

V70

Der Vakuumversuch

Ben Werner Grobecker
ben.grobecker@tu-dortmund.de

Sebastian Rüßmann
sebastian.ruessmann@tu-dortmund.de

Durchführung: 21.04.2022

Abgabe: 5. Mai 2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Grundlagen	3
2.2	Vakuumerzeugung	6
2.2.1	Grundlagen	6
2.2.2	Drehschiebervakuumpumpe	7
2.2.3	Turbomolekularpumpe	8
2.3	Druckmessung	9
3	Durchführung	10
4	Auswertung	10
5	Diskussion	10
	Literatur	11

1 Zielsetzung

Der Vakuumversuch besteht aus 4 verschiedenen Messreihen, mit denen das effektive Saugvermögen zweier Vakuumpumpen verschiedener Bauart bestimmt werden. Dabei handelt es sich um eine *Drehschieber-* und eine *Turbomolekularpumpe*, welche durch verschiedene Prozesse ein Vakuum unterschiedlicher Güte erzeugen. Zur Bestimmung der Saugleistung werden die *Evakuierungskurven* der beiden Pumpen bestimmt sowie jeweils eine *Leckratenmessung* durchgeführt.

2 Theorie

2.1 Grundlagen

Vakuum

Für den Begriff des Vakuums finden sich verschiedenen Definitionen wie die von Wikipedia, [9, Vakuum ist in der technischen Praxis ein Raum mit weitgehender Abwesenheit von Materie.] normgerecht ist Vakuum definiert als [1, der Zustand eines Gases, wenn in einem Behälter der Druck des Gases und damit die Teilchenzahldichte niedriger ist als außerhalb oder wenn der Druck des Gases niedriger ist als 300 mbar, d. h. kleiner als der niedrigste auf der Erdoberfläche vorkommende Atmosphärendruck.] Fest steht, der Vakuum Begriff hängt mit dem Begriff des Druckes zusammen, dadurch gibt es nicht das eine Vakuum, sondern vielmehr eine Druckabhängige Gliederung, welche in Abbildung (1) dargestellt ist. Zusätzlich sind in der Graphik Typische Vakuums Anwendungen, sowie Arbeitsbereiche Verschiedener Pump Bauweisen aufgelistet.

Druck

Der Druck ist definiert als die normale Kraft F , die auf eine Fläche A wirkt

$$p = \frac{F}{A}. \quad (1)$$

Der Einfachheit halber gehen wir im folgendem davon aus, dass es sich bei den verwendeten Gasen um *Ideale Gase* handelt. Diese besitzen im Vergleich zu reellen Gasen folgende vereinfachende Eigenschaften:

- Ideale Gasteilchen bewegen sich frei und wechselwirken nur durch elastische Stöße
- Ideale Gasteilchen punktförmig
- Ideale Gasteilchen Vibrieren und Rotieren nicht

Nun lässt sich der Druck als Impulsübertrag zwischen den Gasteilchen und der Fläche A verstehen.

Viele Gase treten nicht im einheitlichen Zustand auf sondern als Gemisch. So ist die Luft größtenteils ein Gemisch aus Stickstoff (78%) und Sauerstoff (21%) [3]. Dafür wird

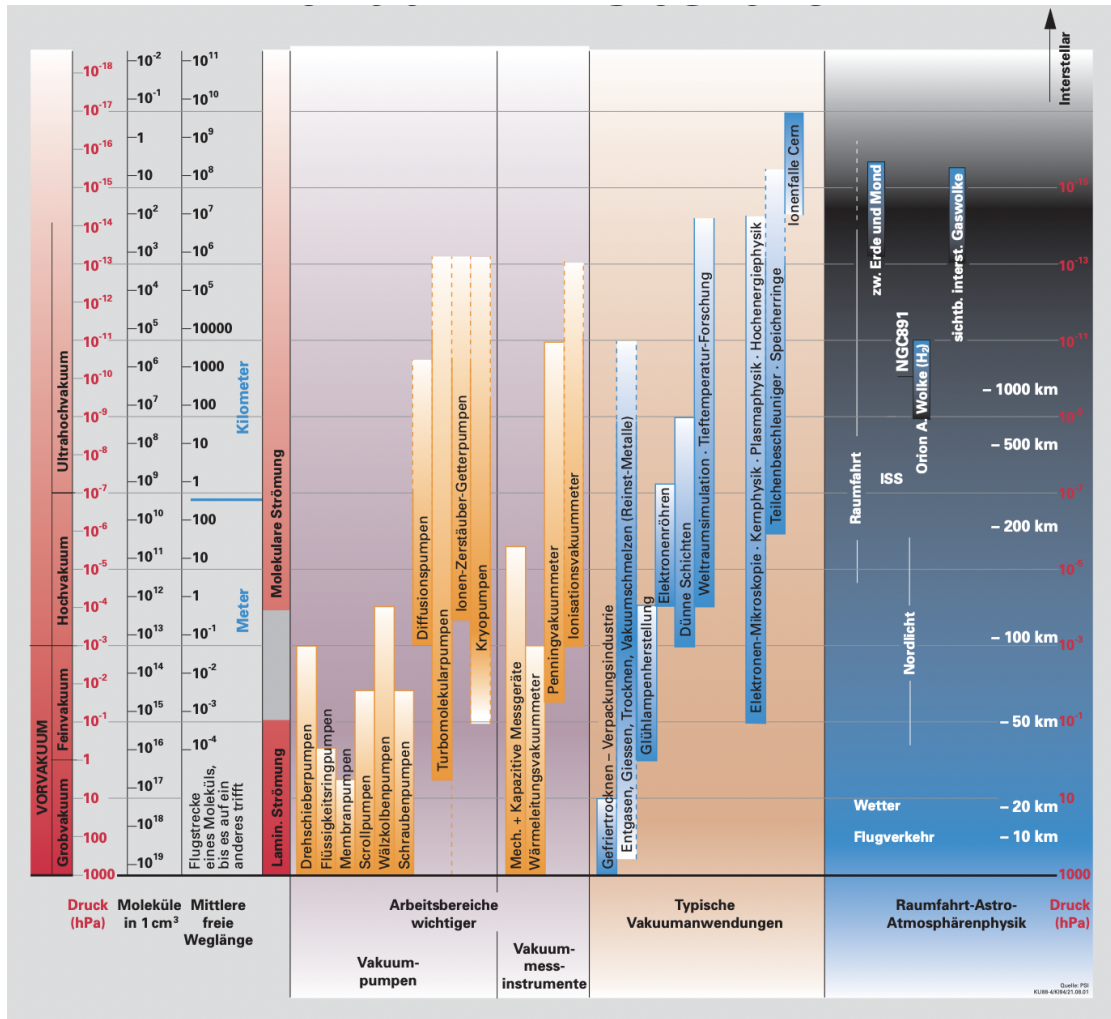


Abbildung 1: Vakuum im Überblick [8]

der Partialdruck p_p eingeführt, welcher den Druck beschreibt den jede Gaskomponente unabhängig von einander ausübt. Die Summe der Partialdrücke ergibt den Totaldruck

$$p = \sum p_p. \quad (2)$$

Ideale Gasgleichung

Wichtig zur Untersuchung von Gasen und somit auch für den Vakuumversuch sind neben dem *Druck* die Kennzahlen *Volumen* V und *Temperatur* T . Ihr Zusammenhang ist bei Idealen Gasen gegeben durch die ideale Gasgleichung

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

Dabei steht k_b für die Boltzmann-Konstante ¹

Mittlere freie Weglänge

Der Fluss und die Ausbreitung von Gasmolekülen wird immer wieder unterbrochen durch Zusammenstöße zwischen den Gasteilchen. Der mittlere Weg, den ein Teilchen zurücklegen kann, bevor es mit einem anderen kollidiert, wird die *mittlere freie Weglänge* \tilde{l} genannt. Sie ist abhängig von der Geschwindigkeit der Teilchen, welche durch die Temperatur beschrieben werden kann und der Dichte der Teilchen, welche proportional zum Druck ist.

Strömungsarten

Abhängig von der mittleren freien Weglänge und der Ausdehnung des Strömungskanal strömen die Gase unterschiedlich durch den Aufbau. Da \tilde{l} proportional zum Druck ist ändert sich die Strömungsart im besser werdenden Vakuum.

Herrscht im Aufbau ein Grobvakuum kommt es zu vielen Kollisionen zwischen den Teilchen, aber zu wenigen zwischen Teilchen und Gefäßwand. Die mittlere freie Weglänge ist deutlich kleiner als die Gefäßabmessungen. Diese Strömung wird *Visköse Strömung* genannt und kann in laminar und turbulent unterteilt werden. Bei der laminaren Strömung bleiben die Gasteilchen in parallelen Schichten mit verschiedener Geschwindigkeit. Mit hohen Geschwindigkeiten lösen sich diese Schichten auf, sodass von einer turbulenten Strömung gesprochen wird. Diese gilt es wenn möglich in der Vakuumtechnik zu vermeiden, da sie eine höhere Pumpleistung verlangen.

Im Hoch- und Ultrahochvakuum geht die visköse Strömung in eine molekulare Strömung über. Die mittlere freie Weglänge ist nun deutlich größer als die Ausdehnung der Teilchen, damit findet so gut wie keine Wechselwirkung zwischen den Gasteilchen statt, sondern nur noch mit den Gefäßwänden. Dies wird später besonders für die Turbomolekularpumpe wichtig. In Abbildung (2) sind die verschiedenen Strömungsarten modellhaft dargestellt.

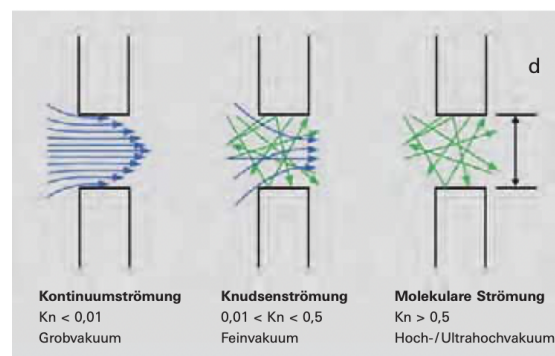


Abbildung 2: Profile der Verschiedenen Strömungsarten [8]

¹ $k_b = 1,3806649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

Leitwert

In den Röhren zwischen des Rezipienten² und der Vakuum pumpen kommt es zwischen dem Gas und den Wänden zu Reibung, eben so zwischen den Gasteilchen selbst. Dies führt zu einem Strömungswiderstand W dessen Kehrwert den Leitwert L bildet

$$L = \frac{1}{W}. \quad (4)$$

Diese Gesetzmäßigkeit ist analog zum ohmschen Widerstand. Offensichtlich hängt der Leitwert von der vorliegenden Strömungsart ab und damit in Hinsicht der Vakuumphysik vom Druck. Dieser Zusammenhang zwischen Druck und Leitwert ist in Abbildung 3 dargestellt. Es ist zu beobachten, dass gerade für schlechte Vakuums der Leitwert besonders hoch ist, welches sich in einem Saugleistungsverlust der Pumpen bemerkbar macht.

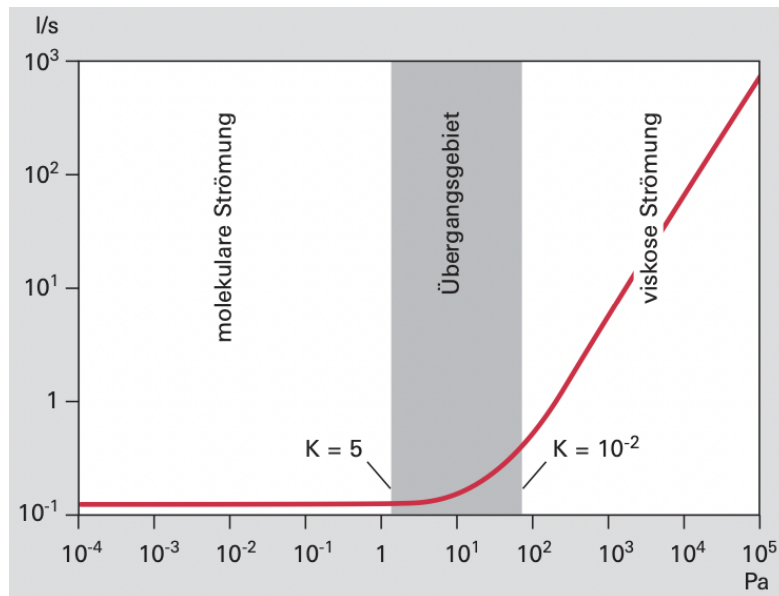


Abbildung 3: Leitwert eines runden glatten Rohrs [8]

2.2 Vakuumerzeugung

2.2.1 Grundlagen

Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, gibt es eine Vielzahl verschiedener Pumpen, die sich in drei große Kategorien einteilen lassen, Verdränger, kinetische und Gasbindende Vakuumpumpen. Dabei liegt der Fokus in diesem Versuch auf der Drehschieberpumpe und der Turbomolekularpumpe (rot markiert). Beide Pumpen arbeiten in einem anderen Druck Bereich vgl. Abbildung(1), sodass die Drehschieberpumpe der Turbomolekularpumpe vorangestellt werden muss vgl. Kapitel 3. Klassifiziert werden die Pumpen neben ihrem Funktionsprinzip durch ihrem *Saugvermögen*, *Saugleistung* und ihrem *Enddruck*.

²Vakuumkammer

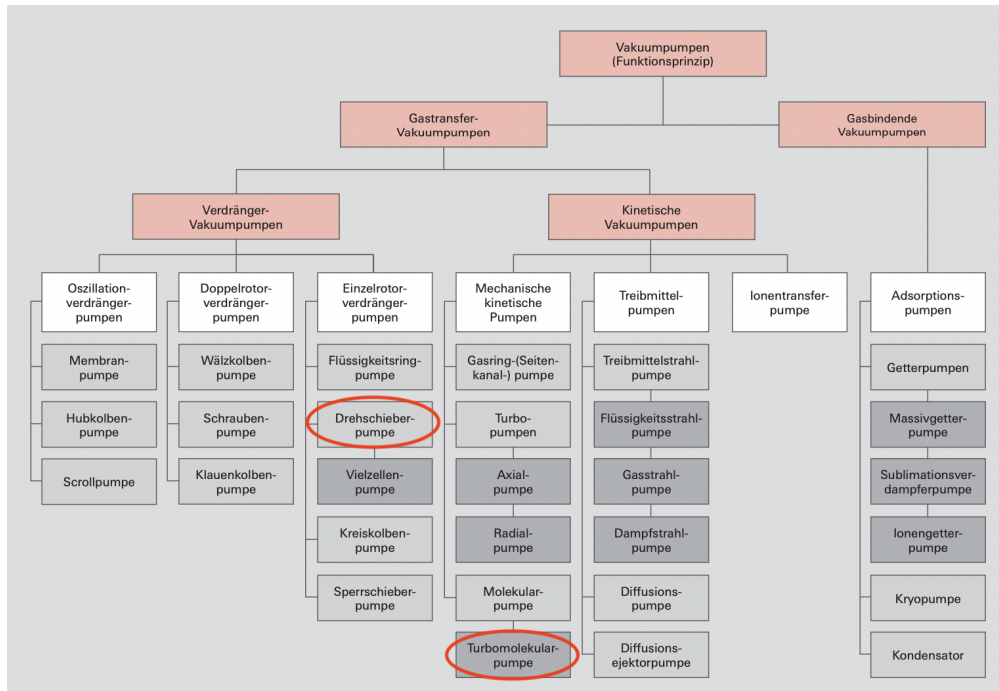


Abbildung 4: Übersicht Vakuumpumpen[8]

Saugvermögen und Saugleistung

Das Saugvermögen ist gegeben durch

$$S = \frac{dV}{dt} \quad (5)$$

Sie gibt den mittlere Volumenstrom an, der durch die Ansaugöffnung der Vakuumpumpe pro Zeit durchgesetzt wird.

Die Saugleistung gibt das Saugvermögen in Abhängigkeit vom Ansaugdruck an

$$q = S \cdot p, \quad (6)$$

da das Saugvermögen mit abnehmendem Druck ebenfalls abnimmt.

Enddruck

Der Enddruck ist der niedrigste Druck, den eine Pumpe theoretisch erreichen kann. Sie nähert sich ihm asymptotisch und kann ihn niemals ganz erreichen, da nahe des Enddruckes die Saugleistung null beträgt. In diesem Bereich arbeitet die Pumpe ausschließlich gegen ihren Rücklaufstrom.

2.2.2 Drehschiebervakuumpumpe

Die Drehschieberpumpe besteht aus einem asymmetrisch eingesetzten Schieber, welcher sich dreht und dadurch das Gas vom Einlassventil zum Auslassventil transportiert.

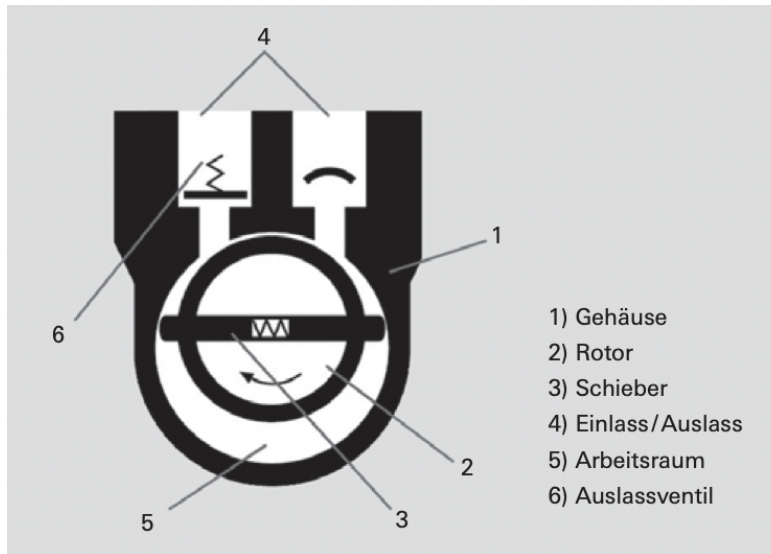


Abbildung 5: Aufbau einer Drehschieberpumpe [8]

Abgedichtet wird der Aufbau durch eine dünne Ölschicht an den Innenwänden. Die Funktionsweise lässt sich gut durch die ideale Gasgleichung verstehen (3). Der Schieber entspannt zuerst das Gas, wodurch der Druck abnimmt (bei konstanter Temperatur). Beim Auslassventil findet der inverse Prozess statt. Das Gas wird komprimiert, wodurch der Druck steigt und das Medium aus dem Ventil gedrückt wird.

Die Drehschieberpumpe kann nur einen vergleichsweise hohen Enddruck erreichen, da der Ölfilm nur begrenzt dichthält. Gleichzeitig gelangt auch immer ein kleiner Ölanteil in den Rezipienten.

2.2.3 Turbomolekularpumpe

Die Turbomolekularpumpe ist ähnlich einer Turbine aufgebaut. Sie besteht aus einem sich schnell drehendem Rotor und einem Stator vgl. Abbildung (6). Das zugrundeliegende Funktionsprinzip ist die Impulsübertragung. Die Rotorblätter absorbieren die Gasmoleküle, wenn diese die Rotorblätter wieder verlassen, besitzen sie zusätzlich zu ihrer thermischen Geschwindigkeit den Impuls des Rotors. Damit die zusätzliche Geschwindigkeit nicht durch Kollisionen unter den Gasteilchen verloren geht, muss die mittlere freie Weglänge größer sein als der Schaufelabstand. Dies ist nur bei der molekularen Strömung der Fall. Daher benötigt die Turbomolekularpumpe eine Vorvakuumpumpe, welche den Druck entsprechend weit reduziert.

Der Vorteil der Turbomolekularpumpe gegenüber der Drehschieberpumpe ist, dass sie ohne Öl auskommt. Dadurch sind wesentlich niedrigere Enddrücke zu erreichen.

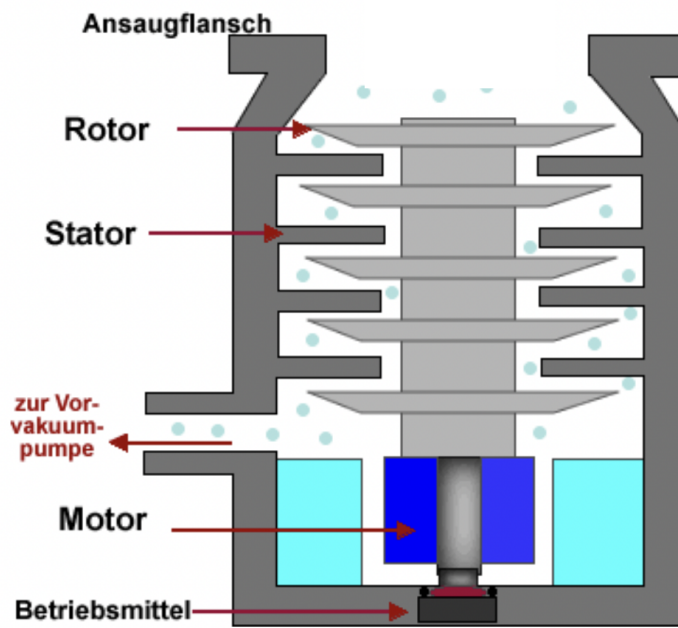


Abbildung 6: Skizzenhafter Aufbau einer Turbomolekularpumpe [2]

2.3 Druckmessung

Der Druck ist definiert als Kraft pro Fläche. Dadurch lässt er sich direkt durch die Kraft, welche auf eine Membran wirkt, messen. Die Messung der Auslenkung erfolgt beispielsweise durch einen Piezokristall. Nimmt der gemessene Druck allerdings stark ab, ist die auf die Membran wirkende Kraft irgendwann so klein, dass keine Auslenkung mehr gemessen werden kann. Der Druck muss ab diesen Punkt indirekt gemessen werden. Dies kann durch den Zusammenhang zwischen Druck und Wärmeleitfähigkeit oder auch durch die Beobachtung Ionisationsströme geschehen.

Pirani-Vakuummeter

In einem gewissen Druckbereich vgl. Abbildung (7) ist die Wärmeleitfähigkeit linear abhängig vom Druck. In diesem Bereich kann der Druck mithilfe eines Pirani-Vakuummeter gemessen werden. Im Zentrum des Messgerätes wird ein Draht auf eine konstante Temperatur geheizt. Durch das umgebene Gas wird die Wärme an eine Rohrwand übertragen. Die dort gemessene Temperatur gibt Aufschluss über den Druck. Zu beachten ist das jedes Gas eine eigene Kennlinie besitzt, auf die das Messgerät eingestellt werden muss.

Kalt-/Heißkathode Ionisationvakuummeter

Ionisationsvakuummeter bestehen aus einer Kathode und einer Anode, welche in einem Magnetfeld eingelassen sind. An der Kathode werden nun Elektronen emittiert,

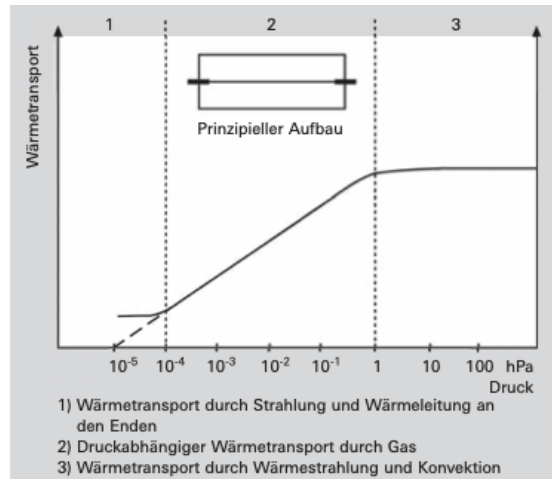


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Druck [8]

hierbei unterscheiden sich Kalt- und Heißkathode. Bei der Heißkathode geschieht dies durch den glühelektrischen Effekt, bei der Kaltkathode durch eine angelegte Spannung. Die emittierten Elektronen fliegen durch die Lorentzkraft auf Kreisbahnen gezwungen Richtung Anode. Dabei Ionisieren sie die sich im Aufbau befindenden Gasteilchen. Der dadurch gemessene Ionisationsstrom ist proportional zum Druck. Die Kreisbahn ist dafür notwendig, um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, ein Gasmolekül zu ionisieren.

3 Durchführung

4 Auswertung

5 Diskussion

Literatur

- [1] DIN 28400-1. *Titel (deutsch): Vakuumtechnik; Benennung und Definitionen; Allgemeine Benennungen*. 1990-05.
- [2] Chemgaroo. [Online; Stand 4. Mai 2022]. URL: http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/3/anc/masse/ms_vakuumsystem.vlu/Page/vsc/de/ch/3/anc/masse/2_massenspektrometer/2_2_vakuumsystem/2_2_2_turbop/turbomol_ms5ht0202.vscml.html.
- [3] Umwelt und Geologie Hessisches Landesamt für Naturschutz. [Online; Stand 4. Mai 2022]. URL: <https://www.hlnug.de/themen/luft/grundlagen>.
- [4] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [5] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [6] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [7] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [8] Pfeifer Vacuum. *The Vacuum Technology Book Volume 2*.
- [9] Wikipedia. *Vakuum — Wikipedia, die freie Enzyklopädie*. [Online; Stand 4. Mai 2022]. 2022. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Vakuum&oldid=221079316>.