

F70/71: Mechanik und Vakuum

Anleitung zum Praktikumsversuch

Zuletzt verändert: August 2026

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
Im Neuenheimer Feld 501, 69120 Heidelberg

Diese Anleitung wird routinemäßig überarbeitet und ergänzt. Hinweise auf Fehler, Wünsche für Erweiterungen oder allgemeine Anmerkungen sind willkommen.

Motivation

Die Frage nach dem „Nichts“ und nach der „Leere“ beschäftigte die Menschheit schon seit geraumer Zeit. So fand das Konstrukt des Vakuums (lat.: *vacuus* - leer) bereits bei dem griechischen Philosophen Demokrit Erwähnung. Weitaus später im 17. Jahrhundert trieben die experimentellen Erkenntnisse von Evangelista Torricelli (von dem die abgewandelte Druckeinheit Torr stammt), Blaise Pascal und Otto von Guericke die Existenztheorie eines Vakuumzustands weiter voran [1]. Dies war ein Widerspruch zur damals weitverbreiteten Äther-Theorie, welche durch das Michelson-Morley-Experiment [2] wiederum einige hundert Jahre später widerlegt werden konnte.

Die weit vorangeschrittene Forschung machte es möglich, Vakua zu schaffen, die für die Durchführung kommender Experimente quasi unentbehrlich waren, da anderweitige Teilcheninteraktionen verhindert werden sollten.

Auch heutzutage ist es für physikalische Labore weiterhin gewöhnlich einzelne Geräte oder ganze Aufbauten zu haben, welche mit durch Pumpen erzeugtem Vakuum arbeiten. So werden zum Beispiel Ultrahochvakua bei den Teilchenbeschleunigern am LHC benötigt [3]. Aber auch in „kleineren“ Experimenten wie dem ATTA-Experiment zur Detektion des seltenen Isotops ^{39}Ar (Kirchhoff Institut für Physik, Gruppe von Prof. Dr. Oberthaler) [4] werden sehr tiefe Drücke und damit sehr feine Vakua gebraucht.

Abseits der Evakuierung von großen experimentellen Aufbauten werden Vakua aber auch in der Technik verwendet. So unter anderem auch für die saubere Beschichtung von Oberflächen bei Verfahren wie dem Magnetron-Sputtering [5].

Was also einst als interessanter philosophischer Gedanke begonnen hatte, hat sich im Laufe der letzten Jahrhunderte als unumgänglicher Teil der Physik und Technik herausgestellt.

Zielsetzung des Versuchs und Aufbau des Skripts

Das Ziel dieses Versuchs ist es, den Studierenden einen Einblick in die Pumpen- und Vakuumtechnik, sowie in die zugehörigen Mechanik und Thermodynamik Grundlagen zu geben. Dazu werden die gängigen Pumpenarten vorgestellt und erklärt sowie einige Versuche mit einem Vakuumsystem durchgeführt, um ein besseres Gefühl für verschiedene Parameter des Vakuums in einem geschlossenen System zu entwickeln. Abschließend haben die Studierenden die Möglichkeit, nicht nur die Lecksuche kennenzulernen, sondern auch einen groben Einblick in die Glasbläserei zu bekommen. Hierfür sollte sich reichlich Zeit genommen werden. Der Versuch ist in all seinem Durchführungsumfang auf etwa *drei Nachmittage* (oder alternativ anderthalb Ganztage) ausgelegt.

Die Studierenden sollen sich vor der Durchführung des Experiments bestenfalls mit allen Kapiteln, mindestens aber mit den Kapiteln 1 bis 4 gut anvertrauen.

Dabei sollen die theoretischen Grundlagen der im Experiment verwendeten Pumpen, Messgeräte und der relevanten Parameter im Vordergrund der Vorbereitung stehen. Diese werden im Kapitel 1 vorgestellt und erklärt. Im Kapitel 2 wird der Versuchsaufbau und dessen Funktionsweise eingeführt, sowie zusätzliche und für die Durchführung des Versuchs nötige Sachverhalte erklärt. Das darauffolgende Kapitel 3 beinhaltet die Versuchsdurchführung. Die zugehörigen in kursiv notierten Fragestellungen sollten während des Versuchs diskutiert und ins Messprotokoll notiert werden. Das Kapitel 4 beinhaltet Vorbereitungsfragen, welche als eine Orientierung für das Ausmaß der Vorbereitung dienen und **vor** der Durchführung beantwortet werden sollen. Die Studierenden finden im letzten Kapitel 5 die zu bearbeitenden Auswertungsaufgaben und die zu diskutierenden Fragestellungen. Hierfür sollen alle während der Versuchsdurchführung aufgenommenen Messdaten (Messprotokoll und digitale Plots am Computer) herangezogen werden. Das Kapitel ist wiederum unterteilt in Aufgaben, die für die reguläre Ausarbeitung zu bearbeiten sind, und Zusatzaufgaben, die für eine besondere Ausarbeitung herangezogen werden können.

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeines zur Vakuumtechnik	1
1.1	Vakuum	1
1.2	Druck und Druckbereiche	1
1.3	Mittlere freie Weglänge	2
1.4	Saugvermögen	3
1.5	Saugleistung	4
1.6	Adsorption und Desorption	5
1.7	Leitwert	7
1.8	Pumpentypen	9
1.9	Vakuummessgeräte	11
1.10	Vakuum-Apparaturen und Symbole in der Vakuumtechnik	15
2	Versuchsaufbau und Methoden	18
2.1	Anmerkungen zur Sicherheit und Wartung	18
2.2	Hauptpumpstation	19
2.3	Drehschieberpumpe (DSP)	20
2.3.1	Der Gasballast einer DSP	21
2.4	Molekular- und Turbomolekularpumpe (TMP)	22
2.5	Pumpstand hoch- oder herunterfahren	24
2.6	Aufnahme und Darstellung/Plot der Drücke	24
2.7	Glasbläserei	25
2.8	Lecksuche	26
3	Versuchsdurchführung	28
3.1	Allgemeines	28
3.2	Vorversuch	28
3.2.1	Erste Evakuierung mit der Drehschieberpumpe und Abpumpen kondensierbarer Dämpfe . .	29
3.2.2	Verhalten von Wasser beim Sättigungsdampfdruck	30
3.2.3	Evakuierung mit der TMP	31
3.3	Hauptversuch 1 - Saugvermögen der TMP	32
3.4	Hauptversuch 2 - Leitwert und Widerstand von Rohr und Blende	33
3.5	Lecksuche an der zweiten Vakuumkammer	35
4	Vorbereitungsfragen	36
5	Auswertung - Reguläre und Besondere	38
5.1	Reguläre Auswertung	38
5.2	Besondere/Optionale Auswertung	41
	Literaturverzeichnis	43

1 Allgemeines zur Vakuumtechnik

Dieses Kapitel gibt eine kurze Einführung in die Welt der Vakuumtechnik. Es soll keineswegs als eine vollständige Zusammenfassung, sondern lediglich als ein grober Einblick in die Thematik gesehen werden. Für eine vollständigere Diskussion des Themas können und sollen weitere Quellen - wie diejenigen, welche im Folgenden erwähnt werden - verwendet werden.

Dieses Kapitel lehnt sich größtenteils an einschlägige Literatur wie [6], gängige Lehrbücher zur Experimentalphysik wie z.B. [7, 8] sowie auf ausführliche und an dieser Stelle ebenfalls empfohlene Internetquellen von Vakuumherstellern wie Pfeiffer Vakuum [9, 10]. Ebenfalls können diverse Kataloge der Hersteller von Vakuumkomponenten wie beispielsweise [11, 12, 13] und viele andere hilfreich sein.

1.1 Vakuum

Als Vakuum wird umgangssprachlich der Zustand eines Volumens bezeichnet, wenn dieser unter einem Druck unterhalb des Atmosphärendrucks steht. Der Druck wird dabei von im Volumen gleichmäßig verteilten Gasen oder Dämpfen verursacht.

Normgerecht ist der Vakuum als ein Zustand eines Gases definiert, wenn in einem Behälter der Druck des Gases und damit die Teilchendichte niedriger ist als außerhalb oder wenn der Druck des Gases kleiner als 300 mbar ist, d.h. geringer als der niedrigste auf der Erdoberfläche vorkommende Druck [14].

1.2 Druck und Druckbereiche

Der *Druck* p ist definiert als der Betrag einer senkrecht und gleichmäßig auf eine Flächeneinheit A wirkenden Kraft F :

$$p = \frac{|\vec{F}_\perp|}{A}. \quad (1.1)$$

Im geschlossenem Volumen mit einer Temperatur größer als der Absolutnullpunkt führen die Gasteilchen thermische Bewegungen aus. Bei der Wechselwirkung zwischen Teilchen miteinander sowie der Volumenwand kommt es zu Stößen auf atomarer und molekularer Ebene. Dabei übt jeder Wandstoß durch Impulsübertragung eine Kraft auf die Volumenwand aus. Durch die Vielzahl der Stöße sowie ihrer statistische Natur wird beim eingeschlossenen Gas ohne äußere Einflüsse an jeder Stelle der Volumenwand der gleiche Druck unabhängig von Ort und Richtung der Messung ausgeübt. In der Praxis liegt jedoch meistens nicht ein einheitliches Gas, sondern ein Gasgemisch vor. Jede Gaskomponente übt einen spezifischen Druck aus, welcher als Partialdruck bezeichnet wird. Bei idealen Gasen addieren sich die Partialdrücke der einzelnen Komponenten zum Totaldruck. Historisch wird der Druck nach dem französischen Mathematiker und Physiker Blaise Pascal in Pascal (Pa) angegeben, jedoch sind auch andere Einheiten wie bar, Torr, atm, etc. gängig.

Üblicherweise werden folgende Druckbereiche (nach DIN 28400) unterschieden:

Großvakuumgebiet (GV)	1000 bis 1 mbar
Feinvakuumgebiet (FV)	1 bis 10^{-3} mbar
Hochvakuumgebiet (HV)	10^{-3} bis 10^{-6} mbar
Ultravakuumgebiet (UV)	10^{-6} bis 10^{-9} mbar
Ultrahochvakuumgebiet (UHV)	$< 10^{-9}$ mbar

Der Enddruck p_e (auch Endvakuum genannt) ist der niedrigste Wert, dem sich der Druck einer blindgeflanschten Vakuumpumpe unter definierten Randbedingungen ohne Gaseinlass und Berücksichtigung der Pumpgeschwindigkeit asymptotisch nähert. Arbeitet eine Pumpe beim Enddruck, so ist das nutzbare Saugvermögen (siehe Abschnitt 1.4) null, da die Pumpe lediglich ihre eigenen Rückstromverluste fördert. Dabei ist der Enddruck ein theoretischer Wert. Heutzutage wird stattdessen oft der Basisdruck angegeben, welcher den Gleichgewichtsdruckwert ohne zusätzlichen Gaseinlass in die Vakuumkammer einer Pumpe darstellt. Da der Basisdruck in einer vorgegebenen Zeit erreicht werden soll, liegt dieser höher als der Enddruck.

1.3 Mittlere freie Weglänge

Die *mittlere freie Weglänge* $\bar{l}$ (häufig nur freie Weglänge) ist die durchschnittliche Strecke, welche ein Teilchen (Atom, Ion, Molekül, Elektron, etc.) ohne Wechselwirkungen (Zusammenstöße) mit anderen Teilchen in einem gegebenen Material zurücklegt. Im Fall einer Vakuumkammer handelt es sich um die Weglänge, welche ein Gasteilchen ohne Änderung dessen Bewegungsrichtung im Mittel zurücklegt. Eine einfache Elementarrechnung ergibt

$$\bar{l} = \frac{1}{n \cdot \sigma_{\infty}}, \quad (1.2)$$

mit der Teilchenzahldichte n (Anzahl der Teilchen pro Volumeneinheit) und dem Wirkungsquerschnitt σ_{∞} . Die Teilchenzahldichte kann z.B. durch die ideale Gasgleichung abgeschätzt werden. Unter Wirkungsquerschnitt wird hierbei ein Stoßquerschnitt eines in Bewegungsrichtung des Teilchens aufgespannten Zylindervolumens verstanden. Dieser ergibt sich hierbei als Produkt aus effektiver Fläche multipliziert mit einem $\sqrt{2}$ -Faktor, der die (durchschnittliche) Relativgeschwindigkeit der Teilchen zueinander miteinbezieht. Es gilt also,

$$\sigma_{\infty} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot d^2, \quad (1.3)$$

wobei d hier den Durchmesser eines Luftteilchens beschreibt.

Für Luft in der Atmosphäre unter Normalbedingungen gilt die Faustformel

$$\bar{l} \cdot p \approx 6.65 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{mbar}. \quad (1.4)$$

1.4 Saugvermögen

Unter dem *Saugvermögen* S wird das pro eine Zeiteinheit dt bei einem an der Saugseite der Pumpe vorliegenden Druck p_a durch eine Pumpe geförderte Gasvolumen V_a verstanden. Nach der Definition wird das Saugvermögen S an der Saugseite der Pumpe gemessen und ist gegeben durch

$$S = \frac{dV_a}{dt} = \frac{V_a}{t}, \quad (1.5)$$

wobei die letzte Gleichheit eine Vereinfachung bei Vorliegen zeitlicher Konstanz ist.

Die Formel 1.5 gibt den mittleren Volumenstrom durch den Querschnitt der Ansaugöffnung einer Vakuumpumpe an. Das durch die Geometrie der Pumpe maximal erreichbare Saugvermögen wird als Nennsaugvermögen bezeichnet. Beim Hintereinanderschalten von mehreren Pumpstufen werden die Saugvermögen miteinander verrechnet, wobei es mit zunehmender Anzahl an Pumpen einen stets kleineren Effekt (sinkende Erträge) gibt.

Das Maximalsaugvermögen der im Aufbau vorliegenden TMP (i.e. Pfeiffer HiPace 80 DN63 ISO-K) bei 20 °C beträgt $\approx 70 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Die genaue Druckabhängigkeit $S(p)$ lässt sich im Folgenden wiederfinden.

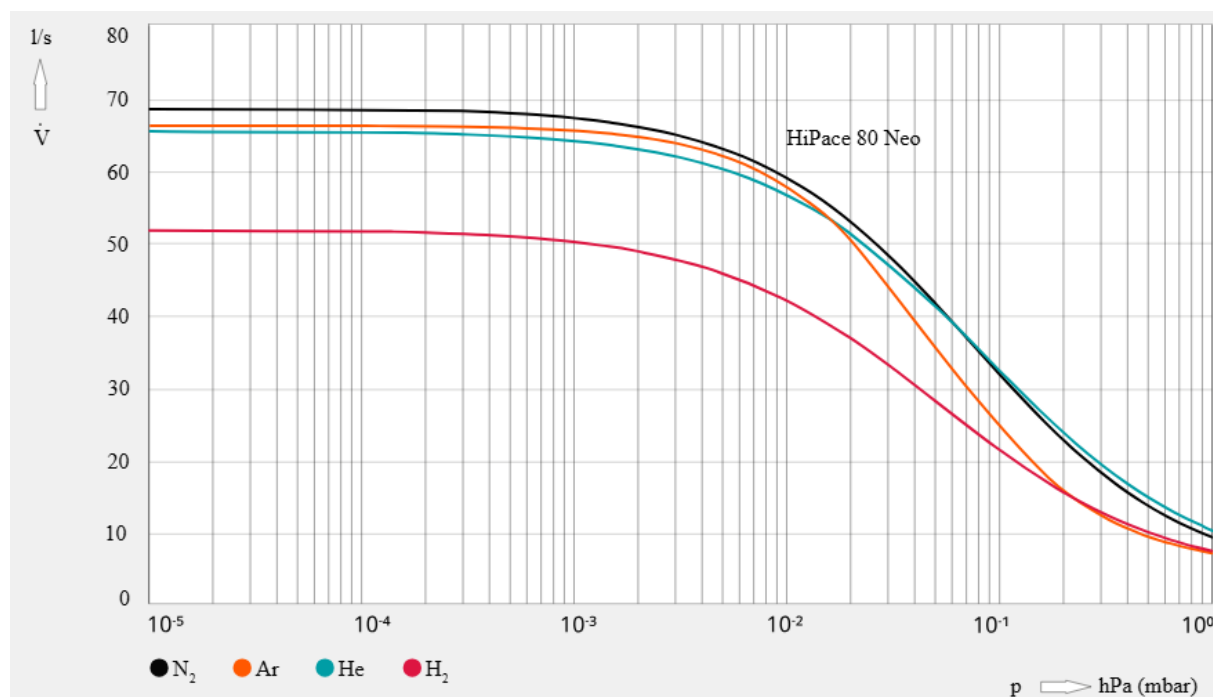


Abbildung 1.1: Der Verlauf des Saugvermögens S der im Versuch verwendeten Pumpe nach Herstellerangaben. Neben Stickstoff sind auch noch weitere in Luft vorkommende Gase und ihre Abweichungen von der Pumpenkalibration dargestellt [15].

Intuitiv lässt sich das Saugvermögen auch als zeitliche Änderung eines Volumenäquivalents bei gegebenem Druck und Temperatur verstehen. Um das genauer einsehen zu können, bedient man sich der *idealen Gasgleichung*

$$p \cdot V = N \cdot k_B \cdot T, \quad (1.6)$$

wobei p den Druck, V ein Gasvolumen, N die zugehörige Teilchenanzahl, k_B die Boltzmannkonstante und T die Gastemperatur beschreibt. Sind Druck und Temperatur zu gegebenem Zeitpunkt konstant, so gilt,

$$p \cdot \frac{dV}{dt} = p \cdot S = k_B \cdot T \cdot \frac{dN}{dt}. \quad (1.7)$$

Hierbei wurde die Änderung des Gasvolumens, wie durch die Definition gegeben, als Saugvermögen umschrieben. Es wird ersichtlich, dass

$$S \propto \frac{dN}{dt} \cdot \frac{1}{p}, \quad (1.8)$$

ergo das Saugvermögen beschreibt, in was für einem Verhältnis sich die Teilchenzahl an der Ansaugseite der Pumpe bei anliegendem Druck ändert.

1.5 Saugleistung

Unter *Saugleistung* Q wird die von der Pumpe pro eine Zeiteinheit dt geförderte Gasmenge

$$Q = S \cdot p_a \quad (1.9)$$

verstanden. Der Begriff der Saugleistung ist in der Praxis von großer Bedeutung und kann z.B. dazu dienen, bei einem gegebenen Problem abzuschätzen, welche Vorpumpe zu einer Hochvakuumpumpe gewählt werden muss.

Der Druck im Rezipienten wird durch den einströmenden Gasfluss Q_{ein} und der Saugleistung der Pumpe (also ausströmender Gasfluss) bestimmt und ist daher ein *Gleichgewichtszustand* (siehe Abschnitt 1.2). Q_{ein} wird durch Desorption von Gasen von den Innenwänden der Vakuumkammer (als *Pseudoleck* bezeichnet) sowie durch Lecks in der Apparatur verursacht. Bei Pumpständen aus gasfördernden Pumpen ist die Saugleistung aller in Reihe geschalteten Pumpen gleich.

Der Gleichgewichtszustand lässt sich auch in Formeln notieren. Unter der gerechtfertigten Annahme, dass sich das Volumen eines Rezipienten nicht plötzlich mit der Zeit verändert und dass das Saugvermögen über viele Druckbereiche hinweg konstant bleibt, gilt im Fall ohne Lecks und Pseudolecks, dass

$$\frac{d}{dt}(pV) = V \cdot \frac{d}{dt}p = Q = -S \cdot p. \quad (1.10)$$

Hierbei rührt das Minuszeichen, da der Druck durch das Abpumpen fällt und das Differential damit natürlich auch ein negatives Vorzeichen hat. Des Weiteren wurde der Einfachheit halber der Index a wieder weggelassen.

Kommen nun Leckströmungen von außen oder innen hinzu, so gilt,

$$V \cdot \frac{d}{dt}p = Q + Q_{\text{Leck}}(t) = -S \cdot p + Q_{\text{Leck}}(t). \quad (1.11)$$

Q_{Leck} wird üblicherweise als Leckrate bezeichnet. Hieraus ist der oben motivierte Gleichgewichtszustand sofort einsehbar. Ist bei einem bestimmten Druck p die Leckrate zeitlich konstant, so folgt aus der obigen Gleichung direkt, dass

$$0 = -S \cdot p + Q_{\text{Leck}} = Q_{\text{aus}} + Q_{\text{ein}}. \quad (1.12)$$

1.6 Adsorption und Desorption

Unter *Adsorption* versteht man das Anhaften von Atomen und Molekülen an der Oberfläche anderer Stoffe. Das Anhaften wird hierbei durch van-der-Waals Kräfte bewirkt. Im vorliegenden Fall ist hierbei die Ansammlung von Wasser sowie sämtlicher in Luft enthaltener Gase an der Oberfläche des Rezipienten zu verstehen. *Desorption* beschreibt den umgekehrten Effekt, also das Ablösen eben jener Atome und Moleküle von der Oberfläche. Bei konstantem Druck herrscht ein Gleichgewicht beider Effekte, es werden also so viele Teilchenverbunde gelöst wie an der Oberfläche gebunden werden.

Werden nun Gasteilchen abgesaugt, so reduziert sich die Adsorptionsrate, da das Gas effektiv aus dem Rezipienten verschwindet. Dementsprechend kommt es zu einer erhöhten *Desorptionsrate*, welche sich bei niedrigen Drücken als *Pseudoleck* erkenntlich zeigt.

Für die kommende Betrachtung wird davon ausgegangen, dass keine äußeren Lecks existieren und dass alle Leckanteile auf Desorption rückführbar sind. Unter diesen Annahmen lässt sich Gleichung (1.11) mit $Q_{\text{Leck}} = Q_{\text{Des}}$ verwenden. Empirisch hat sich ergeben, dass die Desorptionsleistung/-rate in guter Näherung mit t^{-1} skaliert [16]. Damit lässt sich unter Einführung des Proportionalitätsfaktors A^1 die Differentialgleichung in folgender Form schreiben:

$$V \cdot \frac{d}{dt}p = Q + Q_{\text{Des}}(t) = -S \cdot p + \frac{A}{t}. \quad (1.13)$$

Die Lösung dieser Gleichung ist nicht ganz trivial. Allerdings stellt sich raus, dass insbesondere am Anfang des Pumpens und 'nach einiger Zeit' zwei Terme dominant werden.

Zu Beginn ist Desorption schwach und die Druckänderung ist dominiert vom Ausaugen des freien Gases im Rezipienten. Der A -Term in der DGL ist also vernachlässigbar. Integrieren führt zum Ergebnis, dass zu Beginn

$$p(t) \propto e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1.14)$$

wobei $\tau = VS^{-1}$ die charakteristische Abklingzeit beschreibt.

¹Dieser ist grundsätzlich nur begrenzt konstant. Es herrscht also nur eine annähernd invers-linear skalierte Größe.

Bei Erreichen des mittleren HV-Bereichs zeigt sich Desorption als dominanter Effekt und die zeitliche Änderung des Drucks innerhalb des Rezipienten wird sehr gering. Somit kann vereinfachend die linke Seite der DGL vernachlässigt werden. Das führt zu der Relation, dass

$$p(t) \propto \frac{1}{t}. \quad (1.15)$$

Sobald also Desorption zum dominanten Effekt wird, sinkt der Druck nur noch mit (ungefähr) t^{-1} .

Die t^{-1} -Skalierung folgt aus dem Fakt, dass eine Superposition verschiedener Gase mit unterschiedlichen Adsorptionsenergien E_a betrachtet werden. Die Desorptionsrate eines einzelnen Gastyps (z.B. Wasserdampf) kann durch die sogenannte Polanyi-Wigner-Gleichung beschrieben werden:

$$Q_{\text{Des}}^{(1)} \propto \frac{1}{\tau^*} = \frac{1}{\tau_0} \cdot e^{\left(\frac{E_a}{k_B \cdot T}\right)}. \quad (1.16)$$

Hierbei ist τ^* die (statistisch durchschnittliche) Verweildauer der Adsorbate auf der Rezipientenoberfläche. Diese ist vollständig beschrieben durch eine klassische statistisch-thermodynamische Energiegleichung, ergo

$$\tau^* = \tau_0 \cdot e^{-\left(\frac{E_a}{k_B \cdot T}\right)}, \quad (1.17)$$

wobei die Adsorptionsenergie per Definition negativ definiert ist. Der Faktor τ_0 wird als mittlere Verweilzeit bezeichnet und beträgt gemäß Literatur [17], [18] in etwa 10^{-13} s.

Wichtig zu beachten ist nun, dass die Desorptionsrate temperaturabhängig ist. Das Gas desorbiert also schneller, wenn es eine höhere Temperatur besitzt. Das ist die Grundidee des *Baking-Outs*, bei dem zu Beginn des Evakuierens der Rezipient für ein paar Stunden auf eine höhere Temperatur erhitzt wird, um die Zahl der Desorption zu erhöhen. Dadurch sinkt der Faktor A maßgeblich und es werden grundsätzlich viel schneller niedrigere Basisdrücke erreichbar.

Die Polanyi-Wigner-Gleichung bietet eine schöne Möglichkeit, die ungefähre Größenordnung der Desorptionsenergie zu bestimmen. Wenn Druckänderungen gemessen werden, die in einem Bereich liegen, in denen S annähernd konstant ist, so gilt nach (1.9), dass $Q_i \propto p_i$. Werden zusätzlich die Temperaturen T_i bestimmt, die zu den Gleichgewichtsdrücken p_i führen, so lässt sich durch Umformung von (1.16) die Desorptionsenergie bestimmen.

Hat man nun die Desorptionsenergie, so lässt sich die *Sorptionsstärke* der Rezipientenwände durch die Verweilzeit (1.17) quantifizieren. Je länger die Absorbate (durchschnittlich) an der Wand absorbiert bleiben (i.e. verweilen), desto stärker sind sie an die Wand gebunden. Eine hohe Verweildauer ist somit äquivalent zu einer stark bindenden Wand.

1.7 Leitwert

Beim Evakuieren eines Rezipienten über ein Rohr, eine Blende oder Kombination von den beiden liegt für die zur Pumpe gerichtete Gasströmung ein bestimmter *Widerstand* W vor, welcher durch die Geometrie gegeben ist. Dadurch stellen sich verschiedene Drücke vor und nach diesem Hindernis ein. Dabei ist der Druckunterschied Δp proportional zur Saugleistung Q :

$$\Delta p = W \cdot Q \Leftrightarrow \Delta p \cdot L = Q. \quad (1.18)$$

Hierbei wird $L = W^{-1}$ als der *Leitwert* des Rohrs bzw. der Blende bezeichnet. Der Leitwert ist vakuumtechnisch eine sehr wichtige Größe und ist unter anderem dafür bestimmend, welches effektive Saugvermögen sich an einem zu evakuierenden Volumen ergibt, falls die absaugende Pumpe vom anzupumpenden Volumen durch ein System an Rohrleitungen, Ventilen, etc. getrennt und nicht unmittelbar an dieses angeschlossen ist.

Ähnlich zum Ohmschen Gesetz der Elektrizitätslehre kann ein analoges Gesetz der Vakuumtechnik durch die Einführung des Strömungswiderstands $W = L^{-1}$ formuliert werden:

$$Q = \frac{\Delta p}{W} \quad \left(I = \frac{U}{R} \right). \quad (1.19)$$

Hierbei addieren sich die Leitungswiderstände in der Vakuumtechnik analog zu den Widerständen in der Elektrizitätslehre, nämlich nach den Kirchhoffschen Regeln. Damit gelten für eine Serienschaltung und Parallelschaltung jeweils

$$W_{\text{ges}} = \sum W_i \quad (1.20)$$

$$L_{\text{ges}} = \sum L_i. \quad (1.21)$$

Beim Berechnen des Leitwerts eines langen Rohrs ($l \gg r$) oder einer Blende ($l \ll r$) aus deren Abmessungen muss die Art der in ihnen vorliegenden Strömung berücksichtigt werden. Als das Hauptkriterium für diese Unterscheidung wird die mittlere freie Weglänge (siehe Abschnitt 1.3) genommen. Das Maß dabei ist, ob die mittlere freie Weglänge eines Gasteilchen sehr viel kleiner, vergleichbar oder sehr viel Größe als der Durchmesser der Leitung ist. Im Folgenden werden drei Strömungsarten für ein Rohr unterschieden (jeweilige Bereiche als grobe Abschätzung):

- Viskose oder Kontinuums-Strömung: $2 \cdot r \cdot p \gtrsim 0.5 \text{ mbar} \cdot \text{cm}$

Im Fall einer laminaren Kontinuumsströmung wird der Leitwert nach der Formel von Hagen-Poiseuille berechnet:

$$\frac{V}{t} = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot l}. \quad (1.22)$$

Dabei ist V das Volumen, t die betrachtete Zeit, r und l der Radius sowie die Länge des Rohres, $\Delta p = p_2 - p_1$ die Druckdifferenz zwischen den Rohrenden und η die Viskosität des Gases. Unter Verwendung von (1.4) kann die linke Seite der Gleichung mit einem Saugvermögensterm ersetzt werden.

Allerdings muss beachtet werden, dass nun statt p_a der mittlere Druck im Rohr $\bar{p}$ (mit $\bar{p} = 0.5 \cdot (p_1 + p_2)$) eingesetzt werden muss. Dies ist eine direkte Folge einer Integration, die in (1.22) bereits durchgeführt worden ist (i.e. Integration über die Rohrlänge).

Damit lässt sich der Leitwert L des Rohrs mit

$$L = \frac{\pi}{8} \cdot r^4 \frac{\bar{p}}{\eta \cdot l} \quad (1.23)$$

bestimmen.

- Knudsen-Strömung als Zwischengebiet: $0.01 \text{ mbar} \cdot \text{cm} \lesssim 2 \cdot r \cdot p \lesssim 0.5 \text{ mbar} \cdot \text{cm}$
Der Übergangsbereich zwischen Kontinuums- und Molekularströmung wird als Knudsen-Strömung bezeichnet. Wie häufig bei Übergangsbereichen, ist hier die genaue Berechnung der Größen nur mühselig möglich und wird an dieser Stelle nicht näher angegangen.
- Molekularströmung: $2 \cdot r \cdot p \lesssim 0.01 \text{ mbar} \cdot \text{cm}$
Im Fall einer Molekularströmung überwiegt die Anzahl der Stöße der Gasmoleküle an die Wände die der Gasteilchen untereinander, so dass der Gastransport nun diffusiv abläuft. Für den Leitwert L eines Rohrs gilt

$$L = \frac{8}{3} \frac{r^3}{l} \sqrt{\frac{\pi \cdot R \cdot T}{2 \cdot M}}, \quad (1.24)$$

mit der Gaskonstanten R , der Temperatur T und dem Molekulargewicht des Gases M . Diese Formel ist jedoch nur unter der Annahme von ideal glatten Innenwänden gültig, weshalb in der Praxis ein etwas kleinerer Leitwert erwartet wird.

Für eine Blende zwischen zwei Gebieten verschiedener Drücke findet ein effektiver Gastransport von $Q = \Delta p \cdot S = \Delta p \cdot F \cdot \bar{\mu}$. Dabei ist $F = \pi \cdot r^2$ die Querschnittsfläche der Blende und $\bar{\mu}$ die mittlere Geschwindigkeit der Gasteilchen. Für den Leitwert (Molekularströmung) gilt dann²

$$L = \frac{Q}{\Delta p} = F \cdot \frac{\bar{\mu}}{4}. \quad (1.25)$$

Mit der mittleren Geschwindigkeit aus der Maxwell-Boltzmann-Verteilung

$$\bar{\mu} = \sqrt{\frac{8}{\pi} \frac{R \cdot T}{M}} \quad (1.26)$$

kann der Leitwert für Luft bei $T = 293 \text{ K}$ abgeschätzt werden:

$$L \approx 362 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot r^2. \quad (1.27)$$

Die oben angegebenen Formeln zeigen, dass der Leitwert L vom Radius r in zweiter, dritter und vierter Ordnung abhängt. Für die Praxis bedeutet es, dass die Vakuumleitungen zur Verringerung des Leitungswiderstands W immer einen maximal möglichen Durchmesser haben sollten.

²Zu beachten ist der Faktor 0.25 , der dadurch entsteht, dass aufgrund von *Isotropie* nur die Hälfte der Teilchen durch die Öffnung strömt und nur der Geschwindigkeitsanteil *senkrecht zur Fläche* zur Bewegung beiträgt (weiterer Halb-Faktor).

1.8 Pumpentypen

Je nach Anspruch und Aufbau bedarf es unterschiedliche Vakuumpumpen. Je nachdem, welcher Druck in der Gesamtvakuumkammer bzw. in deren Teilen erreicht werden soll, können verschiedene Pumpen miteinander verknüpft werden, um diesen zu erreichen. Ein Stammbaum der Pumpen, geordnet nach ihrem Funktionsprinzip, ist in Abb. 1.2 dargestellt.

Es wird zwischen gasfördernden und gasbindenden Vakuumpumpen unterschieden. Während die Ersteren zeitlich unbeschränkt einsatzfähig sind, haben die Letzteren eine beschränkte Gasaufnahmekapazität und müssen deshalb nach einem bestimmten, anwendungsabhängigen Rhythmus regeneriert werden.

Gasfördernde Vakuumpumpen, auch Gastransferpumpen genannt, werden in Verdrängerpumpen und kinetische Vakuumpumpen eingeteilt. Die Ersteren fördern Gas aus abgesperrten Räumen in die Atmosphäre oder in eine nachgeschaltete Pumpstufe, welches entweder durch mechanischen Antrieb oder einen gerichteten und am Ende der Pumpstrecke kondensierten Dampfstrahl geschieht. Kinetische Vakuumpumpen nutzen das Prinzip der Impulsübertragung, um den Gaspartikeln eine bevorzugte Richtung zu geben und diese damit aus der Kammer zu befördern. Dies findet statistisch über Molekularbewegung statt. Ein Beispiel hierfür ist die Diffusionspumpe, welche eine Treibmittelvakuumpumpe ist. Öldiffusionspumpen funktionieren nach dem Prinzip einer Strahlpumpe, wobei hier die Strömungsrichtung der Teilchen durch das Vergasen des Diffusionspumpöls vorgegeben wird. Anschließend wird das Öl durch ein mit Wasser gekühltes Netz abgefangen. Solche Pumpen haben keine bewegliche Teile und sind daher sehr zuversichtlich und wartungsfreundlich. Jedoch muss das Öl regelmäßig ausgetauscht werden. Außerdem kann weder garantiert werden, dass das gesamte Öl abgefangen wird, noch wird das Volumen schnell abgepumpt.

Im Versuch kommen die Drehschieberpumpe (**DSP**) sowie eine Turbomolekularpumpe (**TMP**) vor. Die DSP wird als eine Vorpumpe verwendet und sorgt dafür, dass die Vakuumkammer auf Feinvakuumgebiet evakuiert wird. Danach schaltet sich die TMP an und bringt den Druck auf das Hochvakuumgebiet bzw. kann sogar bei geringen Leckraten das Ultravakuumgebiet erreichen. Die genaue Funktionsweise dieser Pumpen lässt sich in zahlreichen Quellen finden und soll als Vorbereitung auf den Versuch von Studierenden studiert werden. Das Grundprinzip wird aber in den Unterkapiteln 2.4 und 2.7 kurz wiedergegeben.

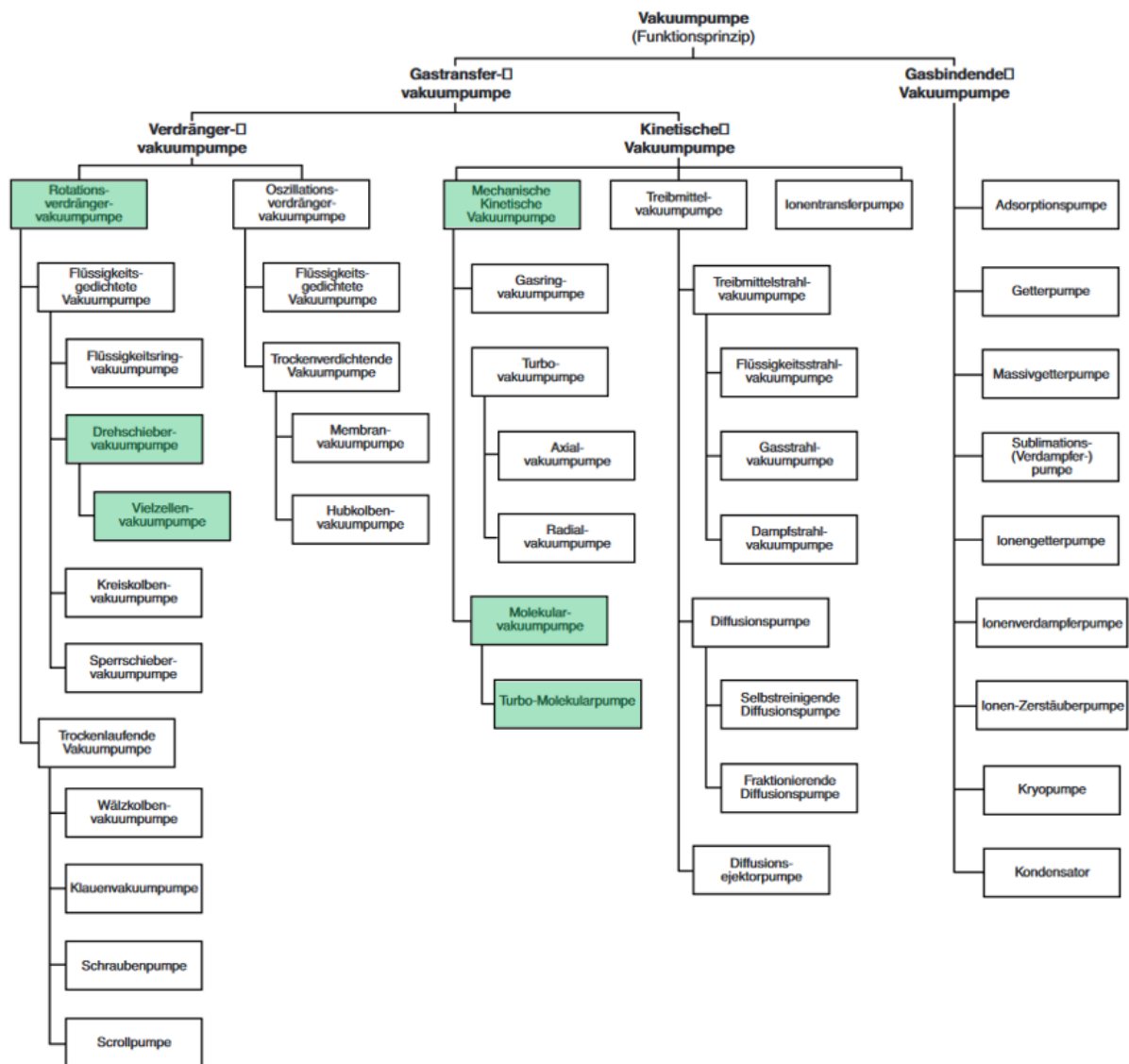


Abbildung 1.2: Ein Stammbaum der gängigen Vakuumpumpen. Die Vakuumpumpen sind hier nach ihrem Funktionsprinzip geordnet. Die für den Versuch relevanten Pumpen sind grün markiert. Abbildung unverändert übernommen aus [1].

1.9 Vakuummessgeräte

In der Vakuumtechnik werden zahlreiche Messgeräte verwendet, welche - abhängig vom Druckbereich - den in einer Vakuumkammer vorhandenen Druck messen. Im Folgenden werden die gängig verwendeten Vakuummessgeräte aufgelistet:

Flüssigkeitsmanometer:

- U-Rohr-Manometer

Die Messung der Druckdifferenzen findet hier durch die Verschiebung einer Flüssigkeitssäule innerhalb eines U-förmigen und mit einer Sperrflüssigkeit gefüllten Glasrohrs statt. Es gibt offene und geschlossene U-Rohr-Manometer. Die meisten Offenen arbeiten mit dem Umgebungsdruck auf einer Seite. Dabei ist der Umgebungsdruck idealerweise gleich dem Normaldruck, schwankt jedoch in Abhängigkeit der Höhe sowie Wetterbedingungen für jede einzelne Messung. Typischerweise können solche Manometer bis $\approx 10^{-1}$ mbar messen.

- Kompressions-Manometer (Kompressions-Vakuummeter, McLeod-Vakuummeter)

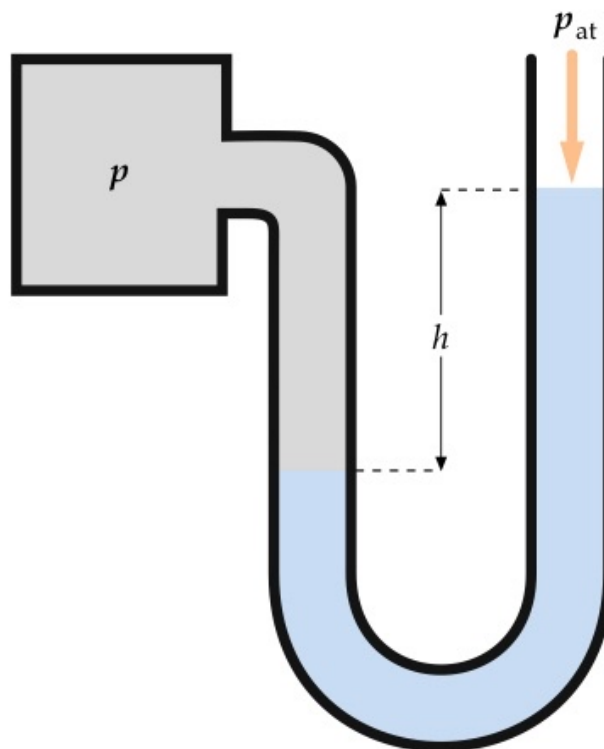


Abbildung 1.3: Zeichnung zur Darstellung der Druckmessung über den Höhenunterschied h bei einem offenen U-Rohr-Manometer. Die Differenz aus $p - p_{\text{at}}$ ergibt sich hierbei trivialerweise als ρgh . Die Zeichnung wurde aus dem folgenden Lehrbuch [19] genommen.

Mechanische Vakuummeter:

- Rohrfeder (Bourdonfeder, Bourdonrohr)

Die Rohrfeder kommt in den meisten mechanischen Druckmessgeräten zur Anwendung. Es werden Zug-, Druck-, Torsions- und Biegefedern unterschieden. Dabei basiert das Messprinzip auf einer durch eine Druckeinwirkung zustande kommende Ausdehnung einer metallischen Feder, welche aus einem Druck beständigen Material gefertigt sein muss, da das Messmedium in die Rohrfeder vordringt. In Abb. 1.4 ist ein solches Bourdonrohr dargestellt. Normalerweise werden Zeiger- und Federmanometer bei Druckbereichen bis $\approx 10^{-1}$ mbar verwendet. Für feinere Drücke ist die Materialausdehnung nicht geeignet, da diese ebenfalls Drücke bis 1 mbar aushalten muss.

- Kapselfedermanometer
- Kapazitätsvakuummeter
- Piezoelektrische Vakuummeter
- Reibungsvakuummeter mit einer rotierenden Kugel

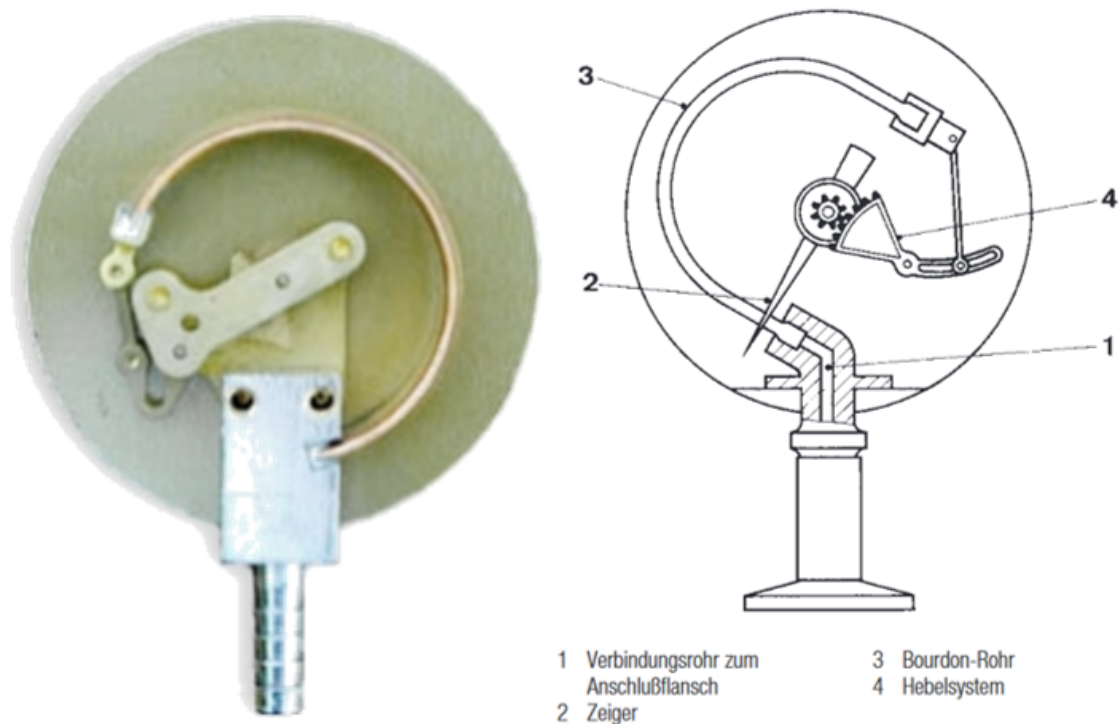


Abbildung 1.4: Ein typisches Bourdonrohr. Hier dargestellt sind **rechts:** ein Foto des inneren Aufbaus und **links:** eine Schnittzeichnung eines Bourdon-Federvakuummeters. Die Abbildungen unverändert übernommen aus [20] (links) und [1] (rechts).

Das Wärmeleitungsvakuummeter (auch als Pirani-Vakuummeter bekannt) wird für die Messung von Feinvakuum verwendet. Die Druckmessung findet über die Tatsache statt, dass die Wärmeleitfähigkeit von Gasen - in gewissen Grenzen - druckabhängig ist. Die Wärmeabgabe des Messdrahts und die zugrunde liegenden Prozesse sind in Abb. 1.5 dargestellt. Es wird die Leitfähigkeit bzw. der Widerstand des Messdrahts gemessen. Der Widerstand steigt dabei stärker als linear mit Temperatur an, da die durch die Temperatur erhöhte kinetische Energie der Teilchen zu mehr Phononen und damit Stöße führt. Jedoch sind Pirani-Vakuummeter nur bis $\approx 10^{-3}$ mbar verwendbar. Der Grund hierfür ist, dass die Wärmestrahlung, welche stets vorhanden ist und keine Teilchen braucht, an diesem Punkt die Wärmeleitung zwischen dem Draht und der äußeren Hülle dominiert.

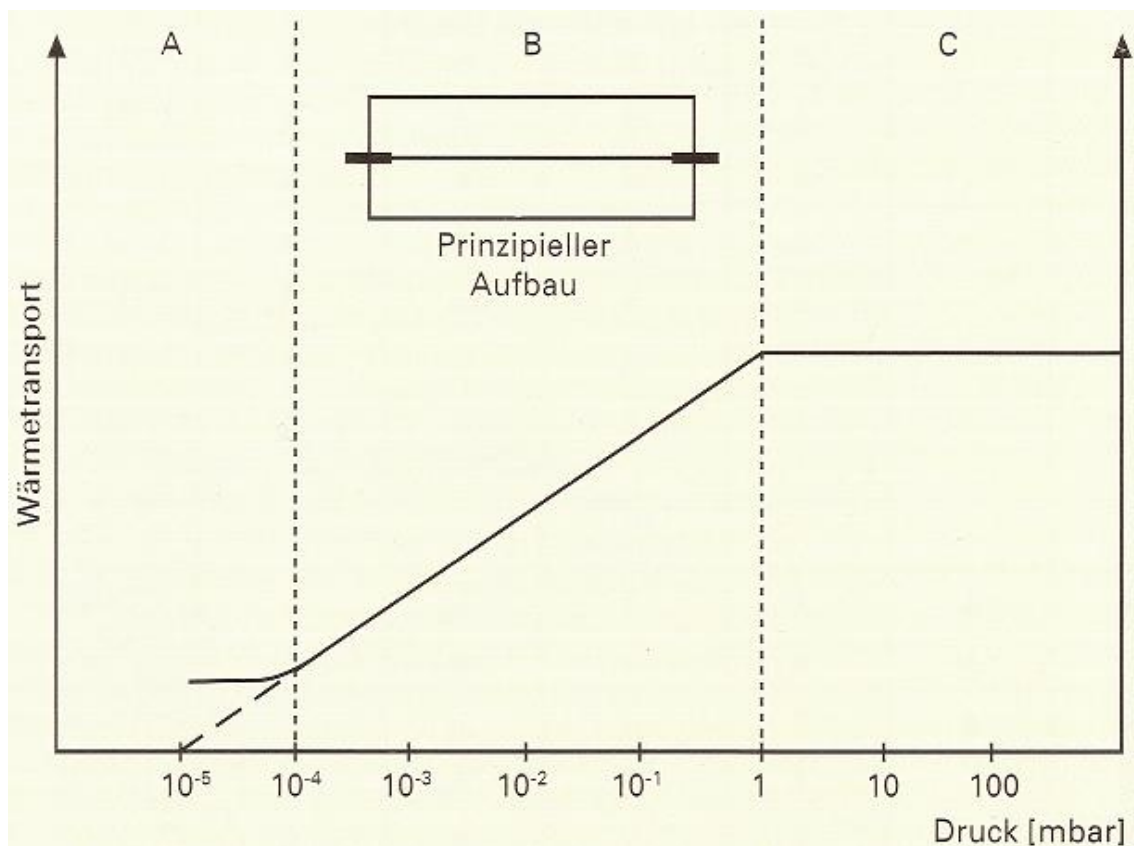


Abbildung 1.5: Das Funktionsprinzip eines Pirani-Messrohrs. Die Wärmeabgabe des Messdrahts erfolgt nach steigendem Druck über **A)** Wärmestrahlung des Drahtes und Wärmeableitung an den Drahtenden, **B)** druckabhängige Wärmeleitung durch das Gas und **C)** Konvektion. Dabei ist der Wärmeverlust des Heizdrahtes im Bereich (**B**) bzw. im Feinvakuumgebiet direkt proportional zum Druck. Somit kann über die elektrische Leistung, welche für die Aufrechterhaltung einer konstanten Temperatur des Drahts notwendig ist, der vorliegende Druck bestimmt werden. Abbildung unverändert übernommen aus [21].

Ionisations-Vakuummeter werden zur Druckbestimmung in Hoch- und Ultrahochvakuumbereichen verwendet. Das Messprinzip besteht darin, das vorhandene Restgas zu ionisieren und einen damit verbundenen Strom zu messen, welcher proportional zur Teilchenzahldichte ist. Die genaue Unterscheidung erfolgt nach der Umsetzung der Ionisierung:

- Kaltkathoden-Ionisationsvakuummeter
- Glühkathoden-Ionisationsvakuummeter

Bei Glühkathoden-Ionisationsvakuummeter gibt ein heißer Draht Elektronen ab, welche durch eine weitere Elektrode beschleunigt werden (typischerweise $100 - 200$ eV). Diese Elektronen ionisieren anschließend Teilchen durch Stöße. Die Anzahl der ionisierter Teilchen und damit der Druck ist über eine Kathode bestimmbar. Dieser Aufbau funktioniert bis $\approx 10^{-8}$ mbar. Hier fängt die Röntgen-Strahlung zu dominieren, welche gegen die äußere Kathode prallt. Dadurch kommt es zum starken Photoeffekt, welcher die Messung zum Stillstand bringt. Außerdem kommt bei Glühkathoden das Problem hervor, dass beim Einschalten diese sich sehr schnell auf ≈ 3000 K erwärmt. Dabei erwärmt sich die Umgebung mit, wodurch Zusatzstrahlung und damit eine Verfälschung des gemessenen Drucks entsteht. Dieser Effekt wird kleiner, je mehr sich ein Gleichgewicht einstellt. Um niedrigere Drücke messen zu können, wird dasselbe Prinzip mit einem anderem Aufbau verwendet. Hier ist die Beschleunigungskathode außen und der Auffänger wird sehr dünn gewählt und befindet sich in der Mitte des Vakuummeters, wodurch der Photoeffekt minimiert wird. Solche Anordnungen können typischerweise bis 10^{-11} mbar messen, wobei es heutzutage schon Aufbauten gibt, welche bis $10^{-14} - 10^{-15}$ mbar gehen. Dazu müssen zum einen die Lecks minimal gehalten und zum anderen die Aufbauten ausgeheizt werden, wozu beispielsweise keine Gummi- sondern nur Kupferdichtungen verwendet werden müssen.

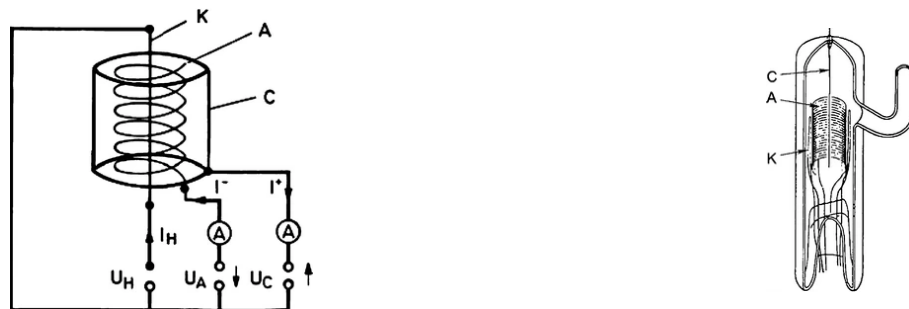


Abbildung 1.6: Der schematische Aufbau eines Glühkathoden-Ionisationsvakuummeters (links). Eine Heizspannung liefert den Heizstrom (mit H indizierte Größen) für die Glühkathode (K). Die ausgelösten Elektronen werden zur Anode (A) beschleunigt und ionisieren auf ihrem Weg das Restgas, welches dann zum negativ geladenen Collector (C) gezogen wird und einen gemessenen Strom erzeugt. Die Verbesserung nach Bayard-Alpert (rechts) tauscht Kathode und Collector, um durch die geringere Auffangfläche die Röntgeneffekte zu minimieren. Abbildungen übernommen aus [22].

1.10 Vakuum-Apparaturen und Symbole in der Vakuumtechnik

In diesem Abschnitt werden einige bei Vakuumaufbauten häufig verwendete Apparaturen aufgezählt. Die Studierenden sollen sich mit diesen vor dem Beginn des Versuchs vertraut machen.

- Typische Werkstoffe
 - Edelstähle (kohlenstoffarme Materialien)
 - Messing (nicht für UHV, da beim Heizen Zink ausdampft)
 - Glas (Sichtfenster, elektrische Durchführungen, etc.)
 - Keramik (z.B. Oxidkeramiken wie Al_2O_3)
- Flanschsysteme
 - Kleinflansch (KF-Flansch)
 - Klammerflansch (K-Flansch)
 - Conflat-Flansch (CF-Flansch)
 - Schraubflansch
- Dichtungen
 - Gummi-elastische Kunststoffe (wie Viton, Perbunan, etc.)
 - Metaldichtungen (Al, Cu, Ag, oder In für tiefe Temperaturen), für UHV entgaste Metalle
 - Schliff mit Vakuumfett (z.B. bei Glasapparaturen wie Exsikkatoren)
- Verbindungen
 - Metall-Metall-Verbindung durch Schweißen
 - Metall-Metall-Verbindung durch Löten (Hart- oder Weichlöten)
 - Kleben (Epoxidkleber)
 - Metall-Glas-Verbindung durch Aufschmelzen von Glas und Wolframoxid
 - Metall-Keramik-Verbindung durch Hartlöten
 - Aufsprengen (Kaltverschweißen)

Wie sonst auch der Fall, wird in der Vakuumtechnik eine Symbolik für Diagramme und Schaltbilder eingeführt. Dazu wird ein deutschsprachiges Beiblatt während des Versuchs zur Verfügung gestellt. Zusätzlich findet sich eine digitale englischsprachige Version des Beiblatts [23] auch auf den folgenden Seiten wieder.

	Vacuum pump, general
	Piston vacuum pump
	Diaphragm vacuum pump
	Rotary positive displacement pump **
	Rotary plunger vacuum pump **
	Sliding vane rotary vacuum pump **
	Rotary piston vacuum pump **
	Liquid ring vacuum pump **
	Roots vacuum pump **
	Turbine vacuum pump, general
	Radial flow vacuum pump
	Axial flow vacuum pump
	Turbomolecular pump
	Ejector vacuum pump **
	Diffusion pump **
	Adsorption pump **
	Getter pump
	Sputter-ion pump
	Cryopump
	Scroll pump **
	Evaporation pump

	Vacuum chamber
	Vacuum bell jar
	Condensate trap, general
	Condensate trap with heat exchanger (e.g. cooled)
	Gas filter, general
	Filtering apparatus, general
	Baffle, general
	Cooled baffle
	Cold trap, general
	Cold trap with coolant reservoir
	Sorption trap
	Throttling
	General symbol for vacuum **)
	Vacuum measurement, vacuum gauge head **)
	Vacuum gauge, operating and display unit for vacuum gauge head **)
	Vacuum gauge, recording **)
	Vacuum gauge with analog measured-value display **)
	Vacuum gauge with digital measured-value display **)
	Measurement of throughput

	Flange connection, general
	Bolted flange connection
	Small flange connection
	Clamped flange connection
	Threaded tube connection
	Ball-and-socket joint
	Spigot-and-socket joint
	Taper ground joint connection
	Intersection of two lines with connection
	Intersection of two lines without connection
	Branch-off point
	Combination of ducts
	Flexible connection (e.g. bellows, flexible tubing)
	Linear-motion leadthrough, flange-mounted
	Linear-motion leadthrough, without flange
	Leadthrough for transmission of rotary and linear motion
	Rotary transmission leadthrough
	Electric current leadthrough

	Manual operation
	Variable leak valve
	Electromagnetic operation
	Hydraulic or pneumatic operation
	Electric motor drive
	Weight-operated
	Shut-off device, general
	Shut-off valve, straight-through valve
	Right-angle valve
	Stop cock
	Three-way stop cock
	Right-angle stop cock
	Gate valve
	Butterfly valve
	Nonreturn valve
	Safety shut-off valve

Abbildung 1.7: Diverse Schaltbildsymbole für unter anderem Vakuumpumpen, -messgeräte und Zuleitungen (i.e. Rohre, etc)

2 Versuchsaufbau und Methoden

Dieses Kapitel beinhaltet Informationen über den experimentellen Aufbau der Hauptvakuumkammer, welche während der Versuchsdurchführung verwendet wird, sowie die Vorstellung einiger für die Durchführung hilfreichen Methoden.

2.1 Anmerkungen zur Sicherheit und Wartung

Beachten Sie, dass Sie während dieses Versuchs unter anderem mit Hochvakuum arbeiten. Machen Sie sich deshalb stets Gedanken darüber, welche mögliche Szenarien und vor allem deren Folgen Sie durch falsche Handlungen hervorrufen können, wie z.B. in Abb. 2.1 dargestellt. Wie kann es dazu kommen und welches Verhalten soll vermieden werden, falls

- die Turbomolekularpumpe ohne der Vorpumpe betrieben wird.
- ein Ventil schlagartig geöffnet wird.
- das vertikale Rohr sich vom Vakuumaufbau löst.
- eine Gasflasche unbemerkt geöffnet gelassen wird.
- die Heliumflasche sowohl geöffnet als auch ungeöffnet umfällt.
- eine neue Kammer ans Vakuum angeschlossen wird, wobei diese an das Vakuumsystem nicht passt.

Die Folgen von Missgeschicken sind nicht immer direkt absehbar. Bitte fragen Sie bei Unsicherheiten die tutorierende Person.



Abbildung 2.1: Ein implodierendes Vakuumrohr. Abbildung unverändert übernommen aus [24].

Vor dem Beginn des Versuchs sollte der Ölstand in den Vorpumpen überprüft werden und die Abluftschläuche sollen frei sein. Beim Beenden des Versuchs soll der Aufbau belüftet hinterlassen werden, wobei alle Geräte abgestellt und vom Netz getrennt, sowie alle relevanten Ventile geschlossen sein sollen.

2.2 Hauptpumpstation

Dieser Abschnitt enthält Abbildungen des von Ihnen verwendeten Versuchsaufbaus. Abb. 2.2 zeigt den Gesamtaufbau der Pumpstation und Abb. 2.3 beinhaltet die dazugehörigen Messgeräte. Zum besseren Verständnis sind die wichtigen Bauteile in den Abbildungen markiert und in den jeweiligen Bildunterschriften benannt.

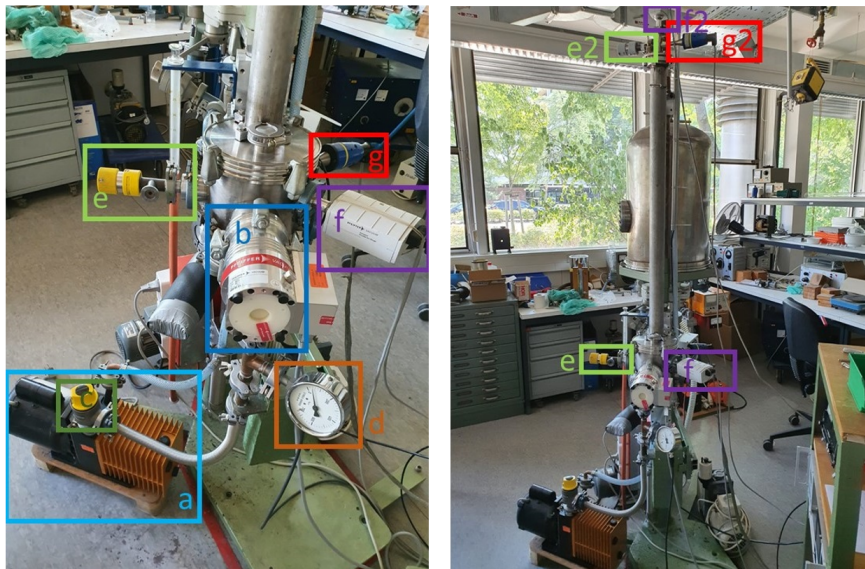


Abbildung 2.2: Der Vakuumbehälter mit **links:** Pumpen und Messgeräten sowie **rechts:** angeschlossenem Rohr. Dabei ist **a)** die Vorpumpe, **b)** die TMP (Pfeiffer HiPace 80 DN63 ISO-K), **c)** das Zwischenventil zwischen den beiden Pumpen, **d)** das Manometer, **e)** bzw. **e2)** das untere bzw. obere Belüftungsventil, **f)** und **f2)** das untere und obere Glühkathoden-Manometer (Pfeiffer IMR 265) und **g)** sowie **g2)** das untere sowie obere Pirani-Manometer.



Abbildung 2.3: Der Pumpstand für den Vakuumbehälter. Hier ist **b2)** die Steuerung der Turbomolekularpumpe, **f3)** die Anzeige der Manometer (kann zwischen Unterem und Oberem umgeschaltet werden) und **g3)** die analoge Anzeige des Manometers.

2.3 Drehschieberpumpe (DSP)

Sie sollen sich mit der Funktionsweise einer DSP vertraut machen. Der Arbeitszyklus einer solchen Pumpe lässt sich in Ansaugen, Abschließen, Verdichten und Ausstoßen eingliedern. Ein Schaubild einer Drehschieberpumpe ist in Abb. 2.4 dargestellt. An diesem sollten die vier Stadien des Pumpzyklus verdeutlicht werden.

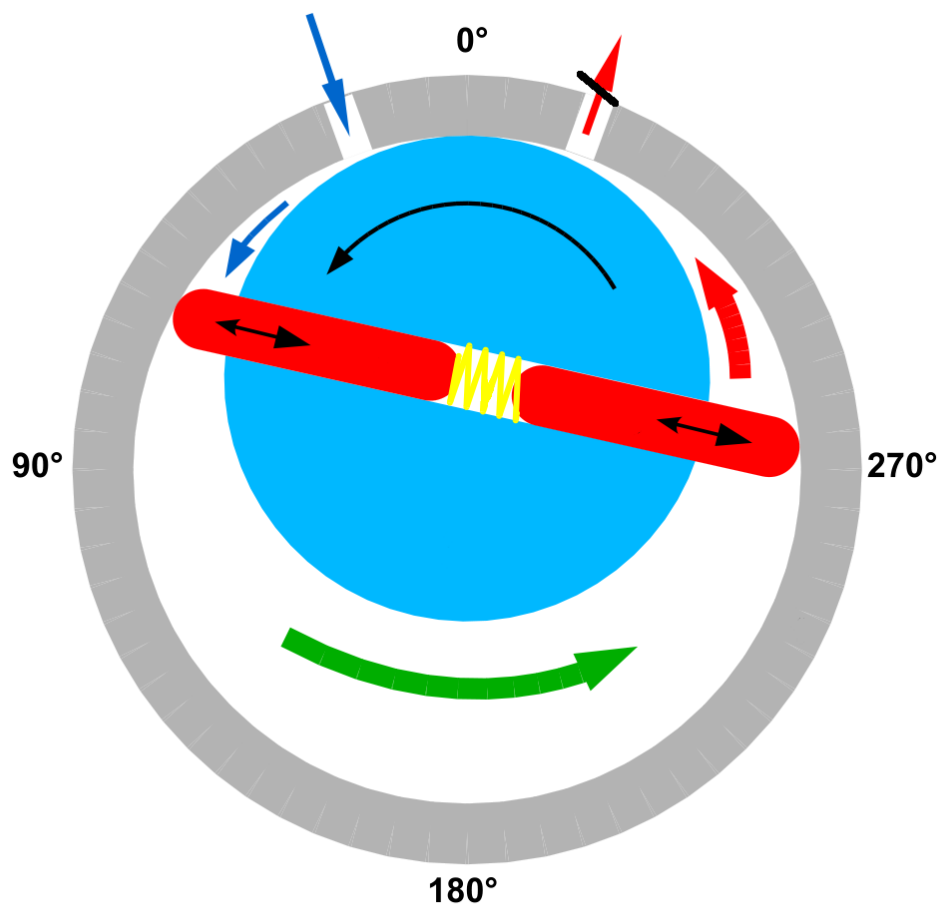


Abbildung 2.4: Schaubild einer DSP. Abbildung unverändert übernommen aus [25].

Dieser Pumpentyp ist einer der gängigsten im Grob- und Feinvakuumbereich und dient als Vorpumpe für Hoch- und Ultrahochvakuumumpumpen, welche nicht gegen den Atmosphärendruck arbeiten können. Dabei kann eine einzelne Pumpe Luft von 1 bar auf 10^{-3} mbar (d.h. Kompressionsverhältnis von 10^6) nicht komprimieren. Deshalb werden Pumpen stets in Reihe geschaltet. Im Versuch liegt eine zweistufige DSP vor. Dabei ist zu beachten, dass mehrere solche Pumpen über Schläuche hintereinander zu verbinden nicht sinnvoll ist, da die mittlere freie Weglänge zu hoch wird. Stattdessen werden weitere Pumpen - wie die TMP - verwendet.

2.3.1 Der Gasballast einer DSP

Als *Gasballast* wird eine Einrichtung bezeichnet, durch welche Luft oder ein anderes nicht kondensierendes Gas in eine Vakuumpumpe eingelassen wird. Beim vorliegenden Versuchsaufbau wird schlicht Umgebungsluft verwendet. Der Gasballast findet Anwendung, wenn in einer Pumpe Dampf (z.B. durch Wasserreste) gefördert wird, welcher bei den vorkommenden Temperaturen aufgrund von Kompression kondensieren würde. Dadurch trägt der Wasserdampf kaum bis gar nicht mehr der Druckerhöhung bei, weshalb das Gas erst bei höheren Verdichtungen - wenn überhaupt - ausgelassen werden kann.

Der Gasballast ermöglicht das Einstromen von Luft durch eine zusätzliche Öffnung am Auslassventils *bevor* die Dampfkondensation eintritt. Damit wird der Dampf mit dem Ballastgas ausgestoßen. Dadurch steigt jedoch der erreichbare Basisdruck (siehe Abschnitt 1.2) einer Vakuumpumpe geringfügig an.

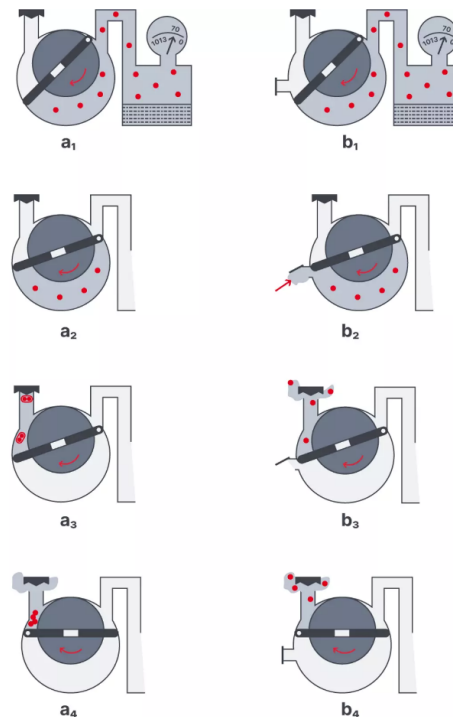


Abbildung 2.5: Die vier Arbeitszyklusabschnitte einer DSP einmal ohne Gasballast- (links) und einmal mit Gasballastbetrieb (rechts). Es ist ersichtlich, dass sich das Ventil (i.e. in der Zeichnung die umgedrehte Krone am Ausschluss) wegen des Unterdrucks nicht öffnen lässt, bis das Wasser bereits kondensiert ist. Dadurch ist es möglich, dass sich das Kondenswasser mit dem Schmieröl vermischt und zu Betriebsbeeinträchtigungen führt. Durch Verwendung eines Gasballasts wird der Totaldruck erhöht, sodass das Ausschlussventil geöffnet wird, bevor das Wasser kondensieren kann.

Anmerkung: Bei a₃ und b₃ ist ein Zeichenfehler, der Rotor sollte natürlich wie in a₄ und b₄ bereits um 180° weiter sein. Bild auffindbar unter [26].

2.4 Molekular- und Turbomolekularpumpe (TMP)

Während der Enddruck einer typischen DSP auf den Feinvakuumgebiet beschränkt ist, werden für einen besseren Druck Hochvakuumumpen wie eine TMP verwendet. Ist die freie Weglänge groß genug (typischerweise einige cm), so sind für den Druck nur noch Wandstöße relevant. Falls die Wand in einer geeignete Art und Weise schnell genug, d.h. mit thermischer Geschwindigkeit bewegt wird, so können Gasteilchen befördert bzw. gepumpt werden. Zunächst wird eine Vorpumpe gebraucht, um die Teilchendichte auf nötige freie Weglänge zu reduzieren. Das Prinzip der sich schnell bewegenden Wände wird bei Holweck- oder Gaedepumpen realisiert. Die TMP arbeitet dagegen nach dem 'Tischtennisschlägerprinzip'. Eine Darstellung einer solchen Pumpe lässt sich in Abb. 2.7 sowie in zahlreichen Wandtafeln und Anschauungsmaterialien im Versuchsraum finden.

Die Funktionsweise besteht darin, dass zwischen den Rotoren und der Teilchen ein Impulsübertrag stattfindet, so dass der Verteilungsfunktion der Bewegung von Letzteren eine Vorzugsrichtung vorgegeben wird. Zu beachten ist, dass hierbei Moleküle nicht 'angesaugt' werden, sondern lediglich über statistische Bewegung in die Rotoren gelangen.

Die im Versuch eingesetzte Pumpe ist eine Hybridpumpe, welche aus einer Turbo- und Gaedestufe besteht. Das kommt daher, dass der Übergangsbereich zwischen $1 \cdot 10^{-1}$ und $1 \cdot 10^{-3}$ mbar für eine reine Turbopumpe problematisch ist. Deshalb wird eine zusätzliche Drag- bzw. Molekularpumpe zwischen der TMP und der Vakuumkammer verwendet, welche gerade in diesem Druckbereich effizient ist. Diese verfügt über eine spiralenförmige Einbuchtung, welche die Teilchen entlang der rotierenden Spirale in Richtung der TMP lenkt.

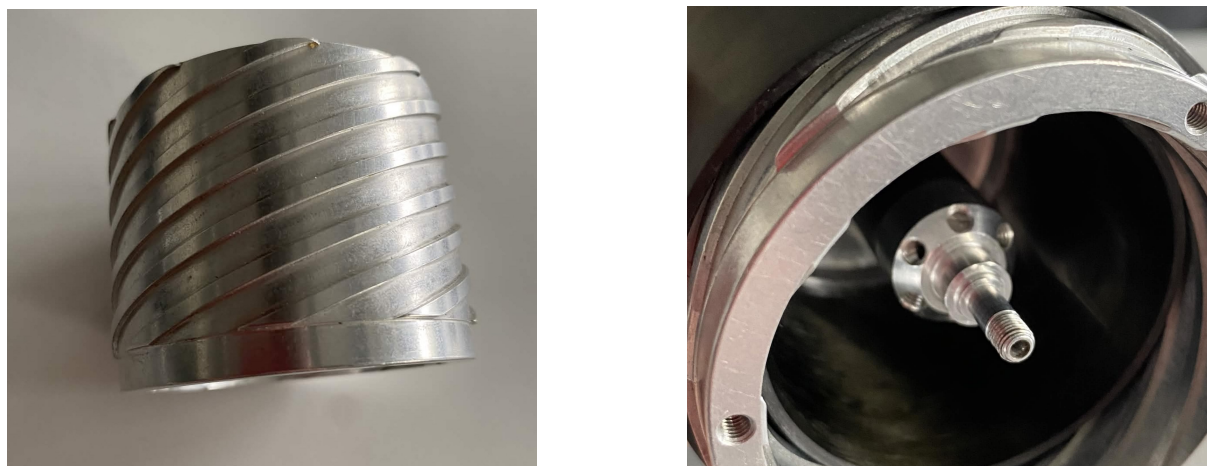


Abbildung 2.6: Die spiralenförmigen Einbuchtungen der vorgeschalteten Dragpumpe/Gaedestufe (links). Zwischen der Wand und der Dragpumpe ist nahezu kein Platz (rechts). Dadurch kommt es zu gezielten und gerichteten Wandstößen. Das ermöglicht das Abpumpen bis zum effektiven Bereich der Turbopumpe. Die Bilder zeigen hierbei ein verkleinertes Vorzeigeobjekt, welches nur zu Präsentationszwecken dient und vor Ort im Versuchsraum wiedergefunden werden kann.



Abbildung 2.7: Eine geöffnete 10-stufige TMP. Am oberen Ende befindet sich die Saugseite mit einem Hochvakuumflansch und dem Magnetlager, unten lässt sich der Elektromotor erkennen. Abbildung unverändert übernommen aus [27].

2.5 Pumpstand hoch- oder herunterfahren

Um den Pumpstand (DSP und TMP) hochzufahren, sollen folgende Schritte in dieser Reihenfolge durchgeführt werden:

- DSP einschalten und nach kurzer Zeit das Verbindungsventil aufdrehen.
- Abwarten, bis der Druck unter etwa $5 \cdot 10^{-1}$ mbar fällt.
- TMP über den Controller einschalten.

Zu beachten ist, dass wegen des desorbierenden Wassers von den Innenflächen der Vakuumkammer (Pseudoleck) das Abpumpen auf einen guten Druck (hier: 10^{-6} mbar Druckbereich) einige Zeit dauert. Deshalb muss nach jeder Öffnung der Vakuumkammer etwas gewartet werden..

Um den Pumpstand wieder auszuschalten, führen Sie folgende Schritte aus:

- Schalten Sie die TMP aus.
- Belüften Sie die Kammer vorsichtig. Dazu öffnen Sie das innere und dann das äußere Belüftungsventil. Warten Sie ab, bis das Pirani-Vakuummeter den Druck in der Mitte des roten Druckbereichs anzeigt. Hier können Sie etwas stärker belüften. Alternativ können Sie bei Versuchsteilen, bei welchen Sie den Druck erhöht haben, die Ventileinstellung verwenden, bei welcher die laufende Pumpe abgebremst worden ist.
- Warten Sie, bis die Drehzahl auf ca. 100 Hz kommt. Hier können Sie das Eckventil (Verbindungsventil zwischen TMP und DSP) schließen und anschließend die DSP runter fahren.
- Belüften Sie nun die Kammer über das Belüftungsventil, indem Sie dieses weiter aufdrehen.

2.6 Aufnahme und Darstellung/Plot der Drücke

Für die Aufnahme der Druckbereiche im Rezipienten ('unten') bzw. für die späteren Hauptversuchsteile am oberen Ende eines Widerstands ('oben') werden die angeschlossenen Manometer, welche als f und g in Abb. 2.2 eingezeichnet sind, ausgelesen und manuell auf f3 in Abb. 2.3 angezeigt. Das Anzeigegerät ist über ein Verbindungskabel mit dem Computer im Raum verbunden. Auf dem Computer sollen die zwei zugehörigen Jupyter Konfigurationen (auffindbar auf der Taskleiste unten) gestartet werden. Anschließend ist das Notebook mit dem Subskript 'measure' zu starten. Sie werden sehen, dass die letzte Zeile dauerhaft am Laufen sein wird. Ab jetzt werden Ihnen alle 10 Sekunden lang die Drücke ausgelesen und in einer TSV-Datei auf dem Jupyter Server gespeichert. Die TSV-Datei finden Sie unter Ihrem Versuchsdatum im Dateinamen wieder. Lassen Sie für alle Messungen den Computer und das Programm eingeschaltet. Die Monitore können Sie über Nacht (bei eingeschaltetem Computer und Programm!) ausschalten. Um Strom zu sparen, dürfen Sie auch das DualGauge über Nacht (bei laufender Pumpe!) ausschalten.

Um die gemessenen Daten in einem interaktiven Plot darzustellen, dürfen Sie das zugehörige Notebook mit dem Subskript 'plot' verwenden. Hierbei müssen Sie den Dateinamen Ihrer Datei in einer der Zeilen einmal ersetzen. Anschließend können Sie das Notebook durchlaufen lassen und sollten einen Plot Ihrer gemessenen Daten zu Gesicht bekommen. Es ist möglich, den Graphen zu verschieben und zu zoomen. Klicken Sie hierfür auf das Pfeilkreuz in der Aktionsleiste links im Plot. Mit der linken Maustaste können Sie nun den Graphen in der Ebene verschieben. Mit der rechten Maustaste initiieren Sie eine Zoomaktion. Wenn Sie dabei mit der Maus 'nach rechts' fahren, zoomen Sie in die x -Dimension hinein. Fahren Sie hingegen 'nach oben' zoomen Sie in die y -Dimension. Auch das Abspeichern Ihrer gewählten Plotbereiche ist möglich. Klicken Sie hierfür einfach auf das letzte Kästchen in der Aktionsleiste.

2.7 Glasbläserei

Glas ist heutzutage wegen seinen Eigenschaften äußerst wichtig. Es ist *amorph* kristallin und sehr *schlecht wärmeleitend*. Es besteht aus Siliziumdioxid mit einem kleinen Anteil von vielfältigen Metallmischungen.

Im Rahmen dieses Versuchs wird Glasbläserei vor allem dazu verwendet, dünne Kapillare aus Glas für die Lecksuche (siehe nächstes Unterkapitel 2.8) zu ziehen. Dies sollte mit Gefühl und vorsichtig gemacht werden. Zum einen werden Sie mit einem mit Propan arbeitendem Gasbrenner arbeiten. Zum anderen arbeiten Sie mit Glasröhren, welche zunächst mit einem speziellen Glasmesser angeschnitten und mit Hand gebrochen werden.

Der Glasstab wird in der Mitte am Gasbrenner mit Schwenkbewegungen aufgewärmt und schnell auseinander gezogen, so dass ein dünner Faden zwischen den beiden Teilen entsteht. Alternativ können Sie den Glasstab erwärmen und anschließend rein blasen, um eine kugelförmige Glasform zu erhalten. Achten Sie darauf, dass das Glas dabei beim zu starken Blasen platzen kann. Das Tragen einer Schutzbrille ist daher während dieses Versuchsteil Pflicht! Außerdem sollten Sie auf scharfe Kanten an Glasstücken achten, da diese eine potentielle Verletzungsgefahr darstellen. Bedenken Sie, dass obwohl Glas ein sehr schlechter Wärmeleiter ist, es trotzdem eine nicht zu vernachlässigende Wärmekapazität hat, so dass ebenfalls Verbrennungsgefahr besteht.

Sie werden von der tutorierenden Person zur Glasbläserei eingewiesen und vorgeführt bekommen, wie eine solche Kapillare gezogen wird. Falls Sie Interesse haben, selbst etwas aus Glas zu blasen, können Sie dies gern mitteilen und im Anschluss nach dem Versuch Euch daran versuchen.

2.8 Lecksuche

Die Lecksuche gehört zu den (oftmals leidigen) Pflichten in der Vakuumtechnik. Lecks können an verschiedenen Stellen einer Vakuumapparatur auftreten wie Flansche, Schweißnähte oder Lötstellen. Ebenfalls können sie durch Materialfehler, Risse, etc. zustande kommen. Dazu kommen die 'Lecks von Innen' wie z.B. das Ausgasen von Metallen oder Kunststoffen. In diesem Versuch werden Lecks untersucht, welche ein 'Loch', also eine Verbindung zwischen Außenatmosphäre und dem Inneren der Vakuumkammer darstellen.

Im ersten Teil der Lecksuche wird ein Heliumlecksucher verwendet, welches das empfindlichste Gerät zur Suche und Lokalisierung von Lecks ist. Er arbeitet als eine Art künstliche Nase, welche sensitiv auf Helium ist. Der Lecksucher kann direkt an dem zu messenden Objekt angeflanscht werden. Wird Helium auf das Leck gesprüht, wird dieses dadurch in das Innere der Vakuumkammer gezogen und massenspektrometrisch nachgewiesen. Dazu liegt ein Magnetfeld senkrecht zur Bewegungsrichtung des Heliums vor, welcher als eine Beschleunigungsspannung zum Fokussieren des Heliumionenstrahls durch die Blenden des Massenspektrometers fungiert. Der Lecksucher arbeitet als ein *massensensitives Heißkathoden-Ionisation-Vakuummeter*. Je nach Art und Anordnung der Hochvakuumpumpe in der Lecksuche wird zwischen Instrom- sowie heute gängigeren Gegenstromlecksuchern unterschieden. Diese Methoden sind deutlich genauer als beispielsweise die Überlecksuche, welche die gängigste Art der Lecksuche ist. Im Versuch wird ein Eigenbau-*Gegenstromlecksucher* verwendet. Hierbei muss das Helium *gegen die Pumpenrichtung* zum Massenspektrometer gelangen. Der Aufbau ist in Abb. 2.8 dargestellt. Wird der Eingang des Lecksuchers mit einer Durchflussimpedanz, welche beispielsweise als eine Kapillare an einem Schlauch ausgeführt sein kann, verbunden, so kann ortsgebunden nach Heliumeintrittspunkten gesucht werden. Ein solches Gerät wird als Schnüffler bezeichnet. Wird das zu untersuchende Gefäß mit Helium unter Überdruck geflutet, so tritt Helium an den Leckstellen aus und kann damit mit dem Schnüffler detektiert werden.

Im zweiten Teil dieses Versuchsabschnitts wird ein künstliches Leck hergestellt, um Lecksuchtechniken anzuwenden. Dazu werden Sie durch die tutorierende Person eingewiesen. Das Ziel ist es, aus einem Glasrohr eine sehr dünne Kapillare über einer Gasbrennerflamme zu ziehen und diese schließlich als ein Leck zu verwenden.

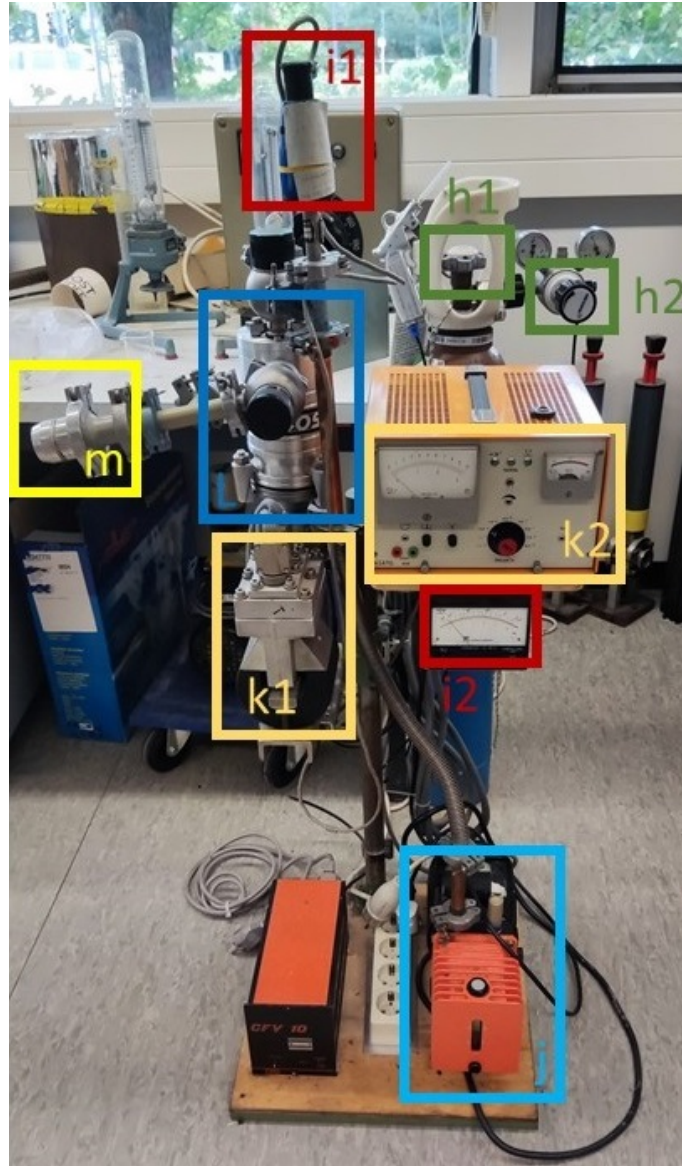


Abbildung 2.8: Der Lecksuchaufbau an der zweiten Vakuumkammer. Dieser besteht aus **h1**) dem Haupt- und **h2**) dem Dosierventil der Gasflasche, **i1**) einem Pirani-Manometer mit Anzeige, **j**) einer Vorpumpe, **k2**) einem Spektrometer mit dazugehörigen Anzeige, **i**) einer TMP und **m**) einem Leckbauteil.

3 Versuchsdurchführung

3.1 Allgemeines

- Beachten Sie, dass zu einer Versuchsdurchführung sowie deren Auswertung ein Laborbuch bzw. Messprotokoll, aus welchem die Messschritte sowie Messdaten (mit Bemerkungen) ersichtlich sind, dazugehört! Das Laborbuch bzw. Messprotokoll soll während der Durchführung angelegt und anschließend bei der Auswertung vorgelegt werden. Fotos vom Aufbau sowie den einzelnen Geräten sind in der Auswertung ebenfalls erwünscht. Vergessen Sie nicht, sich am Ende die Druckaufzeichnungen am Versuchscomputer zuschicken zu lassen!
- Machen Sie sich zu Beginn mit dem Versuchsaufbau der Pumpstation vertraut. Fertigen Sie dazu und im Verlauf des Versuchs Blockschaltbilder der von Ihnen verwendeten Aufbauten. Ein Beispiel hierfür finden Sie in Abb. 3.1.
- Machen Sie sich mit den verwendeten Geräten und Vakuumdichtungen vertraut. Dies ist für die spätere Beurteilung von Fehlern sowie Verbesserungsmöglichkeiten wichtig. Geben Sie in der Ausarbeitung eine kurze Beschreibung der im Versuch verwendeten Messgeräte (Manometer, etc.).
- Fehlerabschätzungen und -berechnungen gehören zu jeder Messung dazu.
- Sie **müssen** die letzten drei Vorbereitungsfragen im nachfolgenden Kapitel 4 vollständig bearbeitet haben, da diese explizite Erwartungs-/Vergleichshorizonte für die nachfolgende Durchführung beinhalten!
- Jede Studierendengruppe soll für die Abschlussdiskussion eine Ausarbeitung, welche das Laborbuch sowie die Auswertung beinhaltet, anfertigen. Jede/r Studierende soll eine eigene kritische Würdigung abgeben, welche aus der Diskussion zum Versuch und zu den Ergebnissen, sowie einer Fehlerbetrachtung besteht. Die kritische Würdigung kann gern Feedback zum Versuch sowie der tutorierenden Person beinhalten.

3.2 Vorversuch

Folgende Versuchsreihe soll den Studierenden einen besseren Überblick der Vakuumkammer und deren Funktionsweise geben sowie die Studierende mit der Apparatur anvertrauen. Da die Versuchsapparatur durch die Nutzung der Vorgruppen gegebenenfalls noch mit einem Halterrohr und zwei Dosierventilen aufgebaut ist, bietet es sich je nach geplanter Durchführung an, die Reihenfolge der Aufgaben leicht zu variieren (so können zum Bsp. ein Leitwertshauptversuchsteil und/oder der zweite Vorversuchsteil vor dem Umbauen durchgeführt werden). Die logische Reihenfolge der Durchführung der Aufgaben ist hierbei ganz dem didaktischen Plan der Dozierenden überlassen.

3.2.1 Erste Evakuierung mit der Drehschieberpumpe und Abpumpen kondensierbarer Dämpfe

Das Abpumpen kondensierter Dämpfe, z.B. Wasserdampf, ist mit einer DSP problematisch, da bei der Kompression des Dampfes dieses sich verflüssigen kann (siehe Abschnitt 2.3.1). Daher kann die Pumpe den Dampf nicht über den Atmosphärendruck komprimieren und folglich nicht ausstoßen. Um dies zu beobachten, füllen Sie eine Aluminiumschale mit einigen ml Wasser und stellen diese in den Rezipienten. Schauen Sie dafür zuerst, dass die Apparatur vollständig belüftet ist (siehe Röhrenfedermanometer) und entfernen Sie dann den KF50-Blindflansch an der Oberseite der Vakuumkammer. Der dazugehörige Aufbau kann aus Abb. 3.1 entnommen werden.

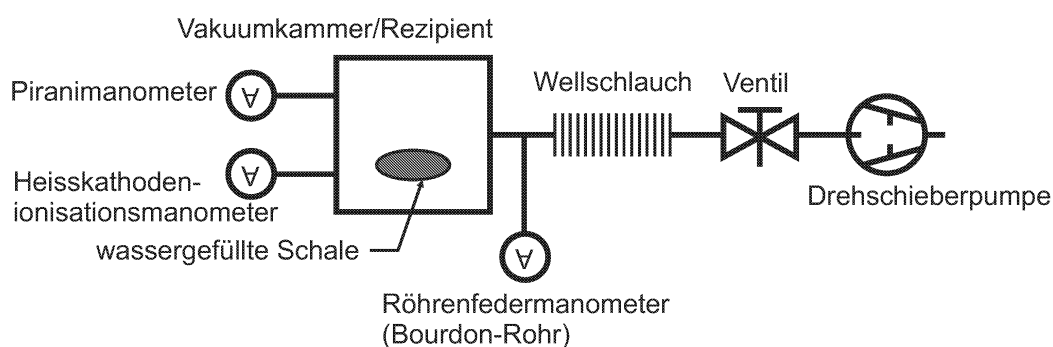


Abbildung 3.1: Ein Vakuum-Blockschaltbild zum Versuchsteil 3.2.1.

Falls noch das Halterohr (Aufbau wie in Abb. 3.3) auf dem Rezipienten steckt, muss die Apparatur zuvor umgebaut werden³. Wenn die Apparatur vollständig belüftet ist, entfernen Sie hierfür vorsichtig das Halterohr (sowie Blende und/oder Leitrohr, die sich im Inneren befinden). Dafür müssen Sie zuerst den Messkopf mit den angeflanschten Messgeräten entfernen. Achten Sie dabei insbesondere, dass der Messkopf mit den Manometern stets **GESICHERT** ist und nicht auf den Boden fallen kann! Anschließend können Sie Blende und Leitrohr aus dem Inneren des Halterohrs nehmen. Sie können danach die Rohrschelle am oberen Rohrende wieder entfixieren, so dass das Rohr zwar noch von der Schelle am Umfallen gehindert ist, sich aber prinzipiell etwas hin und her bewegen kann. Lösen Sie die Schrauben am unteren Flansch und nehmen Sie danach die Rohrschelle komplett vom Halterohr ab. Jetzt können Sie dieses vorsichtig entfernen.

Vorausschauend für den ersten Hauptversuchsteil soll das weiße Belüftungsventil (Dosierventil) an den Rezipienten angebracht werden. Falls noch das Gelbe an den Rezipienten geflanscht ist, sollte es ausgetauscht werden. Sobald sich die Aluminiumschale im Rezipienten befindet, wird die obere Öffnung wieder mit einem KF50-Flansch verschlossen. Die Schrauben an allen Flanschen bei Vakuumaufbauten sollten immer kreuzweise angeschraubt werden. *Wieso?*

³Alternativ kann auch bereits eine der drei Leitwertmessungen (Hauptversuch 2) vor dem Umbau durchgeführt werden. Infos zur Durchführung des Versuchsteils finden Sie im zugehörigen Kapitel 3.4.

Schalten Sie zusätzlich die DualGauge ein und starten Sie die Druckmessung wie in Abschnitt 2.6 beschrieben. Pumpen Sie mit der DSP den Rezipienteninhalte aus. Schalten Sie dafür die DSP ein (roter Schalter an kleiner Steckerleiste) und öffnen Sie dann das gelbe Eckventil an der Pumpe, bis sie auf 'open' steht. Beobachten Sie den Druck am Röhrenfeder- sowie Pirani-Manometer. *Bei welchem Druck scheint die DSP Probleme beim Abpumpen zu bekommen? War das erwartbar? Welches Verhalten beobachten Sie beim Pirani-Manometer?*

Schalten Sie nun den Gasballast (siehe Abschnitt 2.3.1) ein. Hierfür müssen Sie an der Seite der DSP ein schwarzes Rädchen drehen. Der Betrieb des Gasballasts wird sich akustisch bemerkbar machen. Lassen Sie den Gasballast für mindestens 15, bestenfalls 30 min laufen, damit mögliche Emulsionen aus dem Öl gereinigt werden können. *Welcher Druck stellt sich bei Gasballastbetrieb ein?*

Schließen Sie nun wieder den Gasballast und beobachten Sie, wie sich der Druck weiter verändert. *Wie verhält sich nun der Druckverlauf ohne Gasballastbetrieb, wenn sich kein Wasser mehr im Schälchen im Rezipienten befindet?*

3.2.2 Verhalten von Wasser beim Sättigungsdampfdruck

Um das stagnierende Verhalten etwas besser zu verstehen, kann der vorige Versuchsteil auch in einer 'durchsichtigen Variante' durchgeführt werden. Hierfür wird ein wassergefülltes Becherglas in einen kleinen Vakuumexsikkator gegeben und mit einem Schlauch mit einem Dosierventil verbunden, welches wiederum an den Rezipienten angeschlossen ist. Pumpt man nun das Gefäß mit dem Wasser mit aus, so stagniert der Druck und etwas Besonderes passiert mit dem Wasser. *Welches Verhalten lässt sich beobachten und bei welcher Temperatur befindet sich das Wasser, sobald sich der Druck anfängt, kaum mehr zu ändern?*

Lassen Sie den Vorgang nun ruhig für einige Minuten weiterlaufen. Danach sollte die DSP erst mit dem Eckventil vom System getrennt und anschließend ausgeschaltet werden. Mittels eines zweiten Dosierventils soll der Rezipient (und Exsikkator) wieder zurück auf Atmosphärendruck gebracht und anschließend der Exsikkator vom System getrennt werden. *Messen Sie anschließend die Temperatur des Wassers. Was fällt Ihnen auf?* Um den angefallenen Wasserdampf aus Rezipient und DSP zu entfernen, soll der Gasballast wieder für 15-30 Minuten laufen gelassen werden.

Da bestenfalls zwei Ventile benötigt werden, bietet es sich an, diesen Versuchsteil entweder ganz zu Beginn vor dem eigentlichen Umbauen (i.e. vor dem Entfernen des Halterohrs) durchzuführen oder ganz zum Schluss nach der letzten Hauptmessung.

Um das Phänomen des Wassers besser zu verstehen, bietet es sich an, mit dem Phasendiagramm von Wasser bekannt zu machen.

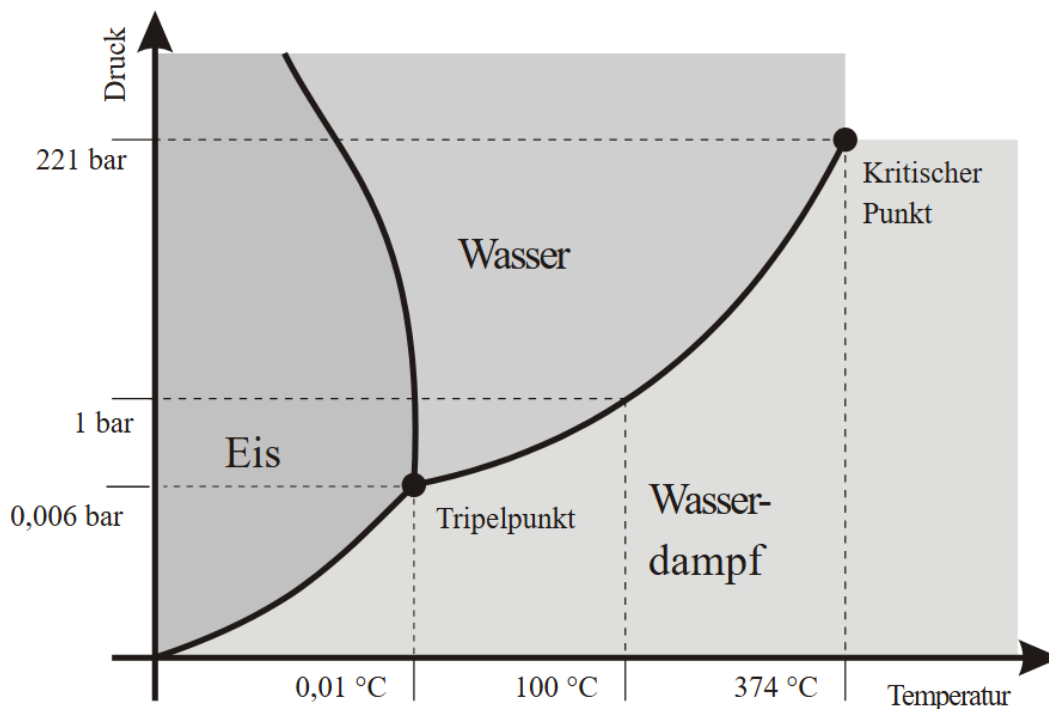


Abbildung 3.2: Das Phasendiagramm von Wasser [28]. Der Sättigungsdampfdruck des Wassers ist temperaturabhängig und beschreibt die Druckgrenze zwischen Wasser und Wasserdampf im Diagramm. Konkrete Werte finden Sie leicht im Internet.

3.2.3 Evakuierung mit der TMP

Evakuieren Sie die Vakuumkammer (Aufbau wie in Abb. 3.1!) mit der DSP auf mindestens $5 \cdot 10^{-1}$ mbar. Schalten Sie den TMP-Kontrolller und die TMP dazu ein. Es dauert einige Zeit, bis die TMP hoch gelaufen ist. *Welche Drehzahl erreicht ein Rotor der im Versuch verwendeten TMP nach vollständigem Hochfahren? Ist das kompatibel mit den Ergebnissen, die Sie zuvor als Vorbereitung bestimmt haben?*

Beobachten Sie den Druckverlauf in den nächsten 15 Minuten am Computer, bzw. am analogen DualGauge mit. *Was passiert mit der Druckanzeige der Glühkathode? Wie sieht die Druckkurve in den ersten etwa fünf Minuten aus und wie in den kommenden zehn Minuten? Warum dauert es so lange, bis ein niedriger Druck erreicht wird und wie könnte dieser Vorgang (in der Theorie) beschleunigt werden?*

Nach dem Beenden dieses Versuchsteils kann die Messapparatur abgeschaltet werden und der Vakuumaufbau wird - unter der Voraussetzung, dass das weiße Dosierventil am Rezipienten für den nächsten Versuchsteil angebracht worden ist - über Nacht evakuiert.

3.3 Hauptversuch 1 - Saugvermögen der TMP

Zur Messung des Saugvermögens der TMP wurde zuvor bei belüfteter Apparatur ein Dosier-ventil mit Aufnahme für Kapillare an der Vakuumkammer angeflanscht. Der Druck wird durch ein Pirani- und Heißkathoden-Manometer gemessen. Bei geschlossenem Ventil wird die Kammer auf $\mathcal{O}(10^{-6} \text{ mbar})$ Druckbereich evakuiert. Stellt sich ein guter Druckwert ein, kann das Saugvermögen gemessen werden.

Dazu wird eine geeignete Messkapillare in die Kapillarenfassung eingesteckt und das Dosier-ventil etwas geöffnet. Hierfür erst einmal das innere Ventil aufdrehen, während das Äußere geschlossen ist. Danach mit dem äußeren Ventil den Druck feinregeln. Der Druck muss somit auf einen neuen Gleichgewichtswert ansteigen. Unter der Annahme von Kontinuität ist die Anzahl der durch die Kapillare angesaugten Luftmoleküle gleich der Anzahl der durch die Pumpe Abgezogenen (Gleichgewicht zwischen Saug- und Leckleistung). Das Vorgehen ist also vom Ansatz (1.12) motiviert. Die Befestigung der Kapillare über den Flansch kann folgendermaßen erfolgen:

- Der Übergang wird an mit einem Flansch befestigt.
- Die Kapillare sollen mit Druckluft ausgeblasen werden. Bei der ersten Verwendung einer Kapillare soll diese eingefettet werden (nicht direkt an der, sondern um die Spitze herum).
- Die Kapillare rechtsum in den Flansch eindrehen.
- Das hängende Brett mit einer Schale installieren, um Wasser einzufangen.

Es soll ein stark verdünnter Tropfen Seifenwasser an die Ansaugöffnung der Kapillare gebracht werden, welcher hinein gezogen wird. Für das Seifenwasser kann ein Becherglas genommen werden. Bei nicht-zusammenhängenden Tropfen wird empfohlen, die Kapillare abzublasen bzw. abzutrocknen und es nochmal versuchen. Anschließend wird das angesaugte Volumen pro Zeiteinheit mit Hilfe einer Stoppuhr gemessen. Die Messung der Wassersäule soll bei der ersten Volumeneinteilung starten und kurz vor dem Übergang in die Kammer über das schnelle Zudrehen des inneren Belüftungsventils (Absperrventil) beendet werden. *Stellen Sie vor der Durchführung dieser Messung sicher, dass das innere Ventil schnell zuge dreht werden kann!* Die Kapillare soll nach jeder Messung mit Druckluft getrocknet werden.

Um die Kapillare für das Ausblasen wieder ausziehen, soll diese am Ende bei ihrer Öffnung zugehalten und gleichzeitig ausgedreht werden. Damit wird verhindert, dass das Wasser weiter Richtung Ventil gedrückt wird.

Stellen Sie als ersten Messpunkt einen Druck von maximal $1 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$ ein, wobei niedrigere Drücke erwünscht sind. Es sollen vier gemessene Größen vorliegen: *Gestoppte Zeit, Überstrichenes Volumen, eingestellter Druck im Rezipienten und Pumpenstrom*. **Vergessen Sie nicht, auch den zur Zeit der Durchführung dieses Versuchsteil vorliegenden Außendruck zu notieren (kann im Internet - mit Quellenangabe und Fehlerabschätzung - für Heidelberg nachgeschlagen werden)!**

Nehmen Sie sich für die erste Kapillare eine Passende aus der Kapillarensammlung im Raum aus. Das Mindestvolumen der ersten Kapillare sollten Sie bereits im Vorbereitungsteil errechnet haben. *Welches Gesamtvolumen misst die erste gewählte Kapillare?*

Unter Nutzung der idealen Gasgleichung kann das Saugvermögen bzw. die Saugleistung aus der Messung berechnet werden. Dazu soll die Messung mehrmals für verschiedene Drücke im Rezipienten wiederholt werden. Um am Ende einen halbwegs linear-geteilten Graphen mit halblogarithmischer Skalierung zu erhalten, sollten Sie die Abstände/Druckwerte nutzen, die Sie zuvor ebenso im Vorbereitungsteil errechnet haben.

Die Messung mit der jeweiligen Kapillare kann gestoppt werden, wenn sich das Seifenwasser zu schnell ($< 3 - 5$ s für den Messweg) bewegt. Anschließend soll eine größere Kapillare verwendet werden. Beachten Sie, dass beim Wechsel der Kapillare stets ein überschneidender Messwert vorliegen soll. Die Messung mit der letzten/größten vorliegenden Kapillare kann gestoppt werden, wenn sich das Seifenwasser auch dort zu schnell ($< 3 - 5$ s für den Messweg) bewegt.

Bei den höheren Drücken ist die Volumenmessung mit der Seifenwasser-Tropfenmethode mangelhaft/schwierig, so dass ein Kolbenprober statt der Kapillare genutzt werden soll. Der Versuch soll solange durchgeführt werden, bis der Pumpstrom stark ansteigt und die Drehfrequenz der TMP nach unten geht (typischerweise bei $\approx 2 \cdot 10^{-2}$ mbar). Am Ende soll der Pumpstand gemäß 2.5 runter gefahren und das Verbindungsteil entfernt werden.

3.4 Hauptversuch 2 - Leitwert und Widerstand von Rohr und Blende

Zur Messung des Leitwerts eines Rohrs - es stehen Rohre verschiedener Durchmesser zur Auswahl - wird zunächst das Halterohr am unteren Flansch auf dem Deckel der Vakuumkammer befestigt (siehe Abb. 3.3 links - dazu wird der obere Deckel entfernt). Das obere Rohrende wird zunächst mit der Rohrschelle nur locker fixiert. Nachdem der untere Flansch festgeschraubt wurde, wird das Halterohr am oberen Ende endgültig fixiert (Hebelwirkung!), wie in Abb. 3.3 rechts dargestellt ist.

In das Halterohr wird das zu vermessende Rohr platziert. Das Halterohr wird am oberen Ende mit dem Deckelflansch verschlossen, an dem ein Dosierventil, ein Pirani-Vakuummeter und ein Heißkathoden-Ionisation-Vakuummeter angeflanscht werden. Bedenken Sie dabei, dass der gesamte Kopf auch mit angeflanschten Messgeräten abnehmbar sein soll (Zugänglichkeit der Schrauben!) sowie dass es **MIT SICHERUNG** angebracht werden soll. Außerdem ist wieder darauf zu achten, dass die Schrauben an allen Flanschen kreuzweise angeschraubt werden!

An der Vakuumkammer wird der Druck nun ebenfalls mit der zweiten Messgarnitur (Pirani + Heißkathode, 'oben') gemessen. Die Vakuumkammer ('unten') soll mindestens auf den Basisdruck von $8 \cdot 10^{-6}$ mbar evakuiert werden. Hierbei die Einschaltreihenfolge gemäß Abschnitt 2.5 beachten!



Abbildung 3.3: **Links:** Der untere Rohrflansch auf dem Deckel der Vakuumkammer. **Rechts:** Die Rohrschelle (unten) und der obere Flansch (oben).

Die Druckdifferenz zwischen den Rohrenden treibt einen Massestrom durch das Rohr. Unter Annahme der Kontinuität und des zuvor bestimmten Saugvermögens kann der Masse- und Volumenstrom und damit der Leitwert des Rohrs gemessen werden.

Im Folgenden wird der **Druck am oberen Ventil** (inneres Ventil aufmachen und mit dem Äußeren regulieren) eingestellt und die *beiden Drücke gemessen* und verglichen. Wiederholen Sie die Messung mit steigendem Druck solange, bis die Pumpendrehzahl wieder nach unten geht.

Es sollten wieder 4-5 Messpunkte pro (oberer) Druckdekade aufgenommen werden, wobei hier die vorherigen Bereiche/Werte übernommen werden können. Alternativ können Sie auch, da im Versuch i.d.R. $p_o \gg p_u \Rightarrow \bar{p} \approx 0.5 \cdot p_o$, stattdessen eine verdoppelte Skalenteilung verwenden, um wieder eine perfekt-logarithmische Skalierung zu erhalten.

Danach soll der Pumpstand runter gefahren (siehe Abschnitt 2.5) und die Apparatur belüftet werden. Anschließend wird der Versuch einmal mit Blende und andermal für eine Serienschaltung aus Rohr und Blende wiederholt. Passen Sie bei der Serienschaltung auf, dass die Einzelteile *zentral* eingerichtet sind.

Vergessen Sie nicht, sowohl das verwendete Rohr als auch die Blende zu vermessen! Für die Länge bzw. die Breite des Rohrs soll ein Lineal bzw. eine Schieblehre verwendet werden. Die korrekte Nutzung der Schieblehre kann Ihnen - falls nötig - von der tutorierenden Person vorgeführt werden. *Womit kann die Blende vermessen werden und warum?*

Die Maße des äußeren Halterohrs werden Ihnen *grob* vorgegeben: $l_{\text{Halte}} \approx 1 \text{ m}$ und $d_{\text{Halte}} \approx 50 \text{ mm}$.

3.5 Lecksuche an der zweiten Vakuumkammer

Im ersten Teil dieses Teilversuchs arbeiten Sie mit Helium, um ein Leck an der zweiten Vakuumkammer zu finden. Mehr Informationen hierzu finden Sie im Abschnitt 2.8. Schließen Sie den Lecksucher an die Apparatur an. Fragen Sie hierzu die tutorierende Person, welche Sie zu diesem Teil des Versuchs einweist. Sprühen Sie möglichst wenig Helium auf die zu untersuchenden Flächen. Hierbei gilt: Lokalisieren statt Einnebeln! Eventuell können Sie durch geschicktes Gegenblasen mit heliumfreier Pressluft das Leck besser lokalisieren. *Welche Leckraten sind mit einem solchen Lecksucher an der Metallfläche messbar?*

Folgende Überlegung für Ihre Auswertung zu dem Versuchsteil: *Nehmen Sie mal an, ein Fahrradschlauch hätte ein Leck mit einer Leckrate von $10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$. Wie lange könnten Sie mit diesem Fahrradschlauch fahren, ohne etwas davon zu bemerken? Wären solche Leckraten für UHV-Apparaturen tolerierbar und wieso?*

Um eine Lecksuche im zweiten Teil dieses Teilversuchs durchzuführen, brauchen Sie ein künstliches Leck. Dazu wird eine dünne Kapillare aus Glas benötigt, welche Sie - wie in Abschnitt 2.7 erklärt - durch Glasbläserei herstellen. Anschließend wird die Kapillare abgehängt (möglichst kurz aus Stabilitätsgründen) und in einem Aluminiumflansch mit einer kleinen Menge Zweikomponentenkleber eingeklebt. *Warum nutzt man hierfür Zweikomponentenkleber?* Flanschen Sie das selbstgebaute Leck an die Vakuumkammer und evakuieren Sie auf einen möglichst kleinen Druck unter Nutzung der TMP. Drehen Sie hierfür das Leckventil etwas auf. *Welcher Enddruck stellt sich ein? Vergleichen Sie diesen mit den vorherigen Messungen. Macht sich das Leck deutlich bemerkbar?*

Mit dem beiliegenden Tesla-Transformator können Sie in der Glaskapillare eine Gasentladung zünden. Dies ist eine einfache Lecksuchmethode für transparente, nichtleitende Aufbauten und wird von Glasbläsern gern benutzt. *Wieso leuchtet der Leckkanal? Welche Voraussetzungen werden gebraucht, damit eine Gasentladung brennen kann?*

Zum Abschluss können Sie bei diesem Aufbau den Pumpstand herunterfahren, lassen diesen jedoch bitte auf Feinvakuum evakuiert.

4 Vorbereitungsfragen

Die folgenden Fragen dienen zur Festhaltung der Theorie sowie Vorbereitung für die Durchführung und sollen vor der Letzteren beantwortet werden.

- Was ist die Einteilung von Vakuum?
- Wie groß ist die Druckkraft auf einen Quadratmeter einer Seitenfläche eines Rezipienten? Es kann von einer Druckdifferenz zwischen normalen Atmosphärendruck und einer Vakuumkammer auf 1 mbar evakuiert ausgegangen werden. Der Druck soll sowohl in Pa als auch bar angegeben werden. Ist die mechanische Stabilität einer Vakuumkammer groß genug, dass diese auf $< 10^{-12}$ mbar evakuieren kann? Für welche Anwendungen wird Ultrahochvakuum gebraucht? Unter welcher Bedingung würde ein evakuierter metallischer Ball kollabieren?
- Wie lautet die ideale Gasgleichung? Wie das Boyle-Mariotte Gesetz?
- Nutzen Sie die Formeln (1.2) und (1.4), um den Wirkungsquerschnitt von Atmosphärenluft unter Normalbedingungen zu bestimmen. Geben Sie das Ergebnis einmal in m^2 und einmal in barn an. Vergleichen Sie diesen Wirkungsquerschnitt mit typischen Querschnitten, die bei Teilchenbeschleunigern am LHC auftreten. Was fällt Ihnen auf?
- Erläutern Sie kurz den Unterschied zwischen einem realen und einem Pseudoleck.
- Warum ist Desorption ein unerwünschter Effekt beim Evakuieren eines Rezipienten?
- Welchen Wert besitzt der Sättigungsdampfdruck von Wasser bei Normalbedingungen? Wie schaut es bei Quecksilber aus? Warum verdunstet Wasser im Vakuum schneller als in einem Gefäß in normaler Raumluft?
- Warum ist der Leitwert bei Molekularströmung druckunabhängig?
- Erklären Sie die Funktionsweise einer Diffusionspumpe. Was sind deren Vor- und Nachteile? Weshalb wird diese Pumpe heutzutage immer weniger verwendet?
- Im Abschnitt 1.8 wurden die zwei im Versuch verwendete Pumpen erwähnt. Dazu
 - wurde im Abschnitt 2.3 die DSP eingeführt. Erklären Sie anhand der Abb. 2.4 ihren Aufbau sowie Funktionsweise. Welcher Druckbereich kann mit einer DSP erreicht werden und warum ist dieser begrenzt? Warum kann eine DSP ohne Gasballast Wasserdampf nur schlecht pumpen? Erklären Sie hierfür kurz, was ein Gasballast überhaupt ist und was er macht.
 - wurde im Abschnitt 2.4 erwähnt, dass eine TMP im Zentrum des Versuchs steht. Erklären Sie deren Aufbau und Funktionsweise anhand der Abb. 2.7. Warum kann man eine solche Pumpe nicht ohne einer Vorpumpe betreiben und in welchem Druckbereich kann eine TMP allgemein arbeiten? Welche Aufgabe erfüllt die Molekularpumpe?

- Im Abschnitt 1.9 wurden mehrere Messgeräte eingeführt. In welchen Druckbereichen werden diese verwendet und wodurch sind diese begrenzt? Überlegen Sie sich,
 - wo im Alltag ein U-Rohr-Manometer verwendet wird. Wäre es sinnvoll, dieses durch ein anderes Druckmessgerät zu ersetzen?
 - warum können Pirani-Vakuummeter nur für Grob- und Feinvakua verwendet werden?
 - was die Funktionsweise einer Glühkathode ist?
- Im Abschnitt 2.8 wurde der Aufbau zur Lecksuche eingeführt. Wie funktioniert ein Dipol-Massenspektrometer? Warum wird ^4He benutzt? Welches andere Gas hat die Massenzahl 4 und kann dadurch die Messung stören?
- Was ist der Vorteil der Gegenstromlecksuchmethode? Warum ist sie so präzise?
- Überlegen Sie sich eine Lecksuche, welche im Alltag passiert. Um welche Art der Lecksuche handelt es sich?
- Was ist ein Tesla-Transformator und wie könnte dieser zur Lecksuche dünner Lecks (z.B. feine, abgebrochene Glasröhrchen) verwendet werden?

Im Folgenden sollen noch ein paar ergänzende Rechnungen und Überlegungen für die kommende Durchführung durchgeführt werden. Die Bearbeitung ist hierbei **zwingend**, da sonst gewisse Erwartungshorizonte/Einstellparameter für die Versuchsdurchführung fehlen!

- Schätzen Sie die Geschwindigkeit der Luftmoleküle und damit der Rotoren einer TMP ab. Vergleichen Sie dazu die kinetische Energie der Rotoren und die thermische Energie der Moleküle. Sie können vereinfacht erst einmal nur von Stickstoff ausgehen und dass der Rotordurchmesser 6 cm beträgt. Können solche Geschwindigkeiten auf Dauer gehalten werden? Unter Voraussetzung, dass das Schmieren keine Option ist, wie kann ein Kugellager einer TMP solche Geschwindigkeiten lange aushalten? Warum pumpt eine (auf Stickstoff ausgelegte) Turbomolekularpumpe Wasserstoff schlechter als Stickstoff?
- Für die Bestimmung des Saugvermögens soll eine passende Startmindestgröße für eine Kapillare gefunden werden. Schätzen Sie das Fassungsvermögen der ersten Kapillare über das Boyle-Mariotte Gesetz ab. Gehen Sie dabei von einer Startmesszeit von $t = 100\text{ s}$, einem Druckunterschied von $\frac{p_{\text{Umgebung}}}{p_{\text{Rezipient}}} = 10^8$ (Größenordnung) und einem Pumpensaugvermögen von $S \approx 70\text{ ls}^{-1}$ aus.
- Da mehrere Druckbereiche (Zehnerpotenzen) während des Versuchs überstrichen werden, ist es sinnvoll, den Druckbereich logarithmisch zu plotten. Wie müssen hierbei die Abstände gewählt werden, damit zum Beispiel vier gleichmäßig verteilte Messwerte in einer Dekade liegen (also vier gleichmäßig verteilte Messpunkte auf der logarithmischen Druckachse zwischen z.B. 10^{-5} und 10^{-4} mbar)?

5 Auswertung - Reguläre und Besondere

Die Auswertung des Versuchs erfolgt mit den während der Versuchsdurchführung aufgenommenen Messdaten (Messprotokoll) und den aufgenommenen Druckverläufen (DualGauge, Pythonprogramm am Versuchscomputer). Die Auswertungsaufgaben gehen hierbei mehr oder weniger chronologisch mit der Durchführungsreihenfolge einher. Die angegebene Reihenfolge dient zur *Orientierung*, muss also nicht zwangsläufig genauso eingehalten werden. Die finale Bearbeitung der Aufgaben sollte bei Abweichungen allerdings auf einer *logischen* Reihenfolge beruhen!

In der vorgeschlagenen Reihenfolge startet die Auswertung mit qualitativen Betrachtungen hinsichtlich Gasen und Wasser im Grob-, Fein- und Hochvakuum. Anschließend soll die Sinnhaftigkeit der verwendeten Drehschieberpumpe inklusive Gasballasts beschrieben werden. Daraufhin folgen einige technische Betrachtungen im Bezug auf die verwendeten Messgeräte (genauer: das DualGauge) und der Grenze der Turbomolekularpumpe. Quantitativ sollen schließlich das Saugvermögen der Turbomolekularpumpe und einige Widerstände bestimmt und mit der Theorie verglichen werden. Zum Schluss soll qualitativ die durchgeführte Lecksuche beschrieben und Ergebnisse aufgezeigt werden.

Für die kurze und lange Ausarbeitung werden üblicherweise die Bearbeitung kleiner Extraaufgaben gefragt. Insofern nicht anders abgesprochen, können hierfür die optionalen Aufgabenteile zum Schluss des Kapitels verwendet werden. Diese beschäftigen sich einerseits mit der Genauigkeit der verwendeten DualGauges und andererseits mit dem Baking-Out Prinzip und weiterführend der Sorptionstheorie.

5.1 Reguläre Auswertung

Gase im Vakuum

Fertigen Sie für alle im Versuch betrachteten Vakuumbereiche (i.e. von 10^{-6} bis 10^3 mbar) *zwei Diagramme* an. Es sollen einmal die freie Teilchenzahldichte (Anzahl Teilchen pro Volumen) sowie zusätzlich die mittlere freie Weglänge als Funktion des Drucks im Rezipienten dargestellt werden. Dazu brauchen Sie die Avogadro-Konstante $N_A \approx 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ sowie das molare Volumen bei Normalbedingungen $V_m \approx 24,46 \text{ l mol}^{-1}$. Beschreiben Sie, wie die Diagramme zustande kommen (Rechnungen). *Alternativ* können Sie das Ganze auch in *ein gemeinsames Diagramm* plotten mit zwei verschiedenen *y*-Achsen (Teilchenzahldichte, mittlere freie Weglänge).

Nutzen Sie diese Diagramme, um zu diskutieren, was *Vakuum auf atomarer/molekularer Ebene* bedeutet. Nutzen Sie hierfür die Gleichungen (1.2) und (1.3) und schätzen Sie hieraus die *Größenordnung der Luftteilchen*. Was ändert sich im Hochvakuum im Vergleich zum Grobvakuum und was ändert sich *nicht*?

Wasser im Vakuum

Nutzen Sie das *Phasendiagramm von Wasser*, um zu erklären, was innerhalb des Rezipienten geschehen ist, als Sie den Behälter auf Feinvakuum evakuiert haben. *Warum war nach dem Pumpen plötzlich kein flüssiges Wasser mehr im Behälter?*

Falls Sie die 'durchsichtige' Version durchgeführt haben, sollten Sie (ebenso mittels Phasendiagramm) erklären, was Sie visuell beobachten konnten. Nutzen Sie die ermittelten Temperaturen, um *abzuschätzen, welcher Druck innerhalb des Exsikkators vorgeherrscht hat*. Warum unterscheiden sich die abgeschätzten Drücke von der Pirani-Druckanzeige (Hint: wessen Druck genau ermittelt das Pirani-Manometer? *Wie ist der Exsikkator am Aufbau befestigt?*)

In welcher Hinsicht macht sich Wasser im Hochvakuum bemerkbar? Können Sie den Effekt des Wassers konkret anhand Ihres DualGauge-Druckplots festmachen?

Die Drehschieberpumpe und der Gasballast

Erklären Sie anhand des *gemessenen Druckverlaufs*, was innerhalb der DSP passiert, sobald Sie in dem Rezipienten eine wassergefüllte Schale abpumpen lassen. Erläutern Sie hierbei, mit Rückbezug auf die vorige Aufgabe, *welcher Druck sich einstellt* und was geschieht, sobald man den *Gasballast einschaltet*. Erläutern Sie anschließend die *Basisdruckbereiche*, die erreicht werden bei ein- und ausgeschaltetem Gasballast. *Was sorgt für den Unterschied?*

Überlegen Sie sich erneut, auf welche Art und Weise der Wert des Pirani-Messgeräts zu verstehen ist. Nutzen Sie Ihren zuvor erstellten Plot bezüglich der mittleren freien Weglänge, um grob die Größenordnung der Weglänge abzuschätzen, die im Basisdruckbereich der DSP liegt. *Welches Bauteil könnte hier effektiv zu einem Hindernis/Widerstand werden (unter Annahme von molekularer Strömung)?*

Einschaltvorgang der Manometer und Pumpstrom der Turbomolekularpumpe

In Ihrem Druckverlauf sollte sich beim Einschalten des DualGauges nach der Nachtevakuierung erkenntlich machen, dass die Druckmessgeräte nicht sofort den eigentlich erreichten Basisdruck anzeigen. *Erläutern Sie, welchen Druckverlauf Sie erkennen können und woran das liegt. Was bedeutet das für einen korrekten Betrieb der Messgeräte?*

Fertigen Sie für die gemessenen Daten in 3.3 ein *weiteres Diagramm* an. Es soll der Pumpstrom als Funktion des Rezipientendrucks aufgetragen, der Kurvenverlauf diskutiert und mit der Theorie verglichen werden. *Was fällt Ihnen insbesondere bei hohen Drücken auf? Welches Verhalten ließ sich während des Versuchs bei der Turbomolekularpumpe beobachten und warum?*

Saugvermögen und -leistung der Turbomolekularpumpe

Unter Nutzung der gemessenen Zeit und des Volumens kann unter Berücksichtigung des vorliegenden Druckunterschieds die Saugleistung berechnet werden. Fertigen Sie die *dazugehörigen Diagramme* einmal für das Saugvermögen S und einmal die zugehörige Saugleistung Q an. Tragen Sie die Größen als Funktion des Drucks (*log. Skala* verwenden, da mehrere Dekaden überwunden werden) auf und *diskutieren Sie den Verlauf* beider Kurven. Die einzelnen Kapillare und deren systematische Fehler sollen klar gekennzeichnet werden. Wie unterscheidet sich der gemessene Kurvenverlauf vom Idealen und warum? Welche Schwächen hat diese Messmethode? Welche systematische Probleme und statistische Messfehler liegen hier vor? Wie könnte die Genauigkeit der Messungen erhöht werden?

Bestimmen Sie anschließend über einen Fit oder eine geeignete Mittelwertbildung *das Saugvermögen, welches sich im Plateaubereich* sichtbar macht. Nutzen Sie diesen Wert für S für den nachfolgenden Aufgabenteil.

Leitwerte und Widerstände

Die Leitwerte für Rohr, Blende und Serienschaltung sollen als Funktion des logarithmischen **mittleren** Drucks $\bar{p}$ *aufgetragen werden*. *Wie sehen die Kurvenverläufe aus? Was sehen Sie in Richtung zu kleinerer bzw. größerer Drücken? Welchen theoretischen Kurvenverlauf würden Sie erwarten und wieso?* Vergleichen Sie Ihre experimentell ermittelten Werte für den Widerstand bzw. Leitwert mit den Theoretischen für Molekularströmung (nach Berechnung).

Spielt das äußere Halterohr eine (große) Rolle für die Leitwertsbestimmungen? *Argumentieren Sie Ihre Entscheidung kurz anhand des Aufbaus und der grob vorgegebenen Werte qualitativ.*

Überprüfen Sie ebenso die *Kirchhoff-Regeln für Leitwerte bzw. Strömungswiderstände in der Vakuumtechnik* anhand Ihrer Messungen. Passen diese an die Theorie? Welche Abweichungen treten auf und wieso? *Wie machen sich die verschiedenen Widerstände in den Druckmessungen der DualGauges bemerkbar?*

Da die Bestimmung der Strömungsarten abhängig von p (also dem lokalen Druck innerhalb des Widerstands) ist, soll als erste, vereinfachte Abschätzung für die Regime der mittlere Druck $\bar{p}$ genutzt werden. Wenn man ganz konservativ sein möchte, so nimmt man stattdessen den maximal vorkommenden Druck, also den oberen Druck! Beachten Sie, dass die Lokalität des Drucks bedeutet, dass an unterschiedlichen Stellen des Widerstands unterschiedliche Strömungsregimes gleichzeitig auftreten können! *Kennzeichnen Sie in Ihren Plots immer die Druckbereiche, die zu viskoser, Knudsen- und Molekularströmung gehören (Grenzen einzeichnen!).*

Lecksuche

Erläutern Sie kurz, welche Art der Lecksuche Sie durchgeführt haben. Ordnen Sie die Größenordnung Ihrer Ergebnisse sinnvoll ein. *Sind die gemessenen Raten signifikant/vernachlässigbar?*

5.2 Besondere/Optionale Auswertung

Die (Un)Genauigkeit der DualGauges

Um herauszufinden, wie gut (oder ungut) die DualGauges den Druck tatsächlich messen, soll im Nachfolgenden ein kleiner Cross-Check erfolgen. Vereinfacht soll $p_a = 10^{-4}$ mbar als Cross-Check Druck genommen werden, da dort einerseits das erwartbare Pseudoleck relativ gering ist ($S_{\text{real}} \approx S_{\text{eff}}$) und andererseits der Saugvermögenswert laut Herstellerangaben nahe Maximum ist. Aus der Grafik 1.1 kann man abschätzen, dass

$$S_{\text{ideal}}(p_a) \approx 69 \text{ ls}^{-1}.$$

Nun ist aber das Problem, dass dies nur für eine direkt an den Rezipienten geflanschte Pumpe gilt. Zwischen TMP und Rezipient ist allerdings ein ca. 7 cm breites und 5 cm langes Rohrstück, dessen Leitwert nicht-trivial aus den oben angegebenen Spezialfallsgleichungen bestimmt werden kann (da $d \approx l$). Es soll also vorgegeben werden, dass

$$L \approx 300 \text{ ls}^{-1}.$$

Das tatsächliche/effektive Saugvermögen kann somit ermittelt werden über

$$S_{\text{eff}} = \frac{1}{\frac{1}{S_{\text{ideal}}} + \frac{1}{L}}. \quad (5.1)$$

Ihre Zusatzaufgabe ist es nun, zuerst einmal zu begründen, warum die obige Gleichung gilt. Für welche besonderen Anordnungen gilt diese Gleichung? Anschließend sollen Sie mittels dieser Gleichung und den vorgegebenen Werten das effektive Saugvermögen für den angegebenen Druck errechnen. Vergleichen Sie diesen Wert mit ihrem experimentell ermittelten Wert. Das Verhältnis beider Werte gibt einen Offsetfaktor des unteren DualGauges an. Im Idealfall sollte dieser beim Wert 1 liegen - tut er das?

Wenn man sich kurz zurückerinnert, so kann man experimentell den Leitwert über (1.18) bestimmen. Ergo über das Verhältnis aus Saugleistung Q und Druckdifferenz Δp . *Macht sich im Zähler des Verhältnisses der Fehler (Offset) des unteren DualGauges bemerkbar? Wie sieht es im Nenner aus, welcher Fehler dominiert dort? (Hint: was ist die Größenordnung der Differenz?) Wie können nun Abweichungen vom theoretischen und experimentellen Molekularleitwert gedeutet werden?*

Sorptionsverhalten von Wasser

Um ein etwas besseres Verständnis vom Ad- und Desorptionsverhalten von Wasser zu bekommen, sollen ein paar kleine Rechnungen gemacht werden.

Unter Nutzung der Polanyi-Wigner Gleichung kann unter der in 1.6 beschriebenen Verhältnissbildung der Effekt eines Baking-Outs quantifiziert werden. *Dies soll sich zunutze gemacht werden, um die Größenordnung der Adsorptionsenergie von Wasser an einer Rezipientenwand (Edelstahl) zu approximieren.* Bei einer Wandtemperatur von

$$T_2 = 400 \text{ K}$$

wird ein Gleichgewichtsdruck von

$$p_2 = 5.5 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$$

gemessen, während bei

$$T_1 = 300 \text{ K}$$

$$p_1 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ mbar.}$$

Es soll angenommen werden, dass beide Saugvermögenswerte (bei den beiden Drücken jeweils) exakt gleich sind.

*Unter Verwendung der bestimmten Adsorptionsenergie (siehe oben) und der durch die Literatur gegebenen mittleren Verweilzeit τ_0 soll die Sorptionsstärke einer Rezipientenwand (wie im Versuch bei Raumtemperatur) und einer mit flüssigem Stickstoff gekühlten ($T \approx 77 \text{ K}$) Wand bestimmt und verglichen werden. Wie viel länger verweilt Wasser an der gekühlten Oberfläche als an der warmen Fläche? Welche Pumpenarten beruhen auf solch einem Verfahren?*⁴

⁴Hier wurde es zwar für Wasser berechnet, aber die Adsorptionsenergie für Luftgase liegt in einem durchaus ähnlichen Bereich, sodass die Interpretation leicht weitergeführt/extrapoliert werden kann.

Literatur

- [1] W. Umrath et. al. *Grundlagen der Vakuumtechnik*. Leybold, 2016.
- [2] A. A. Michelson , E. W. Morley. *On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether*. The American Journal of Science, 1887.
- [3] G. Cattenoz et al. *Vacuum Acceptance Tests for the UHV Room Temperature Vacuum System of the LHC during LS1*. 2014.
- [4] J. Welte et al. *Towards the realization of atom trap trace analysis for ^{39}Ar* . New Journal of Physics, 2010.
- [5] P. Kelly , R.D. Arnell. *Magnetron sputtering: a review of recent development and applications*. Vacuum, 2011.
- [6] W. Umrath et. al. *Handbuch Vakuumtechnik: Theorie und Praxis*. Leybold, 2016.
- [7] D. Meschede. *Gerthsen Physik. 21., völlig neubearbeitete Auflage*. Springer, 2002.
- [8] L. Bergmann, C. Schäfer. *Lehrbuch der Experimentalphysik*. Bd. 1, 10. Auflage, de Gruyter.
- [9] *Pfeiffer Vacuum Know-how*. <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/einfuehrung-in-die-vakuumtechnik/>, besucht am 20. September 2023.
- [10] *Pfeiffer Vacuum Know-how*. <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/vakuumerzeugung/>, besucht am 20. September 2023.
- [11] *Leybold*. Vakuumkomponenten Katalog, 2000.
- [12] *Pfeiffer/Balzers*. Vakuum Katalog.
- [13] *Edwards*. Vakuum Katalog, 2000.
- [14] *Vakuumtechnik; Benennung und Definitionen; Allgemeine Benennungen*. DIN 28400-1, Ausgabe: 1990-05.
- [15] *HiPace 80 Neo Manual*. Pfeiffer Vacuum, <https://www.pfeiffervacuum.com/global/de/product/hipace-80-neo.html>, besucht am 1. August 2026.
- [16] *Pfeiffer Vacuum Know-how*. <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/know-how/configuration/>, besucht am 13. März 2026.
- [17] C. Edelmann. *Vakuumphysik: Grundlagen, Vakuumerzeugung und -messung, Anwendungen*. Spektrum Akademischer Verlag, 1998.
- [18] W. Walcher M. Wutz H. Adam. *Theorie und Praxis der Vakuumtechnik*. Vieweg+Teubner Verlag, 1992.
- [19] P. Tipler et. al. *Physik für Studierende der Naturwissenschaften und Technik*. Springer Spektrum, 2019, 8. Auflage.

- [20] Wikipedia Contributors – Nutzer Leonard G. – Eigenes Werk. *Mechanics of a pressure gauge*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:WPPressGaugeMech-2.jpg>, besucht am 25. September 2023.
- [21] Wikipedia Contributors – Nutzer Albyn – Eigenes Werk. *Druckabhängige Wärmeabgabe (schematisch)*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Pirani-Vakuummeter#/media/Datei:Druck-Bereiche.JPG>, besucht am 25. September 2023.
- [22] K. Jousten. *Handbuch Vakuumtechnik, Unterkapitel: „Ionisationsvakuummeter“*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [23] *Symbole aus der Vakuumtechnik*. Leybold, <https://www.leybold.com/de-de/knowledge/vacuum-fundamentals/reference/symbols-used-in-vacuum-technology-diagrams>, besucht am 13. März 2026.
- [24] Wikipedia Contributors – Nutzer Niels Noordhoek – Eigenes Werk. *Imploding vacuum tube, photographed with high speed air-gap flash*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Implosion_\(mechanical_process\)#/media/File:Imploding_vacuum_tube.JPG](https://en.wikipedia.org/wiki/Implosion_(mechanical_process)#/media/File:Imploding_vacuum_tube.JPG), besucht am 25. September 2023.
- [25] Wikipedia Contributors – Nutzer Rainer Bielefeld – Eigenes Werk. *Prinzipzeichnung einer Drehschieberpumpe*. https://de.wikipedia.org/wiki/Drehschieberpumpe#/media/Datei:Rotary_vane_pump.svg, besucht am 26. September 2023.
- [26] *Was ist ein Gasballast, und wie funktioniert er?* Leybold, <https://www.leybold.com/de-de/knowledge/vacuum-fundamentals/vacuum-generation/how-does-a-gas-ballast-work>, besucht am 13. März 2026.
- [27] Wikipedia Contributors – Nutzer Liquidat – Eigenes Werk. *A cut-through turbomolecular pump model*. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=439595>, besucht am 26. September 2023.
- [28] Wikipedia Contributors – Nutzer JoWi – Eigenes Werk. *A cut-through turbomolecular pump model*. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3850207>, besucht am 1. August 2026.