

TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
DORTMUND

FORTGESCHRITTENPRAKTIKUM PHYSIK  
SOMMERSEMESTER  
2015

---

**V70**  
**Vakuumphysik**

**27.05.2015**

**1. ABGABE**

---

Leonard Wollenberg

leonard.wollenberg@tu-dortmund.de

Joshua Luckey

joshua.luckey@tu-dortmund.de

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>4</b>
2.1 Definition des Vakuums . . . . .	4
2.2 Herleitung der $p(t)$ -Kurve . . . . .	5
2.3 Pumpvorgang . . . . .	5
2.3.1 Viskose Strömungen . . . . .	5
2.3.2 Molekulare Strömungen . . . . .	6
2.3.3 Leitwert . . . . .	6
2.4 Pumpen . . . . .	7
2.4.1 Drehschieberpumpe . . . . .	7
2.4.2 Turbomolekularpumpe . . . . .	7
2.4.3 Virtuelle-Lecks . . . . .	7
2.5 Messgeräte . . . . .	8
2.5.1 Pirani-Vakuummeter . . . . .	8
2.5.2 Kaltkathoden-Vakuummeter . . . . .	8
2.5.3 Heißkathoden-Vakuummeter . . . . .	8
<b>3 Durchführung</b>	<b>9</b>
3.1 Saugvermögen . . . . .	9
3.1.1 Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe . . . . .	9
3.1.2 Leckratenmessung für die Drehschieberpumpe . . . . .	10
3.1.3 Evakuierungskurve der Turbopumpe . . . . .	10
3.1.4 Leckratenmessung der Turbopumpe . . . . .	10
3.2 Bestimmung des Volumens $V_0$ . . . . .	10

<b>4 Fehlerrechnung</b>	<b>11</b>
<b>5 Auswertung</b>	<b>12</b>
5.1 Volumenbestimmung des Rezipienten . . . . .	12
5.2 Drehschieberpumpe . . . . .	13
5.2.1 Evakuierungskurve . . . . .	13
5.2.2 Leckratenmessung . . . . .	17
5.2.3 Saugvermögen . . . . .	20
5.3 Turbopumpe . . . . .	21
5.3.1 Evakuierungskurve . . . . .	21
5.3.2 Leckratenmessung . . . . .	25
5.3.3 Saugvermögen . . . . .	29
<b>6 Diskussion</b>	<b>31</b>

# 1 Einleitung

In diesem Versuch wird der Begriff des Vakuums erläutert und die Funktionsweisen von verschiedenen Pumpen, mit denen ein Vakuum erzeugt werden kann. Die Vakuumphysik hat viele Anwendungen in der Industrie und Forschung. Zum Beispiel beim Bau von Mikrochips, Schmelzen von Metallen um das Oxidieren zu vermeiden oder bei Teilchenbeschleunigern.

# 2 Theorie

## 2.1 Definition des Vakuums

Ein Vakuum wird allgemein definiert, als Abwesenheit von Materie. Um die Größe eines Vakuums zu messen, wird der Druck verwendet. Umso geringer der Druck umso besser das Vakuum.

Ein Vakuum beginnt bei 300 mbar, dass wird Grobvakuum genannt.

In einem Druckbereich von 1 mbar bis zu  $10^{-3}$  mbar, liegt ein Feinvakuum vor.

Das Hochvakuum beginnt bei  $10^{-3}$  mbar und reicht bis zu  $10^{-7}$  mbar. Alle Drücke die darunter liegen, beschreiben ein Ultrahochvakuum.

Eine weitere Größe, die behilflich bei dem Verständnis eines Vakuums ist, ist die mittlere freie Weglänge

$$\Lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi D^2 n}, \quad (1)$$

dabei ist  $n$  die Teilchenzahldichte und  $D$  der Durchmesser der Gasmoleküle. Mithilfe der Teilchenzahldichte

$$n = \frac{N}{V} \quad (2)$$

und der idealen Gasgleichung

$$p \cdot V = Nk_B T \quad (3)$$

für einen Druck  $p$ , ein Volumen  $V$ , einer Teilchenzahl  $N$  und einer Temperatur  $T$ , wobei  $k_B$  die Boltzmann-Konstante ist. Kann die mittlere freie Weglänge als

$$\Lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2}\pi D^2 p} \quad (4)$$

Diese Größe beschreibt die durchschnittliche Strecke die ein Molekül zurücklegt, bis es mit einem anderen zusammen stößt. Bei geringer werdendem Druck, wächst die mittlere

freie Weglänge.

## 2.2 Herleitung der $p(t)$ -Kurve

Unter Annahme der idealen Gasgleichung (3) kann eine Näherung für den Zeitlichen Druckverlauf gemacht werden, für einer konstante Temperatur. Durch ableiten nach der Zeit wird die Gleichung zu

$$\frac{d(p \cdot V)}{dt} = p \frac{dV}{dt} + V \frac{dp}{dt} = 0 \quad (5)$$

Durch umstellen, Integration und Einführung des Saugvermögens

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

, wird die Gleichung zu

$$p(t) = p_0 \exp\left(-\frac{S}{V_0}t\right). \quad (7)$$

Da der Druck allerdings gegen einen Enddruck  $p_E$  läuft, wird folgende Lösung verwendet

$$p(t) = (p_0 - p_E) \exp\left(-\frac{S}{V_0}t\right) + p_E. \quad (8)$$

Hier raus folgt dann die Form für das Saugvermögen als

$$S = -V_0 \frac{d}{dt} \ln\left(\frac{p - p_E}{p_0 - p_E}\right). \quad (9)$$

## 2.3 Pumpvorgang

Ein Gefäß, in dem ein Vakuum erzeugt werden soll, wird Rezipient genannt. Das Gas was abgepumpt wird, strömt in Form von viskose Strömungen aus dem Rezipient, wenn der Druck dem Grobvakuum zugehörig ist. Bei einem Hochvakuum oder Ultrahochvakuum geschieht dies über molekulare Strömungen.

### 2.3.1 Viskose Strömungen

Bei viskose Strömungen überwiegen die Stöße unter den Moleküle gegenüber den Stößen der Moleküle mit der Außenwand des Rezipienten.

$$\Lambda \ll 2r \quad (10)$$

Das heißt die mittlere freie Weglänge ist viel kleiner als der Durchmesser des Rezipienten oder der Rohre. Weiter bedeutet es, dass die Strömung als kontinuierlich betrachtet werden kann, sie wird mithilfe von laminaren oder turbulenten Strömungen beschrieben.

### 2.3.2 Molekulare Strömungen

Bei molekularen Strömungen, überwiegen die Stöße mit der Wand und den Molekülen, weil sich kaum noch Moleküle im Rezipienten befinden. Bei einem Stoß mit der Wand, werden die Moleküle nicht reflektiert, sondern haften an der Wand und lösen sich nach geringer Zeit wieder. Das Haften an der Wand wird als Adsorption bezeichnet und das Verlassen Desorption. Bei der Desorption, werden die Moleküle statistisch verteilt ausgelöst. Die Strömung entsteht dadurch, dass die Teilchen im Durchschnitt sich in eine Richtung bewegen.

### 2.3.3 Leitwert

Der Leitwert  $L$  der als der Kehrwert des Strömungswiderstand  $W$  definiert ist, wird berechnet durch

$$L = \frac{1}{W} = \frac{q_{pV}}{\Delta p} \quad (11)$$

Dabei ist  $q_{pV}$  der Strom des Volumens und  $\Delta p$  die Druckdifferenz an den Bauteilenden. Für in Reihe verbaute Bauteile gilt, dass der inverse gesamte Leitwert  $L_{\text{ges}}$  sich aus der Summe der Kehrwerte der Leitwerte berechnet.

$$\frac{1}{L_{\text{ges}}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_N} \quad (12)$$

Dies kann dazu verwendet werden, um das vorhanden sein eines Lecks zu beschreiben. Ist in einem Vakuumsystem ein Leck, dann kann der effiziente Leitwert beschrieben werden, durch

$$L_{\text{eff}} = \left( \frac{1}{L} + \frac{1}{S} \right)^{-1} \quad (13)$$

dabei ist  $L$  der Leitwert der Pumpe und  $S$  das Saugvermögen des Lecks. Das Saugvermögen des Lecks bei einem Ausgleichdruck  $p_g$  kann durch

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

bestimmt werden. Dabei ist  $Q$  die Leckrate, die mithilfe von

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

bestimmt werden kann.

## 2.4 Pumpen

Ein Vakuum in einem Rezipienten, wird mithilfe von Pumpen verwirklicht. Je nach gewünschtem Vakuum werden unterschiedliche Pumpen benötigt. Für Grob- oder Feinvakuuen wird zum Beispiel eine Drehschieberpumpe verwendet und für Hochvakuuen werden Turbomolekularpumpen verwendet.

### 2.4.1 Drehschieberpumpe

Die Drehschieberpumpe besteht aus einem Hohlzylinder, mit einem Zulauf und einem Ablauf. Ein Roter befindet sich exzentrisch im inneren des Zylinders, an dem mehrere Schieber befestigt sind, die mithilfe von Federn, an die außen Wand gedrückt werden und dadurch das innere in mehrere Volumina aufteilen. Durch den Rotor verändern sich die Volumina. Bei dem Zulauf wird das Volumen größer wodurch es dem Rezipienten Gas entzieht. Das Volumen wird dann vom Zulauf getrennt und überschreitet das Maximum. Das Volumen verringert sich und wird dem Ablauf zugefügt und das Gas wird somit aus der Pumpe her raus geführt.

### 2.4.2 Turbomolekularpumpe

Die Turbomolekularpumpe oder auch Turbopumpe, nutzt den Effekt der Adsorption aus. Wenn das Gas an einer Oberfläche haftet und sich diese bewegt, dann hat das Molekül bei der Desorption eine bevorzugte Austrittsrichtung. Dabei besitzt eine Turbomolekularpumpe eine Reihe von Rotoren und Statorschaufeln, um diesen Effekt zu verbessern. Die Geschwindigkeit der Rotoren muss dazu so groß sein wie die Geschwindigkeit der Gasmolküle, sowie muss eine Molekulare Strömung vorliegen damit die Moleküle den Impuls behalten.

### 2.4.3 Virtuelle-Lecks

Ab einem bestimmten Druck fangen Gasteilchen an, aus der Oberfläche des Aufbaus aus zu treten. Dadurch ändert sich der Druck nicht mehr. Dabei handelt es sich um virtuelle Lecks. Anders herum kann die Oberfläche beim Belüften des Rezipienten als Pumpe agieren und das einströmende Gas auf den Oberflächen ablagern.

## 2.5 Messgeräte

Der Druck wird mit verschiedenen Messgeräten gemessen, weil die unterschiedlichen Vakuuen anders vermessen werden müssen.

### 2.5.1 Pirani-Vakuummeter

Mithilfe der Wärmeleitfähigkeit von Gasen, kann der Druck bestimmt werden. Ein Draht innerhalb eines Hohlzylinders, wird auf eine Konstante Temperatur erhitzt. Das Gas ermöglicht einen Wärmestrom vom Draht zur Hülle. Der Wärmestrom ist Proportional zum Druck und wenn die Temperatur des Drahtes konstant ist, ist die Heizleistung Druckabhängig. Die Heizleistung und der Druck haben einen exponentiellen Zusammenhang, was in eine logarithmische Skala resultiert.

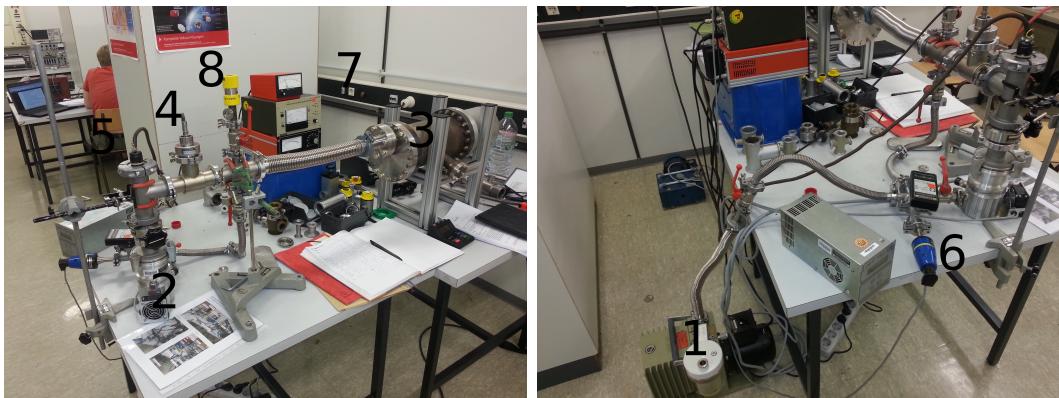
### 2.5.2 Kaltkathoden-Vakuummeter

Wenn zwischen einer Anode und einer Kathode eine hoch Spannung anliegt, werden Elektronen von der Anode ausgelöst und fliegen durch das Gas zur Kathode. Die Gasteilchen werden dadurch ionisiert und es tritt Gasentladung auf. Den Strom der durch die Gasentladung gemessen wird ist Druckabhängig. Damit möglichst viele Gasteilchen ionisiert werden, ist die Kathode Spiralförmig um die Anode aufgebaut. Das resultierende Magnetfeld sorgt dafür dass die Elektronen Spiralförmig zur Anode fliegen und der Weg durchs Gas sich erhöht. Dieses Messgerät besitzt ebenfalls eine logarithmische Skala.

### 2.5.3 Heißkathoden-Vakuummeter

Bei diesem Messgerät werden die Elektronen aus der Kathode gelöst, indem sie erhitzt wird. Mithilfe einer Spannung werden die Elektronen in Richtung der Anode beschleunigt. Die Anode befindet sich als Spule um eine weitere Kathode die negativer Geladen ist als die Heizkathode. Dies Sorgt dafür, dass die geladenen Gasteilchen zu dieser Kathode fliegen. Der Strom der an der Sammelkathode gemessen wird, ist druckabhängig. Dieses Messgerät besitzt eine lineare Skala.

### 3 Durchführung



**Abbildung 1:** Der Verwendete Aufbau aus zwei verschiedenen Winkeln.

Es werden so wohl eine Drehschieberpumpe (1) als auch eine Turbopumpe (2) mithilfe von Rohren und Ventilen an den Rezipienten (3) angeschlossen, wie in Abbildung 1 zu sehen. Es befinden sich je ein Kaltkathoden- (4), Heißkathoden- (5) und Pirani-Vakuummeter (6) im Aufbau und die dazugehörigen Anzeigen (7), dabei wurde das Digitale Messgerät zwar verbaut aber nicht für die Messung verwendet. Weiter befinden sich mehrere Ventile im Aufbau, um zum einem die Pumpen aus zu koppeln und zum anderen verschiedene Bereiche vom Rezipienten zu trennen. Im Aufbau ist noch ein Belüftungsventil (8), mit dem das Volumen mit Luft gefüllt werden kann, an diesem kann ein Maß für ein Leck eingestellt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass mithilfe von Abdichtringen und Spannringen alle Verbindungen abgedichtet sind. Vor der Messung wird einmal mithilfe der Drehschieberpumpe das Innere des Aufbaus aus gepumpt über eine legere Zeit, damit Wasserablagerungen entfernt werden. Bei einem Druck unter  $10^{-1}$  mbar, kann die Turbopumpe ebenfalls angeschaltet werden. Dabei kann gleichzeitig überprüft werden ob der Aufbau dicht ist.

#### 3.1 Saugvermögen

Das Saugvermögen wird für beide Pumpen auf zwei Methoden bestimmt, einmal mithilfe der Evakuierungskurve und der Leckratenmessung.

##### 3.1.1 Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe

Zu Bestimmung der Evakuierungskurve, wird während die Pumpe angeschaltet ist der Rezipient belüftet. Nachdem das Belüftungsventil geschlossen wurde kann die Zeit in Abhängigkeit des Drucks bestimmt werden. Weil das Vakuum ein Grobvakuum ist, wird hier mit dem Pirani-Vakuummeter gearbeitet.

### 3.1.2 Leckratenmessung für die Drehschieberpumpe

Zunächst wird ein Leck am Belüftungsventil eingestellt, dann wird mithilfe der Drehschieberpumpe bis zum Ausgleichsdruck der Aufbau ausgepumpt. Nach dem schließen des Ventils vor der Pumpe, kann der Druckanstieg gegen die Zeit gemessen werden.

### 3.1.3 Evakuierungskurve der Turbopumpe

Die Messung für die Turbopumpe funktioniert wie bei der Drehschieberpumpe, allerdings muss zuerst ein Hochvakuum erzeugt werden. Dazu wird mithilfe der Drehschieberpumpe ein Vakuum von  $10^{-1}$  mbar hergestellt, ab hier wird das Kaltkathoden-Vakuummeter verwendet und die Turbopumpe angestellt. Der Druck wird auf unter  $5 \cdot 10^{-3}$  mbar abgepumpt. Ab hier kann das Heißkathoden-Vakuummeter verwendet werden. Mit dem Belüftungsventil kann ein Ausgleichsdruck in Größenordnung von  $10^{-3}$  mbar eingestellt werden, in dem ein kleines Leck eingestellt wird. Durch schließen des Belüftungsventils, kann der Druckabfall gegen die Zeit gemessen werden.

### 3.1.4 Leckratenmessung der Turbopumpe

Die Leckratenmessung läuft Analog, zur der Messung bei der Drehschieber Pumpe. Nach dem Einstellen eines Ausgleichsdrucks, mit einem kleinen Leck wird das Ventil vor der Turbopumpe geschlossen und es wird der Druckanstieg mit der Zeit gemessen.

## 3.2 Bestimmung des Volumens $V_0$

Nach dem die Messreihen beendet wurden, muss das gesamt innen Volumen des Aufbaues bestimmt werden. Dazu wird jedes Bauteil einzeln vermessen.

## 4 Fehlerrechnung

Im folgenden Abschnitt werden die, für die Auswertung der aufgenommenen Daten verwendeten Gleichungen aufgezeigt und erläutert.

Der Mittelwert aus mehreren Ergebnissen einer Messung wurde mit Hilfe von

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i \quad (16)$$

berechnet. Für die Berechnung der statistischen Abweichung wurde die folgende Gleichung verwendet:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}. \quad (17)$$

Für die Fehlerfortpflanzung der Messunsicherheiten wurde die gaußsche Fehlerfortpflanzung verwendet. Damit berechnet sich der Fehler  $\sigma_y$  einer Größe  $y = y(\vec{x})$ , mit den Messgrößen  $\dim \vec{x} = n$ , wie folgt:

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=0}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2}. \quad (18)$$

Die relative Abweichung eines Messergebnisses  $x$  vom gegebenen Theoriewert  $x_{\text{theo}}$  wird mit folgender Gleichung berechnet:

$$\Delta_{\text{rel}} x = \frac{|x - x_{\text{theo}}|}{x_{\text{theo}}}. \quad (19)$$

Die in der Auswertung angefertigten Regressionskurven wurden mit Hilfe der *Python*-Bibliothek *scipy* [1] durchgeführt.

## 5 Auswertung

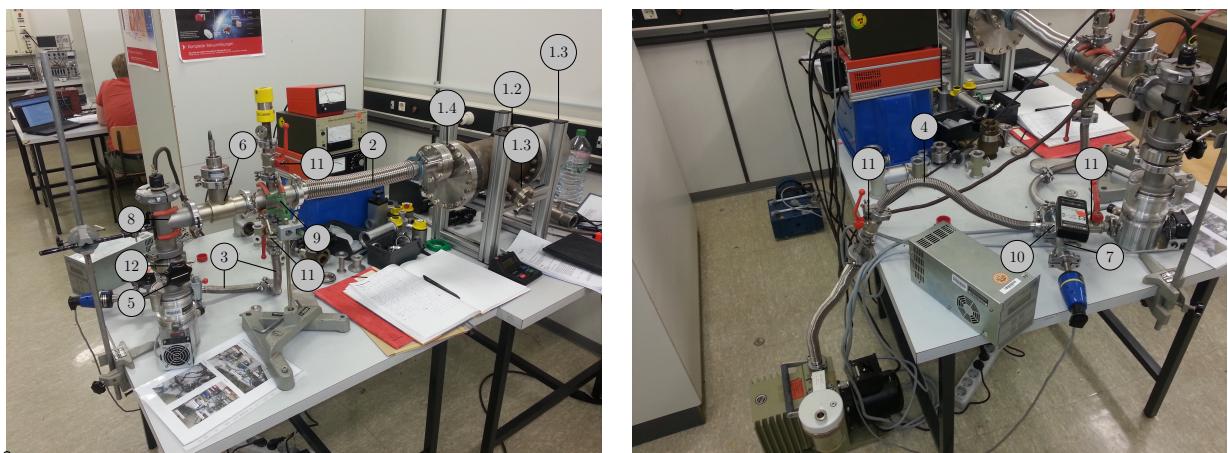
### 5.1 Volumenbestimmung des Rezipienten

Für die Volumenbestimmung des Rezipienten während der durchgeführten Messreihen wurden die in Tabelle 1 aufgelisteten Maße für die verwendeten Bauteile aufgenommen. Für die Berechnung der jeweiligen Volumina wurde die Zylindersymmetrie der Bauteile angenommen. Die Volumina der verwendeten Messinstrumente wurde vernachlässigt, da diese im Vergleich zu den restlichen Bauteilen sehr klein waren. Die angegebenen Messfehler wurden abhängig von dem verwendeten Messgerät (Schieblehre oder Zentimetermaß) und den jeweiligen Formen des Bauteils bestimmt. In Abb. 2 ist ein Foto des Aufbaus mit den nummerierten Bauteilen dargestellt.

Bauteil Nummer	Durchmesser (groß) $d_g/\text{mm}$	Durchmesser (klein) $d_k/\text{mm}$	Länge (groß) $l_g/\text{mm}$	Länge (klein) $l_k/\text{mm}$	Volumen (offen) $V/\text{cm}^3$	Volumen (geschlossen) $V/\text{cm}^3$
1	-	-	-	-	$8900 \pm 600$	-
1.1	$38,5 \pm 0,1$	-	$130 \pm 5$	-	$151 \pm 6$	-
1.2	$151 \pm 5$	-	$480 \pm 10$	-	$8600 \pm 600$	-
1.3	$26 \pm 1$	-	$75 \pm 5$	-	$39 \pm 4$	-
1.4	$34 \pm 2$	-	$75 \pm 5$	-	$69 \pm 9$	-
2	$38 \pm 5$	-	$400 \pm 5$	-	$453 \pm 120$	-
3	$15 \pm 2$	-	$240 \pm 5$	-	$42 \pm 11$	-
4	$15 \pm 2$	-	$440 \pm 5$	-	$77 \pm 21$	-
5	$40 \pm 1$	-	$52 \pm 5$	-	$65 \pm 7$	-
6	$40 \pm 1$	-	$129 \pm 5$	$46 \pm 1$	$219 \pm 13$	-
7	$11,0 \pm 0,1$	-	$80 \pm 5$	$36 \pm 5$	$11,0 \pm 0,7$	-
8	$40 \pm 1$	-	$110 \pm 20$	$60 \pm 10$	$213 \pm 30$	-
9	$39,5 \pm 0,1$	$16,0 \pm 0,1$	$130 \pm 5$	$40 \pm 5$	$175 \pm 7$	-
10	$11,0 \pm 0,1$	$11,0 \pm 0,1$	$80 \pm 5$	$70 \pm 5$	$20 \pm 1$	-
11	$15 \pm 1$	-	$77 \pm 5$	-	$13 \pm 2$	$6 \pm 1$
12	$40 \pm 1$	-	$33 \pm 5$	-	$41 \pm 7$	$21 \pm 3$

**Tabelle 1:** Geometrische Abmessungen aller verwendeten Bauteile und die aus diesen berechneten Volumina. Die Nummerierung entspricht der in Abb. 2 .

Aus der Addition der Volumina der jeweilig verwendeten Bauteile ergeben sich die Ge-



**Abbildung 2:** Versuchsaufbau mit Nummerierung der Bauteile in Tabelle 1

samtvolumina des Rezipienten für die durch geführten Messungen zu:

$$V_{\text{dreh, evak}} = V_{\text{dreh, leck}} = (10,2 \pm 0,7) \text{ l} \quad (20)$$

$$V_{\text{turbo, evak}} = V_{\text{turbo, leck}} = (10,0 \pm 0,7) \text{ l} \quad (21)$$

## 5.2 Drehschieberpumpe

In den Folgenden Abschnitten werden die, unter Verwendung der Drehschieberpumpe, aufgenommenen Messreihen zur Evakuierungskurve und der Leckratenmessung ausgewertet. Mit den Ergebnissen aus diesen, folgt im letzten Teil dieses Abschnitts die Betrachtung des Saugvermögens in Abhängigkeit des Druckes.

### 5.2.1 Evakuierungskurve

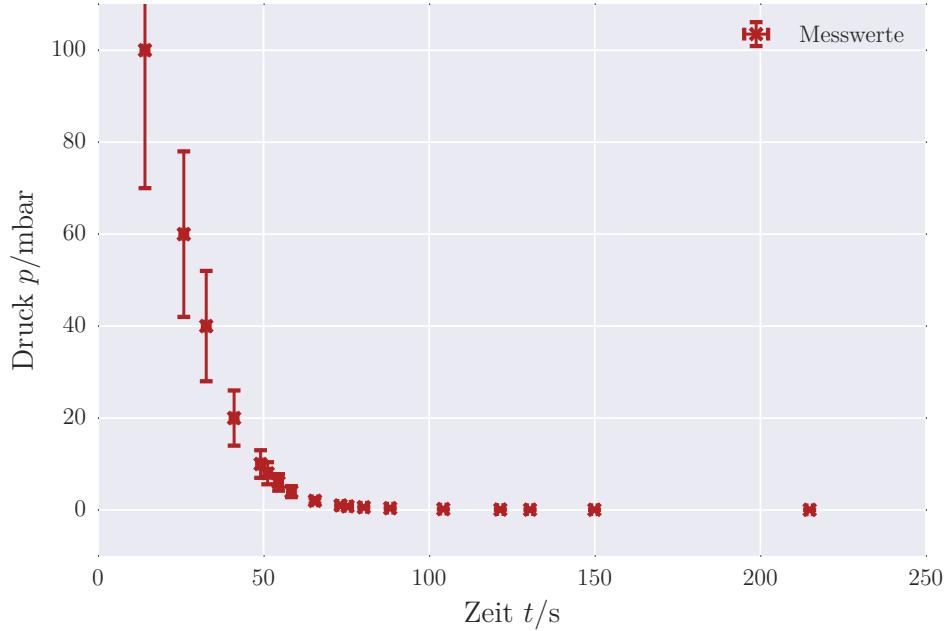
Die zur Bestimmung der Evakuierungskurve aufgenommenen Messwerte für den Druck im Rezipienten sind in Tabelle 2 auch als logarithmierte Werte zu finden. Für die Logarithmierung wurden der Maximaldruck  $p_0 = (100 \pm 30) \text{ mbar}$  und der in dieser Messreihe festgestellte Enddruck  $p_e = (20 \pm 6) \mu\text{bar}$  verwendet. Der Messfehler der Druckwerte wurde aufgrund der Herstellerangabe [2] mit 30 % angenommen. Neben den Messwerten für den Druck sind auch die, über die fünf Messungen, gemittelten Messwerte der Zeit angegeben. Der Messfehler der Zeit ist dabei für jeder der fünf Messungen mit  $\sigma_t = 1 \text{ s}$  als systematischer Fehler angenommen, sodass sich dieser durch die Mittlung nicht verringert.

Druck p/mbar	logarithm. $\frac{p-p_e}{p_0-p_e}$	Druck p/mbar	gemittelte Zeit $\bar{t}/\text{s}$	Druck p/mbar	logarithm. $\frac{p-p_e}{p_0-p_e}$	gemittelte Zeit $\bar{t}/\text{s}$
100 ± 30	0,0 ± 0,0	1,0 ± 0,3	14 ± 1	-4,6 ± 0,4	73 ± 1	
60 ± 18	-0,5 ± 0,4	0,8 ± 0,2	25 ± 1	-4,9 ± 0,4	75 ± 1	
40 ± 12	-0,9 ± 0,4	0,6 ± 0,2	32 ± 1	-5,1 ± 0,4	80 ± 1	
20 ± 6	-1,6 ± 0,4	0,4 ± 0,1	41 ± 1	-5,6 ± 0,4	88 ± 1	
10 ± 3	-2,3 ± 0,4	0,20 ± 0,06	49 ± 1	-6,3 ± 0,4	104 ± 1	
8 ± 2	-2,5 ± 0,4	0,10 ± 0,03	51 ± 1	-7,1 ± 0,5	121 ± 1	
6 ± 2	-2,8 ± 0,4	0,08 ± 0,02	54 ± 1	-7,4 ± 0,5	130 ± 1	
4 ± 1	-3,2 ± 0,4	0,06 ± 0,02	58 ± 1	-7,8 ± 0,6	149 ± 1	
2,0 ± 0,6	-3,9 ± 0,4	0,04 ± 0,01	65 ± 1	-8,5 ± 0,7	214 ± 1	

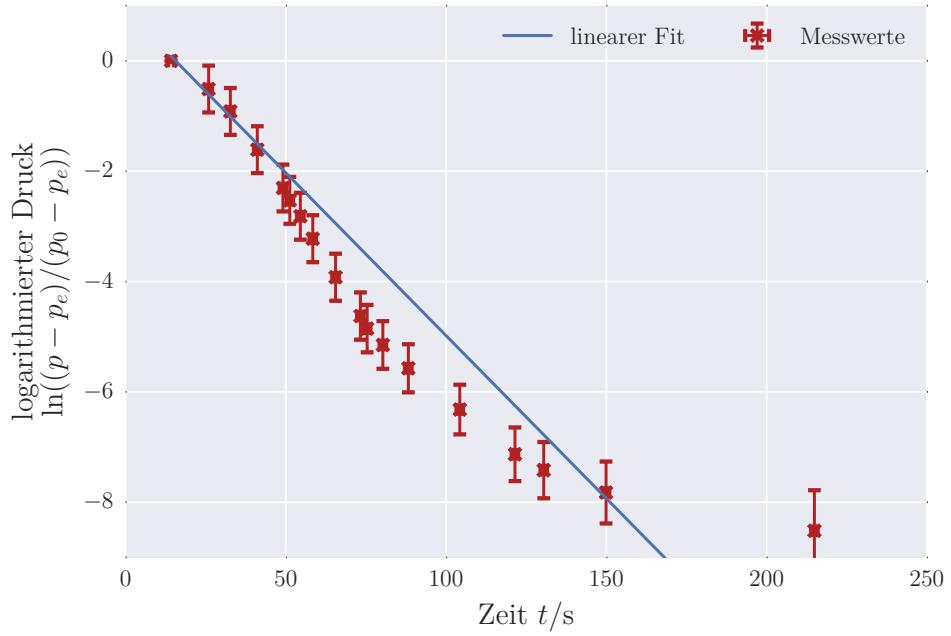
**Tabelle 2:** Werte der Messung der Evakuierungskurve unter Verwendung der Drehschieberpumpe. Neben den gemessenen Drücken sind auch die logarithmierten Drücke und die gemittelten Zeiten angegeben. Dabei sind die Fehler der Zeiten systematischen Ursprungs und wurden daher durch das Mitteln nicht reduziert.

In Abb. 3 sind die Messwerte für den Druck gegen die der Zeit aufgetragen, sodass ich ein exponentieller Verlauf der Evakuierungskurve zeigt. Da ein solcher Verlauf, wie in (8), jedoch nur für ein konstantes Saugvermögen gilt, werden für dessen Bestimmung die logarithmierten Werte der Drücke gegen die Zeit aufgetragen. In dieser Darstellung lassen sich

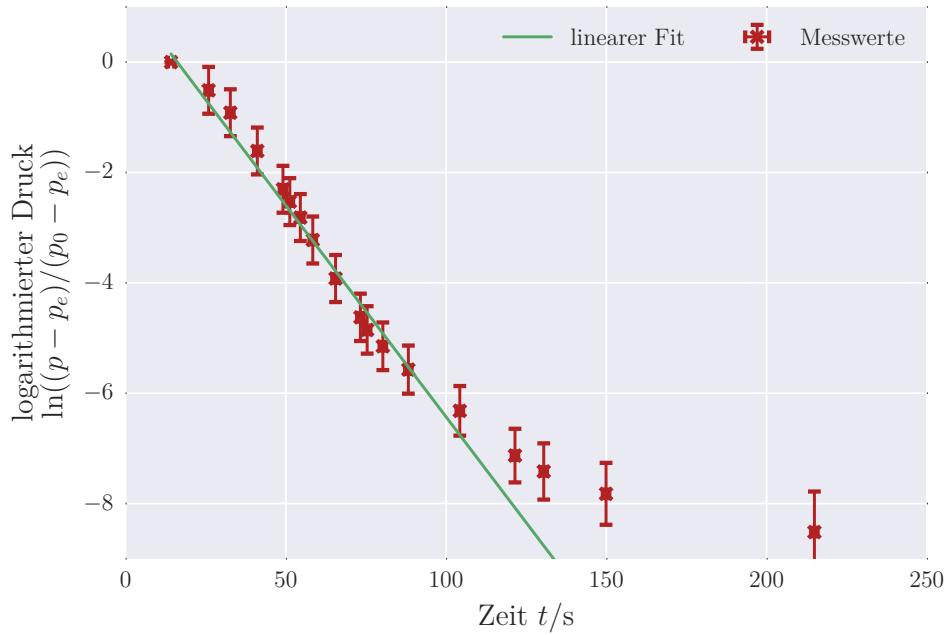
drei Druckbereiche ausmachen, in denen die Messwerte einen linearen Verlauf zeigen. Die grafische Darstellung der Messwerte und die Ausgleichsgeraden für den jeweiligen Druckbereich sind in den Abbildungen 4 bis 6 dargestellt.



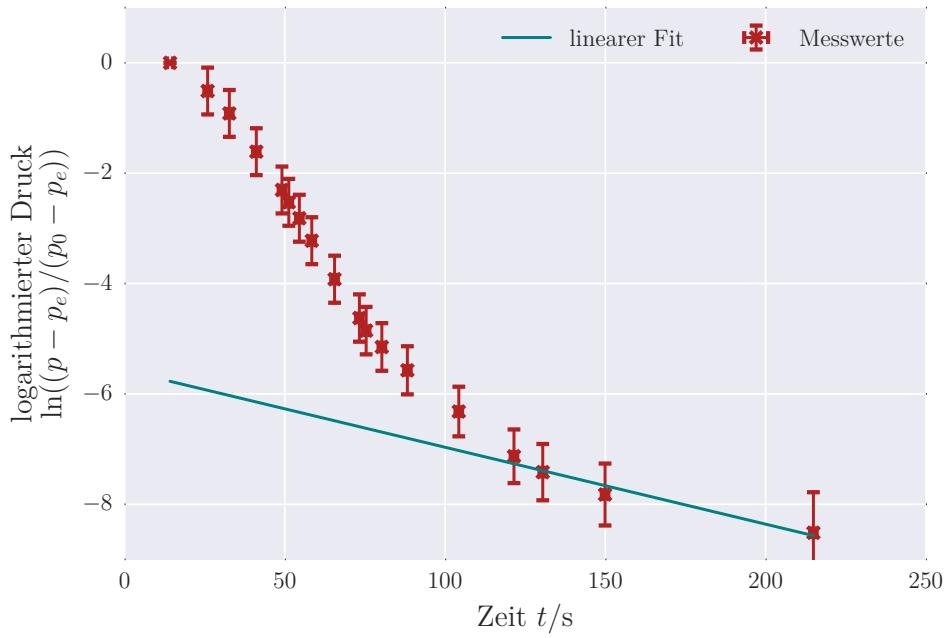
**Abbildung 3:** Grafische Darstellung der aufgenommenen Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe.



**Abbildung 4:** Grafische Darstellung der Evakuierungskurve mit logarithmierten Druckmesswerten und der Ausgleichsgrade für den ersten Druckbereich (100 mbar bis 20 mbar).



**Abbildung 5:** Grafische Darstellung der Evakuierungskurve mit logarithmierten Druckmesswerten und der Ausgleichsgrade für den zweiten Druckbereich (10 mbar bis 0,2 mbar)



**Abbildung 6:** Grafische Darstellung der Evakuierungskurve mit logarithmierten Druckmesswerten und der Ausgleichsgrade für den dritten Druckbereich (0,1 mbar bis 0,04 mbar)

Die durchgeführte Ausgleichsrechnung für eine lineare Funktion der Form

$$P_{\text{drehi}}(t) = a_i \cdot t + b_i \quad (22)$$

ergab für die drei Druckbereiche  $i \in [1, 2, 3]$  die Parameter  $a_i$  und  $b_i$ :

$$a_1 = (-0,059 \pm 0,007) \text{ s}^{-1} \quad (22a)$$

$$b_1 = 0,9 \pm 0,2$$

$$a_2 = (-0,077 \pm 0,005) \text{ s}^{-1} \quad (22b)$$

$$b_2 = 1,2 \pm 0,3$$

$$a_3 = (-0,014 \pm 0,002) \text{ s}^{-1} \quad (22c)$$

$$b_3 = -5,6 \pm 0,3$$

Aus den Steigungen  $a_i$  der Ausgleichsgeraden lässt sich nun das Saugvermögen der Dreh-schieberpumpe in dem jeweiligen Druckbereich nach (9) berechnen. Mit dem Volumen des Rezipienten in dieser Versuchsreihe  $V_{\text{dreh, evak}} = (10,2 \pm 0,7) \text{ l}$  ergibt sich damit für das

Saugvermögen:

$$S_1 = (2,3 \pm 0,2) \text{ ls}^{-1} \quad (23\text{a})$$

$$S_2 = (0,92 \pm 0,06) \text{ ls}^{-1} \quad (23\text{b})$$

$$S_3 = (0,43 \pm 0,05) \text{ ls}^{-1} \quad (23\text{c})$$

### 5.2.2 Leckratenmessung

Die Messwerte die in den vier Messreihen der Leckraten Messung aufgenommen wurden, sind in Tabelle 3 dargestellt. Wiederum sind für den Messfehler des Drucks die Herstellerangabe [2] von 30 % verwendet worden. Als Zeiten sind die Mittelwerte der dreifach ausgeführten Messungen zusammen mit dem systematischen Fehler angegeben.

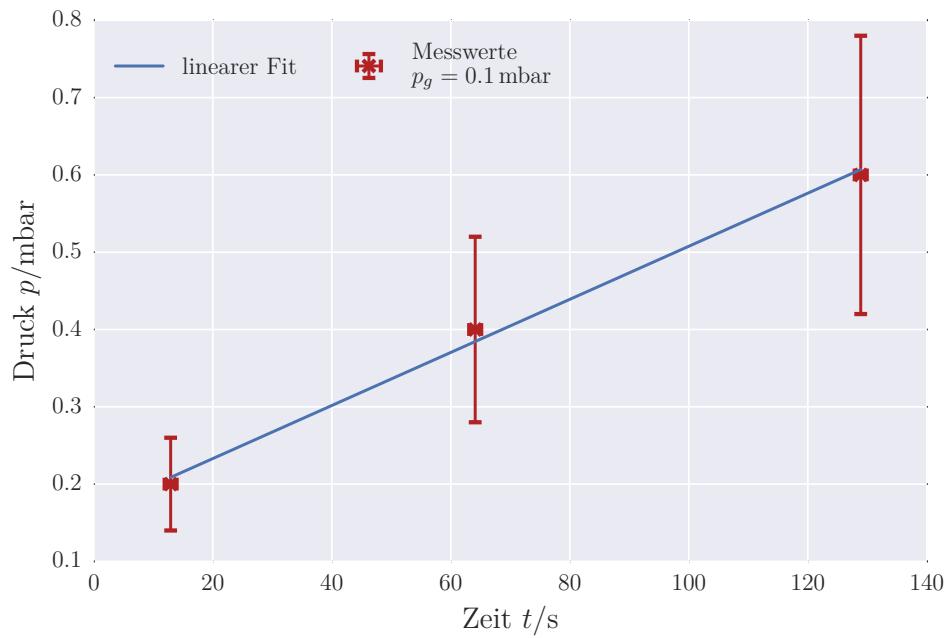
1.Messreihe		2.Messreihe	
Druck p/mbar	gemittelte Zeit $\bar{t}/\text{s}$	Druck p/mbar	gemittelte Zeit $\bar{t}/\text{s}$
$0,20 \pm 0,06$	$12 \pm 1$	$0,4 \pm 0,1$	$17 \pm 1$
$0,4 \pm 0,1$	$64 \pm 1$	$0,6 \pm 0,2$	$46 \pm 1$
$0,6 \pm 0,2$	$128 \pm 1$	$0,8 \pm 0,2$	$72 \pm 1$

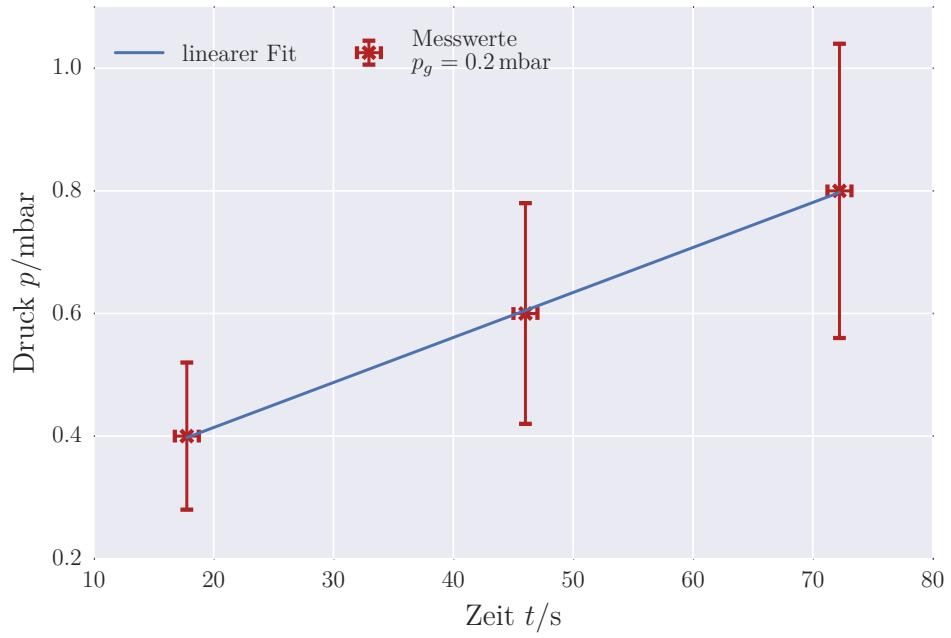
3.Messreihe		4.Messreihe	
Druck p/mbar	gemittelte Zeit $\bar{t}/\text{s}$	Druck p/mbar	gemittelte Zeit $\bar{t}/\text{s}$
$0,6 \pm 0,2$	$9 \pm 1$	$2,0 \pm 0,6$	$12 \pm 1$
$0,8 \pm 0,2$	$18 \pm 1$	$4 \pm 1$	$34 \pm 1$
$1,0 \pm 0,3$	$42 \pm 1$	$6 \pm 2$	$55 \pm 1$

**Tabelle 3:** Werte der Leckratenmessung unter Verwendung der Drehschieberpumpe. Neben den gemessenen Drücken sind die gemittelten Zeiten angegeben. Dabei sind die Fehler der Zeiten systematischen Ursprungs und wurden daher durch das Mitteln nicht reduziert.

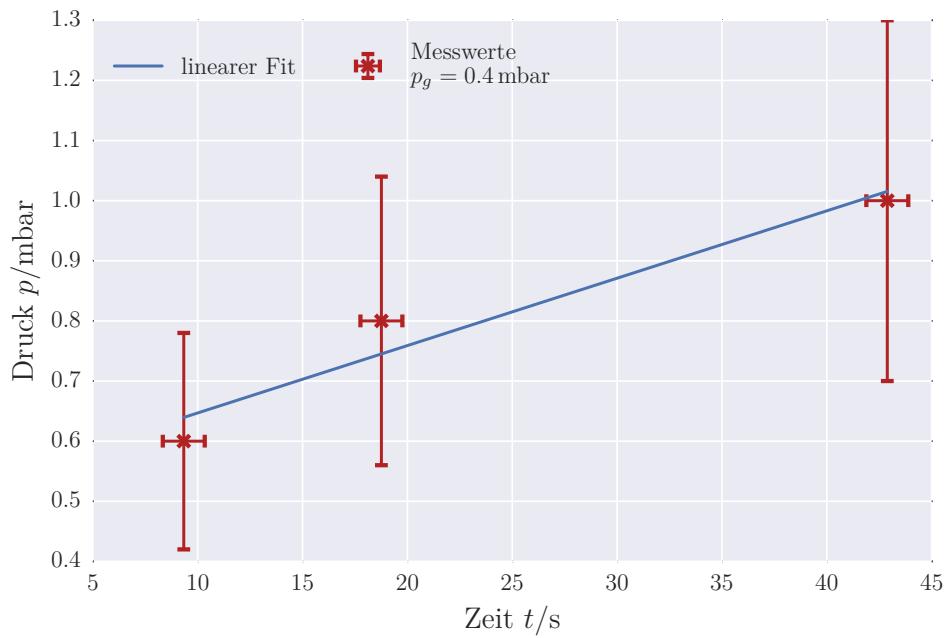
Die grafische Darstellung der jeweiligen Messreihe befindet sich in den Abbildungen 7 bis 10 jeweils zusammen mit einer durch lineare Ausgleichsrechnung bestimmten Geraden.



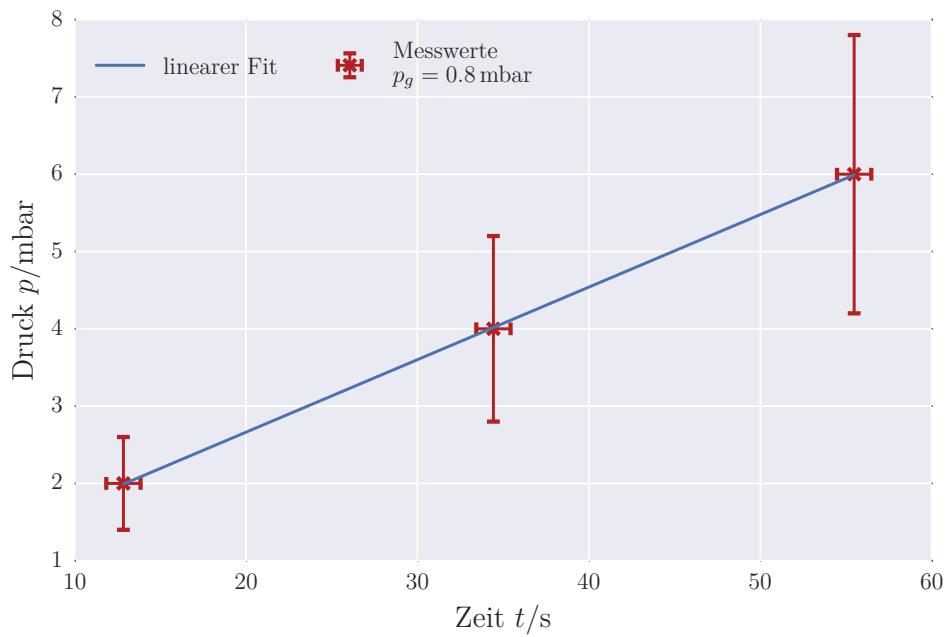
**Abbildung 7:** Graphische Darstellung der Druckmesswerte in Abhängigkeit von der Zeit, aus der 1. Messreihe, und der entsprechenden Ausgleichsgeraden. Der für die Messreihe eingestellte Gleichgewichtsdruck ist angegeben.



**Abbildung 8:** Graphische Darstellung der Druckmesswerte in Abhängigkeit von der Zeit, aus der 2. Messreihe, und der entsprechenden Ausgleichsgeraden. Der für die Messreihe eingestellte Gleichgewichtsdruck ist angegeben.



**Abbildung 9:** Graphische Darstellung der Druckmesswerte in Abhängigkeit von der Zeit, aus der 3. Messreihe, und der entsprechenden Ausgleichsgeraden. Der für die Messreihe eingestellte Gleichgewichtsdruck ist angegeben.



**Abbildung 10:** Graphische Darstellung der Druckmesswerte in Abhängigkeit von der Zeit, aus der 4. Messreihe, und der entsprechenden Ausgleichsgeraden. Der für die Messreihe eingestellte Gleichgewichtsdruck ist angegeben.

Die durchgeführte lineare Ausgleichsrechnung für jede Messreihe ergab, für eine Gerade der Form

$$p_{\text{dreh},i}(t) = c_i \cdot t + d_i, \quad (24)$$

die jeweiligen Fit-Parameter:

$$c_1 = (0,0034 \pm 0,0002) \text{ mbar s}^{-1} \quad (24\text{a})$$

$$d_1 = 0,16 \pm 0,02$$

$$c_2 = (0,0073 \pm 0,0002) \text{ mbar s}^{-1} \quad (24\text{b})$$

$$d_2 = 0,267 \pm 0,008$$

$$c_3 = (0,011 \pm 0,003) \text{ mbar s}^{-1} \quad (24\text{c})$$

$$d_3 = 0,53 \pm 0,08$$

$$c_4 = (0,0938 \pm 0,0007) \text{ mbar s}^{-1} \quad (24\text{d})$$

$$d_4 = 0,79 \pm 0,03$$

Aus den berechneten Steigungen  $c_i$  der Ausgleichsgeraden kann mit (14) und (15) das Saugvermögen der Drehschieberpumpe bestimmt werden. Das dafür notwendige Volumen wurde aus den Einzelvolumen der Bauteile zu  $V_{\text{dreh,leck}} = (10,2 \pm 0,7) \text{ l}$  bestimmt und die jeweiligen Gleichgewichtsdrücke sind in den Grafiken in Tabelle 4 angegeben. Die Werte für das Saugvermögen ergeben sich damit zu:

$$S_1 = (0,35 \pm 0,05) \text{ ls}^{-1} \quad (25\text{a})$$

$$S_2 = (0,37 \pm 0,05) \text{ ls}^{-1} \quad (25\text{b})$$

$$S_3 = (0,29 \pm 0,08) \text{ ls}^{-1} \quad (25\text{c})$$

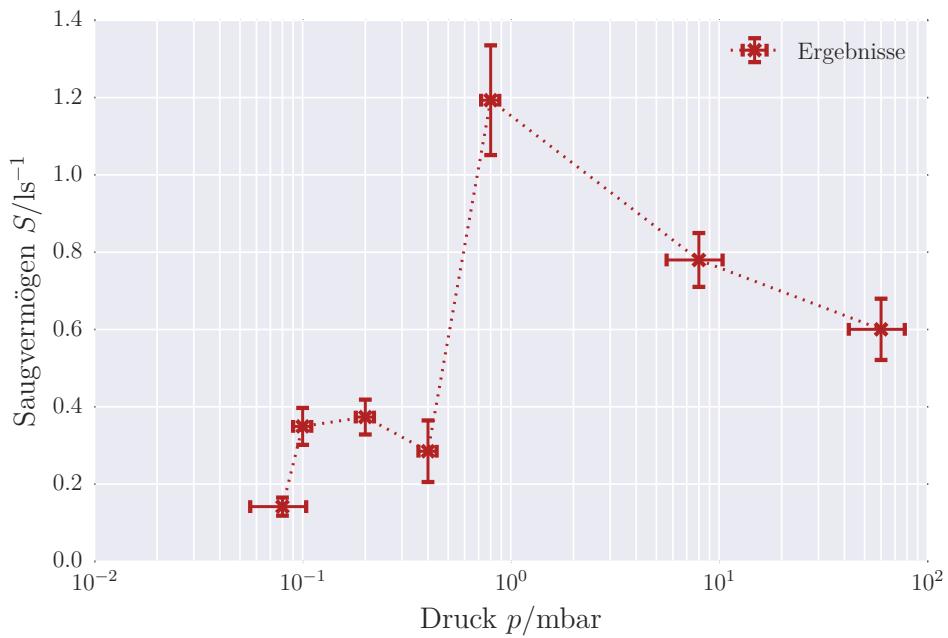
$$S_4 = (1,2 \pm 0,1) \text{ ls}^{-1} \quad (25\text{d})$$

### 5.2.3 Saugvermögen

Die in den vorherigen Messungen bestimmten Werte für das Saugvermögen der Drehschieberpumpe sind zusammen mit dem jeweiligen Druck in Tabelle 4 eingetragen und in Abb. 11 grafisch dargestellt.

Druck $p/\text{mbar}$	Saugvermögen $S/\text{ls}^{-1}$	Druck $p/\text{mbar}$	Saugvermögen $S/\text{ls}^{-1}$
$0,08 \pm 0,02$	$0,14 \pm 0,02$	$0,80 \pm 0,08$	$1,2 \pm 0,1$
$0,10 \pm 0,01$	$0,35 \pm 0,05$	$8 \pm 2$	$0,78 \pm 0,07$
$0,20 \pm 0,02$	$0,37 \pm 0,05$	$60 \pm 18$	$0,60 \pm 0,08$
$0,40 \pm 0,04$	$0,29 \pm 0,08$		

**Tabelle 4:** Aus den vorherigen Messergebnissen berechnet Werte für das Saugvermögen der Drehschieberpumpe in Abhängigkeit des jeweiligen Druckes.



**Abbildung 11:** Grafische Darstellung der Ergebnisse für das Saugvermögen aus den vorangegangenen Messreihen in Abhängigkeit des Druckes bei dem sich dieses Saugvermögen ergab.

## 5.3 Turbopumpe

In den Folgenden Abschnitten werden die, unter Verwendung der Turbopumpe, aufgenommenen Messreihen zur Evakuierungskurve und der Leckratenmessung ausgewertet. Mit den Ergebnissen aus diesen, folgt im letzten Teil dieses Abschnitts die Betrachtung des Saugvermögens in Abhängigkeit des Druckes.

### 5.3.1 Evakuierungskurve

Die zur Bestimmung der Evakuierungskurve aufgenommenen Messwerte für den Druck im Rezipienten sind in Tabelle 5 auch als logarithmierte Werte zu finden. Für die Logarithmierung wurden der Maximaldruck  $p_0 = (8 \pm 1) \cdot 10^{-7}$  bar und der in dieser Messreihe festgestellte Enddruck  $p_e = (16 \pm 2)$  nbar verwendet. Der Messfehler der Druckwerte wurde aufgrund der Herstellerangabe [2] mit 10 % angenommen. Neben den Messwerten für den Druck sind auch die, über die sieben beziehungsweise zwei Messungen<sup>①</sup>, gemittelten Messwerte der Zeit angegeben. Der Messfehler der Zeit ist dabei für jeder der Messungen

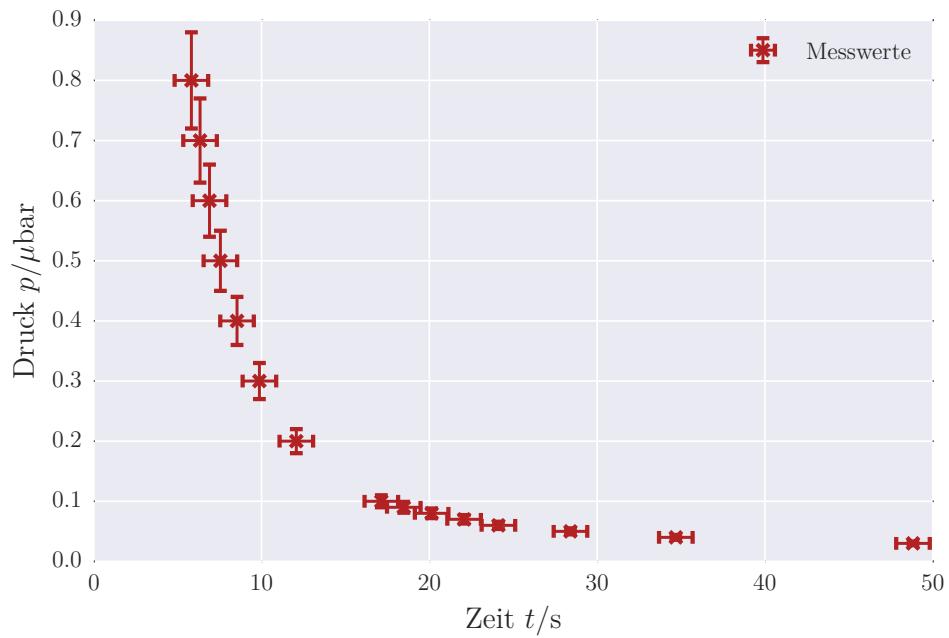
<sup>①</sup> Messung im Druckbereich von 90 nbar bis 30 nbar wurden nur zweifach durchgeführt, da sich die Messung mit Änderung des Messbereichs als schwierig herausstellten.

mit  $\sigma_t = 1$  s als systematischer Fehler angenommen, sodass sich dieser durch die Mittlung nicht verringert.

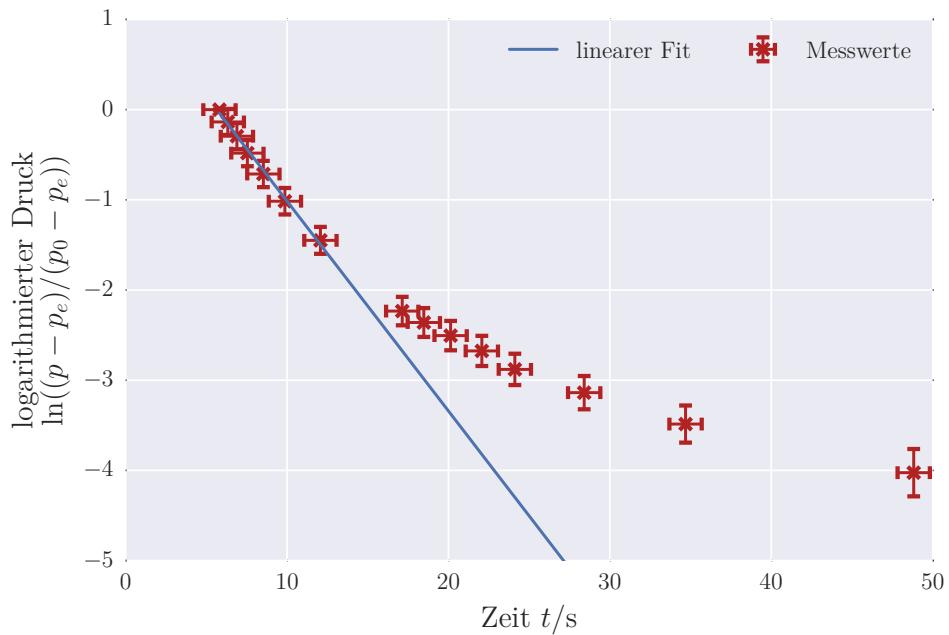
Druck $p/10^{-8}$ bar	logarithm. Druck $\frac{p-p_e}{p_0-p_e}$	gemittelte Zeit $\bar{t}/\text{s}$	Druck $p/10^{-8}$ bar	logarithm. Druck $\frac{p-p_e}{p_0-p_e}$	gemittelte Zeit $\bar{t}/\text{s}$
$80 \pm 8$	$0,0 \pm 0,0$	$5 \pm 1$	$9,0 \pm 0,9$	$-2,4 \pm 0,2$	$18 \pm 1$
$70 \pm 7$	$-0,1 \pm 0,1$	$6 \pm 1$	$8,0 \pm 0,8$	$-2,5 \pm 0,2$	$20 \pm 1$
$59 \pm 6$	$-0,3 \pm 0,1$	$6 \pm 1$	$7,0 \pm 0,7$	$-2,7 \pm 0,2$	$22 \pm 1$
$50 \pm 5$	$-0,5 \pm 0,1$	$7 \pm 1$	$6,0 \pm 0,6$	$-2,9 \pm 0,2$	$24 \pm 1$
$40 \pm 4$	$-0,7 \pm 0,1$	$8 \pm 1$	$5,0 \pm 0,5$	$-3,1 \pm 0,2$	$28 \pm 1$
$29 \pm 3$	$-1,0 \pm 0,1$	$9 \pm 1$	$4,0 \pm 0,4$	$-3,5 \pm 0,2$	$34 \pm 1$
$20 \pm 2$	$-1,4 \pm 0,1$	$12 \pm 1$	$3,0 \pm 0,3$	$-4,0 \pm 0,3$	$48 \pm 1$
$10 \pm 1$	$-2,2 \pm 0,2$	$17 \pm 1$			

**Tabelle 5:** Werte der Messung der Evakuierungskurve unter Verwendung der Turbopumpe. Neben den gemessenen Drücken sind auch die logarithmierten Drücke und die gemittelten Zeiten angegeben. Dabei sind die Fehler der Zeiten systematischen Ursprungs und wurden daher durch das Mitteln nicht reduziert.

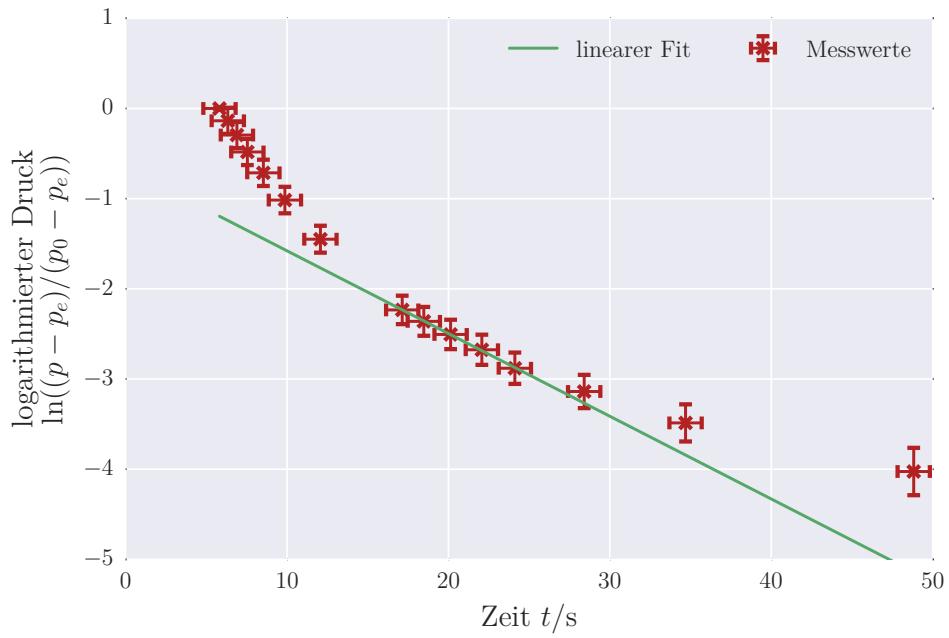
In Abb. 12 sind die Messwerte für den Druck gegen die der Zeit aufgetragen, sodass ich ein exponentieller Verlauf der Evakuierungskurve zeigt. Da ein solcher Verlauf, wie in (8) hergeleitet, jedoch nur für ein konstantes Saugvermögen gilt, werden für dessen Bestimmung die logarithmierten Werte der Drücke gegen die Zeit aufgetragen. Auch für die Turbopumpe lassen sich in dieser Darstellung drei Druckbereiche ausmachen, in denen die Messwerte einen linearen Verlauf zeigen. Die grafische Darstellung der Messwerte und die Ausgleichsgeraden für den jeweiligen Druckbereich sind in den Abbildungen 13 bis 15 dargestellt.



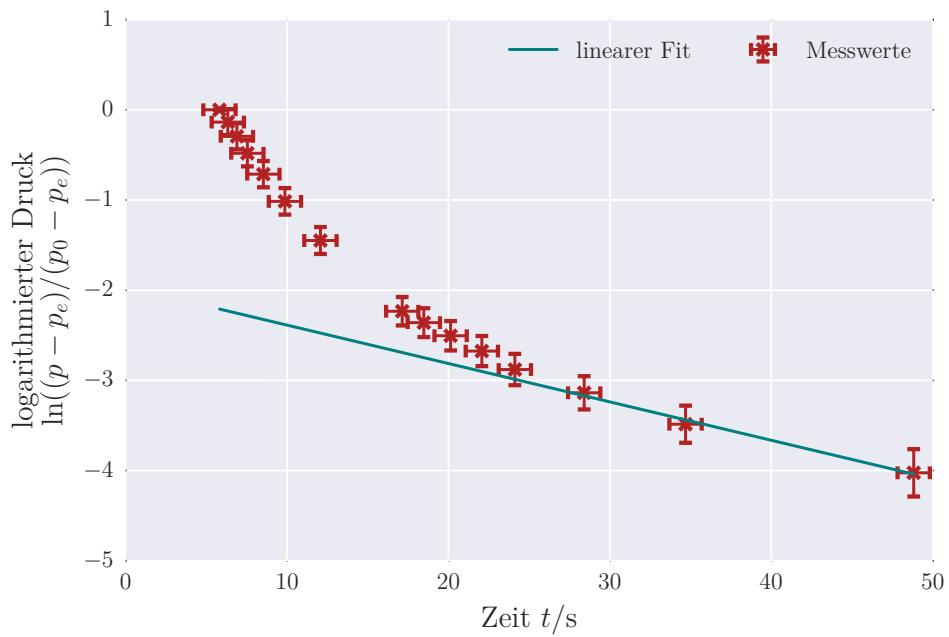
**Abbildung 12:** Grafische Darstellung der aufgenommenen Evakuierungskurve der Turbopumpe.



**Abbildung 13:** Grafische Darstellung der Evakuierungskurve mit logarithmierten Druckmesswerten und der Ausgleichsgrade für den ersten Druckbereich ( $0,8 \mu\text{bar}$  bis  $0,2 \mu\text{bar}$ )



**Abbildung 14:** Grafische Darstellung der Evakuierungskurve mit logarithmierten Druckmesswerten und der Ausgleichsgrade für den zweiten Druckbereich (100 nbar bis 60 nbar)



**Abbildung 15:** Grafische Darstellung der Evakuierungskurve mit logarithmierten Druckmesswerten und der Ausgleichsgrade für den dritten Druckbereich (50 nbar bis 30 nbar)

Die durchgeführte Ausgleichsrechnung für eine lineare Funktion der Form

$$P_{\text{turbo},i}(t) = e_i \cdot t + f_i \quad (26)$$

ergab für die drei Druckbereiche  $i \in [1, 2, 3]$  die Parameter  $e_i$  und  $f_i$ :

$$e_1 = (-0,233 \pm 0,008) \text{ s}^{-1} \quad (26a)$$

$$f_1 = 1,31 \pm 0,06$$

$$e_2 = (-0,092 \pm 0,001) \text{ s}^{-1} \quad (26b)$$

$$f_2 = -0,66 \pm 0,03$$

$$e_3 = (-0,043 \pm 0,004) \text{ s}^{-1} \quad (26c)$$

$$f_3 = -2,0 \pm 0,2$$

Aus den Steigungen  $e_i$  der Ausgleichsgeraden lässt sich nun das Saugvermögen der Dreh-schieberpumpe in dem jeweiligen Druckbereich nach (9) berechnen. Mit dem Volumen des Rezipienten in dieser Versuchsreihe  $V_{\text{turbo, evak}} = (10,0 \pm 0,7) \text{ l}$  ergibt sich damit für das Saugvermögen:

$$S_1 = (2,3 \pm 0,2) \text{ l s}^{-1} \quad (27a)$$

$$S_2 = (0,92 \pm 0,06) \text{ l s}^{-1} \quad (27b)$$

$$S_3 = (0,43 \pm 0,05) \text{ l s}^{-1} \quad (27c)$$

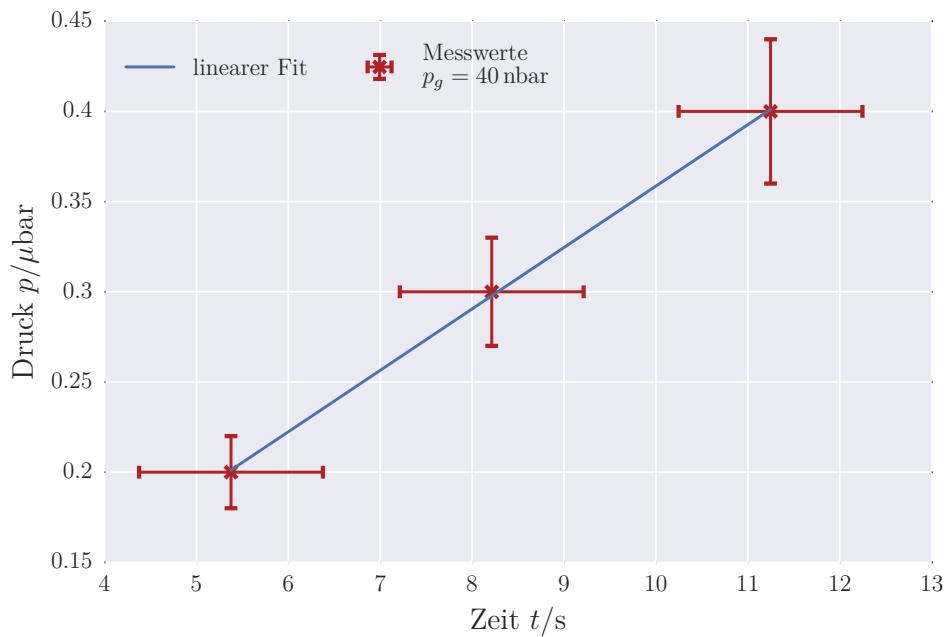
### 5.3.2 Leckratenmessung

Die Messwerte die in den vier Messreihen der Leckraten Messung aufgenommen wurden, sind in Tabelle 6 dargestellt. Wiederum sind für den Messfehler des Drucks die Herstellerangabe [2] von 10 % verwendet worden. Als Zeiten sind die Mittelwerte der dreifach ausgeführten Messungen zusammen mit dem systematischen Fehler angegeben. Die erste Messung der zweiten Messreihe wurde für die Auswertung nicht berücksichtigt, da der Mittelwert mit  $\bar{t} = 0,84 \text{ s}$  unter dem angenommenen systematischen Fehler lag.

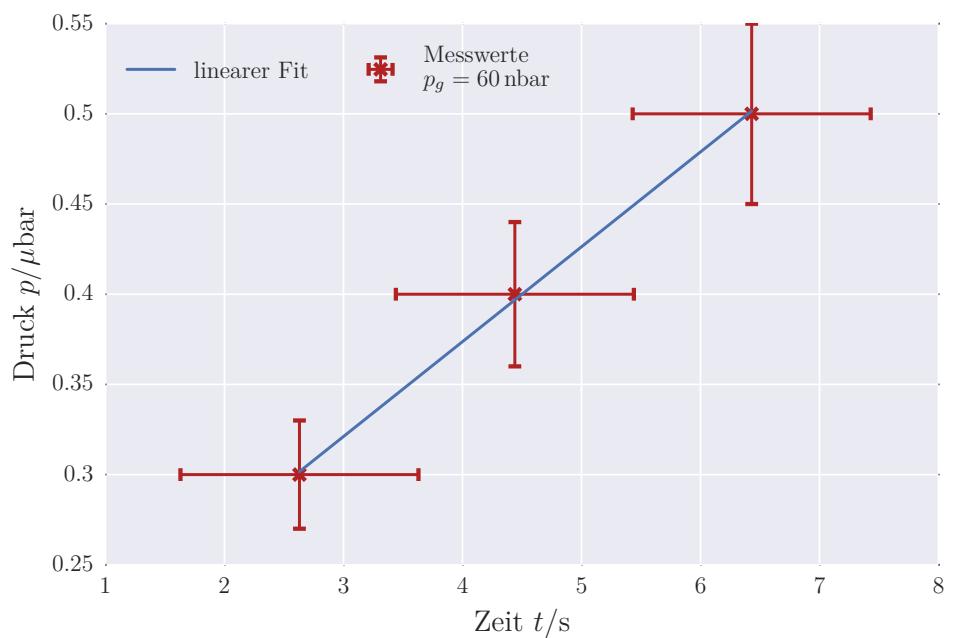
Die grafische Darstellung der jeweiligen Messreihe befindet sich in den Abbildungen 16 bis 19 jeweils zusammen mit einer durch lineare Ausgleichsrechnung bestimmten Geraden.

1.Messreihe		2.Messreihe	
Druck $p/10^{-8}\text{bar}$	gemittelte Zeit $\bar{t}/\text{s}$	Druck $p/10^{-8}\text{bar}$	gemittelte Zeit $\bar{t}/\text{s}$
$20 \pm 2$	$5 \pm 1$	$29 \pm 3$	$2 \pm 1$
$29 \pm 3$	$8 \pm 1$	$40 \pm 4$	$4 \pm 1$
$40 \pm 4$	$11 \pm 1$	$50 \pm 5$	$6 \pm 1$
3.Messreihe		4.Messreihe	
Druck $p/10^{-8}\text{bar}$	gemittelte Zeit $\bar{t}/\text{s}$	Druck $p/10^{-8}\text{bar}$	gemittelte Zeit $\bar{t}/\text{s}$
$29 \pm 9$	$1 \pm 1$	$40 \pm 12$	$2 \pm 1$
$40 \pm 12$	$2 \pm 1$	$50 \pm 15$	$2 \pm 1$
$50 \pm 15$	$3 \pm 1$	$59 \pm 18$	$3 \pm 1$
$59 \pm 18$	$6 \pm 1$	$70 \pm 21$	$4 \pm 1$

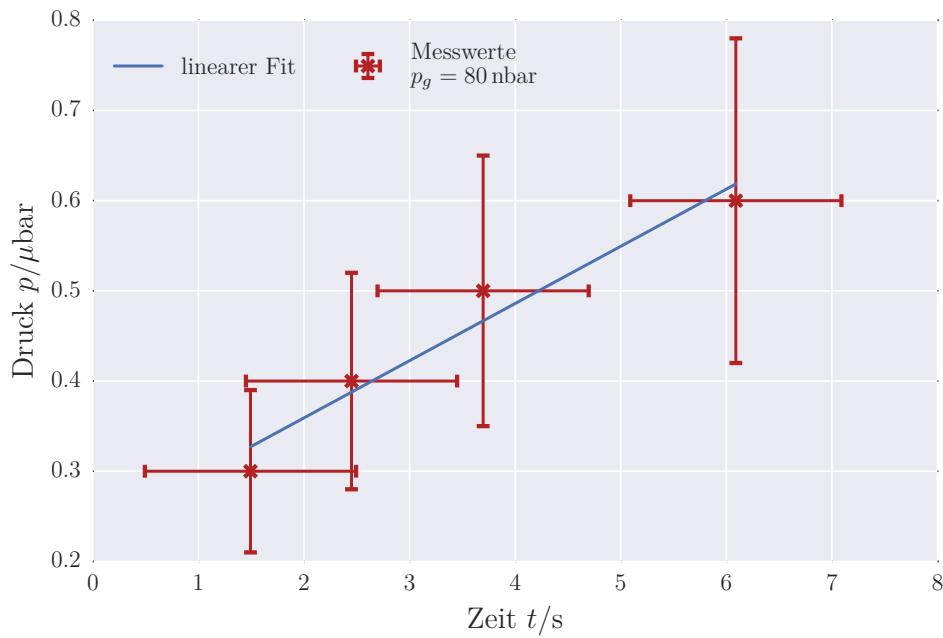
**Tabelle 6:** Werte der Leckratenmessung unter Verwendung der Turbopumpe. Neben den gemessenen Drücken sind die gemittelten Zeiten angegeben. Dabei sind die Fehler der Zeiten systematischen Ursprungs und wurden daher durch das Mitteln nicht reduziert.



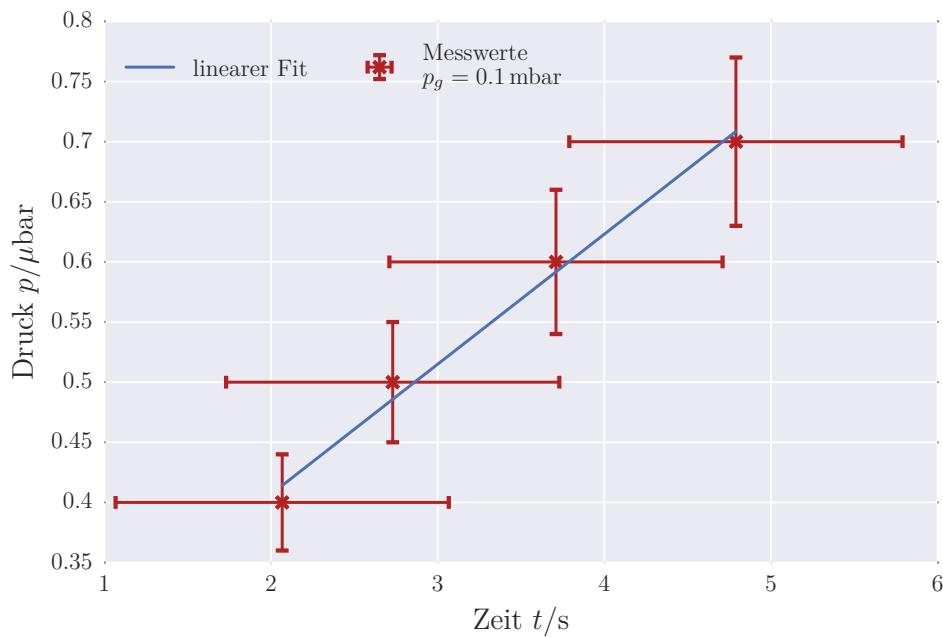
**Abbildung 16:** Graphische Darstellung der Druckmesswerte in Abhängigkeit von der Zeit, aus der 1. Messreihe, und der entsprechenden Ausgleichsgeraden. Der für die Messreihe eingestellte Gleichgewichtsdruck ist angegeben.



**Abbildung 17:** Graphische Darstellung der Druckmesswerte in Abhangigkeit von der Zeit, aus der 2. Messreihe, und der entsprechenden Ausgleichsgeraden. Der fur die Messreihe eingestellte Gleichgewichtsdruck ist angegeben.



**Abbildung 18:** Graphische Darstellung der Druckmesswerte in Abhängigkeit von der Zeit, aus der 3. Messreihe, und der entsprechenden Ausgleichsgeraden. Der für die Messreihe eingestellte Gleichgewichtsdruck ist angegeben.



**Abbildung 19:** Graphische Darstellung der Druckmesswerte in Abhängigkeit von der Zeit, aus der 4. Messreihe, und der entsprechenden Ausgleichsgeraden. Der für die Messreihe eingestellte Gleichgewichtsdruck ist angegeben.

Die durchgeföhrte lineare Ausgleichsrechnung für jede Messreihe ergab, für eine Gerade der Form

$$p_{\text{turbo},i}(t) = g_i \cdot t + h_i, \quad (28)$$

die jeweiligen Fit-Parameter:

$$\begin{aligned} g_1 &= (34,1 \pm 0,7) \text{ nbar s}^{-1} \\ h_1 &= (18 \pm 6) \cdot 10^{-6} \end{aligned} \quad (28\text{a})$$

$$\begin{aligned} g_2 &= (53 \pm 1) \text{ nbar s}^{-1} \\ h_2 &= (163 \pm 7) \cdot 10^{-6} \end{aligned} \quad (28\text{b})$$

$$\begin{aligned} g_3 &= (6 \pm 1) \cdot 10^{-5} \text{ mbar s}^{-1} \\ h_3 &= (23 \pm 4) \cdot 10^{-5} \end{aligned} \quad (28\text{c})$$

$$\begin{aligned} g_4 &= (108 \pm 8) \text{ nbar s}^{-1} \\ h_4 &= (19 \pm 3) \cdot 10^{-5} \end{aligned} \quad (28\text{d})$$

Aus den berechneten Steigungen  $g_i$  der Ausgleichsgeraden kann mit (14) und (15) das Saugvermögen der Drehschieberpumpe bestimmt werden. Das dafür notwendige Volumen wurde aus den Einzelvolumen der Bauteile zu  $V_{\text{turbo,leck}} = (10,0 \pm 0,7) \text{ l}$  bestimmt und die jeweiligen Gleichgewichtsdrücke sind in den Grafiken in Tabelle 7 angegeben. Die Werte für das Saugvermögen ergeben sich damit zu:

$$S_1 = (9 \pm 1) \text{ ls}^{-1} \quad (29\text{a})$$

$$S_2 = (9 \pm 1) \text{ ls}^{-1} \quad (29\text{b})$$

$$S_3 = (8 \pm 2) \text{ ls}^{-1} \quad (29\text{c})$$

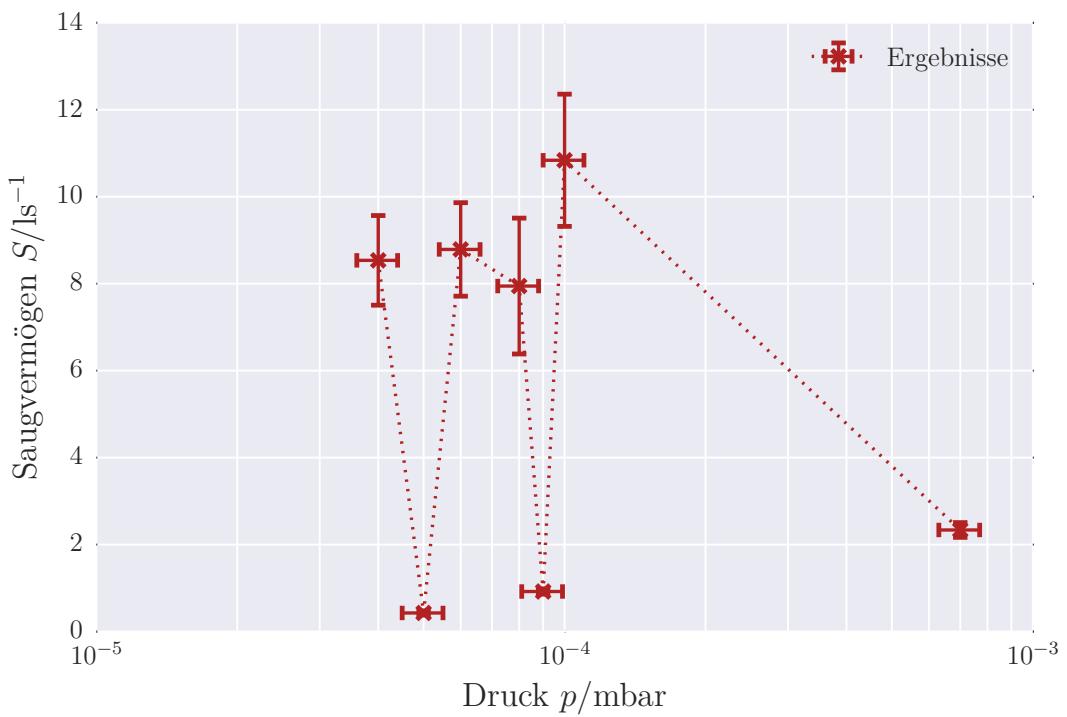
$$S_4 = (11 \pm 2) \text{ ls}^{-1} \quad (29\text{d})$$

### 5.3.3 Saugvermögen

Die in den vorherigen Messungen bestimmten Werte für das Saugvermögen der Drehschieberpumpe sind zusammen mit dem jeweiligen Druck in Tabelle 7 eingetragen und in Abb. 20 grafisch dargestellt.

Druck $p/10^{-8} \text{ bar}$	Saugvermögen $S/\text{ls}^{-1}$	Druck $p/10^{-8} \text{ bar}$	Saugvermögen $S/\text{ls}^{-1}$
$4,0 \pm 0,4$	$8 \pm 1$	$9,0 \pm 0,9$	$0,92 \pm 0,06$
$5,0 \pm 0,5$	$0,43 \pm 0,05$	$10 \pm 1$	$10 \pm 2$
$6,0 \pm 0,6$	$8 \pm 1$	$70 \pm 7$	$2,3 \pm 0,2$
$8,0 \pm 0,8$	$7 \pm 2$		

**Tabelle 7:** Aus den vorherigen Messergebnissen berechnet Werte für das Saugvermögen der Turbopumpe in Abhängigkeit des jeweiligen Druckes.



**Abbildung 20:** Grafische Darstellung der Ergebnisse für das Saugvermögen aus den vorangegangenen Messreihen in Abhängigkeit des Druckes bei dem sich dieses Saugvermögen ergab.

## 6 Diskussion

Im Folgenden werden die in der Auswertung gewonnenen Ergebnisse noch einmal zusammen gefasst und abschließend diskutiert, um eine Aussage über deren Plausibilität treffen zu können.

Für die Messung der Evakuierungskurve der Drehschieberpumpe ergibt sich zunächst ein Verlauf der einer exponentiell abfallenden Kurve ähnlich sieht. Durch die Logarithmierung des Druckes erhält man jedoch nicht nur eine lineare Funktion sondern mehrere Druckreiche in denen ein linearer Verlauf zu erkennen ist. Dies entspricht der theoretischen Beschreibung, da das Saugvermögen der Pumpen über den gesamten Druckbereich nicht konstant ist.

Die Leckratennmessung der Drehschieberpumpe ergibt, wie von der Theorie vorhergesagt, für jeden Gleichgewichtsdruck und damit jede Messreihe eine lineare Funktion.

Aus beiden Messungen kann durch lineare Ausgleichsrechnung die Steigungen der jeweiligen Geraden ermittelt und damit das Saugvermögen bei dem herrschenden Druck bestimmt werden. Die gegen den Druck aufgetragenen Werte für das Saugvermögen zeigen zunächst den in der Literatur [3] angegebenen Verlauf. Dieser beschreibt einen erst flachen und dann steilen Anstieg und eine Annäherung an einen Sättigungswert. Die in diesem Versuch berechneten Werte steigen auch zunächst bis zu einem Maximum an und fallen nach diesem wieder ab. Das Abfallen im niedrigen Druckbereich ist durch den Versuchsaufbau zu erklären, da bei hohen Drücken der Desorptionsstrom der Gasteilchen von den Innenflächen des Rezipienten überwiegt und die Pumpe in diesem Druckbereich gegen diesen arbeiten muss. Vergleichbares gilt für den Bereich sehr geringer Drücke, in diesen ist die Innenfläche des Rezipienten so sauber, dass diese selbst als Pumpe wirkt und somit das Saugvermögen der Drehschieberpumpe reduziert.

Die Herstellerangabe [4] zum Saugvermögen der Drehschieberpumpe liegt bei

$$\begin{aligned} S_{\text{soll,dreh}} &= 4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \\ &\approx 1,11 \text{ l s}^{-1}. \end{aligned} \tag{30}$$

Das Maximum der in diesem Versuch bestimmten Werte ergab sich zu

$S_{\text{max,dreh}} = (1,2 \pm 0,1) \text{ l s}^{-1}$ , sodass der theoretische Wert im Rahmen des Fehlers liegt.

In den Messungen mit der Turbopumpe lassen sich Grundsätzliche die gleichen Beobachtungen machen wie bei der Durchführung mit der Drehschieberpumpe. Auch hier ergeben sich bei der logarithmierten Evakuierungskurve Druckbereiche mit linearem Verlauf. Und auch die Leckratennmessung führt zu Messwerten, die für jeden eingestellten Gleichgewichtsdruck einen linearen Verlauf zeigen.

Der Unterschied zu der Messung mit der Drehschieberpumpe wird jedoch in der Darstellung des Saugvermögens in Abhängigkeit des Druckes sichtbar. In dieser zeigt sich, dass die Werte die aus der Evakuierungskurve gewonnen wurden sehr stark von denen aus der Leckrattemessung abweichen. Eine mögliche Erklärung dieser Diskrepanz ist, die bereits erwähnte Pumpwirkung der Innenfläche des Rezipienten. Da die Turbopumpe in einem Druckbereich betrieben wurden, der zwei bis drei Größenordnungen geringer ist als bei der Drehschieberpumpe ist dieser Effekt noch viel stärker zu erwarten.

Im Gegensatz dazu ist bei der Messung der Leckrate, bei der Luft eingelassen wird, diese Pumpwirkung des Rezipienten der Turbopumpe nicht entgegengesetzt, sodass in diesem Versuch die Summe der beiden Saugvermögen (von Turbopumpe und Rezipient) bestimmt wird.

Beim Vergleich der Messwerte mit der Herstellerangabe [2] von

$$S_{\text{soll,turbo}} = 77 \text{ l s}^{-1}, \quad (31)$$

zeigt sich ein weiterer großer Unterschied. Dieser ist wiederum durch den Aufbau zu erklären, da direkt am Ansaugstutzen der Turbopumpe ein Flansch angebracht war, der aufgrund seines geringeren Durchmessers und damit geringeren Leitwertes  $L_{\text{flansch}}$  das Saugvermögen der Turbopumpe, wie durch (13) beschrieben, stark verringert. Geht man von einer Verringerung um den Faktor 10 aus, so erhält man das effektive Saugvermögen

$$S_{\text{eff,turbo}} = 7,7 \text{ l s}^{-1}. \quad (32)$$

Betrachtet man nun die Messwerte aus der Leckrattemessung zeigt sich, dass der Effektivwert im Fehlerbereich von drei der vier Messwerte liegt.

## Literatur

- [1] SciPy developers. *SciPy*. URL: <http://docs.scipy.org/doc/> (besucht am 07.05.2015).
- [2] Datenblätter. *Pirani-Messgerät, Heißkathodenmessgerät, Turbopumpe*. Am Praktikumsort ausliegend.
- [3] Pfeiffer Vacuum GmbH. *The Vacuum Technology Book Volume II*. 2. Aufl. Pfeiffer Vacuum GmbH Asslar, 2013.
- [4] Datenplakette. *Drehschieberpumpe*. Auf Drehschieberpumpe angebracht.

# V70 Vakuumphysik

27.05.15

## Wiederholungen

### Rundzeitzeiten

P Druck Pa/mbar	Zeit s/s	Zeit s/s	Zeit s/s	Zeit s/s	Zeit s/s
$10^2$	12,01	14,33	15,46	15,14	13,05
$6 \cdot 10^1$	12,63	11,70	25,80	16,04	26,10
$4 \cdot 10^1$	6,91	6,80	32,53	32,31	33,25
$2 \cdot 10^1$	8,09	8,18	41,19	41,03	41,72
$1 \cdot 10^1$	8,17	<del>8,07</del> 7,81	49,02	49,32	49,60
$8 \cdot 10^0$	2,34	2,06	50,94	51,46	51,83
$6 \cdot 10^0$	2,93	3,33	54,54	54,64	55,18
$4 \cdot 10^0$	3,92	3,94	58,41	58,57	58,94
$2 \cdot 10^0$	7,18	6,98	1' 5,74	1' 05,61 1' 05,96	
$1 \cdot 10^0$	7,89	7,96	13,14	13,39	13,64
$8 \cdot 10^{-1}$	1,80	2,16	14,74	15,87	16,14
$6 \cdot 10^{-1}$	4,85	4,79	20,45	20,37	20,78
$4 \cdot 10^{-1}$	8,29	7,71	28,37	28,08	28,93
$2 \cdot 10^{-1}$	15,75	16,36	44,26	44,52	44,74
$1 \cdot 10^{-1}$	16,45	17,50	2' 2,36	2' 01,32 2' 01,94	
$8 \cdot 10^{-2}$	8,62	9,15	11,49	10,91	10,31
$6 \cdot 10^{-2}$	19,09	19,99	30,42	30,57	29,85
$4 \cdot 10^{-2}$	61,48	71,83	3' 36,56	3' 36,30 3' 29,70	

Fehler:

Druck:  $\pm 30\%$

Zeit:  $\pm 1s$

Enddruck =  $2 \cdot 10^{-2}$  mbar

27.05.15

5.9.15

# Leckrate (Drehschliesser)

~~Peg = 10^-1 mbar~~

Druck P/mbar	Zeit t/s	Zeit t/s	Zeit t/s
$3 \cdot 10^{-1}$			
$2 \cdot 10^{-1}$	12,96	12,96	12,81
$4 \cdot 10^{-1}$	1' 03,55	1' 04,82	1' 03,91
$6 \cdot 10^{-1}$	2' 07,05	2' 09,65	2' 09,96

Druck P/mbar	Zeit t/s	Zeit t/s	Zeit t/s
$2 \cdot 10^{-1}$			
$4 \cdot 10^{-1}$			
$2 \cdot 10^0$			
$9 \cdot 10^0$			
$6 \cdot 10^0$			
$8 \cdot 10^0$			
$1 \cdot 10^1$			
$2 \cdot 10^1$			
$4 \cdot 10^1$			
$6 \cdot 10^1$			
$8 \cdot 10^1$			
$1 \cdot 10^2$			

Druck P/mbar	Zeit t/s	Zeit t/s	Zeit t/s
$2 \cdot 10^{-1} = Peg$			
$4 \cdot 10^{-1}$	18,33	17,58	17,37
$6 \cdot 10^{-1}$	46,11	46,05	45,89
$8 \cdot 10^{-1}$	1' 12,73	1' 11,51	1' 12,42
$4 \cdot 10^0 = Peg$			
$6 \cdot 10^0$	9,26	9,51	9,24
$8 \cdot 10^0$	19,11	18,11	19,06
$1 \cdot 10^1$	28,37	27,86	27,84

$$Peg = 10^{-1} \text{ mbar}$$

$$Peg = 8 \cdot 10^{-1}$$

↓ zu kurz  
0

Fehler:

Druck:  $\pm 30\%$

Zeit: 1s

$2 \cdot 10^0$	12,50	12,96	13,07
$4 \cdot 10^0$	34,00	34,88	34,69
$6 \cdot 10^0$	54,42	55,05	56,96

27.05.15

5. Soe

Evak.-Kurve  
Turbopumpe

Druck P/mbar	Zeit t/s	Zeit t/s	Zeit t/s	Zeit t/s	Zeit t/s
$P_{\text{ref}} = 5 \cdot 10^{-3}$ <del><math>10 \cdot 10^{-4}</math></del> <del><math>4 \cdot 10^{-4}</math></del>					
$8 \cdot 10^{-4}$	5,61	6,01	5,63	5,78	5,79
<del><math>7 \cdot 10^{-4}</math></del>	6,24	6,37	6,31	6,36	6,24
$6 \cdot 10^{-4}$	6,77	7,04	6,86	6,81	6,84
$5 \cdot 10^{-4}$	7,36	07,74	7,47	7,54	7,52
$4 \cdot 10^{-4}$	8,24	8,75	8,49	8,56	8,57
$3 \cdot 10^{-4}$	9,65	10,10	9,68	9,90	9,91
$2 \cdot 10^{-4}$	11,90	12,34	<del>12,25</del> <del>9,478</del>	12,13	12,05
$1 \cdot 10^{-4}$	17,11	17,52	17,39	17,16	17,31
<del><math>1,92 \cdot 10^{-5}</math></del>					
$8 \cdot 10^{-5}$					
$8 \cdot 10^{-4}$	5,95	5,94			
<del>7</del>	<del>16,26</del>	<del>6,54</del>			
6	6,78	7,17			
5	7,41	7,72			
4	8,44	8,70			
3	9,86	9,99			
2	11,90	11,92			
1	16,64	16,83			
$9 \cdot 10^{-5}$	<del>18,34</del> $\downarrow 20,11$	$18,61$			
$8 \cdot 10^{-5}$	22,30	20,16			
$7 \cdot 10^{-5}$	23,36	21,84			
$6 \cdot 10^{-5}$	28,66	24,37			
$5 \cdot 10^{-5}$	35,53	28,16			
$4 \cdot 10^{-5}$	50,86	33,85			
$3 \cdot 10^{-5}$		$46,74$			

Enddruck:  $1,6 \cdot 10^{-5}$  mbar

Fehler:

Druck:  $\pm 10\%$

Zeit:  $\pm 1\%$

27.05.15  
S. 90

# Leichtatmungsmessung

242

Druck  
P/mbar

~~P<sub>eq</sub> = 4 · 10<sup>-5</sup>~~  
~~P<sub>eq</sub> = 4 · 10<sup>-5</sup>~~  
~~5 · 10<sup>-4</sup>~~  
~~6 · 10<sup>-4</sup>~~  
~~7 · 10<sup>-4</sup>~~  
~~8 · 10<sup>-4</sup>~~  
~~9 · 10<sup>-4</sup>~~

Druck P/mbar	Druck P/mbar	Zeit s	Zeit s	Zeit s	Zeit s
$P_{eq} = 4 \cdot 10^{-5}$	$P_{eq} = 4 \cdot 10^{-5}$	<del>4,95</del>	<del>5,49</del>	<del>5,40</del>	<del>5,24</del>
$P_{eq} = 4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	<del>4,95</del>	<del>2,66</del>	<del>5,40</del>	<del>5,24</del>
$5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	<del>4,93</del>	<del>8,52</del>	<del>8,43</del>	<del>7,69</del>
$6 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	<del>30,73</del>	<del>11,81</del>	<del>11,70</del>	<del>10,23</del>
$7 \cdot 10^{-4}$	$P_{eq} = 6 \cdot 10^{-5}$	<del>0,62</del>	<del>1,04</del>	<del>0,87</del>	<del>2</del>
$8 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	<del>2,25</del>	<del>2,48</del>	<del>3,16</del>	<del>3</del>
$9 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	<del>4,10</del>	<del>4,43</del>	<del>4,79</del>	
	$4 \cdot 10^{-4}$	<del>5,82</del>	<del>6,13</del>	<del>7,34</del>	
	$5 \cdot 10^{-4}$				
$P_{eq} = 8 \cdot 10^{-5}$					
	<del>2 · 10<sup>-4</sup></del>	<del>1,47</del>	<del>1,76</del>	<del>1,25</del>	
	<del>4 · 10<sup>-4</sup></del>	<del>2,82</del>	<del>2,36</del>	<del>2,17</del>	
	<del>5 · 10<sup>-4</sup></del>	<del>4,34</del>	<del>3,38</del>	<del>3,37</del>	
	<del>6 · 10<sup>-4</sup></del>	<del>6,37</del>	<del>5,48</del>	<del>4,42</del>	
$P_{eq} = 10^{-4}$					
	$4 \cdot 10^{-4}$	$2,18$	$2,01$	$2,01$	
	$5 \cdot 10^{-4}$	$3,25$	$2,43$	$2,51$	
	$6 \cdot 10^{-4}$	$4,45$	$3,34$	$3,34$	
	$7 \cdot 10^{-4}$	$5,85$	$4,30$	$4,22$	

27.09.15  
G.G.

## Volumenbestimmung

### Rezipient

Anschluss:

$$D = 38,5 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm} \quad D_{außen} = 15,5 \text{ cm} \pm 5 \text{ mm}$$

$$L = 13 \text{ cm} \pm 5 \text{ mm} \quad L = 48 \text{ cm} \pm 10 \text{ mm}$$

$$d_{Wand} = 8 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$$

Ende

$$D = 28 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ mm}$$

$$d_{Wand} = 2 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$$

$$L = 75 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$$

Seitenansatz

$$D_{außen} = (38,3 \pm 0,9) \text{ mm}$$

$$d_{Wand} = 4 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$$

$$L = (8,5 \pm 0,5) \text{ cm}$$

Röhr (Rezipient  $\rightarrow$  X-Stück):

$$D = 38,0 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$$

$$L = 40 \text{ cm} \pm 0,5 \text{ cm}$$

### Großes X-Stück

$$L_0 = (13 \pm 0,5) \text{ cm}$$

$$D_G = (39,5 \pm 0,15) \text{ mm}$$

$$D_{außen} = (18 \pm 0,1) \text{ mm}$$

$$L_{H_1} = (35 \pm 0,1) \text{ mm}$$

$$L_{H_2} = (35 \pm 0,1) \text{ mm}$$

### Heschweihl (x4)

$$D = (15,3 \pm 0,1) \text{ mm}$$

$$L = (77 \pm 5) \text{ mm}$$

$$L = (77 \pm 5) \text{ mm}$$

27.05.15

5.9.2

### T-Stück

$$L_9 = (129 \pm 5) \text{ mm}$$

$$D = (40 \pm 1) \text{ mm}$$

$$L_K = (46 \pm 1) \text{ mm}$$

### T-Stück (Turbo)

$$D = (40 \pm 1) \text{ mm}$$

$$L_9 = (11 \pm 2) \text{ cm}$$

$$L_K = (6 \pm 1) \text{ cm}$$

### Kleines Rohr X2

$$L = (24 \pm 0,5) \text{ cm}$$

$$D = (15 \pm 2) \text{ mm}$$

### Ventil (Turbo)

$$L = (33 \pm 5) \text{ mm}$$

$$D = (40 \pm 1) \text{ mm}$$

### Flansch L (Turbo)

$$L = (52 \pm 5) \text{ mm}$$

$$D = (40 \pm 1) \text{ mm}$$

### Rohr (lang & breit)

$$L = (40 \pm 5) \text{ mm}$$

$$D = (15, \pm 2) \text{ mm}$$

### Kleines T-Stück

$$L_9 = (8 \pm 0,5) \text{ cm}$$

$$D = (11, \pm 0,1) \text{ mm}$$

$$L_K = (36 \pm 5) \text{ mm}$$

### Kleines X-Stück

$$L_9 = (80 \pm 5) \text{ mm}$$

$$L_K = (70 \pm 5) \text{ mm}$$

$$D = (11 \pm 0,1) \text{ mm}$$

Ventile offen  $\Rightarrow$  ganz +

Ventile geschlossen  $\Rightarrow$  halb

27.05.15  
G. G.

gerald.schmidt@fu-dortmund.de  
Raum 22 / DELTA