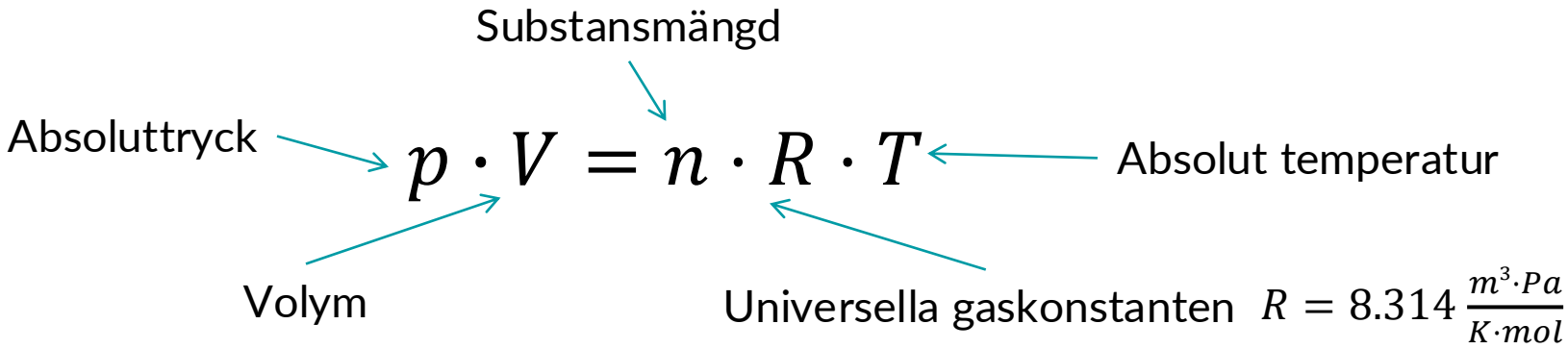
Verkliga gaser

Verkliga gaser avviker från det ideala gasbeteendet på vissa sätt:

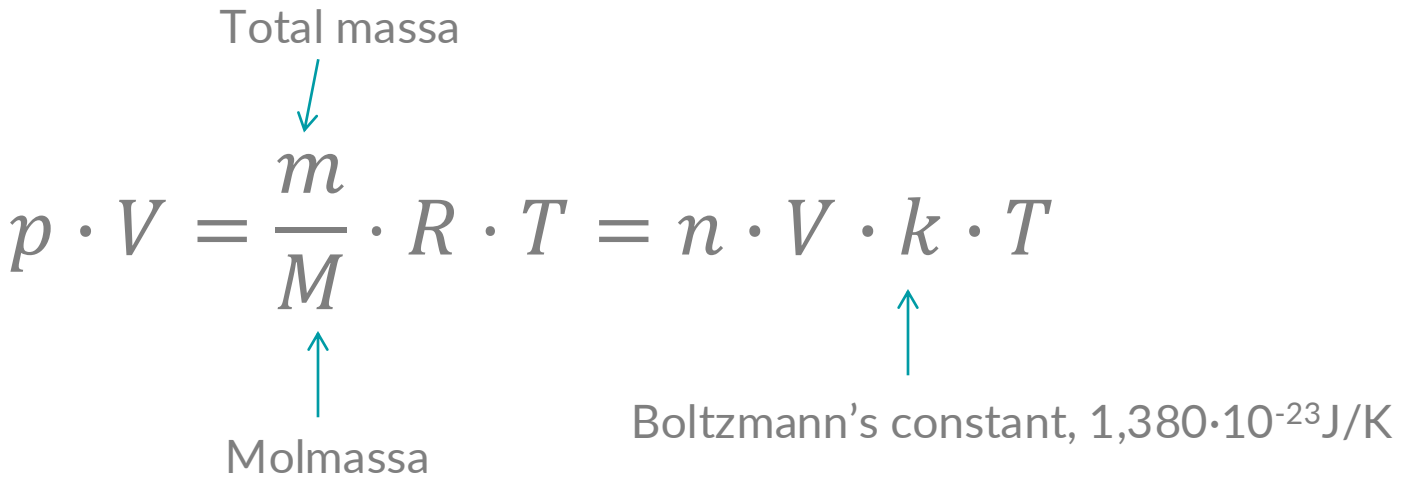
- Molekylernas totala volym är inte obetydlig jämfört med den totala volymen
- Molekylerna interagerar inte bara i direkta kollisioner

Dessa avvikelser från det ideala gasbeteendet korrigeras genom användningen av "virala koefficienter" i gaslagarna.

Ideala gaslagen



Alternativa versioner:



Molekyltäthet

Ur allmänna gaslagen ser vi att trycket är proportionellt mot antalet molekyler per volymenhet.

$$p = n \cdot k \cdot T$$

Beräkna antalet molekyler vid rumstemperatur och:

1. Atmosfärstryck $2{,}47 \cdot 10^{25}$ molekyler/m^3 eller $2{,}47 \cdot 10^{19}$ molekyler /cm^3

2. 10^{-10} Pa $2{,}47 \cdot 10^{10}$ molekyler/m^3 eller $2{,}45 \cdot 10^{4}$ molekyler /cm^3

Något absolut vakuum kan man alltså inte tala om!

RI.
SE

Termisk molekylhastighet

Molekylerna har en genomsnittshastighet som är beroende på temperatur och molmassa. Tyngre molekyler rör sig långsammare än lätta vid samma temperatur

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot M}} = konst \cdot \sqrt{\frac{T}{M}}$$

Gas	Molmassa (g/mol)	Medelhastighet, 293 K (m/s)
H_2	2	1,762
He	4	1,246
H_2O	18	587
N_2	28	471

RI. SE

Medelfri väg

Gasmolekylerna rör sig kontinuerligt i mediet.

De kolliderar dels med varandra, dels med kärlets väggar

Ju fler molekyler, desto kortare sträcka innan en kollision

$$\bar{l} \cdot p = \frac{k \cdot T}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot {d_m}^2}$$

$$\bar{l} = \frac{k \cdot T}{p \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot {d_m}^2}$$

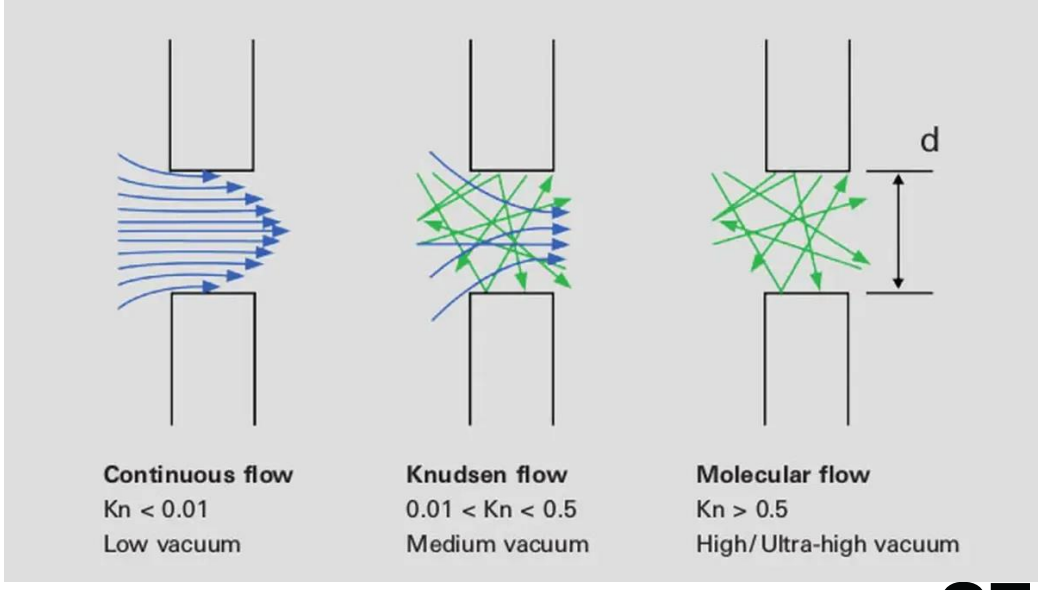
d_m = molekyldiameter

Flödesmodeller i vakuum

- Vid högre tryck är flödet laminärt, $\bar{l} \ll d$
- Vid låga tryck är det partikelflöde, $\bar{l} \gg d$
- Mellan är det ”både och”, övergångsflöde, $\bar{l} \sim d$

Kan uppskattas med ”Knudsentalet”, *Kn* där *d* står för vakuumvolymens dimensioner (diameter)

$$Kn = \frac{\bar{l}}{d}$$



SE

Vakuumområden

Trycknivå	Tryck (hPa)	Tryck [Pa]	Partikeldensitet (cm^{-3})	Medelfri väg (m)
Atmosfärstryck	1,013.25	101,325	$2.7 \cdot 10^{19}$	$6.8 \cdot 10^{-8}$
Lågvakuum (LV)	300…1	30,000…100	10^{19}…10^{16}	10^{-8}…10^{-4}
Medelvakuum (MV)	1…10^{-3}	100…10^{-1}	10^{16} …10^{13}	10^{-4}…10^{-1}
Högvakuum (HV)	10^{-3}…10^{-7}	10^{-1}…10^{-5}	10^{13}…10^{9}	10^{-1}…10^{3}
Ultrahögt vakuum (UHV)	10^{-7}…10^{-12}	10^{-5}…10^{-10}	10^{9}…10^{4}	10^{3}…10^{8}
Extremt högt vakuum (XHV)	<10^{-12}	<10^{-10}	<10^{4}	>10^{8}

Vakuumområden

Trycknivå	Tryck (hPa)	Tryck [Pa]	Partikeldensitet (cm^{-3})	Medelfri väg (m)
Atmosfärstryck	1,013.25	101,325	$2.7 \cdot 10^{19}$	$6.8 \cdot 10^{-8}$
Lågvakuum (LV)	300…1	30,000…100	10^{19}…10^{16}	10^{-8}…10^{-4}
Medelvakuum (MV)	1…10^{-3}	100…10^{-1}	10^{16} …10^{13}	10^{-4}…10^{-1}
Högvakuum (HV)	10^{-3}…10^{-7}	10^{-1}…10^{-5}	10^{13}…10^{9}	10^{-1}…10^{3}
Ultrahögt vakuum (UHV)	10^{-7}…10^{-12}	10^{-5}…10^{-10}	10^{9}…10^{4}	10^{3}…10^{8}
Extremt högt vakuum (XHV)	<10^{-12}	<10^{-10}	<10^{4}	>10^{8}

Vakuumområden

Trycknivå	Tryck (hPa)	Tryck [Pa]	Partikeldensitet (cm^{-3})	Medelfri väg (m)
Atmosfärstryck	1,013.25	101,325	$2.7 \cdot 10^{19}$	$6.8 \cdot 10^{-8}$
Lågvakuum (LV)	300…1	30,000…100	10^{19}…10^{16}	10^{-8}…10^{-4}
Medelvakuum (MV)	1…10^{-3}	100…10^{-1}	10^{16} …10^{13}	10^{-4}…10^{-1}
Högvakuum (HV)	10^{-3}…10^{-7}	10^{-1}…10^{-5}	10^{13}…10^{9}	10^{-1}…10^{3}
Ultrahögt vakuum (UHV)	10^{-7}…10^{-12}	10^{-5}…10^{-10}	10^{9}…10^{4}	10^{3}…10^{8}
Extremt högt vakuum (XHV)	<10^{-12}	<10^{-10}	<10^{4}	>10^{8}

RI. SE

Vakuumområden

Lågvakuum:	Den medelfria vägen är mycket mindre än dimensionerna i volymerna. De flesta kollisioner är mellan gaspartiklar. Gasen beter sig som ett normal medium.
Medelvakuum:	Den medelfria vägen är i samma storleksordning som volymernas dimensioner. Gasen beter sig vare sig som ett normal medium eller som partiklar utan någonting mitt emellan. Speciella metoder krävs för att beräkna flöden
Högvakuum:	Den medelfria vägen är mycket större än dimensionerna i volymerna. De flesta kollisionerna sker med väggarna medan kollisioner mellan gasmolekyler är försumbara. Normala gaslagar gäller inte. Gasen beter sig som partiklar.

Gasflöden

Utgående från allmänna gaslagen kan vi uttrycka flödet som förändring över tid (förutsättande konstant temperatur):

$$q_{pV} = \frac{p \cdot V}{t} = \frac{m}{t \cdot M} \cdot R \cdot T$$

Vakuumpumpar har (oftast) konstant volymflöde:

$$S = \frac{dV}{dt}$$

Ur detta kan vi ange pumpkapaciteten:

$$q_{pV} = S \cdot p = \frac{dV}{Dt} \cdot p$$

RI. SE

Gaslast

Den gasblandning vi har i ett kärl kallas gaslast, Q

Gaslasten beror på:

- Urgasning ur vakuumsystemet
- Urgasning ur material
- Läckor
- …

För att nå lämpligt vacuum måste ju gaslasten pumpas ut.

Pumpens kapacitet S måste alltså anpassas till att kunna möta gaslasten.

Partialtryck

Det totala trycket är summan av partialtrycken för alla ingående gaskomponenter

$$p_{total} = \sum p_i = p_1 + p_2 + \ldots + p_n$$

Partialtryck i luft

Gas	Partialtryck (Pa)	Partialtryck (hPa)	Volym (%)
Kvävgas, N_2	$79{,}1 * 10^3$	791	78
Syre, O_2	$21{,}2 * 10^3$	212	21
Argon, Ar	960	9,6	0,9
Koldioxid, CO_2	40	0,4	0,04
Neon, Ne	1,9	$1{,}9 * 10^{-2}$	
Helium, He	0,5	$5{,}0 * 10^{-3}$	
Krypton, Kr	0,101	$10{,}1 * 10^{-4}$	
Vätgas, H_2	0,05	$5{,}0 * 10^{-4}$	
Xenon, Xe	0,009	$9{,}0 * 10^{-5}$	

RI.SE



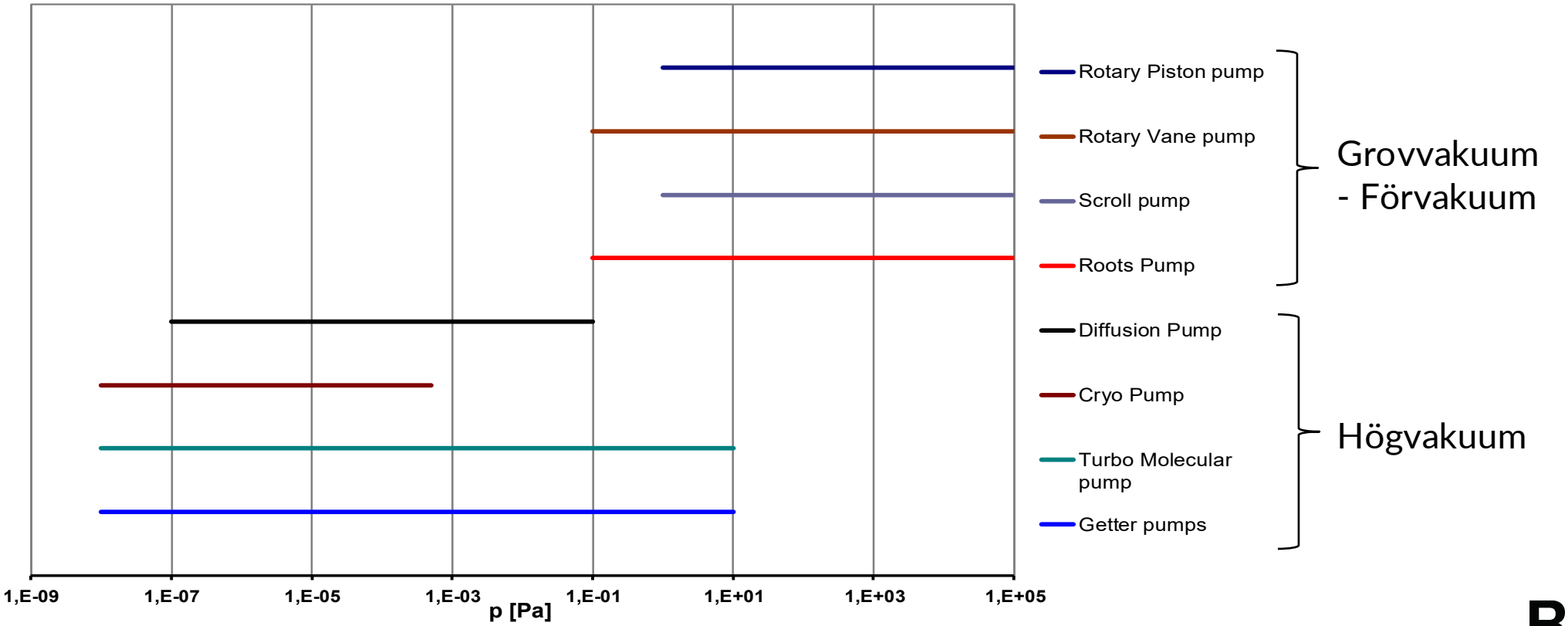
Robert Boyle f. 1627

RI.
SE

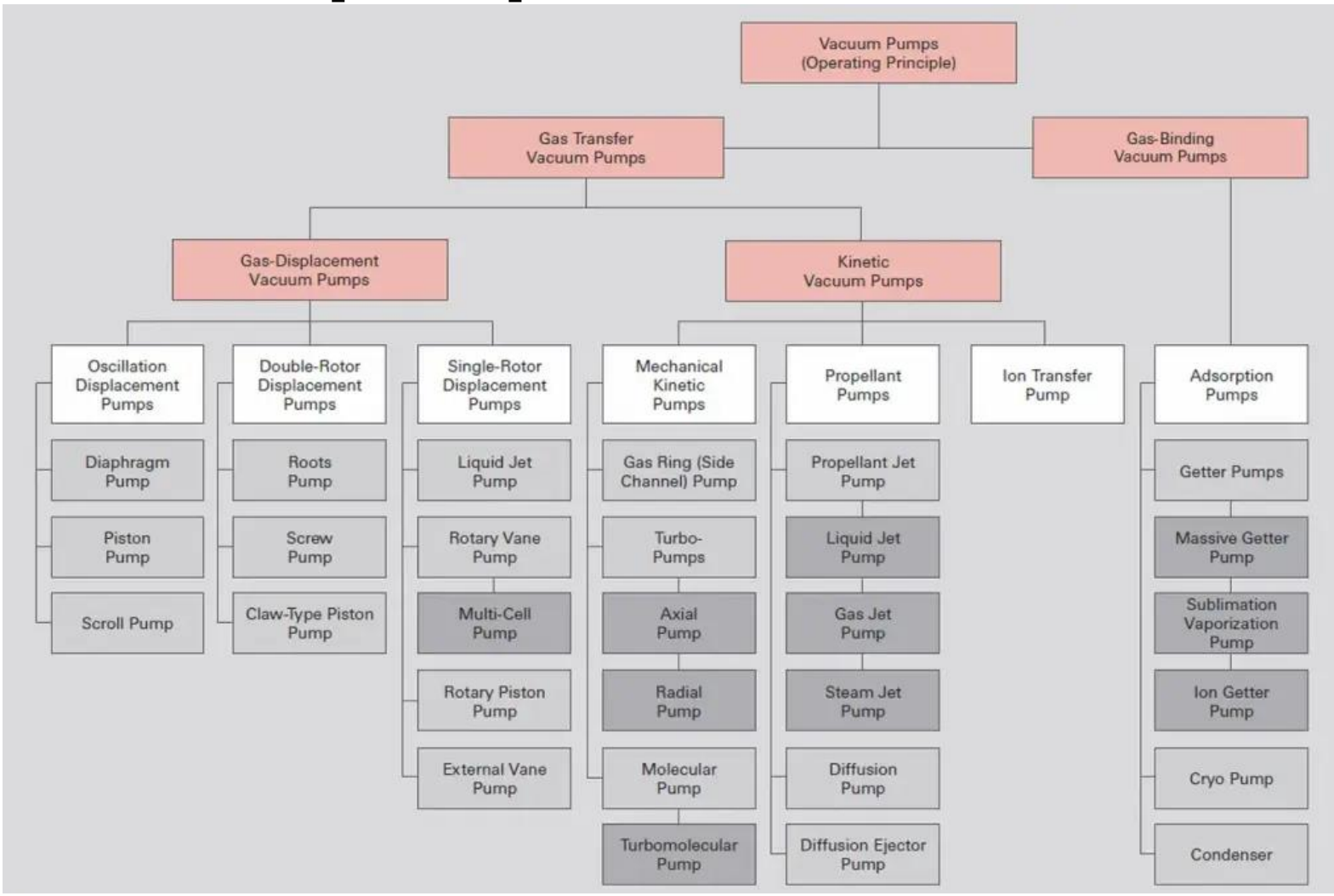
Over to Mike!

Vakuumpumpar

Vakuumpumpar



Vakuumpumpar



Bilden från Pfeiffer vacuum

Pumptyper

Grovvakuumpumpar

- Pumpar från atmosfärstryck ned till ~1 Pa
- Robusta
- Ska kunna arbeta kontinuerligt under mycket lång tid (år) med hög gaslast.

Högvakuumpumpar

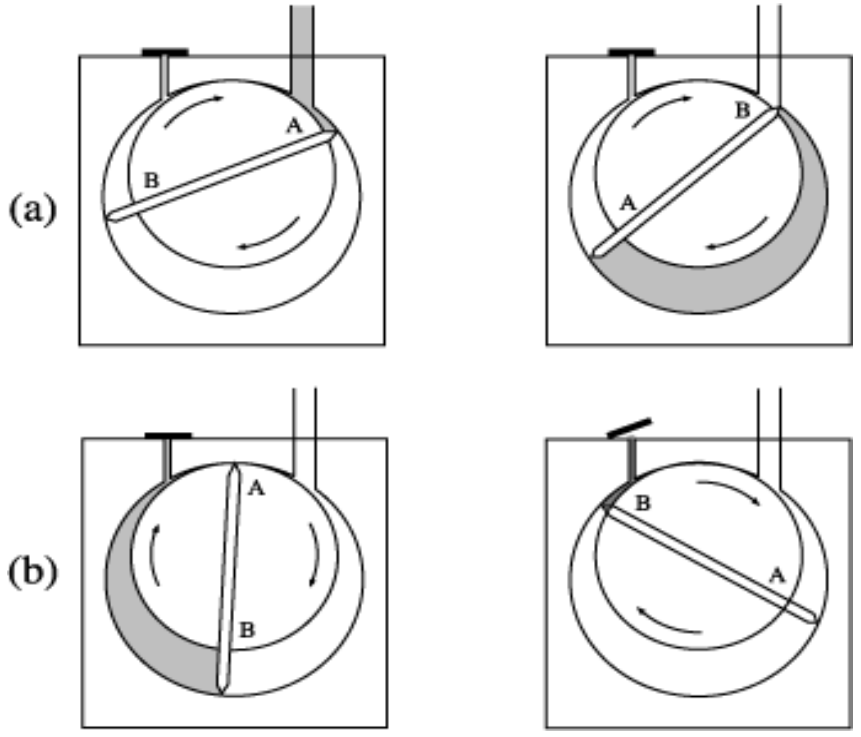
- Kan (oftast) inte pumpa från atmosfärstryck utan kräver en grovpump i serie
- Hög kompression för att nå höga vacuum (låga tryck)
- Har ofta olika pumpförmåga för olika gaser

Adsorptionspumpar

- Inte pumpar i vanlig bemärkelse, binder gasen och evakuerar den inte.
- Kräver förpumpning för att inte mättas för fort.
- Monteras ofta parallellt med högvakuumpumpar

RI.
SE

Rotary vane pump



- Typiska grovvakuumpumpar
- Mycket vanliga

\+ Pumpar ned till ~0,1 Pa

\+ Oljesmorda

\+ Oljetätade

\+ Effektiva

\+ Robusta

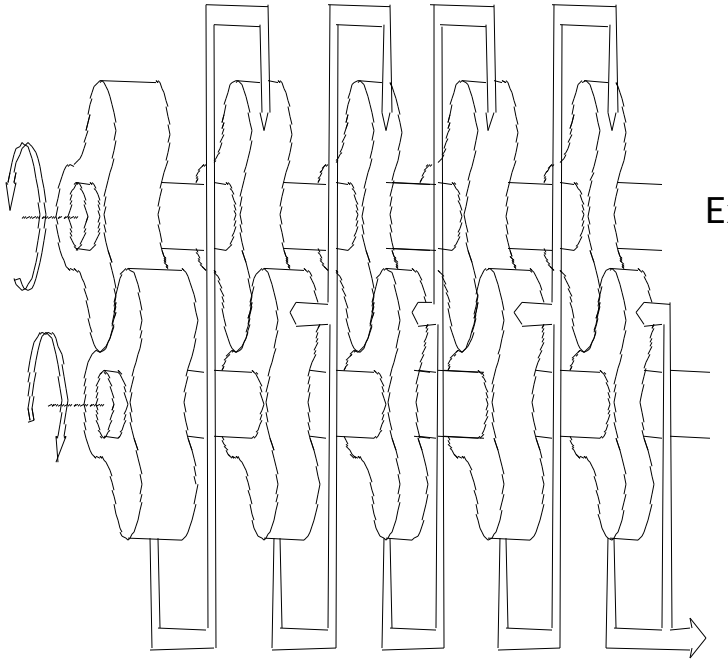
\+ Relativt billiga

\- Risk för oljekontaminering

Animering

Rootspump

Inlet



Exhaust

Bild från Alcatel

ROOTS pump animering

- Används mycket som grovvakumpumpar
- Har blivit vanliga idag
- Gammal princip men mycket förbättrad de senaste femton åren

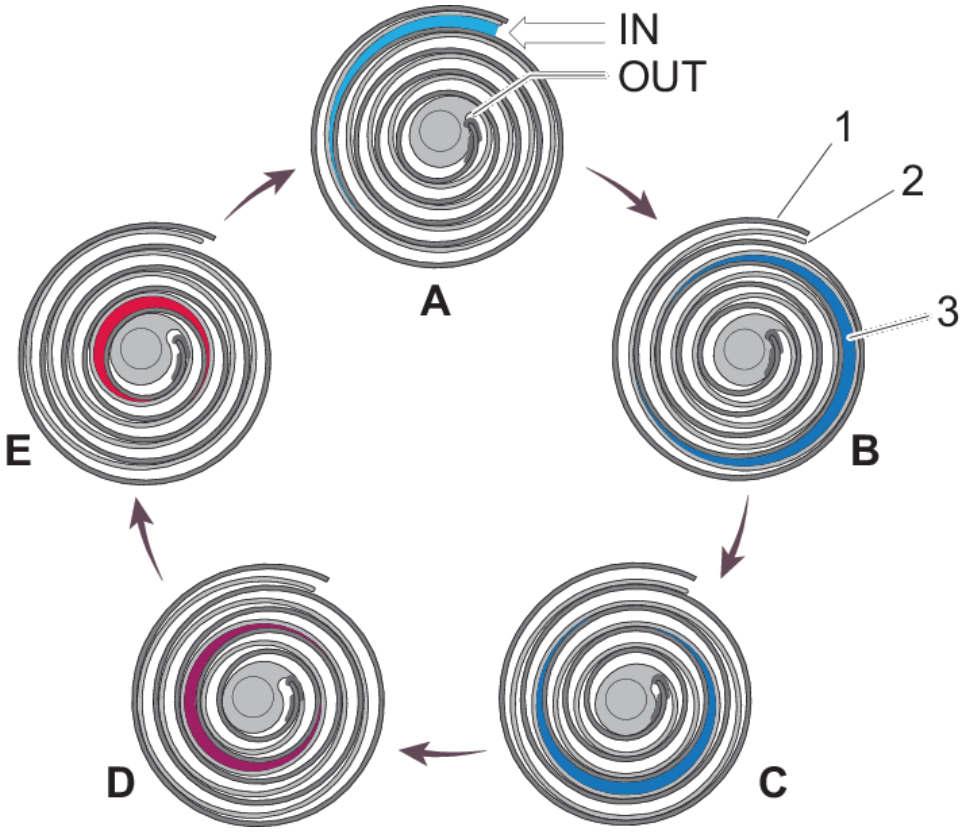
\+ Pumpar ned till ~1 Pa

\+ Torr pump

– Kräver flera pumpsteg för högt vacuum

– Relativt dyr

Scrollpump



- Har blivit vanliga idag
- Kompaktare än rootspumpar

\+ Pumpar ned till ~1 Pa

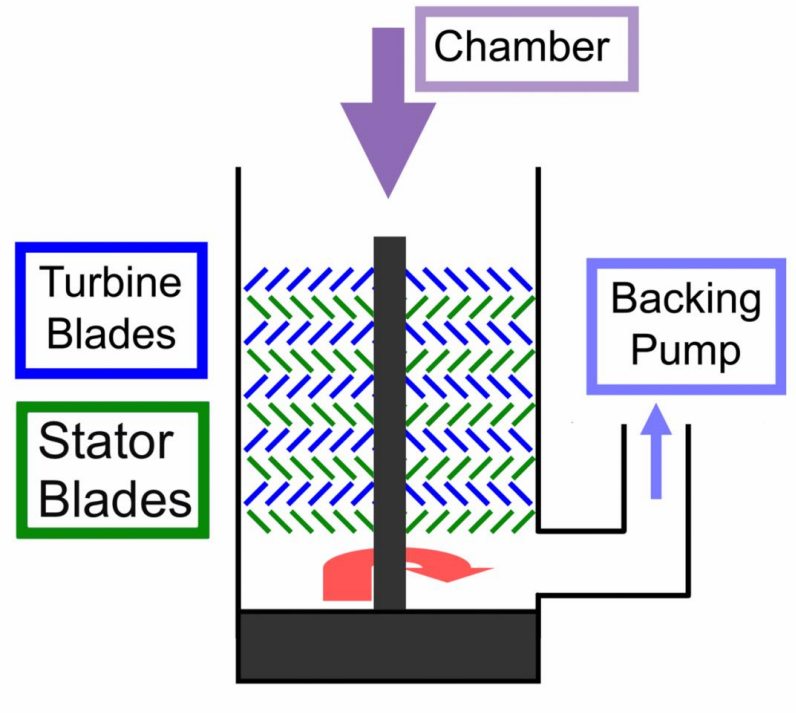
\+ Torr pump

– Relativt dyr

– Packningarna har begränsad livslängd, måste bytas ofta

Scroll pump animering

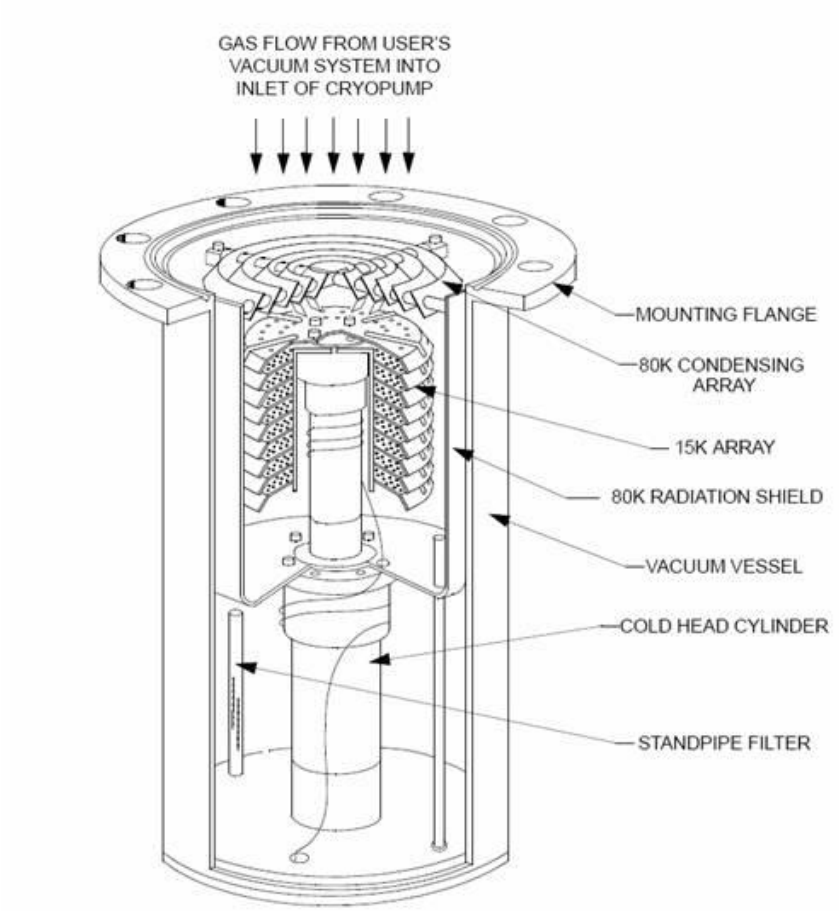
Turbomolekylar pump (turbopump)



- Ned till 10^{-9} Pa
- Väldigt effektiv
- Olika pumphastighet för olika gaser
- Oljasmord lagring eller magnetlagring
- Kräver förvakuumpump!

Animering

Kryopump

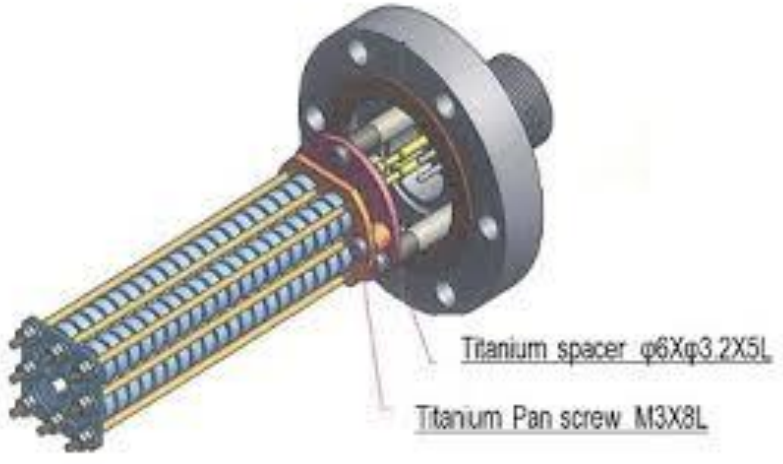


- Kyler/fryser gasen
- Gasberoende pumphastighet
- Hög pumphastighet
- Inte för kontinuerligt bruk
- Måste regenereras



Getterpump

- Binder gasen to en “getter”-yta
- Extremt stor yta
- Konstant pumphastighet i HV- och UHV-områd
- Väldigt bra för vätgas och dess isotoper
- Vibrationsfri
- Kräver regeneration
- Kan kombineras med turbo-pumpar



Vakuum-flänsar och komponenter

Flänsar - krav

Flänsar är icke-permanenta skarvar i vakuumsystemet

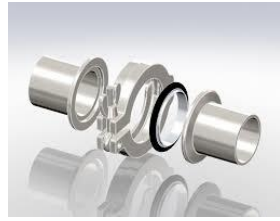
De måste:

- Vara lätta (eller möjliga) att montera och demontera
- Ha minimalt läckage i arbetsområdet
- Kunna bära viss mekanisk belastning
- Vara standardiserade
- Ha maximal konduktans

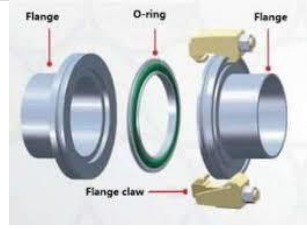
Olika typer av flänsar

Tre standardiserade varianter:

- KF (Klein Flansche)



- ISO (Stor ISO, ISO-K och ISO-F)



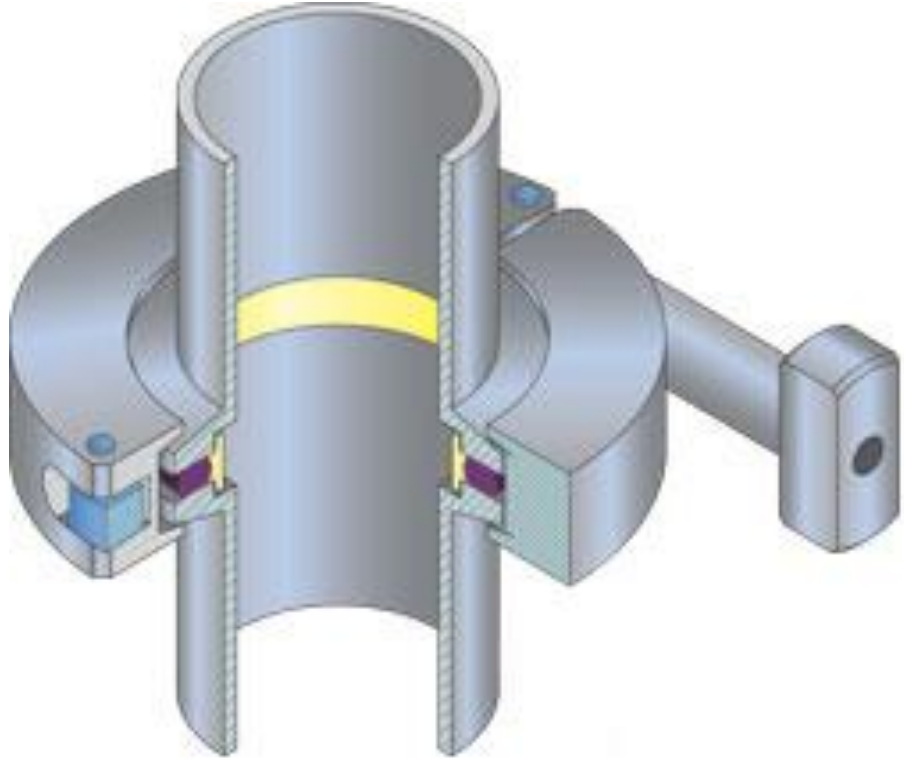
- CF (ConFlat)



- Äldre typer finns liksom special-flänsar

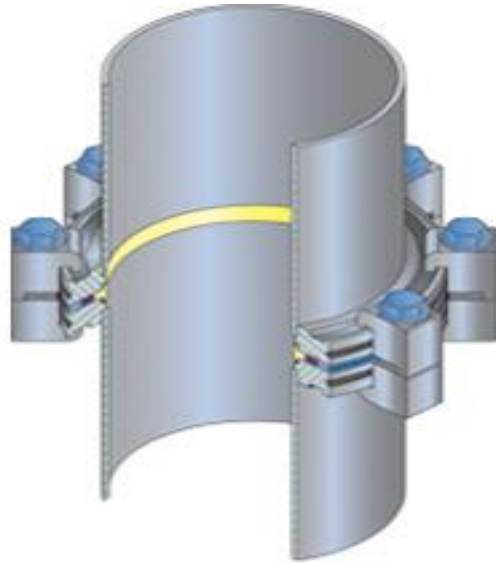
KF-flänsar (”Klein Flanche”)

- KF är O-ringstätade flänsar med klämring
- Storlekar från 10 till 50 mm innerdiameter
- Kan bära viss vikt, i första hand endast rörsystemet
- O-ringen är monterad på en centreringsring för extra stöd
- Användbara ned till HV och temperaturer mellan 0 °C och 100-180 °C beroende på material i O-ringen.
- Snabb och enkel att använda

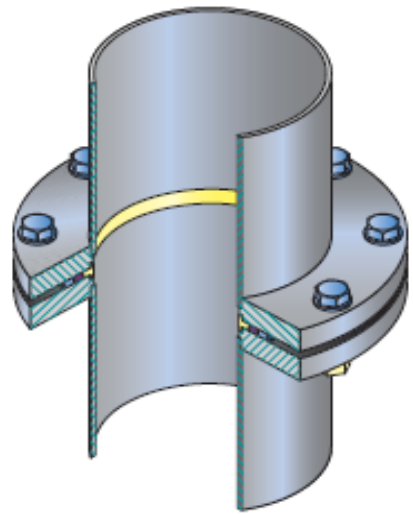


ISO-flänsar

- Även dessa är O-ringstätade.
- Dimensioner mellan 63 och 630 mm innerdiameter
- O-ringen monterad mellan två centreringsringar.
- Kan ta högre mekaniska laster än KF
- Flänsarna kan antingen klämmas ihop (ISO-K) eller skruvas ihop (ISO-F)
- Det går att kombinera dessa med ”Halvklämmor”.
- Användbara ned till HV och temperaturer mellan 0°C och 100-180°C beroende på material i O-ringen.
- Vanlig till montering av turbopumpar och vid större rördimensioner.



ISO-K



ISO-F

O-ringar, material

Både KF, ISO-K och ISO-F är begränsade i vakuumområde av materialet i O-ringen

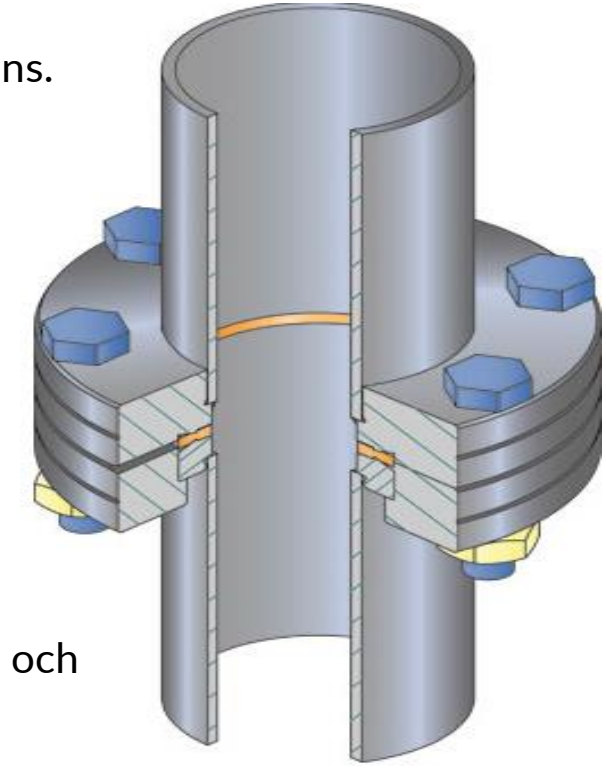
- Nitrilgummi (buna-N): billigt, maximal temperatur ~100°C, hög permeabilitet för vatten, inte lämpligt i syrgasprocesser, kort livslängd
- Fluorocarbon (viton); väldigt vanlig, maximal temperatur ~180°C till 200°C, relativt låg permeabilitet utom för helium, lång livslängd.
- Perfluorocarbon (Kalrez, Chemraz), bästa högtemperturegenskaperna, up till 250°C, annars likvärdigt med fluorocarbon

- Användning av vakuumfett för extra tätning är debatterat!

RI.
SE

CF-flänsar (ConFlat)

- Har metallisk tätring som kläms mellan två knivseggar, en i varje fläns.
- Finns i storlekar mellan 16 och 250 mm innerdiameter.
- Tätringen är oftast av koppar vilken kan vara silverbelagt för högtemperaturanvändning
- Kläms ihop direkt mellan flänshalvorna
- Tätringen är för engångsbruk
- Finns med både fast och fritt roterande flänsring
- Användbar i vakuum till ~10^{-11} Pa och temperaturer mellan -196°C och 450°C.
- Speciell hänsyn ska tas till skruvarna vid extrema temperaturer (förglödgning mm)



Adaptrar

- Givetvis kommer du alltid att ha ”fel” fläns på ditt system.
- Det finns ett stort utbud av övergångar mellan olika storlekar och typer av flänsar.
- Överst en övergång mellan CF16 till ’Cajun VCR’, en vanlig koppling på vissa typer av givare och i gasanalys- och gasinjektions-system
- … och under, en adapter mellan KF16 och NPT-gänga.





Standardiserade dimensioner

- De flesta komponenter har standardiserade dimensioner vilket gör dem lätt utbytbara och modifierbara
- Till exempel kan en 90° vinkel enkelt ersättas med en T-koppling och ge ytterligare en anslutning vid senare tillfälle om så behövs.





När standardkomponenterna inte passar

- Det finns flexibla komponenter när de vanliga storlekarna inte passar
- … eller när vibrationsdämpning behövs

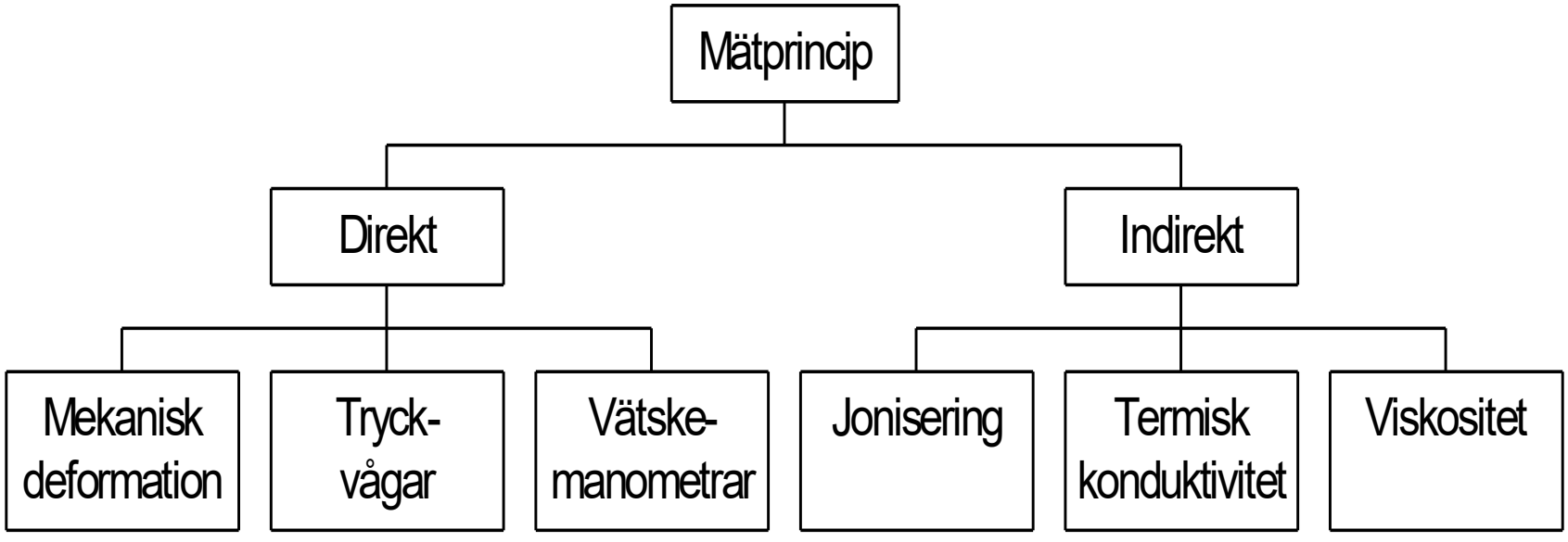




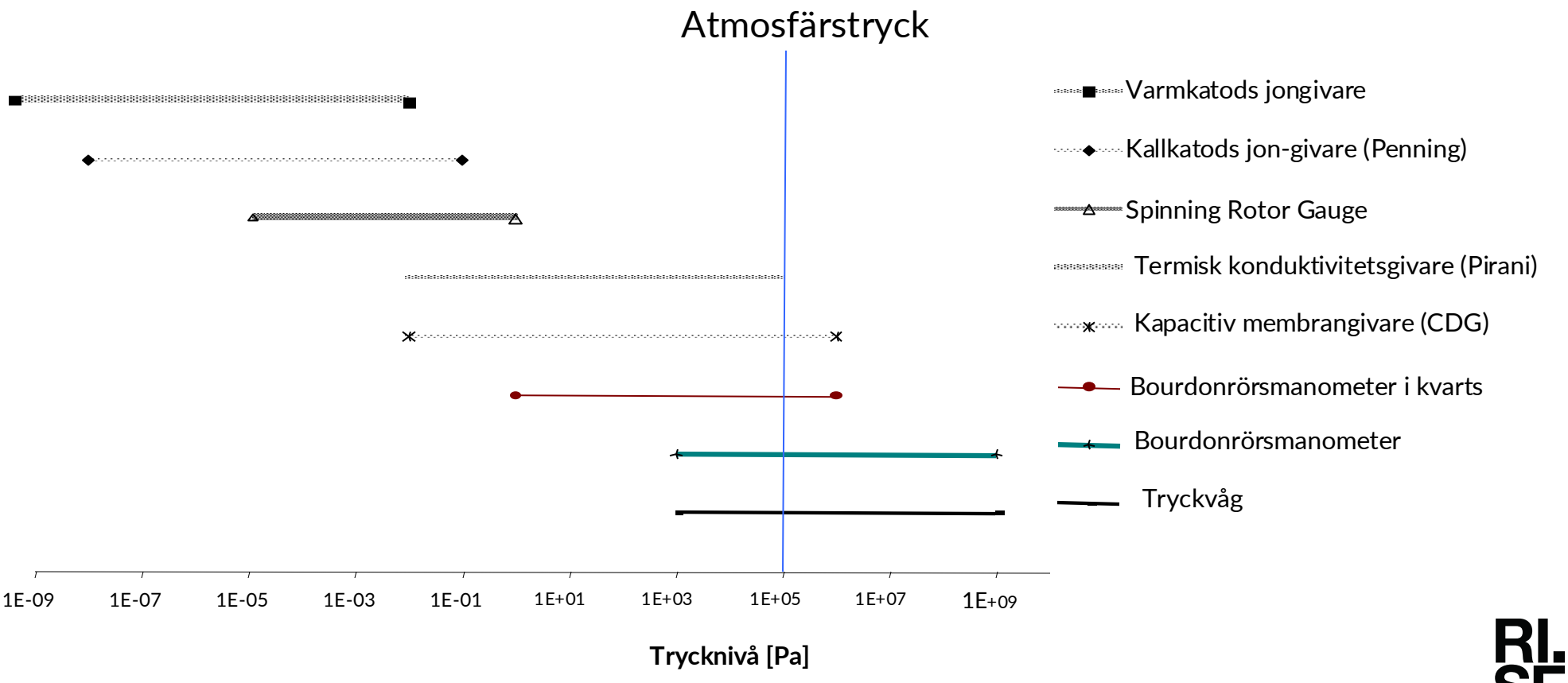
Ock så finns det ju ”Special”

Mäta vakuum

Att mäta vakuum

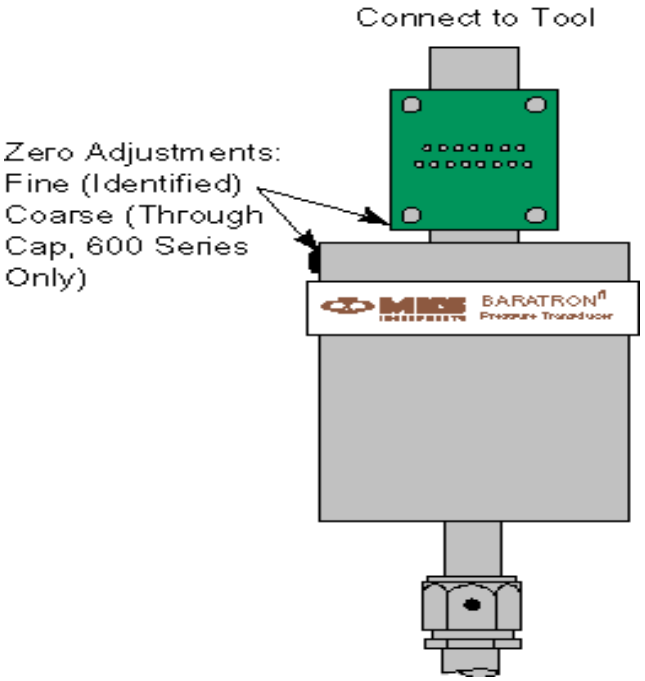


Mätområden för olika vakuumgivare

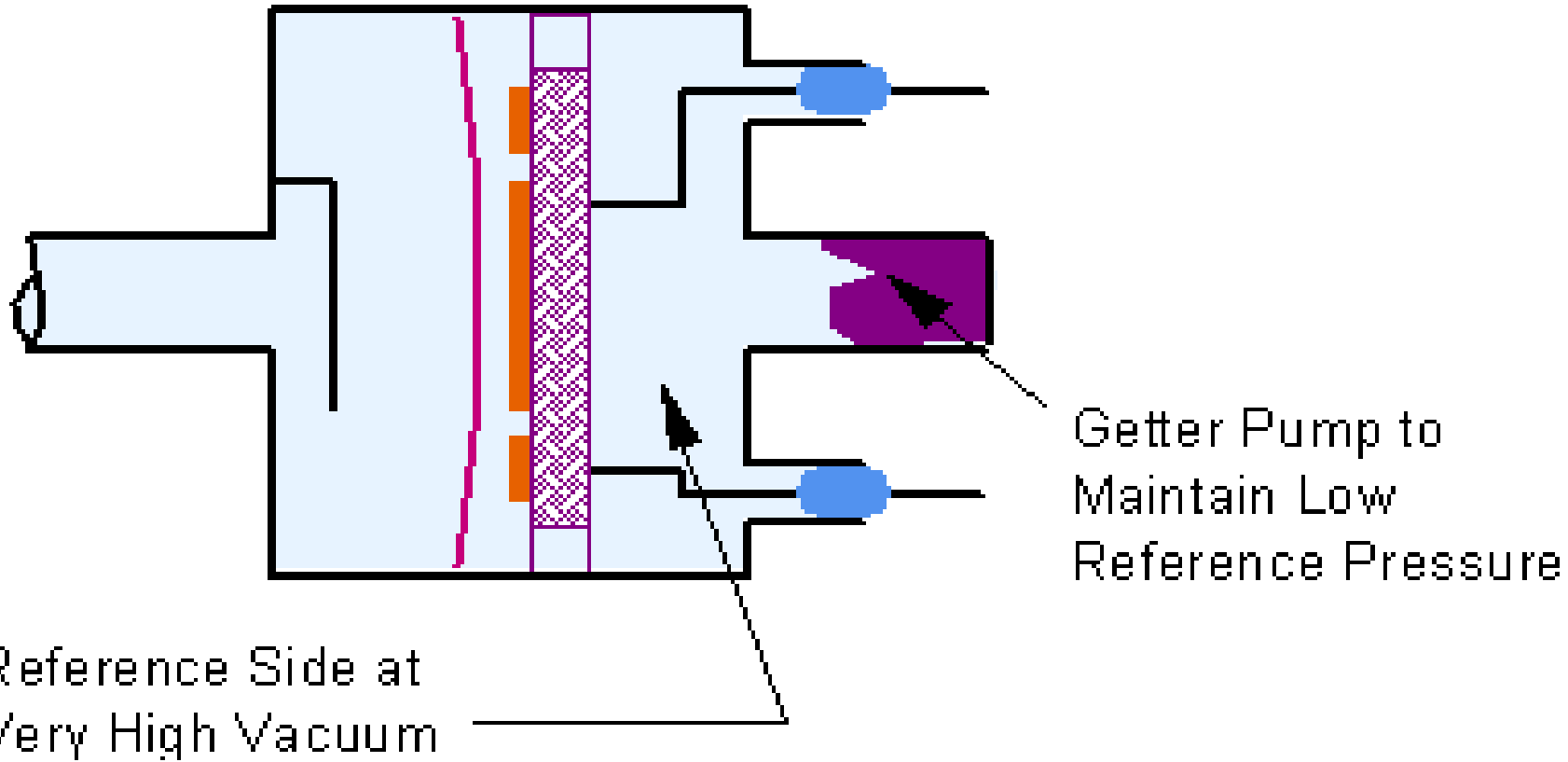


Kapacitiva givare (CDG)

- 10^{-3} Pa till > 100 kPa
- Sant tryckkännande
- Hög känslighet, användbara över flera dekader
- Temperaturkänsliga, för högsta precision finns uppvärmda versioner
- Kan levereras med speciellt ytskikt för korrosiva miljöer



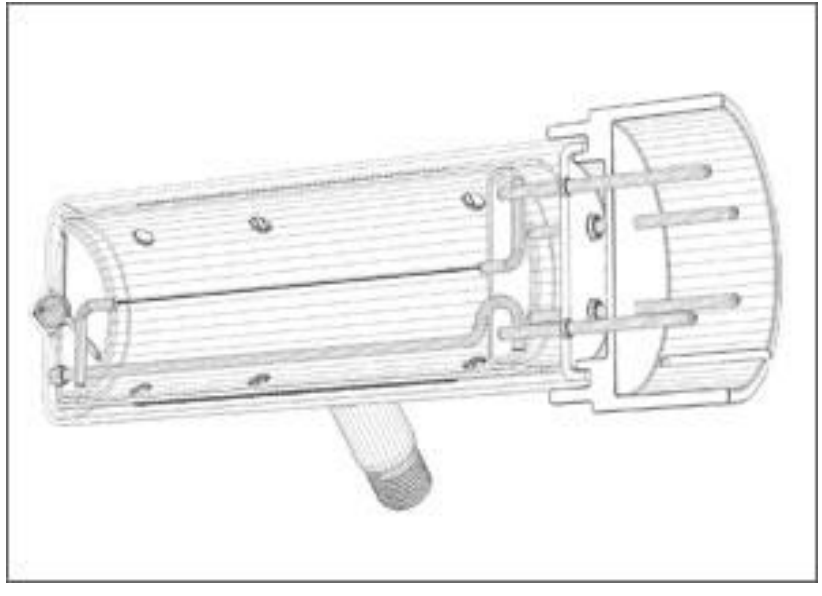
CDG


Getter Pump to
Maintain Low
Reference Pressure
Reference Side at
Very High Vacuum

Pirani gauge

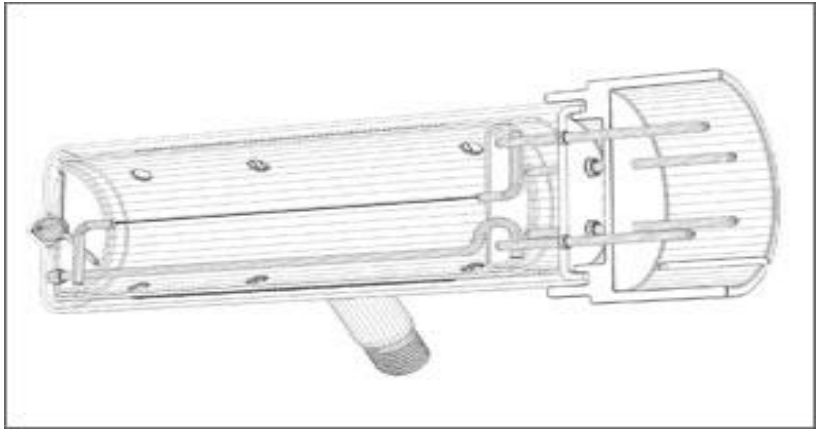
- 10^{-3} – 10 hPa
- Billig och enkel
- Robust, klarar plötsliga tryckstötar utan att skadas
- Snabba stegsvar

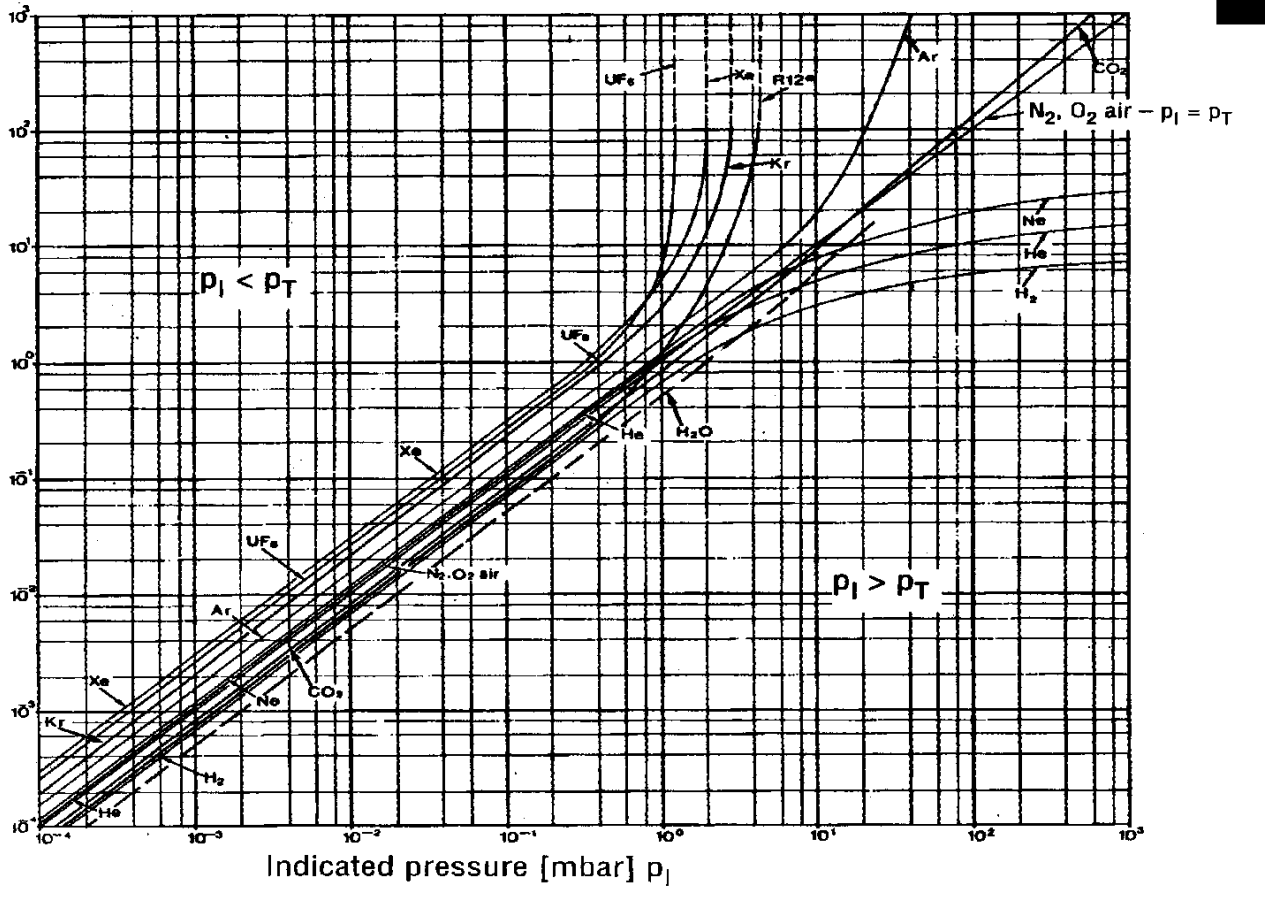
- Mäter termisk konduktans



Pirani gauge

- Påverkas av temperatur, fukt, föroreningar med mera
- Låg precision
- Gasberoende
- Positionsberoende, måste kalibreras med samma orientering som vid användning

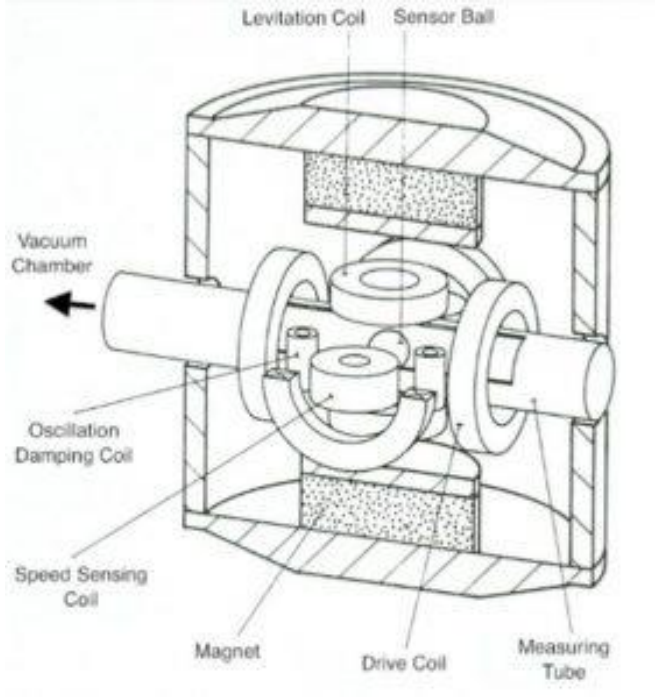




Calibration curves of THERMOVAC gauges for various gases, based on nitrogen equivalent reading

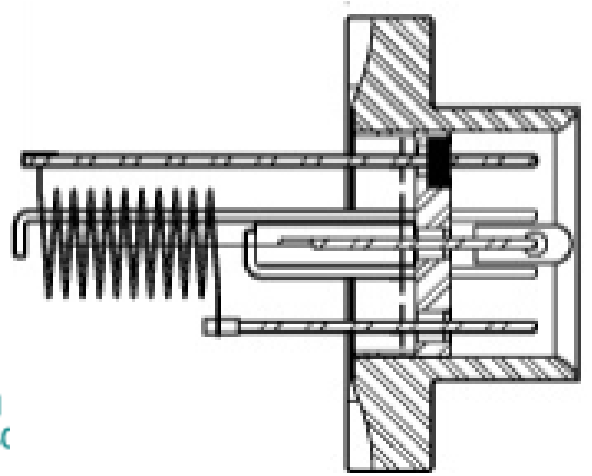
Spinning rotor gauge, SRG (gas viscosity meter)

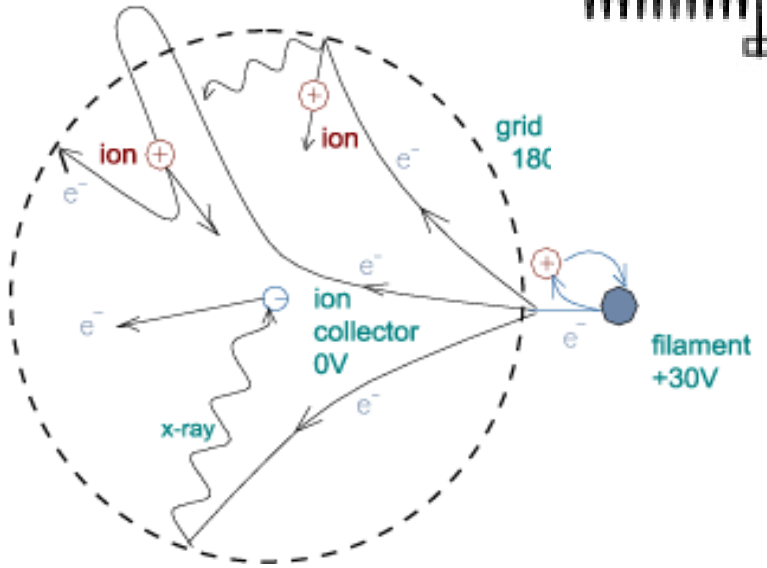
- 10^{-7} – 10 Pa
- Mycket noggrann
- Gasberoende
- Långsam (1 s – 30 s)
- Vibrationskänslig
- Mäter gasviskositet



Varmkatod Jonisationsgivare

- 10^{-10} - 10^{-2} hPa
- Gasberoende
- Klarar inte högre tryck (i drift)
- Mäter jonisationsförmåga hos gasen
- Flera olika designer finns för att mininera effekterna av bland annat bakgrundsstålning och andra parasitiska effekter





Varmkatod Jonisationsgivare

- Aktiverad vid för höga ryck (~10-2 Pa) förstör givaren
- Kräver urgasning med regelbundna intervall
- Både pumpar och gasar ut gas vilket påverkar både vakuumet och andra givare
- Olika montering:
  - Naken givare mäter lokalt vakuum noggranare men påverkas mer av omgivning (andra givare, vakuumkammaren med mera)
  - Inkapsad givare är mer robust, klarar förflyttning bättre och är inte påverkade av omgivningen men mäter inte kammarens vakuum lika bra.

RI.
SE

Varmkatod Jonisationsgivare (Penning gauge)

- $5*10^{-7}$ - 10^{-2} hPa
- Gasberoende
- Grov men robust
- Känslig för kontaminering
- Mäter gasens jonisationsförmåga
- Används ofta för att kontrollera andra givares nollnivå (exempelvis pirani eller CDGs)



RI.
SE

En kommentar

Idag finns flera hybridgivare på marknaden som innehåller två eller flera sensorer i samma hus vilket ger större arbetsområde och optimerar mätområdena, exempelvis CDG/Pirani eller Pirani/jonisationsgivare

Detta ger större dynamiskt område i ett och samma mäthuvud.

Det kan ge problem i områden där de olika sensorerna överlappar eller ska växlas



Sammanfattning

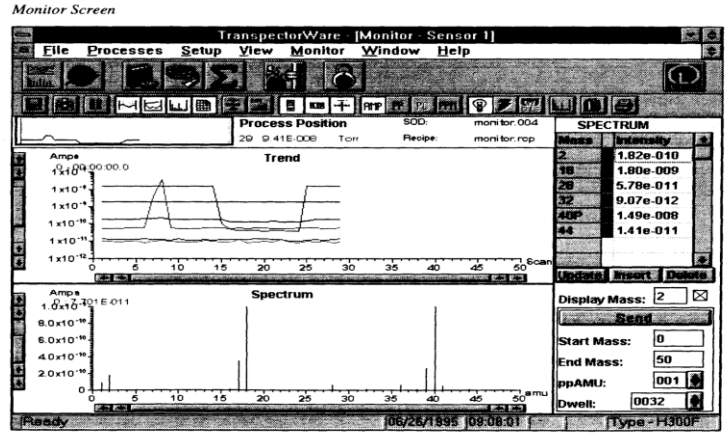
Type	Range (Pa)	Range (hPa)	Comments
Penning gauge	10^{-5} - 1	10^{-7} – 10^{-2}	Rough but reliable
Hot Ion gauge	10^{-1} – 10^{-8}	10^{-3} – 10^{-10}	Liniar, not so robust
RGA	10^{-2} – 10^{-10}	10^{-4} –10^{-12}	Expensive, slow
Pirani	10^{-2} - 10^{5}	10^{-4} - 10^{3}	Cheap, easy to use but low precision
SRG	10^{-5} - 2	10^{-7} – $2*10^{-2}$	Accurate but slow and sensitive to vibrations, expensive

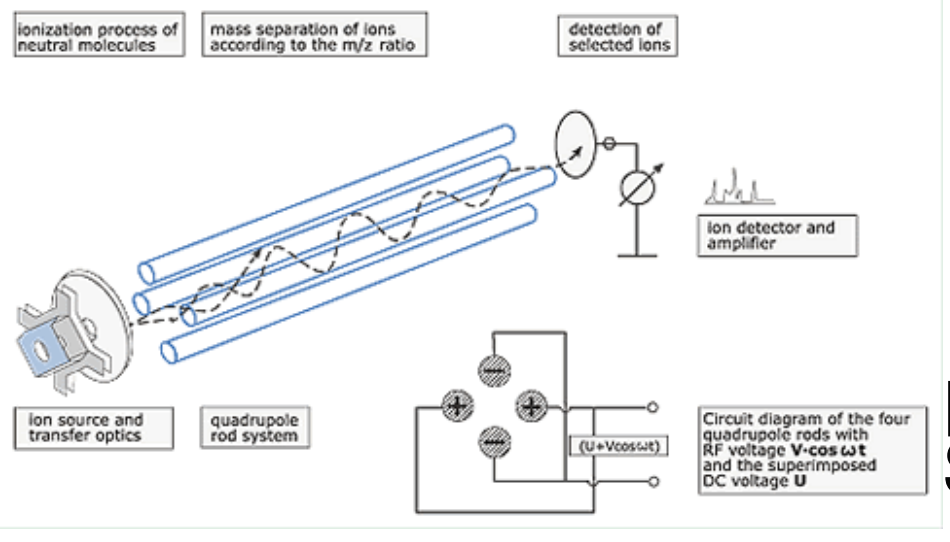
RI.
SE

Restgasanalysator, quadropole

Residual Gas Analyzer, RGA

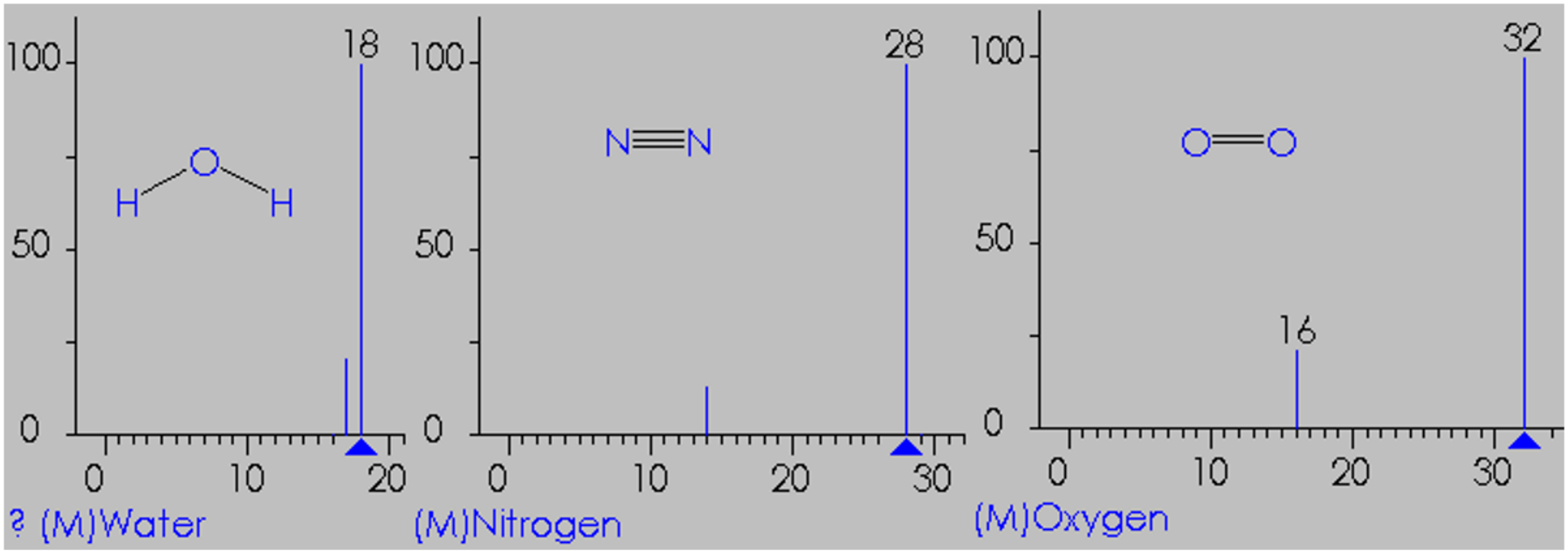
- Användbar i UHV- och HV-området
- Mäter både totaltryck och partialtryck
- Inte helt pålitlig, kan ha stor drift (~60%/3 months)
- För noggranna mätningar krävs referensgaser i direkt samband med mätningarna





RGA - quadropole

- En RGA ger intensitetnn för varje masstal, det vill säga för molekylmassan för respective component i gasen.
- Kan vara svårt att särskilja molekyler med olika sammansättning men samma masstal



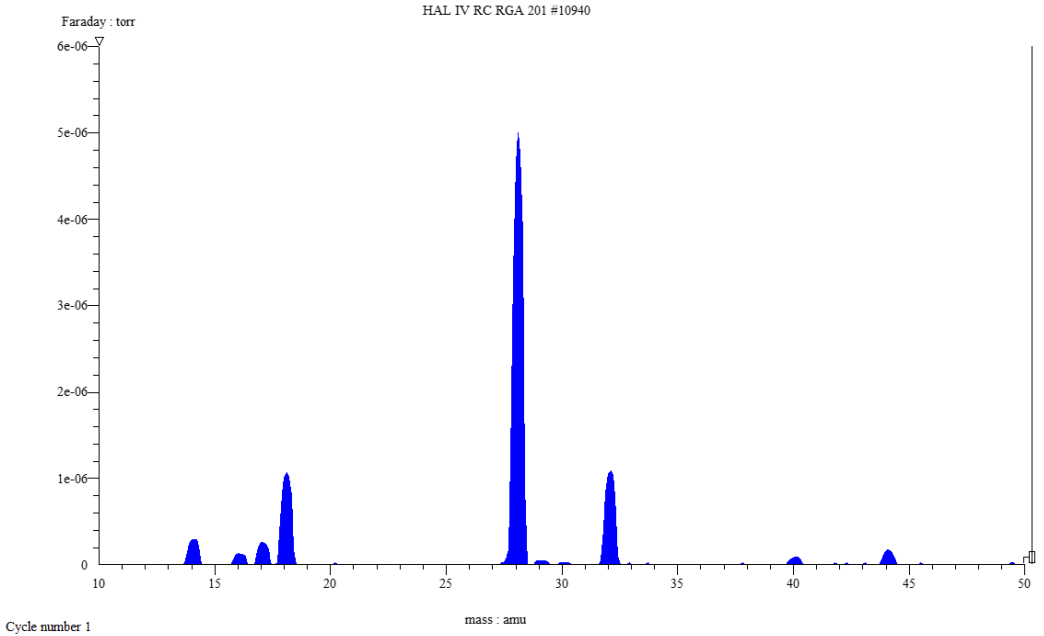
RGA – quadropole - exempel

- Kväve har masstalet 28, det sönderdelas i en kvävemolekyl och en kvävejon

  $(^{14}N_2)^+ \rightarrow {}^{14}N + {}^{14}N^+$, vilket ger en sekundärtopp vid m/e 14

- Koloxid har masstalet 28 men sönderdelas i en kolatom och en syrejon.

  $(^{12}C\,^{16}O)^+ \rightarrow {}^{12}C + {}^{16}O^+$, vilket ger två sekundärtoppar vid m/e 12 och m/e=16



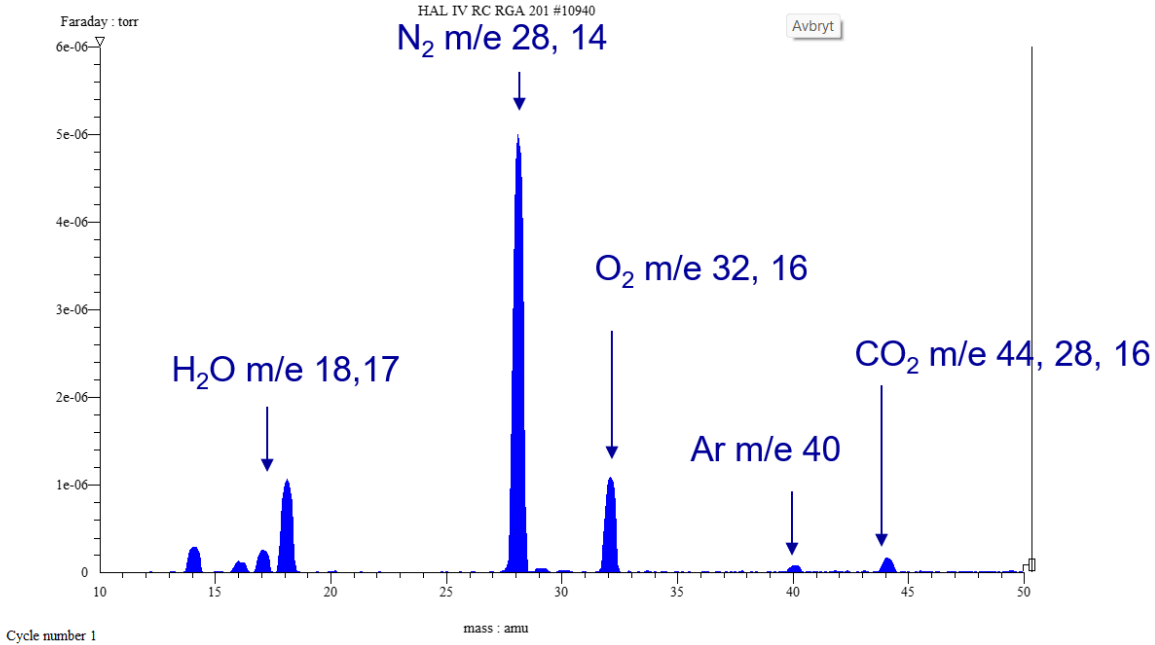
RGA – quadropole - exempel

- Kväve har masstalet 28, det sönderdelas i en kvävemolekyl och en kvävejon

  $(^{14}N_2)^+ \rightarrow {}^{14}N + {}^{14}N^+$, vilket ger en sekundärtopp vid m/e 14

- Koloxid har masstalet 28 men sönderdelas i en kolatom och en syrejon.

  $(^{12}C\,{}^{16}O)^+ \rightarrow {}^{12}C + {}^{16}O^+$, vilket ger två sekundärtoppar vid m/e 12 och m/e=16



Efterbehandling

Vikten av rena vakuumkomponenter

Ett exempel på varför det är viktigt att tvätta vakuumkomponenterna

Lite antaganden:

- Ett fingeravtryck väger cirka 1 mg
- Materialet (fettet) har en molmassa nära CO_2, 1.6 kg/m^3 vid 100 kPa och 0°C

I en volym på 10 liter ger detta ett tryck på cirka 6 Pa!



Bakning och tvättning

- Bakning för att “koka bort” föroreningar, t ex vatten
    - Genomförs vid temperaturer upp till 450 °C under längre tid (timmar – dagar).
    - Systemet måste pumpas under tiden för att få bort ämnena
- Tvättning för att lösa ut föroreningar
    - Lösningsmedel och skäljning
    - Ultraljudstvätt
- Ofta föreskrivet I detalj av kunden

- Chemical degreasing with detergent and ultrasonic
    - Formulation and operating parameters:
        - Detergent NGL 17.40 spec. ALU III: 10 g/l.
        - Temperature: 50°C.
        - Time: 30 – 60 minutes.
    - Rinsing with water

Ur “ESS VACUUM HANDBOOK PART 3”

Urgasning

- Gaser som “läcker” från material I vakuumsystem, t ex från plastmaterial
- Ska hållas på acceptabla nivåer
- Val av material och behandling kritiskt
- Mäts på liknande sätt som läckor (gasflöden)
- Urgasningsmätningar kräver ofta gasanalys för att bestämma komponenter.

		Maximum Steady State Outgassing rate $Pa.m^3.s^{-1}.m^{-2}$		
VQC+	**Outgas temperature °C**	**Hydrogen isotopes**	**Impurities**	**Testing Guidelines**
1	100‡	1×10^{-7}	1×10^{-9}	Appendix 17
2	20	$1 \times 10^{-7*}$		Appendix 17
3	20	1×10^{-8}		Appendix 17
4	20	1×10^{-7}		Published data and conformity to clean work plan.

For VQC 2, 3 and 4, the outgassing rate excludes the partial outgassing rates for water and hydrogen.

‡ The outgas test temperature can be reduced to 20 °C for components which normally operate at cryogenic temperatures.

+ For CFC refer to section 26.7

* In the case of resins for magnets it is considered that this target outgassing rate will be achievable. However, a factor of 10 increase will be permitted as an acceptance criterion.

Ur “ITER Vacuum Handbook”

Täthet och täthetskontroll

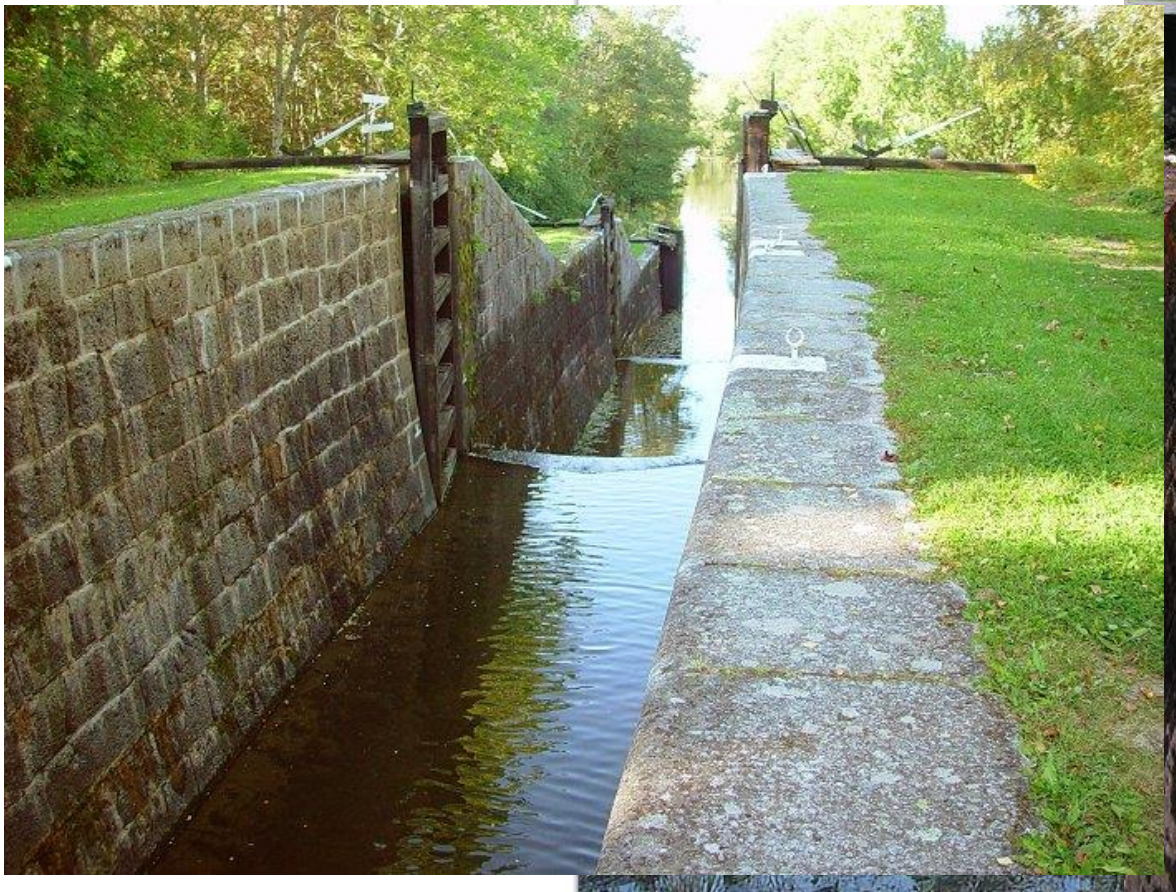
Inget är tätt

Täthet är ett relativt begrepp

- En hink är tät om inget vatten rinner ut
- En bilmotor läcker olja om det finns en oljefläck på garagegolvet
- Vätgas penetrerar syrafast stål

Inget är tätt

- Cong canal, Irland





Exempel Däcktryck

- Kravet på en lättmetallfälg är inte kopplad till fälgens livslängd.
- Istället är det en definierad tidsperiod på kanske 6 månader under vilken bilen ska kunna lagras utan att däcket förlorar formen.

Fälgen klarar en tryckminskning på 400 mbar på en lagringstid på 6 månader.

Om däckets volym är 20 liter blir flödet ungefär:

$$Q=3*10^{-5}Pa*m^3/s$$



Vad betyder “tät”?

	Läckkrav (Pa*m^3/s He)
• Vattentätt:	$<10^{-3}$
• Ångtätt:	$<10^{-4}$
• Bakterietätt:	$<10^{-5}$
• Oljetätt:	$<10^{-6}$
• Virustätt:	$<10^{-7} – 10^{-11}$
• Gastätt:	$<10^{-8}$
• “Absolut tätt”:	$<10^{-11}$

RI.
SE

Täthetskontroll, läcksökning och läckmätning

Täthetskontroll:

– Kontroll om ett system eller en komponent uppfyller givna krav på totalt läckage, godkänd eller underkänd.

Läcksökning:

- Uppsökning av läckan/läckorna. Geometrisk position på objektet.

Läckmätning:

- Uppmätning av läckaget genom respektive läcka, anges i gasmängd eller massa per tidsenhet.

RI.
SE

Olika flödestyper

- **Molekylärt flöde**: Gasen beter sig som partikelflöde. Vid vakuum där ”medelfria vägen” är större än läckans diameter.
- **Laminärt flöde**: Välordnat flöde utan ’strömvirvlar’. ”Flödet följer vägen”.
- **Turbolent flöde**: ”Oordnat” flöde. Mycket virvlar. Uppstår då det laminära flödet bryter samman.
- **Kritiskt flöde** (sonic flow): Uppstår vid mycket höga gashastigheter då denna närmar sig ljudhastigheten.

RI.
SE

Laminärt flöde

- Flödet går rakt fram.
- Flödesprofilen är parabolisk.
- Ofta förekommande i läckor.
- Flödet ökar med minskande viskositet.
- Flödet ökar **kvadratiskt** med tryckdifferensen.



$$Q = \frac{\Pi r^4}{16\eta l}(P_1^2 - P_2^2) = k\frac{(P_1^2 - P_2^2)}{\eta}$$

r: läckans radie

l: läckans längd

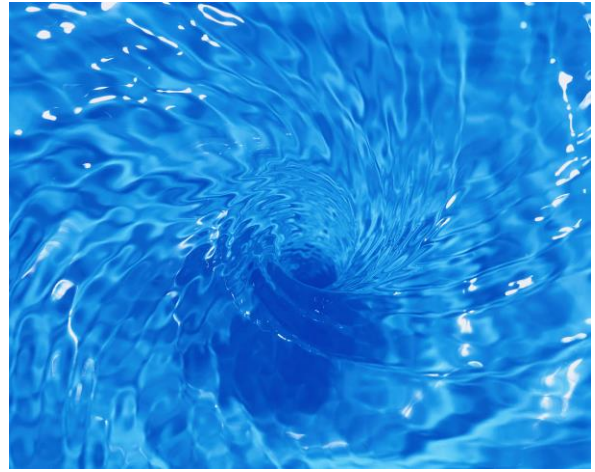
k: konstant för given läcka

η: gasens viskositet

RI.SE

Turbolent flöde

- Ostadigt flöde.
- Har en platt flödesprofil (tillplattad parabol).
- Förekommer endast vid stora läckor.
- Flödet beroende på väggarnas 'råhet'.
- Flödet ~proportionellt mot trycket.



$$Q = \Pi \sqrt{d^5} \sqrt{\frac{RT(P_1^2 - P_2^2)}{16 f M l}}$$

d: 'kanal-diameter'

l: 'kanal-längd'

f: 'friktionskoefficient' beroende på kanalens ytråhet

RI.
SE

Molekylärt flöde

•Partikelflöde.

•Uppträder då medelfria vägen är större än hålets diameter.

•Vanligtvis vid läckage i vakuumsystem eller vid tester då vakuum appliceras på endera sidan.

•Flödet är linjärt proportionellt mot tryckskillnaden.

$$Q = \sqrt{\frac{2\Pi RT}{M}} \frac{d^3}{6l} (P_1 - P_2)$$

d: 'kanal-diameter'
l: 'kanal-längd'
M: molmassa
T: absolut temperatur
P_i: tryck uppströms resp nedströms
R: gaskonstanten, 8,315

Olika metoder

Metod (under ideala förhållanden)	**Känslighet (Pa*m^3/s)**
Ultraljud	10^{-2}
Voluminös förflyttning	10^{-3}
Gasladdning	10^{-3}
Halogen	10^{-4}
Luftbubblor i vatten	10^{-4} - 10^{-5}
Såplösning	10^{-4} - 10^{-5}
Termisk konduktivitet	10^{-5}
Infrarött	$6*10^{-5}$ – $6*10^{-7}$
Vätebubblor i alkohol	$5*10^{-7}$
Radioaktiva isotoper	10^{-9} - 10^{-13}
Spårgas	**10^{-6}**
Tryckfall	**10^{-2}**

RI.
SE

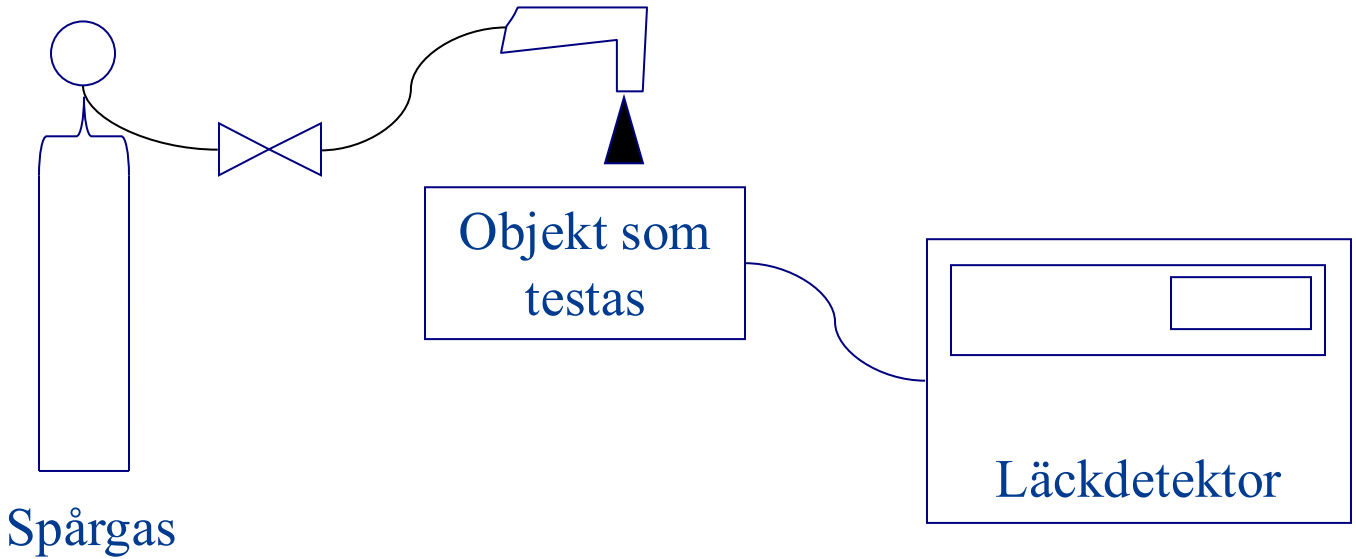
Spårgastestning

- Läcktest genom detektering av en gas som normalt inte finns i nämnvärda proportioner i atmosfären.
- Kan vara snabb, speciellt vid små objekt
- Kan även användas utan tryckskillnad (dock med långa cykeltider)
- Ger inga föroreningar av objektet
- Mycket hög känslighet

RI.
SE

Spårgastestning - Spraymetoden

- Objektet sprayas med spårgasen.
- Detektorn är ansluten till objektet.
- Om det finns några läckor i området där spårgasen sprayas kommer detektorn att ge utslag.

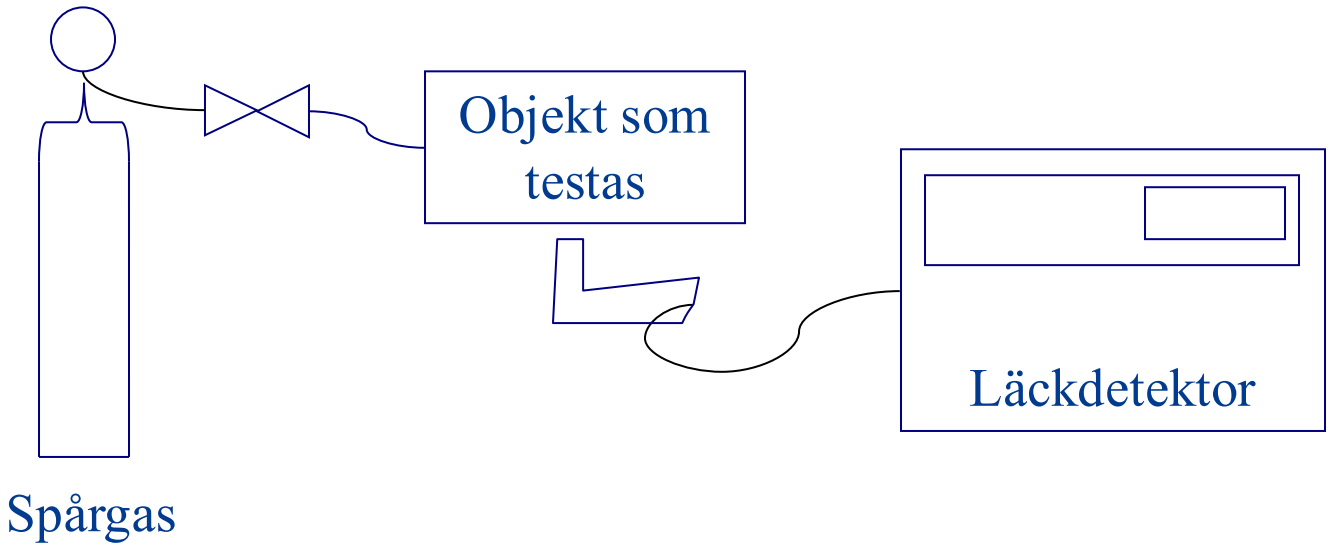


Spårgastestning - Spraymetoden

- Operatörsberoende
- Snabbt om man endast har ett fåtal misstänkta områden
- Svårt mäta läckage
- Tänk på att spårgasen oftast är lätt och stiger uppåt. Börja söka upptill om läckan ska lokaliseras
- Inga större fixturkostnader
- Svårt att automatisera

Spårgastestning - Sniffermetoden

- Objektet fylls med spårgasen.
- Detektorn är ansluten till snifferproben.
- Om det finns några läckor i området där proben hålls kommer detektorn att ge utslag.



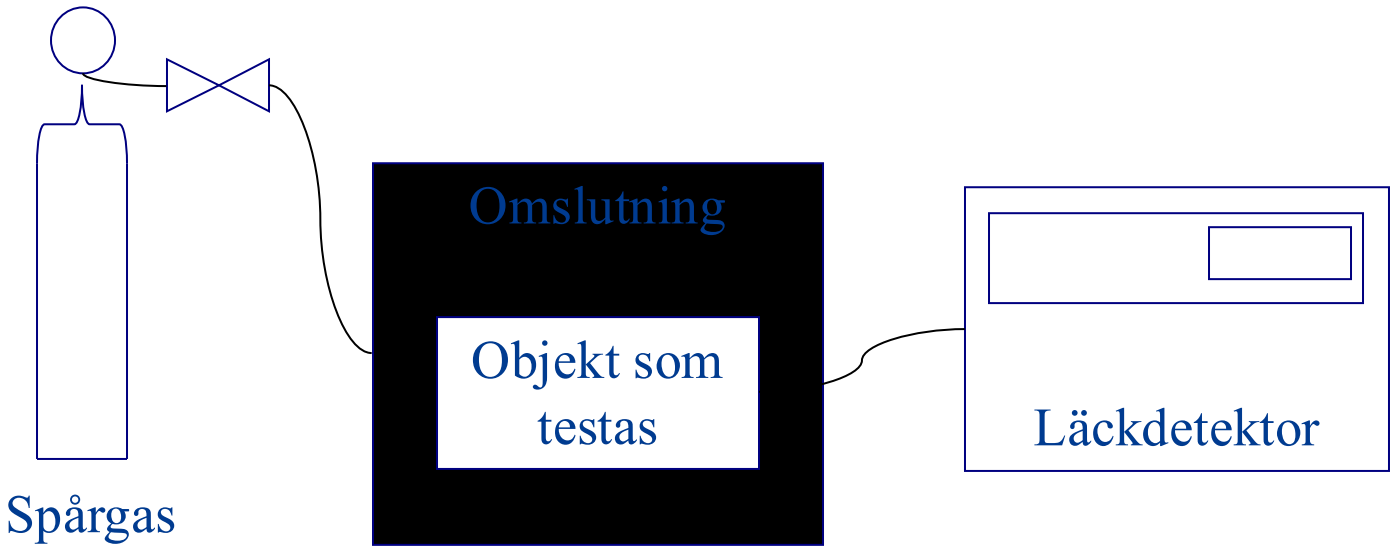
Spårgastestning - Sniffermetoden

- Operatörsberoende
- Snabbt om man endast har ett fåtal misstänkta områden
- Svårt mäta läckage
- Tänk på att spårgasen oftast är lätt och stiger uppåt. Börja mäta upptill om läckan ska lokaliseras
- Inga fixturkostnader
- Svårt att automatisera

RI.
SE

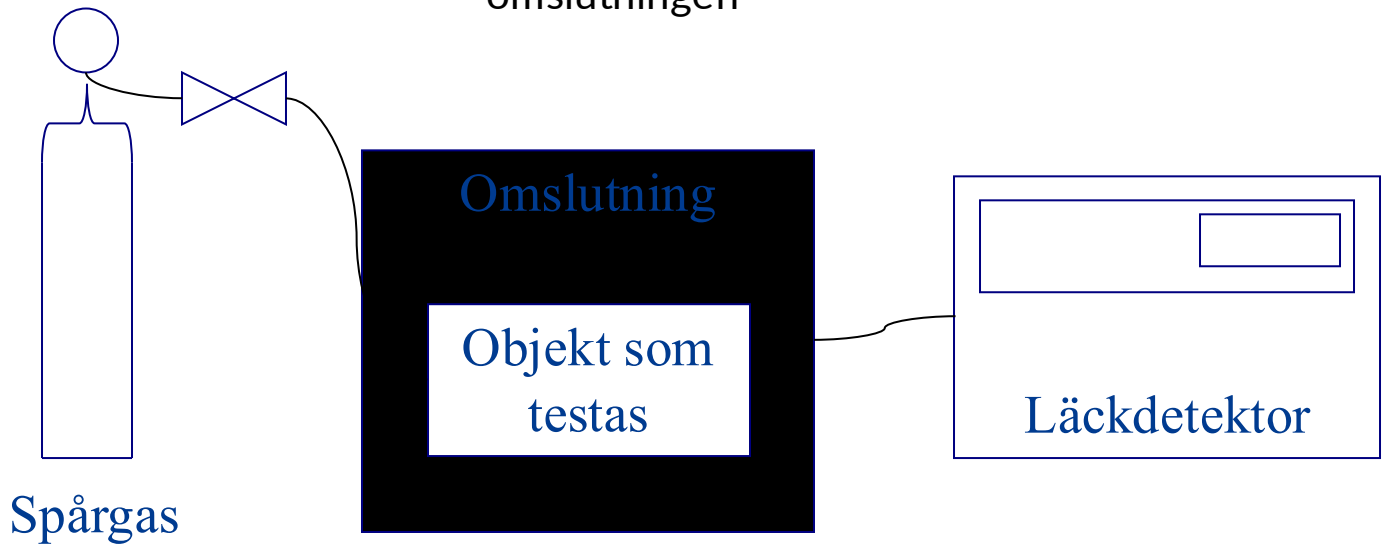
Automatisk täthetskonstroll med spårgas

- Genom att kontrollera miljön bättre kan testen förbättras avsevärt.
- Objektet placeras i en omslutning där spårgasen finns under högre tryck än trycket i objektet.
- Efter fastställd tid mäts koncentrationen i objektet.



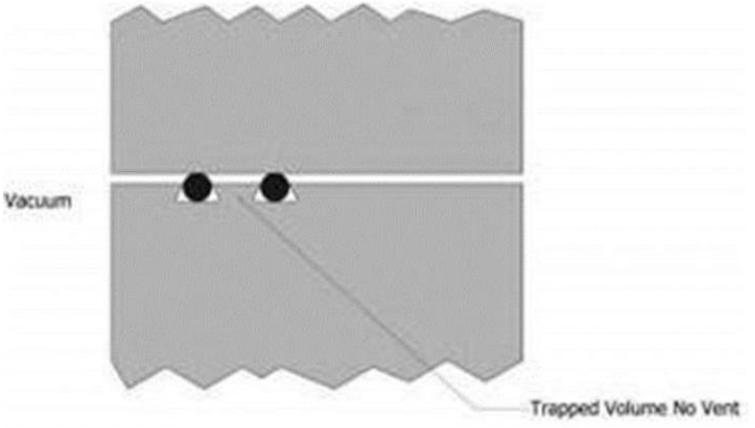
Automatisk täthetskonstroll med spårgas

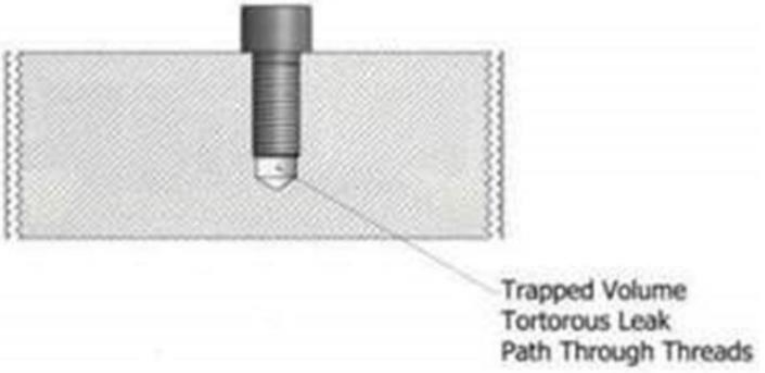
- Om objektet inte klarar att utsätts för externt tryck kan anslutningarna vändas så att objektet trycksätts och koncentrationen mäts i omslutningen

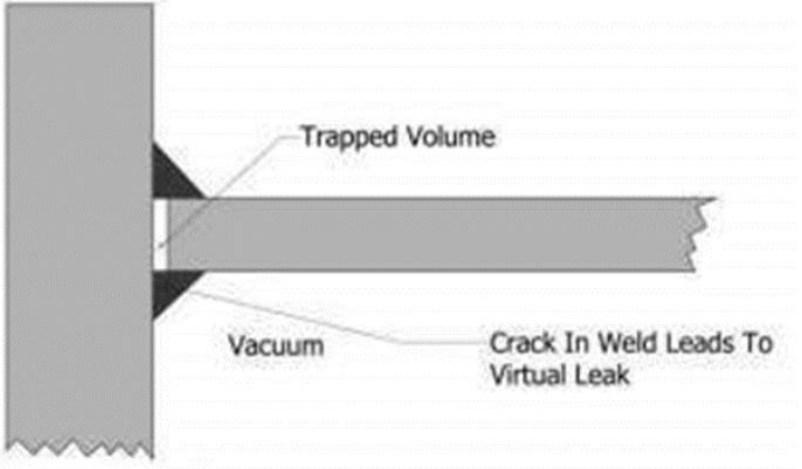


Virtuella läckor

- Fenomen som inte är verkliga läckor men som ställer till det!
- ”Gömda” volymer som läcker ut under begränsad tid.
- Kan undvikas genom smart design







Verkliga, virtuella läckor och urgasning

Verkliga läckor

- Konstanta över tid
- Gassammansättning beror på omgivning (exempelvis luft)

Virtuella läckor

- Avklingar över tid
- Gassammansättning från tillverkningen

Urgasning

- Relativt konstant över tid
- Specifik gassammansättning från material

RI.
SE

Val av metoder

- För måttliga läckkrav är flödesmätning eller tryckförändring lämpliga.
- För höga krav på täthet är spårgasmetoden lämplig.
- Vid val av spårgas måste processkrav vägas in.
- Tryckförändring och flödesmätning kan inte ensamt utföra läcksökning.
- Täthetskontroll kan automatiseras men läcksökning är ofta manuellt arbete.

RI.
SE

TACK!

Fredrik Arrhén

fredrik.arrhen@ri.se

0105-165 624

RISE Research Institutes of Sweden

SÄKERHET OCH TRANSPORT

MÄTTEKNIK

