

Validierung des Vakuum- und LN2-Systems für das PENeLOPE Experiment

Validation of the Vakuum- and LN2-System for the PENeLOPE
Experiment

Hendrik Hartmond

Institute for Hadronic Structure and Fundamental Symmetries (E18)
Physik-Department Technische Universität München

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades

Bachelor of Science

an der Fakultät für Physik der Technischen Universität München.

Themensteller

Prof. Dr. Stephan Paul

Zweitgutachter

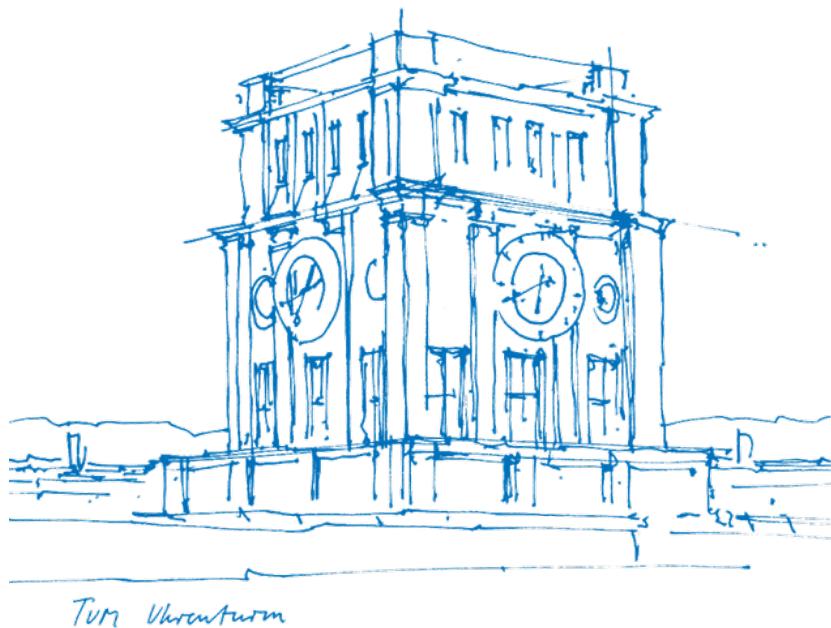
Prof. Dr. Bruno Leibundgut

Betreut von

Rainer Stoepler

Eingereicht am

München, den 17.09.2020



Abstrakt

Um die Lebensdauer des freien Neutrons genauer zu vermessen - Ziel auf $\pm 0.1\text{ s}$ - wurde beschlossen ein umfangreicheres Experiment durchzuführen. In diesem sollen ultra-kalte Neutronen genutzt werden. Man nutzt deren magnetisches Moment, um sie in einem magnetischen Gradientenfeld ab zu lenken und somit speichern zu können. Um ausreichend hohe magnetische Gradienten zu erzielen, werden supraleitende Spulen genutzt. Diese operieren bei der Verdampfungstemperatur von Helium (4 K). Um die Energieverluste zu minimieren, ist der Aufbau mit einem Isulationsvakuum und einem darin befindlichen Stickstoffschild ausgestattet. Um den Helium-Verbrauch zu verringern, wird angestrebt, den Magneten zuerst mittels flüssig-Stickstoff herab zu kühlen und erst darauf folgend flüssig-Helium zu nutzen.

Der Aufbau wurde geplant und hergestellt und an die Technische Universität München geliefert. Inhalt dieser Arbeit ist die Funktionsweise, der Aufbau und die Validierung des Vakuum Systems sowie der Kühlung durch Flüssigstickstoff (LN2).

Nomenklatur

\bar{I}	Freie Weglänge
\bar{p}	Durchschnittlicher Druck
μ	Viskosität
ω_l	Larmorfrequenz
ρ	Dichte
$\vec{\mu}$	Magnetisches Moment
A	Fläche
B	Magnetfeld
C	(Rohr-) Leitwert
c_v	Spezifische Wärmekapazität
d_m	Nenndurchmesser
F	Kraft
g	Gravitationskonstante
h	Höhe
k	Konstante
k_b	Bolzmannfaktor
K_n	Knudsenszahl
l	Länge
M	Molare Masse
m	Masse
p	Druck
Q	Innere Energie
q_{pV}	pV-Durchfluss
R	Universelle Gaskonstante
S	Übertragunsmatrix
T	Thermeperatur
t	Zeit

V	Volumen
V_g	Gravitationspotential
V_m	Magnetisches Potential

Inhaltsverzeichnis

Abstrakt	i
Nomenklatur	iii
1 Neutronen und PENELOPE	1
1.1 Neutronen und ultra kalte Neutronen	1
1.1.1 Temperatur	1
1.1.2 Interaktionen	1
1.2 Lebensdauer	2
1.2.1 Strahlexperimente	2
1.2.2 Speicherexperimente	2
1.3 PENELOPE	3
1.3.1 Aufbau	3
1.3.2 Funktionsweise	3
2 Numerische Ableitung	7
2.1 Minimale Fehlerquadrate	7
2.2 LOWESS und LOESS	7
2.3 Differenzieren	8
2.4 Differenzieren von Ausreißerbehafteten Treppenfunktionen	9
3 Vakuum Theorie	13
3.1 Vakuumklassen	13
3.2 Strömungsarten	13
3.3 Adsorbtion, Absorbtion und Desorption	14
3.4 Sensorik	14
3.5 Pumpen	14
3.5.1 Wälzkolbenpumpe	14
3.5.2 Turbomolekularpumpe	15
3.5.3 Kryopumpe	15
3.6 Leckraten	16
4 Vakuum Messung	17
4.1 Pumpgeschwindigkeit	17
4.2 Leckrate	18
5 Kühlung Theorie	23
5.1 Thermisches Modell	23
5.2 Wärmeleitung	23
5.3 Konvektion	23
5.4 Wärmestrahlung	23
5.5 Rückrechnung	24
6 Kühlung Messung	25
6.1 Thermaler Aufbau PENELOPE	25

6.2	Messverfahren	25
6.2.1	Temperatur	25
6.2.2	Stickstofffluss	27
6.2.3	Messwertaufname	27
6.2.4	Auswertung	27
7	Fazit	33
A	Python Code LOWESS	35
	Literaturverzeichnis	37

1 Neutronen und PNeLOPE

1.1 Neutronen und ultra kalte Neutronen

Neutronen bilden im Zusammenschluss mit Protonen als Kerne von Atomen den Großteil der heutigen Materie.

1.1.1 Temperatur

Ordnungsparameter zur Klassifizierung von Neutronen ist die kinetische Energie. Bei Energien oberhalb von 3 meV, was einer Temperatur von 50 K entspricht, ist die Rede von thermischen Neutronen. Darunter wird von kalten Neutronen gesprochen. Bei Energien unterhalb von 300 neV, was einer Temperatur von unter 1 mK entspricht, spricht man von ultra-kalten Neutronen.

1.1.2 Interaktionen

Gravitation

Aufgrund seiner Masse unterliegt das freie Neutron der Gravitation. Das Potential beziffert sich durch

$$V_g = m \cdot g \cdot h = 102 \times 10^{-9} \text{ eVm}^{-1} \cdot h \quad (1.1)$$

Für ultra-kalte Neutronen heißt das, dass sie ein Gefäß mit einem Meter Höhe nicht nach oben verlassen können.

Magnetische Interaktion

Das Neutron besitzt keine elektrische Ladung, interagiert also nicht elektrisch. Jedoch besitzt es Spin 1/2 und ein magnetisches Moment der Höhe $-1.913\,042\,73(45) \mu_N$ [1]. Ein inhomogenes Magnetfeld wirkt also die Kraft

$$F_m = -\nabla V_m = \nabla(\vec{\mu} \cdot B(r)) = \pm |\vec{\mu}| \cdot \nabla |B(r)| \quad (1.2)$$

aus. Dabei hängt das Vorzeichen von der Ausrichtung des Spins relativ zum Magnetfeld ab. Die vorhandenen Neutronen teilen sich also auf in solche, die sich zu einem höher werden Magnetfeld hin bewegen -zu Englisch High Field Seekers (kurz HFS)- und solche, die sich von einem höher werdenden Magnetfeld weg bewegen -zu Englisch Low Field Seekers (kurz LFS)- auf. Diese Ausrichtung bleibt im adiabatischen Fall erhalten. Bedingung für diesen ist

$$\frac{\dot{B}}{B} \ll \omega_l \quad (1.3)$$

Interaktion mit Materie

Neutronen können von Kristallstrukturen reflektiert, transmittiert sowie absorbiert werden. Die Reflexionsrate nimmt mit geringerer Temperatur und somit größerer Compton-Wellenlänge zu. Zentrale Abhängigkeit besteht von dem Fermipotential des Materials. Durch gezielte Wahl lassen sich damit sowohl Absorber als auch Reflektoren realisieren. Für eine genauere quantenmechanische Erläuterung sei auf [2] verwiesen.

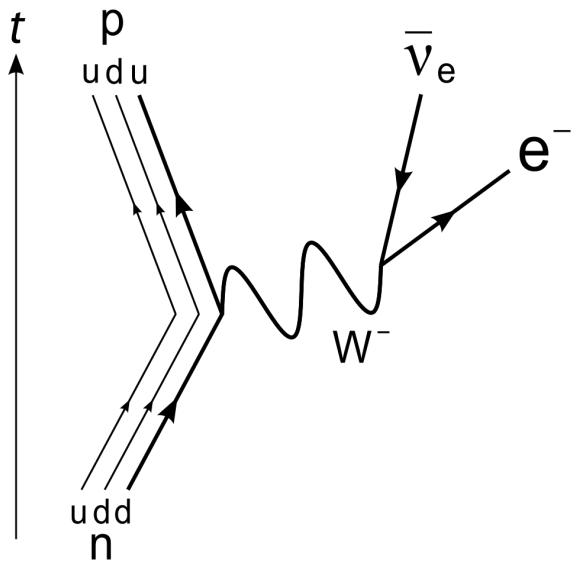


Abbildung 1.1 Feynman-Diagramm des Neutronzerfalls

1.2 Lebensdauer

Im Gegensatz zu in Kernen gebundenen Neutronen ist das freie Neutron nicht stabil, sondern zerfällt über den Betazerfall in ein Proton, ein Elektron sowie ein Elektron-Antineutrino.

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e + 0,783\text{MeV} \quad (1.4)$$

Hierbei zerfällt ein Down-Quark über ein W-Boson zu einem Up-Quark. Abbildung 1.1 zeigt das entsprechende Feynman-Diagramm. Die Lebensdauer gibt Aussage über Element der CKM-Matrix. Damit ist sie ein wichtiges Mittel in der Verifizierung beziehungsweise Falsifizierung neuer Theorien der Teilchenphysik. Die Particle Data Group gibt als weltweites Mittel $879.4(6)\text{s}$ [1] an. Bisherige experimentelle Befunde zur Lebensdauer wurden in Abbildung 1.2 über dem Jahr ihrer Veröffentlichung aufgetragen. Es gibt zwei Arten von Experimenten zur Messung.

1.2.1 Strahlexperimente

Strahlexperimente nutzen einen Neutronenstrahl. Vermessen werden die Zerfallsprodukte, welche sich aus dem Strahl extrahieren lassen. Durch Messung der Intensität nach verschiedenen Laufzeiten, etwa durch verschiedene Abstände von der Quelle oder Variation der Energie, lässt sich die Zerfallsrate ermitteln.

Durch die Zeitdillation und somit der Verlängerung der Lebensdauer, sowie durch weitere strahlbasierte Effekte treten diverse Unsicherheiten auf, die es zu beherrschen gilt.

1.2.2 Speicherexperimente

Diese Experimente agieren nach einem einfachen Prinzip: man fülle Neutronen in ein Volumen, warte eine gewisse Zeit und schaue nach, wie viele Neutronen noch übrig sind. Durch Variation der Messdauer lässt sich die Zerfallsrate ermitteln. Zudem lassen sich die Zerfallsprodukte extrahieren und vermessen.

Die Herausforderung besteht darin, die Einflüsse durch die Speicherung zu Eliminieren. Die Nutzung von Materieflaschen ist fehlerbehaftet, wodurch die Nutzung von Magnetflaschen zu besseren Ergebnissen vorzuziehen ist.

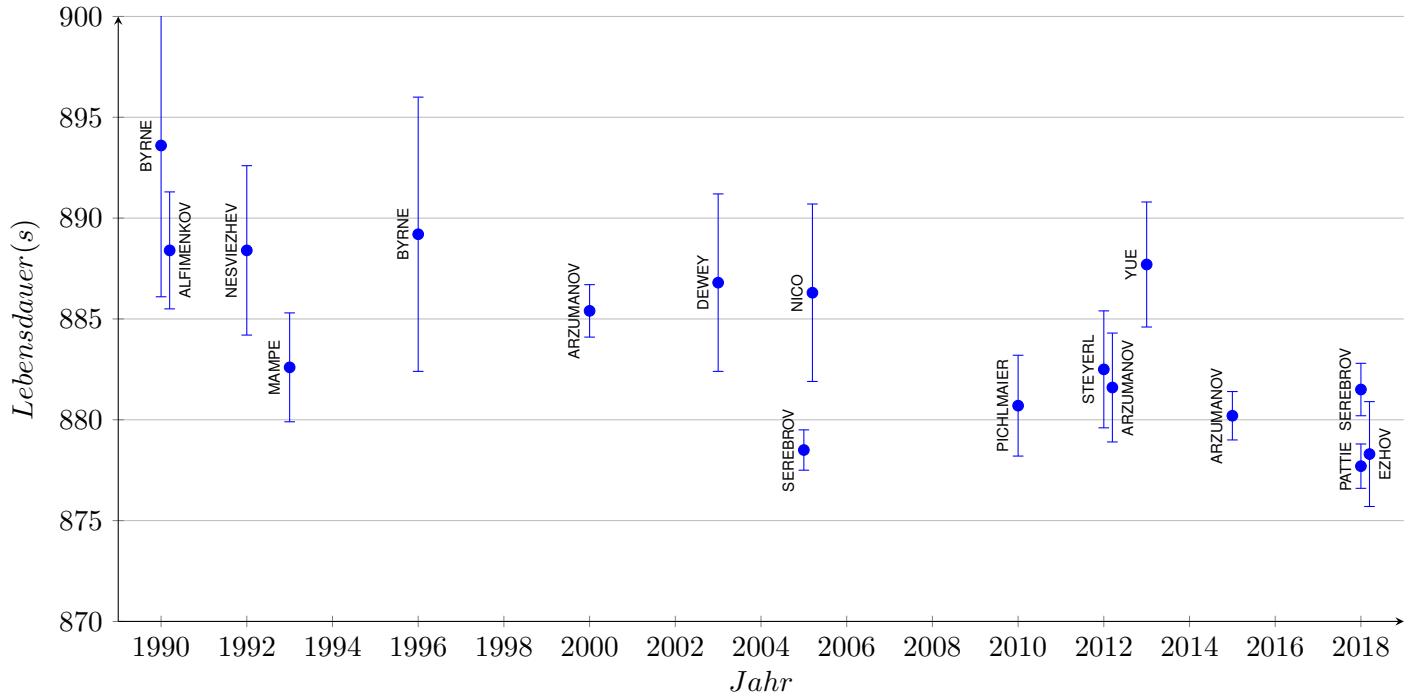


Abbildung 1.2 Bisherige Experimente zur Neutron Lebensdauer (Zeitraum 1990-2020)[1]

1.3 PENeLOPE

Um die Unsicherheit der Lebensdauer auf unter ± 0.1 s zu reduzieren, wurde ein neues Präzisions-Experiment ins Leben gerufen. Als Funktionsweise wurde die Entscheidung für eine Magnetflasche mit zusätzlicher Vermessung der Protonen, die beim Zerfall frei werden, getroffen. Daher wurde das Projekt als "Precision Experiment on the Neutron Lifetim Operating with Proton Extraction", kurz PENeLOPE benannt.

1.3.1 Aufbau

Der Aufbau ist in Abbildung 1.3 dargestellt.

Das Gradientenfeld wird durch alternierende supraleitende Spulen erzeugt. Die Magnetflasche ist hoch genug, dass der Einfluss der Gravitation ausreicht und auf einen Deckel verzichtet wird. Zur Erhaltung der Spinausrichtung wird ein tangentiales Magnetfeld eingesetzt. Diese wird durch einen wassergekühlten Hohlleiter im Zentrum erzeugt, durch den 15 kA geleitet werden. Um die ultra-kalten Neutronen nicht zu erwärmen und die supraleitenden Spulen zu kühlen, wird eine flüssig-Helium Kühlung genutzt. Zur Isolation wird ein Isolationsvakuum sowie ein Stickstoff-Schild genutzt. (Siehe Kapitel 6). Der Detektor befindet sich oberhalb des Experimentbereichs. Zur Extraktion der Protonen wird zwischen dem Flaschenboden und dem Detektor ein elektrisches Feld erzeugt.

1.3.2 Funktionsweise

Für PENeLOPE ist folgender Messzyklus angedacht (Vgl. [3]):

Vorpolarisieren

Um möglichst hohe Neutronendichten nutzen zu können, werden die von der Quelle kommenden Neutronen vorpolarisiert. Hierzu wird eine magnetische Barriere in Kombination mit einem AFP Spin flipper genutzt.[3]

Einlassen

Bei ausgeschalteten supraleitenden Spulen werden die Neutronen in das Experimentvolumen geleitet. Gehalten werden die Neutronen hier durch Reflexion an den Wänden.

Rampen

Innerhalb von 100 s werden die supraleitenden Spulen gerampt. Durch das Magnetfeld werden die Low-field-seeker von den verbleibenden high-field-seekern getrennt.

Abstreifen

Je ein ringförmiger Absorber wird an der Innen- und Außenwand des Experimenterraums entlang gefahren. Dieser absorbiert die dort vorhandenen high-field-seeker.

Messung

Über einen variablen Zeitraum werden die Zerfallprotonen detektiert.

Auslassen

Um die verbleibenden Neutronen aus dem Volumen entfernen zu können, werden die supraleitenden Spulen herunter gefahren.

Zählen

Die verbleibenden Neutronen werden aus dem Volumen gelassen und mit einem Detektor gezählt.



Abbildung 1.3 Querschnitt des PENeLOPE Aufbaus

2 Numerische Ableitung

Für die Auswertungen werden mathematische Verfahren benötigt, die im Folgenden erläutert werden.

2.1 Minimale Fehlerquadrate

Ist für eine Messreihe (x_i, y_i) mit $i = 1, 2, \dots$ eine theoretisch begründete Funktion $f(x)$ bekannt, die jedoch von zusätzlichen Parametern abhängt, so lassen die optimalen Werte für die Parameter mittels der Methode der minimalen Fehlerquadrate errechnen. Um etwas über 'optimal' besagen zu können, wird eine Bewertungsmöglichkeit benötigt. Wir nutzen die Summe der Fehlerquadrate.

$$\min \sum_i (f(x_i) - y_i)^2 \quad (2.1)$$

Dies entspricht der l_2 Norm

$$\langle A, B \rangle = \|A - B\|_{l_2} = \sqrt{\sum_i (A_i - B_i)^2} \quad (2.2)$$

mit A_i als Wert des Messpunktes und B_i gleich dem Wert der Funktion an der Position x . Die übergreifende Wurzel wird bei der Minimierung vernachlässigt, da sich diese als monotone Funktion nicht auf die Position des Minimums auswirkt. Zusätzlich lässt sich eine Gewichtung W einberechnen. Der zu minimierende Ausdruck wird damit zu

$$\sum_i W(x_i) \cdot (f(x_i) - y_i)^2 \quad (2.3)$$

Zur Durchführung der Optimierung existieren neben analytischen Lösungen diverse numerische Verfahren. In der Python Bibliothek Scipy wurde die Levenberg-Marquardt Methode zur Optimierung umgesetzt[4]. Diese wird im Folgenden verwendet.

2.2 LOWESS und LOESS

Viele Messungen weisen Ausreißer auf, also Messpunkte, die durch Fehler im Messverfahren entstanden sind und weit abseits der restlichen Messwerte liegen. Eine Möglichkeit, diese zu entfernen, bietet der LOWESS (local weighted scatterplot smoothing) beziehungsweise LOESS (locally estimated scatterplot smoothing) filter. Dies sind Glättungsalgorithmen, die aus einer Messreihe, die stochastischen Schwankungen unterliegt, eine geglättet Funktion erzeugen. In Abbildung 2.1 wird das Verfahren anhand einer Messreihe, die normalverteiltem Rauschen unterliegt und einen einzelnen Ausreißer beinhaltet, erläutert.

Bild A zeigt die originale Messreihe.

An jeder Position wird nun lokal eine Funktion angeglichen. Für LOWESS kommt eine lineare, für LOESS eine quadratische Funktion zur Anwendung. Hierbei werden die Werte so gewichtet, dass nur Messpunkte in der Nähe der betrachteten Stelle Einfluss nehmen. Eine mögliche Gewichtung für einen Fit bei x_0 ist

$$W(x, x_0) = \begin{cases} ((x - x_0)^2 - (w)^2)^2 & \text{falls } |x - y| < w \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.4)$$

mit w als zusätzlichen Parameter. Diese Funktion ist für $x_0 = 19$ in Graph B dargestellt. Der Wert dieser ersten Glättung wird als geglätteter Wert gespeichert. Das Resultat ist in Graph C aufgetragen.

In jedem Iterationsschritt wird nun ein zusätzliche Gewichtung ergänzt, die Ausreißer von Messpunkten unterscheidet. Durch die Wahl dieser Gewichtung lässt sich die Unterscheidung von Messwerten zu Messfehlern genauer spezifizieren. Bedingungen an die zusätzliche Gewichtung sind lediglich

$$W(A_i, B_i) = \max(W) \quad \text{für } A_i = B_i \quad (2.5)$$

$$W(A_i, B_i) \rightarrow 0 \quad \text{für } |A_i - B_i| \rightarrow \infty \quad (2.6)$$

$$W(A_i, B_i) \geq 0 \quad \text{für alle } A_i, B_i \quad (2.7)$$

Eine mögliche Zusatzgewichtung ist

$$W(x) = \frac{1}{(\frac{y_{mess}}{y_{fitted}})^6 + (\frac{y_{mess}}{y_{fitted}})^6} \quad (2.8)$$

Die beiden Gewichtungen multiplizieren sich. Die sich entsprechend ergebende erweiterte Gewichtungsfunktion für $x_0 = 19$ ist in Graph D dargestellt.

Mit den neuen Gewichtungen berechnet man wiederum eine neue geglättete Datenreihe. Für das Beispiel ist diese in Graph E eingezeichnet. Es zeigt sich, dass bereits nach einer einzigen Iteration die Schwankung stark verringert wurde und der Messfehler nicht mehr auftaucht. Bei Bedarf können mehrere Iterationsschritte, bestehen aus Aktualisieren der Gewichtungen und neu berechnen der Glättung, durchgeführt werden.

Eine Python-Funktion zur Durchführung des LOWESS Algorithmus befindet sich im Anhang A.

Glättungsverfahren sind allgemein mit Vorsicht zu genießen, da sie in unglücklichen Fällen auch Werte verfälschen können. Ebenso kann auch ein Peak, der kein Messfehler ist, gefiltert werden und somit Informationen verloren gehen.

2.3 Differenzieren

Um von einer Messreihe auf ihre Ableitung schließen zu können, liegt es nahe, bei jedem Punkt den Folgenden zu betrachten und die Steigung direkt auszurechnen

$$y'_n = \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n} \quad (2.9)$$

Dies lässt sich symmetrisch erweitern, indem man die Nachbarn auf beiden Seiten mit einbezieht

$$y'_n = \frac{\frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n} + \frac{y_{n-1} - y_n}{x_{n-1} - x_n}}{2} \quad (2.10)$$

Um stochastisches Flattern zu vermeiden, lässt sich ein Glättungsverfahren anwenden oder der beachtete Bereich weiter ausweiten.

Dies bringt jedoch Probleme bei Messreihen, deren Auflösung klein ist, d.h. die Messreihe einer Treppefunktion ähnelt. Würde man bei diesen nur die nächsten Nachbarn beachten, so wäre die errechnete Ableitung in weiten Bereichen null mit Peaks an den Stellen, an denen sich der Wert ändert. Um dies zu verhindern, kann man jene Bereiche, in denen sich der Messwert nicht ändert, zu einem Punkt zusammen fassen. Dieser Schritt ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Werden diese Punkte abgeleitet, zeigt sich die gesuchte Ableitung.

2.4 Differenzieren von Ausreißerbehafteten Treppenfunktionen

Weist eine Messreihe sowohl eine geringe Auflösung als auch Ausreißer auf, so ist vor dem Ableiten ein zusätzlicher Schritt von Nöten.

Die Messfehler lassen sich weiterhin mittels des LOWESS/LOESS Verfahrens entfernen. Hierbei werden jedoch auch die Stufen abgemildert. Das Ergebnisse einer LOWESS Glättung auf einer Treppenfunktion mit Messfehler ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

Um eine Ableitung durchführen zu können, muss die Glättung entweder weit genug gehen, um die Stufen komplett zu entfernen oder es muss die Abmilderung der Stufen rückgängig gemacht werden.

Dies lässt sich erreichen durch eine Rundung auf die ursprünglichen Stufen.

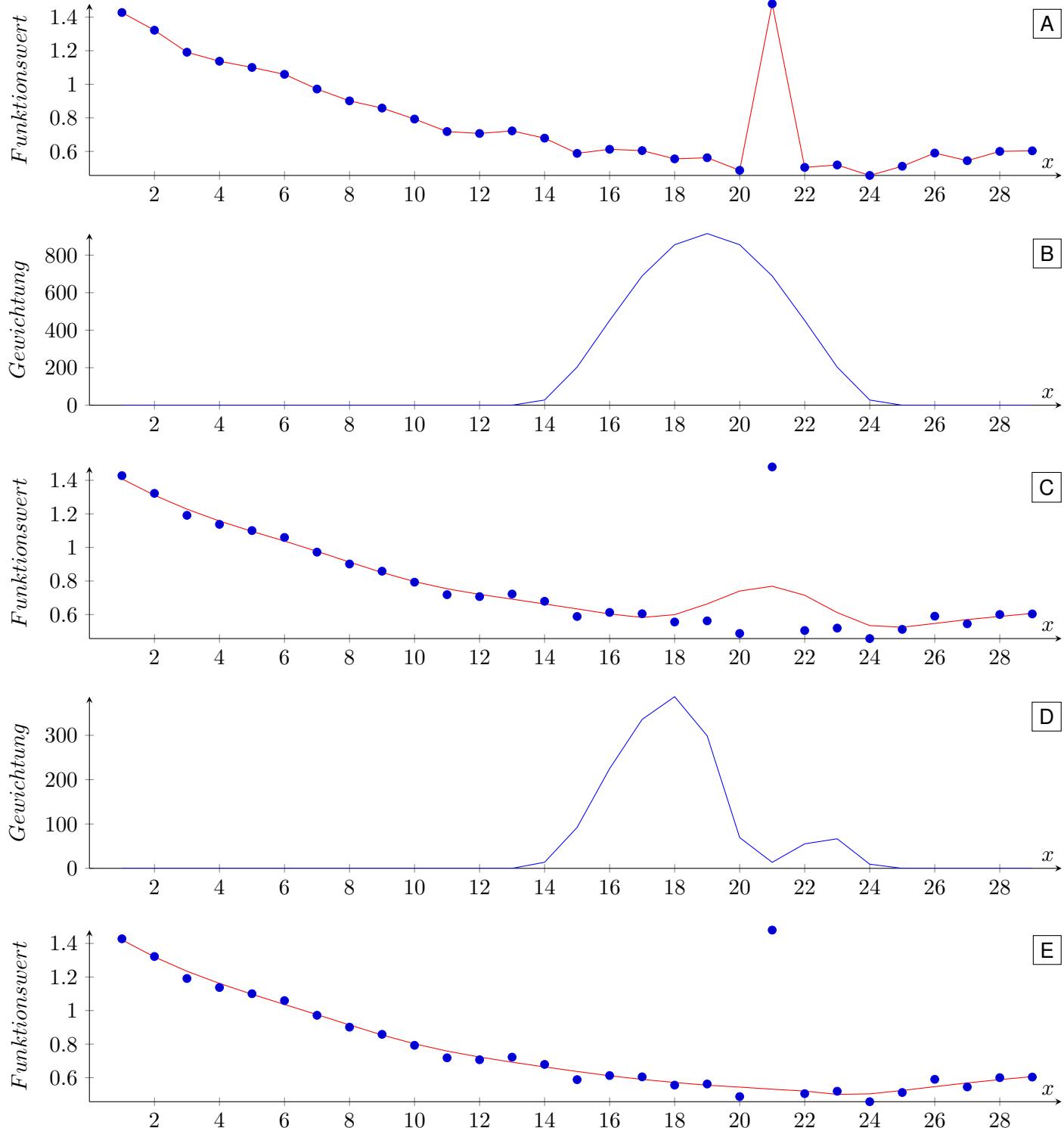


Abbildung 2.1 Erläuterung zum LOWESS Algorithmus. Die blauen Punkte in den Graphen A,C und D stellen die ursprüngliche Messreihe dar. Die roten Graphen entsprechen der Glättungsfunktion. In Graph B und D sind jeweils Gewichtungen für $x_0 = 19$ aufgetragen.

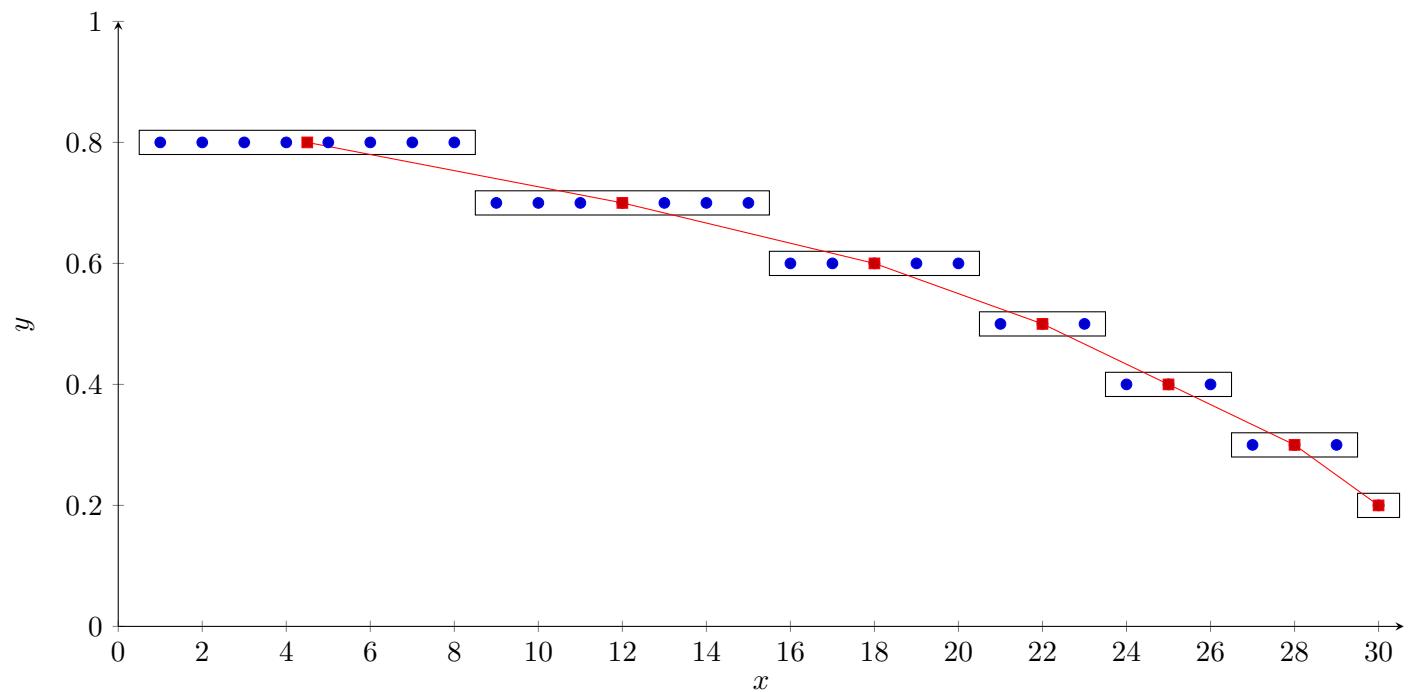


Abbildung 2.2 Erläuterung zur Ableitung von Treppenfunktions-ähnlichen Messwerten

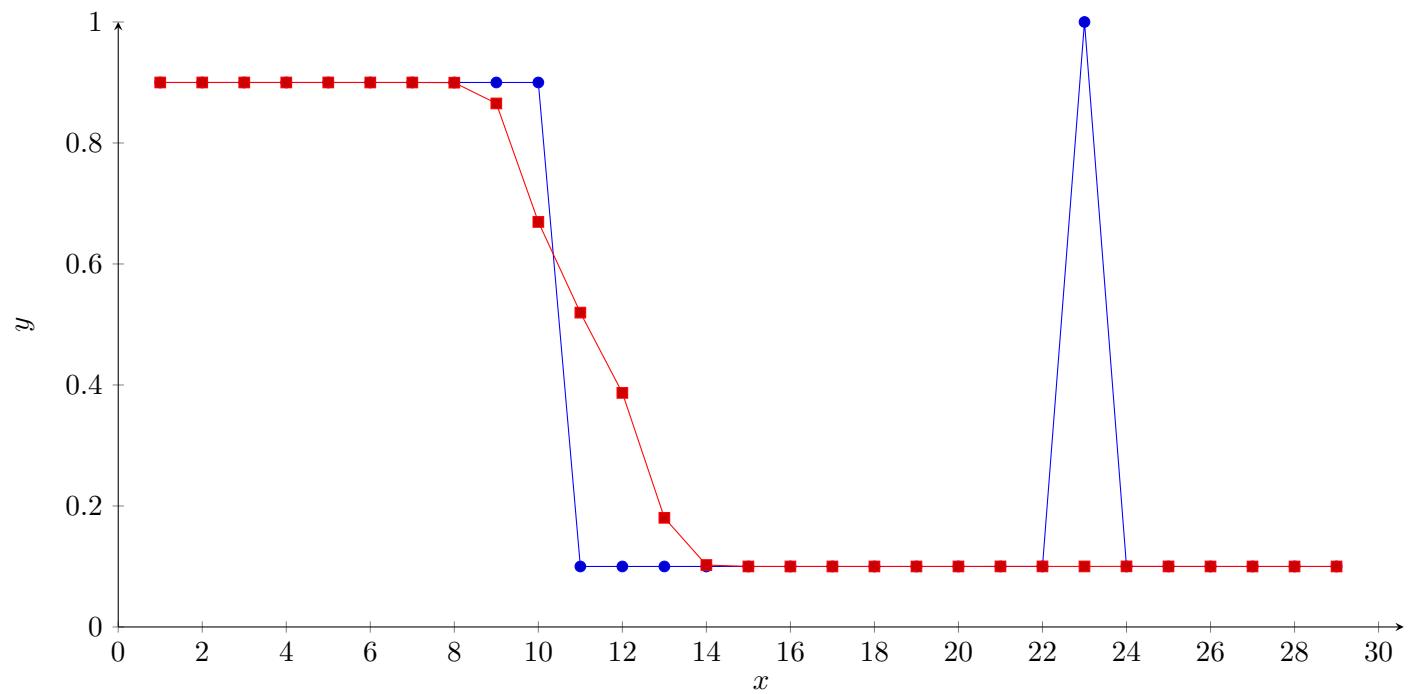


Abbildung 2.3 Erläuterung zur Filterung von Treppenfunktions-ähnlichen Messreihen

3 Vakuum Theorie

3.1 Vakuumklassen

In der DIN 28400-1 wird Vakuum definiert als "Zustand eines Gases, wenn in einem Behälter der Druck des Gases und damit die Teilchenanzahl dichte 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" [5]. Weiter unterteilt wird der Begriff in Vakuumklassen. Eine Auflistung findet sich in Tabelle 3.1. Für die Anwendungen in PENELOPE werden Vakua im Ultrahochvakuum mit Drucker unter 1×10^{-8} mbar angestrebt.

Tabelle 3.1 Vakuumklassen

Klasse	Druckbereich	Teilchendichte
Grobvakuum	1×10^3 bis 1 mbar	2.5×10^{25} bis $2.5 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$
Feinvakuum	1 bis 1×10^{-3} mbar	2.5×10^{22} bis $2.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
Hochvakuum	1×10^{-3} bis 1×10^{-7} mbar	2.5×10^{19} bis $2.5 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$
Ultrahochvakuum	< 1×10^{-7} mbar	< $2.5 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$

3.2 Strömungsarten

Wichtig für das Verständnis von Vakuumanlagen ist das Verhalten von Strömungen bei geringen Drücken.

Der Durchfluss durch eine Fläche wird beschrieben über den pV-Durchfluss

$$q_{pV} = \frac{\partial(p \cdot V)}{\partial t} \quad (3.1)$$

Für (annähernd) ideale Gase lässt sich dies unter Zuhilfenahme der allgemeinen Gasgleichung

$$\frac{p \cdot V}{T} = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \quad (3.2)$$

schreiben als

$$q_{pV} = \frac{\Delta(p \cdot V)}{\Delta t} = \frac{\Delta m \cdot R \cdot T}{M \cdot \Delta t} \quad (3.3)$$

Er steht also in direkter Proportionalität zum Massenfluss. Als Ordnungsgröße dient die Knudsenzahl

$$K_n = \frac{\bar{I}}{d} \quad (3.4)$$

mit der freien Weglänge

$$\bar{I} = \frac{k_b \cdot T}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot d_m^2}} \quad (3.5)$$

Für Knudsenzahlen kleiner 0.01, was für typische Anwendungen einem Druck oberhalb von 10×10^{-3} mbar entspricht, tritt viskose Strömung auf. Dabei wechselwirken die Teilchen ausreichend häufig, um sich kollektiv gerichtet zu bewegen. Für ein langes Rohr ergibt sich für viskose Strömung ein pV-Durchfluss von

$$q_{pV} = \Delta p \cdot C = \Delta p \cdot \frac{\pi \cdot d^4}{128 \cdot \mu \cdot l} \cdot \bar{p} \quad (3.6)$$

Also eine direkte Proportionalität zum Druck.

Bei Knudsenzahlen größer 0.5 spricht man von molekularer Strömung. Hierbei kommt es kaum noch zu Stößen zwischen den Teilchen. Somit treten keine kollektiven Phänomene mehr auf. Für ein langes Rohr ergibt sich für molekularer Strömung ein pV-Durchfluss von

$$q_{pV} = \Delta p \cdot C = \Delta p \cdot \frac{\bar{c} \cdot \pi \cdot d^3}{12 \cdot l} \quad (3.7)$$

Zu beachten ist, dass hier keine Abhängigkeit vom Druck mehr besteht.

3.3 Adsorption, Absorbtion und Desorption

An den Wänden von Vakuumkammern lagern sich an der Oberfläche (Absorption) und in den Wänden (Adsorption) Teilchen an. Je nach Teilchenart werden diese Teilchen unterhalb eines gewissen Drucks wieder frei (Desorption). Dieser Effekt verlangsamt das Erzeugen hochwertiger Vakua. Besonders Wasser (H_2O) unterliegt diesem Effekt, weswegen spezielle Verfahren wie Ausheizen und Einfrieren von Nöten sind, um in höhere Vakuumklassen vorzustoßen. Beim Ausheizen wird die Temperatur erhöht und somit die Abdampfrate zu erhöhen und möglichst viele Teilchen zu lösen und abpumpen zu können. Um die verbleibenden Moleküle aus dem Raum zu entfernen, nutzt man Kryostate, um diese bewusst an den Wänden einzufrieren.

3.4 Sensorik

Zur Druckmessung werden bei PENeLOPE zwei Verfahren eingesetzt. Im Druckbereich überhalb von 5.5×10^{-3} mbar wird ein Pirani System genutzt. Dieses Verfahren nutzt die thermische Leitfähigkeit des Restgases aus. Ein dünner Draht wird elektrisch auf einer konstanten Temperatur gehalten. Die abgeleitete Wärme lässt sich in Form von zugeführter Energie messen. Bei sehr geringen Vakua wird die thermische Leitfähigkeit jedoch so klein, dass Fehler überwiegen und diese Messmethode nicht mehr aussagekräftig ist. Daher wird unterhalb von 2.0×10^{-2} mbar eine heiße Kathoden Ionisation genutzt. Hierbei wird eine Kathode geheizt, um thermisches Freiwerden von Elektronen zu ermöglichen. Die freien Elektronen werden in einem elektrischen Feld beschleunigt. Treffen sie auf Gasmoleküle ionisieren sie diese. Die ionisierten Moleküle werden gesammelt und der so ermittelte Ionenstrom lässt sich auf die Teilchendichte und somit auf den Druck in der Kammer zurückrechnen.

3.5 Pumpen

Zur Erzeugung von Vakua stehen diverse Arten von Pumpen zur Verfügung. Eine Auflistung einiger gängigen Pumparten und der Druckbereiche, in denen diese arbeiten, findet sich in Abbildung 3.1. Als Kennwert von Vakuumpumpen wird das Saugvermögen

$$S = \frac{q_{pV}}{p} = \frac{\dot{p}}{p} \cdot V \quad (3.8)$$

genutzt. Beim Letzten Gleichheitszeichen wurde das Volumen konstant gesetzt. Der Nennwert beziffert dabei den maximalen Wert.

Für das PENeLOPE Experiment wurde sich für die Nutzung von je einer Wälzkolbenpumpe und einer Turbomolekularpumpe pro Vakuum-Bereich und einfrieren per Kryostat entschieden.

3.5.1 Wälzkolbenpumpe

Ein Prinzipbild einer Wälzkolbenpumpe ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Im Bereich A fließt Luft aus dem Trabanten in die Pumpe. Im Bereich B wird diese vom Trabanten getrennt, um daraufhin in den Bereich

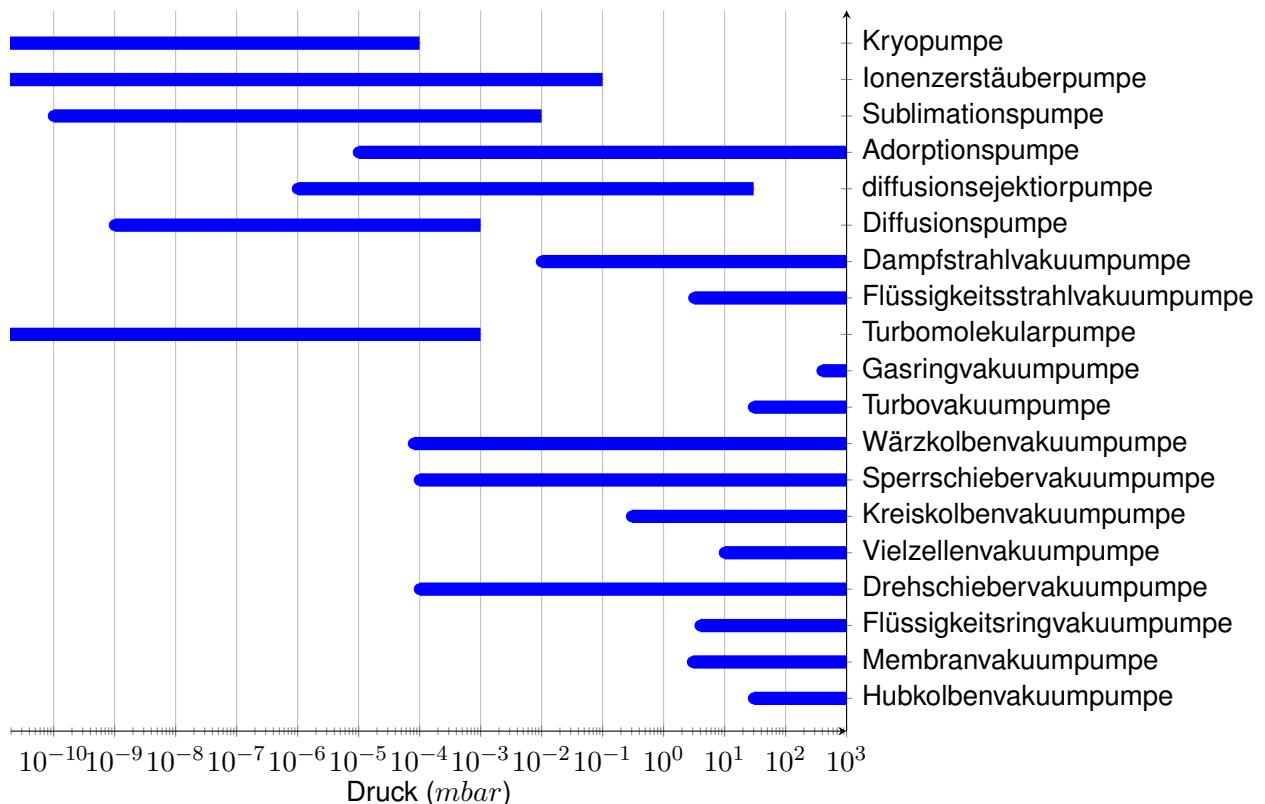


Abbildung 3.1 Verschiedene Pumpentypen und ihre üblichen Arbeitsbereiche.

C gepresst zu werde. Aus diesem entweicht das Gas dann zum Auslass. Meist werden mehrere solcher Stufen hintereinander betrieben, um die gewünschte Druckdifferenz zu erreichen.

Dieses System funktioniert, solange eine viskose Strömung vorliegt. Sobald das Vakuum gering genug ist und molekulare Strömung dominiert, treten nur wenige Gasteilchen in die Pumpe ein, somit fällt die Pumpleistung drastisch ein.

3.5.2 Turbomolekularpumpe

Turbomolekularpumpe agieren im Bereich der molekularen Strömung. Hier liegt die Aufgabe nicht mehr darin, möglichst viel Material zu bewegen, sondern das wenige übrige Material zu erfassen. Der Aufbau einer Turbomolekularpumpe ist in Abbildung 3.3 schematisch dargestellt. Mit einem elektrischen Motor werden turbinenartige Schaufelräder angetrieben. Dabei werden Drehgeschwindigkeiten in der Größenordnung von zehntausend Umdrehungen pro Minute erreicht. Trifft nun ein Teilchen auf die Schaufeln, wird es in Richtung Auslass katapultiert.

3.5.3 Kryopumpe

Nimmt der Druck weiter ab, dominiert die in Abschnitt 3.3 beschriebene Desorption von Gasen an Oberflächen. Um diesem Effekt entgegen zu wirken, friert man Gase an Oberflächen ein. Bei PENeLOPE wird kein extriger Kaltkopf eingesetzt, sondern das Stickstoffschild sowie der LHe gekühlte Magnet ausgenutzt.

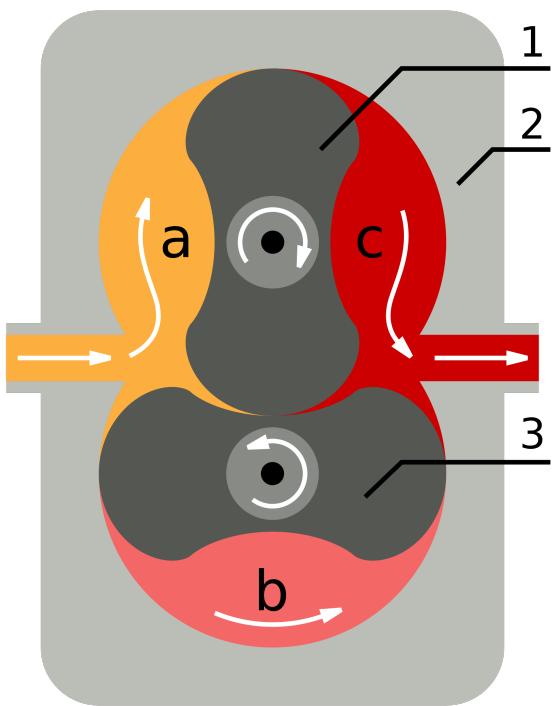


Abbildung 3.2 Prinzipbild einer Wälzkolbenpumpe.
1 und 3 sind Drehkolbe. 2 das Gehäuse.[6]



Abbildung 3.3 Modell einer Turbomolekularpumpe.
Der Einlass befindet sich Oben, der Auslass auf der Linken Seite.[7]

3.6 Leckraten

Im Allgemeinen ist kein Vakuumaufbau ideal dicht. Kennwert hierfür ist die Leckrate, definiert analog zum pV-Durchfluss als

$$Q_l = \frac{\partial(p \cdot V)}{\partial t} \quad (3.9)$$

4 Vakuum Messung

Der PENeLOPE Aufbau ist beinhaltet zwei Vakua. Einerseits das Experimentvakuum, in dem sich später die UCN aufhalte. Anderseits das Isolationsvakuum. An beide Volumina wurde eine Turbomolekularpumpe, sowie eine Wälzkolbenpumpe angeschlossen.

4.1 Pumpgeschwindigkeit

Zur Ermittlung der Pumpgeschwindigkeit wurden beide Volumina ausgepumpt und der Innendruck sekündlich aufgezeichnet. Die aufgezeichneten Messkurven sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Die Werte wurden mit dem in Kapitel 2 beschriebenen Verfahren geglättet und abgeleitet. Damit lässt sich die Pumpleistung

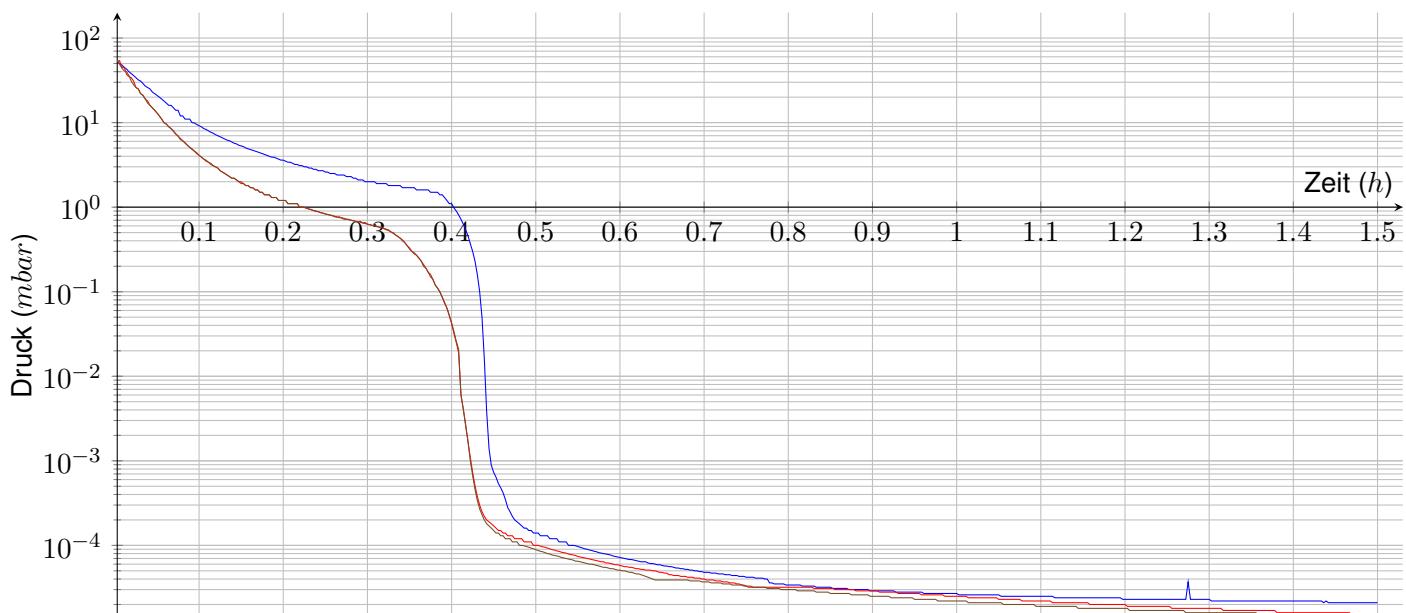


Abbildung 4.1 Druck im Experimentvakuum (Blau) (unterliegt einer Genauigkeit von $\pm 15\%$) und Druck im Isolationsvakuum (Rot und Braun)(unterliegt einer Genauigkeit von $\pm 30\%$) über der Zeit beim Auspumpen

in Abhängigkeit vom Restdruck darstellen. Das entsprechende Diagramm befindet sich in Abbildung 4.2 und Abbildung 4.3.

Die Auflösung der Messgeräte ändert sich jeweils bei den Größenordnungsgrenzen. An diesen Stellen versagt das Glättungsverfahren kurzzeitig, wodurch an diesen Stellen Peaks vorliegen.

Für das Experimentvolumen zeigt sich ein Saugvermögen der Vorpumpe von bis zu $44 \text{ m}^3/\text{h}$. Dieses fällt bei geringerem Druck ab, bis bei 1.8 mbar die Turbomolekularpumpe eingeschalten wurde. Im Druckbereich bis etwa $1 \times 10^{-2} \text{ mbar}$ ist zu beachten, dass die Turbomolekularpumpe langsam hoch fährt und somit das gemessene Pumpvermögen geringer ist, als das Pumpvermögen bei voller Geschwindigkeit. Bei $3 \times 10^{-3} \text{ mbar}$ wird das Maximum bei $808(242) \text{ m}^3/\text{h}$ erreicht. Bei tieferen Drücken sinkt die Pumpleistung wieder.

Der Druck beim Isolationsvakuum verläuft analog. Nach dem Maximum der Vorpumpe mit $100 \text{ m}^3/\text{s}$ sinkt

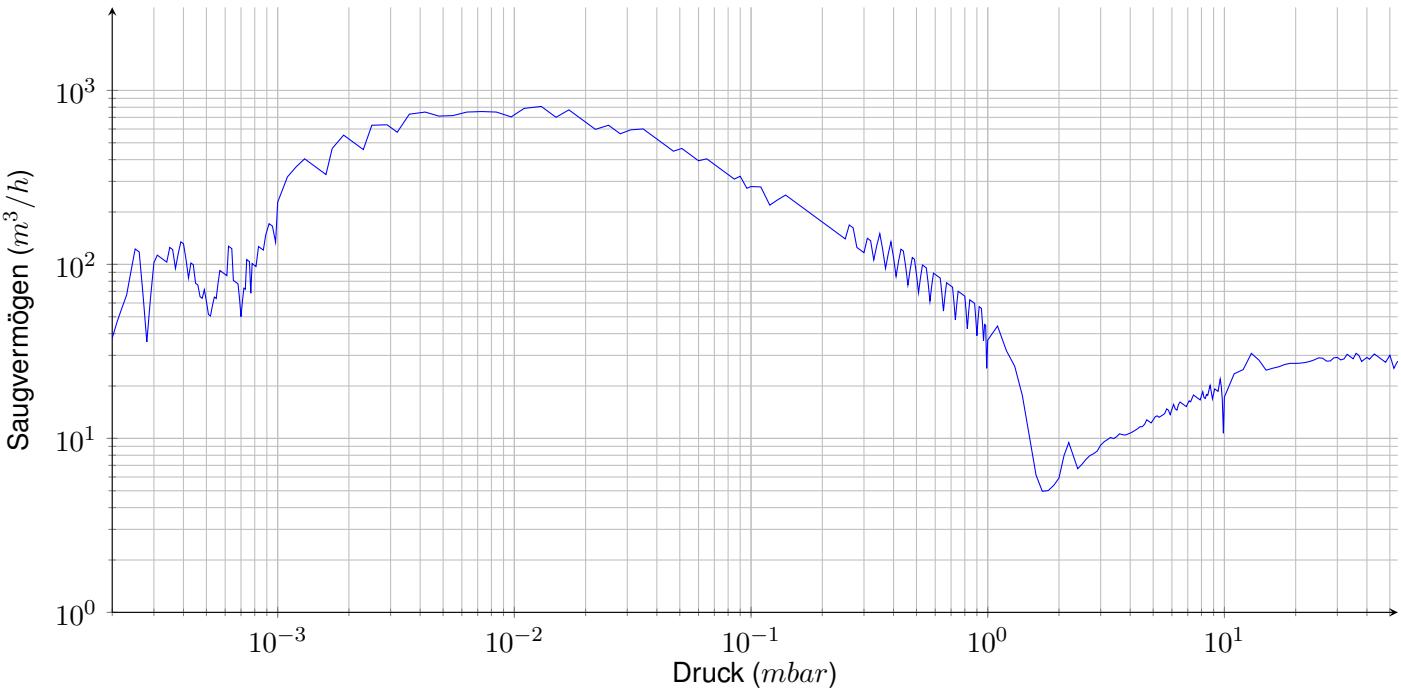


Abbildung 4.2 Saugvermögen der Pumpenkombination am Experimentvakuum. (Der Druck Unterliegt einer Unsicherheit von $\pm 30\%$. Das Saugvermögen unterliegt einer Unsicherheit von $\pm 35\%$)

das Saugvermögen, bis bis bei 6×10^{-1} mbar die Turbomolekularpumpe zugeschalten wird. Diese erreicht bei 3×10^{-3} mbar ihr maximales Saugvermögen mit etwa $100 \text{ m}^3/\text{h}$.

Das Stickstoffschild und später der flüssig-Helium gekühlte Magnet werden sich als große Kyostate auf das Vakuum ausüben. Damit sollte der angestrebte Maximalwert von 10×10^{-8} mbar ohne Probleme erreicht werden.

In Tabelle 4.1 sind die ermittelten Saugvermögen und die vom Pumpenhersteller angegebenen Werte gegenübergestellt. Für das Experimentvolumen stimmen die Werte im Rahmen der Messungssicherheit überein. Beim Isolationsvolumen sind sie jedoch etwas verringert. Dies lässt sich durch die verstelltere Geometrie sowie die vorliegende Menge an MLI erklären.

Tabelle 4.1 Auflistung der ermittelten Saugvermögen, sowie der entsprechenden Herstellerangaben

Pumpenposition	Herstellerangabe	Messung
Vorpumpe Experiment	$55 \text{ m}^3/\text{h}$	$44(13) \text{ m}^3/\text{h}$
Turbomolekular Experiment	$900 \text{ m}^3/\text{h}$	$808(242) \text{ m}^3/\text{h}$
Vorpumpe Isolation	$330 \text{ m}^3/\text{h}$	$187(56) \text{ m}^3/\text{h}$
Turbomolekular Isolation	$1980 \text{ m}^3/\text{h}$	$1870(561) \text{ m}^3/\text{h}$

4.2 Leckrate

Um die Dichtigkeit des Tanks sowie aller angeschlossenen Kabeldurchführungen und Flansche zu testen, wurde ein Haltetest durchgeführt. Hierzu wurden beide Vakua auf 1×10^{-5} mbar evakuiert. Daraufhin wurden die Schieber geschlossen und die Pumpen ausgeschaltet. Der Druck in den Volumina wurde sekündlich aufgezeichnet. Der Druckanstieg über die Zeit ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

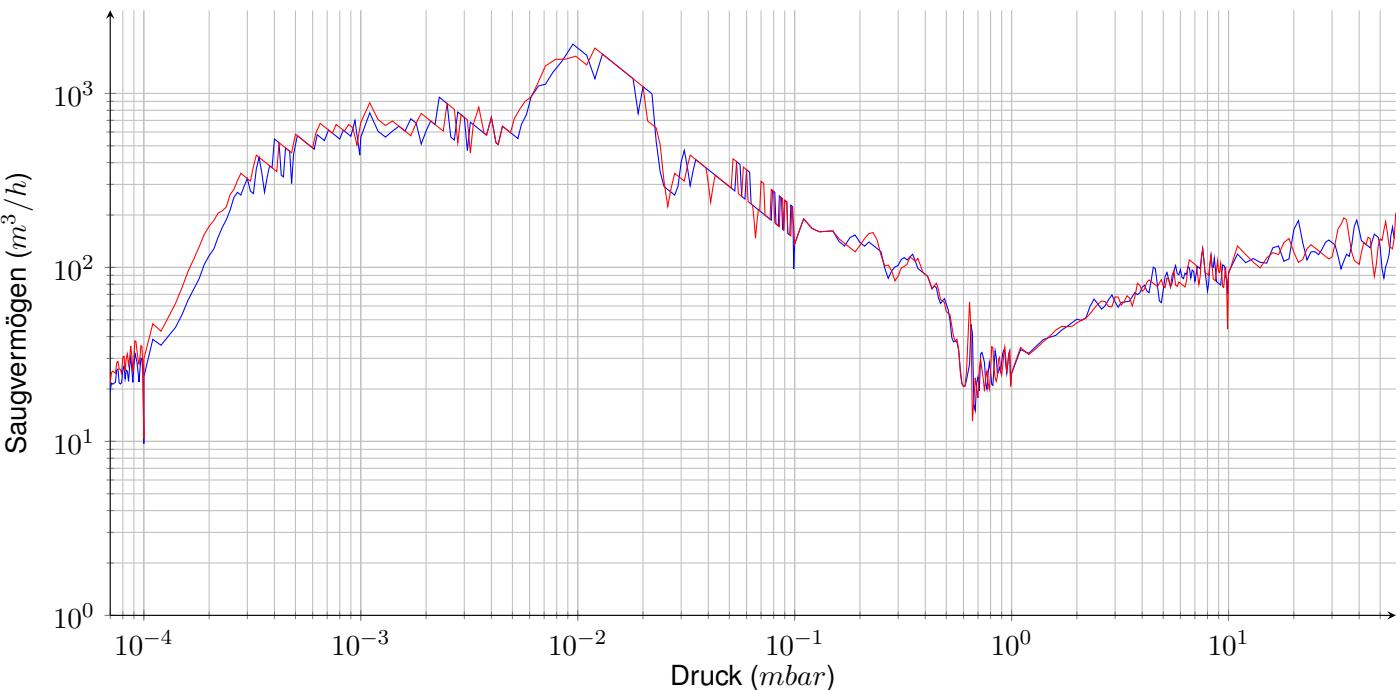


Abbildung 4.3 Saugvermögen der Pumpenkombination am Isolationsvakuum.(Der Druck unterliegt einer Unsicherheit von $\pm 15\%$. Das Saugvermögen einer Unsicherheit von $\pm 20\%$

Da im gesamten betrachteten Druckbereich molekulare Strömung zu erwarten ist, ist eine konstante Leckrate zu erwarten. Dies resultiert in einem linearen Druckanstieg. Durch fitten einer linearer Funktionen errechnet sich eine Leckrate von $5.84(6) \times 10^{-5}$ mbarl/s für das Isolationsvakuum und $1.81(2) \times 10^{-4}$ mbarl/s für das Experimentvakuum.

Um zu überprüfen, ob die Annahme molekularer Strömung gerechtfertigt ist und ob die Leckrate durch etwaige Effekte mit dem Druck variiert, wurde die Leckrate nach dem in Kapitel 2 beschriebenen Verfahren druckabhängig berechnet und in Abbildung 4.5 bzw. 4.6 aufgetragen. Die Ausschläge bei 3×10^{-5} mbar im Isolationsvakuum entstehen aus einer Stufe im Graphen der Druckkurve. Bei diesem Druck ändern die Sensoren die Stromstärke des Elektronenstroms und stellen das Messprogramm um.

Die jeweiligen starken Ausschläge bei 1×10^{-4} mbar entstehen bei der Glättung und Ableitung aufgrund der hier vorliegenden änderung der Auflösung.

In den restlichen Bereichen zeigt sich das erwartete konstante Verhalten.

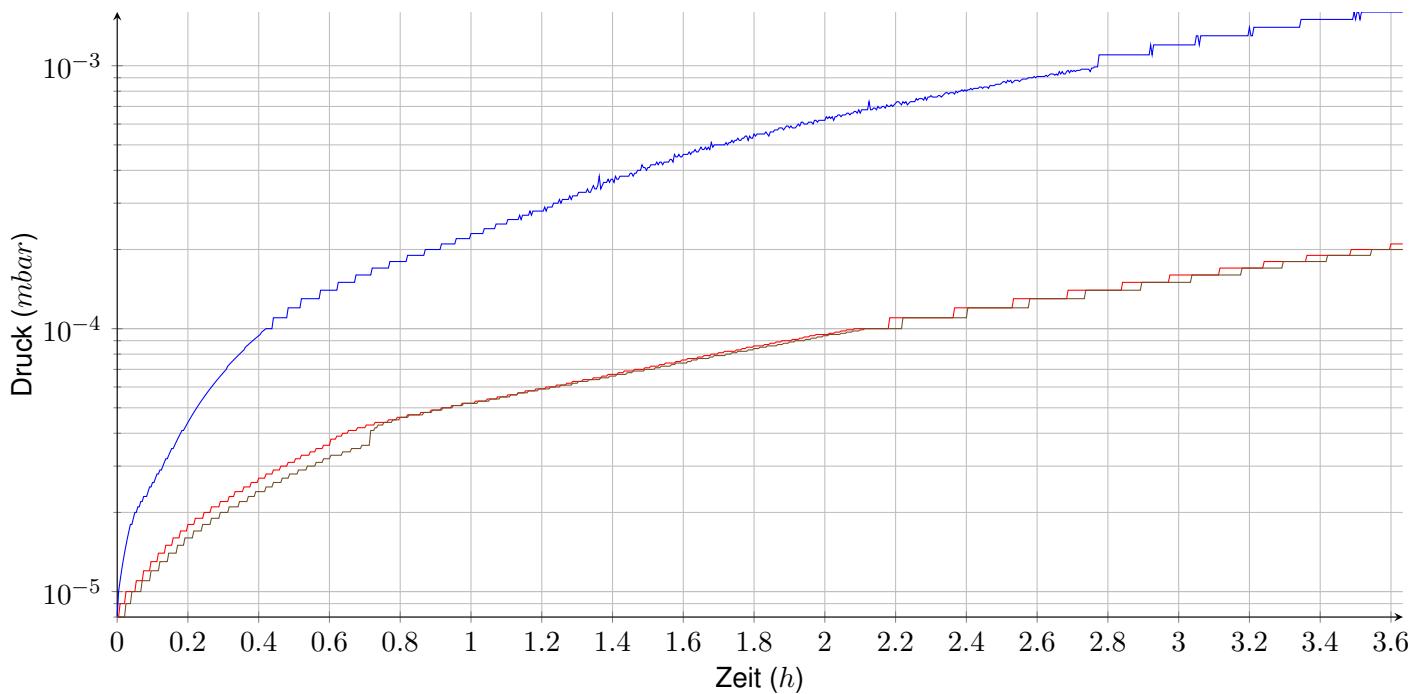


Abbildung 4.4 Druck im Experimentvakuum (Blau) (unterliegt einer Genauigkeit von $\pm 15\%$) und Druck im Isolationsvakuum (Rot und Braun)(unterliegt einer Genauigkeit von $\pm 30\%$) über der Zeit beim Standtest

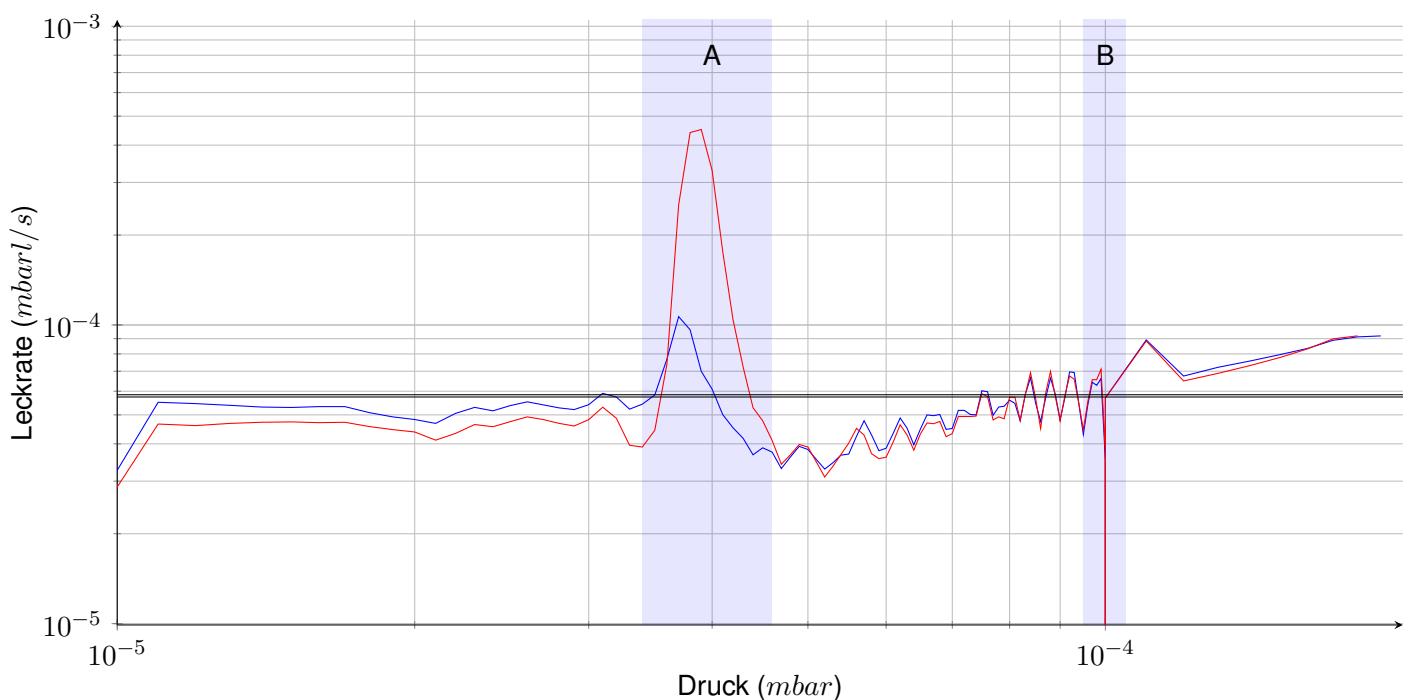


Abbildung 4.5 Druckabhängigkeit der Leckrate des Isolationsvakuum aufgenommen mit zwei Sensoren (Blau und Rot) sowie global gefittete Leckrate (schwarz) $5.84(6) \times 10^{-5}$ mbarl/s. Im Bereich A ändert sich das Messverfahren des Drucksensors, wordurch ein Peak entsteht. Der Ausreißer im Bereich B entsteht bei der Glättung, da sich hier die Auflösung des Sensors ändert.

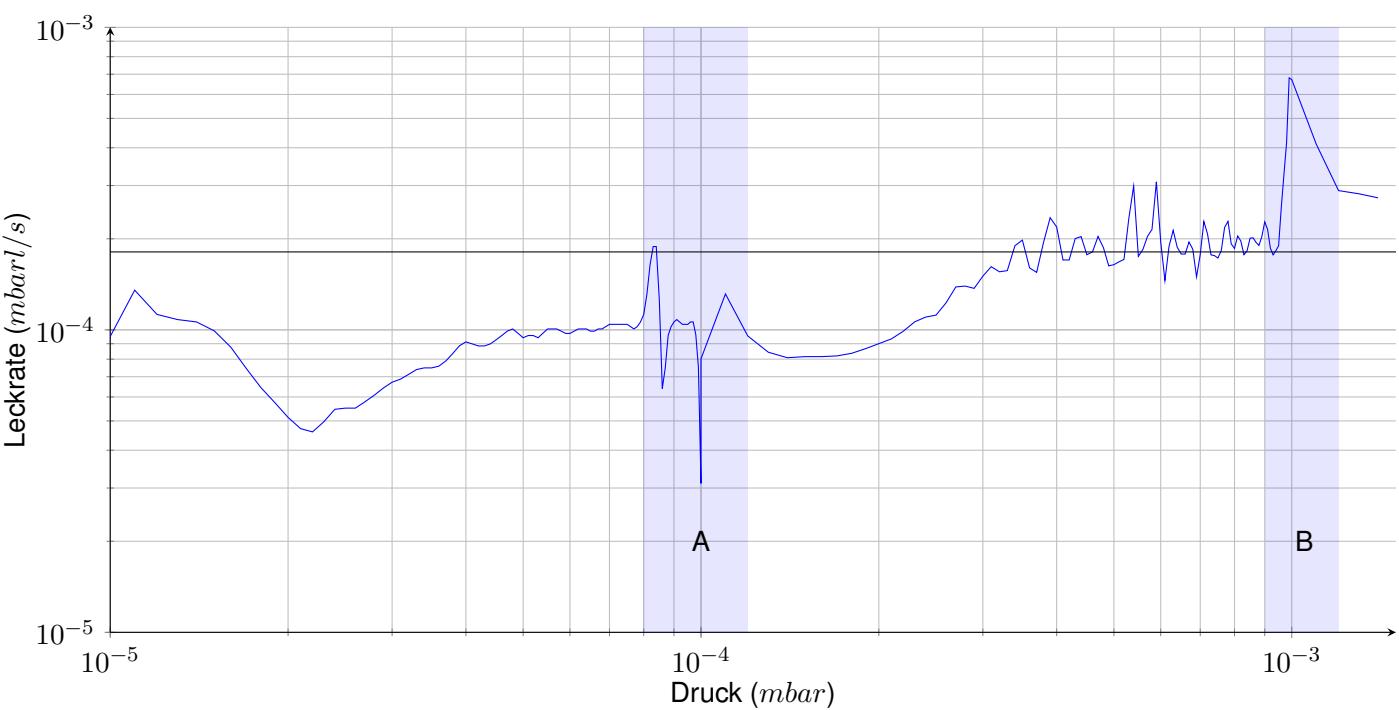


Abbildung 4.6 Druckabhängigkeit der Leckrate des Isolationsvakuum aufgenommen mit zwei Sensoren (Blau und Rot) sowie global gefittete Leckrate (schwarz) $1.81(2) \times 10^{-4}$ mbarl/s. Die Ausreißer in den Bereichen A und B entstehen jeweils bei der Glättung, da sich hier die Auflösung des Sensors ändert.

5 Kühlung Theorie

5.1 Thermisches Modell

Zur Beschreibung wird die Energie betrachtet. Die in einem Objekt in Form von Wärme gespeicherte Energie steht in direkter Propotionalität zu dessen Masse und Temperatur

$$Q = c_v \cdot m \cdot T \quad (5.1)$$

Das reelle System lässt sich in einen mathematischen Graphen übertragen. Die Ecken beschreiben dabei die Massen und die Kanten die Wärmeüberträge. Es treten drei Übertragungseffekte auf, deren Einflüsse im Folgenden diskutiert werden.

5.2 Wärmeleitung

Durch direkte Stöße von Atomen und Molekülen wird Impuls und somit Energie übertragen. Der Wärmeübertrag durch ein Prisma mit Fläche A und Dicke d enstpricht

$$\dot{Q} = k_{Leitung} \cdot \frac{A}{d} \cdot (T_1 - T_2) \quad (5.2)$$

Die beteiligten Temperaturen gehen also linear ein.

5.3 Konvektion

Wird Wärme in einem Gas oder einer Flüssigkeit übertragen so wird das Medium zusätzlich in Bewegung versetzt, was den Wärmeübertrag beschleunigt. Der Effekt lässt sich beschreiben durch

$$\dot{Q} = k_{Konvektion} \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (5.3)$$

Der Einfluss hängt vom vorliegenden Druck ab. Für Vakua wie jene im PENeLOPE Experiment ist dieser Effekt daher vernachlässigbar klein.

5.4 Wärmestrahlung

Durch Schwarzkörperstrahlung gibt jeder Körper Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung ab. Ebenso nimmt er die Strahlung auf, die von anderen Objekten abgestrahlt wird. Quantitativ lässt sich der Wärmeübertrag zwischen zwei Platten mit Fläche A durch

$$\dot{Q} = k_{Strahlung} \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (5.4)$$

berechnen. Besonderer Augenmerk liegt hier auf der Temperatur, die zur vierten Potenz eingeht. Dies bewirkt, dass der Effekt bei höheren Temperaturen (z.B. Raumtemperatur und 77K) einen sehr viel größeren Einfluss hat als bei kleinen Temperaturen (z.B zwischen 3nK und 4K).

Eine weitere entscheidende Eigenschaft ist, das sie nicht von dem Abstand abhängt. Somit lässt sich durch Einfügen von Zwischenschichten ein geringerer Übertrag erzielen. Dies wird bei Multilayer Insulation (kurz MLI) ausgenutzt. Diese besteht aus vielen Schichten einer dünnen Folie. Getrennt werden diese Schichten durch ein schlecht Wärme leitendes Geflecht. Der Heliumbehälter des PENeLOPE Aufbaus ist auf diese Weise isoliert.

5.5 Rückrechnung

Die Gleichungen (5.1) bis (5.4) lassen sich in einer Differentialgleichung zusammen fassen:

$$\begin{pmatrix} \dot{Q}_1 \\ \dot{Q}_2 \\ \dot{Q}_3 \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{v_1} m_1 \dot{T}_1 \\ c_{v_2} m_1 \dot{T}_2 \\ c_{v_3} m_1 \dot{T}_3 \\ \vdots \end{pmatrix} + \dot{Q}_{Extern} = S_{Leitung} \cdot \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \vdots \end{pmatrix} + S_{Strahlung} \cdot \begin{pmatrix} T_1^4 \\ T_2^4 \\ T_3^4 \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

wobei $S_{Leitung}$ und $S_{Strahlung}$ jeweils quadratische Matrizen beschreiben, die die Konstanten und Zuordnungen aus Gleichung (5.2) und (5.4) beinhalten. \dot{Q}_{Extern} beschreibt hierbei alle Wechselwirkungen mit der Umgebung. Für PENeLOPE sind dies namhaft die Aufnahme von Wärme an der Außenhaut des Tanks sowie die abgegebene Wärme durch Verdampfung von Stickstoff und Helium. Die Kühlleistung durch Verdampfen von Stickstoff lässt sich direkt aus dem Durchfluss, der latenten Wärme sowie der Temperatur des abgeführt Gases berechnen.

Da diese Energieeinträge und Energieaflüsse zeitabhängig sind, ist eine algebraische Lösung nur bedingt sinnvoll. Die numerische Lösung dieses Systems wurde von Oliver Sirius mit Hilfe des Programms Simulink durchgeführt und wird in seiner Bachelorarbeit beschrieben.

Zur Validierung des Systems sollen die Systemparameter $S_{Leitung}$ und $S_{Strahlung}$ per Messung ermittelt werden, um diese mit zu erwarteten Werten zu vergleichen. Die Linke Seite von (5.5) muss komplett erfasst werden. Daher müssen alle Massen und Wärmekapazitäten bekannt sein oder gemessen werden. Alle Temperaturkurven müssen erfasst werden und die externen Einträge müssen vermessen oder abgeschätzt werden.

6 Kühlung Messung

6.1 Thermaler Aufbau PENELOPE

Der zu kühlende Teil des PENELOPE Aufbaus ist der Behälter, in dem sich später die UCN befinden sowie die sich darum befindenden supraleitenden Spulen.

Der UCN Behälter muss gekühlt werden, um den Wärmeeintrag auf die UCN möglichst gering zu halten. Bei zu hohem Wärmeeintrag würden die steigenden Energien der UCN zu Unsicherheiten in der Lebendsdauermessung führen.

Die supraleitenden Spulen müssen unter ihre Sprungtemperatur gekühlt werden, um supraleitend zu werden. Für dies ist eine Kühlung durch flüssigen Stickstoff von Nöten.

Um den Heliumaufbau befindet sich das Isolationsvakuum. Durch dieses wird Wärmeeintrag durch Konvektion verhindert. Ebenso wird der Wärmeübertrag durch Wärmeleitung, bis auf die Aufhängungen und Anschlüsse, vermieden. Um Wärmeleitung weiter zu verringern sind die Aufhängungen mit möglichst lang und mit geringer Querschnittsfläche hergestellt.

Die übrige Wärmestrahlung wird mit MLI gedämmt. Zudem ist im Isolationsvakuum ein Stickstoff gekühltes Schild verbaut.

Um beim Runterkühlen des Systems Helium zu sparen, ist geplant den Helium-Bereich per Strahlung aufs Stickstoffschild zuerst auf Stickstofftemperatur zu kühlen und erst danach flüssig-Helium zum Einsatz zu bringen.

Der Protonendetektor, der später im Experimentvakuum oberhalb des Bereiches, in dem die UCN vorliegen, angebracht wird, existiert aktuell noch nicht. Um dennoch dessen thermalen Einfluss einschätzen zu können, wurde ein Zwischendeckel hinzugefügt. Die Position ist in Abbildung 6.2 in Blau eingezzeichnet. Der Zwischendeckel wurde vom Tankdeckel mit drei Schnüren abgehängt. Auf der Oberseite wurden 60 Schichten MLI verbaut. Ein Bild des Zwischendeckel vor dem Einbau befindet sich in Abbildung 6.1.

6.2 Messverfahren

6.2.1 Temperatur

Für die Temperaturmessung wird die Temperaturabhängigkeit eines elektrischen Leiters ausgenutzt. Für die Sensoren am Magneten, der bis auf Heliumtemperatur gekühlt wird, wurden Ceronx Sensoren der Firma Lakeshore genutzt. Die restlichen Sensoren sind PT100. Die genauen Messpositionen sind in Abbildung 6.2 in den Querschnitt eingezeichnet.

Die Benennung, Sensor Typ und Verkabelungsart im Tank ist in Tabelle 6.1 aufgelistet. Zudem wurden drei Sensoren (CU, CM, CU) an der Zentral-Spule angebracht sowie ein Sensor zur Aufnahme der Umgebungstemperatur (Atm) hinzugefügt.

An allen Messpositionen im Tank sind zwei Sensoren verbaut worden, um etwaige asymmetrische Ef-



Abbildung 6.1 Zwischendeckel vor dem Einbau

fekte zu erkennen. Denkbar wäre z.B. schnelleres Kühlen auf der Seite, an der sich der Stickstoffeinlass befindet im Gegensatz zu der Seite, auf der der Abfluss vorliegt.

Die Sensoren sind im Tank per Zwei- oder Vierleitermessung verkabelt und ab der Kabeldurchführung auf Vierleitermessung ausgelegt. Alle Kabeldurchführungen wurden mit doppelten Steckern ausgestattet, also einer Steckverbindung unter dem Flansch und einem über dem Flansch. Dies ermöglicht sowohl ein abnehmen des Deckels als auch ein abstecken der weiterlaufenden Kabel. Die offene Kabeldurchführung des Helium Durchlasses He4 ist in Abbildung 6.3 dargestellt.

Zur Messwerterfassung werden Anzeigegeräte der Firma LakeShore genutzt. Diese sollen später durch eine SPS-Steuerung ersetzt werden. Per RS-232 Bus werden die Daten an einen Computer übertragen. Alle Temperaturwerte werden minütlich aufgezeichnet.

Zum aktuellen Zeitpunkt liegen nur die Messwerte der PT100 vor.

6.2.2 Stickstofffluss

Um den Stickstofffluss zu messen, wurde ein Durchflussmesser eingesetzt. Der abgedampfte Stickstoff wird, bevor er der Abluftanlage zugeführt wird, mittels einer Heizung auf Raumtemperatur erwärmt. Der Flusssensor wurde hinter diesen Heizung positioniert. Leider stellte sich der genutzte Sensor bei der Messung als unfunktional heraus, weswegen dieser Messwert leider fehlt.

6.2.3 Messwertaufname

Die Versuche erstreckten sich über zwei Wochen. Die aufgenommenen Messreihen sind in Abbildung 6.4 dargestellt.

6.2.4 Auswertung

Mit dem fehlenden Fluss-Messwert konnte leider das in Kapitel 5 beschriebene Verfahren nicht angewendet werden.

Weitere Einschränkung ergaben sich durch die Stickstoffversorgung. Ursprünglich war ein Anschluss an einen großen Speicher geplant, der groß genug gewesen wäre, um einen kontinuierlichen Fluss zu nutzen. Der Anschluss stellte sich leider als nicht umsetzbar heraus. Daher wurden einzelne Kannen mit jeweils 100 l Inhalt eingesetzt. Bis zu vier dieser Kannen wurden in Reihe geschalten, um über längere Zeiten eine konstante Versorgung zu ermöglichen. Aufgrund diverser Probleme mit Hebern und Druckreglern konnten, in der beschränkten Zeit, leider keine reproduzierbaren Ergebnisse erreicht werden.

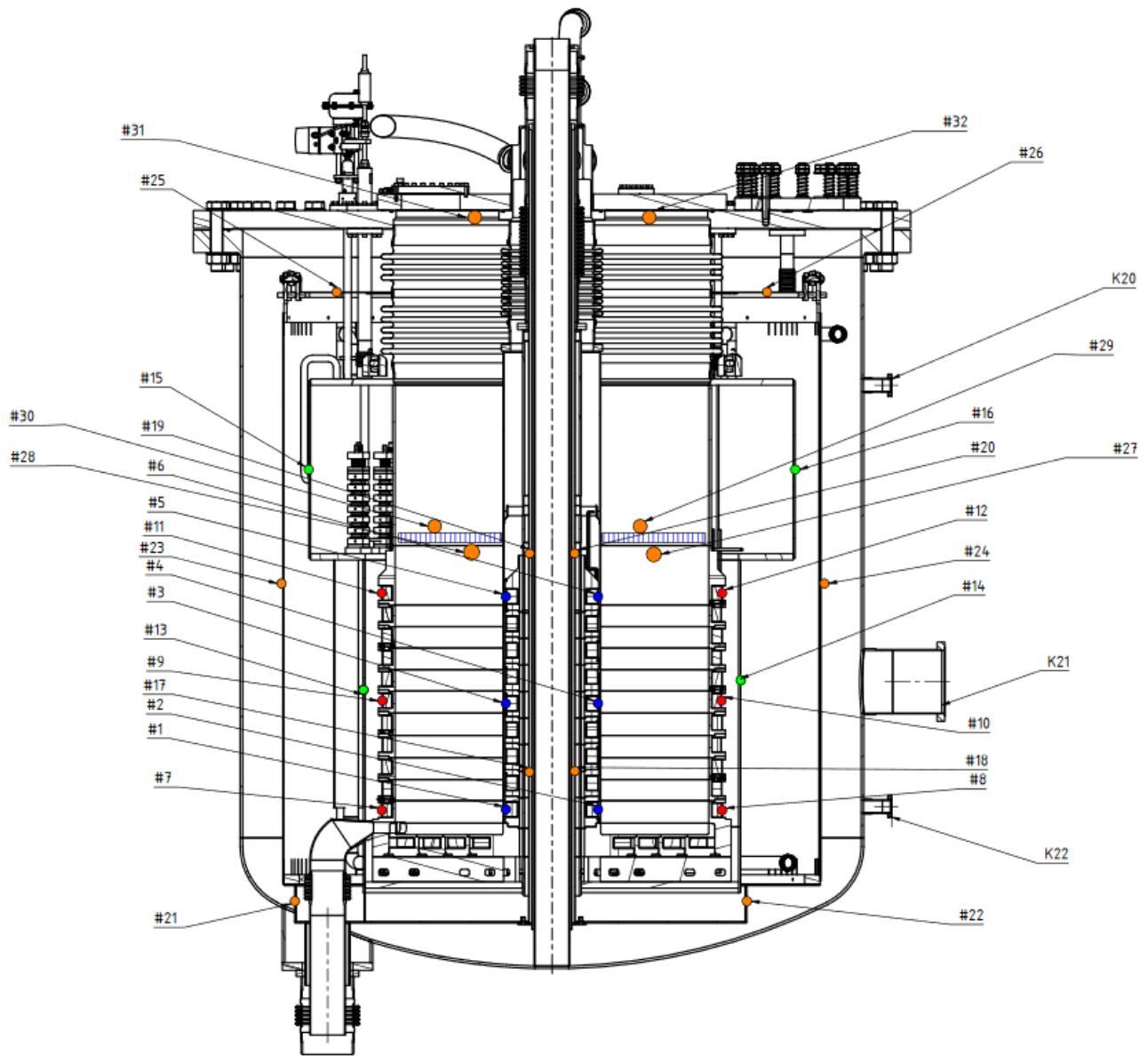


Abbildung 6.2 Themperaturmesspunkte am PENeLOPE Aufbau. In Blau ist der Zwischendeckel eingezeichnet, der den thermalen Einfluss des Detectors abbilden soll .

Tabelle 6.1 Positionsbeschreibung und Typ der Themperatursensoren

Nummer	Position	Typ	Flansch	Verkabelung
#1	IC 10-	Cernox	He4	4-Leiter 7m
#2	IC 10-	Cernox	He4	4-Leiter 7m
#3	IC 12-	Cernox	He4	4-Leiter 7m
#4	IC 12-	Cernox	He4	4-Leiter 7m
#5	IC 14-	Cernox	He4	4-Leiter 7m
#6	IC 14-	Cernox	He4	4-Leiter 7m
#7	OC 22+	Cernox	He4	4-Leiter 5m
#8	OC 22+	Cernox	He4	4-Leiter 5m
#9	OC 18-	Cernox	He4	4-Leiter 5m
#10	OC 18-	Cernox	He4	4-Leiter 5m
#11	OC 27+	Cernox	He4	4-Leiter 5m
#12	OC 27+	Cernox	He4	4-Leiter 5m
#13	He-Behälter - Spulenbereich	PT100	K5/K7	2-Leiter 5m
#14	He-Behälter - Spulenbereich	PT100	K5/K7	2-Leiter 5m
#15	He-Behälter - Spulenbereich	PT100	K5/K7	2-Leiter 5m
#16	He-Behälter - Spulenbereich	PT100	K5/K7	2-Leiter 5m
#17	Therm. Schild - Innenrohor	PT100	K5/K7	2-Leiter 7m
#18	Therm. Schild - Innenrohor	PT100	K5/K7	2-Leiter 7m
#19	Therm. Schild - Innenrohor	PT100	K5/K7	2-Leiter 7m
#20	Therm. Schild - Innenrohor	PT100	K5/K7	2-Leiter 7m
#21	Therm. Schild - Boden	PT100	K5/K7	2-Leiter 5m
#22	Therm. Schild - Boden	PT100	K5/K7	2-Leiter 5m
#23	Therm. Schild - Außenschild	PT100	K5/K7	2-Leiter 5m
#24	Therm. Schild - Außenschild	PT100	K5/K7	2-Leiter 5m
#25	Therm. Schild - Deckel	PT100	K5/K7	2-Leiter 3m
#26	Therm. Schild - Deckel	PT100	K5/K7	2-Leiter 3m
#27	Detektor Schild Boden	PT100	K15	4-Leiter 1,2m
#28	Detektor Schild Boden	PT100	K15	4-Leiter 1,2m
#29	Detektor Schild Deckel	PT100	K15	4-Leiter 1,2m
#30	Detektor Schild Deckel	PT100	K15	4-Leiter 1,2m
#31	UCN Deckel Innenseite	PT100	K15	4-Leiter 1,2m
#32	UCN Deckel Innenseite	PT100	K15	4-Leiter 1,2m

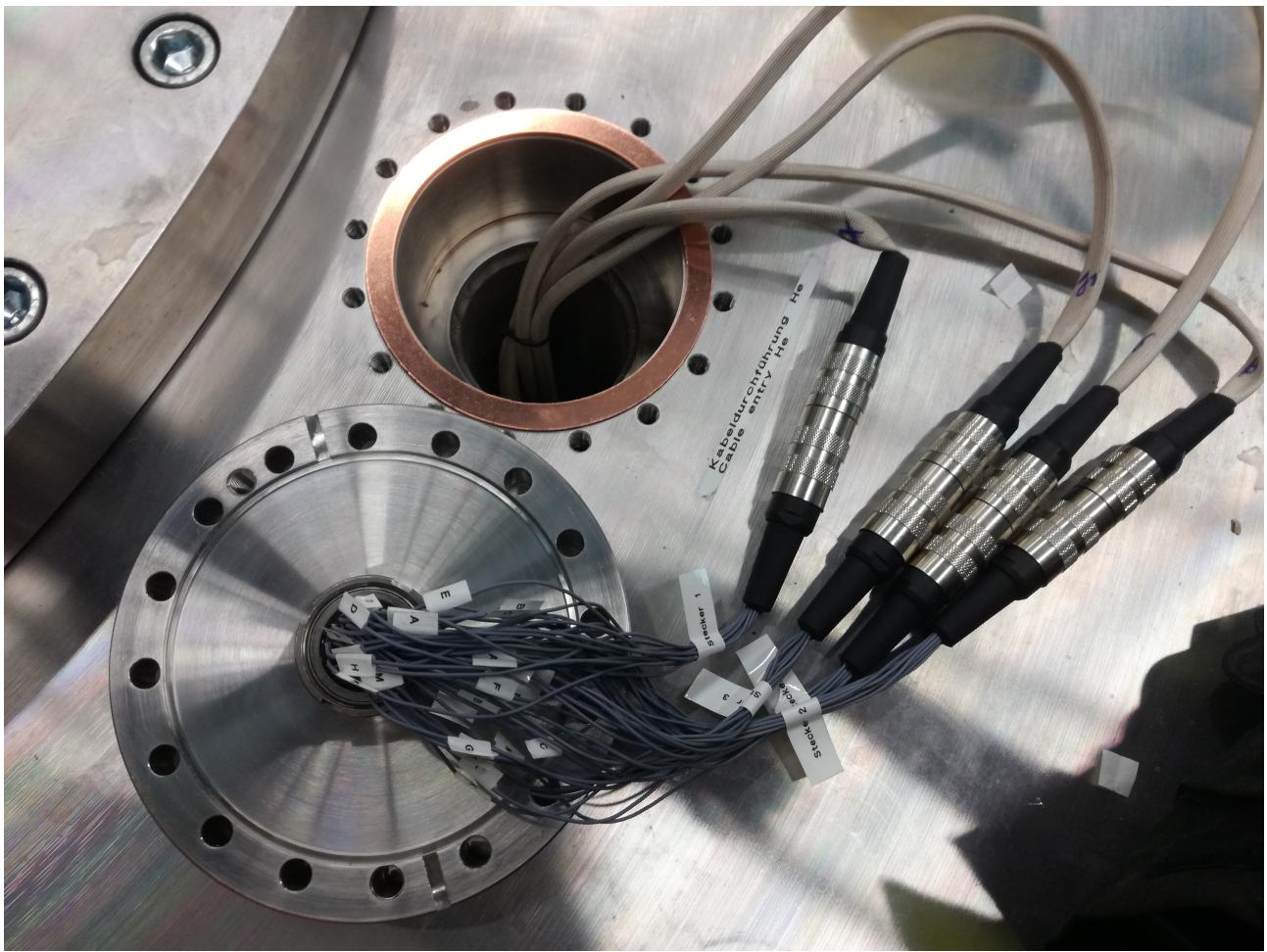
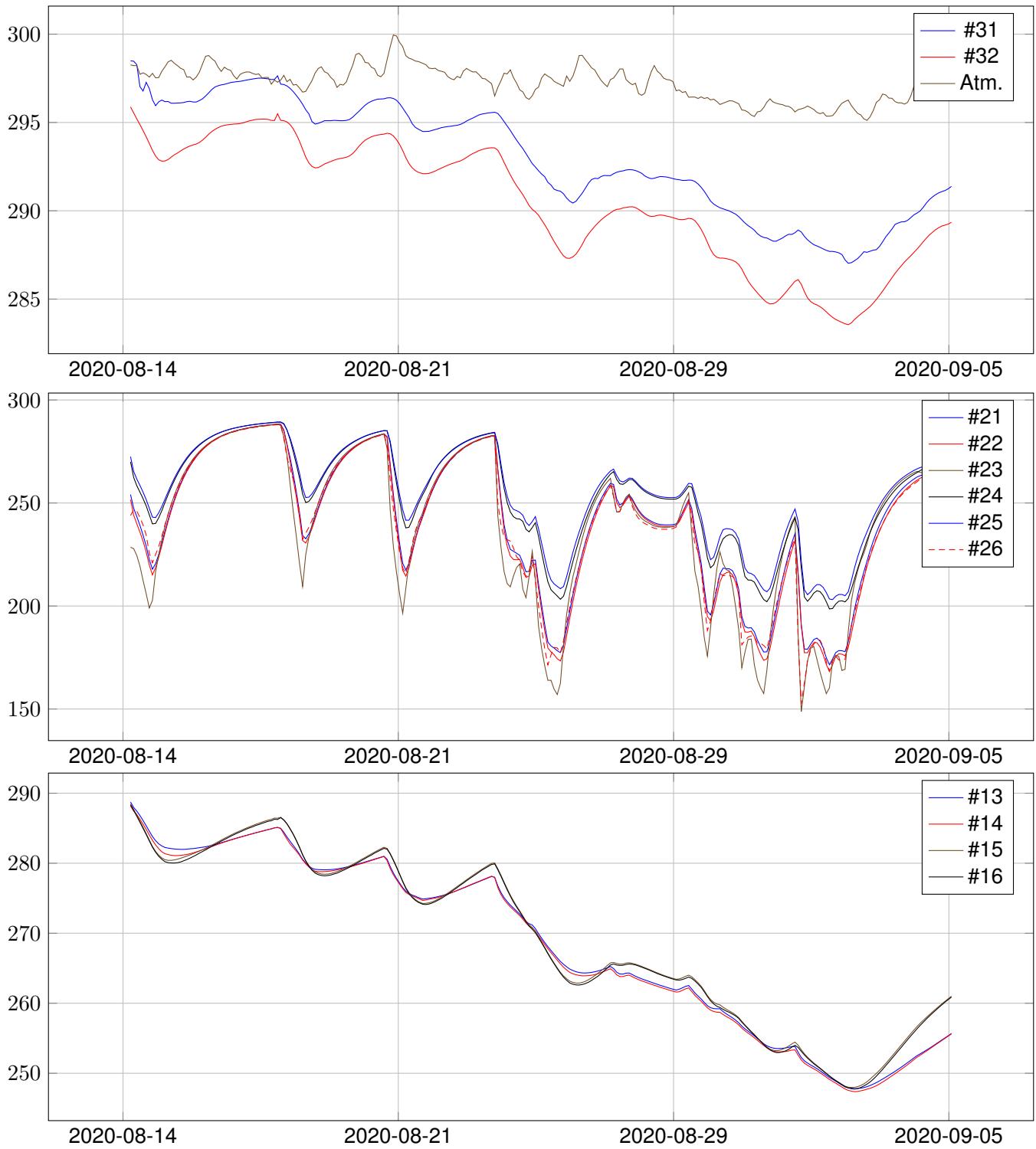


Abbildung 6.3 Offene Kabeldurchführung "He4". Von unten kommen die Signalleistungen von 12 Cernox Sensoren, jeweils zu 12 Adern gebündelt. Diese sind mit einer Steckverbindung unter dem Flansch mit dem in den Flansch eingebauten 55 adrigen Stecker verbunden. In diesen wird von der Oberseite ein Adapter auf drei 25-pin Flachstecker gesteckt. Diese wurden so belegt, dass sie direkt in die Lakeshore Geräte eingesteckt werden können.



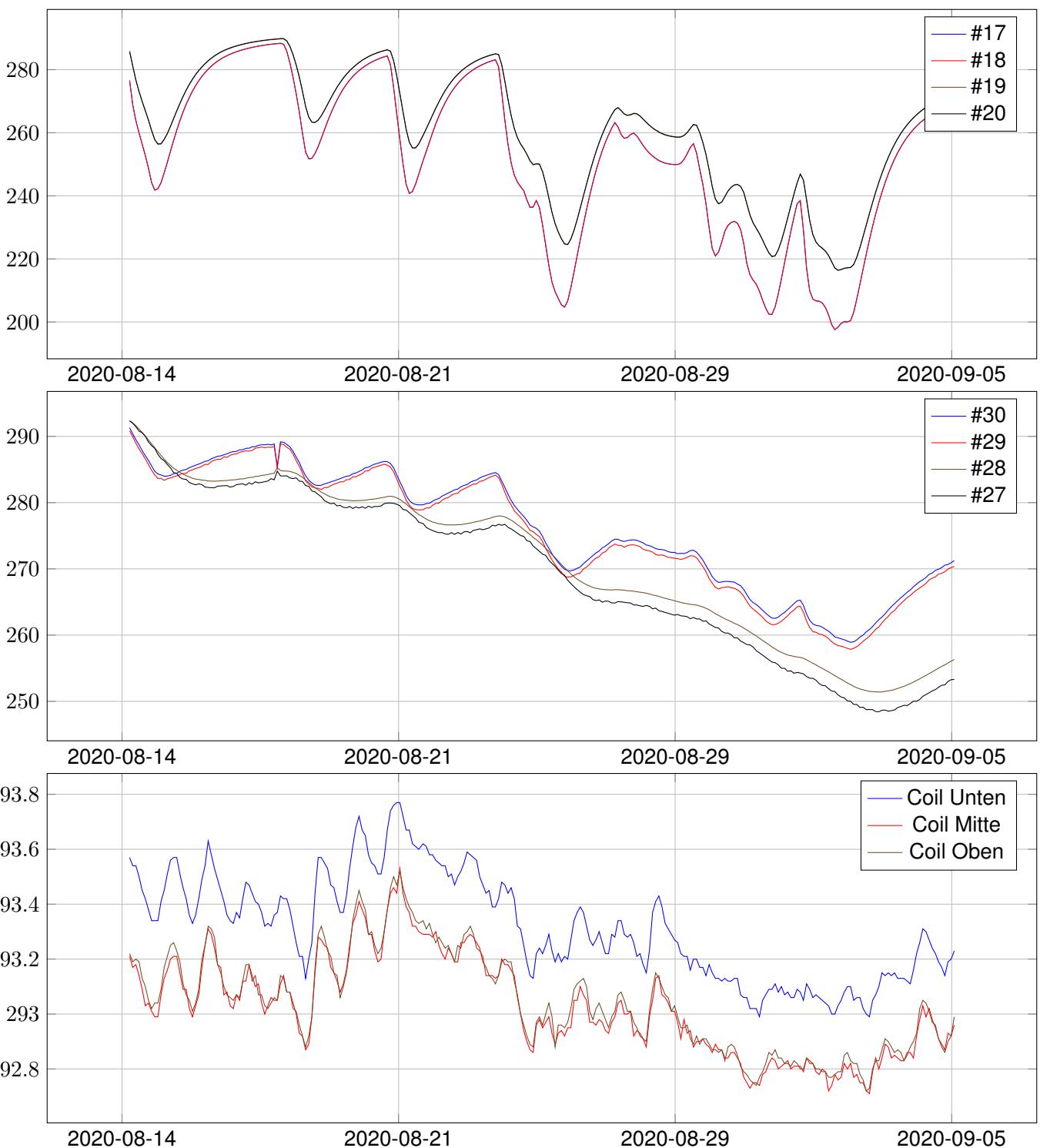


Abbildung 6.4 Graphen der thermal Versuche. Auf der y-Achse ist jeweils die Temperatur in Kelvin aufgetragen, auf der x-Achse die Zeit.

7 Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Vakuum Aufbau des PENeLOPE Experiments fertig gestellt. Ebenso wurde der Stickstoffaufbau, bis auf eine noch recht provisorische Stickstoffversorgung, fertig gestellt. Die nötigen Sensoren für Vakuum, Temperatur und Durchfluss wurden verkabelt. Alle PT100 Sensoren zeigen realistische Werte. Die Cernox Sensoren konnten noch nicht getestet werden. Der genutzte Durchflusssensor stellte sich als Defekt heraus. Die Kennwerte (Saugvermögen der Pumpe sowie Leckraten der Volumina) des Vakuumsystems wurden gemessen und stimmen mit den erwarteten Werten überein. Kennwerte der Stickstoffkühlung konnten leider nicht quantitativ erhoben werden. Jedoch lassen die aufgenommenen Messreihen qualitativ auf die Funktionalität des Aufbaus schließen.

A Python Code LOWESS

```
import numpy as np
from scipy.optimize import curve_fit
import math

# Dieser Code setzt voraus, dass die Messpunkte in gleich bleibenden Intervallen
# aufgenommen wurden und somit nicht verrechnet werden.

# Definition der Gewichtungsfunktion
def weightfunction(a, x_0, w):
    if (abs(a-x_0) < w):
        return(((a-x_0)**2-w**2)**2)
    else:
        return(1e-15)

# Definition der Anpassungsfunktion
def f(x, a, b):
    if(isinstance(x, int)):
        return a + x* b
    else:
        ret = []
        for i in x:
            ret.append(a + i* b)
        return ret

def LOWESS(y, w, Iterationen):
    x = range(len(y))
    # 0. Iteration
    y_1 = []
    for b in x:
        popt, pcov = curve_fit(f, x[int(math.floor(max(0,b-w))):int(math.ceil(min(b+w,len(x))))]
                               , y_0[int(math.floor(max(0,b-w))):int(math.ceil(min(b+w,len(x))))]
                               , [0,0]
                               , sigma=[1/(weightfunction(a,b,w)) for a in
                                       range(int(math.floor(max(0,b-w))),int(math.ceil(min(b+w,len(x)))))]
                               , absolute_sigma=True)
        y_1.append(f(b,*popt))

    # Iterationsloop
    for step in range(Iterationen):
        # Berechnung der Zusatzgewichtung
        weight = []
        for i in range(len(x)):
            weight.append(1/((abs(y_1[i]/y_0[i])**6+abs(y_0[i]/y_1[i])**6)))

        # Neuberechnen der Regressionen
        y_neu = []
        for b in x:
            popt, pcov = curve_fit(f, x[int(math.floor(max(0,b-w))):int(math.ceil(min(b+w,len(x))))]
                                   , y_0[int(math.floor(max(0,b-w))):int(math.ceil(min(b+w,len(x))))], [0,0]
                                   , sigma=[1/(weightfunction(x[a],b,w)*weight[a]) for a in
                                           range(int(math.floor(max(0,b-w))),int(math.ceil(min(b+w,len(x)))))]
                                   , absolute_sigma=True)
            y_neu.append(f(b,*popt))
        y_1=y_neu
    return y_1
```


Literaturverzeichnis

- [1] P. D. Group, P. A. Zyla, R. M. Barnett, J. Beringer, O. Dahl, D. A. Dwyer, D. E. Groom, C. J. Lin, K. S. Lugovsky, E. Pianori, D. J. Robinson, C. G. Wohl, W. M. Yao, K. Agashe, G. Aielli, B. C. Allanach, C. Amsler, M. Antonelli, E. C. Aschenauer, D. M. Asner, H. Baer, S. Banerjee, L. Baudis, C. W. Bauer, J. J. Beatty, V. I. Belousov, S. Bethke, A. Bettini, O. Biebel, K. M. Black, E. Blucher, O. Buchmuller, V. Burkert, M. A. Bychkov, R. N. Cahn, M. Carena, A. Ceccucci, A. Cerri, D. Chakraborty, R. S. Chivukula, G. Cowan, G. D'Ambrosio, T. Damour, D. de Florian, A. de Gouvêa, T. DeGrand, P. de Jong, G. Dissertori, B. A. Dobrescu, M. D'Onofrio, M. Doser, M. Drees, H. K. Dreiner, P. Eerola, U. Egede, S. Eidelman, J. Ellis, J. Erler, V. V. Ezhela, W. Fettscher, B. D. Fields, B. Foster, A. Freitas, H. Gallagher, L. Garren, H. J. Gerber, G. Gerbier, T. Gershon, Y. Gershtein, T. Gherghetta, A. A. Godizov, M. C. Gonzalez-Garcia, M. Goodman, C. Grab, A. V. Gritsan, C. Grojean, M. Grünewald, A. Gurtu, T. Gutsche, H. E. Haber, C. Hanhart, S. Hashimoto, Y. Hayato, A. Hebecker, S. Heinemeyer, B. Heltsley, J. J. Hernández-Rey, K. Hikasa, J. Hisano, A. Höcker, J. Holder, A. Holtkamp, J. Huston, T. Hyodo, K. F. Johnson, M. Kado, M. Karliner, U. F. Katz, M. Kenzie, V. A. Khoze, S. R. Klein, E. Klempert, R. V. Kowalewski, F. Krauss, M. Kreps, B. Krusche, Y. Kwon, O. Lahav, J. Laiho, L. P. Lellouch, J. Lesgourgues, A. R. Liddle, Z. Ligeti, C. Lippmann, T. M. Liss, L. Littenberg, C. Lourengo, S. B. Lugovsky, A. Lusiani, Y. Makida, F. Maltoni, T. Mannel, A. V. Manohar, W. J. Marciano, A. Masoni, J. Matthews, U. G. Meißner, M. Mikhasenko, D. J. Miller, D. Milstead, R. E. Mitchell, K. Mönig, P. Molaro, F. Moortgat, M. Moskovic, K. Nakamura, M. Narain, P. Nason, S. Navas, M. Neubert, P. Nevski, Y. Nir, K. A. Olive, C. Patrignani, J. A. Peacock, S. T. Petcov, V. A. Petrov, A. Pich, A. Piepke, A. Pomarol, S. Profumo, A. Quadt, K. Rabbertz, J. Rademacker, G. Raffelt, H. Ramani, M. Ramsey-Musolf, B. N. Ratcliff, P. Richardson, A. Ringwald, S. Roesler, S. Rolli, A. Romanouk, L. J. Rosenberg, J. L. Rosner, G. Rybka, M. Ryskin, R. A. Ryutin, Y. Sakai, G. P. Salam, S. Sarkar, F. Sauli, O. Schneider, K. Scholberg, A. J. Schwartz, J. Schwiening, D. Scott, V. Sharma, S. R. Sharpe, T. Shutt, M. Silari, T. Sjöstrand, P. Skands, T. Skwarnicki, G. F. Smoot, A. Soffer, M. S. Sozzi, S. Spanier, C. Spiering, A. Stahl, S. L. Stone, Y. Sumino, T. Sumiyoshi, M. J. Syphers, F. Takahashi, M. Tanabashi, J. Tanaka, M. Taševský, K. Terashi, J. Terning, U. Thoma, R. S. Thorne, L. Tiator, M. Titov, N. P. Tkachenko, D. R. Tovey, K. Trabelsi, P. Urquijo, G. Valencia, R. Van de Water, N. Varelas, G. Venanzoni, L. Verde, M. G. Vincter, P. Vogel, W. Vogelsang, A. Vogt, V. Vorobyev, S. P. Wakely, W. Walkowiak, C. W. Walter, D. Wands, M. O. Wascko, D. H. Weinberg, E. J. Weinberg, M. White, L. R. Wiencke, S. Willocq, C. L. Woody, R. L. Workman, M. Yokoyama, R. Yoshida, G. Zanderighi, G. P. Zeller, O. V. Zenin, R. Y. Zhu, S. L. Zhu, F. Zimmermann, J. Anderson, T. Basaglia, V. S. Lugovsky, P. Schaffner, and W. Zheng, “Review of Particle Physics,” *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, vol. 2020, no. 8, 08 2020, 083C01. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104>
- [2] R. Golub, D. Richardson, and S. Lamoreaux, *Ultra-Cold Neutrons* -. Boca Raton, Fla: CRC Press, 1991.
- [3] W. S. Schreyer, “Magnets, polarizers, systematics, and optimizations of the neutron-lifetime experiment penelope,” Doktorarbeit, Technischen Universität München, November 2016.
- [4] `scipy.optimize.curve_fit` — `scipy` v1.5.2 reference guide. [Online]. Available: https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.curve_fit.html
- [5] *Vakuumtechnik; Benennung und Definitionen; Allgemeine Benennungen*, Norm DIN 28 400-1, Mai 1990.

- [6] Rainer Bielefeld. (2006) Rotary piston pump.svg. [accessed 19.09.2020]. [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rotary_piston_pump.svg
- [7] Liquidat. (2005) Cut through turbomolecular pump.jpg. [accessed 19.09.2020]. [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cut_through_turbomolecular_pump.jpg