

Cursus Vacuümtechniek

**Kenniscentrum Mechatronica
Eindhoven**

Naslagwerken Vacuümtechniek

- L.Wolterbeek Muller: Vacuümtechniek, beginselen en toepassingen, ISBN 90-2012203-7, Uitg.: Kluwer Technische Boeken b.v., Deventer;
- E.P.Th.Suurmeyer en J.Verhoeven: Vacuümtechniek, ISBN 90-9002806-4, Uitg.: Nederlandse Vacuüm Vereniging (NEVAC);
- J.Visser, serie artikelen in De Constructeur (oktober 1988 t/m januari 1991)
- M.Wutz, H.Adam, W.Walcher: Theorie und Praxis der Vakuumtechnik, ISBN 3-528-14884-5; uitg.: Verlag Fried. Vieweg & Sohn, Braunschweig/ Wiesbaden;
- Nigel Harris: Modern Vacuum Practice, ISBN 0-07-707099-2; Uitg.: McGraw-Hill Book Company.

Naslagwerken Vacuümtechniek

- John F. O'Hanlon: A User's Guide to Vacuum Technology; ISBN 0-471-81242-0; Uitg. John Wiley & Sons, New York.
- D.H.Holkeboer, D.W.Jones, F.Pagano, D.J.Santeler.: Vacuum Technology and Space Simulation, ISBN 1-56396-123-7; Uitg. American Institute of Physics, New York.
- A.Chambers, R.K.Fitch, B.S.Halliday: Basic Vacuum Technology, ISBN 0-85274-128-6; Uitg. Adam Hilger, Bristol en New York.

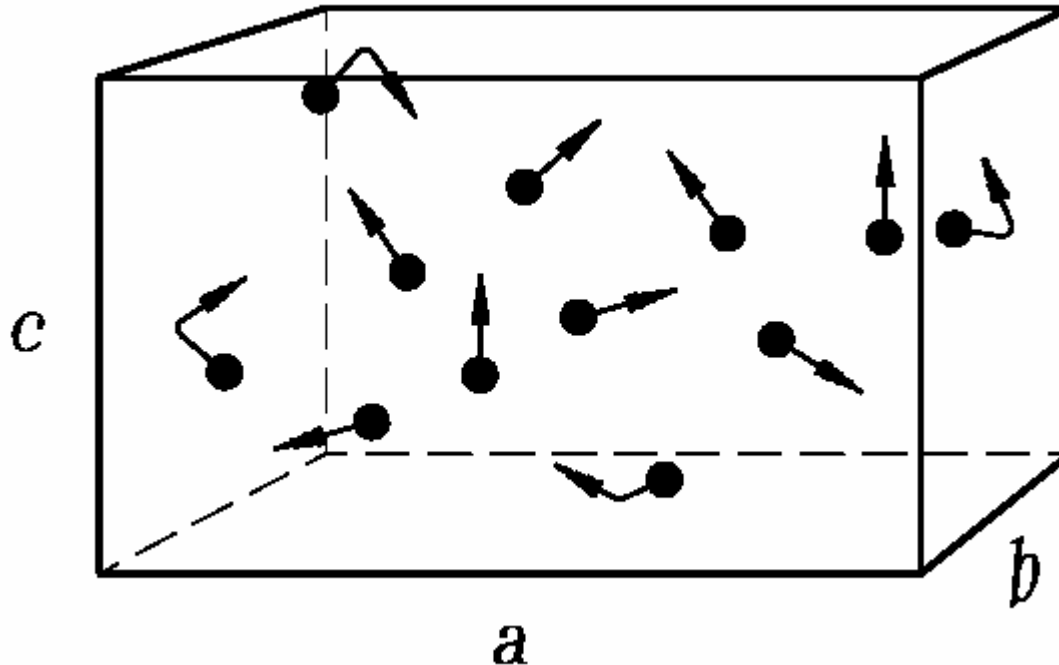
Waarom vacuum ?

- Sommige processen verdragen geen zuurstof of andere gassen
- Sommige oppervlakteprocessen moeten plaatsvinden op schone oppervlakken
- Bij sommige processen is er een zekere afstand tussen bron en substraat: daar tussenin mogen gassen geen rol spelen (hinderen)
- Een drukverschil veroorzaakt een kracht
- Vacuum is een goede warmte-isolator
- Om opgelost gas te verwijderen is een lagere dichtheid nodig, soms ontstaat ook een temperatuurdaling (vriesdrogen)

Basisbegrippen

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ Torr} \simeq 1 \text{ bar} = 1000 \text{ mbar} = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$$

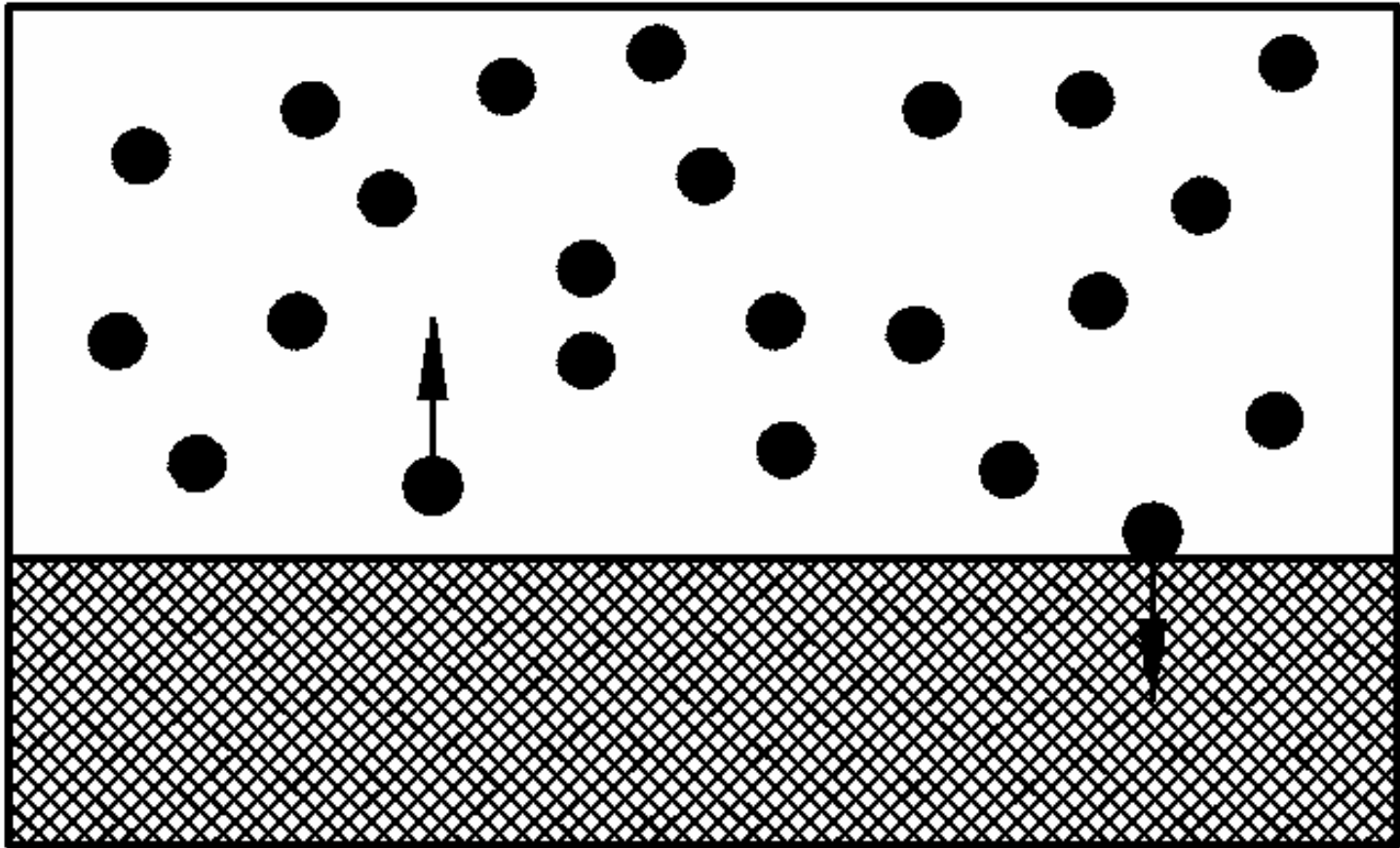
Schematisch voorstelling van de beweging van gasdeeltjes.



$$p = \frac{Nmv^2}{3V} \quad [\text{Pa}] \quad n = N/V \text{ de deeltjesdichtheid}$$

Basisbegrippen

Model van verdamping en condensatie.



Verdampingsnelheid

$$\frac{dN_v}{dt} = 2,63 \times 10^{24} \frac{s_c p_s}{\sqrt{MT}} \quad \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$$

Op schone vloeistof- en metaaloppervlakken is de condensatiekans voor de bijbehorende dampmoleculen doorgaans $s_c \simeq 1$ en wordt de verdampingsnelheid

$$\frac{dN_v}{dt} = 2,63 \times 10^{24} \frac{p_s}{\sqrt{MT}} \quad \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$$

$$\frac{dw_v}{dt} = 4,36 \times 10^{-3} p_s \sqrt{\frac{M}{T}} \quad \text{kg/m}^2 \text{s}$$

Water vormt hierop een uitzondering met $s_c \simeq 0,02$

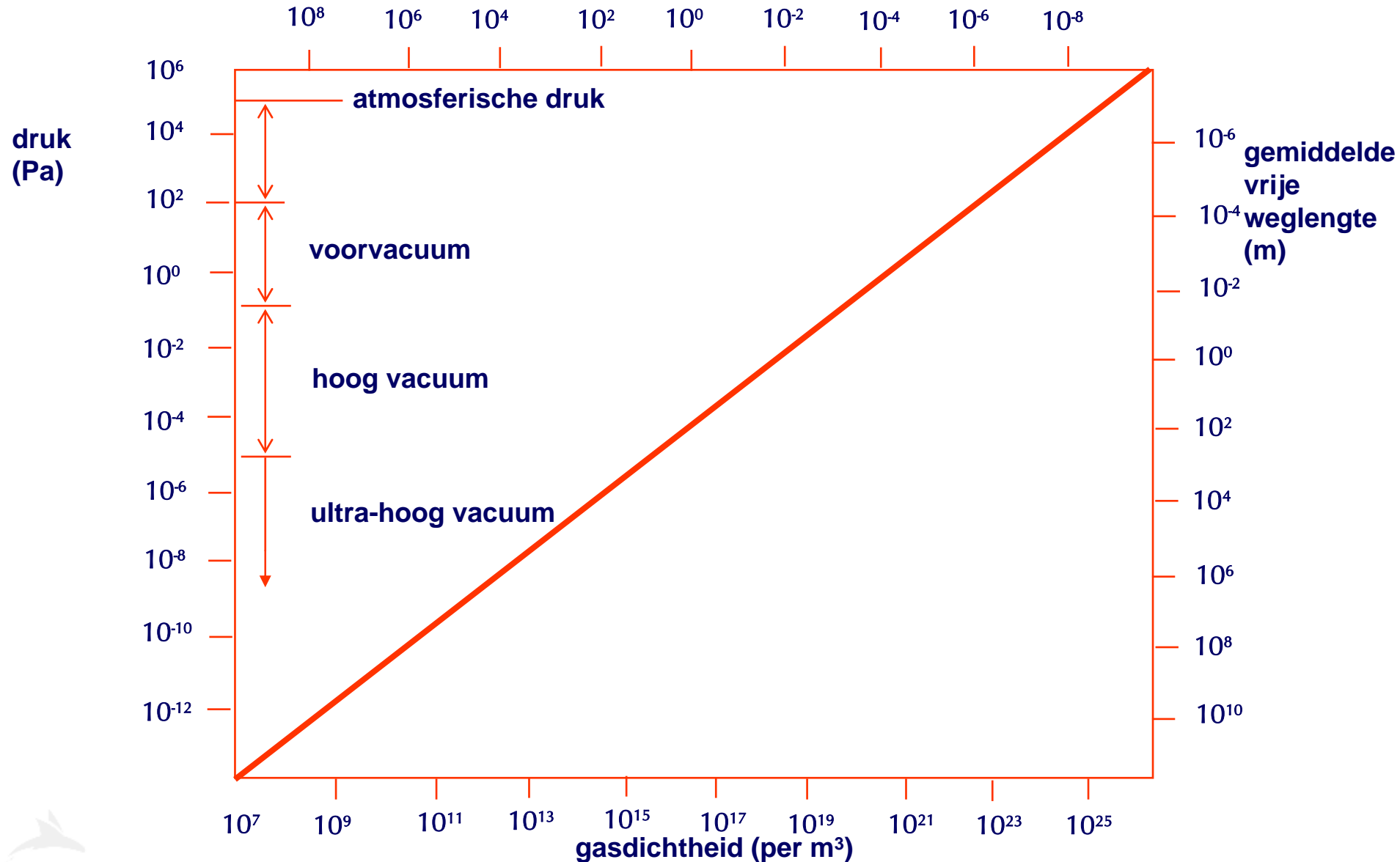
Bereken hoe lang het duurt voor een schoteltje water geheel verdampt is, en vergelijk dat met de werkelijke situatie

Verdampingssnelheid (vervolg)

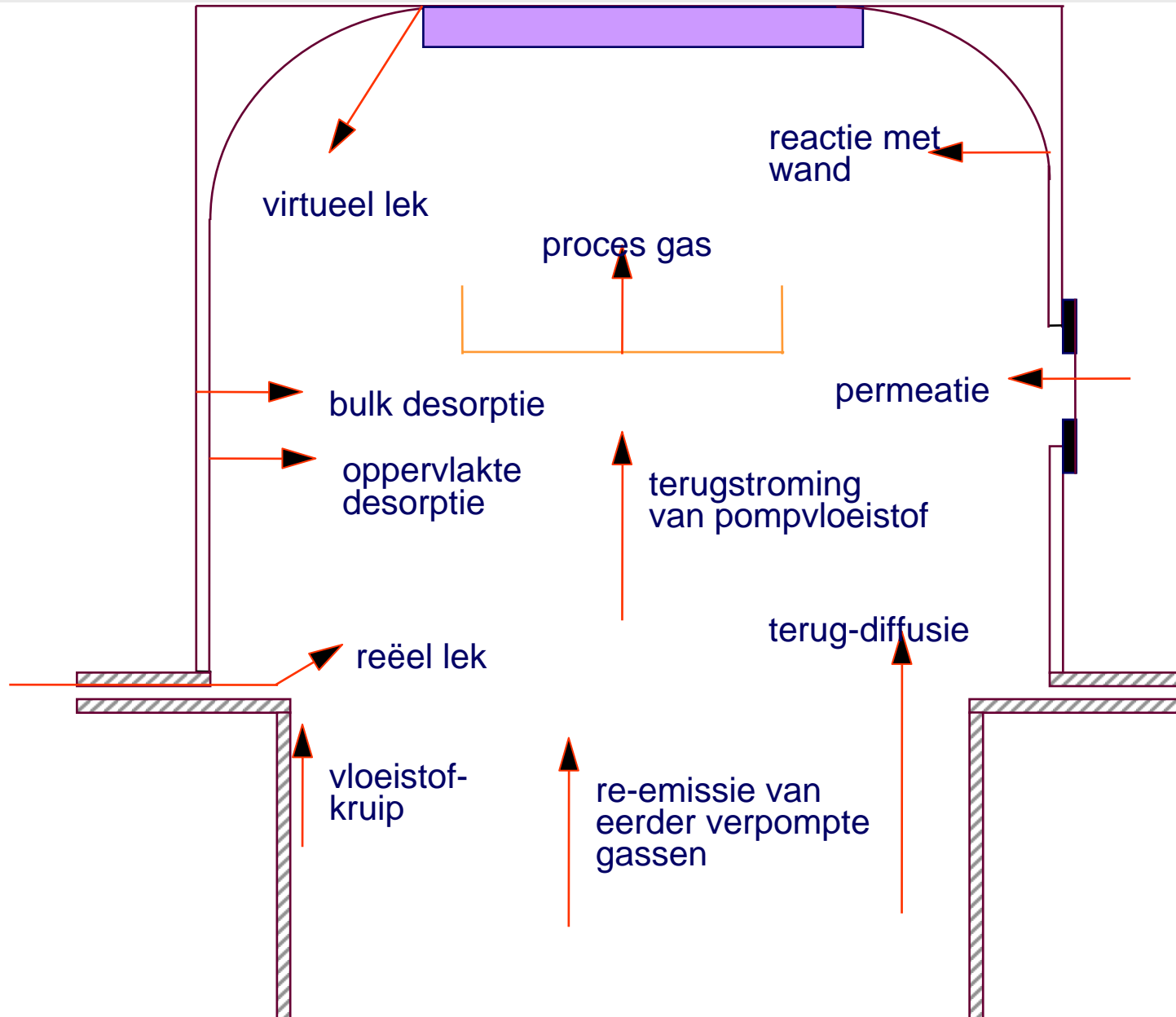
$$\frac{dw_v}{dt} = 4,36 \times 10^{-3} p_s \sqrt{\frac{M}{T}} \quad \text{kg/m}^2 \text{ s}$$

Overzicht Vacuümgebied

tijd voor een monolaag (s)

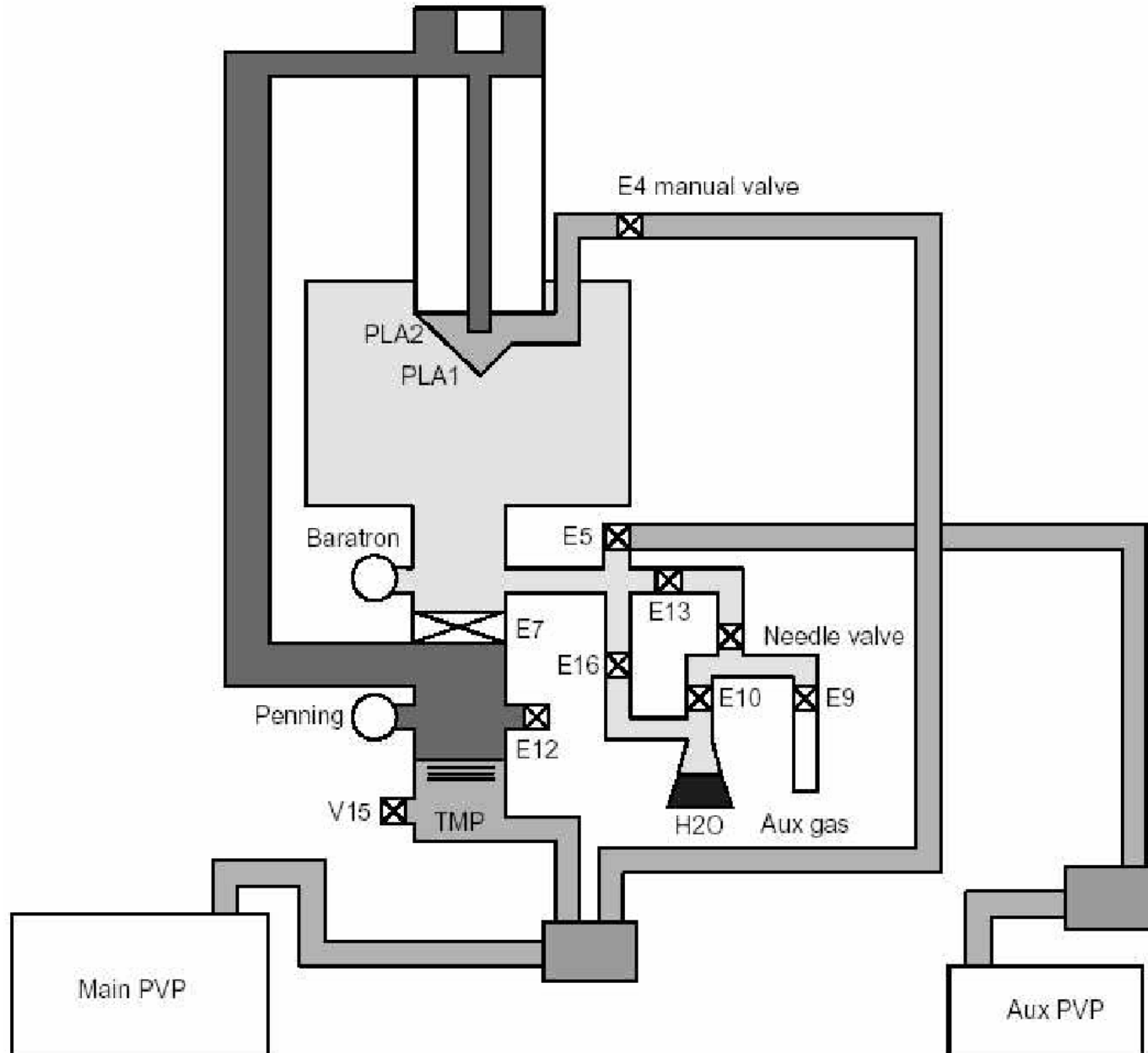


Vacuümsysteem (algemeen)



Vacuümsysteem Elektronenmicroscop

XL40 TMP vacuum configuration



Invloed van een wand

Vacuüm

Atmosfeer

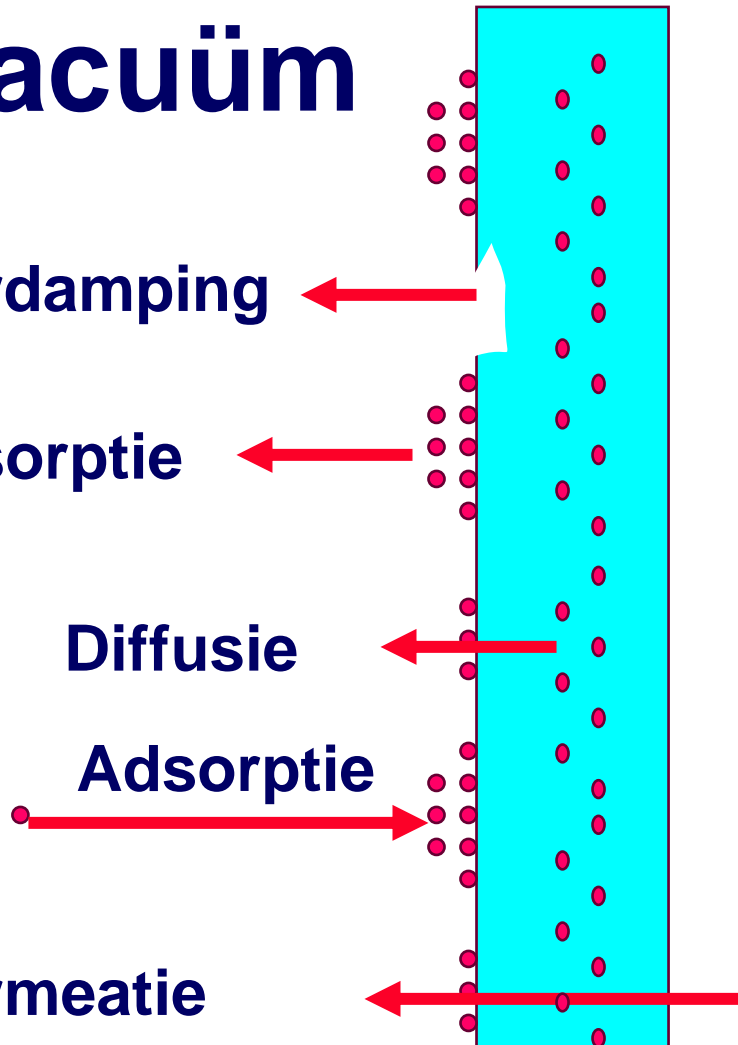
Verdamping

Desorptie

Diffusie

Adsorptie

Permeatie



Gaswetten

Wet van Boyle: voor een *afgesloten hoeveelheid* gas is bij constante temperatuur het *produkt van druk en volume constant*:

$$p \cdot V = \text{constant}$$

Wetten van Gay Lussac:
voor een afgesloten *hoeveelheid* gas geldt voor een *volumeverandering bij constante druk*:

$$\frac{V}{T} = \text{constant}$$

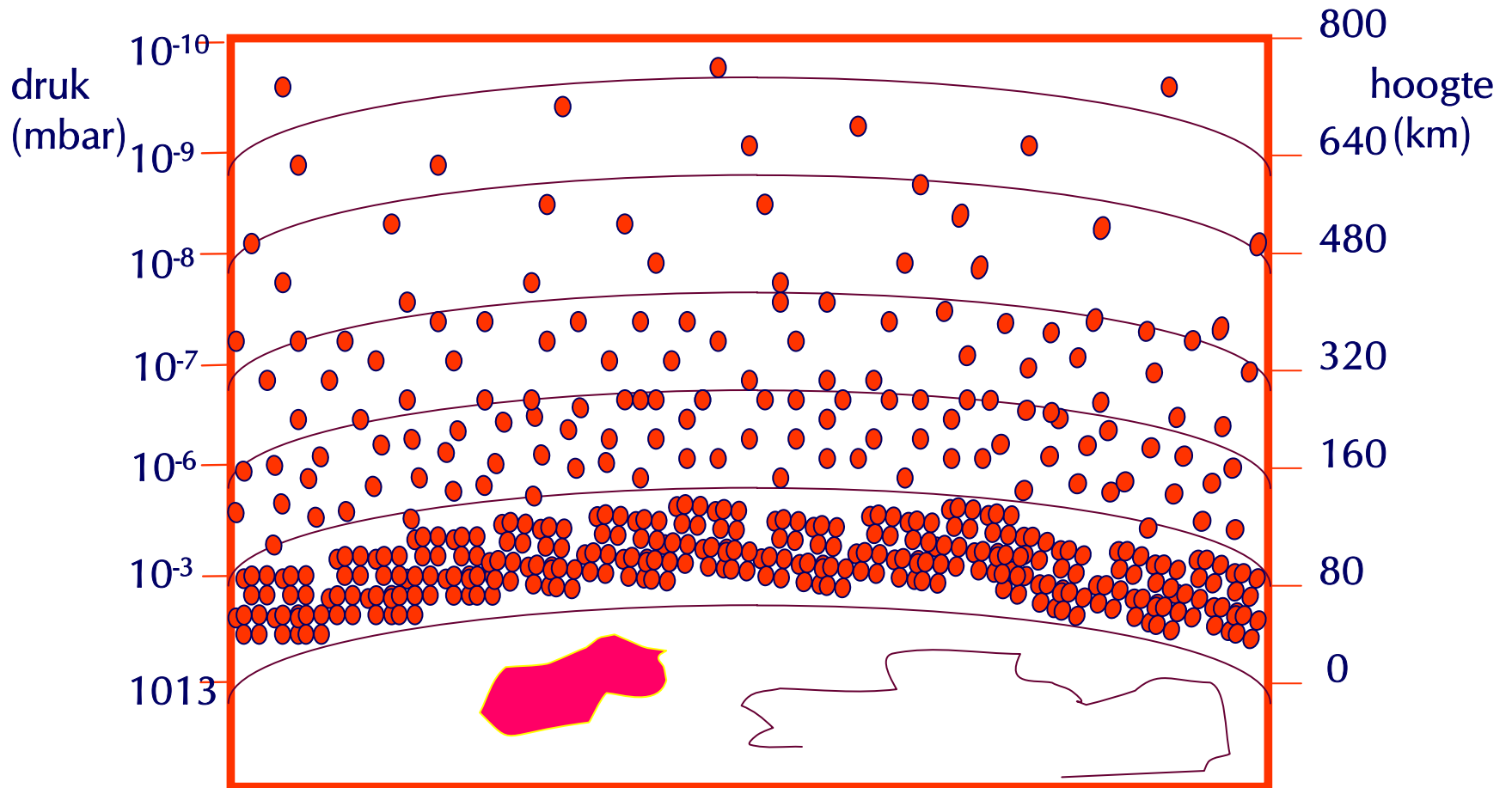
en voor een *drukverandering bij constant volume*:

$$\frac{p}{T} = \text{constant}$$

Gecombineerd levert dit de z.g *wet van Boyle - Gay Lussac* op:
Voor een *afgesloten hoeveelheid* gas geldt:

$$\frac{pV}{T} = \text{constant}$$

Deeltjesdichtheid



Getal van Avogadro

Voor ieder gas met dezelfde temperatuur en druk is het aantal moleculen per volume-eenheid gelijk

Massa van molecuul wordt uitgedrukt in *atomaire massa-eenheden*: $1 \text{ a.m.e.} \div 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

De massa M van een stikstofmolecuul is $28 \text{ a.m.e.} = 28 \times 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 4,5 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$

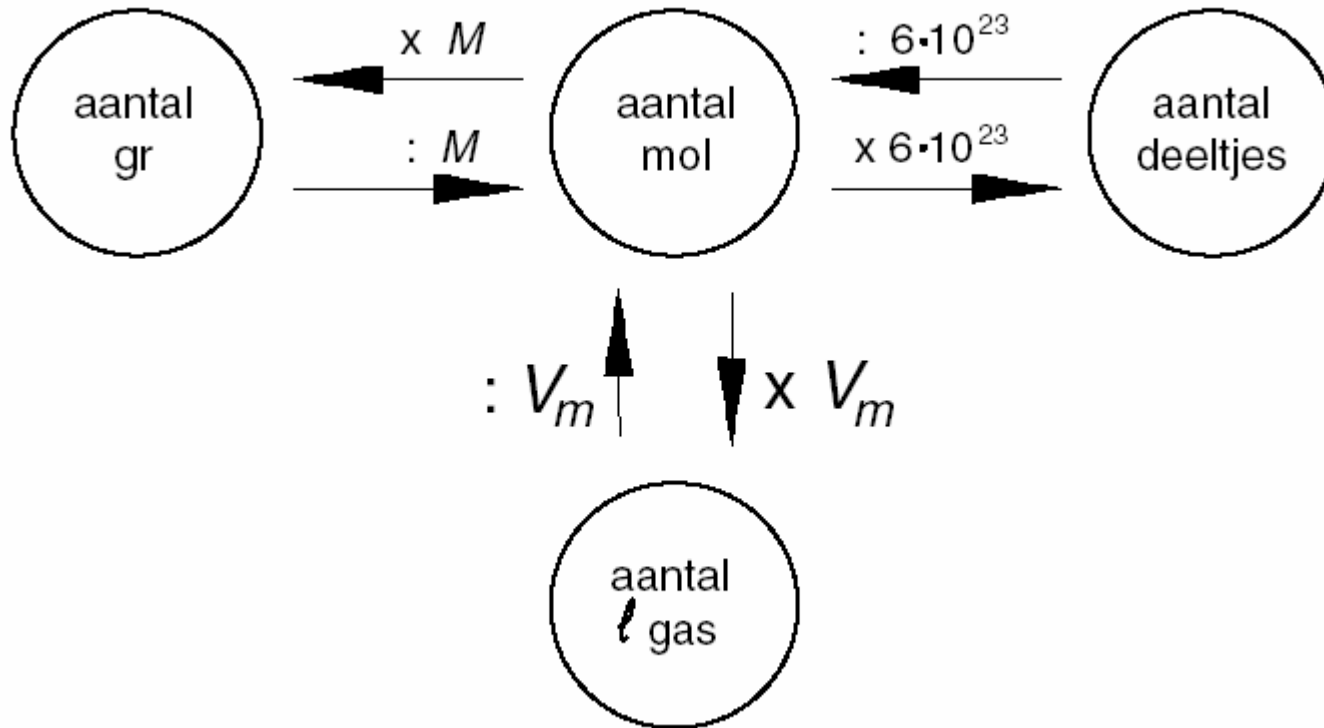
In 1 mol gas zitten $N_A = 6,0 \cdot 10^{23}$ moleculen.

Voor stikstof is 1 mol gelijk aan 28 gram en bij 1 atmosfeer en $20 \text{ }^\circ\text{C}$ is dat een volume van 24 dm^3 .

Algemene gaswet: $pV = n_m RT$

Met $n_m = N/N_A$ en R is de algemene gasconstante: $R = 8,3 \text{ J.K}^{-1}$

Belangrijke relaties



Schema van relatie tussen aantal gasdeeltjes, aantal mol, massa en volume.

M = massa gasdeeltjes in a.m.e., N_A = getal van Avogadro, V_m = mol-volume bij de heersende temperatuur.

Gassnelheid van gasdeeltjes

- Gasmoleculen hebben voor dagelijkse begrippen grote snelheden
- De molecuulsnelheid is niet voor elk molecuul gelijk:
- de snelheid hangt af van het soort molecuul:
 - ◆ lichte moleculen gaan sneller dan zware
 - ◆ de snelheid hangt van de temperatuur
 - ◆ bij hogere temperatuur hogere snelheid

Gassnelheid van gasdeeltjes

- Gasmoleculen hebben voor dagelijkse begrippen grote snelheden
- De molecuulsnelheid is niet voor elk molecuul gelijk:
- de snelheid hangt af van het soort molecuul:
 - ◆ lichte moleculen gaan sneller dan zware
 - ◆ de snelheid hangt van de temperatuur
 - ◆ bij hogere temperatuur hogere snelheid
- er is een snelheidsverdeling van een gas: de z.g. Maxwell-Boltzmannverdeling

- ◆ je kunt dan spreken over:

- ◆ de *gemiddelde snelheid*

- ◆ de *meest voorkomende snelheid*

- ◆ de *middelbare snelheid*

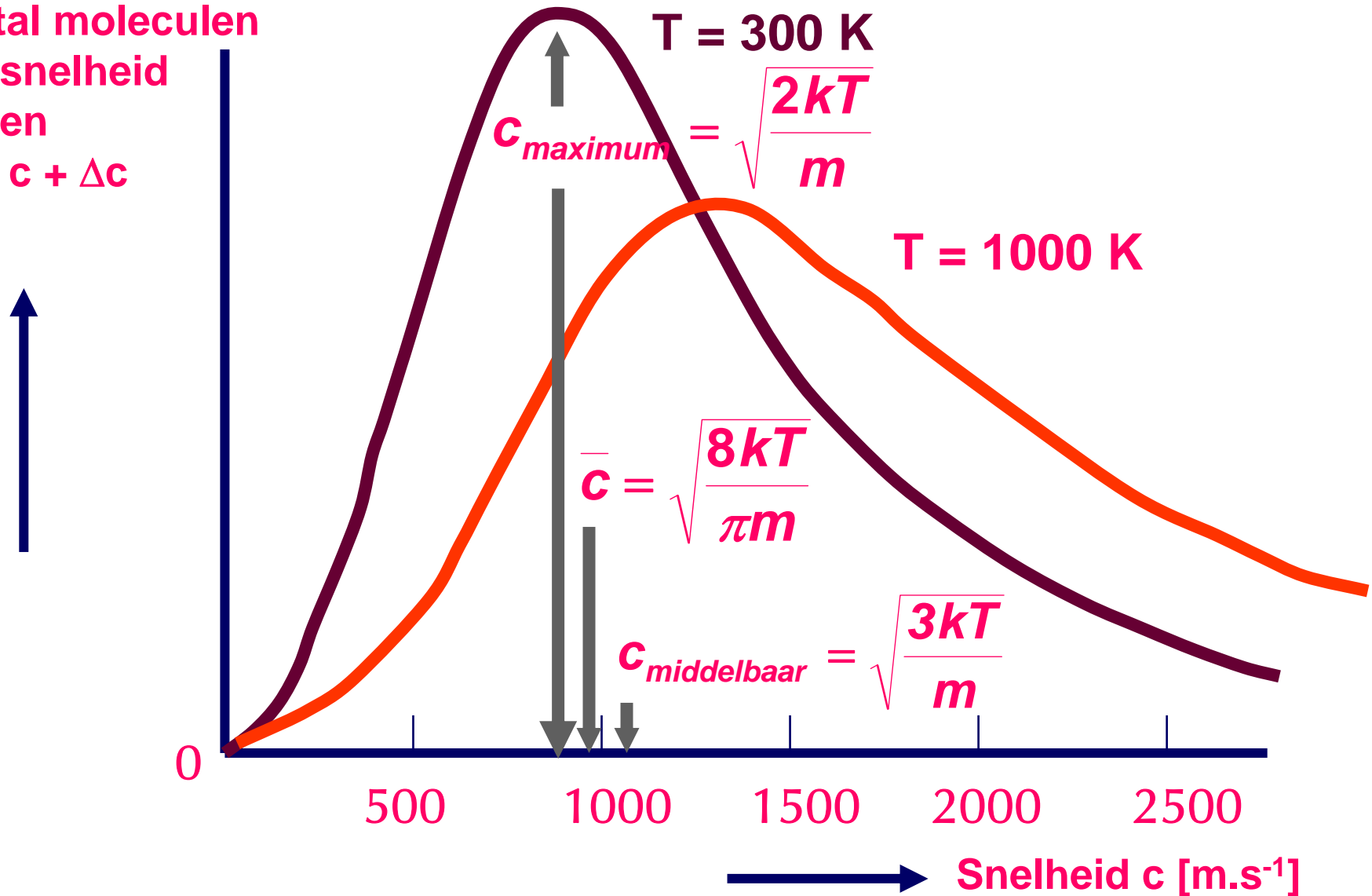
$$\bar{c} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$$

$$c_{\text{maximum}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

$$c^2 = \frac{3kT}{m} \Rightarrow c_{\text{middelbaar}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

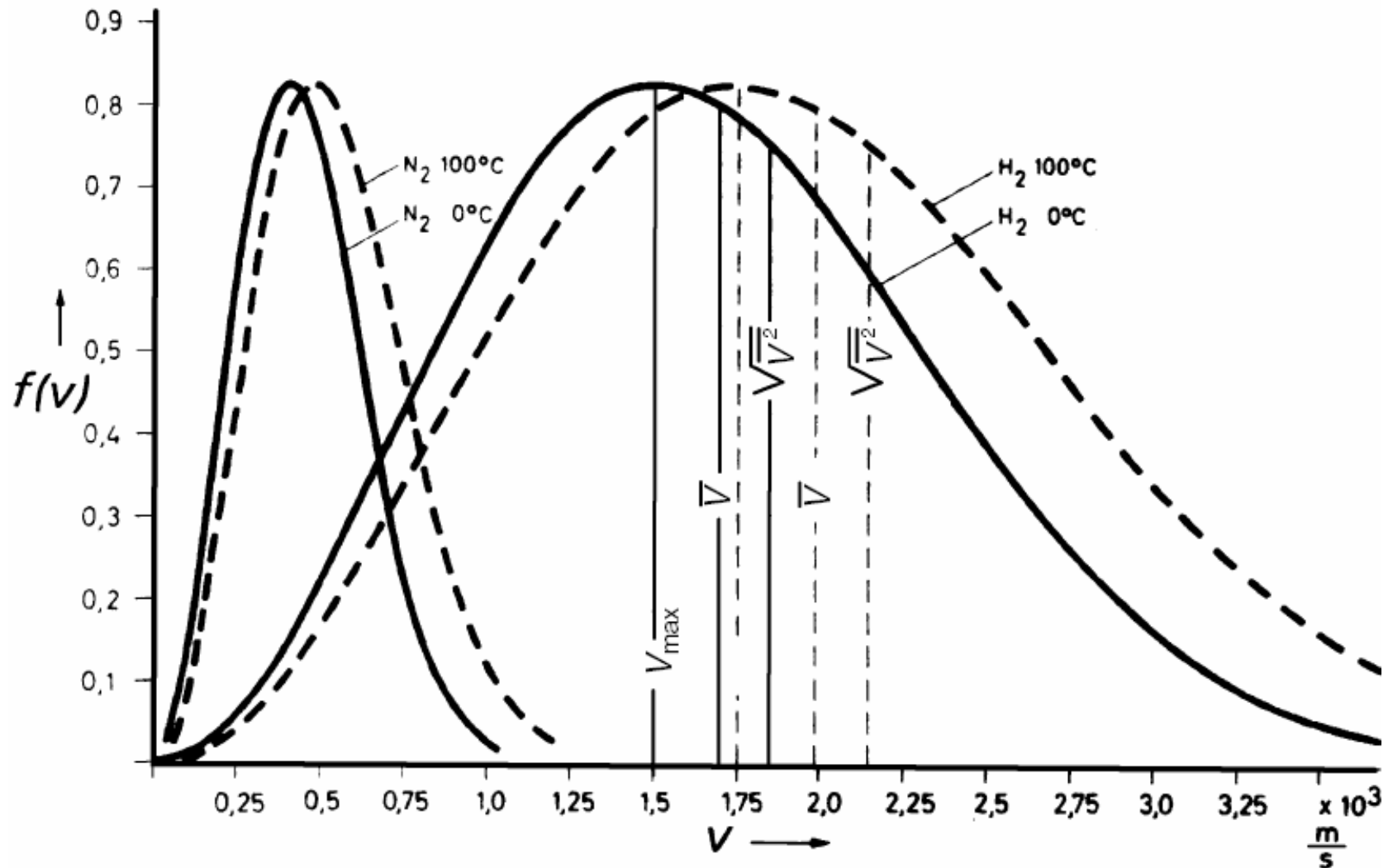
Snelheidsverdeling van Maxwell-Boltzmann

Aantal moleculen
met snelheid
tussen
 c en $c + \Delta c$



Snelheidsverdelingsfunctie van Maxwell

voor H_2 en N_2 bij twee verschillende temperaturen



Rekenvoorbeeld gassnelheid

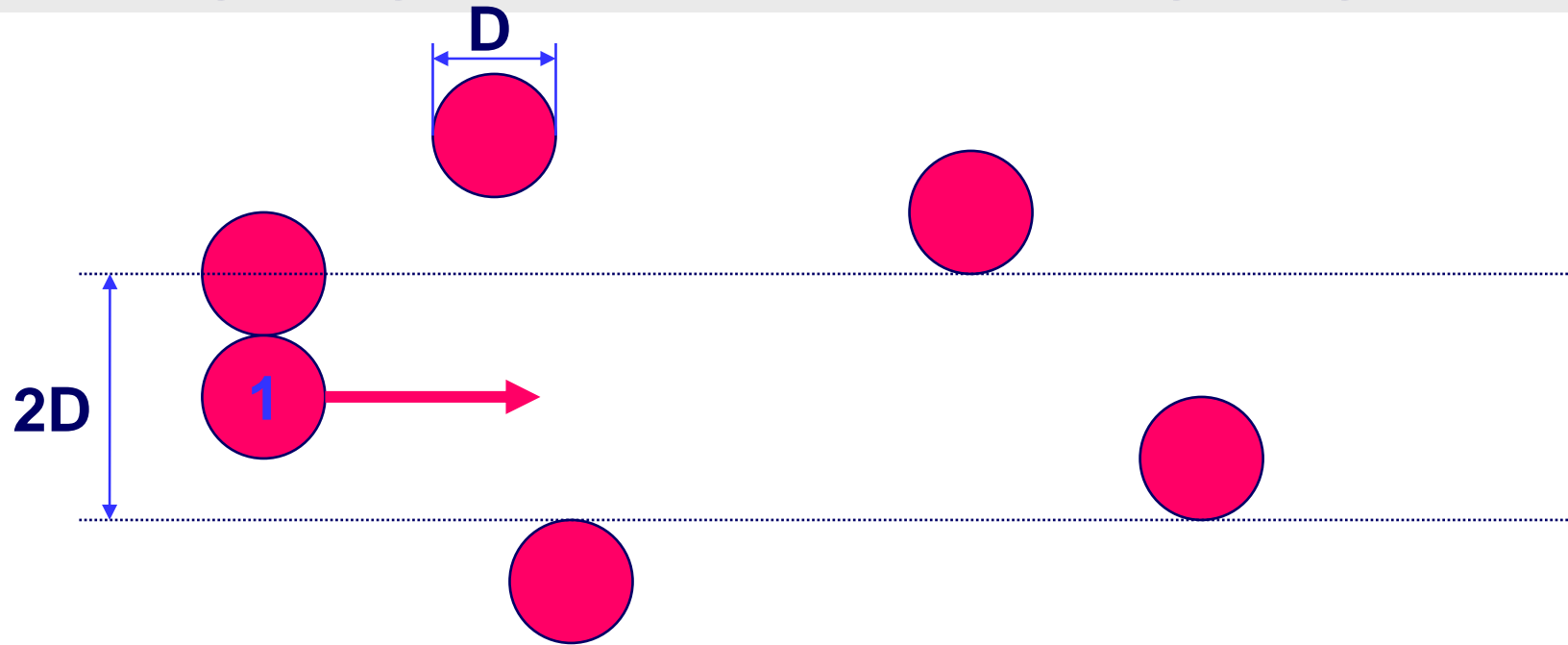
Bij kamertemperatuur (20 °C = 293 K) voor stikstof (N₂):

$$\overline{c_{N_2}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8 * 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{\pi \cdot 28 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}}} = 480 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

En voor waterstof (H₂):

$$\overline{c_{H_2}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8 * 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{\pi \cdot 2 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}}} = 1800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Begrip gemiddelde vrije weglengte λ



Omvatte botsingsvolume per seconde is:

$$\pi D^2 v$$

Er bevinden zich hierin: $n\pi D^2 v$ deeltjes

Dus: $n\pi D^2 v$ botsingen per seconde

$\lambda = (\text{afgelegde weg per seconde}) / (\text{aantal botsingen per seconde})$

$$\lambda = \frac{v}{n\pi D^2 v} = \frac{1}{n\pi D^2} \longrightarrow \lambda = \frac{kT}{p\pi D^2} \quad \lambda_{\text{lucht}} = \frac{6,7 \cdot 10^{-3}}{\rho[\text{Pa}]} [\text{m}]$$

Vrije weglengte

Voor de vrije weglengte (afstand waarover molecuul gemiddeld beweegt voordat het botst) in lucht bij kamertemperatuur geldt:

$$\lambda_{\text{lucht}} = \frac{6,7 \cdot 10^{-3}}{p} \text{ [m]} \text{ waarbij } p \text{ in Pa is uitgedrukt}$$

| Gassoort | λ in cm bij $p = 1$ Torr | λ in m bij $p = 1$ Pa |
|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| H ₂ (waterstof) | $9,0 \times 10^{-3}$ | $1,2 \times 10^{-2}$ |
| He (helium) | 14×10^{-3} | $1,8 \times 10^{-2}$ |
| Ar (argon) | $4,8 \times 10^{-3}$ | $6,4 \times 10^{-3}$ |
| H ₂ O (waterdamp) | $3,0 \times 10^{-3}$ | $4,0 \times 10^{-3}$ |
| N ₂ (stikstof) | $4,6 \times 10^{-3}$ | $6,1 \times 10^{-3}$ |
| O ₂ (zuurstof) | $4,9 \times 10^{-3}$ | $6,5 \times 10^{-3}$ |
| CO ₂ (kooldioxyde) | $3,0 \times 10^{-3}$ | $4,0 \times 10^{-3}$ |
| Hg (kwik) | $2,3 \times 10^{-3}$ | $3,1 \times 10^{-3}$ |
| lucht | $5,0 \times 10^{-3}$ | $6,7 \times 10^{-3}$ |

Pompsnelheid

Een (ideale) pomp sluit per tijdseenheid t een *bepaald volume* V van het te evacueren systeem af en verwijdert de daarin toevallig aanwezige deeltjes:

Pompsnelheid = S

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

Let op: dit zegt niets over de hoeveelheid verpompt gas !!

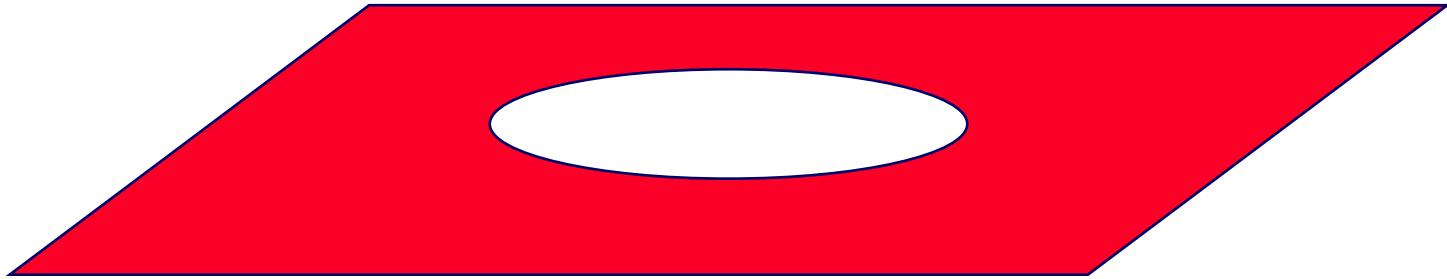
Uitgedrukt in $\left[\frac{m^3}{s} \right] = [m^3 \cdot s^{-1}]$

Hoeveelheid verpompt gas Q wordt gegeven door:

$$Q = p \cdot S$$

Uitgedrukt in: $\left[\frac{Pa \cdot m^3}{s} \right] = [Pa \cdot m^3 \cdot s^{-1}]$

Pompsnelheid S



$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{4} \bar{n} \bar{c} \cdot A$$
$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{n} \cdot \frac{dN}{dt} = \frac{1}{4} \bar{c} \cdot A \equiv S$$

Verband gasstroom Q en pompsnelheid S:

$$Q = p * S$$

Transportverschijnselen

- Goed begrip van de **kinetische gastheorie** is essentieel voor het verkrijgen van inzicht in de vacuümfysica en -techniek.
- Belangrijk zijn de **eigenschappen** van een gas onder **niet-evenwichtsomstandigheden**, te weten
 - ◆ het transport van impuls (**viscositeit**),
 - ◆ energie (**warmtegeleiding**)
 - ◆ Massa (**diffusie**).
- Het blijkt dat de geldende wetten voor het transport van deze drie grootheden **veel gelijkenis** met elkaar vertonen.
- Transport van een **fysische eigenschap**, die de gasdeeltjes met zich meedragen, kan slechts plaatsvinden dankzij hun **thermisch beweging**.

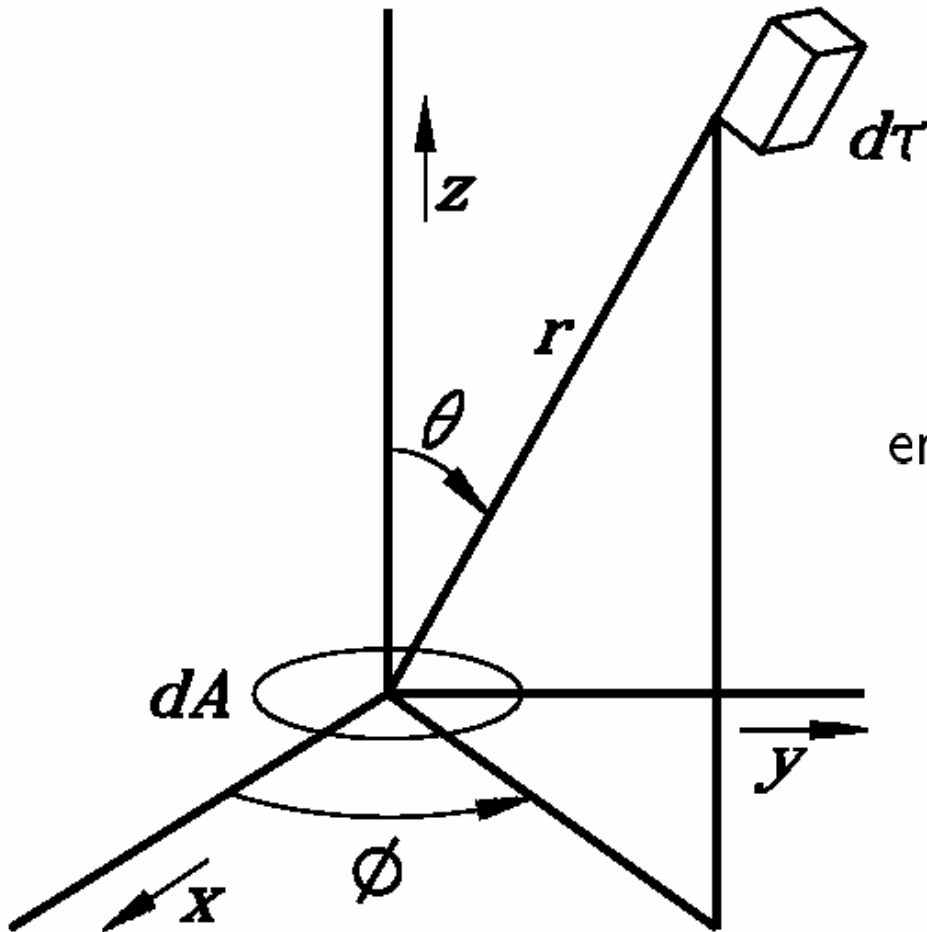
Transportverschijnselen

- Het transportgedrag van een gas blijkt **afhankelijk** van de grootte van de **gemiddelde vrije weglengte** λ in verhouding tot de **karakteristieke afmeting** d van het systeemonderdeel waarin of waardoor het transport plaatsvindt
- Deze verhouding staat bekend onder de naam **kengetal van Knudsen**:

$$Kn = \frac{\lambda}{d}$$

- $Kn \ll 1$) we spreken van '**hoge**' druk; het gas wordt '**dicht**' genoemd en gedraagt zich als een **continu medium**; gasstroming onder deze omstandigheden heet '**viskeus**'.
- $Kn \gg 1$) we spreken van '**lage**' druk; het gas wordt '**verdund**' genoemd en gedraagt zich als een **systeem van losse moleculen zonder interactie**; gasstroming bij lage druk noemen we '**(vrij) moleculair**'

Transportverschijnselen bij hoge druk



$$\Gamma_G = -\frac{1}{3}n\bar{v}\lambda\frac{dG}{dz}$$

en dus algemeen voor $G = G(x, y, z)$

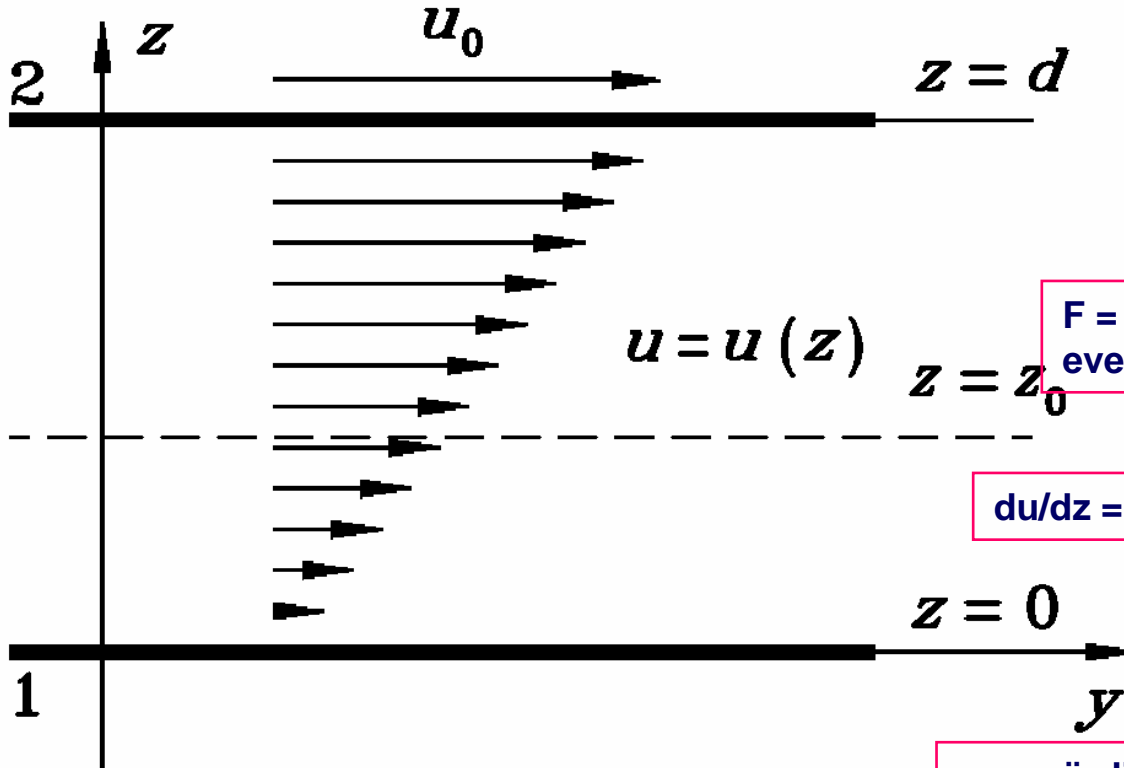
$$\Gamma_G = -\frac{1}{3}n\bar{v}\lambda\nabla G(x, y, z)$$

met:
$$\nabla = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{y}} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{z}}$$

G is een fysische grootheid (energie, impuls, massa)
het bijbehorende transport van G noemen we Γ_G

Transportverschijnselen: Viscositeit

■ Hoge druk ($Kn \ll 1$)



η = viscositeitscoëfficiënt

$$F = \eta \frac{du}{dz}$$

F = schuifkracht per eenheid van oppervlak evenwijdig aan de stromingsrichting

du/dz = ter plaatse heersende snelheidsgradiënt

z = coördinaat loodrecht op stromingsrichting

$$\eta = \frac{1}{3}nm\bar{v}\lambda = \frac{1}{3}\rho\bar{v}\lambda \quad [\text{Ns/m}^2]$$

Nauwkeuriger: $\eta \simeq \frac{1}{2}\rho\bar{v}\lambda$

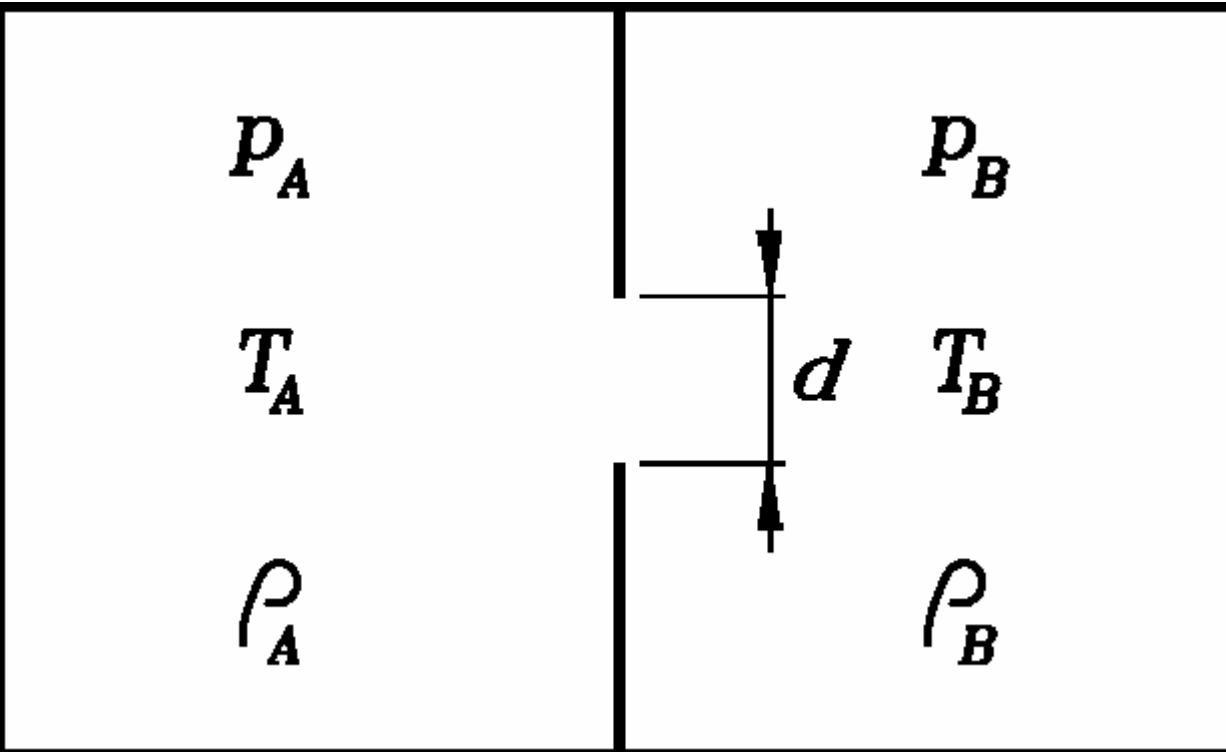
Viscositeit

- Lage druk ($Kn \gg 1$)

moleculaire viscositeitscoëfficiënt:

$$\eta_m = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} p \quad [\text{Ns/m}^3]$$

Thermomoleculaire gasverplaatsing



$\lambda \ll d$: drukken
aan weerszijden
opening gelijk:

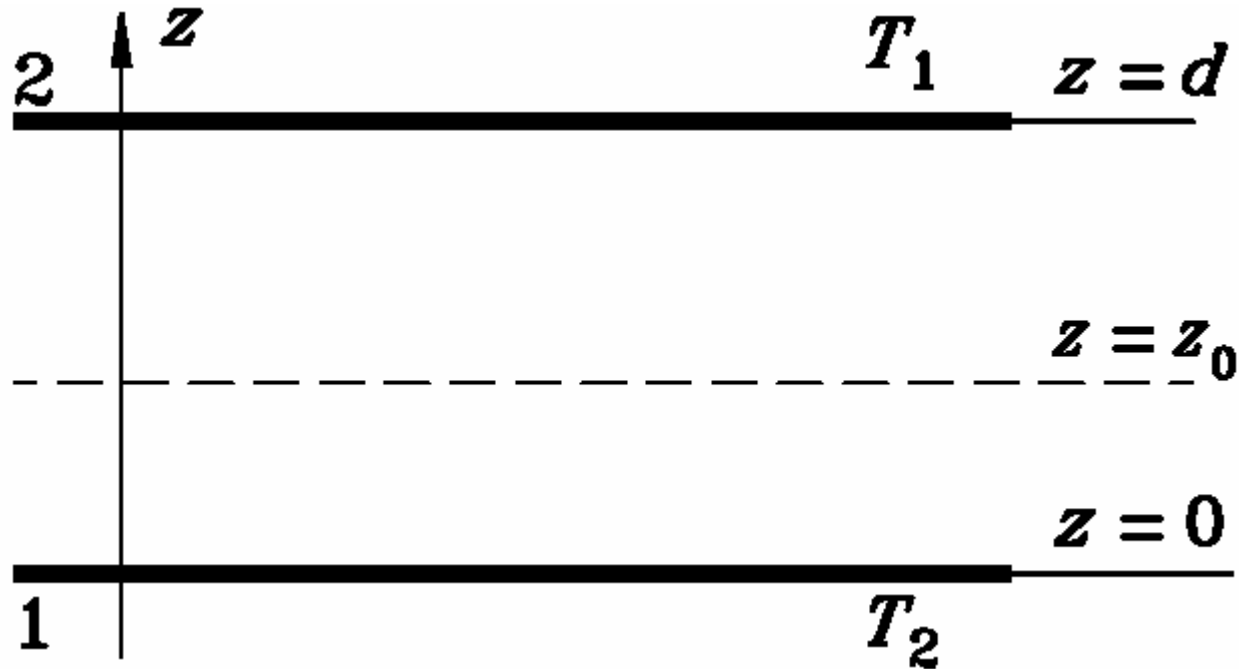
$$\frac{\rho_A}{\rho_B} = \frac{T_A}{T_B}$$

$\lambda \gg d$: deeltjesstroom naar links en rechts door
opening gelijk:

$$\frac{1}{4}n_A\bar{v}_A = \frac{1}{4}n_B\bar{v}_B \quad \longrightarrow \quad \frac{p_A}{p_B} = \sqrt{\frac{T_A}{T_B}}$$

Warmtegeleiding bij hoge druk

- Hoge druk ($Kn \ll 1$)



$$\Lambda = \frac{1}{3} c_V n m \bar{v} \lambda = \frac{1}{3} c_V \rho \bar{v} \lambda \quad [\text{W/mK}]$$

Afwijkingen t.g.v. correlatie en transportsnelheid !!

Warmtegeleiding bij hoge druk

Tabel 1.2 Warmtegeleidingscoëfficiënt Λ en viscositeitscoëfficiënt η van enige gassen bij 0 °C ($Kn \ll 1$)

| Gassoort | $10^2 \Lambda$ [W/mK] | $10^6 \eta$ [N s/m ²] | $10^{-3} c_V$ [J/kg K] | ϵ_{exp} | ϵ_{th} |
|------------------|-----------------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| He | 14,4 | 18,6 | 3,12 | 2,48 | 2,5 |
| Ne | 4,65 | 29,7 | 0,628 | 2,49 | 2,5 |
| Ar | 1,60 | 21,0 | 0,312 | 2,44 | 2,5 |
| Kr | 0,88 | 23,7 | 0,148 | 2,51 | 2,5 |
| H ₂ | 1,73 | 8,35 | 10,2 | 2,03 | 1,9 |
| CO | 2,25 | 16,6 | 0,745 | 1,82 | 1,9 |
| lucht | 2,41 | 17,1 | 0,716 | 1,97 | 1,9 |
| O ₂ | 2,44 | 18,9 | 0,657 | 1,96 | 1,9 |
| CO ₂ | 1,44 | 13,9 | 0,641 | 1,61 | 1,75 |
| N ₂ O | 1,51 | 13,7 | 0,649 | 1,70 | 1,75 |

Warmtegeleiding bij lage druk

■ $Kn \gg 1$

$$\Lambda_m = \frac{1}{2} \frac{\kappa + 1}{\kappa - 1} \sqrt{\frac{k}{2\pi \cdot 273}} \frac{1}{\sqrt{m}} \quad [\text{W/m}^2 \text{ K Pa}]$$

Tabel 1.3 Moleculaire warmtegeleidingscoëfficiënt Λ_m van enige gassen

| Gassoort | κ | $10\Lambda_m$ [W/m ² K Pa] | Gassoort | κ | $10\Lambda_m$ [W/m ² K Pa] |
|----------|----------|---------------------------------------|------------------|----------|---------------------------------------|
| He | 1,67 | 22,1 | H ₂ | 1,4 | 45,7 |
| Ne | 1,67 | 9,8 | N ₂ | 1,4 | 12,5 |
| Ar | 1,67 | 7,0 | O ₂ | 1,4 | 11,7 |
| Hg | 1,67 | 3,1 | H ₂ O | 1,3 | 19,9 |
| | | | CO ₂ | 1,3 | 12,8 |

! Ga na dat bij constante κ geldt, dat Λ_m redelijk goed evenredig is met $m^{-1/2}$

Accommodatiecoëfficiënten

$$q_z = \frac{\alpha}{2 - \alpha} \Lambda_m p_0 (T_2 - T_1)$$

Tabel 1.4 Energie-accomodatietoëfficiënt α van enige gassen op verschillende oppervlakken

| Gassoort | W 'normaal' | Pt schoon gepolijst | Pt 'normaal' | Pt licht gezwart | Pt zwaar gezwart |
|-----------------|----------------|---------------------------|-----------------|------------------------|------------------------|
| He | | 0,03 | 0,38 | | |
| Ne | | | 0,74 | | |
| Ar | 0,85 | 0,55 | 0,86 | | |
| Kr | | | 0,84 | | |
| Xe | | | 0,86 | | |
| H ₂ | 0,20 | 0,15 | 0,29 | 0,56 | 0,71 |
| N ₂ | 0,57 | | 0,77 | | |
| CO | | | 0,77 | | |
| O ₂ | | 0,42 | 0,79 | 0,93 | 0,96 |
| CO ₂ | | | 0,78 | 0,95 | 0,98 |
| Hg | 0,95 | | | | |

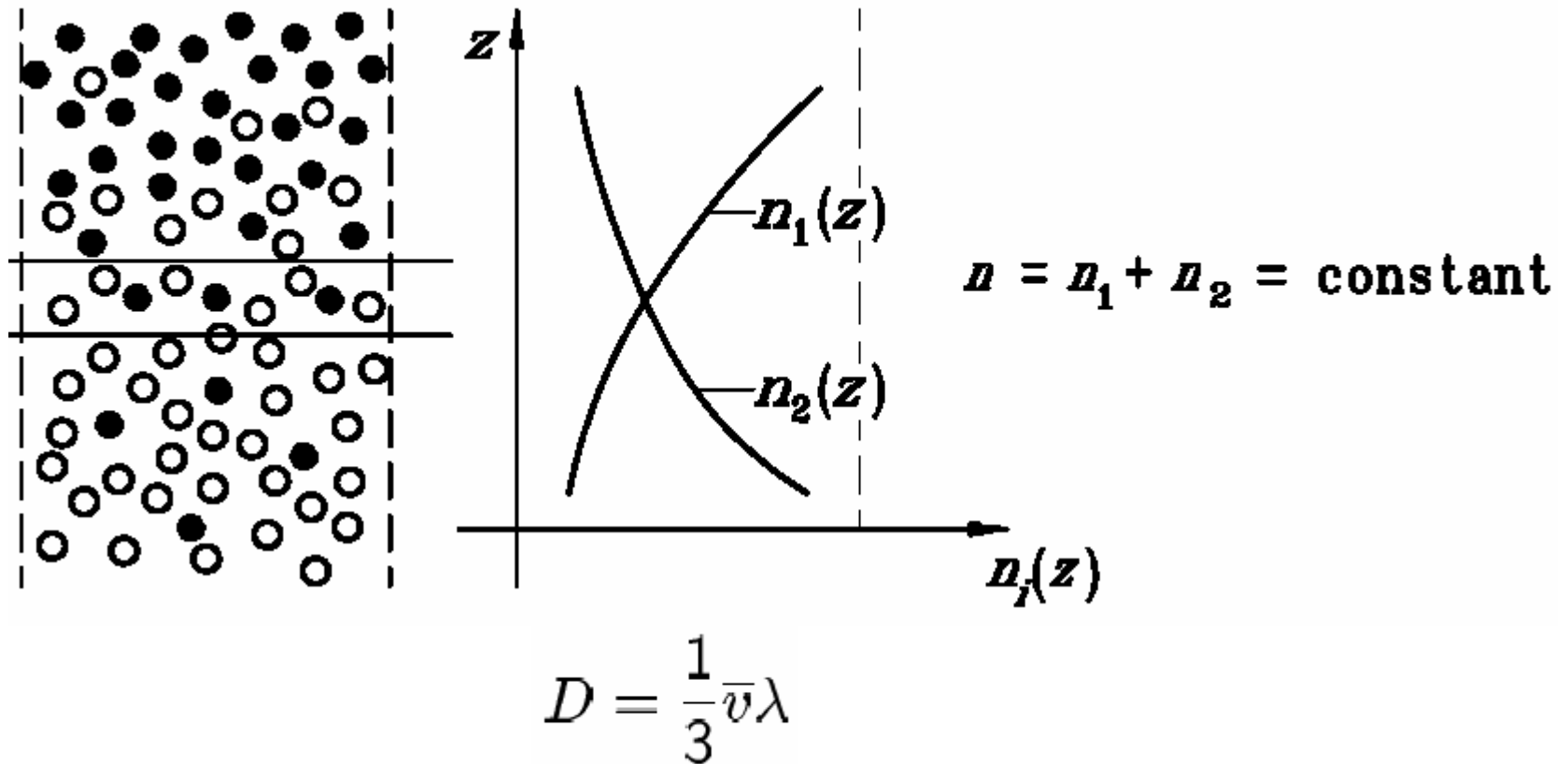
Diffusievergelijkingen van Fick

- 1e diffusievergelijking van Fick: $\mathbf{j}_d = -D\nabla n(x, y, z)$
- 2e diffusievergelijking van Fick: $\frac{\partial n}{\partial t} = D\Delta n$

Met hulp van continuïteitsvergelijking: $\text{div}\mathbf{j}_d + \frac{\partial n}{\partial t} = 0$

Waarbij: $\Delta = \text{Laplace-operator} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

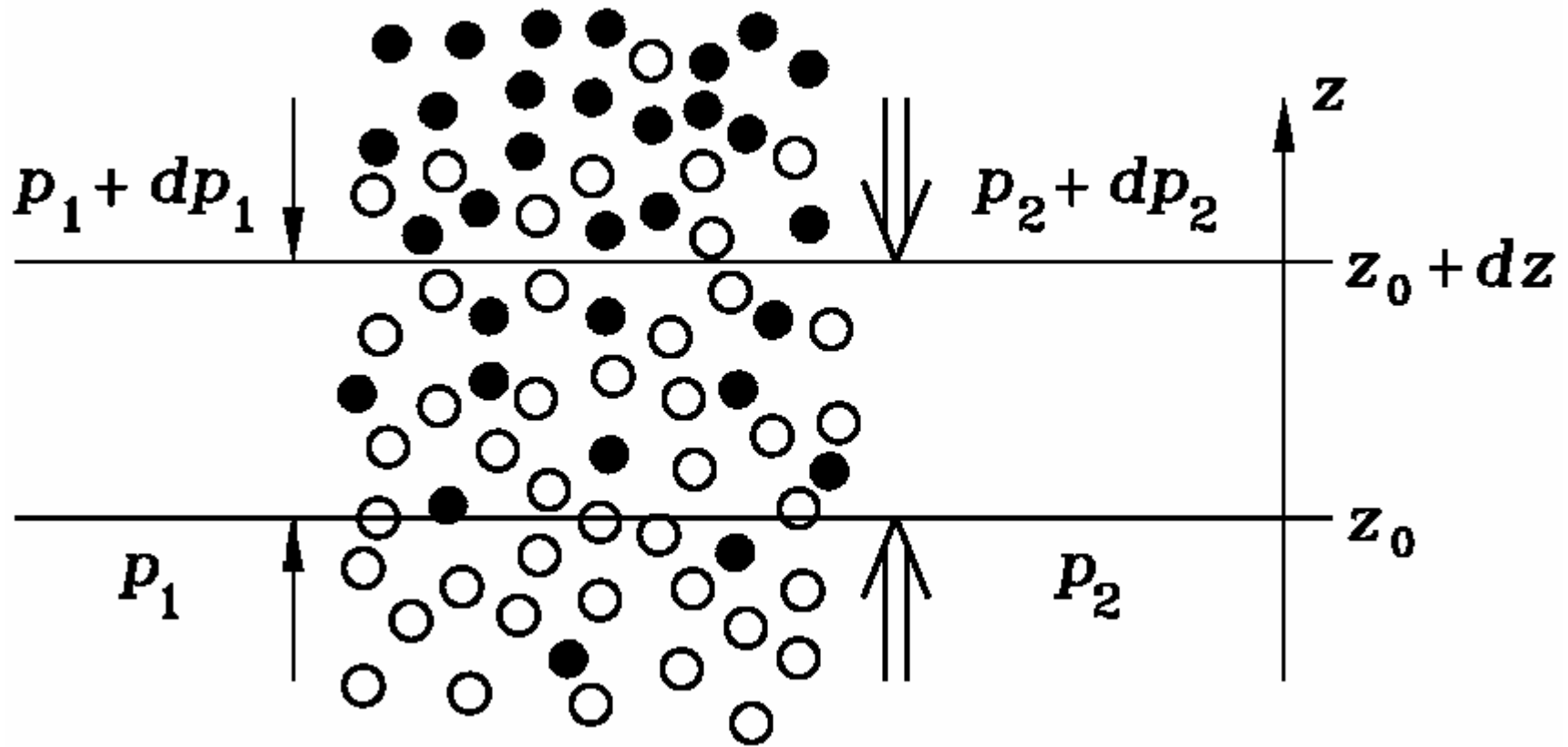
Zelfdiffusie



! ■ Ga na, D bij constante temperatuur evenredig is met

- ◆ p^{-1}
- ◆ $m^{-1/2}$

Wederzijdse diffusie



$$D = \frac{\pi}{4} \bar{v} \lambda \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

Wederzijdse diffusie

Tabel 1.5 Coëfficiënt van wederzijdse diffusie voor enige gasmengsels bij 0 °C en 1 atmosfeer

| Gasmengsel | $10^5 D$ [m ² /s] | gasmengsel | $10^5 D$ [m ² /s] |
|--------------------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| H ₂ -lucht | 6,61 | CO ₂ -H ₂ | 5,38 |
| H ₂ -O ₂ | 6,79 | CO ₂ -CO | 1,36 |
| CO-H ₂ | 6,42 | CO ₂ -lucht | 1,38 |
| CO-O ₂ | 1,83 | N ₂ O-H ₂ | 5,35 |
| O ₂ -N ₂ | 1,74 | N ₂ O-CO ₂ | 0,98 |
| O ₂ -lucht | 1,78 | | |