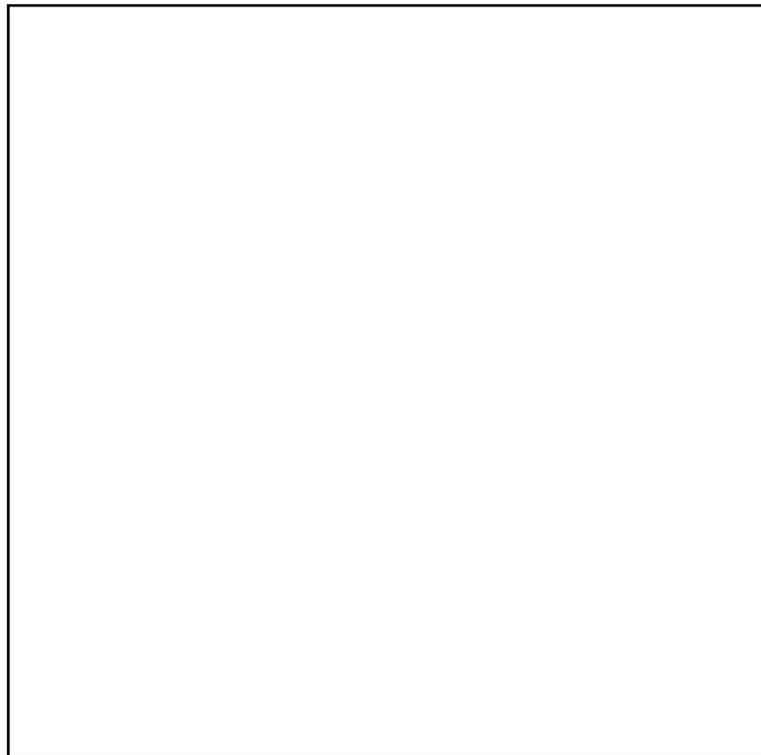


Konstruktion einer Vakuumkammer und -messvorrichtungen



(Anstatt einer Vakuumapparatur: Die Abbildung eines idealen Vakuums (nichts))

Wettbewerb „Jugend Forscht“ 2001

Ole Massow (20 Jahre)

**Arbeitsgemeinschaft „Jugend Forscht“
des Christian-Gymnasiums Hermannsburg**

Leitung: StD Thomas Biedermann

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Definition von Vakuum	3
3. Zielsetzung	4
4. Die Vakuumapparatur	4
4.1 Das Kammersystem	5
4.2 Die Ausgasungsrate	6
4.3 Die Drehschieberpumpe	7
4.4 Möglichkeiten zum Erreichen niedrigerer Enddrücke	7
5. Die Messvorrichtungen	8
5.1 Konstruktion des Temperatur-Druck-Messgerätes	8
5.2 Versuch einer mathematischen Annäherung	10
5.3 Eichung der Messmethode	11
6. Vakuumphänomene	11
7. Fazit und Ausschau	12
8. Danksagung	12
9. Literaturverzeichnis	12

1. Einleitung

„Ich hab’s im Kopf, aber ich komme nicht darauf!“ Dieser Spruch wird wahrscheinlich so manchem bei dem Titel meiner Arbeit einfallen. Doch wie kommt man dazu, wirklich eine Apparatur zu bauen, mit der man ein Vakuum erzeugen und darin entsprechende physikalische Experimente durchführen kann?

Entstanden ist diese Arbeit aus der Idee heraus, ein Tunnel-Elektronen- oder zumindest ein Raster-Elektronen-Mikroskop zu bauen. Das klingt ziemlich abgehoben und die Vorstellung, diese Aufgaben in einem Jahr zu bewältigen, ist auch mindestens genauso überzogen. Also musste ich meine Vorstellungen auf ein erfüllbares Maß zurecht stutzen, woraus sich mir die Aufgabe stellte, „nur“ eine Apparatur und geeignete Messsysteme zu bauen.

Anfangs versuchte ich Ideen und Lösungen ohne Zuhilfenahme von entsprechender Literatur zu finden, woraus sich mir folgende Fragen stellten:

- Wie kann ich Drücke messen, die über mehrere Zehnerpotenzen variieren?
- Welche Messmethoden sind geeignet?
- Wie kann ich meine Apparaturen eichen?

Zu den Fragen muss ich noch sagen, dass die Jugend forscht AG des Christian-Gymnasiums Hermannsburg schon vor längerer Zeit Teile einer Kammer und eine Pumpe als Spende erhalten hatte, es fehlten jedoch einige Teile ebenso wie eine Messapparatur.

Bei der Literaturrecherche fiel mir im Vergleich zu aktuellen Herstellerangaben auf, dass der Großteil der Vakuumtechnik bereits in den 50er und 60er Jahren erfunden wurde und seitdem nur die Ausführungen verbessert und weiterentwickelt wurden. Die damals übliche Größe zur Bestimmung der Druckes Torr wurde durch Pascal [1 Pa] ersetzt.

2. Definition von Vakuum

Da meine Literaturquellen fast ausschliesslich noch Torr als Größe zur Druckbestimmung führen, habe ich alle Werte in Pascal überführt. Dabei gilt: $1 \text{ Torr} = 1,333224 \cdot 10^2 \text{ Pa}$ [1].

Vakua werden dabei folgendermaßen definiert [2]:

„Vakuum, der Zustand in einem gaserfüllten Raum bei Drücken unterhalb des Atmosphärendrucks.“

Da sich Vakua stark in ihren Drücken unterscheiden können, teilt man sie in vier unterschiedliche Druckbereiche ein [2]:

	Großvakuum	Feinvakuum	Hochvakuum	Ultrahochvakuum
Druck (Pa)	10^5 bis 10^2	10^2 bis 10^{-1}	10^{-1} bis 10^{-5}	$< 10^{-5}$
Teilchenzahl / cm^3	10^{19} bis 10^{16}	10^{16} bis 10^{13}	10^{13} bis 10^9	$< 10^9$
Mittlere freie Weglänge (cm)	10^{-5} bis 10^{-2}	10^{-2} bis 10^1	10^1 bis 10^5	$> 10^5$
Wandstöße je cm^2 und s	10^{24} bis 10^{20}	10^{20} bis 10^{17}	10^{17} bis 10^{13}	$< 10^{13}$
Molekülstöße je cm^3 und s	10^{29} bis 10^{23}	10^{23} bis 10^{17}	10^{17} bis 10^9	$< 10^9$

Tabelle 1: Grenzdaten unterschiedlicher Vakua

Diese Angaben sind auf volle Zehnerpotenzen abgerundet und gelten für Zimmertemperatur und Luft. Der normale Luftdruck beträgt bei $1,013 \cdot 10^5$ Pa.

3. Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit soll eine Vakuumapparatur sein, die Experimente im Bereich des Feinvakuums ermöglicht. Mein Anliegen war dabei, bereits vorhandene Teile, wie das Kammergehäuse, einige Gummiringdichtungen und die Drehschieberpumpe, zu nutzen, um die Kosten und den Aufwand gering zu halten. Das gesetzte Ziel eines Feinvakuums sollte mit den vorhandenen Gegenständen erreichbar sein, obwohl diese aufgrund ihres Alters etwas an ihrer Leistungsfähigkeit eingebüßt haben werden.

Weiter wird eine Messmethode für die Bestimmung des Vakuums benötigt, die im Idealfall folgende Eigenschaften aufweist: Der Messbereich deckt weitestgehend den Druckbereich des Feinvakuums ab und die technische Ausführung sollte auch hier so einfach wie möglich gehalten sein. Bei der Verwendung hoher Spannungen und Ströme sowie unterschiedlicher Gase muss sichergestellt sein, dass keine Störungen durch in der Kammer ablaufende Versuche auftreten können, so dass im Idealfall parallel zur Versuchsdurchführung der Druck gemessen werden kann.

4. Die Vakuumapparatur

Aus einer Materialspende standen mir einige Dinge zur Konstruktion der Vakuumkammer zur Verfügung, so dass ich sie nicht anfertigen bzw. anfertigen lassen musste. Dabei handelte es sich um zwei Rohrstücke, eine Drehschieberpumpe, ein Rückschlagventil und diverse Kleinflansche. Diese waren bereits einige Jahre in Betrieb gewesen, weshalb sie einer gründlichen Reinigung bzw. Wiederaufarbeitung bedurften.

4.1 Das Kammersystem

Die beiden bereits vorhandenen Rohrstücke weisen jeweils ein Volumen von $8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ auf. Ein Rohr ist bereits mit zwei Anschlüssen für Gasleitungen ausgestattet, diese besitzen jedoch nur einen inneren Durchmesser von 4 mm, so dass der geringe Querschnitt die Pumpdauer unnötig verlängern würde. Daher wurde das zweite Rohrstück mit einem Kleinflansch KF 25 nachgerüstet, welcher einen Durchmesser von 20 mm und somit eine Querschnittsvergrößerung gegenüber den Gasanschlüssen um den Faktor 25 aufweist. Der Flansch ist mit Epoxydharz an die Kammer angeklebt.

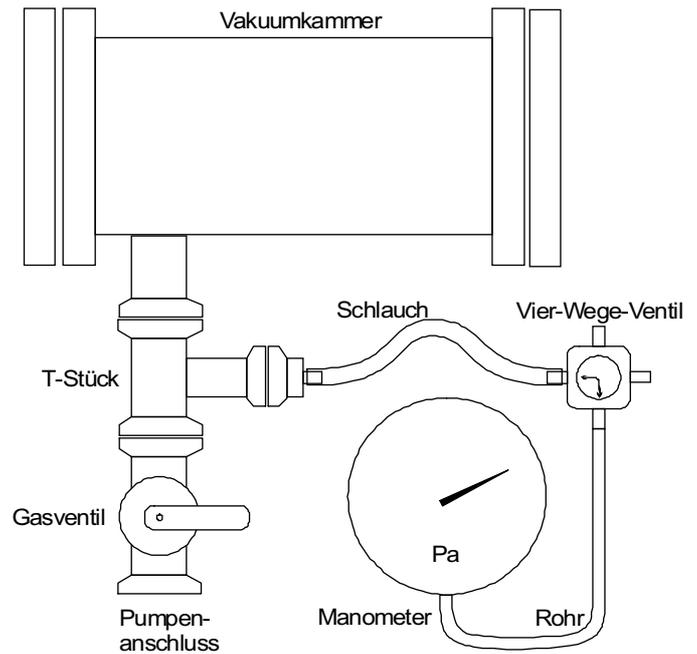


Abb. 1: Das Kammersystem mit Manometer

Als Abschlüsse für die Rohre dienen zwei Endflansche mit einem Durchmesser von 22 cm, weshalb sie nicht selbst hergestellt werden konnten. Dank der freundlichen Unterstützung der Zweigstelle der DLR in Trauen konnte ich mir diese in deren Werkstatt anfertigen lassen. Während ein Flansch ein Sichtfenster von 7 cm Durchmesser beinhaltet, sind in den anderen Flansch (Abb. 2) elektrische Durchführungen in Form von Gewindestangen (M4 und M6) mit Epoxy eingeklebt, die auch als mechanische Fixierungspunkte dienen können. Aus den unterschiedlichen Spaltbreiten an den Durchführungen von 0,7 bis zu 2,5 mm resultieren Spannungsfestigkeiten von 7000 bis 25000 Volt bei 10000 V/mm für Kunststoffe.

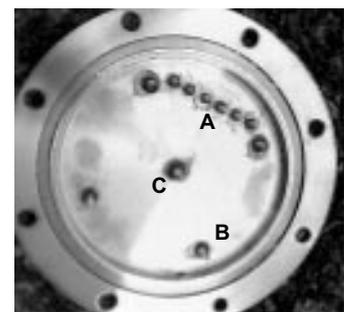


Abb. 2: Kammerflansch mit elektrischen Durchführungen

	Anzahl	Spaltbreite	Spannungsfestigkeit
Durchführung A	6	0,7 mm	7000
Durchführung B	4	1,5 mm	15000
Durchführung C	1	2,5 mm	25000

Tabelle 2: Spannungsfestigkeiten der elektrischen Durchführungen

An die Kammer ist ein T-Stück angeschlossen, welches zum einen über einen Schlauchadapter mit einem Vierwegeventil verbunden ist. An diesem sind ein Zeigermanometer und ein Nadelventil installiert. Das Nadelventil dient zur dosierbaren Belüftung der Kammer. Das T-Stück ist weiter mit einem Ventil verbunden, an welches die Pumpe per Vakuumschlauch angeschlossen ist. Dieses Ventil verschliesst die Apparatur gegenüber dem Luftdruck, welcher ausserhalb der Kammer herrscht, damit durch die eventuell abgeschaltete Pumpe kein Gas in diese zurückströmen kann. Die verwendeten Vakuumschläuche sind mit dickem Draht umwickelt, um ein Zusammenfallen aufgrund der Druckdifferenz und somit eine Querschnittsverkleinerung zu verhindern. Sowohl die Kleinflansche

als auch die Flansche des Kammerrohres sind mit O-Ringen aus Neopren abgedichtet, zusätzlich sind diese mit einem Film Rawleigh-Vakuumfett überzogen.

4.2 Die Ausgasungsrate

Der ultimativ erreichbare Druck hängt zum Einen stark von der Sauberkeit und der Art der Reinigung des Kammerystems ab. Sollten die Oberflächen verschmutzt oder mit leicht verdampfenden Stoffen behaftet sein, wie z.B. Wasser oder Fett, kann der maximale Druck gegenüber einer sauberen Apparatur um Zehnerpotenzen niedriger sein. Daher ist die Reinigung mit Wasser absolut ungeeignet und sollte mit stark flüchtigen Chemikalien wie Aceton erfolgen. Ebenso ist eine ausreichende Dauer zum Verflüchtigen der Stoffe zu beachten.

Zum Anderen hängt der Tiefstdruck von den verwendeten Materialien ab. Als zu beachtende Faktoren ergeben sich die Ausgasung, der Dampfdruck und die Durchlässigkeit. Diese sind in der Literatur unter dem Begriff der Ausgasungsrate zusammen gefasst. Für die verwendeten Stoffe ergibt sich folgende Tabelle [3]:

Material	Ausgasungsrate in $\text{Pa m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$	Oberfläche in m^2	Druckverminderung in Pa s^{-1}
Aluminium	$1,7 \cdot 10^{-3}$	0,016	$3,40 \cdot 10^{-3}$
Stahl	$3,0 \cdot 10^{-4}$	0,200	$7,50 \cdot 10^{-3}$
Epoxy	$1,4 \cdot 10^{-2}$	0,001	$1,75 \cdot 10^{-3}$
Neopren	$4,0 \cdot 10^{-2}$	0,005	$2,50 \cdot 10^{-2}$
Polyethylen	$3,5 \cdot 10^{-4}$	0,025	$1,10 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 3: Ausgasungsraten und Druckverminderung durch verwendete Materialien bei $8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ Kammervolumen

Bildet man die Summe der einzelnen Druckverminderungen durch die vorhandenen Oberflächen in der Apparatur, ergibt sich bei einem Kammervolumen von $8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ ein Wert von $3,875 \cdot 10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$. Ausgehend von einem Anfangsdruck von ca. $4 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$ sind bereits nach 258 s jedoch 10 Pa und nach insgesamt 43 min. 10^2 Pa überschritten (Diagramm 1). Der Druck steigt dabei linear an.

Da das Kammerystem bei der Erstellung dieser Arbeit noch große Undichtigkeiten aufwies, sind die Daten bisher nur theoretisch. Ebenso kann ich aufgrund bislang unbekannter Pumpenleistung keine konkrete Aussage über den tiefstmöglichen Druck mit eingeschalteter Pumpe machen.

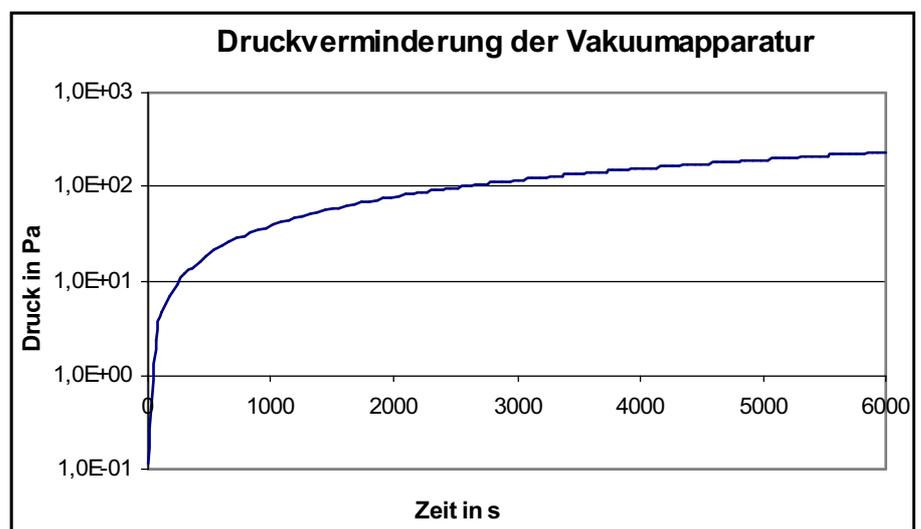


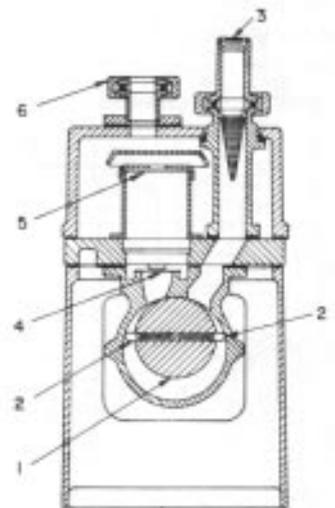
Diagramm 1: Druckverminderung der Vakuumapparatur (logarit. Darstellung)

4.3 Die Drehschieberpumpe

Ebenso wie bei dem Kammer-System war auch die Überarbeitung der gespendeten Pumpe zu Versuchsbeginn noch nicht abgeschlossen, so dass ich hauptsächlich mit einer typähnlichen Pumpe aus dem Schulfundus arbeitete.

Bei den von mir verwendeten Pumpen handelt es sich um Drehschieberpumpen. Diese zeichnen sich durch relativ hohe Pumpleistung bei niedrigen Drücken und eine einfache Handhabung aus. Zudem reicht ihr maximal erreichbarer Unterdruck bis in den Feinvakuumbereich, sodass sie für die meisten physikalischen Vakuumexperimente, basierend auf Leuchterscheinungen, geeignet sind. Dem gegenüber steht die Tatsache, dass es sich bei Drehschieberpumpen um mechanische Pumpen handelt, welche durch bewegliche Teile Verschleisserscheinungen bedingen. Feuchtigkeit in Form von Wasserdampf, welcher in der Pumpe wieder kondensiert, kann ebenfalls dazu beitragen.

Trotzdem ist die Konstruktion einer Drehschieberpumpe recht einfach (Abb. 3): Im zylindrischen Pumpengehäuse dreht sich ein zylindrischer Rotor. Dieser ist dezentrisch platziert, wobei er zwischen der Einlass- und der Auslassöffnung mit dem Gehäuse gasdicht abschliesst. Weiter beinhaltet er zwei Schieber, die zueinander um 180° Grad versetzt sind und durch Federn gegen die Wandung des Gehäuses gepresst werden. Alle beweglichen Teile sind mit einem Ölfilm überzogen, wobei das Öl die Funktion der Dichtung übernimmt. Der Gastransport findet aufgrund des variablen Innenraumes bzw. der Kompression des Gases an der Austrittsöffnung statt [4].



- 1) Rotor
- 2) Schieber
- 3) Einlassöffnung
- 4) Auslassventil
- 5) Ölabscheider
- 6) Auslassöffnung

Abb. 3: Drehschieberpumpe

Zur Berechnung des Druckverlaufes beim Evakuieren kann bei einer idealen Pumpe eine Exponentialfunktion zur Basis e angesehen werden. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass im Realfall durch die Pumpe Gasmoleküle in die Kammer rückdiffundieren. Daher wird als ultimativer Druck für Drehschieberpumpen ein Wert von 10 Pa angegeben.

4.4 Möglichkeiten zum Erreichen niedrigerer Enddrücke

Als weitere technische Möglichkeiten bzw. Ausbaustufen kann man folgende Dinge anführen: Die Pumpleistung und somit auch der tiefstmögliche Druck lässt sich durch eine weitere Pumpe steigern. Dafür kommen Diffusionspumpen in Frage, wobei Öldiffusionspumpen (Abb. 4) als zweite Pumpenstufe am gebräuchlichsten

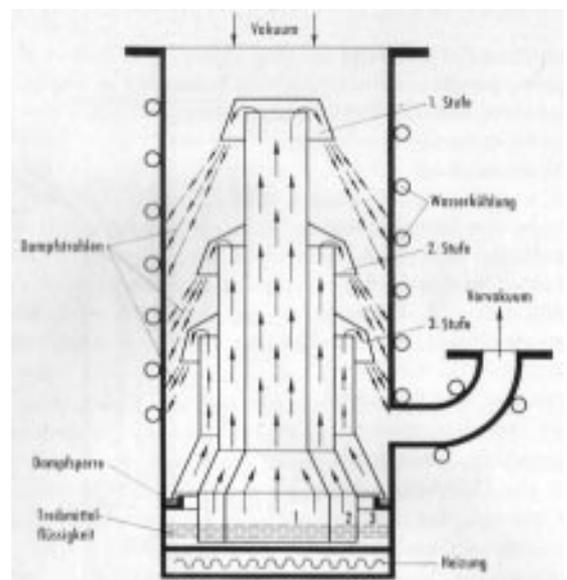


Abb. 4: dreistrahlige Öldiffusionspumpe

sind. Bei diesem Pumpentyp wird Öl erhitzt und der dabei entstehende Dampf durch ein System von Düsen geleitet. Dieser erreicht dabei 2 - 3 fache Schallgeschwindigkeit, wodurch in den Gasstrom diffundierte Gase mitgerissen werden. An der Gehäusewand der Pumpe kondensiert der Öldampf wieder und das transportierte Gas wird von einer Vorpumpe, z.B. einer Drehschieberpumpe, entfernt.

Durch Ausheizen und anschliessendem Kühlen der Apparatur meist mit flüssigem Stickstoff kann man die Grenze des tiefstmöglichen Druckes ebenfalls weiter senken. Dabei wird das System für einige Stunden auf Temperaturen von 250 bis 450 °C erhitzt, wodurch Flüssigkeiten beschleunigt verdampfen und Gase aus den Feststoffen des Systems austreten. Anschliessend wird die gesamte Apparatur auf unter -200 °C gekühlt. Dadurch wird der Dampfdruck noch vorhandener Flüssigkeiten stark verringert und Gase schlagen sich als Flüssigkeiten oder Feststoffe an der Gehäusewandung nieder. Diese Methoden sind jedoch erst im Hochvakuum effektiv und nutzbringend einzusetzen, im Feinvakuumbereich ist ihr Nutzen verschwindend gering. Zudem ist diese Methode mit dem jetzigen Kammersystem nicht realisierbar, da die Dichtungen und Klebeverbindungen nicht hitzebeständig sind. Ebenso übersteigt der technische Aufwand die Grenzen des Machbaren.

5. Die Messvorrichtungen

Zur Messung des Druckes kommen ein Manometer mit einem Arbeitsbereich vom Normaldruck bis hinunter zu 10^4 Pa und ein selbstgebautes Druckmessgerät basierend auf einem Temperaturfühler zum Einsatz. Letzteres wird in Kapitel 5.1 genauer beschrieben. Entgegen der ursprünglichen Überlegungen genügen diese beiden Druckanzeigen für die Messung des Grob- und des Feinvakuums.

5.1 Konstruktion des Temperatur-Druck-Messgerätes

Die Druckmessung basiert auf der Kühlungsleistungsdifferenz von Konvektionskühlung zur Strahlungskühlung. Dabei wird der physikalische Zusammenhang genutzt, dass durch Konvektionskühlung wesentlich mehr Wärme als durch Strahlungskühlung in der gleichen Zeit von einem erhitzten Gegenstand abgeführt werden kann. Bei Normaldruck wird die Kühlung hauptsächlich durch die Energieübertragung vom Messfühler auf die Gasmoleküle bewirkt, wodurch diese aufgrund ihrer nun erhöhten Temperatur nach oben aufsteigen (Konvektion). Da die Anzahl der Moleküle pro Volumen aber mit absinkendem Druck erniedrigt wird, verlagern sich die Kühlungsleistungsanteile in Richtung der Strahlungskühlung. Dabei gibt der Messfühler Energie hauptsächlich in Form von elektromagnetischen Wellen ab. Diese Abhängigkeit verläuft im Bereich von 10^3 bis 10^{-1} Pa stark druckabhängig [4]. Auch von 10^5 bis 10^3 Pa kann sie zum Einsatz kommen, wobei die Messmethode jedoch keine signifikante Druckabhängigkeit mehr aufweist, sodass eine Wertetabelle angelegt werden muss.

Der Messfühler, ein KTY, ist ein Halbleiterbauelement und ändert in Abhängigkeit von seiner Temperatur seinen Widerstand. Während einer Messung wird der KTY durch Veränderung der Versorgungsspannung an einen anderen temperaturunabhängigen Widerstand abgeglichen (Abb. 5). Der Anfangsstrom durch die Messbrücke ist so gewählt, dass sich der KTY bei Normaldruck auf ca. 80 - 100 °C aufheizt. Mit abnehmendem Druck ist aufgrund der geringer werdenden Konvektionskühlung eine niedrigere Heizleistung, also auch eine geringere Spannung nötig. Die hierbei auftretende Spannungsänderung wird um den Faktor 10 verstärkt. Zu Beginn jeder Messung wird dieser Wert mittels einer stabilisierten Referenzspannung auf den Wert Null gesetzt.

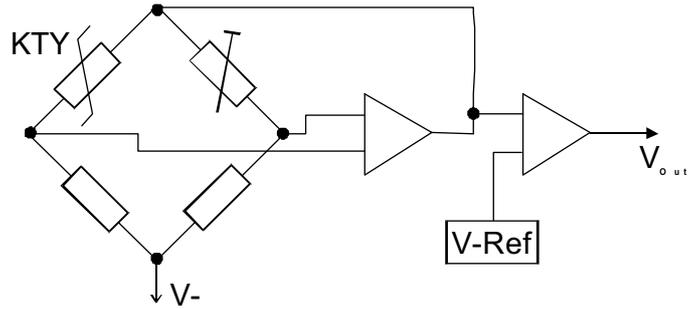


Abb. 5: Schaltung der Temperatur-Druck-Messmethode

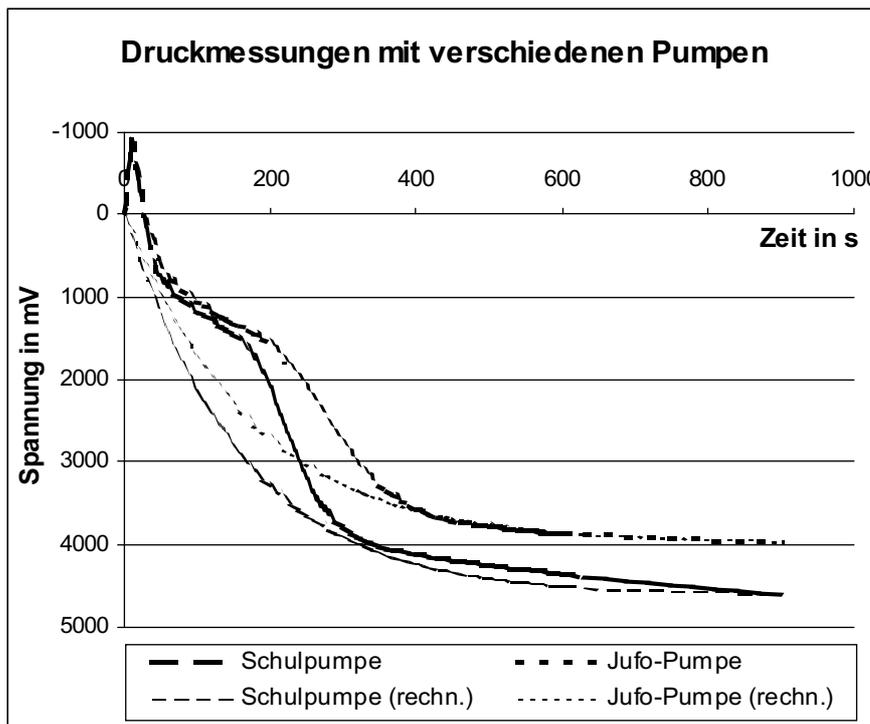


Diagramm 2: Spannungsverlauf am KTY in Abhängigkeit zum Druck

Das Widerstandsverhältnis der beiden Spannungsteiler in der Brücke ist genau dann gleich, wenn die Differenzspannung zwischen den beiden Mittelanzapfungen gleich Null ist. Der nachgeschaltete Operationsverstärker misst diese Differenzspannung und steuert seine Ausgangsspannung so nach, dass diese Spannung wieder auf den Wert Null zurückgeführt wird. Die Ausgangsspannung kann dann weiter verarbeitet werden. Die nachfolgende

Stufe erlaubt eine Nullpunktverschiebung der Spannung sowie bei Bedarf eine Nachverstärkung.

Bei der Interpretation der gewonnenen Daten durch die Messung der Spannung am KTY während der Evakuierung des Kammervolumens ergeben sich charakteristische Kurven. Dabei ist in der Darstellung in Diagramm 2 zu beachten, dass die gemessene Spannung aufgrund der Messelektronik umgekehrt proportional zum Druck und der Heizleistung verläuft. Der Spitzenwert im Zeitraum von 0 bis 50 s ist möglicherweise einerseits durch den Anstieg der Konvektionskühlung zu erklären, da es aufgrund des Abpumpens der Luft in der Kammer zu Verwirbelungen kommt, welche den Kühlungseffekt verstärken, dieser Vorgang verliert jedoch schnell an Bedeutung. andererseits findet

in diesem Zeitintervall gleichzeitig eine rasche Druckminderung statt, die zu einer Abkühlung des Gases führt und damit ebenfalls eine höhere Heizleistung bedingt. Im Bereich von 50 bis 300 s (Schulpumpe) bzw. 50 bis 400 s (Jufo-Pumpe) egalisiert sich dieser Prozess wieder, da die Gasmenge bereits stark reduziert ist. Anschließend zeichnet sich eine Übereinstimmung der Graphen mit den eingezeichneten exponentiell verlaufenden Ausgleichskurven ab, in diesem Bereich scheint der Zusammenhang von Spannung und Druck linear zu sein.

5.2 Versuch einer mathematischen Annäherung

Bei dem Abpumpvorgang sind verschiedene Prozesse beteiligt, entsprechendes gilt auch für die Vorgänge am Messsensor. Hierbei sind die verschiedenen Größen nicht allein von der Zeit, sondern auch von anderen Parametern abhängig.

- Pumpe - das transportierbare Gasvolumen hängt ab vom aktuellen Druck
- Leck - das eintretende Gasvolumen hängt ab vom Differenzdruck
- Ausgasung - das eintretende Gasvolumen ist nahezu ausschließlich zeitabhängig

Für die Temperatur des Messfühlers gilt darüber hinaus:

- Konvektion - Die Kühlung hängt vom Gasdruck ab
- Expansion - eine Abkühlung des Gases verändert die Umgebungstemperatur

Für die mathematische Darstellung solcher Vorgänge und ohne Kenntnis von Differentialgleichungen, die hierfür üblicherweise benötigt werden, verwende ich eine stark vereinfachende Differenzenmethode, in der in konstanten Zeitintervallen der Zustand des Systems aus dem vorherigen Zustand bestimmt wird und die Entwicklung der Größen von einem zum nächsten Zustand durch entspre-

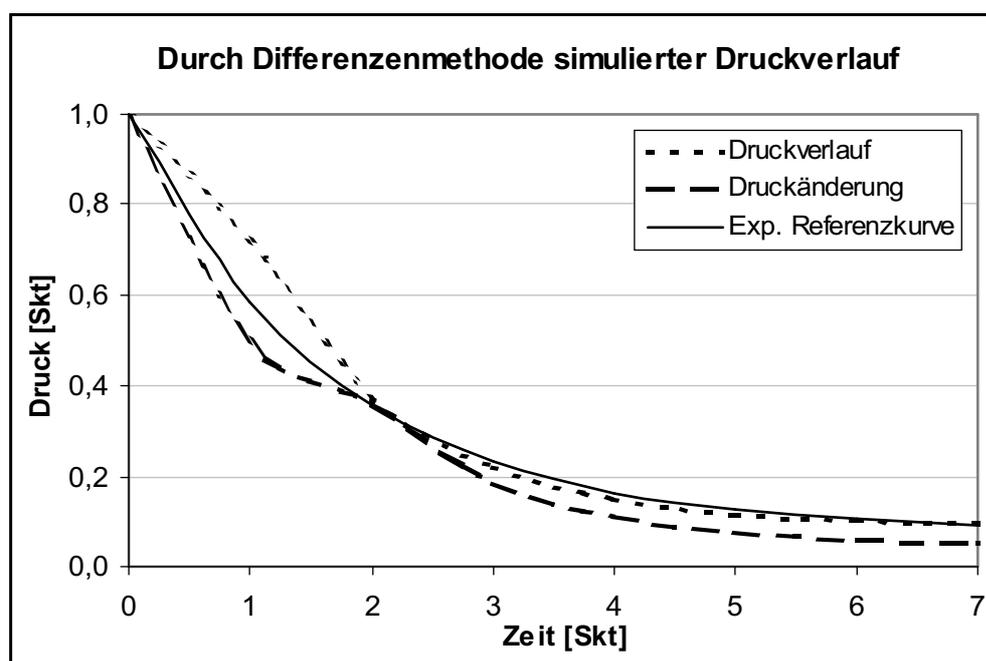


Diagramm 3: Simulation der Vorgänge beim Evakuieren

chende einfache Berechnungen möglich ist. Das Ergebnis einer solchen (mit Excel ausgeführten) Rechnung zeigt das Diagramm 3. Überraschender Weise zeigen sich qualitativ gute Übereinstimmungen mit den von mir am KTY gemessenen Werten nach Diagramm 2, was darauf hindeutet, dass für den deutlich von der exponentiellen Erwartungskurve abweichenden Verlauf in den ersten 300 s (in der Simulation zwischen 0 und 4 Skt) vermutlich eine Abkühlung des Gasvolumens durch Druckerniedrigung verantwortlich ist.

5.3 Eichung der Messmethode

Eine Eichung der Temperatur-Druck-Messmethode kann zur Zeit noch nicht erfolgen, da es mir bisher noch nicht gelungen, den theoretischen Druckverlauf aufgrund von Pumpenleistung und Einströmungsraten in Abhängigkeit von der Zeit exakt zu bestimmen. Die ersten Ansätze lassen jedoch erkennen, dass sich ein Gleichgewicht zwischen der Pumpenleistung als auch der Ausgasungsrate und der Leckrate für den tiefstmöglichen Druck der Apparatur einstellen muss. Die Druckverminderung durch die Pumpe folgt prinzipiell einer Exponentialfunktion, wohingegen die durch die Leckrate bestimmte einströmende Gasmenge angenähert linear abhängig ist von dem Differenzdruck der Kammer zur umgebenden Atmosphäre. Die ausgasende Gasmenge ist für kurze Evakuierungszeiten von bis zu zwei Stunden zeitlich linear. Soweit der theoretische Ansatz.

Eine Eichung meiner Messvorrichtung wäre nur möglich, wenn ich ein kalibriertes Messgerät für Feinvakuum zur Verfügung hätte, was leider nicht der Fall ist. Zwar haben wir ein McLeod Vakuum-Messgerät, allerdings arbeitet dieses mit nicht unerheblichen Mengen von Quecksilber, weshalb ich es bislang nicht eingesetzt habe.

Eine andere Möglichkeit wäre, eine Kalibrierung bestimmter Druckwerte durch Gasentladungserscheinungen vorzunehmen, von denen bekannt ist, dass sie bei einem genau bestimmten Druck einsetzen. Mit mindestens drei verschiedenen solcher Erscheinungen wäre eine Skalierung meiner Apparatur ebenfalls durchführbar.

6. Vakuumphänomene

Als „Phänomene“ bezeichne ich die Tatsache, dass durch verminderte Drücke Ionisation und Anregung von Molekülen wesentlich leichter auftreten kann. Durch Rekombination der ionisierten und angeregten Gasmoleküle kommt es bereits bei Spannungen zu Leuchterscheinungen an den elektrischen Durchführungen, die erheblich unterhalb der Spannungsfestigkeit der Isolatoren liegen. Sollte diese Tatsache durchzuführende Experimente nicht weiter beeinträchtigen, bleibt jedoch noch zu berücksichtigen, dass dabei an unerwünschten Stellen Ströme bis zu einigen Milliampere fließen können. Eine exakte Strommessung ist dann nicht mehr möglich. Hier muss die abnehmende Isolationswirkung des umgebenden Gases durch eine hinreichende andere Isolation kompensiert bzw. die Aufbauten auf geeignete Weise angeordnet werden.

7. Fazit und Ausschau

In Anbetracht der eingangs gesetzten Ziele sind einige davon noch nicht erreicht und bedürfen intensiver Bearbeitung. Die Messmethode ist zwar soweit fertig gestellt und auch relativ erfolgversprechend. Jedoch wird die zu verwendende Vakuumkammer erst nach Fertigstellung dieser Arbeit ihre Teststreife erlangen. Ebenso ist eine Vertiefung in die Berechnung des Druckverlaufes während einer Evakuierung sinnvoll und notwendig.

Alles in allem ist dieses Projekt bei Weitem noch nicht abgeschlossen und es bieten sich noch viele Verbesserungspunkte und Erweiterungsmöglichkeiten.

8. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all den Personen danken, die mir diese Arbeit ermöglicht haben oder mir dabei hilfreich zur Verfügung standen. Daher möchte ich Herrn Thomas Biedermann meine Anerkennung für seine kreativen und nützlichen Hilfestellungen aussprechen. Ebenso möchte ich mich für die gute Unterstützung durch die DLR in Trauen, insbesondere bei Herrn Schmidt, bedanken, mit deren Hilfe diese Arbeit im handwerklichen Bereich erst ermöglicht wurde. Auch Herrn Ermgassen kommt mein Dank für seine hilfreiche Unterstützung zu.

9. Literaturverzeichnis

- [1] Höfling, Dr.: „Physik, Formeln und Einheiten, Sekundarstufe II“, S. 73, Köln 1997
- [2] Brockhaus ABC: „Physik“, Band II, S. 1628f, Leipzig 1972
- [3] L. Holland/ W. Steckelmacher/ J. Yarwood: „Vacuum Manual“, London 1974
- [4] H. A. Steinherz: „Handbook of High Vacuum Engineering“, New York, 2nd Printing, 1967