

- *Ultrahochvakuumtechnologie (UHV)*
- *Aufdampfen und Molekularstrahlepitaxie*
- *Grundlagen der Teilchenoptik und Spektroskopie*
- *Chemische Analyse:*
 - Auger-Elektronenspektroskopie (AES)
 - Mikrosonde (EDX)
 - Sekundärionenmassenspektroskopie (SIMS)
 - Rutherford Rückstreuung (RBS)
- *Morphologie und Struktur der Oberflächen*
 - Relaxation, Rekonstruktion und Defekte
 - Niederenergetische Elektronenbeugung (LEED)
 - Reflexion hochenergetisch gebeugter Elektronen (RHEED)
 - Hochauflösende Röntgenbeugung (HRXRD)
 - Röntgenreflexion
 - Photoemission (UPS, XPS)
 - Rasterelektronenmikroskopie (SEM)
 - Rastertunnel- und Rasterkraftmikroskopie (STM und AFM)

- *Optische Meßmethoden:*
 - Absorption-, Reflexions- und Transmissionsmessungen
 - Ellipsometrie
 - Photo- und Kathodolumineszenz
 - IR- und Ramanspektroskopie
- *Elektronische Meßmethoden:*
 - Hall-Effektmessung
 - Schubnikov-de-Haas Oszillationen und Quantum-Hall-Effekt
 - Kapazitäts-Spannungsmessung (CV)
 - Tiefe Störstellenspektroskopie (DLTS)

Die Vorlesung gibt einen Überblick über die experimentellen Meßmethoden der Oberflächen-, Festkörper- und Halbleiterphysik. Die Zusammenhänge für das Verständnis werden so dargestellt, daß Sie auch Studenten ohne spezielle Ausbildung in Quantenmechanik in ihren Grundzügen verstehen können.

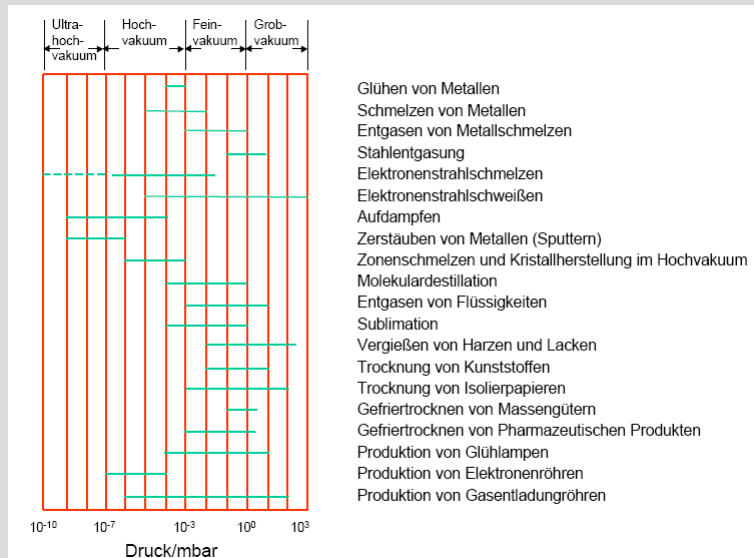
Die Vakuumentchnik befasst sich mit Anlagen, in denen sich ein Gas(gemisch) befindet, dessen Druck „deutlich“ geringer ist als der umgebende Atmosphärendruck.

Die wichtigste Messgröße der Vakuumentchnik ist der Druck $p = \bar{F} / A$, der durch Stöße der Gaspartikel mit der Behälterwand entsteht.

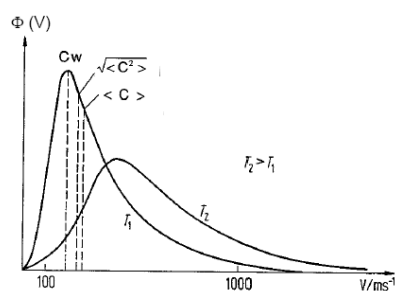
Druckeinheiten: 1 Pa = 1 N/m² = 0,01 mbar
 1 Torr = 1mm Hg-Säule = 1,333 mbar

Vakuumbereiche: Grobvakuum 10³ - 1 mbar
 Feinvakuum 1 - 10⁻³ mbar
 Hochvakuum 10⁻³ - 10⁻⁷ mbar
 Ultrahochvakuum 10⁻⁷ - 10⁻¹⁰ mbar

Große Drücke sind durch die Kraftwirkung direkt messbar, während kleine Drücke nur indirekt messbar sind. Um ein Vakuum zu erzeugen, braucht man einen "dichten" Behälter ("Rezipient") und ein Vakuumpumpsystem. Die Hauptfeinde des Vakuums sind die Umgebungsluft N₂, O₂, H₂O,... und ausgasende Stoffe im Behälter.



- Ein ideales Gas besteht aus Gaspartikeln, d.h. Atomen, Molekülen die als elastische, harte Kugeln betrachtet werden können und kontinuierlich in Bewegung sind. Ein Gas ist im Gleichgewicht, wenn keine äußeren Kräfte (Gravitation, Magnetfelder) wirken. Der Druck entsteht durch den Impulsübertrag bei der Rückstreuung/Reflexion der Gaspartikel an der Behälterwand.
- Druck p , Volumen V , Temperatur T und die Zahl der Mole n beschreiben den Zustand eines Gases vollständig.
- Das Molvolumen idealer Gase ist unabhängig von der Gasart 22,4 l (0°C, 1013 mbar).
- $p \cdot V = \text{const.}$ Bei konstanter Temperatur; Boyle - Mariottesches Gesetz (Die Kraft auf einen Kolben steigt, wenn das Gas verdichtet wird.)
- $V / T = \text{const.}$ (Ein Heißluftballon steigt, weil die Luft sich ausdehnt, entweicht und die Dichte abnimmt, wobei der Druck konstant ist.)
- $p / T = \text{const.}$ (Eine Konservendose platzt beim Erwärmen, wenn sie nicht geöffnet wird.)
- $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$ Gleichung des idealen Gases
 - n = Anzahl der Mole (1 Mol = N_A , $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ ist die Avogadro-Zahl).
 - R = Gaskonstante ($R = 8,315$ J/K/mol)
 Die Größe $p \cdot V$ beschreibt bei gegebener Temperatur die Gasmenge. Die Masse der Gasmenge ergibt sich als Produkt aus Anzahl der Mole und Molekulargewicht.



Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung für zwei Temperaturen

$\phi(v) dv$ ist die Wahrscheinlichkeit im Gas ein Molekül mit der Geschwindigkeit im Intervall v bis $v + dv$ zu finden.

$$\phi(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi KT} \right)^{3/2} \cdot v^2 \cdot e^{-mv^2/2KT}$$

$\langle c \rangle$ = Mittelwert der Geschwindigkeit
Die Temperatur eines Gases ist mit der mittleren kinetischen Energie der Moleküle korreliert:

$$\langle E_K \rangle = \frac{1}{2} m \langle c^2 \rangle = \frac{3}{2} KT$$

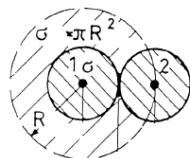
K: Boltzmann Konstante

Die mittlere Geschwindigkeit der Luftmoleküle bei Raumtemperatur ist 1600 km/h !

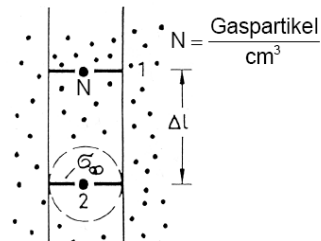
Die mittlere freie Weglänge Δl ist diejenige Strecke, die ein Molekül im Mittel im Gas zurücklegt, bis es einen Stoß erleidet.



Bahn eines Moleküls bei Stößen im Gas



σ = Wirkungsquerschnitt, effektive Stoßfläche

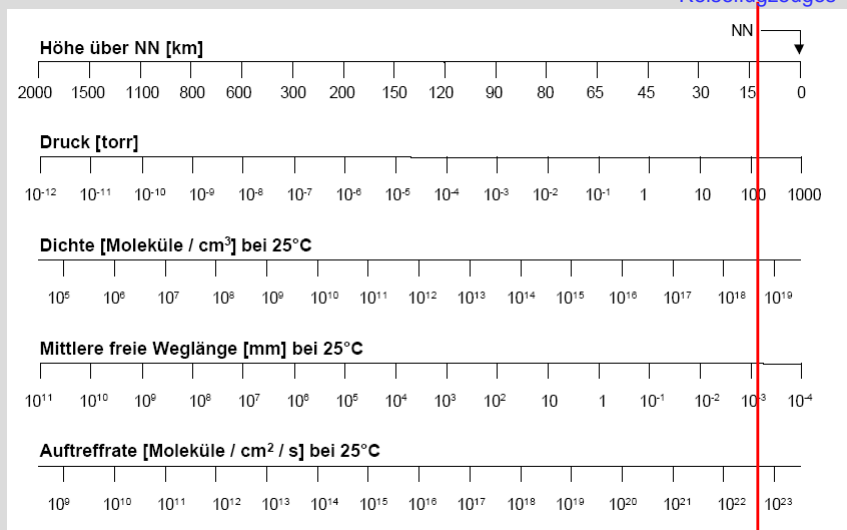


Ein Stoß erfolgt, wenn sich im Volumen $\sigma \cdot \Delta l$ genau ein weiteres Gasmolekül befindet:

$1 = N \cdot \sigma \cdot \Delta l$; $N \sim p$; Luft: $\Delta l \cdot p \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{Torr}$ $\Delta l \sim 1/p$ bei $T = 20^\circ\text{C}$

p [Torr]	10^3-1	$1-10^{-3}$	$10^{-3}-10^{-7}$	$10^{-7}-10^{-10}$	p [Torr]	10^3	1	10^{-3}	10^{-6}
Vakuum	Grob	Fein	Hoch	Ultrahoch	Δl [m]	$50 \cdot 10^{-9}$	$50 \cdot 10^{-6}$	$50 \cdot 10^{-3}$	50

Flughöhe eines Reiseflugzeuges



- Gasstrom $Q = \frac{V \cdot p}{\Delta t} \left[\frac{\text{m}^3 \cdot \text{mbar}}{\text{s}} \right]$ (Massenstrom des Gases)

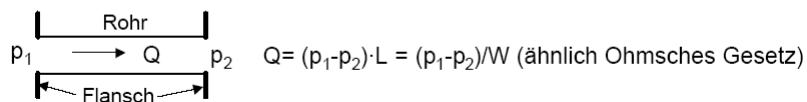
- Sauggeschwindigkeit: $S = \frac{V}{\Delta t} \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{h}} \right] \left[\text{m}^3/\text{s} \right]$

- Saugleistung: Geförderter Gasstrom $Q = S \cdot p \left[\frac{\text{m}^3 \cdot \text{mbar}}{\text{s}} \right]$

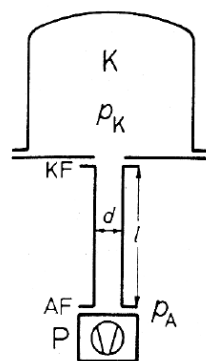
- Enddruck: niedrigster erreichbarer Druck der Pumpe ($t \rightarrow \infty$)

- Leckrate : Gasstrom durch ein Leck $\left[\frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s}} \right]$

- Strömungswiderstand W oder Leitwert L einer Vakuumleitung:



Alle Gasleitungen im Vakuumsystem stellen einen Strömungswiderstand dar!



$Q \sim \Delta p$ Der Gasstrom ist proportional zum Druckabfall
 $W = \Delta p / Q$ Strömungswiderstand
 $L = Q / \Delta p$ Leitwert ($= 1 / W$)

Serienschaltung $W = W_1 + W_2 + W_3 + \dots$
 Parallelschaltung $L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots$

Die Sauggeschwindigkeit $S = Q/p$ der Pumpe wird durch die Leitung zwischen Pumpe und Kessel reduziert.

Die Pumpe hat über das Ansaugrohr die Sauggeschwindigkeit:
 $S_{\text{eff}} = S / (1 + S / L)$
 $S_{\text{eff}} > 0,9 S$, wenn $L > 10 S$

Wenn die Sauggeschwindigkeit durch Leitungen nicht wesentlich reduziert werden soll, dann müssen die Widerstände der Leitungen sehr gering, sein d.h. die Leitwerte größer als die Sauggeschwindigkeit der Pumpe.

Faustregel: Die Leitungen müssen möglichst kurz und weit sein

Mittlere freie Weglänge : $\Delta l = \frac{1}{p} \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{Torr}}$ Luft bei 20°C

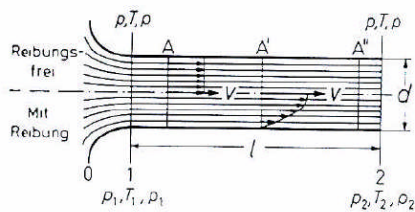
Knudsenzahl : $K = \frac{\Delta l}{d}$ d = Rohrdurchmesser

Kleineres (größeres) K bedeutet, dass die Gasmoleküle überwiegend Stöße mit ihren Nachbarn (mit der Behälterwand) haben.

Reynoldszahl : $Re = \rho \cdot v \cdot d / \eta$ η = dynamische Viskosität

Strömungsart	K	Δl [m]	Druckbereich [mbar]	
Viskose Strömung	$< 10^{-2}$	$10^{-8} - 10^{-5}$	$10^3 - 1$	Großvakuum turbulent $Re > 2300$ laminar $Re < 2300$
Knudsen Strömung	$10^{-2} - 0,5$	$10^{-5} - 10^{-2}$	$1 - 10^{-3}$	Feinvakuum
Molekulare Strömung	$> 0,5$	$> 10^{-2}$	$< 10^{-3}$	Hochvakuum, Ultrahochvakuum

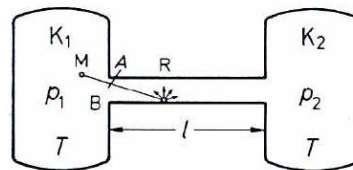
Laminare Strömung ($\Delta l \lesssim 10\mu\text{m}$)
Großvakuum



$$W = \frac{128\mu}{\pi} \cdot \frac{1}{\langle p \rangle} \cdot \frac{l}{d^4}$$

W proportion al zu l und $1/d^4$

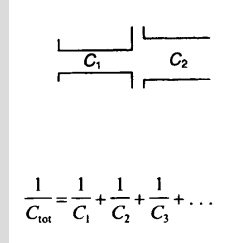
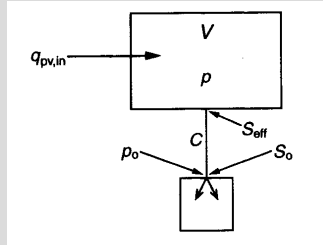
Molekulare Strömung ($\Delta l \gtrsim 10\text{cm}$)
Hochvakuum, UHV



$$W = \sqrt{\frac{2\pi \cdot M_{\text{molar}}}{RT} \cdot \frac{1}{A}} \cdot \left(1 + \frac{3}{16} \cdot \frac{A_M}{A}\right)$$

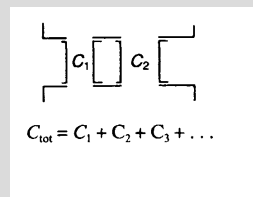
W proportion al zu $1/\sqrt{A}$

Serienschaltung von Rohren



Parallelschaltung von Rohren

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S_0} + \frac{1}{C_{tot}}$$



Mit C als Leitwert (im Deutschen auch L bezeichnet)

Table 1 Nominal widths (DN) and recommended internal diameters for international standard tubes and flanges used in vacuum technology

DN	d_i (mm)
10	10
16	16
25	24
40	41
63	70
100	102
125	127
160	153
250	261
630	651
1000	1000

Saugvermögen S:	$S = \frac{dV}{dt} = \dot{V}$
Saugleistung Q:	$Q = p \cdot \frac{dV}{dt} = p \cdot S$
Strömungswiderstand W:	$W = \frac{\Delta p}{Q}$
Reihenschaltung:	$W_{ges} = \sum_i W_i$
Parallelschaltung:	$\frac{1}{W_{ges}} = \sum_i \frac{1}{W_i}$
Leitwert L:	$L = \frac{1}{W} = \frac{Q}{\Delta p}$
Effektives Saugvermögen S_{eff} :	$S_{eff} = \frac{S}{1 + \frac{S}{L}} < S$
Pumpwirkungsgrad η :	$\eta = \frac{S_{eff}}{S} = \frac{1}{1 + \frac{S}{L}} < 1$

Faustregel: Die Leitungen müssen möglichst kurz und weit sein

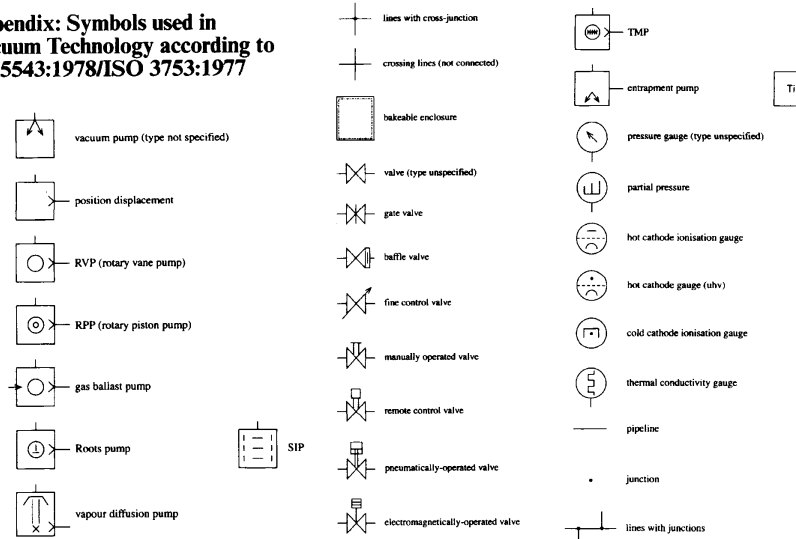
Table 2.1 Expressions for gas flow rate

Quantity	Equation	Typical units ^a
Mass flow rate	$q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t}$ (2.1)	kg s ⁻¹
pV flow rate (pV-throughput)	$q_{pV} = p\dot{V};$ $= p \frac{\Delta V}{\Delta t}$ (2.2)	mbar L s ⁻¹ , Pa m ³ s ⁻¹
Volume flow rate	$q_V = \dot{V};$ $= \frac{\Delta V}{\Delta t}$ (2.3)	m ³ h ⁻¹ , L s ⁻¹
Molar flow rate ^b	$q_n = \dot{n};$ $= \frac{\Delta n}{\Delta t}$ (2.4)	mol s ⁻¹

^a Expressions such as L/s, $\frac{L}{s}$ and L s⁻¹ are equivalent.

^b n is defined in pV = nRT where $n = \frac{m}{M}$.

Appendix: Symbols used in Vacuum Technology according to BS 5543:1978/ISO 3753:1977



apl.Prof. Dr. D.J. As

- Grobvakuum
- Feinvakuum
- Hochvakuum
- Ultrahochvakuum

	Grobvakuum	Feinvakuum	Hochvakuum	Ultrahochvakuum
Druck p [mbar]	10 ¹³ -1	1-10 ⁻³	10 ⁻³ -10 ⁻⁷	< 10 ⁻⁷
Teilchenanzahl-dichte n [cm ⁻³]	10 ¹⁹ -10 ¹⁶	10 ¹⁶ -10 ¹³	10 ¹³ -10 ⁹	< 10 ⁹
Mittl. freie Weglänge $\bar{\lambda}$ [cm]	< 10 ⁻²	10 ⁻² -10	10-10 ⁵	> 10 ⁵
Flächenstoßrate Z _A [cm ⁻¹ · s ⁻¹]	10 ²³ -10 ²⁰	10 ²⁰ -10 ¹⁷	10 ¹⁷ -10 ¹³	< 10 ¹³
Volumenstoßrate Z _V [cm ⁻³ · s ⁻¹]	10 ²⁹ -10 ²³	10 ²³ -10 ¹⁷	10 ¹⁷ -10 ⁹	< 10 ⁹
Bedeckungszeit τ [s]	< 10 ⁻⁵	10 ⁻⁵ -10 ⁻²	10 ⁻² -100	> 100
Art der Gasströmung	Strömungs-kontinuum (viskose Strömung)	Knudsen-Strömung	Molekular-Strömung	Molekular-Strömung
Weitere besondere Eigenschaften	Konvektion druckabhängig	stärkere Änderung der Wärmeleitfähigkeit des Gases	starke Abnahme der Volumenstoßrate	Teilchen auf den Oberflächen überwiegen bei weitem gegenüber den Teilchen im Gasraum

apl.Prof. Dr. D.J. As

	<i>Rough vacuum</i>	<i>Medium vacuum</i>	<i>High vacuum</i>	<i>UHV-XHV</i>
Total pressure/mbar	10 ² -1	1-10 ⁻³	10 ⁻³ -10 ⁻⁷	<10 ⁻⁷ -<10 ⁻¹⁰
<i>Typical applications</i>				
<i>Rough</i>	Chemical technology (unit operations such as degassing, drying, filtration)			
<i>Medium</i>	Chemical technology (distillation) Chemical Vapour Deposition (CVD) Sputtering processes			
<i>High</i>	Physical Vapour Deposition (PVD) (coating of various substrates with a range of materials) GC-MS Kinetic studies			
<i>UHV-XHV</i>	Surface science (e.g. AES, XPS, EELS) Fusion research Synchrotron radiation sources (various applications)			

1. Wie gut muß Vakuum sein?

Druck p bestimmt wie viele (Gas-)Teilchen pro Sekunde und cm² auf Oberfläche auftreten

Auftreffrate : \dot{z} [cm²/s]
 $p = 2 m \langle v \rangle \cdot \dot{z}$

Mittlere Energie: $\frac{1}{2} m \cdot \langle v \rangle^2 \cong \frac{1}{2} m \cdot \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} k_B T \Rightarrow \langle v \rangle = \sqrt{\frac{3 k_B T}{m}}$

$p = \frac{6 k_B T}{\langle v \rangle} \cdot \dot{z} = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{m k_B T} \cdot \dot{z}$

Eine Monolage ist ca. 3 · 10¹⁴ Teilchen

Mit Molekulargewicht 28 (N₂) und T=300 K ergibt sich damit

$\dot{z} = 3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

$$\dot{z} = \frac{p}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{m \cdot k_B \cdot T}} \Rightarrow 5 \cdot 10^{-6} \cdot p [\text{Torr}]$$

Dies bedeutet, daß bei etwa 10⁻⁶ Torr, pro Sekunde eine Zahl von Molekülen, die einer Monolage entsprechen auf die Oberfläche auftrifft.

Haftende Moleküle werden durch einen Haftkoeffizienten S bestimmt.

(S = 1 d.h. jedes Atom bleibt an der Oberfläche haften!)

d.h. um eine „Reine Oberfläche“ untersuchen zu können und zwar über einen Zeitraum von Stunden ist deshalb ein Vakuum von 10^{-10} mbar oder weniger notwendig.

⇒ UHV-Bedingungen

Mit dem Haftkoeffizienten S kann eine neue Größe Langmuir (1L) definiert werden:

Dies entspricht einer Dosis (Adsorbate/cm²) die einem Aussetzen der Oberfläche (1s) einem Druck von 10^{-6} Torr entspricht oder z.B 10^{-8} Torr 100s.

Druckeinheiten:

Einheit	$N \cdot m^{-2}, Pa^2$	mbar	bar	Torr
1 $N \cdot m^{-2}$ (= 1 Pa)	1	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$
1 mbar	100	1	$1 \cdot 10^{-3}$	0,75
1 bar	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^3$	1	750
1 Torr ³⁾	133	1,33	$1,33 \cdot 10^{-3}$	1

1) Das Torr ist in Tabelle I nur deshalb aufgenommen worden, um den Übergang von dieser angewöhnten Einheit auf die gesetzliche Einheit $N \cdot m^{-2}$, mbar und bar zu erleichtern. In Zukunft sind die üblichen Einheiten Torr, mm-Wassersäule (mm WS), mm-Quecksilbersäule (mm Hg), Vakuum, technische Atmosphäre, physikalische Atmosphäre (atm), Atmosphäre absolut (ata), Atmosphäre Überdruck (atü), Atmosphäre Unterdruck (atü) nicht mehr zu verwenden. In diesem Zusammenhang sei auf DIN 1314 verwiesen.

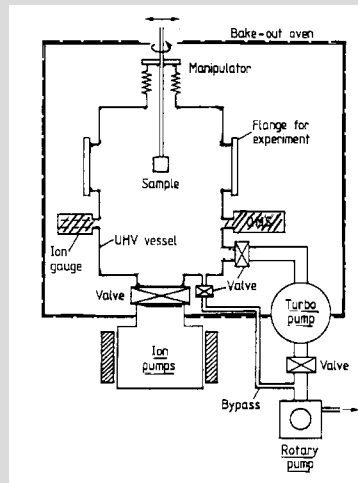
2) Die Einheit Newton durch Quadratmeter ($N \cdot m^{-2}$) wird auch mit Pascal (Pa) bezeichnet. $1 N \cdot m^{-2} = 1 Pa$. Newton durch Quadratmeter oder Pascal ist die SI-Einheit des Druckes von Fluiden.

3) 1 Torr = $\frac{2}{3}$ mbar = $\frac{1}{34}$ Torr = 1 mbar.

Tabelle IV: Zusammenstellung wichtiger gaskinetischer Formeln

Größe	Größengleichung	Zahlenwertgleichung	Werte für Luft u. 20 °C
Wahrscheinlichste Teilchengeschwindigkeit c_w	$c_w = \sqrt{\frac{2RT}{M}}$	$c_w = 1,29 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{cm}{s}$	$c_w = 410 \text{ m/s}$
Mittlere Teilchengeschwindigkeit \bar{c}	$\bar{c} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$	$\bar{c} = 1,46 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{cm}{s}$	$\bar{c} = 464 \text{ m/s}$
Mittleres Geschwindigkeitsquadrat \bar{c}^2 der Teilchen	$\bar{c}^2 = \frac{3RT}{M}$	$\bar{c}^2 = 2,49 \cdot 10^8 \frac{T}{M} \frac{cm^2}{s^2}$	$\bar{c}^2 = 25,16 \cdot 10^4 \frac{m^2}{s^2}$
Gasdruck p der Teilchen	$p = n \cdot k \cdot T$ $p = \frac{1}{3} \cdot n \cdot m \cdot \bar{c}^2$ $p = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot \bar{c}^2$	$p = 13,80 \cdot 10^{10} \cdot n \cdot T \text{ mbar}$	$p = 4,04 \cdot 10^{-17} \cdot n \text{ mbar}$ (gilt für alle Gase)
Teilchenanzahldichte n	$n = \frac{p}{kT}$	$n = 7,25 \cdot 10^{19} \frac{p}{T} \text{ cm}^{-3}$	$n = 2,5 \cdot 10^{16} \cdot p \text{ cm}^{-3}$ (für alle Gase)
Flächenstoßrate Z_A	$Z_A = \frac{1}{4} \cdot n \cdot \bar{c}$ $Z_A = \frac{p}{2 \pi M k T} \cdot \sqrt{\frac{M}{2 \pi k T}}$	$Z_A = 2,83 \cdot 10^{22} \frac{p}{\sqrt{MT}} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$Z_A = 7,85 \cdot 10^{10} \cdot p \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (s. Abb. 78.2)
Volumenstoßrate Z_V	$Z_V = \frac{1}{2} \cdot n \cdot \bar{c} \cdot d$ $Z_V = \frac{p \cdot d}{\sqrt{2 \pi M k T}}$	$Z_V = 5,27 \cdot 10^{22} \frac{p \cdot d}{\sqrt{MT}} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$Z_V = 8,6 \cdot 10^{10} \cdot p \cdot d \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (s. Abb. 78.2)
Zustandsgleichung für ideale Gase	$p \cdot V = \nu \cdot R \cdot T$	$p \cdot V = 83,14 \cdot \nu \cdot T \text{ mbar} \cdot l$	$p \cdot V = 2,44 \cdot 10^4 \cdot \nu \cdot T \text{ mbar} \cdot l$ (für alle Gase)
Flächenbezogener Massenstrom $q_{m,A}$	$q_{m,A} = Z_A \cdot m$ $q_{m,A} = \frac{p \cdot d}{\sqrt{2 \pi k T N_A}} \cdot \rho$	$q_{m,A} = 4,377 \cdot 10^{-2} \frac{p \cdot d \cdot M}{\sqrt{T}} \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$q_{m,A} = 1,38 \cdot 10^{-12} \cdot p \cdot d \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

- Zur Erzeugung von UHV benötigt man die entsprechenden **Pumpen**
- Zur Messung des Drucks benötigt man **Meßsonden**



Und eine **Vakuumkammer:**

- besteht aus VA-Stahlkörper (ausheizbar)
 - hat verschiedene Öffnungen
 - Fenster
 - Messgeräte
 - Herstellungsgeräte (z.B. Knudsenzellen)
 - An den Wänden adsorbiert Restgas
Ausheizen z.B. 10 h bei 150-180°C
 - Flansche werden mit Cu-Ringen gedichtet
- Bem.: für HV ($< 10^{-7}$ mbar) reichen nicht ausheizbare Gummi oder Viton Dichtungen

apl.Prof. Dr. D.J. As