

V70

Der Vakuumversuch

Celina Wieberg
celina.wieberg@tu-dortmund.de

Aaron Schink
aaron.schink@tu-dortmund.de

Durchführung: 23.10.2024

Abgabe: 30.10.2024

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Druckbereiche und Strömungsarten	3
2.2 Partialdrücke der Luft	4
2.3 Oberflächenphänomene und Gasdynamik	4
2.4 Leistung und Effizienz von Vakuumpumpen	5
2.5 Evakuierungskurve	6
2.6 Pumpen	6
2.6.1 Drehschieberpumpe	6
2.6.2 Turbomolekularpumpe	7
2.7 Vakuummessgeräte und Effizienzbereiche	8
2.7.1 Ionisations-Vakuummeter	8
2.7.2 Glühkathoden und Kaltkathoden	8
2.7.3 Pirani-Vakuummeter	8
2.7.4 Piezo-Vakuummeter	9
3 Durchführung	9
3.1 Turbomolekularpumpe	9
3.1.1 Evakuierungskurve	9
3.1.2 Leckratenmessung	10
3.1.3 Leckraten mit einem dünnen Verbindungsrohr	10
3.2 Drehschieberpumpe	11
3.2.1 Evakuierungskurve	11
3.2.2 Leckratenmessung	11
4 Auswertung	11
4.1 Fehler	12
4.2 Drehschieberpumpe	13
4.2.1 Evakuierungskurve	13
4.2.2 Leckratenmessungen für bestimmte Gleichgewichtsdrücke p_G . . .	14
4.3 Turbomolekularpumpe	18
4.3.1 Evakuierungskurve	18
4.3.2 Leckratenmessungen für bestimmte Gleichgewichtsdrücke p_G . . .	20
4.4 Leitwertbestimmung eines kurzen Rohres	24
5 Diskussion	27
5.1 Saugvermögen	27
5.2 Leitwert	29
6 Originaldaten	30
Literatur	40

1 Zielsetzung

Ziel des Versuchs ist die Bestimmung des effektiven Saugvermögens der Drehschieberpumpe und der Turbomolekularpumpe mit Hilfe der Auswertung von Evakuierungskurven und durch Ermittlung ihrer jeweiligen Leckraten. Außerdem sollen die Grundlagen der Vakuumphysik, so wie der Umgang mit den entsprechenden Vakuumtechnik-Komponenten erlernt werden. Die Vakuumphysik hat vielfältige Anwendungsbereiche in Wissenschaft und Industrie. In der Lebensmittelverarbeitung wird Vakuumtechnik zum Gefriertrocknen und zur Vakuumverpackung genutzt. In der wissenschaftlichen Forschung ist sie essentiell für physikalische Experimente und die Massenspektrometrie. Auch im Alltag findet Vakuumtechnik Anwendung, etwa bei der Beschichtung von Glas für bessere Isolierung und beim Recycling von Elektroschrott zur Rückgewinnung wertvoller Materialien. Diese vielseitigen Einsatzmöglichkeiten machen die Vakuumphysik zu einem unverzichtbaren Werkzeug in vielen Bereichen.

2 Theorie

Das Vakuum ist ein Zustand geringer Gasdichte, also ein Raum, welcher Nahezu leer von Materie ist. Da dieser Raum nur wenige Teilchen enthält, ist der Druck in einem Vakuum deutlich geringer als der Atmosphärendruck. Druck ist definiert als die Kraft pro Fläche, die von Gasmolekülen ausgeübt wird, wenn sie auf eine Oberfläche stoßen. Die mittlere freie Weglänge, also die Strecke, welche ein Teilchen im Mittel zurücklegt, bevor es mit einem anderen kollidiert, ist folglich sehr hoch. Ein perfektes Vakuum ist in der Praxis nicht zu realisieren, zur mathematischen Beschreibung des Vakuums wird die Zustandsgleichungen des idealen Gases verwendet, einem theoretischen Modell für ein Gas, in welchem die Teilchen keine Wechselwirkungen außer elastischen Stößen erfahren. Außerdem ist ihr Volumen vernachlässigbar und sie werden als punktförmige Teilchen angenommen. Die Zustandsgleichung des idealen Gases ist gegeben durch

$$pV = Nk_B T. \quad (1)$$

Dabei ist p der Druck, V das Volumen, N die Teilchenanzahl, k_B die Boltzmann-Konstante und T die Temperatur. Bei konstanter Temperatur ist der Druck eines Gases umgekehrt proportional zum Volumen, das ist das Boyle-Mariottesche Gesetz,

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}. \quad (2)$$

2.1 Druckbereiche und Strömungsarten

Beim Evakuierungsvorgang fällt der Druck über die Zeit. Der normale Atmosphärendruck beträgt auf der Erdoberfläche 1 bar. Die Druckbereiche des Vakuums liegen bei folgenden Werten: Grobvakuum bei 1 bar bis 10^{-3} bar, Feinvakuum von 10^{-3} bar bis 10^{-7} bar, Hochvakuum von 10^{-7} bis 10^{-9} bar und das Ultrahochvakuum liegt bei Werten unter 10^{-9} bar. In niedrigen Druckbereichen, also im Hochvakuum und im Ultrahochvakuum,

dominiert die molekulare Strömung, hier bewegen sich die Moleküle fast unabhängig voneinander, da sie nur selten kollidieren und ihre mittlere freie Weglänge größer ist als die Abmessung des Behälters. In größeren Druckbereichen kollidieren die Teilchen oft und bewegen sich in geordneten Bahnen, das wird laminare Strömung genannt. Im folgenden betrachten wir ein Gemisch aus Gasen, der Gesamtdruck ist dabei die Summe aller Partialdrücke. Der Partialdruck eines Gases in einem Gasgemisch ist der Druck, den dieses einzelne Gas ausüben würde, wenn es alleine das gesamte Volumen des Gemisches ausfüllen würde.

2.2 Partialdrücke der Luft

Der Versuch wird mit Luft betrieben, die präzise Zusammensetzung dieser und der Partialdrücke ist von äußerster Wichtigkeit. Luft besteht hauptsächlich aus Stickstoff, Sauerstoff, Argon und Kohlendioxid, zusammen mit geringen Mengen anderer Gase. Hier sind die ungefähren Anteile und die entsprechenden Partialdrücke bei einem Gesamtdruck von 1 atm (101325 Pa):

$$\text{Stickstoff}(N_2) = 78\%$$

$$\text{Sauerstoff}(O_2) = 21\%$$

$$\text{Argon}(Ar) = 0.93\%$$

$$\text{Kohlendioxid}(CO_2) = 0.04\%$$

$$\text{Andere Gase} = 0.03\%$$

2.3 Oberflächenphänomene und Gasdynamik

Um das Verhalten von Gasen in Vakuumexperimenten zu verstehen, müssen sich einige Phänomene klargemacht werden. Die Moleküle haben alle eine kinetische Energie, dadurch können sie im Vakuum von einem Bereich hoher Konzentration zu einem Bereich niedriger Konzentration gelangen. Diese so genannte Diffusion gewährleistet die Homogenität des Vakuums, kann aber durch Temperaturveränderung und Materialeigenschaften beeinflusst werden. Haften Gas oder Flüssigkeitsmoleküle an der Oberfläche eines Feststoffes, dringen aber nicht in ihn ein, so wird von Adsorption gesprochen. Die Ursache von Adsorption sind oft Van-der-Waals-Kräfte, die zur beschriebenen Anreicherung von Gasen nahe der Oberfläche führen. Dringen die Moleküle tatsächlich in den Feststoff ein, so handelt es sich um Absorption. Die Moleküle können dort chemisch gebunden oder gelöst werden. Im Vakuum tritt Absorption seltener auf als Adsorption. Beide Phänomene können zu einer Druckänderung des Systems führen, da die Prozesse reversibel sind, die Moleküle können also wieder freigesetzt werden. Dieser Prozess wird als Desorption bezeichnet und kann z.B. durch Erhitzen erreicht werden. Die Reversibilität der ersten Prozesse ist wichtig für die Aufrechterhaltung eines stabilen Vakuums, führt aber automatisch zu einem Druckanstieg. Werden Gase langsam aus Materialien freigesetzt, entstehen virtuelle Lecks im Vakuum. Ihr Ursprung liegt immer in interner Gasfreisetzung, sie entstehen nicht durch externe Quellen oder Leckagen. Leckagen bezeichnen das ungewollte Eindringen von Gas

oder Flüssigkeiten durch undichte Stellen in einem System. In der Vakuumtechnik und Physik bezieht sich der Begriff speziell auf das Eindringen von Luft oder anderen Gasen in ein Vakuumsystem. Leckagen können durch verschiedene Ursachen entstehen wie z.B. kleine Löcher in den Materialien, beschädigte Dichtungen oder undichte Koppelstellen. Treten virtuelle Lecks auf, so können sie den Evakuierungsvorgang verlangsamen.

2.4 Leistung und Effizienz von Vakuumpumpen

Die Kenngrößen einer Vakuumpumpe sind wichtig um ihre Effizienz und ihre Arbeitsweise zu analysieren. Der Gasstrom in einer Pumpe beschreibt die Menge an Gas, die pro Zeiteinheit durch ein System bewegt wird. Die Saugleistung einer Pumpe ist ihre Fähigkeit, Gas aus einem System zu entfernen. Beides wird typischerweise in Liter pro Sekunde angegeben. Die Saugleistung lässt sich berechnen mit

$$Q = \frac{dpV}{dt} \quad (3)$$

Dabei ist V das Volumen und t die Zeit. Das Saugvermögen S ist definiert als die maximale Gasmenge, die die Pumpe bei einem bestimmten Druck abpumpen kann. Das Saugvermögen lässt sich mit der Evakuierungskurve berechnen und hängt von dem Betriebsdruck ab:

$$S = \frac{dV}{dt}. \quad (4)$$

In der Praxis treten Leistungsverluste in einer Pumpe auf, Gründe dafür sind thermische Effekte wie Temperaturänderung des Gases, Viskosität, raue Innenflächen von Rohren und Kollisionsverluste bei hohen Drücken. Es macht daher Sinn, ein effektives Saugvermögen zu definieren. Es gilt [2]

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{C} \quad (5)$$

Der Leitwert C eines Rohres beschreibt, wie effizient Gas durch das Rohr transportiert wird. Er kann definiert werden über den Strömungswiderstand R , welcher beschreibt wie stark der Gasfluss durch das Rohr behindert wird und die Druckdifferenz Δp , die zwischen der Messsonde und der Pumpe herrscht

$$C = \frac{1}{R} = \frac{Q}{\Delta p} \quad (6)$$

Mit der Formel für den Gasfluss Q in Abhängigkeit von dem Strömungswiderstand und der Druckdifferenz

$$Q = \frac{\Delta p}{R} \quad (7)$$

kann der Leitwert durch

$$C = \frac{Q}{\Delta p} \quad (8)$$

ausgedrückt werden.

2.5 Evakuierungskurve

Die Evakuierungskurve beschreibt, wie der Druck während des Evakuierungsvorgangs durch eine Vakuumpumpe mit der Zeit fällt. Mithilfe der Kurve können Effizienz und Leistung der Pumpe analysiert werden. Es kann eine Differentialgleichung unter folgenden Annahmen hergeleitet werden:

- Die Temperatur T ist konstant.
- Das Gas lässt sich mit den Gesetzen der idealen Gasgleichung beschreiben.
- Das System ist abgeschlossen.

Die Zustandsgleichung für ein ideales Gas lautet:

$$p \cdot V = N k_B T \quad (9)$$

Da $N \cdot k_B \cdot T$ konstant ist gilt: $p \cdot V = \text{konstant}$. Wird ein System, welches mit einer Pumpe evakuiert wird, betrachtet, ändert sich der Druck über die Zeit. Diese Änderung wird durch folgende Differentialgleichung beschrieben:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{S}{V} \cdot p \quad (10)$$

Dies ist eine lineare Differentialgleichung 1. Ordnung, die durch Trennung der Variablen gelöst wird. Werden p und t getrennt und beide Seiten integriert, ergibt sich nach anwenden der Exponentialfunktion eine Gleichung, die beschreibt wie der Druck $p(t)$ im Laufe der Zeit t abnimmt

$$p(t) = p_0 \cdot e^{-\frac{S}{V} \cdot t} \quad (11)$$

Dabei ist p_0 der Druck zu Beginn der Messung. Unter berücksichtigung des Enddrucks p_E modifiziert sich die Lösung zu: [2]

$$p(t) = p_E + (p_0 - p_E) \cdot e^{-\frac{S}{V} \cdot t} \quad (12)$$

Der Enddruck p_E der Evakuierungskurve ist der Druck, der erreicht wird, wenn die Vakuumpumpe das Vakuum erreicht hat und keine signifikanten Leckagen oder Gasquellen mehr vorhanden sind. Der Enddruck wird festgelegt durch das Gleichgewicht zwischen der Saugleistung der Pumpe und den Leckraten im System. Zudem kann die Temperatur Einfluss auf die Gasdichte und die Effizienz der Vakuumpumpe nehmen.

2.6 Pumpen

2.6.1 Drehschieberpumpe

Die Drehschieberpumpe ist eine Verdrängungspumpe, die für die Vakuumerzeugung genutzt werden kann. Sie besteht aus dem Stator, einem festen Gehäuse und einem Rotor in Form eines rotierenden Zylinders welcher exentrisch im Gehäuse gelagert ist. Der Rotor

besteht aus mehreren Schiebern, welche durch Zentrifugalkräfte oder Federn an die Innenwand des Gehäuses gepresst werden (Phase1). Die Vakuumerzeugung läuft folgendermaßen ab: Sobald der Rotor sich dreht, entsteht ein vergrößerter Schöpfraum, welcher mithilfe der Ansaugstutzen das Gas einsaugt(Phase 1+2). Mit der Zeit erreicht der Schöpfraum sein maximales Volumen, sobald dies geschehen ist, beginnt er sich wieder zu verkleinern, wodurch das angesaugte Gas komprimiert wird. Dadurch erhöht sich der Druck. Schließlich wird das Gas durch den Auslassstutzen aus der Pumpe gedrückt und in das Abgassystem geleitet(Phase 3). Das Prinzip basiert darauf, dass durch die Rotation ein Volumen entsteht welches sich vergrößert und verkleinert, wodurch ein Druckgradient entsteht, der das Gas durch die Pumpe transportiert. [drehschieberpumpe, schieberpumpe]

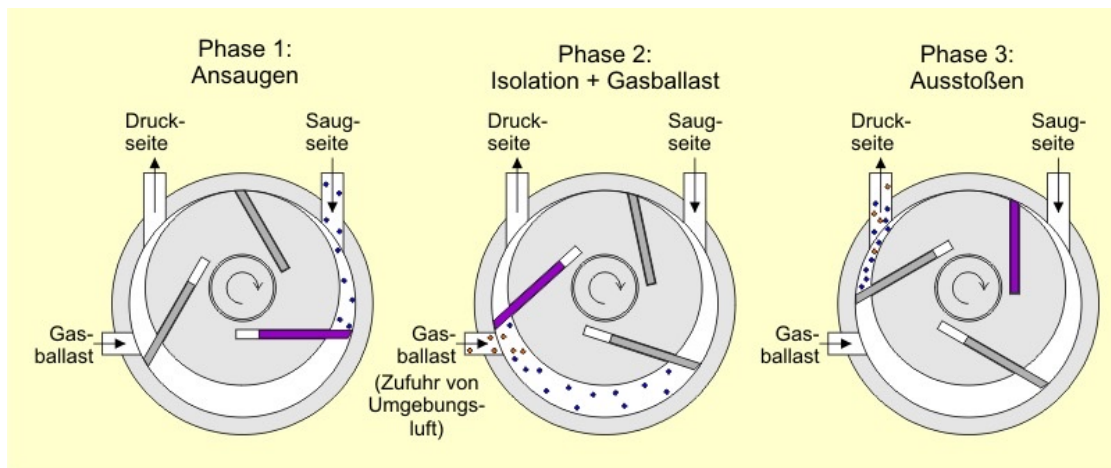


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Drehschieberpumpe

2.6.2 Turbomolekularpumpe

Turbomolekularpumpen arbeiten effizient im Hochvakuumbereich und benötigen ein Vorvakuum, um effektiv zu funktionieren. Dieses Vorvakuum wird durch eine vorgeschaltete Drehschieberpumpe erzeugt, die den Druck ausreichend senkt, damit die Turbomolekularpumpe ihre Aufgabe erfüllen kann. Ohne diese Vorpumpe könnte die Turbomolekularpumpe nicht die erforderliche Geschwindigkeit erreichen, um Gasmoleküle effektiv zu beschleunigen und ein hohes Vakuum zu erzeugen. Die Turbomolekularpumpe ist eine mechanische Vakuumpumpe, die das Prinzip der molekularen Strömung nutzt. Die Pumpe besteht aus einem Rotor und mehreren Statorscheiben. Der Rotor ist scheibenförmig und besitzt Schaufeln, die wie bei einer Turbine angeordnet sind. Zwischen den Schaufeln befinden sich Spalten, die als Transportkanäle für das Gas dienen. Durch den Ansaugstutzen wird das Gas in die Pumpe geleitet und gelangt dort in die Spalten zwischen den rotierenden Schaufeln. Durch die hohe Geschwindigkeit des Rotors bekommen die Gasmoleküle Impulse übertragen, wodurch sie wiederholt mit den Schaufeln kollidieren können und so durch die Pumpe transportiert werden. Die Moleküle werden in Richtung des Auslasses beschleunigt und bei Erreichen des Auslassstutzens aus der Pumpe geleitet.

Dadurch wird der Druck in der Kammer verringert, was ein Vakuum erzeugt. Die Pumpe basiert also auf der kinetischen Energie der Gasmoleküle. Die Pumpen sind besonders effektiv im Hochvakuumbereich [6].

2.7 Vakuummessgeräte und Effizienzbereiche

2.7.1 Ionisations-Vakuummeter

Die Ionisations-Vakuummeter sind in der Lage sehr niedrige Drücke präzise zu messen, sie werden also in Druckbereichen die dem Hochvakuum und dem Ultrahochvakuum entsprechen verwendet. In dem Gerät befindet sich ein Elektronenemitter, welcher Elektronen erzeugt. Diese werden durch ein elektrisches Feld beschleunigt und ionisieren die Gasmoleküle sobald sie aufeinander treffen. Die entstandenen Ionen werden durch ein weiteres elektrisches Feld zu einer Sammel Elektrode hin beschleunigt. Dieser Ionenstrom ist proportional zu der Anzahl der ionisierten Moleküle im Vakuum und wird von einem Amperemeter gemessen. Da der Strom proportional zu der Gasdichte und damit zu dem Druck im Vakuum ist, kann der gemessene Strom einfach in einen Druckwert umgerechnet werden. Die Druckveränderungen entstehen also durch den Ionisationsprozess [2].

2.7.2 Glühkathoden und Kaltkathoden

In einem Ionisationsvakuummeter können sowohl Glühkathoden als auch Kaltkathoden verbaut werden. In der Praxis werden allerdings nicht beide Typen in einem Gerät vereint, sondern wählt nach Anforderungen an den Versuch welches Gerät verwendet wird. Das Glühkathoden-Ionisationsvakuummeter arbeitet optimal im Hochvakuumbereich und nutzt die thermische Emission von Elektronen durch das Erhitzen eines Glühdrahtes. Dieses Gerät kann sehr präzise Messungen durchführen und in niedrigen Druckbereichen arbeiten, muss aber regelmäßig gewartet und gereinigt werden. Das Kaltkathode-Vakuummeter erzeugt Elektronenemission durch ein starkes elektrisches Feld. Zusätzlich wird in der Kathode ein magnetisches Feld generiert, durch welches die Elektronen Schraubbewegungen durchführen und anschließend die Ionisationen erzeugen. Dieses Gerät ist weniger anfällig gegen Verschmutzungen und ist schneller einsetzbar als das Glühkathoden-Ionisationsvakuummeter, da es nicht erst eine bestimmte Betriebstemperatur erreichen muss, dafür ist es allerdings weniger präzise und kann im Hochvakuum nicht zuverlässig arbeiten [4].

2.7.3 Pirani-Vakuummeter

Das Pirani-Vakuummeter ist ideal um mittlere Drücke im Bereich von 10^{-3} bar bis 10^{-2} bar zu messen. Ein konstanter Strom erhitzt einen Draht aus Platin oder Wolfram, welcher sich in einem Gehäuse befindet, durch das Gas strömen kann. Die Temperatur des Drahtes ist dabei abhängig von dem Druck des umgebenden Gases. Ist der Druck gering, so ist der Draht heiß. Das liegt daran, dass das Gas bei wenig Druck und damit geringer Gasdichte ein schlechter Wärmeleiter ist und nur wenig Wärme vom Draht abführen kann. Mit der gleichen Argumentation ist der Draht bei hohem Druck kühler.

Die Temperaturveränderung führt zu einer Veränderung des elektrischen Widerstandes des Drahtes. Diese Veränderung wird mit einer Brückenschaltung gemessen und daraus kann dann der Druck bestimmt werden. [7]

2.7.4 Piezo-Vakuummeter

Das Piezo-Vakuummeter arbeitet effizient bei Druckbereichen von einem bar, also bei Atmosphärendruck. In dem Vakuummeter befindet sich eine Membran, die von einem Gas umgeben ist. Der Druck des Gases übt eine Kraft auf die Membran aus, wodurch diese sich verformt. Ist der Druck höher, so ist auch das Ausmaß der Verformung größer. Ein piezoelektrisches Material, welches sich direkt an der Membran befindet kann die Verformung der Membran in ein elektrisches Signal übersetzen. Dieser Effekt wird piezoelektrischer Effekt bezeichnet, die Spannung entsteht durch die Verschiebung von elektrischen Ladungen innerhalb des Materials. Das Material muss dafür eine asymmetrische Kristallstruktur besitzen, sodass die positiven und negativen Ladungen im Kristall nicht symmetrisch verteilt sind. Der mechanische Druck auf das Material verschiebt die Atome innerhalb des Kristallgitters und damit die Verteilung der Ladungen im Material. Das daraus resultierende Dipolmoment erzeugt eine messbare elektrische Spannung. Aus dieser Spannung kann der Druck bestimmt werden. Druck und Spannung sind proportional zueinander und zu der Verformung der Membran. [7]

3 Durchführung

In dem Experiment werden verschiedene Geräte genutzt, um präzise Messergebnisse zu erzielen. Für die Pumpentechnik wird die Drehschieberpumpe der Firma ILMVAC Typ 300883/AKD16 mit einem Saugvermögen von $4,6 - 5,5 \frac{m^3}{h}$ betrieben. Für die Messungen im Hochvakuum wird mit der Turbomolekularpumpe SST81 von ILMVAC, betrieben bei 1350 Hertz mit einem Saugvermögen von $77 \frac{L}{s}$ gearbeitet. Bei der Messung der Vakuumwerte kommen zwei verschiedene Messgeräte zum Einsatz: der kombinierte Pirani/Kaltkathode-Sensor PKR 360 von Pfeiffer Vacuum, ausgelesen mit zwei Anzeigeräten TPG 361 („SingleGauge“), sowie der kombinierte Piezo/Pirani-Sensor TPG202 von Pfeiffer Vacuum [1].

3.1 Turbomolekularpumpe

3.1.1 Evakuierungskurve

Um die Evakuierungskurve zu bestimmen wird zuerst das schwarze Vential V3 oberhalb der Turbomolekularpumpe geöffnet. Vorab musste sichergestellt werden, dass bereits Drücke im Bereich des Hochvakuums von 10^{-7} bis 10^{-9} bar erreicht wurden. Die Messwerte werden mit einem Pirani-Vakuummeter aufgenommen. Dieses wird in Betrieb genommen, sobald die Turbomolekularpumpe eine Drehzahl von 1350 Hertz erreicht hat. Um die Kurve zu bestimmen wird das gelbe Dosierventiel auf den Startdruck von $5 \cdot 10^{-6}$ bar eingestellt während die Turbomolekularpumpe läuft. Das Kugel- und das Nadelventiel



Abbildung 2: Der Versuchsaufbau ohne zusätzliches Rohr. Dieses Rohr würde zwischen der Turbomolekularpumpe und dem Rezipienten verbaut werden.

werden dann zeitgleich geschlossen und über einen Zeitraum von 120 Sekunden werden Werte aufgenommen. Diese werden direkt auf einen angeschlossenen Computer übertragen, abgelesen und gespeichert. Die Messung wird drei mal durchgeführt, da dies der bestmögliche Kompromiss zwischen Zeitaufwand und Anzahl der Datensätze ist. Mehr Datensätze würden zu statistisch besseren Ergebnissen führen, passen aber nicht in den Rahmen des Praktikums.

3.1.2 Leckratenmessung

Um die Leckraten zu bestimmen, ist das Ventil V3 geöffnet, mithilfe des Dosierventils V4 werden vier verschiedene Gleichgewichtsdrücke eingestellt. Sobald diese eingestellt sind wird das Ventil V3 geschlossen. Die Werte um welche der Druck im Laufe der Messzeit von 120 Sekunden steigt, werden wieder an den Computer gesendet. Die Gleichgewichtsdrücke sind: $5 \cdot 10^{-8}$ bar, $7 \cdot 10^{-8}$ bar, $1 \cdot 10^{-7}$ und $2 \cdot 10^{-7}$ bar.

3.1.3 Leckraten mit einem dünnen Verbindungsrohr

Vor der Turbomolekularpumpe wird für die letzten zwei Messungen ein dünnes Rohr eingebaut. Sobald der Druck wieder Werte erreicht hat in welchen die Pumpe arbeiten kann wird jeweils bei $5 \cdot 10^{-8}$ bar und bei $2 \cdot 10^{-7}$ bar eine weitere Leckratenmessung durchgeführt.

3.2 Drehschieberpumpe

3.2.1 Evakuierungskurve

Die Bestimmung der Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe läuft nach dem selben Prinzip ab. Das gelbe Dosierventil V4 und das Kugelventil V5 werden geöffnet, und der Rezipient bei abgeklemmter Pumpe (V1 geschlossen) kurz bis zum Atmosphärendruck (ca. 1 bar) belüftet. Die Messung beginnt, sobald die Ventile V4 und V5 wieder geschlossen sind. Der Druckabfall wird 600 Sekunden lang von einem Computer aufgenommen. Bei diesem Experiment wird ein kombiniertes Piezo-/Pirani-Messgerät verwendet. Diese Messung findet einmal statt.

3.2.2 Leckratenmessung

Um ein Leck zu simulieren wird bei laufender Pumpe mithilfe des Dosierventils V4 ein Gleichgewichtsdruck im Rezipienten eingestellt. Es werden sechs Messung durchgeführt, jeweils 200 Sekunden lang. Die Messung startet, sobald V1 geschlossen wird. Die dabei eingestellten Gleichgewichtsdrücke sind $5 \cdot 10^{-4}$ bar, 0,01 bar, 0,05 bar und 0,1 bar. Die Messung bei 0,1 bar wird dabei dreimal durchgeführt.

4 Auswertung

Für die Auswertung wird die Python-Bibliothek `numpy` [3] benutzt. Die Fits entstehen mit `curve_fit` aus `scipy.optimize` [8]. Die Fehlerrechnung wird mit `uncertainties` [5] durchgeführt. Plots entstehen mit `matplotlib.pyplot`.

Vor den Messreihen der beiden Pumpen wird der Rezipient lang genug evakuiert, sodass ein angenäherter Enddruck p_E gemessen werden kann.

Die Evakuierungskurven werden mit linearen Regressionen (Least Square Fits) der Form

$$y = m \cdot x + b \quad (13)$$

genährt, wobei die Messwerte Werte gemäß (12) als

$$f(t) = \ln \frac{p(t) - p_E}{p_0 - p_E} = -\frac{S}{V} \cdot t \quad (14)$$

zu fittende Werte benutzt werden, sodass die verschiedenen Saugvermögen in den unterschiedlichen Druckbereichen mit

$$S = -m \cdot V \quad (15)$$

berechnet werden können. Dabei ist m die Steigung der linearen Fits in mbar/s und b der y -Achsenabschnitt in mbar.

Bei den Leckratenmessungen zu den Gleichgewichtsdrücken p_G wird das Saugvermögen S ebenfalls durch eine lineare Regression bestimmt. S ist hierbei gegeben durch

$$S = m \cdot \frac{V}{p_G} \quad (16)$$

4.1 Fehler

Die PKR-360-Geräte besitzen einen Messbereich von $1 \cdot 10^{-9}$ hPa bis 1000 hPa, das TPG-202 einen von 1200 hPa bis $5 \cdot 10^{-4}$ hPa.

Die Genauigkeit der PKR-360 liegen bei 30% des Messwertes für Messungen zwischen $1 \cdot 10^{-8}$ hPa und 100 hPa und bei 50% für Messungen darüber bis zu 1000 hPa. Die Genauigkeit des TPG-202 liegt bei einem Faktor 2 für Messungen unter $2 \cdot 10^{-3}$ hPa, bei 10% für Messungen bis zu 10 hPa und bei 0,3% für Messungen bis zu 1200 hPa. [1]

Die Fehler der gemessenen Werte werden mit einer Fehlerfortpflanzung berücksichtigt. Der Mittelwert \bar{x} von N gemessenen Werten a bestimmt sich über

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i, \quad (17)$$

der Fehler des Mittelwertes über

$$\Delta x = \sqrt{\frac{1}{N \cdot (N-1)} \sum_{i=1}^N (a_i - \bar{x})^2}. \quad (18)$$

Die Gaußsche Fehlerfortpflanzung für eine berechnete Größe f lautet

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot (\Delta x_i)^2}. \quad (19)$$

Die Fehlerfortpflanzung für (14) ergibt

$$\Delta f(t) = \sqrt{\left(\frac{1}{p(t) - p_E} \cdot \Delta p(t) \right)^2 + \left(\frac{1}{p_0 - p_E} \cdot \Delta p_0 \right)^2 + \left(\frac{1}{p_0 - p_E} - \frac{1}{p(t) - p_E} \cdot \Delta p(t) \right)^2}, \quad (20)$$

der Fehler für das Saugvermögen aus der Steigung nach (15)

$$\Delta S = \sqrt{(V \cdot \Delta m)^2 + (m \cdot \Delta V)^2}, \quad (21)$$

der Fehler für das Saugvermögen für die Leckratenmessung nach (16)

$$\Delta S = \sqrt{\left(\frac{V}{p_G} \cdot \Delta m \right)^2 + \left(\frac{m}{p_G} \cdot \Delta V \right)^2 + \left(\frac{V \cdot m}{p_G^2} \cdot \Delta p_G \right)^2} \quad (22)$$

Zur Überprüfung der Richtigkeit von **uncertainties** werden Ergebnisse vorweggenommen und mit einer händischen Rechnung verglichen.

Für S_3 in Abbildung 10 lautet der Fehler in $\Delta S = 0,019$ L/s, was bis zur dritten Nachkommastelle mit einem händischen Ergebnis mit $m = (-0,005\,831\,318\,0 \pm 0,000\,000\,013\,0)$ mbar/s und einem Volumen von $V = (33,0 \pm 3,3)$ L übereinstimmt. Ebenso findet sich eine Übereinstimmung der Leckratenmessung für ein Gleichgewichtsdruck von $2 \cdot 10^{-4}$ mbar $\pm 6 \cdot 10^{-5}$ mbar mit der Steigung $m = (0,000\,139 \pm 0,000\,012)$ mbar/s im Volumen $(33,0 \pm 3,3)$ L bei Aufrundung des händischen Ergebnisses.

Die Sicherheit von **uncertainties** wird im Folgenden akzeptiert und für die Fehlerrechnung genutzt.

4.2 Drehschieberpumpe

Der für die Drehschieberpumpe nach einer ungefähr 30 minütigen Mittagspause gemessene Enddruck beträgt

$$p_E = (3,83 \pm 0,38) \cdot 10^{-3} \text{ mbar.} \quad (23)$$

Das Volumen wird der Versuchsanleitung entnommen und beträgt

$$V_{DP} = (34 \pm 3,4) \text{ L.} \quad (24)$$

4.2.1 Evakuierungskurve

Für die Evakuierungskurve ergibt sich der Plot in Abbildung 3.

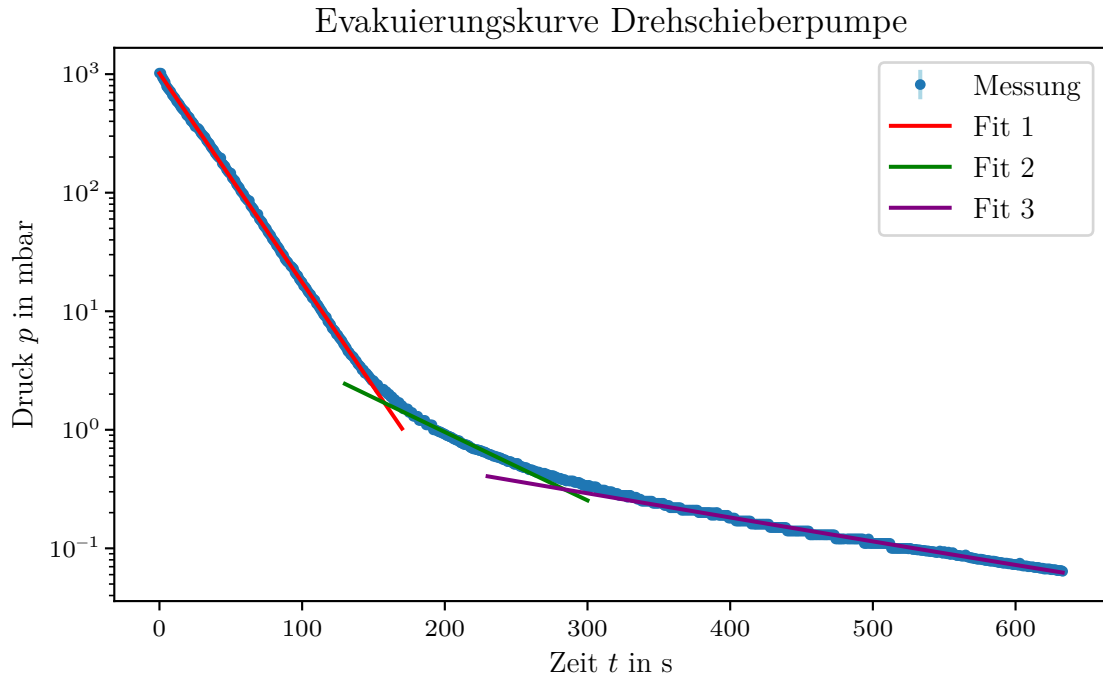


Abbildung 3: Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe mit drei Fitkurven.

Die berechneten Fitparameter bestimmen sich zu

$$m_1 = -0,0408(7) \frac{\text{mbar}}{\text{s}}, b_1 = 0,01(7) \text{ mbar} \quad (25)$$

$$m_2 = -0,014\,41(34) \frac{\text{mbar}}{\text{s}}, b_2 = -4,16(8) \text{ mbar} \quad (26)$$

$$m_3 = -0,005\,970(4) \frac{\text{mbar}}{\text{s}}, b_3 = -6,174(6) \text{ mbar.} \quad (27)$$

Für die erste Gerade werden die ersten 150 Datenpunkte ausgewertet, für die zweite die nächsten 100 und für die dritte alle nachfolgenden Punkte.

Nach (15) ergibt sich

$$S_1 = (1,39 \pm 0,14) \frac{\text{L}}{\text{s}} \quad (28)$$

$$S_2 = (0,49 \pm 0,05) \frac{\text{L}}{\text{s}} \quad (29)$$

$$S_3 = (0,41 \pm 0,04) \frac{\text{L}}{\text{s}} \quad (30)$$

S_1 hat dabei einen Gültigkeitsbereich von 1000 mbar bis 2 mbar, S_2 von 2 mbar bis 0,3 mbar und S_3 darunter.

4.2.2 Leckratenmessungen für bestimmte Gleichgewichtsdrücke p_G

Für $p_G = 100$ mbar werden drei Messungen durchgeführt und ein Mittelwert ausgewertet. Die anderen Gleichgewichtsdrücke werden nur einmal gemessen, da die statistische Abweichung, wie gezeigt wird, ausreichend gering ist.

Die Messungen für 100 mbar finden sich in Abbildung 4

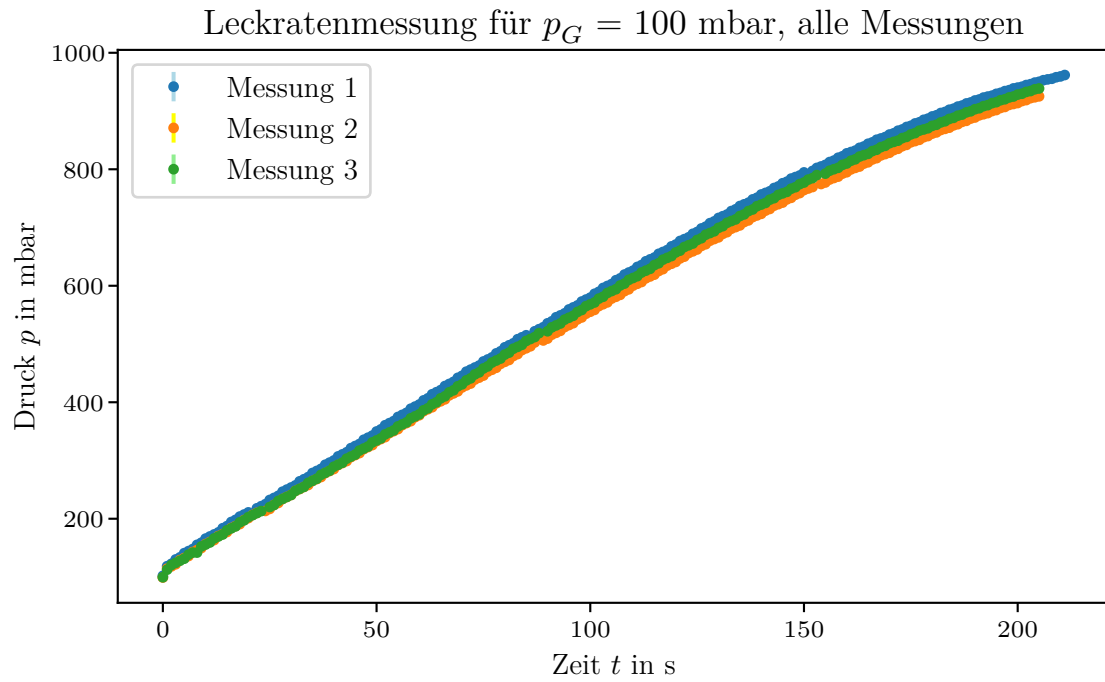


Abbildung 4: Drei Leckratenmessungen bei $p_G = 100$ mbar.

Für den Mittelwert ergibt sich die Grafik in Abbildung 5.

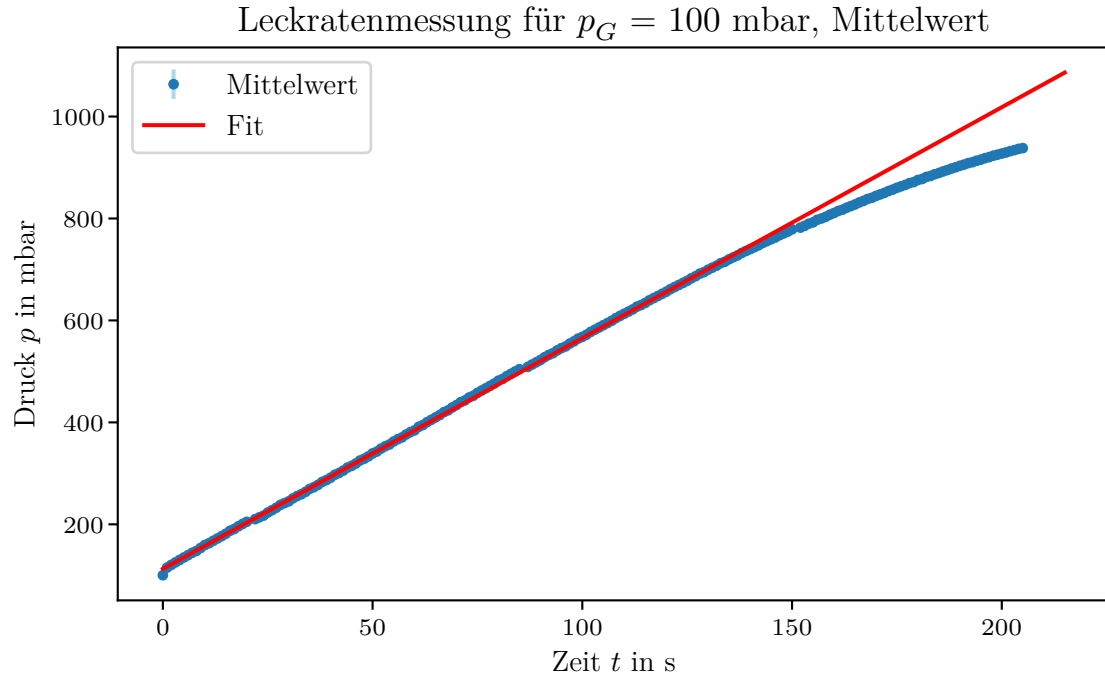


Abbildung 5: Mittelwerte der drei Messreihen.

Die Parameter des Fits lauten

$$m = (4,5283 \pm 0,0003) \frac{\text{mbar}}{\text{s}}, b = (112,640 \pm 0,018) \text{ mbar}, \quad (31)$$

wobei nur die Messwerte zwischen dem 10. und 150. Messwert für die Regression benutzt werden.

Es ergibt sich ein Saugvermögen von

$$S_{100} = (1,54 \pm 0,16) \frac{\text{L}}{\text{s}}. \quad (32)$$

Für $p_G = 50$ mbar ergibt sich die Grafik in Abbildung 6.

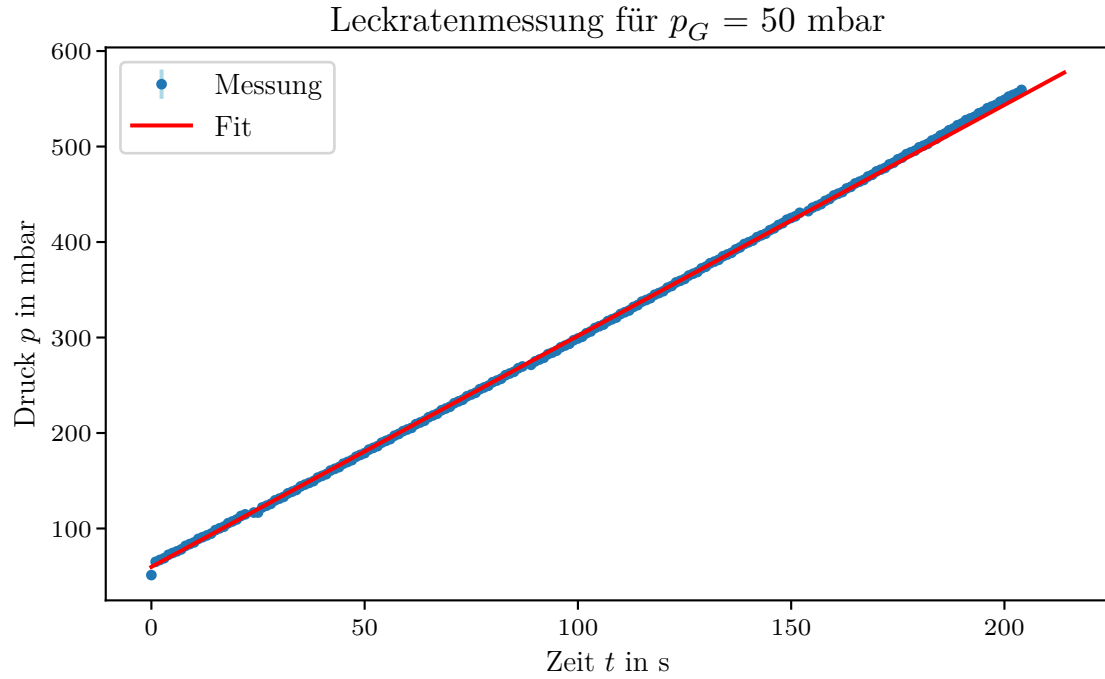


Abbildung 6: Mittelwerte der drei Messreihen.

Die Parameter des Fits lauten

$$m = (2,419 \pm 0,001) \frac{\text{mbar}}{\text{s}}, b = (59,78 \pm 0,07) \text{ mbar}, \quad (33)$$

wobei nur die Werte nach der 10. Messung für die Regression benutzt werden.

Es ergibt sich ein Saugvermögen von

$$S_{50} = (1,64 \pm 0,17) \frac{\text{L}}{\text{s}}. \quad (34)$$

Für $p_G = 10$ mbar ergibt sich die Grafik in 7.

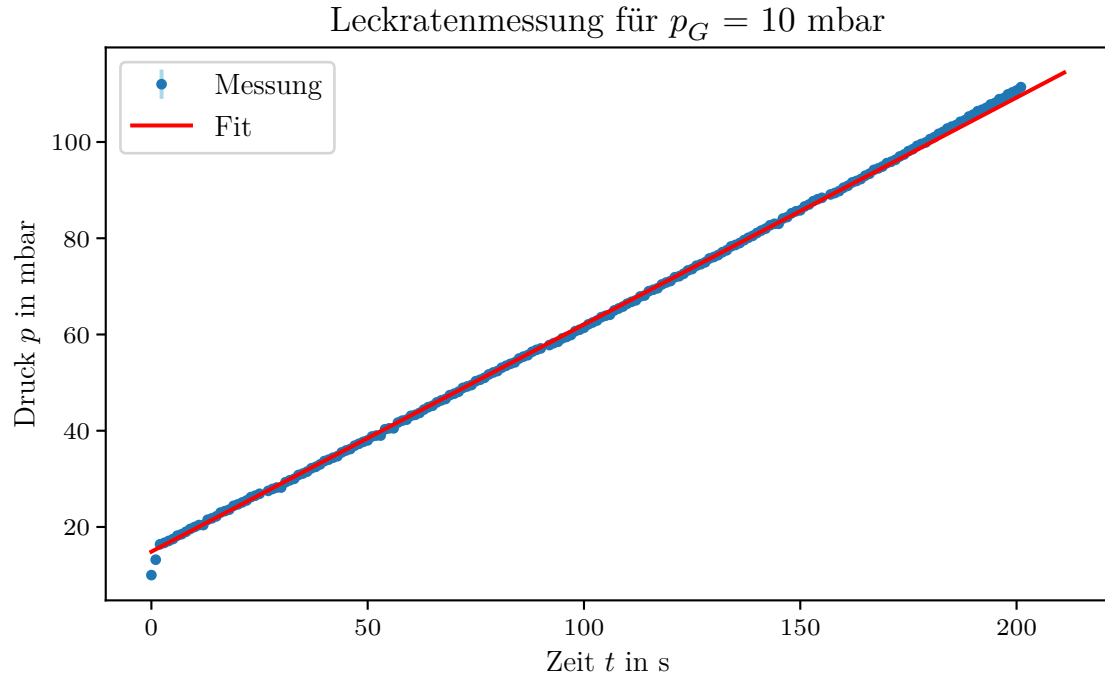


Abbildung 7: Mittelwerte der drei Messreihen. Fit: $m = 0,471\,84 \pm 0,000\,22$, $b = 14,886 \pm 0,016$.

Die Parameter des Fits lauten

$$m = (0,471\,84 \pm 0,000\,22) \frac{\text{mbar}}{\text{s}}, b = (14,886 \pm 0,016) \text{ mbar}, \quad (35)$$

wobei nur die Werte nach der 10. Messung für die Regression benutzt werden.

Es ergibt sich ein Saugvermögen von

$$S_{10} = (1,60 \pm 0,17) \frac{\text{L}}{\text{s}}. \quad (36)$$

Für $p_G = 0,5$ mbar ergibt sich die Grafik in Abbildung 8.

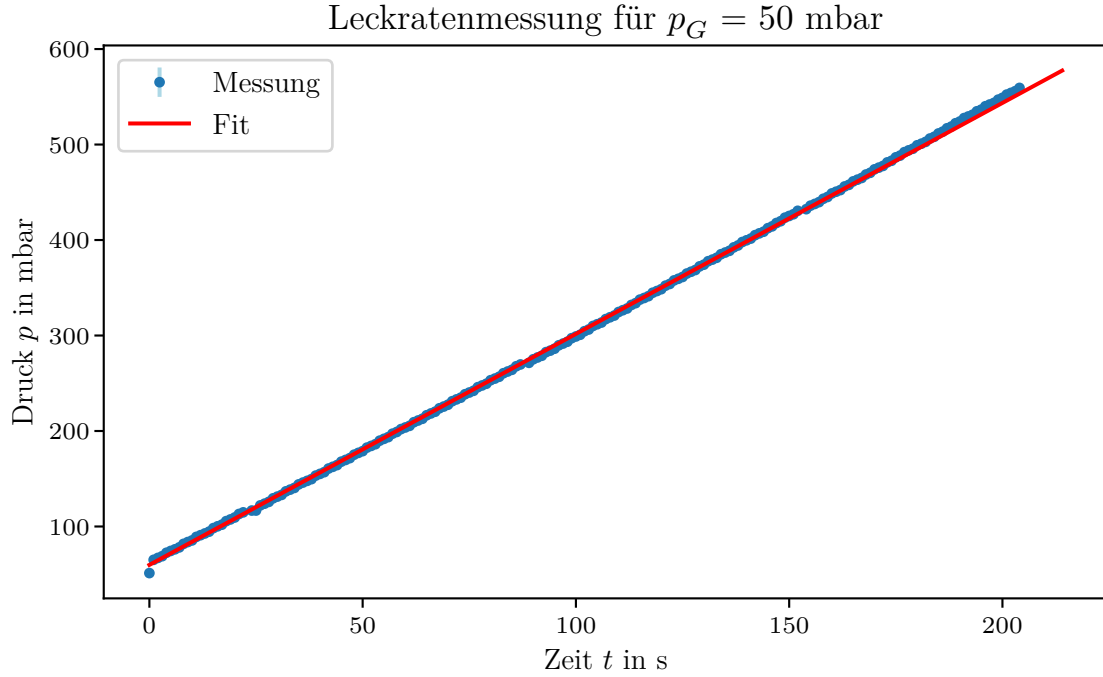


Abbildung 8: Mittelwerte der drei Messreihen.

Die Parameter des Fits lauten

$$m = (0,0150 \pm 0,0004) \frac{\text{mbar}}{\text{s}}, b = (1,63 \pm 0,04) \text{ mbar}, \quad (37)$$

wobei nur die Werte nach der 10. Messung für die Regression benutzt werden.

Es ergibt sich ein Saugvermögen von

$$S_{0,5} = (1,02 \pm 0,15) \frac{\text{L}}{\text{s}}. \quad (38)$$

4.3 Turbomolekularpumpe

Der für die Turbomolekularpumpe gemessene Enddruck beträgt

$$p_E = (5,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-5} \text{ mbar}. \quad (39)$$

Das Volumen wird der Versuchsanleitung entnommen und beträgt

$$V_{\text{TP}} = (33 \pm 3,3) \text{ L}. \quad (40)$$

4.3.1 Evakuierungskurve

Für die Evakuierungskurve werden drei Messreihen aufgenommen, bei der der Rezipient von einem Startdruck von ungefähr $p_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ mbar evakuiert wird. Diese sehen wie in Abbildung 9 aufgezeigt aus.

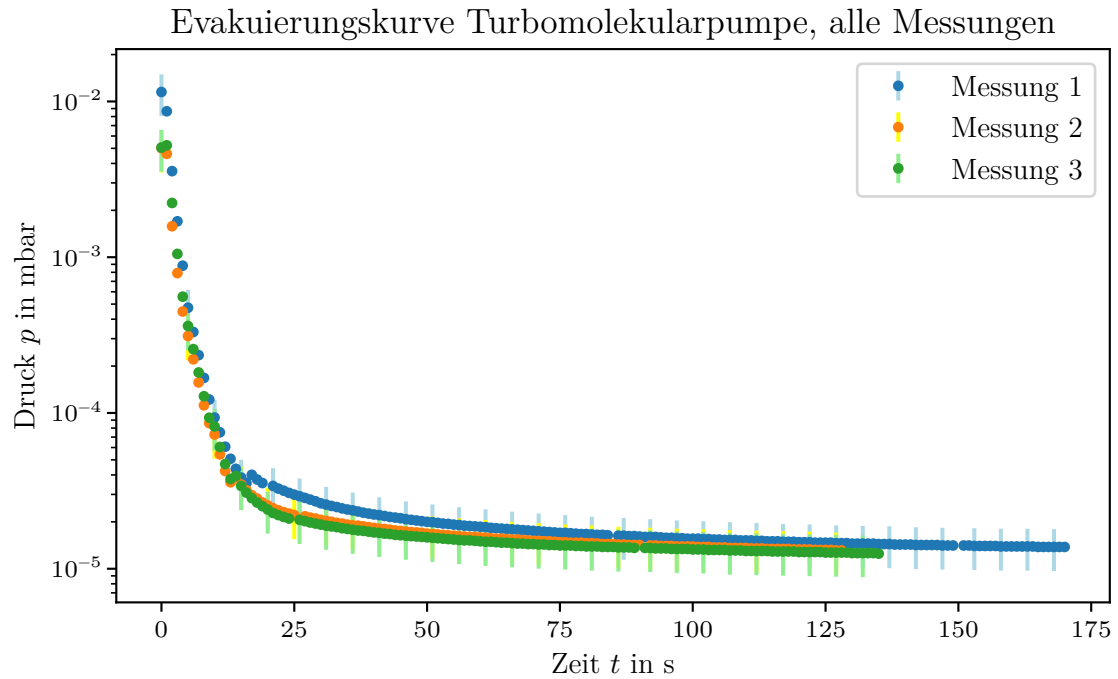


Abbildung 9: Drei Evakuierungskurven der Turbomolekularpumpe.

Alle Kurven haben einen kleinen Sprung, die blaue Kurve bei $t = 20$ s, die grüne und orangene bei $t = 15$ s. Für die Mittelwertbildung wird die blaue Kurve ignoriert. Es ergibt sich die Grafik in Abbildung 10.

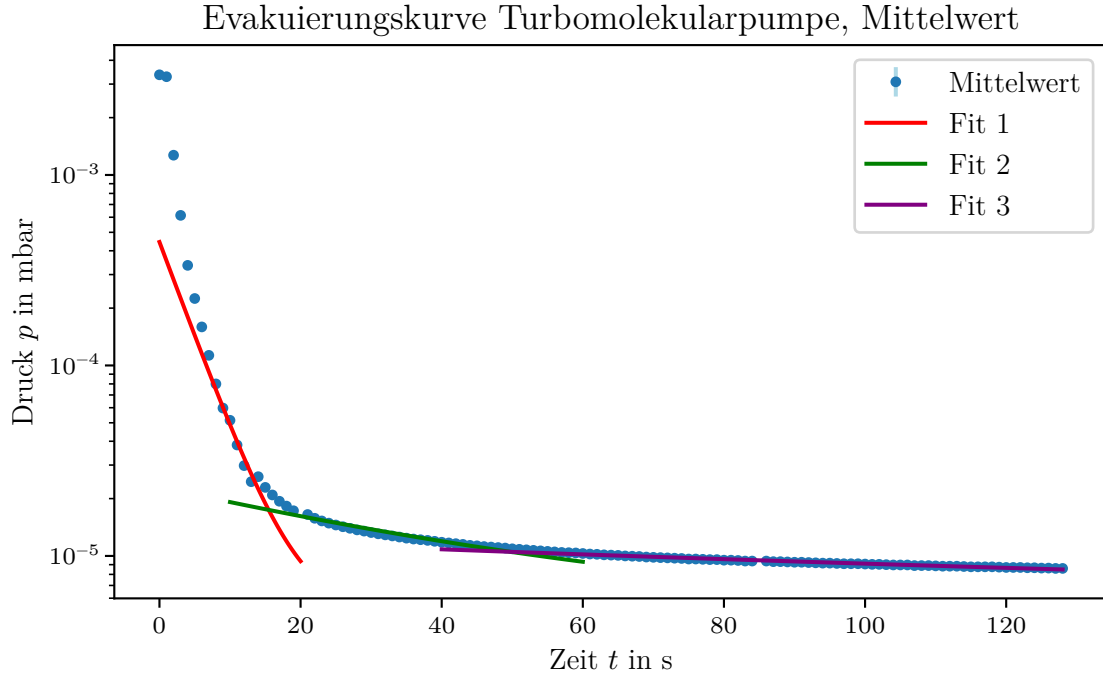


Abbildung 10: Evakuierungskurve der Turbomolekularpumpe mit drei Fitkurven.

Die berechneten Fitparameter bestimmen sich zu

$$m_1 = -0,230\,420\,2(4) \frac{\text{mbar}}{\text{s}}, b_1 = 2,030\,883(5) \text{ mbar} \quad (41)$$

$$m_2 = -0,023\,777\,465(13) \frac{\text{mbar}}{\text{s}}, b_2 = -5,227\,685\,8(5) \text{ mbar} \quad (42)$$

$$m_3 = -0,005\,831\,318\,0(27) \frac{\text{mbar}}{\text{s}}, b_3 = -6,120\,550\,98(26) \text{ mbar}. \quad (43)$$

Für die erste Gerade werden die ersten 15 Messpunkte verwendet, für die zweite Gerade die nächsten 35 und für die dritte Gerade die restlichen Punkte.

Nach (15) ergibt sich

$$S_1 = (7,5 \pm 0,8) \frac{\text{L}}{\text{s}} \quad (44)$$

$$S_2 = (0,78 \pm 0,08) \frac{\text{L}}{\text{s}} \quad (45)$$

$$S_3 = (0,192 \pm 0,019) \frac{\text{L}}{\text{s}} \quad (46)$$

S_1 hat dabei einen Gültigkeitsbereich bis $2 \cdot 10^{-4}$ mbar, S_2 von $2 \cdot 10^{-5}$ mbar bis 10^{-5} mbar und S_3 darunter.

4.3.2 Leckratenmessungen für bestimmte Gleichgewichtsdrücke p_G

Für $p_G = 10^{-4}$ mbar ergibt sich die Grafik in Abbildung 11.

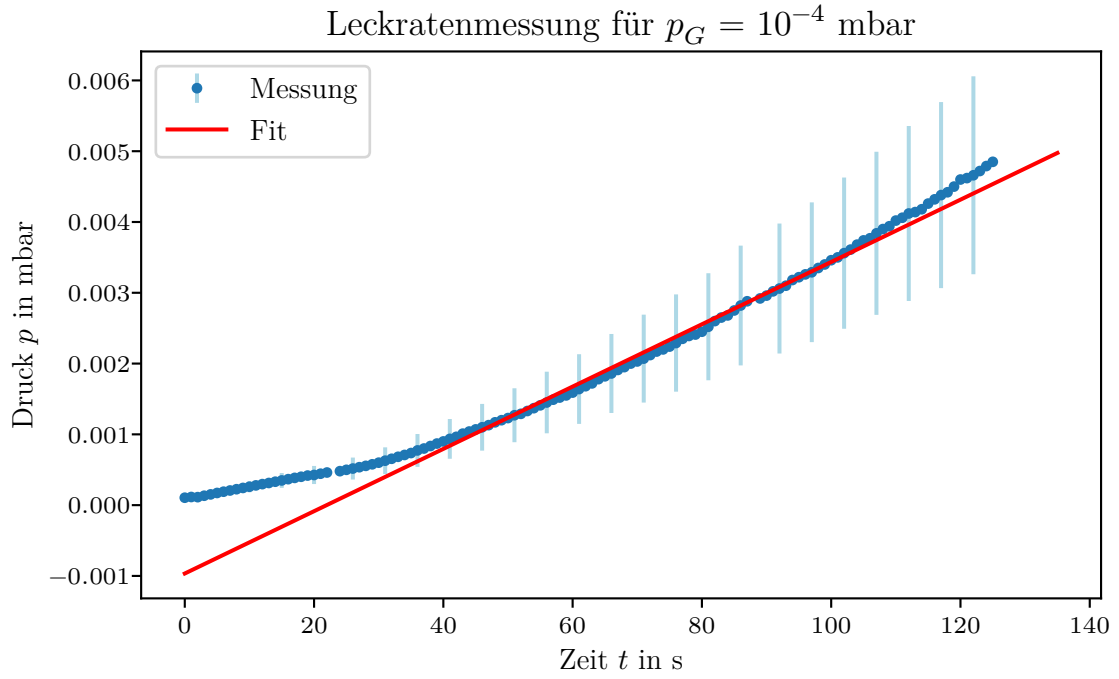


Abbildung 11: Leckratenmessung mit Fit.

Die Parameter des Fits lauten

$$m = (4,40 \pm 0,32) \frac{\text{mbar}}{\text{s}}, b = (-9,7 \pm 2,1) \cdot 10^{-4} \text{ mbar}, \quad (47)$$

wobei nur die Werte nach dem 40. Messpunkt für die Regression benutzt werden.

Es ergibt sich ein Saugvermögen von

$$S_{10^{-4}} = (15 \pm 5) \frac{\text{L}}{\text{s}}. \quad (48)$$

Für $p_G = 2 \cdot 10^{-4}$ mbar ergibt sich die Grafik in Abbildung 12.

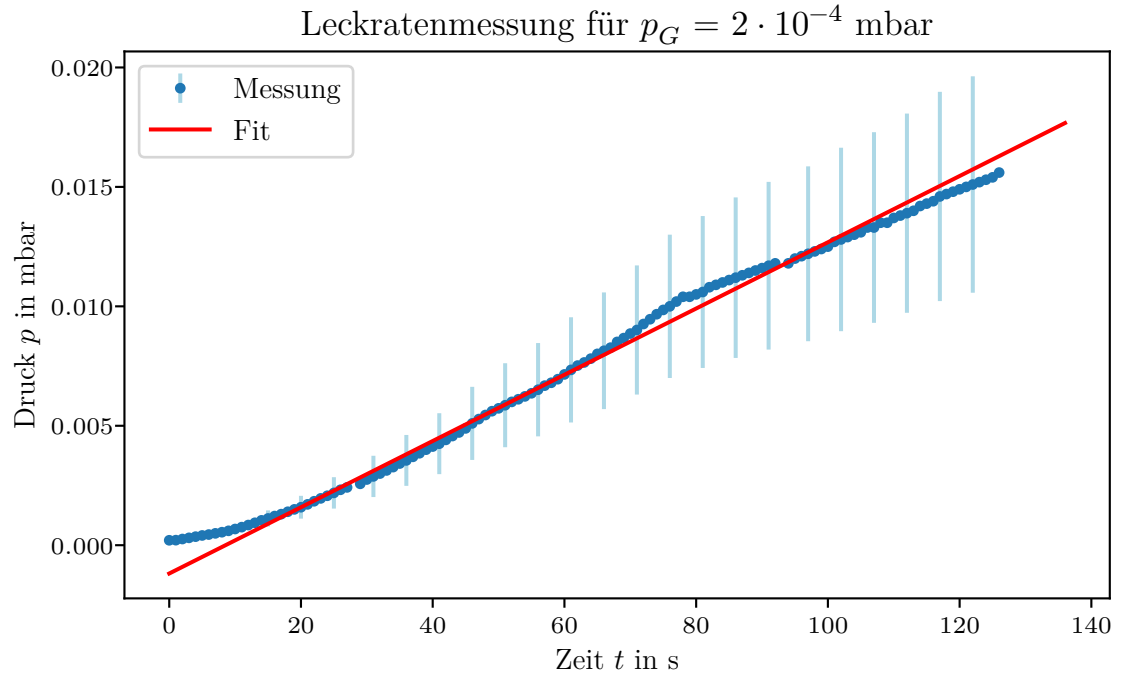


Abbildung 12: Leckratenmessung mit Fit.

Die Parameter des Fits lauten

$$m = (13,9 \pm 1,2) \cdot 10^{-5} \frac{\text{mbar}}{\text{s}}, b = (1,2 \pm 0,8) \cdot 10^{-4} \text{ mbar}, \quad (49)$$

wobei nur die Werte nach dem 40. Messpunkt für die Regression benutzt werden.

Es ergibt sich ein Saugvermögen von

$$S_{2 \cdot 10^{-4}} = (23 \pm 8) \frac{\text{L}}{\text{s}}. \quad (50)$$

Für $p_G = 5 \cdot 10^{-5}$ mbar ergibt sich die Grafik in Abbildung 13.

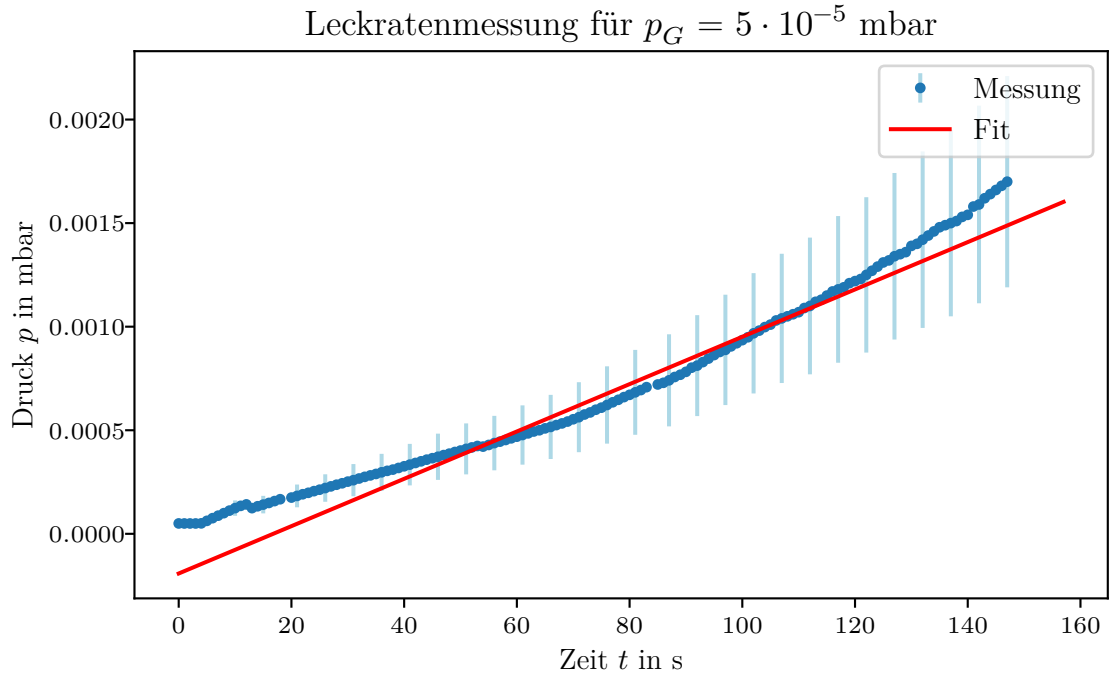


Abbildung 13: Leckratenmessung mit Fit.

Die Parameter des Fits lauten

$$m = (1,14 \pm 0,08) \cdot 10^{-5} \frac{\text{mbar}}{\text{s}}, b = (-1,9 \pm 0,6) \cdot 10^{-4} \text{ mbar}, \quad (51)$$

wobei nur die Werte nach dem 40. Messpunkt für die Regression benutzt werden.

Es ergibt sich ein Saugvermögen von

$$S_{5 \cdot 10^{-5}} = (7,5 \pm 2,4) \frac{\text{L}}{\text{s}}. \quad (52)$$

Für $p_G = 7 \cdot 10^{-5}$ mbar ergibt sich die Grafik in Abbildung 14.

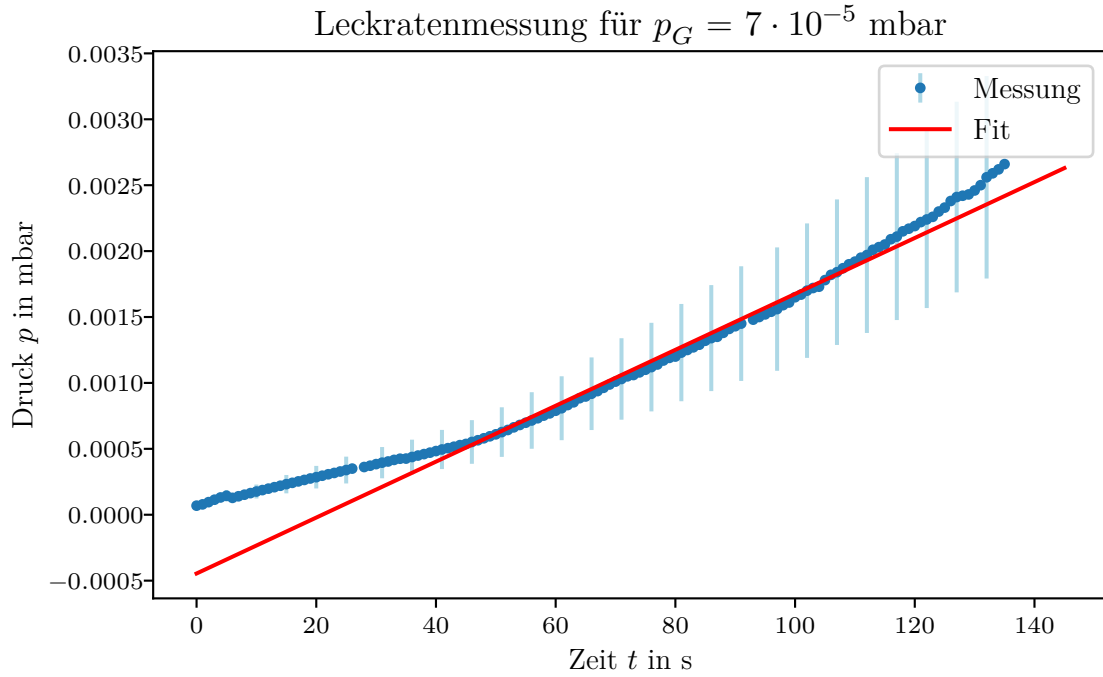


Abbildung 14: Leckratenmessung mit Fit.

Die Parameter des Fits lauten

$$m = (2,12 \pm 0,14) \cdot 10^{-5} \frac{\text{mbar}}{\text{s}}, b = (-4,5 \pm 1,0) \cdot 10^{-4} \text{ mbar}, \quad (53)$$

wobei nur die Werte nach dem 40. Messpunkt für die Regression benutzt werden.

Es ergibt sich ein Saugvermögen von

$$S_{7 \cdot 10^{-5}} = (10 \pm 3,2) \frac{\text{L}}{\text{s}}. \quad (54)$$

4.4 Leitwertbestimmung eines kurzen Rohres

Es werden zwei Leckratenmessungen für den Aufbau mit einem kurzen Verbindungsrohr bei zwei verschiedenen Drücken durchgeführt. Die zwei Messgeräte D1 und D2 werden ausgelesen und ihre Messwerte miteinander verglichen.

Für $p_G = 2 \cdot 10^{-4}$ mbar ergibt sich die Grafik in Abbildung 15.

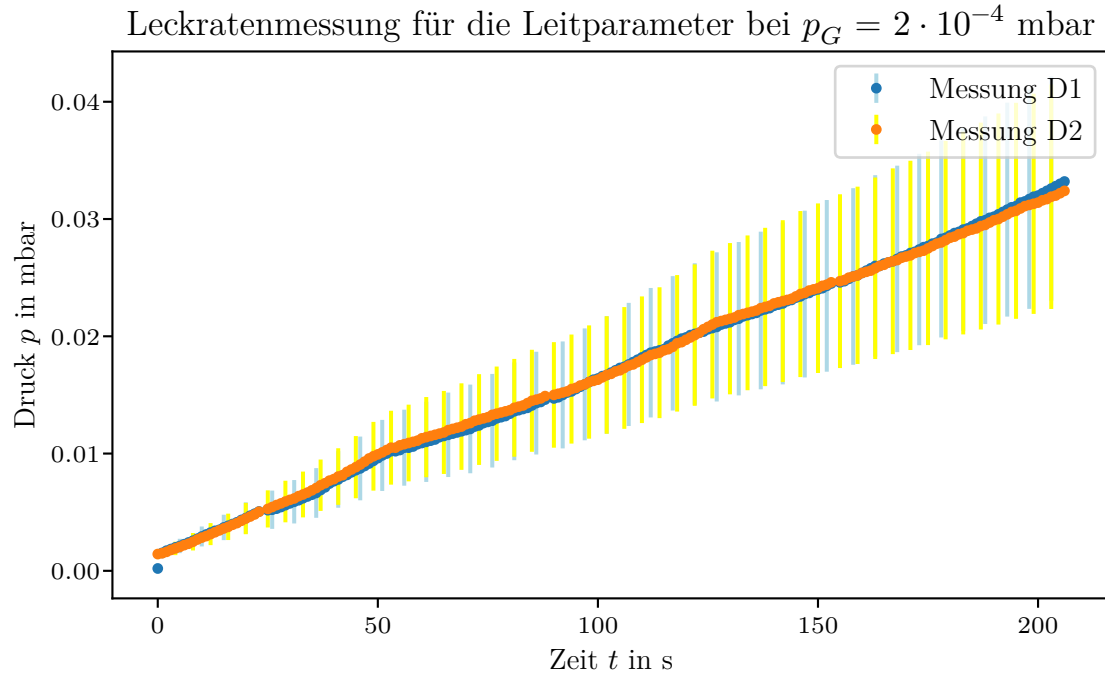


Abbildung 15: Leckratenmessung für den Leitparameter. Die Leckraten sind nahezu identisch.

Die Parameter des Fits lauten

$$m = (1,61 \pm 0,06) \frac{\text{mbar}}{\text{s}}, b = (1,1 \pm 0,4) \cdot 10^{-4} \text{ mbar}, \quad (55)$$

wobei nur die Werte nach dem 20. Messpunkt für die Regression benutzt werden.

Für $p_G = 5 \cdot 10^{-5}$ mbar ergibt sich folgende Grafik.

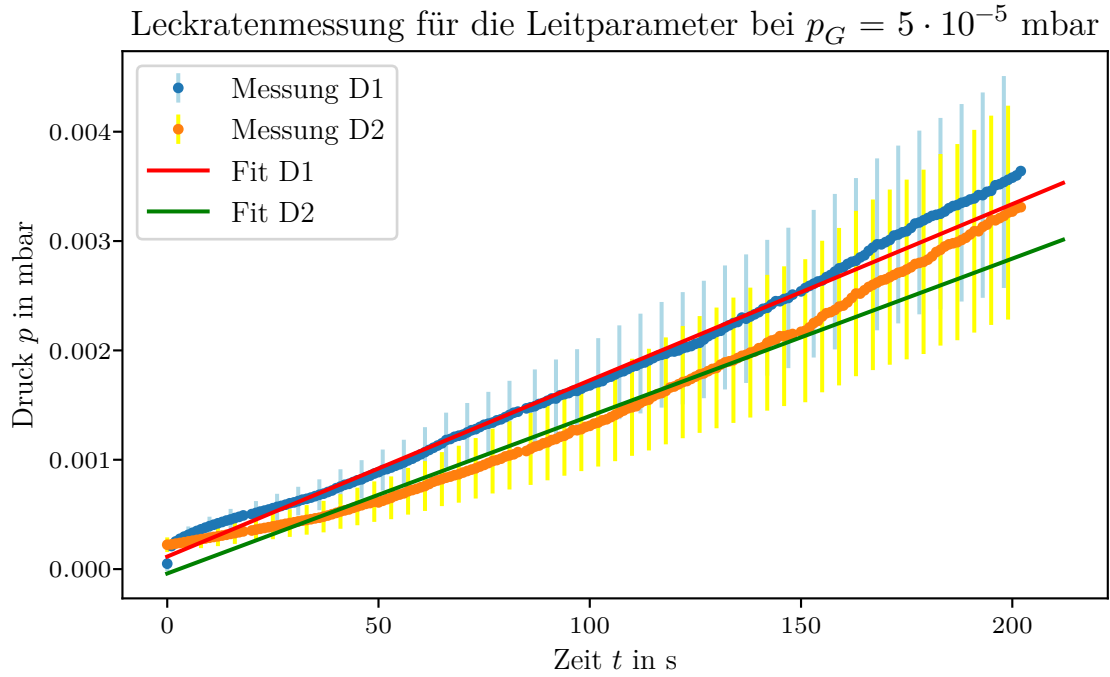


Abbildung 16: Leckratenmessung für den Leitparameter. Die Leckraten sind unterschiedlich.

Die Parameter des Fits lauten

$$m_1 = (1,61 \pm 0,06) \cdot 10^{-5} \frac{\text{mbar}}{\text{s}}, b_1 = (1,1 \pm 0,4) \cdot 10^{-4} \text{ mbar} \quad (56)$$

$$m_2 = (1,44 \pm 0,06) \cdot 10^{-5} \frac{\text{mbar}}{\text{s}}, b_2 = (-4 \pm 4) \cdot 10^{-5} \text{ mbar}. \quad (57)$$

wobei nur die Werte nach dem 20. Messpunkt für die Regression benutzt werden.

Es ergeben sich Saugvermögen von

$$S_{\text{Leitwert, D1}} = (2,7 \pm 0,8) \frac{\text{L}}{\text{s}} \quad (58)$$

$$S_{\text{Leitwert, D2}} = (2,4 \pm 0,8) \frac{\text{L}}{\text{s}}. \quad (59)$$

Wird $S_{\text{Leitwert, D2}}$ als das effektive Saugvermögen S_{eff} und $S_{\text{Leitwert, D1}}$ als das theoretische Saugvermögen angenommen, ist

$$\frac{1}{S_{\text{eff}}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{L} \quad (60)$$

eine Abschätzung für den Leitwert L , hier

$$L = (20 \pm 80) \frac{\text{L}}{\text{s}} \quad (61)$$

5 Diskussion

5.1 Saugvermögen

Für die Drehschieberpumpe werden folgende Saugvermögen bestimmt und in Abbildung 17 dargestellt.

$$\begin{aligned}S_1 &= (1,39 \pm 0,14) \frac{\text{L}}{\text{s}} \\S_2 &= (0,49 \pm 0,05) \frac{\text{L}}{\text{s}} \\S_3 &= (0,41 \pm 0,04) \frac{\text{L}}{\text{s}} \\S_{100} &= (1,54 \pm 0,16) \frac{\text{L}}{\text{s}} \\S_{50} &= (1,64 \pm 0,17) \frac{\text{L}}{\text{s}} \\S_{10} &= (1,60 \pm 0,17) \frac{\text{L}}{\text{s}} \\S_{0,5} &= (1,02 \pm 0,15) \frac{\text{L}}{\text{s}}.\end{aligned}$$

Der Verlust im Saugvermögen bei der Evakuierung, also bei S_1 , S_2 und S_3 , ist damit zu erklären, dass das Saugvermögen selber druckabhängig ist. Das vom Hersteller angegebene Saugvermögen beläuft sich auf $4,6 \text{ m}^3/\text{h}$ [1], was $1,28 \text{ L/s}$ entspricht. Die Abweichung vom Mittelwert der Saugvermögen,

$$\bar{S}_{\text{DP}} = (1,156 \pm 0,442) \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

beträgt $\Delta S = 9,7 \%$.

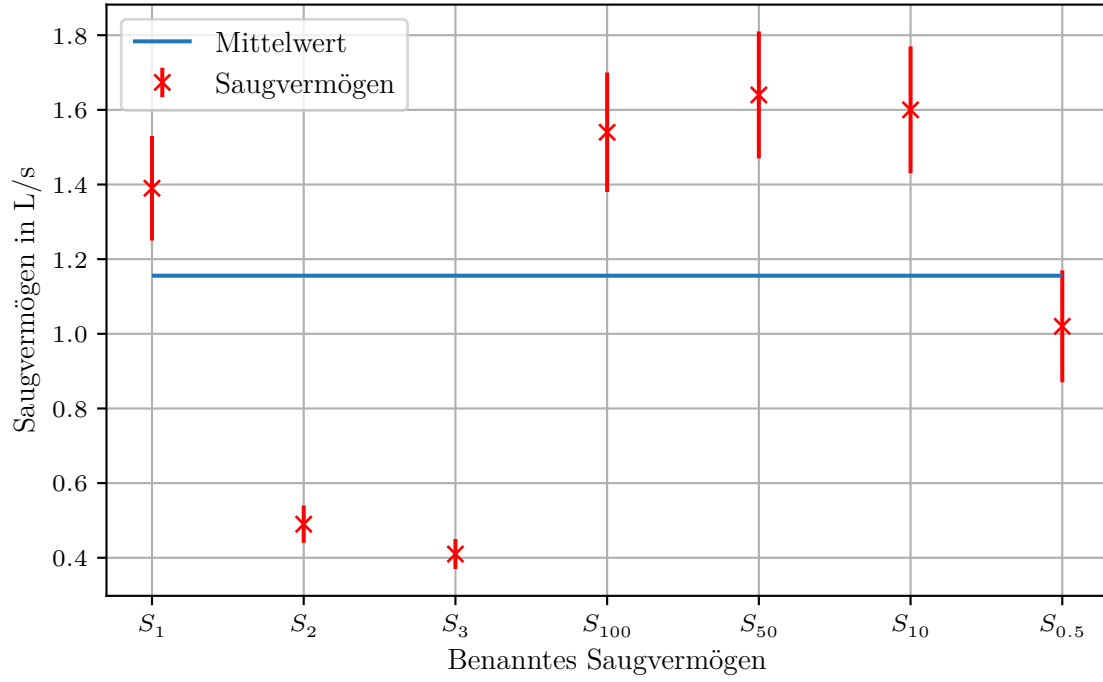


Abbildung 17: Ermittelte Saugvermögen S der Drehschieberpumpe und der berechnete Mittelwert \bar{S}_{DP} .

Für die Turbomolekularpumpe werden folgende Saugvermögen bestimmt und in Abbildung 18 dargestellt.

$$\begin{aligned}
 S_1 &= (7,5 \pm 0,8) \frac{\text{L}}{\text{s}} \\
 S_2 &= (0,78 \pm 0,08) \frac{\text{L}}{\text{s}} \\
 S_3 &= (0,192 \pm 0,019) \frac{\text{L}}{\text{s}} \\
 S_{10^{-4}} &= (15 \pm 5) \frac{\text{L}}{\text{s}} \\
 S_{2 \cdot 10^{-4}} &= (23 \pm 8) \frac{\text{L}}{\text{s}} \\
 S_{5 \cdot 10^{-5}} &= (7,5 \pm 2,4) \frac{\text{L}}{\text{s}} \\
 S_{7 \cdot 10^{-5}} &= (10 \pm 3,2) \frac{\text{L}}{\text{s}}.
 \end{aligned}$$

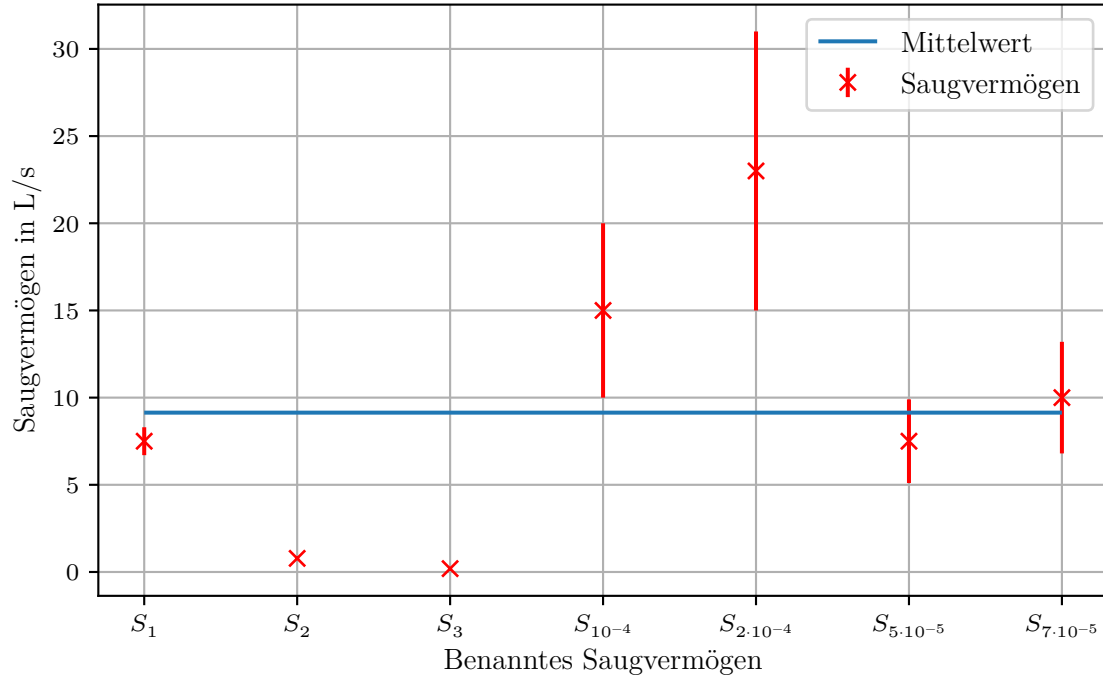


Abbildung 18: Ermittelte Saugvermögen S der Turbomolekularpumpe und der berechnete Mittelwert \bar{S}_{TP} .

Die Abweichung vom Mittelwert der Saugvermögen,

$$\bar{S}_{DP} = (9,13 \pm 5,88) \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

zum Literaturwert des Herstellers von 77 L/s [1] beträgt $\Delta S = 88 \%$.

Diese Unterschiede sind damit zu erklären, dass der Hersteller diese unter Idealbedingungen ermittelt und sie, zumindest im Falle der Turbomolekularpumpe, für ein bestimmtes Gas, hier Stickstoff, angegeben werden. Diese Idealbedingungen sind unter anderem ein angepasstes, zu evakuierendes Volumen, Temperaturkontrolle und Stoffkontrolle. Wasserdampf in der Luft ist in der Lage, im Rezipienten zu kondensieren und zu desorbieren, insbesondere wenn die Temperatur über den Verlauf der Messung steigt. Unter nicht-idealen Bedingungen kommen insbesondere die Desorption bei kleinen Drücken zum Tragen, weshalb die Messwerte für die Drehschieberpumpe viel näher bei den Herstellerwerten liegen als für die Turbomolekularpumpe, die bei viel kleineren Drücken arbeitet.

5.2 Leitwert

Wird zwischen den zwei Messgeräten ein weiteres Rohr eingefügt, ändert sich die Geometrie des zu evakuierenden Volumens. Die Detektoren messen unterschiedliche Drücke, wie in 15 und 16 zu sehen ist, weil sich der Leitwert zwischen den beiden Messgeräten

ändert. Der Leitwert des Rohres spielt allerdings nur bei den niedrigeren Drücken eine Wirkung, sobald es zur molekularen Strömung kommt, da die Teilchen anders als bei der laminaren Strömung im höheren Druckbereich nicht störungsfrei das Rohr durchfließen können, allerdings wird gleichzeitig bei kleinen Drücken die Desorption stärker.

6 Originaldaten

Aufgrund des Volumens der Datenmenge werden hier für die einzelnen Plots ausgewählte Datenpunkte dargestellt. Wenn nicht näher spezifiziert ist t in s, p und Δp in mbar angegeben.

Tabelle 1: Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe, für Abbildung 3.

t	p	Δp
0	1020.0	3.06
20	441.8	1.32
40	208.7	0.63
60	91.3	0.27
80	39.5	0.11
100	17.5	0.05
120	7.7	0.77
140	3.5	0.35
160	2.0	0.20
180	1.3	0.13
200	0.92	0.09
220	0.69	0.07
240	0.57	0.06
260	0.46	0.05
280	0.39	0.04
300	0.33	0.03
320	0.29	0.03
340	0.25	0.025
360	0.22	0.02
380	0.20	0.02
400	0.18	0.02
420	0.16	0.02
440	0.14	0.01
460	0.13	0.01
480	0.12	0.01
500	0.11	0.011
520	0.10	0.01
540	0.094	0.0094
560	0.087	0.0087
580	0.079	0.0079
600	0.073	0.0073
620	0.067	0.0067

Tabelle 2: Leckratenmessung 100 mbar, für Abbildung 4.

t	p_1	Δp_1	p_2	Δp_2	p_3	Δp_3
0	101.9	0.3057	99.1	0.2973	99.5	0.2985
10	165.9	0.4977	156.5	0.4695	155.7	0.467
20	210.9	0.6327	201.1	0.6033	202.8	0.6084
30	253.6	0.7608	240.8	0.7224	240.8	0.7224
40	300.0	0.9	285.3	0.5900	289.3	0.8679
50	349.8	1.0494	333.3	0.9999	334.4	1.0032
60	396.1	1.1823	377.7	1.1331	379.3	1.13
70	445.4	1.3362	425.4	1.2762	430.8	1.2924
80	494.3	1.4829	469.4	1.4082	481.8	1.4454
90	535.5	1.6065	509.3	1.5279	521.9	1.5656
100	579.6	1.7388	555.4	1.6662	568.1	1.7043
110	625.9	1.8777	600.2	1.8006	613.3	1.8398
120	670.7	2.0121	640.9	1.9227	657.2	1.9716
130	716.4	2.1492	683.1	2.0493	699.4	2.0982
140	756.7	2.2701	723.5	2.1705	739.4	2.2182
150	794.6	2.3838	764.3	2.2929	777.2	2.3316
160	827.3	2.4819	794.9	2.3847	809.9	2.4297
170	859.6	2.5788	828.4	2.4852	844.7	2.5341
180	890.7	2.6721	861.2	2.5836	874.5	2.6235
190	918.1	2.7543	888.9	2.6667	903.1	2.7093
200	940.2	2.8206	913.7	2.7411	928.2	2.7846

Tabelle 3: Leckratenmessung 100 mbar, Mittelwerte, für Abbildung 5.

t	$p_{\text{mean}} \cdot 10^{-6}$	$\Delta p_{\text{mean}} \cdot 10^{-7}$
0	100.1	0.03
10	159.36	0.058
20	204.93	0.074
30	245.06	0.089
40	291.53	0.10
50	339.16	0.12
60	384.36	0.14
70	433.86	0.15
80	481.83	0.17
90	522.23	0.19
100	567.69	0.20
110	613.13	0.22
120	656.26	0.23
130	699.63	0.25
140	739.86	0.26
150	778.70	0.28
160	810.69	0.29
170	844.23	0.30
180	875.46	0.31
190	903.36	0.32
200	927.36	0.33

Tabelle 4: Leckratenmessung 50 mbar, für Abbildung 6.

t	p	Δp
0	51.2	0.1536
10	85.4	0.2562
20	109.4	0.3282
30	131.3	0.3939
40	155.1	0.4653
50	178.9	0.5367
60	203.7	0.6111
70	227.5	0.6825
80	253.2	0.7596
90	275.1	0.8253
100	299.0	0.897
110	324.6	0.9738
120	348.5	1.0455
130	374.2	1.1226
140	399.7	1.1991
150	425.2	1.2756
160	448.8	1.3464
170	474.0	1.422
180	499.2	1.4976
190	524.1	1.5723
200	548.9	1.6467

Tabelle 5: Leckratenmessung 10 mbar, für Abbildung 7.

t	p	Δp
0	10.0	0.03
10	20.0	0.06
20	24.7	0.0741
30	28.2	0.0846
40	33.7	0.1011
50	38.0	0.114
60	43.1	0.1293
70	47.7	0.1431
80	52.4	0.1572
90	57.1	0.1713
100	61.4	0.1842
110	66.4	0.1992
120	71.1	0.2133
130	76.1	0.2283
140	81.1	0.2433
150	85.8	0.2574
160	90.5	0.2715
170	95.6	0.2868
180	100.6	0.3018
190	105.7	0.3171
200	110.7	0.3321

Tabelle 6: Leckratenmessung 0,5 mbar, für Abbildung 8.

t	p	Δp
0	0.51	0.05
10	1.8	0.18
20	2.0	0.20
30	2.1	0.21
40	2.2	0.22
50	2.4	0.24
60	2.5	0.25
70	2.7	0.27
80	2.8	0.28
90	3.0	0.30
100	3.1	0.31
110	3.2	0.32
120	3.4	0.34
130	3.6	0.36
140	3.8	0.38
150	3.9	0.39
160	4.1	0.41
170	4.2	0.42
180	4.3	0.43
190	4.5	0.45
200	4.6	0.46
210	4.8	0.48

Tabelle 7: Evakuierungskurve der Turbomolekularpumpe, für Abbildung 9.

t	p_1	Δp_1	p_2	Δp_2	p_3	Δp_3
0	101.9	0.3057	99.1	0.2973	99.5	0.2985
10	165.9	0.4977	156.5	0.4695	155.7	0.467
20	210.9	0.6327	201.1	0.6033	202.8	0.6084
30	253.6	0.7608	240.8	0.7224	240.8	0.7224
40	300.0	0.9	285.3	0.8559	289.3	0.8679
50	349.8	1.0494	333.3	0.9999	334.4	1.0031
60	396.1	1.1883	377.7	1.1331	379.3	1.1379
70	445.4	1.3362	425.4	1.2762	430.8	1.2924
80	494.3	1.4829	469.4	1.4082	481.8	1.4454
100	579.6	1.7388	555.4	1.6662	568.1	1.7043
110	625.9	1.8777	600.2	1.8006	613.3	1.8398
120	670.7	2.0121	640.9	1.9227	657.2	1.9716
130	716.4	2.1492	683.1	2.0493	699.4	2.0982

Tabelle 8: Evakuierung der Turbomolekularpumpe, Mittelwerte, für ??.

t	$p_{\text{mean}} \cdot 10^{-6}$	$\Delta p_{\text{mean}} \cdot 10^{-7}$
0	8.6	4.85
10	79.0	45.2
20	18.2	10.3
30	13.7	7.74
40	12.0	6.81
50	11.0	6.25
60	10.4	5.87
70	9.93	5.61
80	9.56	5.40
100	9.1	5.13
110	8.9	5.02
120	8.76	4.95
130	8.6	4.85

Tabelle 9: Leckratenmessung $SI10^{-4}$ mbar, für ??.

t	$p \cdot 10^{-4}$	$\Delta p \cdot 10^{-4}$
0	1.05	0.31
10	2.6	0.77
20	4.26	1.27
30	6.00	1.79
40	9.00	2.70
50	12.3	3.68
60	15.9	4.77
70	20.3	6.00
80	24.5	7.35
90	29.6	8.87
100	34.6	10.37
110	40.2	12.06
120	46.0	13.80

Tabelle 10: Leckratenmessung $2 \cdot 10^{-4}$ mbar, für Abbildung 12.

t	$p \cdot 10^{-4}$	$\Delta p \cdot 10^{-4}$
0	2.06	0.62
10	6.78	2.03
20	15.90	4.77
30	27.50	8.25
40	41.30	12.38
50	57.30	17.18
60	71.50	21.44
70	88.60	26.58
80	105.00	31.54
90	116.00	34.75
100	125.00	37.53
110	137.00	41.10
120	149.00	44.70

Tabelle 11: Leckratenmessung $5 \cdot 10^{-5}$ mbar, für Abbildung 13.

t	$p \cdot 10^{-4}$	$\Delta p \cdot 10^{-4}$
0	0.50	0.15
10	1.24	0.37
20	1.75	0.52
30	2.52	0.76
40	3.26	0.97
50	4.02	1.20
60	4.69	1.40
70	5.53	1.65
80	6.71	2.01
90	7.82	2.34
100	9.35	2.80
110	10.7	3.21
120	12.2	3.66

Tabelle 12: Leckratenmessung $7 \cdot 10^{-5}$ mbar, für Abbildung 14.

t	$p \cdot 10^{-4}$	$\Delta p \cdot 10^{-4}$
0	0.68	0.20
10	1.76	0.52
20	2.85	0.85
30	3.84	1.15
40	4.83	1.44
50	6.1	1.82
60	7.89	2.36
70	10.1	3.03
80	12.	3.59
90	14.3	4.29
100	16.5	4.95
110	19.2	5.76
120	21.9	6.57

Tabelle 13: Leitwertmessung $2 \cdot 10^{-4}$ mbar, für Abbildung 15.

t	p_{D1}	Δp_{D1}	p_{D2}	Δp_{D2}
0	0.0002	0.000429	0.00143	0.000429
10	0.00293	0.000849	0.00283	0.000849
20	0.0045	0.001338	0.00446	0.001338
30	0.00575	0.001814	0.00605	0.001814
40	0.00764	0.002346	0.00782	0.002346
50	0.00961	0.002979	0.00993	0.002979
60	0.0109	0.00339	0.0113	0.00339
70	0.012	0.00375	0.0125	0.00375
80	0.0134	0.00411	0.0137	0.00411
90	0.0147	0.0045	0.015	0.0045
100	0.0164	0.0048	0.0163	0.004889
110	0.0182	0.005399	0.018	0.005399
120	0.0199	0.005909	0.0197	0.00590
130	0.0212	0.00649	0.0215	0.00644
140	0.0226	0.00684	0.0228	0.00684
150	0.024	0.00723	0.0241	0.00722
160	0.0254	0.00762	0.0254	0.00761
170	0.0269	0.00804	0.0268	0.00804
180	0.0286	0.00852	0.0284	0.00852
190	0.0302	0.00896	0.0299	0.008969
200	0.032	0.00942	0.0314	0.00942

Tabelle 14: Leitwertmessung $5 \cdot 10^{-5}$ mbar, für Abbildung 16.

t	p_{D1}	Δp_{D1}	p_{D2}	Δp_{D2}
0	0.000049	0.0000669	0.000223	0.0000669
10	0.000393	0.0000860	0.000287	0.0000860
20	0.000503	0.0001059	0.000353	0.0001059
30	0.00061	0.0001284	0.000428	0.0001284
40	0.00074	0.0001542	0.000514	0.0001542
50	0.000887	0.0001829	0.000610	0.000182
60	0.00105	0.0002243	0.000748	0.0002243
70	0.00123	0.0002649	0.000883	0.0002649
80	0.00139	0.0003090	0.00103	0.0003090
90	0.00154	0.0003483	0.00116	0.000348
100	0.00168	0.0003929	0.00131	0.000392
110	0.00185	0.0004439	0.00148	0.000443
120	0.00199	0.0005012	0.00167	0.000501
130	0.00217	0.0005523	0.00184	0.000552
140	0.00235	0.0006062	0.00202	0.000606
150	0.00254	0.0006517	0.00217	0.000651
160	0.00276	0.0007229	0.00241	0.000722
170	0.00299	0.0007959	0.00265	0.000795
180	0.00321	0.0008495	0.00283	0.000849
190	0.00338	0.0009179	0.00306	0.000917
200	0.00358	0.0009809	0.00327	0.000980

Literatur

- [1] TU Dortmund. *V70 - Vakuumversuch*. TU Dortmund. 2025.
- [2] *Grundlagen der Vakuumtechnik*. Leybold Products. 2024-10-21. URL: https://www.leyboldproducts.de/media/pdf/10/0f/8b/FVT_Grundlagen_der_Vakuumtechnik_DE591eea2256c34.pdf (besucht am 21.10.2024).
- [3] Charles R. Harris u. a. „Array programming with NumPy“. In: *Nature* 585.7825 (Sep. 2020), S. 357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2. URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>.
- [4] *Kathoden*. Wikipedia. 2023-10-18. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gl%C3%BChkathode#:~:text=Im%20Gegensatz%20zu%20Kaltkathoden%2C%20bei, Temperatur%20und%20den%20Materialeigenschaften%20abh%C3%A4ngig>. (besucht am 22.10.2024).
- [5] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 3.1.7. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.

- [6] *Turbomolekularpumpe*. Pfeiffer Vacuum. 2014-10-22. URL: <https://know-how-book.pfeiffer-vacuum.com/de/vakuumerzeugung/turbomolekularpumpen/aufbau-funktionsprinzip/funktionsprinzip-turbomolekularpumpe/index.html> (besucht am 22.10.2024).
- [7] *Vakuummeter*. Pfeiffer Vacuum. 2024. URL: https://delta.tu-dortmund.de/storages/delta/r/Studium/Lehrveranstaltungen/Versuche/Vakuumversuch_V70/Versuchsbeschreibung_Vakuumversuch_V70.pdf (besucht am 24.10.2024).
- [8] Pauli Virtanen u. a. „SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python“. In: *Nature Methods* 17 (2020), S. 261–272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.