

V70

Vakuumversuch

Philip Jaletzky	Jannis Vornholt
philip.jaletzky@udo.edu	jannis.vornholt@tu-dortmund.de

Durchführung: 25.04.2022

Abgabe: 20.05.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1. Theorie	3
1.1. Grundlagen	3
1.2. Strömungen	4
1.3. Saugvermögen und Leitwert	4
1.4. Evakuierungskurve	5
1.5. Lecks	5
1.6. Leckratenmessung	6
1.7. Vakuumpumpen	6
1.7.1. Drehschieberpumpe	6
1.7.2. Turbomolekularpumpe	6
1.8. Vakuummessung	7
1.8.1. Pirani-Vakuummeter	7
1.8.2. Kaltkathoden-Ionisationsvakuummeter	7
1.8.3. Heißkathoden-Ionisationsvakuummeter	8
1.8.4. Piezo-Vakuummeter	8
2. Aufbau	8
3. Durchführung	9
3.1. Messung mit der Turbomolekularpumpen	9
3.1.1. Evakuierungskurve	9
3.1.2. Leckratenmessung	10
3.2. Messung mit der Drehschieberpumpen	10
3.2.1. Evakuierungskurve	10
3.2.2. Leckratenmessung	10
4. Auswertung	10
4.1. Fehlerrechnung	10
4.2. Turbopumpe	11
4.2.1. Evakuierungskurve	11
4.2.2. Leckratenmessungen	14
4.3. Drehschieberpumpe	19
4.3.1. Evakuierungskurve	19
4.3.2. Leckratenmessungen	23
5. Diskussion	31
Literatur	33
A. Anhang	33

1. Theorie

Ziel des Versuchs ist es, das effektive Saugvermögen einer Drehschieberpumpe und einer Turbomolekularpumpe, zu bestimmen. Dies geschieht zum einen über die Evakuierungskurve und zum anderen über eine Leckratenmessung. Zudem sollen die Grundlagen der Vakuumphysik erlernt werden.

1.1. Grundlagen

Vakuum ist definiert als Druck, der geringer ist als der Erdatmosphärendruck auf der Erdoberfläche. Dies ist in etwa bei 300 mbar (auf dem Mount Everest) der Fall [S.9, 2]. Es gibt verschiedene Abstufungen von Vakuum. Diese reichen vom Grobvakuum bei 300 mbar - 1 mbar, bis zum extrem hohen Vakuum bei Drücken von weniger als 10^{-12} mbar [S.10, 2]. Druck, über den das Vakuum definiert ist, beschreibt die senkrecht auf eine Fläche wirkende Kraft, also $p = \frac{F}{A}$. Bei Gasgemischen übt jede Komponente einen spezifischen Druck aus, dieser spezifische Druck heißt Partialdruck p_{pa} . Die einzelnen Partialdrücke eines Gasgemisches sind unabhängig voneinander. Bei Gasgemischen aus N verschiedenen idealen Gasen gilt für den Gesamtdruck p_{ges} :

$$p_{ges} = \sum_{i=1}^N p_{pa,i}. \quad (1)$$

Um das Verhalten des Gases bzw. der Teilchen im Vakuum besser beschreiben zu können, wird dieses Gas als Ideales Gas angenommen. Bei idealem Gas werden die Gasteilchen als punktförmige Massen ohne Ausdehnung beschrieben. Die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen werden vernachlässigt, vor allem Van-der-Waals- und Dipol-Dipol-Kräfte. Zudem wird angenommen, dass die Teilchen ausschließlich elastisch mit anderen Gasteilchen und den Wänden stoßen. Wenn diese drei Annahmen gelten, ist das Produkt aus Druck und Volumen,

$$pV = const, \quad (2)$$

bei konstanter Temperatur, konstant. Weiterhin ist der Druck, in einem konstanten Volumen, proportional zur Temperatur, $p = const \cdot T$. Daraus ergibt sich die ideale Gasgleichung,

$$pV = N \cdot k_B \cdot T. \quad (3)$$

Dabei ist N die Teilchenanzahl und k_B die Boltzmann-Konstante. Diese Gleichung kann als Ausdruck für den Druck in Abhängigkeit von der Teilchenzahldichte $n = \frac{N}{V}$ geschrieben werden. Daraus folgt,

$$p = n \cdot k_B \cdot T. \quad (4)$$

Damit ist die Teilchenzahldichte ein gutes Maß für den Druck und kann zur Beschreibung des Drucks verwendet werden [S.11, 2]. Ebenfalls eng mit der Teilchenzahldichte und

damit dem Druck verknüpft und relevant für die Vakuumtechnik ist die mittlere freie Weglänge \bar{l} . Diese beschreibt die durchschnittliche Länge des Weges, eines Teilchens, bis es mit einem anderen Teilchen oder einer Wand zusammenstößt und ist gegeben als:

$$\bar{l} = \frac{k_B \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot p \cdot d_m^2}. \quad (5)$$

Dabei ist d_m^2 der Moleküldurchmesser [S.12, 2].

1.2. Strömungen

Im Vakuum gibt es zwei wesentliche Arten von Strömungen, zum einen die viskosen Strömungen und zum anderen die molekularen Strömungen. Eine Kennzahl zur Unterscheidung der Strömungen ist die Knudsenzahl $K_n = \frac{\bar{l}}{d}$, also das Verhältnis zwischen mittlerer freier Weglänge und Weite des Strömungskanals d . Bei einer Knudsenzahl von $K_n < 0,01$ ist die Strömung viskos, bei $K_n > 0,5$ ist die Strömung laminar. Zwischen den beiden Grenzen befindet sich die Knudsenströmung. Die viskose Strömung zeichnet sich dadurch aus, dass die Gasteilchen hauptsächlich untereinander Stöße ausführen und kaum mit den Wänden. In diesem Bereich gibt es zum einen die turbulente Strömung, bei der die Gasteilchen völlig ungeordnet sind. Diese Strömung tritt bei schnelleren Strömungsgeschwindigkeiten auf und ist im Vakuum nur beim Abpumpen von Atmosphärendruck und beim Belüften relevant. Zum anderen gibt es die laminare Strömung, bei der sich die Gasteilchen innerhalb parallel zueinander geordneten Schichten aufhalten. Dies geschieht bei langsameren Strömungsgeschwindigkeiten der viskosen Strömung. Die molekulare Strömung ist vor allem im Hochvakuum und Ultrahochvakuum von Bedeutung, da bei geringen Teilchenzahldichten, kaum Stöße mit anderen Teilchen erfolgen, sondern hauptsächlich mit Wänden [2].

1.3. Saugvermögen und Leitwert

Das Saugvermögen S einer Vakuumpumpe gibt an, wieviel Gas sie pro Zeit aus dem Rezipienten saugen kann,

$$S = \frac{dV}{dt}. \quad (6)$$

Die Rohre und Behälter in der Vakuumtechnik haben ähnlich wie elektrische Leiter, einen Widerstand. Dieser Widerstand ist über die Druckdifferenz Δp zwischen Ende und Anfang des Rohres und dem Gasstrom q_{pV} definiert,

$$W = \frac{\Delta p}{q_{pV}}. \quad (7)$$

Der Kehrwert des Widerstands wird Leitwert genannt und ist ein Maß dafür, wie gut der Gasstrom durch ein Gefäß fließen kann. Es gilt für den Leitwert L :

$$L = \frac{1}{W} = \frac{q_{pV}}{\Delta p}. \quad (8)$$

Aus diesem Rohrwiderstand ergibt sich, dass das Saugvermögen der Vakuumpumpe nicht dem theoretischen Wert entspricht, da die Pumpe normalerweise über einen Schlauch mit dem Rezipienten verbunden ist und dieser Schlauch aber auch der Rezipient selbst, einen Rohrwiderstand besitzen [S.82, 1]. Das Effektive Saugvermögen einer Vakuumpumpe ist daher

$$S_{eff} = \frac{1}{S} + \frac{1}{L}. \quad (9)$$

1.4. Evakuierungskurve

Wird Gleichung (2) nach der Zeit abgeleitet,

$$\frac{dp}{dt}V + \frac{dV}{dt} = 0 \quad (10)$$

und anschließend umgestellt, so entsteht ein Ausdruck für das Saugvermögen,

$$\frac{dV}{dt} = S = -\frac{Vdp}{p dt}. \quad (11)$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung ist:

$$p(t) = p_0 \exp\left(-\frac{S}{V}t\right) \quad (12)$$

Weiter muss beachtet werden, dass jede Vakuumpumpe einen Enddruck $P_E \neq 0$ erzeugt. Dies führt zur abschließenden Gleichung für die Evakuierungskurve:

$$p(t) = (p_0 - P_E) \exp\left(-\frac{S}{V}t\right) + P_E. \quad (13)$$

Mit Hilfe dieser Formel kann aus der Evakuierungskurve das Saugvermögen einer Vakuumpumpe bestimmt werden, wobei hier nicht beachtet wurde, dass das Saugvermögen einer Vakuumpumpe nicht konstant über alle Drücke ist.

1.5. Lecks

Bei jedem Vakuumaufbau gibt es Lecks, die Verhindern, dass der Druck unter P_E sinkt. Es gibt zum einen reale Lecks, die von außerhalb der Vakuumanlage messbar sind, z.B. undichte Ventile aber auch "virtuelle" Lecks, bei denen das nicht der Fall ist. Diese "virtuellen" Lecks werden z.B. durch **Desorption** verursacht. Desorption beschreibt das Lösen/Austreten von Atomen oder Molekülen, von/aus einer Oberfläche. Diese Atome und Moleküle sind vorher durch **Sorption** angelagert worden. Bei der Sorption wird zwischen **Absorption**, also das in das Material rein diffundieren und **Adsorption**, dem Anlagern von Atomen und Molekülen an einer Oberfläche, unterschieden [S.62, 63, 1].

1.6. Leckratenmessung

Das Saugvermögen kann auch über die Leckratenmessung bestimmt werden. Dafür muss zunächst eine Leckrate Q eingestellt werden. Dies wird durch ein geöffnetes Drosselventil realisiert. Um eine Leckratenmessung durchführen zu können, muss durch das Drosselventil genausoviel Luft in den Rezipienten einströmen, wie die Pumpe aus dem Rezipienten absaugt. Ist dies der Fall, stellt sich ein Gleichgewichtsdruck p_g im Rezipienten ein. Es gilt für das Saugvermögen S

$$S = \frac{Q}{p_g}, \quad (14)$$

mit

$$Q = V_0 \frac{\Delta p}{\Delta t}. \quad (15)$$

Aus Gleichung (14) und (15) folgt für das Saugvermögen:

$$S = \frac{V_0}{p_g} \frac{\Delta p}{\Delta t}. \quad (16)$$

1.7. Vakuumpumpen

1.7.1. Drehschieberpumpe

Die Drehschieberpumpe ist eine gasfördernde Vakuumpumpe, das heißt sie erzeugt ein Vakuum durch Absaugen und Einschließen einzelner Teilvolumen und anschließendem Ausstoß dieser Volumen. Hierfür ist die Drehschieberpumpe, wie in Abbildung 1 schematisch dargestellt, aufgebaut. Durch das Drehen des Rotors und das Abdichten der einzelnen Volumina durch die Schieber mit Hilfe von Federn, wird das Volumen am Ansaugventil vergrößert, so dass Gas aus dem Rezipienten, in die Pumpe strömt. Dieses Volumen wird nun in Richtung Auslassventil befördert und dort komprimiert, bis der Druck hoch genug ist um das Auslassventil zu öffnen. Drehschieberpumpen werden bei Atmosphärendruck bis hin zum Feinvakuum ($p = 10^{-3}$ mbar) benutzt. Tiefere Drücke werden nicht erreicht, da bei tieferen Drücken, zu viel Öl, welches das Auslassventil bedeckt und die Schieber abdichtet, gasförmig wird und zurück in den Rezipienten diffundiert [S.60, 61, 2].

1.7.2. Turbomolekularpumpe

Turbomolekularpumpen sind kinetische Vakuumpumpen. Sie sind turbinenähnlich aufgebaut, innerhalb des Gehäuses sind mehrere Schichten abwechselnd mit Rotorscheiben und Statorscheiben besetzt. Die Schaufeln der Schichten sind angewinkelt und zwischen Rotor und Stator spiegelverkehrt. Zur Erzeugung eines Vakuums macht sich die Turbopumpe den Effekt der Adsorption zu nutze. Die Rotoren drehen sich während sich ein Molekül an dem Rotorblatt anheftet. Bei der Desorption hat das Molekül durch die angewinkelte

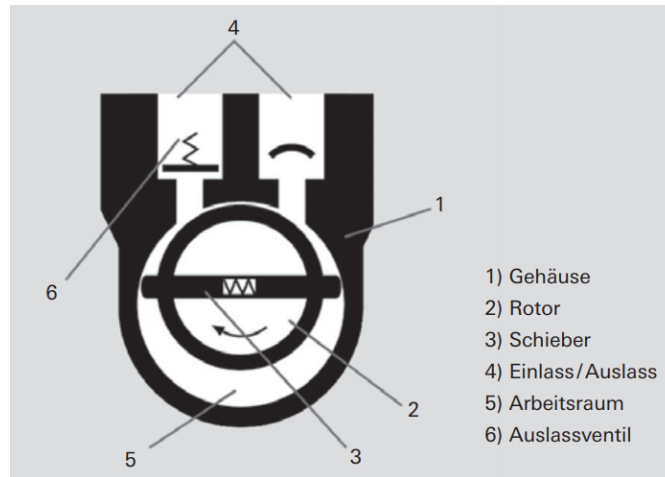


Abbildung 1.: Schematische Abbildung einer Drehschieberpumpe.

Rotorscheibe und deren Rotation, einen Impuls, der bevorzugt in Pumpenrichtung zeigt. Damit dieses Prinzip funktioniert, muss eine molekulare Strömung herrschen. Daher benötigt die Turbopumpe ein Vorvakuum. Zudem müssen die Rotorblätter ähnliche Geschwindigkeiten erreichen wie die Gasmoleküle, weshalb der Rotor sich mit bis zu 1500 Hz dreht. Damit erreicht die Pumpe Drücke im Bereich des Hochvakuums [S.83, 84, 2].

1.8. Vakuummessung

1.8.1. Pirani-Vakuummeter

Das Pirani-Vakuummeter ist ein Wärmeleitungsvakuummeter. Es besteht aus einem Heizdraht in der Mitte eines Gehäuses. Der Druck wird bestimmt, indem die Wärmeleitfähigkeit des Gases zwischen Heizdraht und Gehäuse gemessen wird. Diese ist im Bereich von 10 mbar bis 10^{-4} mbar hauptsächlich durch Stöße der Gasteilchen gegeben und verläuft linear zum Druck [S.93, 94, 2].

1.8.2. Kaltkathoden-Ionisationsvakuummeter

Bei diesem Vakuummeter werden durch ein elektrisches Feld Elektronen aus der Kathode gelöst. Dies geschieht durch elektrische Feldemission, dem durch ein elektrisches Feld induziertem Tunneln eines Elektrons aus einem Potential heraus. Die aus der Kathodenoberfläche austretenden Elektronen werden anschließend durch das elektrische Feld in Richtung Anode beschleunigt. Zwischen Kathode und Anode ionisieren die Elektronen durch Stöße Gasteilchen, wodurch ein Ionenstrom zustande kommt. Der Ionenstrom ist proportional zum Druck. Das Kaltkathoden-Ionisationsvakuummeter kann für Druckbereiche unterhalb von $p = 10^{-2}$ mbar genutzt werden [S.94, 2].

1.8.3. Heißkathoden-Ionisationsvakuummeter

Das Prinzip ist ähnlich zum Kaltkathoden-Ionisationsvakuummeter, nur werden hier die Elektronen durch das Aufheizen eines Glühdrahts und durch thermische Elektronenemission freigesetzt. Die Druckbestimmung erfolgt ebenfalls durch Messung des Ionenstroms, da dieser proportional zum Druck ist [S.94, 95, 2].

1.8.4. Piezo-Vakuummeter

Das Piezo-Vakuummeter besteht aus einem Volumen mit Druck p_0 , welches durch eine Membran von dem Volumen des Rezipienten mit p_1 getrennt ist. Bei Druckunterschieden zwischen p_0 und p_1 wirkt eine Kraft auf die Oberfläche der Membran, wodurch diese gedehnt wird. In der Membran sind Piezokristalle eindiffundiert, welche bei besagter Dehnung eine Spannung erzeugen, durch die auf den Druck im Rezipienten geschlossen werden kann. Diese Art von Vakuummeter wird vor allem im Grobvakuum eingesetzt [S.92, 2].

2. Aufbau

Im Bild 2 ist der Versuchsaufbau zu sehen. Der Rezipient (R) ist mit der Turbomolekularpumpe (P2) verbunden, welche wiederum mit der Drehschieberpumpe (P1) verbunden ist. Über das Ventil (V1) kann die Drehschieberpumpe vom restlichen Aufbau abgeschiebert werden. Dasselbe ist für die Turbopumpe mit dem Ventil (V2) möglich. Zum Belüften des Rezipienten sind ein Ventil (V3) und ein Drosselventil (D1) mit dem Rezipienten verbunden. Die für den Versuch genutzten Messgeräte sind zum einen das Pirani-Kaltkathoden-Vakuummeter (M1) zur Bestimmung der von der Turbopumpe erzeugten Drücke und das Piezo-Pirani-Vakuummeter (M2) für die Drücke, die durch die Drehschieberpumpe erzeugt werden.

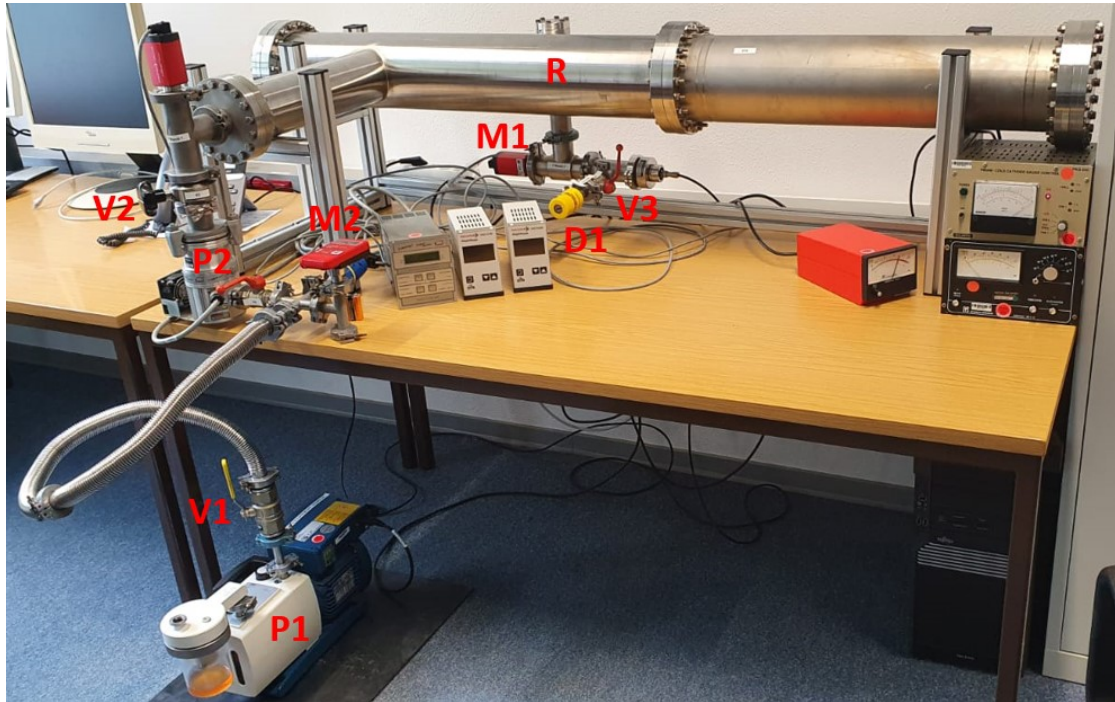


Abbildung 2.: Versuchsaufbau.

3. Durchführung

Bevor die eigentlichen Messungen beginnen können, muss überprüft werden ob der Rezipient dicht ist. Dafür wird der Rezipient evakuiert und festgestellt ob der Enddruck im Bereich des von der angeschlossenen Pumpe, maximal erzeugbaren Vakuums liegt. Ist dies nicht der Fall, muss die Apparatur mit z.b. Blindflanschen, durch Ventile schließen oder Umbaumaßnahmen überprüft werden und undichte Stellen abgedichtet werden.

3.1. Messung mit der Turbomolekularpumpen

Da die Turbomolekularpumpe schon vor Beginn des Versuchs lief, wurde mit der Bestimmung des Saugvermögens der Turbopumpe begonnen.

3.1.1. Evakuierungskurve

Zur Bestimmung der Evakuierungskurve laufen beide Pumpen und die Ventile zum Rezipienten sind geöffnet. Nun wird der Rezipient vorsichtig mit geöffnetem V3 und über das Drosselventil (D1) belüftet, bis der Druck im Rezipienten bei $p_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ liegt. Anschließend wird V3 geschlossen und für 120 s alle 10 s der Druck im Rezipienten abgelesen. Diese Prozedur wird 3-mal durchgeführt.

3.1.2. Leckratenmessung

Für die Leckratenmessung wird bei laufenden Pumpen und geöffneten V1 und V2 über das Drosselventil ein Gleichgewichtsdruck eingestellt. Danach wird die Turbomolekularpumpe durch Schließen des Ventils V2 abgeschiebert und 120 s lang alle 10 s der Druck gemessen. Dies wird insgesamt 3-mal pro Gleichgewichtsdruck und mit vier verschiedenen Gleichgewichtsdrücken ($p_g = 5 \cdot 10^{-5}; 7 \cdot 10^{-5}; 1 \cdot 10^{-4}; 2 \cdot 10^{-4}$ mbar) durchgeführt.

3.2. Messung mit der Drehschieberpumpen

Für die Messungen mit der Drehschieberpumpe wird die Turbomolekularpumpe ausgestellt. Das Ventil V2 bleibt die gesamte Zeit geöffnet.

3.2.1. Evakuierungskurve

Bei der Bestimmung der Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe bleiben V1 und V2 geöffnet, der Rezipient wird über V3 und D1 geflutet, bis Atmosphärendruck innerhalb des Rezipienten herrscht. Dann wird V3 geschlossen und 600 s lang alle 10 s der Druck im Rezipienten abgelesen. Auch diese Messung wird 3-mal durchgeführt.

3.2.2. Leckratenmessung

Die Leckratenmessung der Drehschieberpumpe verläuft fast äquivalent zur Messung mit der Turbomolekularpumpe. Über das Drosselventil D1 werden vier verschiedene Gleichgewichtsdrücke ($p_g = 0, 5; 10; 50; 100$ mbar) eingestellt. Anschließend wird die Pumpe über V1 abgeschiebert und 200 s lang alle 10 s der Druck bestimmt. Für jeden Gleichgewichtsdruck wird die Messung wieder 3-mal durchgeführt.

4. Auswertung

Im Folgenden werden die aufgenommenen Messreihen ausgewertet, um die Evakuierungskurven sowie das effektive Saugvermögen beider Pumpentypen zu bestimmen. Das effektive Saugvermögen wird sowohl anhand der Evakuierungskurven, als auch anhand der Leckratenmessungen bestimmt. Scans der Originalmessdaten sind im Anhang zu finden.

4.1. Fehlerrechnung

Wenn mehrere voneinander unabhängige fehlerbehaftete Größen miteinander verrechnet werden, wird die Gaußsche Fehlerfortpflanzung

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} \quad (17)$$

genutzt, um den Fehler der berechneten Größe zu bestimmen.

Bei der Mittelwertbildung der Messgrößen aus den Messreihen ist zu beachten, dass die

Unsicherheit Δp des arithmetischen Mittelwerts \bar{p} einer Observablen p bei n unabhängigen Messungen nach

$$\Delta p = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{p} - p_i)^2} \quad (18)$$

berechnet wird. Bei den unterschiedlichen Pumpentypen werden verschiedene Messgeräte genutzt, die zu unterschiedlichen Messungenauigkeiten für die einzelnen Messwerte führen, welche in den jeweiligen Unterabschnitten betrachtet werden.

Die Fehlerfortpflanzung der Saugleistung bestimmt sich also zu

$$\sigma_S = \sqrt{\left(\frac{m^2}{p_g^2}\right) \cdot \sigma_V^2 + \left(\frac{V^2}{p_g^2}\right) \cdot \sigma_m^2 + \left(\frac{m^2 V^2}{p_g^4}\right) \cdot \sigma_p^2} \quad .$$

4.2. Turbopumpe

Als Messgerät bei den Messungen an der Turbopumpe wurde das PKR 360, Pfeiffer Vacuum Messgerät (kombinierter Pirani/Kaltkathode-Sensor) verwendet. Die Messungenauigkeit des genutzten Messgeräts beträgt 30% im Bereich von $1 \cdot 10^{-8}$ mbar bis 100 mbar und 50% im Bereich von 100 mbar bis 1000 mbar [3].

4.2.1. Evakuierungskurve

Für die Evakuierungsmessung der Turbopumpe wird über 120 Sekunden der Druck alle 10 Sekunden gemessen, innerhalb der ersten 20 Sekunden sogar alle 5 Sekunden. Auf diese Weise werden 3 Messreihen aufgenommen. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse dieser Messreihen mit den jeweiligen Fehlern aufgelistet. Für den Mittelwert des Drucks wurde zusätzlich der Fehler des Mittelwerts (Gleichung 18) berechnet.

Tabelle 1.: Messreihen zur Evakuierungsmessung der Turbopumpe

t [s]	p1 [mbar]	p2 [mbar]	p3 [mbar]	\bar{p} [mbar]
0	0.0050 \pm 0.0015	0.0050 \pm 0.0015	0.0050 \pm 0.0015	0.0050 \pm 0.0015
5	0.00032 \pm 0.00010	0.00039 \pm 0.00012	0.00038 \pm 0.00011	0.00036 \pm 0.00011
10	0.00012 \pm 0.00004	0.00013 \pm 0.00004	0.00012 \pm 0.00004	0.00012 \pm 0.00004
15	(5.7 \pm 1.7)*10 ⁻⁵	(5.7 \pm 1.7)*10 ⁻⁵	(6.0 \pm 1.8)*10 ⁻⁵	(5.8 \pm 1.7)*10 ⁻⁵
20	(4.1 \pm 1.2)*10 ⁻⁵	(4.1 \pm 1.2)*10 ⁻⁵	(4.2 \pm 1.3)*10 ⁻⁵	(4.1 \pm 1.2)*10 ⁻⁵
30	(3.0 \pm 0.9)*10 ⁻⁵	(3.2 \pm 1.0)*10 ⁻⁵	(3.2 \pm 1.0)*10 ⁻⁵	(3.1 \pm 0.9)*10 ⁻⁵
40	(2.8 \pm 0.8)*10 ⁻⁵	(2.8 \pm 0.9)*10 ⁻⁵	(2.9 \pm 0.9)*10 ⁻⁵	(2.8 \pm 0.8)*10 ⁻⁵
50	(2.6 \pm 0.8)*10 ⁻⁵	(2.6 \pm 0.8)*10 ⁻⁵	(2.6 \pm 0.8)*10 ⁻⁵	(2.6 \pm 0.8)*10 ⁻⁵
60	(2.4 \pm 0.7)*10 ⁻⁵	(2.5 \pm 0.7)*10 ⁻⁵	(2.5 \pm 0.8)*10 ⁻⁵	(2.5 \pm 0.7)*10 ⁻⁵
70	(2.3 \pm 0.7)*10 ⁻⁵	(2.4 \pm 0.7)*10 ⁻⁵	(2.4 \pm 0.7)*10 ⁻⁵	(2.4 \pm 0.7)*10 ⁻⁵
80	(2.3 \pm 0.7)*10 ⁻⁵	(2.3 \pm 0.7)*10 ⁻⁵	(2.3 \pm 0.7)*10 ⁻⁵	(2.3 \pm 0.7)*10 ⁻⁵
90	(2.2 \pm 0.7)*10 ⁻⁵	(2.2 \pm 0.7)*10 ⁻⁵	(2.2 \pm 0.7)*10 ⁻⁵	(2.2 \pm 0.7)*10 ⁻⁵
100	(2.1 \pm 0.6)*10 ⁻⁵	(2.2 \pm 0.6)*10 ⁻⁵	(2.2 \pm 0.7)*10 ⁻⁵	(2.2 \pm 0.6)*10 ⁻⁵
110	(2.1 \pm 0.6)*10 ⁻⁵	(2.1 \pm 0.6)*10 ⁻⁵	(2.1 \pm 0.6)*10 ⁻⁵	(2.1 \pm 0.6)*10 ⁻⁵
120	(2.1 \pm 0.6)*10 ⁻⁵	(2.1 \pm 0.6)*10 ⁻⁵	(2.1 \pm 0.6)*10 ⁻⁵	(2.1 \pm 0.6)*10 ⁻⁵

Um die Messwerte an eine Gerade der Form

$$y = m \cdot x + n \quad (19)$$

angleichen zu können, müssen sie über den Zusammenhang

$$\ln \left(\frac{p(t) - p_{end}}{p_0 - p_{end}} \right) \quad (20)$$

linearisiert werden. Für die Fehlerfortpflanzung der logarithmierten Werte wurde die Formel

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sigma_p^2}{(p - p_E)^2} + \frac{\sigma_{p_0}^2}{(p_0 - p_E)^2} + \sigma_{p_E}^2 \left(\frac{1}{p_0 - p_E} - \frac{1}{p - p_E} \right)^2}$$

genutzt, die aus der Gaußschen Fehlerfortpflanzung (Gleichung 17) resultiert. Die logarithmierten Werte sind in Tabelle 2 aufgelistet (gemessen wurden $p_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ und $p_E = 1.5 \cdot 10^{-5}$).

Tabelle 2.: Logarithmierte Messreihen zur Evakuierungsmessung der Turbopumpe

t [s]	$\ln(\frac{p-p_E}{p_0-p_E})$
0	0.0 \pm 0.4
5	-2.7 \pm 0.4
10	-3.8 \pm 0.5
15	-4.8 \pm 0.5
20	-5.2 \pm 0.6
30	-5.7 \pm 0.7
40	-5.9 \pm 0.8
50	-6.1 \pm 0.9
60	-6.2 \pm 0.9
70	-6.3 \pm 1.0
80	-6.5 \pm 1.1
90	-6.5 \pm 1.2
100	-6.6 \pm 1.2
110	-6.7 \pm 1.3
120	-6.7 \pm 1.3

Da die Saugleistung der Pumpe nicht für den gesamten Druckbereich konstant ist, wird die lineare Ausgleichsrechnung für drei unterschiedliche Druckbereiche durchgeführt. Die logarithmierten Werte mit Ausgleichsgeraden für die 3 Druckbereiche sind in Abbildung 3 graphisch dargestellt.

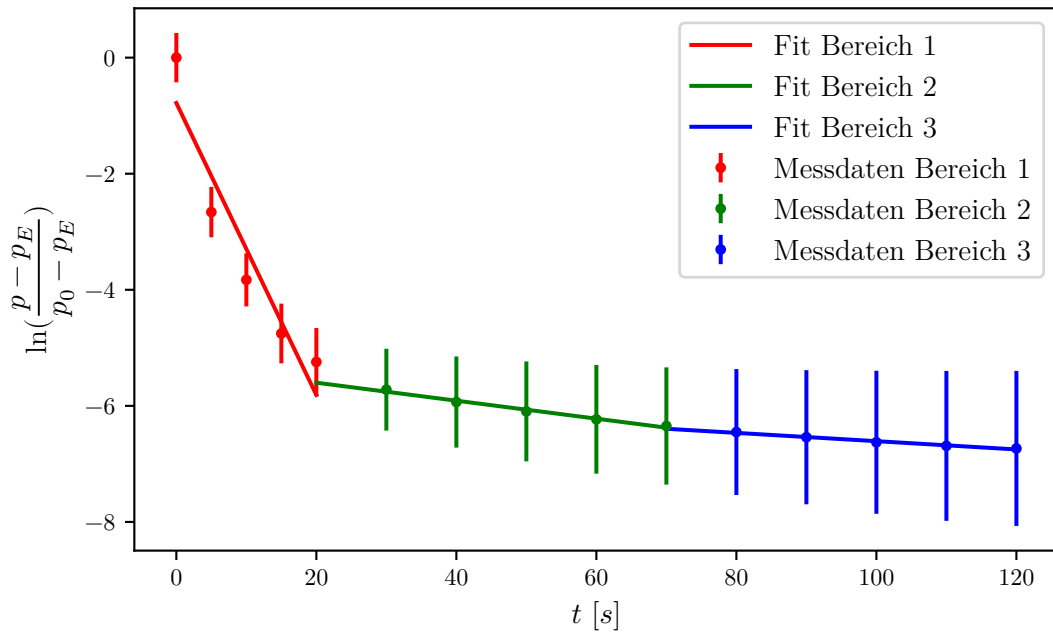


Abbildung 3.: Logarithmierte Werte mit Ausgleichsgeraden für 3 Druckbereiche zur Evakuierungsmessung der Turbopumpe

Aus den Parametern der Ausgleichsrechnung lässt sich über $S = -mV$ die Saugvermögen bestimmen. Diese Parameter sowie das Saugvermögen sind in der folgenden Tabelle für die entsprechenden Druckbereiche aufgelistet.

Druckbereich	$m[1/s]$	n	$S[l/s]$
$5 \cdot 10^{-3}$ mbar bis $4,2 \cdot 10^{-5}$ mbar	-0.2516 ± 0.04681	-0.7815 ± 0.04681	8.3019 ± 1.75376
$4,2 \cdot 10^{-5}$ mbar bis $2,35 \cdot 10^{-5}$ mbar	-0.0155 ± 0.00109	-5.2908 ± 0.00109	0.5115 ± 0.06254
$2,35 \cdot 10^{-5}$ mbar bis $2,1 \cdot 10^{-5}$ mbar	-0.0071 ± 0.00057	-5.8948 ± 0.00057	0.2355 ± 0.03007

Tabelle 3.: Parameter der Ausgleichsgeraden und Ergebnisse für das Saugvermögen.

4.2.2. Leckratenmessungen

Bei den Leckratenmessungen für die Turbopumpe wird, nachdem jeweils ein bestimmter Gleichgewichtsdruck eingestellt wurde, über einen Zeitraum von 120 s alle 10 s der Druck aufgenommen. Zu diesen Werten wird dann wieder eine lineare Ausgleichsrechnung (zur Gerade, Gleichung 19) durchgeführt. Die Messungen wurden bei den Gleichgewichtsdrücken $p_g = 1 \cdot 10^{-4}$ mbar (siehe Tabelle 4 und Abbildung 4), $p_g = 2 \cdot 10^{-4}$ mbar (siehe Tabelle 5 und Abbildung 5), $p_g = 5 \cdot 10^{-5}$ mbar (siehe Tabelle 6 und Abbildung 6) und $p_g = 7 \cdot 10^{-5}$ mbar (siehe Tabelle 7 und Abbildung 7) durchgeführt.

Tabelle 4.: Messreihen zur Leckratenmessung der Turbopumpe mit $p_g = 1 * 10^{-4}$ mbar

t [s]	p1 [mbar]	p2 [mbar]	p3 [mbar]	\bar{p} [mbar]
10	0.00027 \pm 0.00008	0.00027 \pm 0.00008	0.00028 \pm 0.00008	0.00027 \pm 0.00008
20	0.00042 \pm 0.00013	0.00042 \pm 0.00012	0.00042 \pm 0.00013	0.00042 \pm 0.00013
30	0.00055 \pm 0.00016	0.00055 \pm 0.00017	0.00056 \pm 0.00017	0.00055 \pm 0.00017
40	0.00067 \pm 0.00020	0.00067 \pm 0.00020	0.00068 \pm 0.00020	0.00067 \pm 0.00020
50	0.00081 \pm 0.00024	0.00081 \pm 0.00024	0.00083 \pm 0.00025	0.00082 \pm 0.00024
60	0.00098 \pm 0.00029	0.00096 \pm 0.00029	0.00097 \pm 0.00029	0.00097 \pm 0.00029
70	0.00111 \pm 0.00033	0.00110 \pm 0.00033	0.00111 \pm 0.00033	0.00111 \pm 0.00033
80	0.0013 \pm 0.0004	0.0013 \pm 0.0004	0.0013 \pm 0.0004	0.0013 \pm 0.0004
90	0.0015 \pm 0.0004	0.0015 \pm 0.0004	0.0015 \pm 0.0005	0.0015 \pm 0.0005
100	0.0017 \pm 0.0005	0.0017 \pm 0.0005	0.0017 \pm 0.0005	0.0017 \pm 0.0005
110	0.0019 \pm 0.0006	0.0019 \pm 0.0006	0.0019 \pm 0.0006	0.0019 \pm 0.0006
120	0.0021 \pm 0.0006	0.0021 \pm 0.0006	0.0021 \pm 0.0006	0.0021 \pm 0.0006

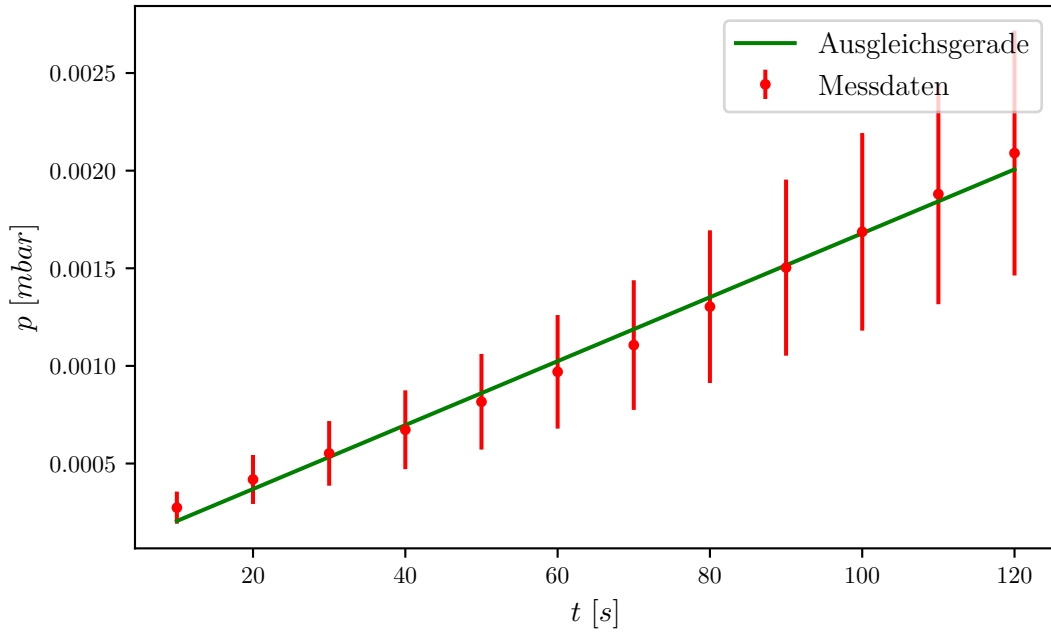


Abbildung 4.: Messwerte mit Ausgleichsgerade zur Leckratenmessung der Turbopumpe bei $p_g = 1 * 10^{-4}$ mbar

Tabelle 5.: Messreihen zur Leckratenmessung der Turbopumpe mit $p_g = 2 * 10^{-4}$ mbar

t [s]	p1 [mbar]	p2 [mbar]	p3 [mbar]	\bar{p} [mbar]
10	0.00054 ±0.00016	0.00052 ±0.00016	0.00053 ±0.00016	0.00053 ±0.00016
20	0.00084 ±0.00025	0.00083 ±0.00025	0.00082 ±0.00025	0.00083 ±0.00025
30	0.0012 ±0.0004	0.0012 ±0.0004	0.00116 ±0.00035	0.00118 ±0.00035
40	0.0016 ±0.0005	0.0016 ±0.0005	0.0016 ±0.0005	0.0016 ±0.0005
50	0.0021 ±0.0006	0.0021 ±0.0006	0.0021 ±0.0006	0.0021 ±0.0006
60	0.0027 ±0.0008	0.0026 ±0.0008	0.0026 ±0.0008	0.0026 ±0.0008
70	0.0032 ±0.0010	0.0032 ±0.0009	0.0031 ±0.0009	0.0032 ±0.0009
80	0.0038 ±0.0011	0.0038 ±0.0011	0.0037 ±0.0011	0.0038 ±0.0011
90	0.0044 ±0.0013	0.0043 ±0.0013	0.0043 ±0.0013	0.0043 ±0.0013
100	0.0050 ±0.0015	0.0050 ±0.0015	0.0050 ±0.0015	0.0050 ±0.0015
110	0.0057 ±0.0017	0.0057 ±0.0017	0.0056 ±0.0017	0.0057 ±0.0017
120	0.0063 ±0.0019	0.0063 ±0.0019	0.0062 ±0.0019	0.0063 ±0.0019

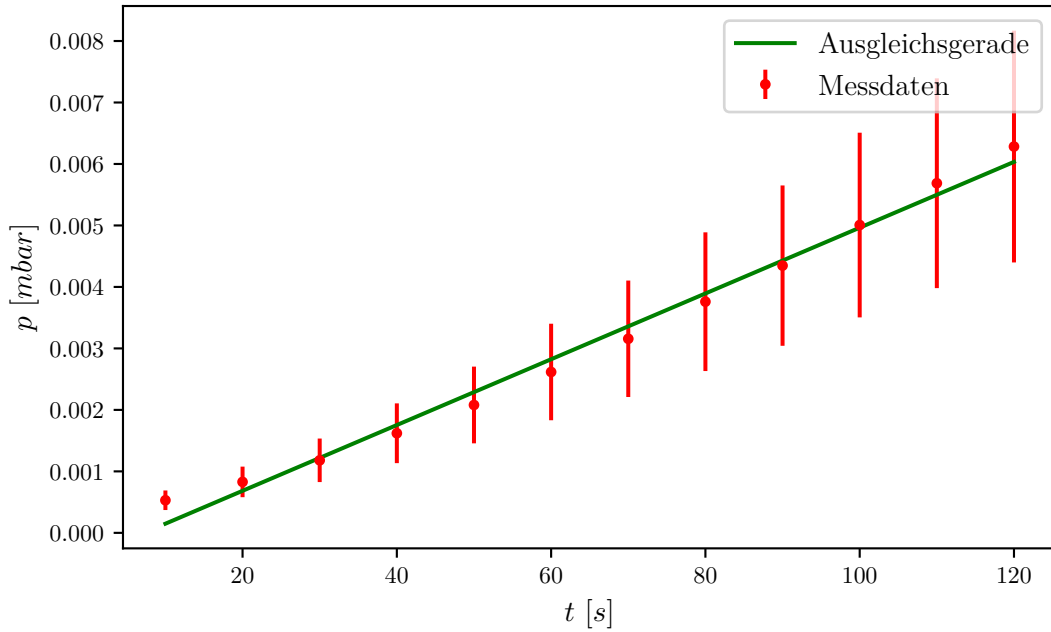


Abbildung 5.: Messwerte mit Ausgleichsgerade zur Leckratenmessung der Turbopumpe bei $p_g = 2 * 10^{-4}$ mbar

Tabelle 6.: Messreihen zur Leckratenmessung der Turbopumpe mit $p_g = 5 * 10^{-5}$ mbar

t [s]	p1 [mbar]	p2 [mbar]	p3 [mbar]	\bar{p} [mbar]
10	0.00014 ± 0.00004	0.00014 ± 0.00004	0.00014 ± 0.00004	0.00014 ± 0.00004
20	0.00021 ± 0.00006	0.00021 ± 0.00006	0.00021 ± 0.00006	0.00021 ± 0.00006
30	0.00028 ± 0.00008	0.00028 ± 0.00008	0.00028 ± 0.00008	0.00028 ± 0.00008
40	0.00034 ± 0.00010	0.00034 ± 0.00010	0.00034 ± 0.00010	0.00034 ± 0.00010
50	0.00039 ± 0.00012	0.00040 ± 0.00012	0.00040 ± 0.00012	0.00040 ± 0.00012
60	0.00045 ± 0.00013	0.00046 ± 0.00014	0.00045 ± 0.00014	0.00045 ± 0.00014
70	0.00051 ± 0.00015	0.00051 ± 0.00015	0.00052 ± 0.00015	0.00051 ± 0.00015
80	0.00056 ± 0.00017	0.00056 ± 0.00017	0.00057 ± 0.00017	0.00056 ± 0.00017
90	0.00061 ± 0.00018	0.00062 ± 0.00019	0.00062 ± 0.00019	0.00062 ± 0.00019
100	0.00066 ± 0.00020	0.00067 ± 0.00020	0.00066 ± 0.00020	0.00066 ± 0.00020
110	0.00072 ± 0.00022	0.00072 ± 0.00022	0.00072 ± 0.00022	0.00072 ± 0.00022
120	0.00078 ± 0.00023	0.00079 ± 0.00024	0.00078 ± 0.00024	0.00079 ± 0.00024

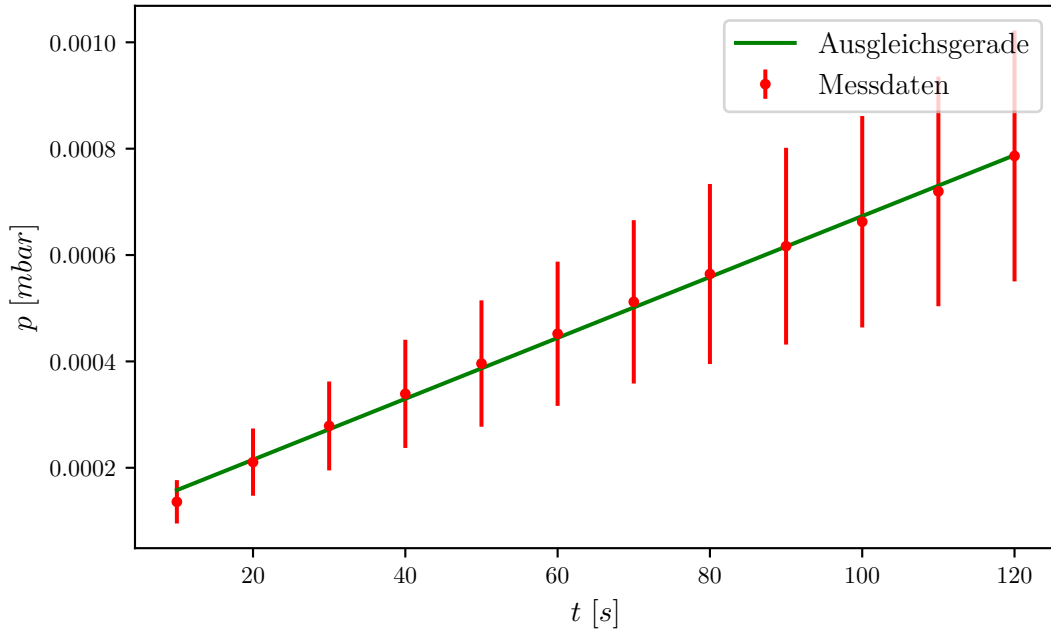


Abbildung 6.: Messwerte mit Ausgleichsgerade zur Leckratenmessung der Turbopumpe bei $p_g = 5 * 10^{-5}$ mbar

Tabelle 7.: Messreihen zur Leckratenmessung der Turbopumpe mit $p_g = 7 \cdot 10^{-5}$ mbar

t [s]	p1 [mbar]	p2 [mbar]	p3 [mbar]	\bar{p} [mbar]
10	0.00020 ± 0.00006	0.00020 ± 0.00006	0.00019 ± 0.00006	0.00020 ± 0.00006
20	0.00030 ± 0.00009	0.00030 ± 0.00009	0.00029 ± 0.00009	0.00030 ± 0.00009
30	0.00040 ± 0.00012	0.00040 ± 0.00012	0.00040 ± 0.00012	0.00040 ± 0.00012
40	0.00049 ± 0.00015	0.00049 ± 0.00015	0.00049 ± 0.00015	0.00049 ± 0.00015
50	0.00057 ± 0.00017	0.00058 ± 0.00017	0.00058 ± 0.00017	0.00058 ± 0.00017
60	0.00065 ± 0.00020	0.00066 ± 0.00020	0.00066 ± 0.00020	0.00066 ± 0.00020
70	0.00075 ± 0.00022	0.00075 ± 0.00022	0.00075 ± 0.00022	0.00075 ± 0.00022
80	0.00084 ± 0.00025	0.00084 ± 0.00025	0.00084 ± 0.00025	0.00084 ± 0.00025
90	0.00096 ± 0.00029	0.00095 ± 0.00028	0.00095 ± 0.00028	0.00095 ± 0.00029
100	0.00109 ± 0.00033	0.00107 ± 0.00032	0.00107 ± 0.00032	0.00108 ± 0.00032
110	0.00116 ± 0.00035	0.00116 ± 0.00035	0.00115 ± 0.00034	0.00116 ± 0.00035
120	0.0013 ± 0.0004	0.0013 ± 0.0004	0.0013 ± 0.0004	0.0013 ± 0.0004

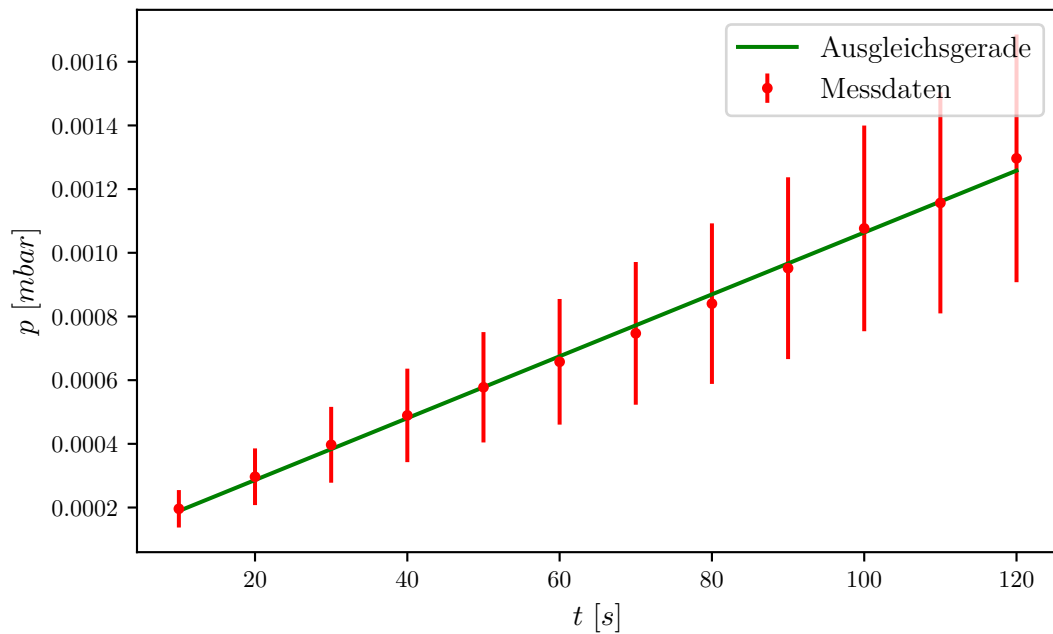


Abbildung 7.: Messwerte mit Ausgleichsgerade zur Leckratenmessung der Turbopumpe bei $p_g = 7 \cdot 10^{-5}$ mbar

Schließlich können wieder die Parameter der Ausgleichsgeraden und das Saugvermögen über $S = \frac{-V}{p_g} \cdot m$ bestimmt werden. Die Parameter und das entsprechende Saugvermögen für die jeweiligen Gleichgewichtsdrücke sind im Folgenden tabellarisch aufgelistet.

p_g [mbar]	m [1/s]	n	S [l/s]
$1 \cdot 10^{-4}$ mbar	$0.00001637 \pm 0.00000046$	$0.00004194 \pm 0.00000046$	5.4027 ± 0.56130
$2 \cdot 10^{-4}$ mbar	$0.00005350 \pm 0.00000175$	$-0.00038608 \pm 0.00000175$	8.8272 ± 0.92869
$5 \cdot 10^{-5}$ mbar	$0.00000573 \pm 0.00000009$	$0.00010065 \pm 0.00000009$	3.7791 ± 0.38249
$7 \cdot 10^{-5}$ mbar	$0.00000972 \pm 0.00000017$	$0.00009193 \pm 0.00000017$	4.5814 ± 0.46502

Tabelle 8.: Parameter der Ausgleichsgeraden und Ergebnisse für das Saugvermögen zur Leckratenmessung der Turbopumpe für unterschiedliche Gleichgewichtsdrücke

4.3. Drehschieberpumpe

Für die Messungen mit der Drehschieberpumpe wird als Fehler für Druckwerte kleiner als $2 \cdot 10^{-3}$ mbar ein Faktor 2 vom Messwert, für $2 \cdot 10^{-3}$ mbar bis 10 mbar der Wert ± 120 mbar und für 10 mbar bis 1200 mbar der Wert $\pm 3,6$ mbar als Messfehler genutzt[3].

4.3.1. Evakuierungskurve

Bei dieser Messung wurden über einen Zeitraum von 600 s alle 10 s Druckwerte aufgenommen. Das Vorgehen für die Auswertung der Evakuierungsmessung erfolgt ansonsten analog zum Vorgehen bei der Turbopumpe. Als Startdruck wurde $p_0 = 998$ mbar und als Enddruck wurde $p_E = 0,012$ mbar gemessen.

Tabelle 9.: Messreihen zur Evakuierungsmessung der Drehschieberpumpe (Bereich bis 300 s)

t [s]	p1 [mbar]	p2 [mbar]	p3 [mbar]	\bar{p} [mbar]
0	998 \pm 4	998 \pm 4	998 \pm 4	998 \pm 4
10	652 \pm 4	646 \pm 4	654 \pm 4	651 \pm 4
20	487 \pm 4	482 \pm 4	481 \pm 4	483 \pm 4
30	352 \pm 4	359 \pm 4	361 \pm 4	357 \pm 4
40	262 \pm 4	268 \pm 4	269 \pm 4	266 \pm 4
50	200 \pm 4	197 \pm 4	198 \pm 4	198 \pm 4
60	145 \pm 4	144 \pm 4	145 \pm 4	145 \pm 4
70	106 \pm 4	105 \pm 4	106 \pm 4	106 \pm 4
80	78 \pm 4	77 \pm 4	78 \pm 4	78 \pm 4
90	57 \pm 4	56 \pm 4	57 \pm 4	57 \pm 4
100	41 \pm 4	41 \pm 4	41 \pm 4	41 \pm 4
110	30 \pm 4	30 \pm 4	3.00 \pm 0.30	21 \pm 4
120	22 \pm 4	22 \pm 4	3.10 \pm 0.31	15 \pm 4
130	15 \pm 4	16 \pm 4	16 \pm 4	16 \pm 4
140	12 \pm 4	12 \pm 4	12 \pm 4	12 \pm 4
150	8.5 \pm 0.9	8.4 \pm 0.8	8.4 \pm 0.8	8.4 \pm 0.8
160	6.2 \pm 0.6	6.2 \pm 0.6	6.2 \pm 0.6	6.2 \pm 0.6
170	4.6 \pm 0.5	4.5 \pm 0.5	4.6 \pm 0.5	4.6 \pm 0.5
180	3.6 \pm 0.4	3.6 \pm 0.4	3.6 \pm 0.4	3.6 \pm 0.4
190	2.90 \pm 0.29	2.80 \pm 0.28	2.90 \pm 0.29	2.87 \pm 0.29
200	2.30 \pm 0.23	2.30 \pm 0.23	2.30 \pm 0.23	2.30 \pm 0.23
210	1.90 \pm 0.19	1.90 \pm 0.19	1.90 \pm 0.19	1.90 \pm 0.19
220	1.60 \pm 0.16	1.60 \pm 0.16	1.70 \pm 0.17	1.63 \pm 0.16
230	1.40 \pm 0.14	1.40 \pm 0.14	1.40 \pm 0.14	1.40 \pm 0.14
240	1.20 \pm 0.12	1.20 \pm 0.12	1.20 \pm 0.12	1.20 \pm 0.12
250	1.10 \pm 0.11	1.10 \pm 0.11	1.10 \pm 0.11	1.10 \pm 0.11
260	0.93 \pm 0.09	0.94 \pm 0.09	0.95 \pm 0.10	0.94 \pm 0.09
270	0.84 \pm 0.08	0.86 \pm 0.09	0.86 \pm 0.09	0.85 \pm 0.09
280	0.76 \pm 0.08	0.77 \pm 0.08	0.77 \pm 0.08	0.77 \pm 0.08
290	0.69 \pm 0.07	0.70 \pm 0.07	0.69 \pm 0.07	0.69 \pm 0.07
300	0.64 \pm 0.06	0.64 \pm 0.06	0.64 \pm 0.06	0.64 \pm 0.06

Tabelle 10.: Messreihen zur Evakuierungsmessung der Drehschieberpumpe (Bereich 300 s bis 600 s)

t [s]	p1 [mbar]	p2 [mbar]	p3 [mbar]	\bar{p} [mbar]
300	0.64 \pm 0.06	0.64 \pm 0.06	0.64 \pm 0.06	0.64 \pm 0.06
310	0.60 \pm 0.06	0.60 \pm 0.06	0.60 \pm 0.06	0.60 \pm 0.06
320	0.55 \pm 0.06	0.55 \pm 0.06	0.56 \pm 0.06	0.55 \pm 0.06
330	0.52 \pm 0.05	0.51 \pm 0.05	0.52 \pm 0.05	0.52 \pm 0.05
340	0.48 \pm 0.05	0.48 \pm 0.05	0.48 \pm 0.05	0.48 \pm 0.05
350	0.45 \pm 0.05	0.45 \pm 0.05	0.45 \pm 0.05	0.45 \pm 0.05
360	0.42 \pm 0.04	0.40 \pm 0.04	0.40 \pm 0.04	0.41 \pm 0.04
370	0.40 \pm 0.04	0.38 \pm 0.04	0.37 \pm 0.04	0.38 \pm 0.04
380	0.38 \pm 0.04	0.36 \pm 0.04	0.350 \pm 0.035	0.36 \pm 0.04
390	0.36 \pm 0.04	0.340 \pm 0.034	0.340 \pm 0.034	0.347 \pm 0.035
400	0.330 \pm 0.033	0.340 \pm 0.034	0.330 \pm 0.033	0.333 \pm 0.033
410	0.320 \pm 0.032	0.310 \pm 0.031	0.320 \pm 0.032	0.317 \pm 0.032
420	0.320 \pm 0.032	0.310 \pm 0.031	0.320 \pm 0.032	0.317 \pm 0.032
430	0.310 \pm 0.031	0.310 \pm 0.031	0.310 \pm 0.031	0.310 \pm 0.031
440	0.300 \pm 0.030	0.290 \pm 0.029	0.300 \pm 0.030	0.297 \pm 0.030
450	0.280 \pm 0.028	0.280 \pm 0.028	0.280 \pm 0.028	0.280 \pm 0.028
460	0.260 \pm 0.026	0.270 \pm 0.027	0.270 \pm 0.027	0.267 \pm 0.027
470	0.250 \pm 0.025	0.260 \pm 0.026	0.260 \pm 0.026	0.257 \pm 0.026
480	0.240 \pm 0.024	0.250 \pm 0.025	0.250 \pm 0.025	0.247 \pm 0.025
490	0.230 \pm 0.023	0.230 \pm 0.023	0.130 \pm 0.013	0.197 \pm 0.020
500	0.220 \pm 0.022	0.220 \pm 0.022	0.220 \pm 0.022	0.220 \pm 0.022
510	0.210 \pm 0.021	0.210 \pm 0.021	0.210 \pm 0.021	0.210 \pm 0.021
520	0.210 \pm 0.021	0.200 \pm 0.020	0.200 \pm 0.020	0.203 \pm 0.020
530	0.190 \pm 0.019	0.190 \pm 0.019	0.200 \pm 0.020	0.193 \pm 0.019
540	0.180 \pm 0.018	0.180 \pm 0.018	0.190 \pm 0.019	0.183 \pm 0.018
550	0.180 \pm 0.018	0.180 \pm 0.018	0.190 \pm 0.019	0.183 \pm 0.018
560	0.170 \pm 0.017	0.170 \pm 0.017	0.180 \pm 0.018	0.173 \pm 0.017
570	0.170 \pm 0.017	0.170 \pm 0.017	0.170 \pm 0.017	0.170 \pm 0.017
580	0.160 \pm 0.016	0.160 \pm 0.016	0.160 \pm 0.016	0.160 \pm 0.016
590	0.160 \pm 0.016	0.150 \pm 0.015	0.160 \pm 0.016	0.157 \pm 0.016
600	0.150 \pm 0.015	0.150 \pm 0.015	0.150 \pm 0.015	0.150 \pm 0.015

Tabelle 11.: Logarithmierte Messreihen zur Evakuierungsmessung der Drehschieberpumpe

t [s]	$\ln(\frac{p-p_E}{p_0-p_E})$	t [s]	$\ln(\frac{p-p_E}{p_0-p_E})$
0	0.000 \pm 0.005	310	-7.44 \pm 0.10
10	-0.428 \pm 0.007	320	-7.52 \pm 0.10
20	-0.725 \pm 0.008	330	-7.59 \pm 0.10
30	-1.027 \pm 0.011	340	-7.67 \pm 0.10
40	-1.321 \pm 0.014	350	-7.73 \pm 0.10
50	-1.616 \pm 0.019	360	-7.84 \pm 0.10
60	-1.931 \pm 0.025	370	-7.90 \pm 0.10
70	-2.246 \pm 0.034	380	-7.95 \pm 0.10
80	-2.55 \pm 0.05	390	-8.00 \pm 0.10
90	-2.87 \pm 0.06	400	-8.04 \pm 0.10
100	-3.19 \pm 0.09	410	-8.09 \pm 0.10
110	-3.86 \pm 0.17	420	-8.09 \pm 0.10
120	-4.17 \pm 0.23	430	-8.12 \pm 0.10
130	-4.15 \pm 0.23	440	-8.16 \pm 0.10
140	-4.45 \pm 0.31	450	-8.22 \pm 0.10
150	-4.77 \pm 0.10	460	-8.27 \pm 0.10
160	-5.08 \pm 0.10	470	-8.31 \pm 0.11
170	-5.39 \pm 0.10	480	-8.36 \pm 0.11
180	-5.63 \pm 0.10	490	-8.59 \pm 0.11
190	-5.86 \pm 0.10	500	-8.48 \pm 0.11
200	-6.08 \pm 0.10	510	-8.53 \pm 0.11
210	-6.27 \pm 0.10	520	-8.56 \pm 0.11
220	-6.42 \pm 0.10	530	-8.61 \pm 0.11
230	-6.58 \pm 0.10	540	-8.67 \pm 0.11
240	-6.73 \pm 0.10	550	-8.67 \pm 0.11
250	-6.82 \pm 0.10	560	-8.73 \pm 0.11
260	-6.98 \pm 0.10	570	-8.75 \pm 0.11
270	-7.08 \pm 0.10	580	-8.82 \pm 0.11
280	-7.19 \pm 0.10	590	-8.84 \pm 0.11
290	-7.29 \pm 0.10	600	-8.89 \pm 0.11
300	-7.37 \pm 0.10	-	-

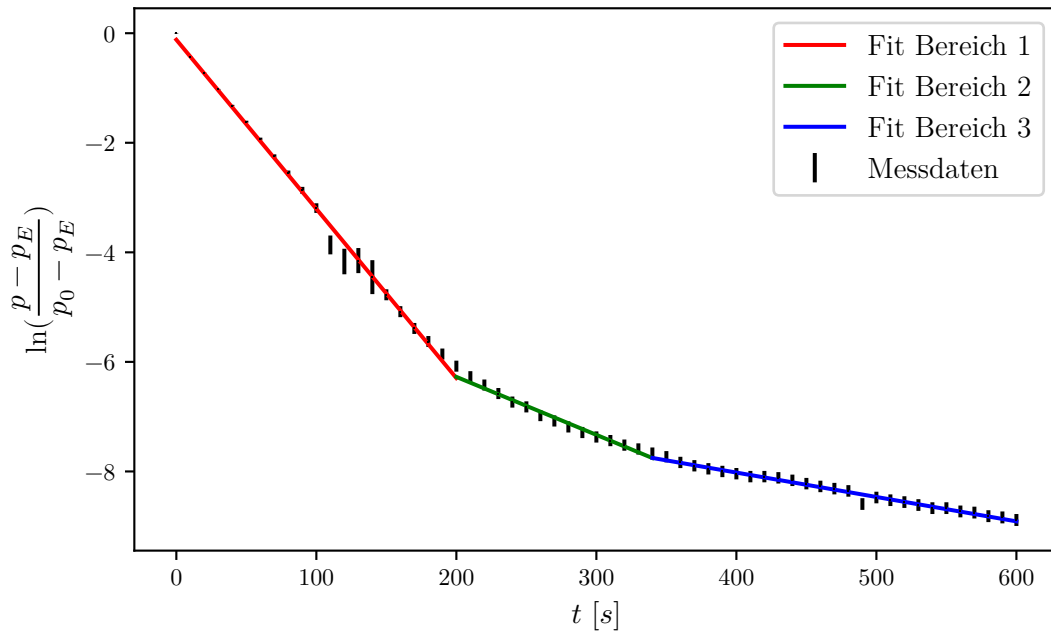


Abbildung 8.: Logarithmierte Werte mit Ausgleichsgeraden für 3 Druckbereiche zur Evakuierungsmessung der Drehschieberpumpe

Die Parameter der Ausgleichsrechnung und das jeweilige Saugvermögen sind in der folgenden Tabelle für die entsprechenden Druckbereiche aufgelistet.

Druckbereich	$m[1/s]$	n	$S[l/s]$
998 mbar bis 2,3 mbar	-0.0309 ± 0.00048	-0.1191 ± 0.00048	1.0500 ± 0.10624
2,3 mbar bis 0,52 mbar	-0.0106 ± 0.00043	-4.1571 ± 0.00043	0.3598 ± 0.03877
0,52 mbar bis 0,15 mbar	-0.0045 ± 0.00011	-6.2388 ± 0.00011	0.1514 ± 0.01563

Tabelle 12.: Parameter der Ausgleichsgeraden und Ergebnisse für das Saugvermögen für die Evakuierungsmessung zur Drehschieberpumpe

4.3.2. Leckratenmessungen

In diesem Abschnitt werden analog zum Vorgehen bei der Turbopumpe die Ergebnisse der Leckratenmessungen für die Drehschieberpumpe dargestellt. Die Messungen wurden bei den Gleichgewichtsdrücken $p_g = 0,5 \text{ mbar}$, $p_g = 9,7 \text{ mbar}$, $p_g = 50 \text{ mbar}$ und $p_g = 100 \text{ mbar}$ durchgeführt. Dazu werden die Messwerte jeweils graphisch mit Ausgleichsgerade dargestellt.

Tabelle 13.: Messreihen zur Leckratenmessung der Drehschieberpumpe mit $p_g = 0.5$ mbar

t [s]	p1 [mbar]	p2 [mbar]	p3 [mbar]	\bar{p} [mbar]
10	1.90 \pm 0.19	1.90 \pm 0.19	1.90 \pm 0.19	1.90 \pm 0.19
20	2.00 \pm 0.20	2.00 \pm 0.20	2.00 \pm 0.20	2.00 \pm 0.20
30	2.10 \pm 0.21	2.10 \pm 0.21	2.10 \pm 0.21	2.10 \pm 0.21
40	2.20 \pm 0.22	2.20 \pm 0.22	2.20 \pm 0.22	2.20 \pm 0.22
50	2.30 \pm 0.23	2.30 \pm 0.23	2.30 \pm 0.23	2.30 \pm 0.23
60	2.50 \pm 0.25	2.50 \pm 0.25	2.50 \pm 0.25	2.50 \pm 0.25
70	2.60 \pm 0.26	2.60 \pm 0.26	2.60 \pm 0.26	2.60 \pm 0.26
80	2.70 \pm 0.27	2.70 \pm 0.27	2.70 \pm 0.27	2.70 \pm 0.27
90	2.80 \pm 0.28	2.80 \pm 0.28	2.80 \pm 0.28	2.80 \pm 0.28
100	2.90 \pm 0.29	2.90 \pm 0.29	2.90 \pm 0.29	2.90 \pm 0.29
110	3.00 \pm 0.30	3.00 \pm 0.30	3.00 \pm 0.30	3.00 \pm 0.30
120	3.10 \pm 0.31	3.10 \pm 0.31	3.10 \pm 0.31	3.10 \pm 0.31
130	3.20 \pm 0.32	3.20 \pm 0.32	3.20 \pm 0.32	3.20 \pm 0.32
140	3.30 \pm 0.33	3.30 \pm 0.33	3.30 \pm 0.33	3.30 \pm 0.33
150	3.50 \pm 0.35	3.50 \pm 0.35	3.50 \pm 0.35	3.50 \pm 0.35
160	3.6 \pm 0.4	3.6 \pm 0.4	3.6 \pm 0.4	3.6 \pm 0.4
170	3.7 \pm 0.4	3.8 \pm 0.4	3.7 \pm 0.4	3.7 \pm 0.4
180	3.8 \pm 0.4	3.8 \pm 0.4	3.8 \pm 0.4	3.8 \pm 0.4
190	4.0 \pm 0.4	4.0 \pm 0.4	4.0 \pm 0.4	4.0 \pm 0.4
200	4.1 \pm 0.4	4.1 \pm 0.4	4.1 \pm 0.4	4.1 \pm 0.4

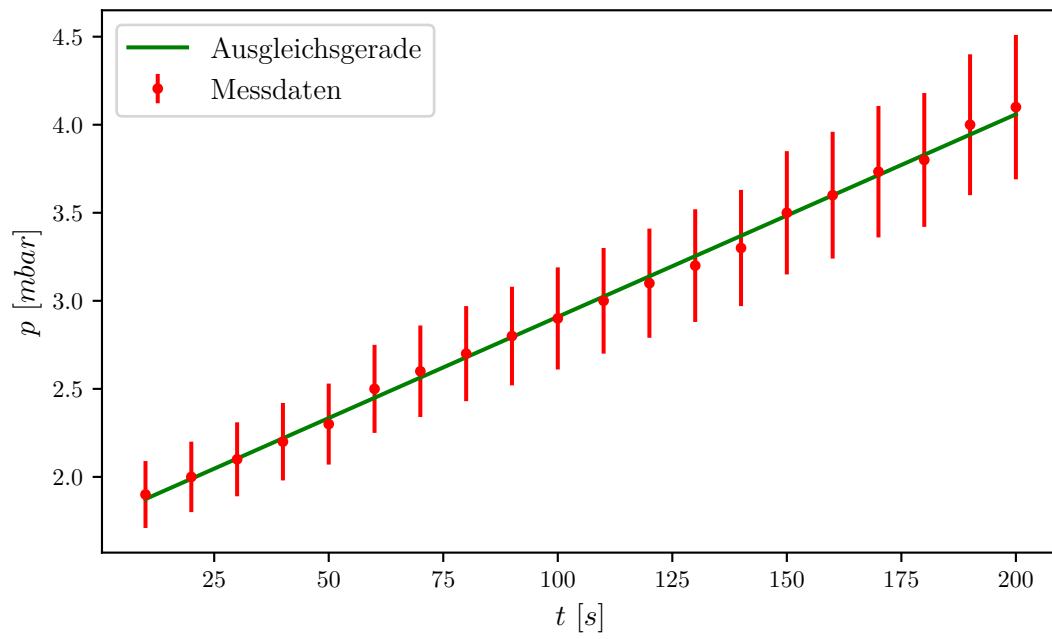


Abbildung 9.: Messwerte mit Ausgleichsgerade zur Leckratenmessung der Drehschieberpumpe bei $p_g = 0,5 \text{ mbar}$

Tabelle 14.: Messreihen zur Leckratenmessung der Drehschieberpumpe mit $p_g = 9.7$ mbar

t [s]	p1 [mbar]	p2 [mbar]	p3 [mbar]	\bar{p} [mbar]
10	19 \pm 4	19 \pm 4	19 \pm 4	19 \pm 4
20	23 \pm 4	22 \pm 4	22 \pm 4	22 \pm 4
30	26 \pm 4	26 \pm 4	26 \pm 4	26 \pm 4
40	30 \pm 4	29 \pm 4	29 \pm 4	29 \pm 4
50	33 \pm 4	33 \pm 4	33 \pm 4	33 \pm 4
60	37 \pm 4	37 \pm 4	36 \pm 4	37 \pm 4
70	40 \pm 4	40 \pm 4	40 \pm 4	40 \pm 4
80	44 \pm 4	44 \pm 4	44 \pm 4	44 \pm 4
90	47 \pm 4	47 \pm 4	47 \pm 4	47 \pm 4
100	51 \pm 4	51 \pm 4	51 \pm 4	51 \pm 4
110	54 \pm 4	54 \pm 4	54 \pm 4	54 \pm 4
120	58 \pm 4	58 \pm 4	58 \pm 4	58 \pm 4
130	61 \pm 4	61 \pm 4	62 \pm 4	61 \pm 4
140	65 \pm 4	65 \pm 4	65 \pm 4	65 \pm 4
150	68 \pm 4	68 \pm 4	68 \pm 4	68 \pm 4
160	72 \pm 4	72 \pm 4	72 \pm 4	72 \pm 4
170	75 \pm 4	75 \pm 4	75 \pm 4	75 \pm 4
180	79 \pm 4	79 \pm 4	79 \pm 4	79 \pm 4
190	82 \pm 4	82 \pm 4	82 \pm 4	82 \pm 4
200	86 \pm 4	86 \pm 4	86 \pm 4	86 \pm 4

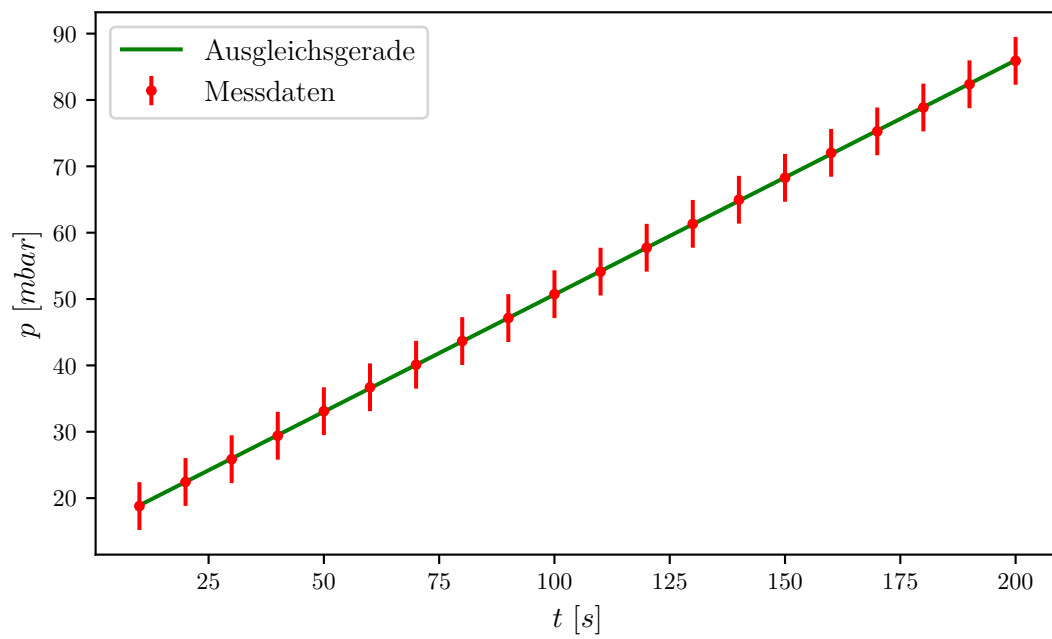


Abbildung 10.: Messwerte mit Ausgleichsgerade zur Leckratenmessung der Drehschieberpumpe bei $p_g = 9,7$ mbar

Tabelle 15.: Messreihen zur Leckratenmessung der Drehschieberpumpe mit $p_g = 50$ mbar

t [s]	p1 [mbar]	p2 [mbar]	p3 [mbar]	\bar{p} [mbar]
10	76 \pm 4	76 \pm 4	75 \pm 4	76 \pm 4
20	94 \pm 4	94 \pm 4	93 \pm 4	93 \pm 4
30	111 \pm 4	111 \pm 4	110 \pm 4	111 \pm 4
40	128 \pm 4	128 \pm 4	128 \pm 4	128 \pm 4
50	146 \pm 4	146 \pm 4	145 \pm 4	146 \pm 4
60	163 \pm 4	163 \pm 4	162 \pm 4	163 \pm 4
70	181 \pm 4	180 \pm 4	180 \pm 4	180 \pm 4
80	198 \pm 4	198 \pm 4	197 \pm 4	198 \pm 4
90	214 \pm 4	214 \pm 4	213 \pm 4	214 \pm 4
100	232 \pm 4	232 \pm 4	233 \pm 4	232 \pm 4
110	249 \pm 4	249 \pm 4	248 \pm 4	249 \pm 4
120	267 \pm 4	266 \pm 4	266 \pm 4	266 \pm 4
130	284 \pm 4	284 \pm 4	283 \pm 4	284 \pm 4
140	302 \pm 4	301 \pm 4	300 \pm 4	301 \pm 4
150	319 \pm 4	318 \pm 4	318 \pm 4	318 \pm 4
160	336 \pm 4	336 \pm 4	335 \pm 4	336 \pm 4
170	354 \pm 4	353 \pm 4	352 \pm 4	353 \pm 4
180	371 \pm 4	371 \pm 4	370 \pm 4	371 \pm 4
190	388 \pm 4	388 \pm 4	387 \pm 4	388 \pm 4
200	406 \pm 4	405 \pm 4	404 \pm 4	405 \pm 4

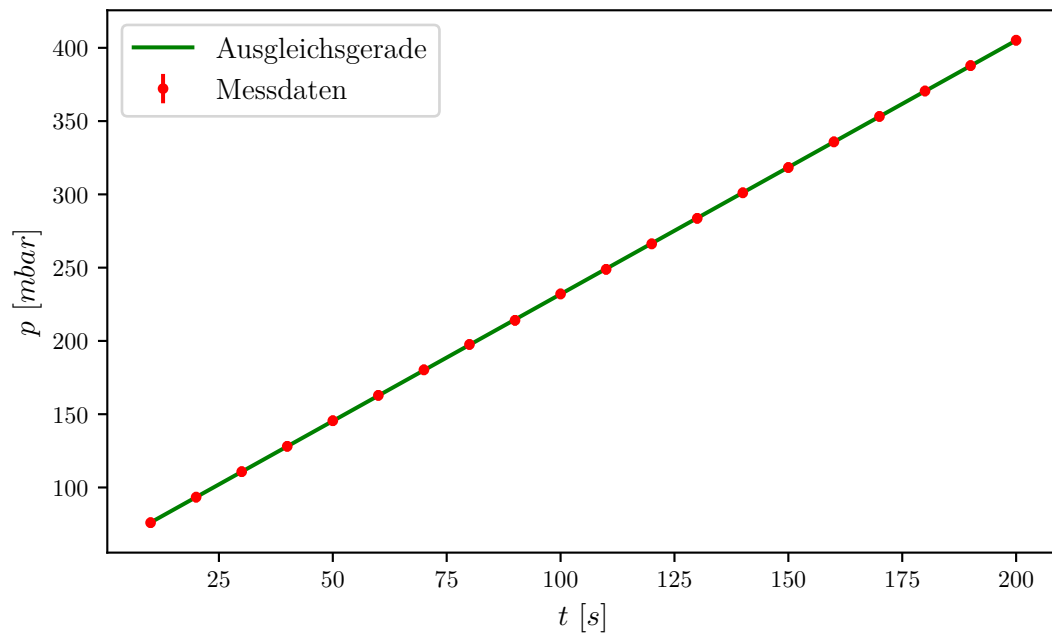


Abbildung 11.: Messwerte mit Ausgleichsgerade zur Leckratenmessung der Drehschieberpumpe bei $p_g = 50 \text{ mbar}$

Tabelle 16.: Messreihen zur Leckratenmessung der Drehschieberpumpe mit $p_g = 100$ mbar

t [s]	p1 [mbar]	p2 [mbar]	p3 [mbar]	\bar{p} [mbar]
10	145 \pm 4	144 \pm 4	145 \pm 4	145 \pm 4
20	179 \pm 4	178 \pm 4	179 \pm 4	179 \pm 4
30	211 \pm 4	214 \pm 4	211 \pm 4	212 \pm 4
40	248 \pm 4	248 \pm 4	248 \pm 4	248 \pm 4
50	279 \pm 4	281 \pm 4	278 \pm 4	279 \pm 4
60	312 \pm 4	315 \pm 4	312 \pm 4	313 \pm 4
70	346 \pm 4	349 \pm 4	346 \pm 4	347 \pm 4
80	383 \pm 4	382 \pm 4	383 \pm 4	383 \pm 4
90	413 \pm 4	416 \pm 4	416 \pm 4	415 \pm 4
100	446 \pm 4	449 \pm 4	446 \pm 4	447 \pm 4
110	482 \pm 4	482 \pm 4	479 \pm 4	481 \pm 4
120	515 \pm 4	514 \pm 4	512 \pm 4	514 \pm 4
130	544 \pm 4	546 \pm 4	544 \pm 4	545 \pm 4
140	576 \pm 4	578 \pm 4	575 \pm 4	576 \pm 4
150	610 \pm 4	609 \pm 4	606 \pm 4	608 \pm 4
160	640 \pm 4	639 \pm 4	636 \pm 4	638 \pm 4
170	666 \pm 4	668 \pm 4	666 \pm 4	667 \pm 4
180	698 \pm 4	697 \pm 4	695 \pm 4	697 \pm 4
190	723 \pm 4	722 \pm 4	725 \pm 4	723 \pm 4
200	750 \pm 4	751 \pm 4	749 \pm 4	750 \pm 4

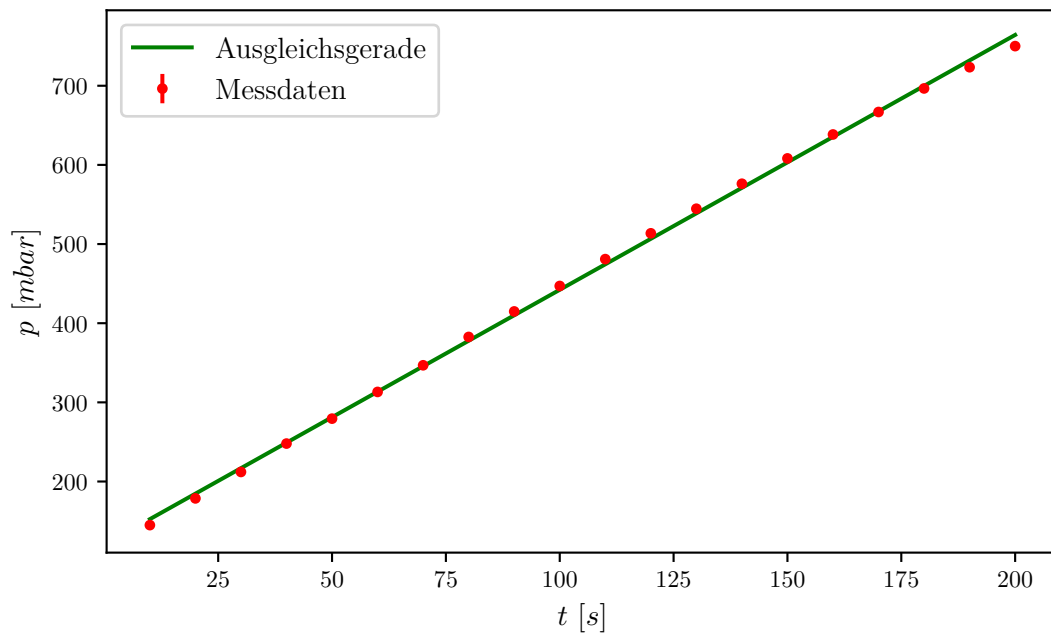


Abbildung 12.: Messwerte mit Ausgleichsgerade zur Leckratenmessung der Drehschieberpumpe bei $p_g = 100$ mbar

Auch für die Drehschieberpumpe lässt sich aus den Parametern der Ausgleichsgeraden die Saugleistung bestimmen:

p_g [mbar]	m [1/s]	n	S [l/s]
0,5 mbar	0.0115 ± 0.000138	1.759 ± 0.000138	0.782 ± 0.0788
9,7 mbar	0.353 ± 0.000372	15.374 ± 0.000372	1.237 ± 0.124
50 mbar	1.731 ± 0.000889	58.788 ± 0.000889	1.1773 ± 0.118
100 mbar	3.220 ± 0.0235	120.251 ± 0.0235	1.0947 ± 0.1010

Tabelle 17.: Parameter der Ausgleichsgeraden und Ergebnisse für das Saugvermögen zur Leckratenmessung der Drehschieberpumpe für unterschiedliche Gleichgewichtsdrücke

5. Diskussion

In der Auswertung dieses Versuches konnten also anhand der Evakuierungs- und Leckratenmessungen unterschiedliche Ergebnisse für das Saugvermögen in unterschiedlichen Druckbereichen für beide Pumpentypen bestimmt werden. Als Endergebnis werden diese in Abbildung 13 und Abbildung 14 zusammengefasst und mit dem vom Hersteller angegebenen Theoriewert verglichen.

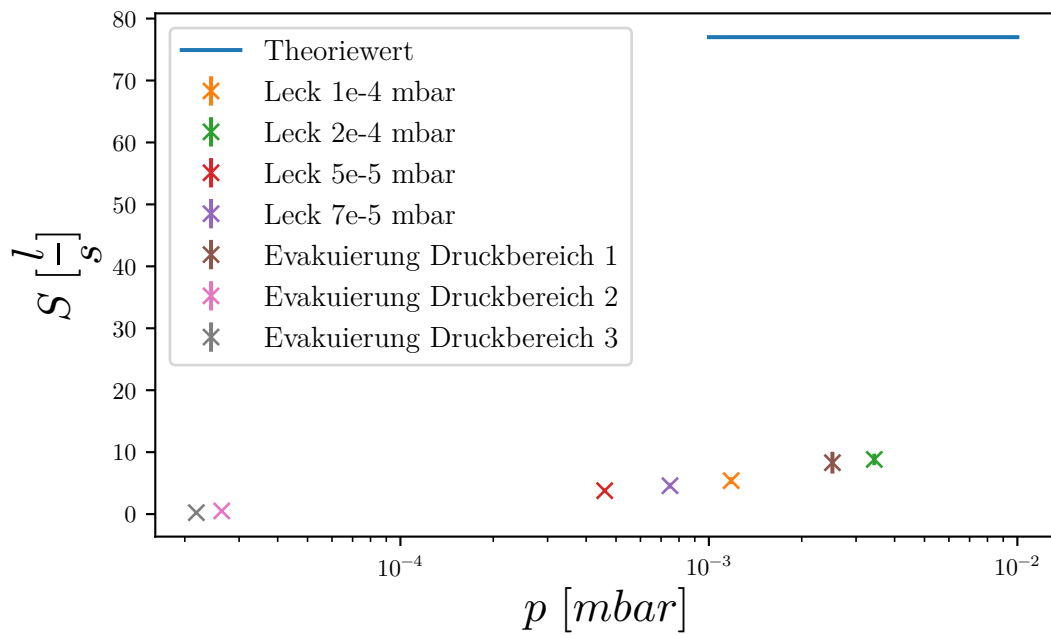


Abbildung 13.: Berechnetes Saugvermögen in Abhängigkeit des Drucks und Vergleich mit dem Theoriewert für die Turbopumpe

An Abbildung 13 ist zu sehen, dass die Ergebnisse für das Saugvermögen für die Turbopumpe stark von dem vom Hersteller angegebenen Theoriewert abweichen. Die hohe Abweichung ist teilweise dadurch zu erklären, dass die Messwerte in gewisser Entfernung von der Turbomolekularpumpe aufgenommen wurden, sodass der Leitwert die Saugleistung verringert. Dazu wurden allgemein die vom Hersteller angegebenen Idealbedingungen für die Nutzung der Pumpe nicht erreicht.

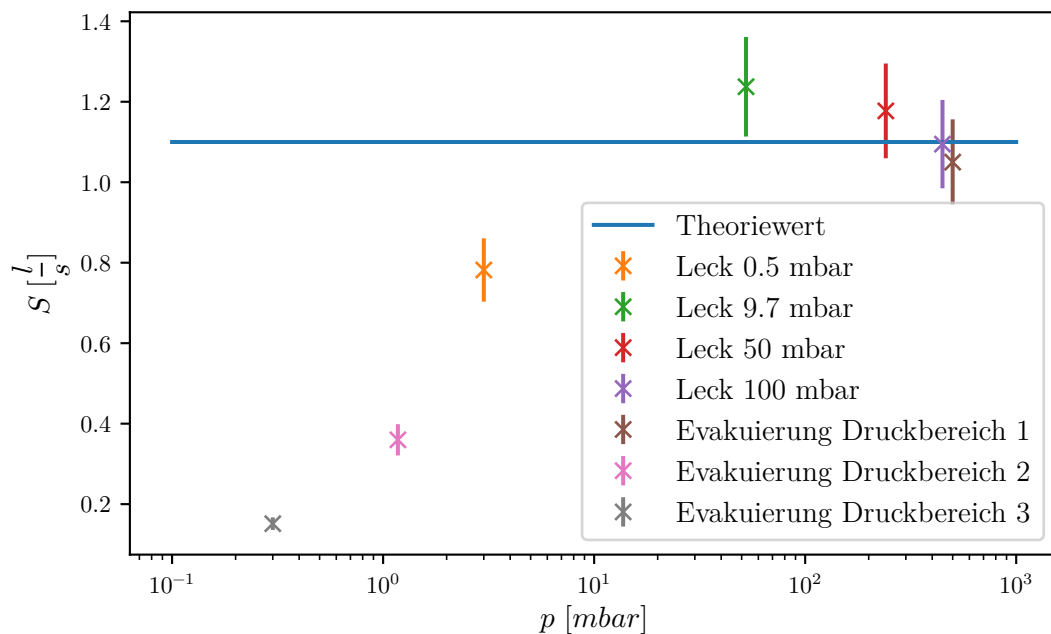


Abbildung 14.: Berechnetes Saugvermögen in Abhängigkeit des Drucks und Vergleich mit dem Theoriewert für die Drehschieberpumpe

Es ist zu sehen, dass das berechnete Saugvermögen für die Leckratenmessung bei $p_g = 100$ mbar mit $(1.09 \pm 0.11) \text{ l/s}$ sehr nah am Theoriewert von 1.1 l/s liegt. Andererseits ist eine große Abweichung bei den niedrigeren Druckwerten bei der Evakuierungsmessung zu erkennen. Insgesamt ist zu sehen, dass die Ergebnisse bei höheren Druckwerten deutlich näher am Theoriewert liegen.

Da Effekte wie die Verringerung der Saugleistung durch den Leitwert oder durch andere Einflüsse wie Desorption im Hochvakuum-Bereich eine größere Rolle spielen, kann es erklärt werden, dass die Ergebnisse für die Drehschieberpumpe generell näher an den Theoriewerten liegen als die Ergebnisse für die Turbomolekularpumpe.

Literatur

- [1] Wilhelm Walacher Max Wutz Hermann Adam. *Theorie und Praxis der Vakuumtechnik*. 1992.
- [2] Pfeiffer Vacuum. *The Vacuum technology book*. URL: <http://www.pfeiffer-vacuum.de/know-how/container.action> (besucht am 29.04.2022).
- [3] *Versuchsanleitung: V70 Vakuumversuch*. Fakultät Physik, TU Dortmund. 2022.

A. Anhang

DR 25.4.22

V20

P_E

Turbopumpe!

3x 720 s.

↳ Evakuierungskurve

$$P_E = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ hPa}$$

(\rightarrow)

$$2,2 \cdot 10^{-6} \text{ hPa}$$

mit PRK 360

$$5 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$$

$$\text{Startdruck } 7,7 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$$

<u>I:</u> t	P [hPa]	P [hPa]	P [hPa]
0	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$7,7 \cdot 10^{-3}$ $5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
5	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$
10	$7,3 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{-5}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$
15	$5,7 \cdot 10^{-5}$	$5,7 \cdot 10^{-5}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$
20	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$
30	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$3,20 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$
40	$2,77 \cdot 10^{-5}$	$2,84 \cdot 10^{-5}$	$2,85 \cdot 10^{-5}$
50	$2,59 \cdot 10^{-5}$	$2,64 \cdot 10^{-5}$	$2,64 \cdot 10^{-5}$
60	$2,45 \cdot 10^{-5}$	$2,48 \cdot 10^{-5}$	$2,57 \cdot 10^{-5}$
70	$2,358 \cdot 10^{-5}$	$2,38 \cdot 10^{-5}$	$2,39 \cdot 10^{-5}$
80	$2,27 \cdot 10^{-5}$	$2,29 \cdot 10^{-5}$	$2,30 \cdot 10^{-5}$
90	$2,27 \cdot 10^{-5}$	$2,22 \cdot 10^{-5}$	$2,23 \cdot 10^{-5}$
100	$2,76 \cdot 10^{-5}$	$2,76 \cdot 10^{-5}$	$2,77 \cdot 10^{-5}$
110	$2,77 \cdot 10^{-5}$	$2,72 \cdot 10^{-5}$	$2,73 \cdot 10^{-5}$
120	$2,09 \cdot 10^{-5}$	$2,09 \cdot 10^{-5}$	$2,70 \cdot 10^{-5}$

Leckrate:

Leckrate:

$$P_g = 5 \cdot 10^{-5}$$

0	7,36-4		
10	7,36-4	7,36-4	7,36-4
20	2,70-4	2,72-4	2,70-4
30	2,79-4	2,79-4	2,78-4
40	3,39-4	3,39-4	3,39-4
50	3,92-4	3,97-4	3,99-4
60	4,47-4	4,55-4	4,54-4
70	5,07-4	5,73-4	5,76-4
80	5,60-4	5,65-4	5,68-4
90	6,75-4	6,77-4	6,78-4
100	6,60-4	6,65-4	6,63-4
110	7,18-4	7,22-4	7,19-4
120	7,83-4	7,92-4	7,84-4

$$P_g = 7 \cdot 10^{-5} \text{ kPa, mbar}$$

$1,96 \cdot 10^{-4}$	$1,98 \cdot 10^{-4}$	$1,94 \cdot 10^{-4}$
$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	2,99
$3,98 \cdot 10^{-4}$	3,97	3,96
$4,9 \cdot 10^{-4}$	4,9	4,88
$5,75 \cdot 10^{-4}$	5,73	5,79
$6,55 \cdot 10^{-4}$	6,6	6,58
$7,45 \cdot 10^{-4}$	7,48	7,48
$8,42 \cdot 10^{-4}$	8,4	8,39
$9,56 \cdot 10^{-4}$	9,5	9,49
$1,09 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-3}$
$1,16 \cdot 10^{-3}$	$1,16 \cdot 10^{-3}$	1,15
$1,30 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	1,29

$$P_g = 1 \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$$

2,72 $\cdot 10^{-4}$	2,73	2,77
4,2 $\cdot 10^{-4}$	4,15	4,12
5,5	5,51	5,55
6,72	6,7	6,77
8,12	8,09	8,28
9,77	9,62	9,7
$1,11 \cdot 10^{-3}$	1,1	1,11
$1,31 \cdot 10^{-3}$	1,29	1,31
$1,5 \cdot 10^{-3}$	1,49	1,52
1,69	1,67	1,7
1,88	1,86	1,9
2,09	2,08	2,1

$$2 \cdot 10^{-4} = P_g$$

5,36 $\cdot 10^{-4}$	5,25	5,3
8,36	8,3	8,2
$1,19 \cdot 10^{-3}$	1,19	1,16
1,63	1,63	1,6
2,1	2,08	2,06
2,65	2,61	2,59
3,2	3,16	3,11
3,79	3,77	3,72
4,37	4,35	4,32
5,05	5,01	4,96
5,73	5,68	5,65
6,34	6,28	6,23

PSR 25.4.22

Drucküberpumpe mit Pfeife TP 202
 Evakuierungskurve
 t [min] p_0 (500 mbar) p_1 (500 mbar) p_2 (500 mbar)
 $p_E = 0,072$ bei $t = 30 \text{ min}$
 (998)
 (996)

0	998	0,70	652	0,60	650	0,60	70	79	79	79
10	652	0,64	466	0,55	487	0,56	70	2	2,0	2,0
20	487	0,60	482	0,57	367	0,52	70	21	2,7	2,7
30	362	0,55	353	0,48	269	0,48	40	22	2,2	2,2
40	262	0,52	268	0,45	198	0,45	50	23	2,3	2,3
50	200	0,48	197	0,42	165	0,43	60	25	2,5	2,5
60	145	0,45	144	0,40	106	0,40	70	26	2,6	2,6
70	106	0,42	105	0,38	78	0,37	80	27	2,7	2,7
80	78	0,40	77	0,36	57	0,35	90	28	2,8	2,8
90	57	0,38	56	0,34	47	0,34	100	29	2,9	2,9
100	47	0,36	47	0,37	30,0	0,32	110	30	3,0	3,0
110	30	0,33	29,8	0,37	27,7	0,37	120	3,7	3,7	3,7
120	27,7	0,32	27,6	0,27	16,0	0,30	130	3,2	3,2	3,2
130	16,0	0,37	15,8	0,28	14,4	0,28	140	3,3	3,3	3,3
140	14,4	0,30	14,5	0,27	12,7	0,27	150	3,5	3,5	3,5
150	12,7	0,28	12,5	0,26	11,4	0,26	160	3,6	3,6	3,6
160	11,4	0,26	11,2	0,25	10,5	0,25	170	3,7	3,7	3,7
170	10,5	0,25	10,4	0,24	9,6	0,24	180	3,8	3,8	3,8
180	9,6	0,24	9,5	0,23	8,6	0,23	190	4,0	4,0	4,0
190	8,6	0,23	8,5	0,22	7,7	0,22	200	4,7	4,7	4,7
200	7,7	0,22	7,5	0,21	7,2	0,21				
210	7,5	0,21	7,4	0,20	7,2	0,20				
220	7,4	0,21	7,4	0,19	7,4	0,20				
230	7,2	0,19	7,2	0,18	7,2	0,19				
240	7,2	0,18	7,2	0,17	7,1	0,17				
250	7,1	0,17	7,1	0,16	6,9	0,16				
260	6,9	0,16	6,9	0,15	6,8	0,15				
270	6,8	0,15	6,8	0,14	6,7	0,14				
280	6,7	0,14	6,7	0,13	6,6	0,13				
290	6,6	0,13	6,6	0,12	6,5	0,12				
300	6,5	0,12	6,5	0,11	6,4	0,11				

DSR 25.4.22

Ledrate: Drehschieberpumpe

$p_g = 3,7$ mBar

$p_g = 50$ mBar

$p_g = 100$ mBar

t [s]	p [mBar]								
10	18,9	18,7	18,8	76,2	76,3	75,4	145,2	144,4	145,1
20	22,8	22,7	22,3	93,7	93,7	92,8	178,9	178,2	178,9
30	26	25,7	25,9	111,2	111	110,2	211,2	213,9	211,1
40	29,5	29,3	29,4	128,5	128,3	127,5	248	247,5	248,3
50	33,2	33,2	32,9	145,9	145,8	144,9	278,6	281,2	278,5
60	36,8	36,8	36,5	163,2	163,1	162,3	312,3	314,9	312,3
70	40,1	40,2	40	180,7	180,5	179,6	346	348,6	345,9
80	43,6	43,8	43,6	198,1	198,8	196,9	382,9	382,2	382,8
90	47,2	47,2	47	214,5	214,3	213,4	412,9	415,5	416,2
100	50,7	50,8	50,7	231,9	231,7	232,6	446,2	448,8	446,1
110	54,2	54	54,2	249,3	249	248,3	482,3	481,6	479
120	57,7	57,9	57,6	266,8	266,4	265,5	515,0	514,1	511,6
130	61,3	61,1	61,6	284,2	283,8	283	544,0	546,2	543,7
140	65,2	64,9	64,8	301,6	301,2	300,4	575,5	577,8	575,3
150	68,3	68,2	68,3	318,9	318,4	317,7	609,6	608,8	606,2
160	72,2	72	71,9	336,4	336	335,1	639,8	639	639 636,5
170	75,4	75,1	75,3	353,7	353,4	352,5	666,4	668	666,1
180	79	78,8	78,8	371,1	370,7	369,8	697,9	697,1	694,8
190	82,4	82,2	82,5	388,5	387,9	387,2	722,8	722,1	725,3
200	86	85,8	85,9	405,8	405,3	404,5	749,6	751,4	749,2

DSR 25.4.22