

Singer, M.

**Erste Erprobung eines Ionisationsmanometers mit LaB<sub>6</sub>-Emitter für starke Magnetfelder**

**IPP 2018-11  
Mai 2018**

# Erste Erprobung eines Ionisationsmanometers mit LaB<sub>6</sub>-Emitter für starke Magnetfelder

Martin Singer - E4  
Praktikumsbericht

12.12.2017

## Zusammenfassung

Für den Betrieb einer Vakuum-Anlage ist es von großer Bedeutung den Druck in der Anlage genau bestimmen zu können. Hierfür wurden über die Jahre diverse Möglichkeiten der Druckmessung entwickelt. Jedoch gestalten sich diese Messungen in Fusions-Anlagen besonders schwierig. In solchen werden mithilfe hoher magnetischer Feldstärken geladenen Teilchen eingesperrt und deren Verhalten untersucht. Eben diese großen Feldstärken stellen die gesamte Diagnostik innerhalb einer solchen Anlage, insbesondere auch die Druckmessung vor vielerlei Probleme.

Im Rahmen eines Praktikums am Institut für Plasmaphysik (IPP) in Greifswald, innerhalb der Abteilung für Divertor- und Randschichtphysik (E4) sollte ein neuer Prototyp von Ionisationsmanometern auf seine Tauglichkeit für Druckmessungen bei hohen Magnetfeldstärken getestet werden. Hierfür wurden mit diesem Manometer mehrere Experimente im PAX-Labor innerhalb eines Magneten durchgeführt, bei welchem Feldstärken von bis zu 5 T erreicht werden können. Diese Experimente sollen nun im Folgenden, nach einer Einleitung zur Druckmessung und ihrer Probleme bei hohen Feldstärken, sowie einer Vorstellung des Prototyps und Versuchsaufbaus kurz beschrieben und erläutert werden.

# Contents

1. Druckmessung	3
2. Das LaB <sub>6</sub> -Ionisationsmanometer	5
3. Aufbau des Experiments	6
4. Vergleich der Manometer im Magnetfeld	7
5. Ermittlung eines Arbeitspunktes	8
6. Funktionstests	13
7. Erste Kalibrierung	17
8. Hochdrucktest	20
9. Langzeitmessung	21
10. Fazit und Ausblick	22
A. Anhang und zusätzliche Abbildungen	24

# 1. Druckmessung

In den meisten physikalischen Experimenten ist der Druck innerhalb der experimentellen Apparatur ein wichtiger Parameter. Über den Druck können Rückschlüsse auf Restgas in der Vakuumanlage gezogen werden oder er kann direkt als Indikator für die Güte eines Vakuums betrachtet werden. Gerade in Fusions-Experimenten stellt der Gasdruck einen für das Plasma essentiellen Kontrollparameter dar. Durch Messungen des Drucks in der Randschicht des Plasmas kann der Gaseinlass in das Experiment überprüft und können Transportphänomene in der Randschicht untersucht werden. Aufgrund dessen ist es für viele Experimente besonders wichtig, über den Druck in dem experimentellen Aufbau Auskunft zu erhalten.

Für die Druckmessung stehen unterschiedliche Methoden zu Verfügung, zum Beispiel die kapazitiven Manometer. Diese funktionieren mithilfe zweier Membranen, welche die Membranen eines Plattenkondensators bilden, bei denen die eine Kondensatormembran fest installiert und die zweite so aufgehängt ist, dass sie sich relativ zu der ersten verschieben lässt. Die bewegbare Membran steht über eine kleine Öffnung im Kontakt zum Vakuum, sodass im Vakuum vorhandenen Teilchen zu ihr gelangen können. Treffen diese Teilchen auf die Membran, verschiebt sich diese je nach Intensität des Teilchenstroms hin zur fest aufgehängten (bzw. bei nachlassendem Strom von dieser weg), was in einer Änderung der Kapazität des Kondensators resultiert. Diese Kapazitätsänderung ist direkt proportional zum Druck in der Vakuumanlage, da die resultierende Kraft je Fläche (= Druck), welche von den Teilchen auf die Membran übertragen wird direkt in der Kapazitätsänderung messbar ist. Auf diese Weise wird mithilfe kapazitiver Manometer der absolute Druck bestimmt.

Eine weitere, häufig Anwendung findende Methode ist die der Ionisationsmanometer. Diese Manometer bestehen aus einer Anordnung von einer Elektronenquelle und mehrerer Elektroden, welche in Abbildung 1 schematisch skizziert ist. Die erste Gitterelektrode [Kontrollgitter] „saugt“ die Elektronen von der Elektronenquelle (meist eine einfache Glühwendel aus Wolfram) ab und das zweite Gitter [Beschleunigungsgitter] beschleunigt diese Elektronen dann in das Ionisationsvolumen. Dort ionisieren die Elektronen Gasatome im Volumen, welche dann durch die dritte Elektrode [Ionenkollector] angezogen werden. Dort entladen sich die positiv geladenen Gasionen wieder durch Einfang eines Elektrons von der Oberfläche. Der auf diese Weise resultierende Elektronenstrom ist proportional zu den Gasionen im Volumen und somit ein Maß für die Teilchenanzahl im Gasvolumen.

Dabei muss jedoch bedacht werden, dass der erzeugte Elektronenstrom von dem Gasarten im Ionisationsvolumen abhängig ist, da verschiedene Gase bei gleichbleibender Elektronenenergie sich unterschiedlich ionisieren lassen. Deswegen bedarf es bei der Ermittlung des realen Drucks mithilfe dieser Methode eines Korrekturfaktors. Diese Faktoren sind in gängigen Nachschlagewerken <sup>1</sup> aufgelistet und müssen bei der Bestimmung des realen Drucks mit den Messwerten berücksichtigt (multipliziert) werden.

---

<sup>1</sup>z.B. den Know-How-Kompendium von Pfeiffer-Vacuum[2] oder Grundlagen der Vakuumtechnik von œrlikon (leybold vacuum)[6]

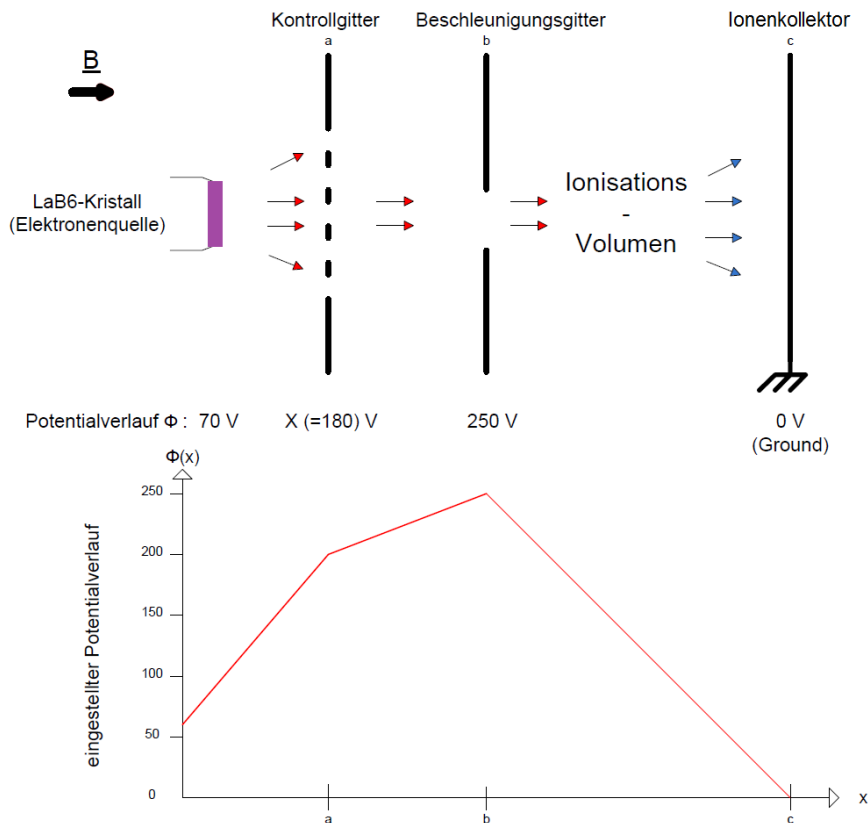


Figure 1: Oben ist der skizzierte Aufbau des getesteten Ionisationsmanometers zu sehen. Ganz links sitzt der LaB<sub>6</sub>-Kristall und rechts daneben in kleinen Abständen zunächst das Kontroll- und Beschleunigungsgitter. Ganz rechts sieht man den Ionenkollector sowie zwischen diesen und dem zweiten Gitter das Ionisationsvolumen. Das untere Bild zeigt den idealisierten Potentialverlauf der Anordnung.

Somit haben die Ionisationsmanometer gegenüber den kapazitiven Manometern den Nachteil, dass sich die Auswertung einer Messung bei Gasgemischen schwieriger gestaltet, während bei der kapazitiven Messung direkt der absolute Druck gasunabhängig ermittelt werden kann. Dafür können mit Ionisationsmanometern größere Druckbereiche im UHV [ultra high vacuum] ( $10^{-12}$  bis  $10^{-3}$  mbar [7]) gemessen werden, während die kapazitiven Manometer erst bei höheren Druckbereichen zuverlässig arbeiten ( $10^{-5}$  bis  $10^{-11}$  mbar), da es erst einen gewissen Drucks bzw. Teilchenstroms zur Verformung der Membran bedarf.

Bei Druckmessungen in magnetisch eingeschlossenen Plasmen gibt es jedoch besondere Probleme, welche die Messung problematisch gestalten. So muss durch einen Elektronenemitter, bspw. eine Glühkathode aus Wolfram, ein gewisser Heizstrom fließen, damit diese auch den gewünschten Elektronenstrom emittiert. Unter dem Einfluss eines Mag-

netfeldes wirkt jedoch auf geladene Teilchen die Lorentzkraft. Aufgrund dieser Kraft kommt es zu einer Ablenkung der Teilchen senkrecht zu ihrer Bewegungsrichtung und zum Magnetfeld. Das kann bei hohen Strömen in der Kathode dazu führen, dass sich diese im Magnetfeld verbiegt, was bis zum Ausfall des Ionisationsmanometers führen kann. Da bei aufwendigen Experimenten während des laufenden Betriebs nicht einfach das Vakuum aufgebrochen und defekte Geräte ausgetauscht werden können, handelt es sich hierbei um ein Problem, welches nach Möglichkeit umgangen werden sollte und insbesondere für zukünftige Experimente einer Lösung bedarf.

## 2. Das $\text{LaB}_6$ -Ionisationsmanometer

Aufgrund dessen wurde am IPP Greifswald die Idee für eine neue Bauart der Ionisationsmanometer entwickelt, bei welcher diese Probleme vermieden werden sollen. Zu diesem Zweck wurde bei einem Manometer, wie sie bisher im ASDEX-Experiment und im W7-X zum Einsatz kommen[3] die Wolfram-Glühwendel durch einen Lanthanhexaborid( $\text{LaB}_6$ )-Kristall als Elektronenemitter ausgetauscht.

Bei den Lanthanhexaborid-Kristallen handelt es sich um rein künstlich hergestellte Kristalle, welche eine neue Möglichkeit der Emission von Elektronen bieten. Der Kristall wird dabei zwischen zwei Graphit-Blöcken unter hohem Druck (ca. 100 bar) eingeklemmt, welche wiederum an zwei Molybdän-Pfosten befestigt sind. Über diese wird eine Heizstrom angelegt, welcher zunächst direkt durch ohm'sches Heizen die Graphit-Blöcke erwärmt und dann konduktiv den  $\text{LaB}_6$ -Kristall. Es bedarf nur eines geringen Heizstromes von etwa 1-3 A, der den Kristall langsam erwärmt und ihn somit zur Elektronenemission anregt. Dabei können mit geringen Heizströmen beachtliche Elektronenströme erzeugt werden (siehe Abbildung 4 in Abschnitt 5). Der Wolfram-Emitter des ASDEX-Manometers bedarf dagegen Heizströme von 15 – 20 A, um einen Elektronenstrom von  $200 \mu\text{A}$  zu erhalten (siehe [3]). Für denselben Elektronenstrom benötigt der  $\text{LaB}_6$ -Kristall nur einen Heizstrom von 1,45 A bei einem Druck von  $1 \cdot 10^{-5}$  mbar (siehe Abbildung 8).

Jedoch sollte dabei beachtet werden, dass durch die geringe Heizleistung auch die Temperatur des Kristalls im Vergleich zur herkömmlichen Glühwendeln aus Wolfram sehr gering ist. Dies ist im direkten optischen Vergleich (siehe Abbildung 2) relativ einfach zu erkennen. Es bleibt daher offen, ob es im Betrieb bei geringen Kristalltemperaturen unter Gasatmosphäre zu einer Ablagerung von Verunreinigungen auf dem Kristall kommt, welche im längeren Betrieb zu einer Verringerung des Elektronenstroms führen könnte, oder gar den Einsatz des Kristalls innerhalb des Manometers unmöglich macht. Ebenso wenig Erfahrung wurden bisher bezüglich der Interaktion des Kristalls mit Neutronen gewonnen, welche insbesondere in zukünftigen Fusionsexperimenten zu erwarten sind und auch zu einer Beschädigung führen könnten. Dieses sind Ansatzpunkte für weitere Erprobungen, um die Einsetzbarkeit der Manometer in Fusionsexperimenten zu überprüfen.

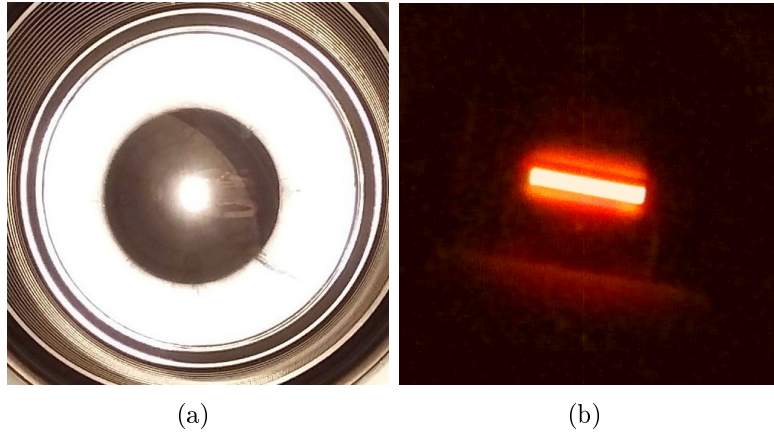


Figure 2: Optischer Vergleich der beiden Ionisationsmanometer im laufendem Betrieb. Links das ASDEX-Manometer mit Wolframkathode und rechts der Prototyp mit  $\text{LaB}_6$ -Kristall als Elektronenemitter.

### 3. Aufbau des Experiments

Alle in dieser Arbeit beschriebene Messungen fanden im PAX-Labor am IPP in Greifswald statt. Dieses Labor verfügt über einen supraleitenden Magneten mit dem magnetische Feldstärken bis zu 5 T erreicht werden können. Da dieser Magnet jedoch im persistent-Mode betrieben wird, ist es nicht möglich im laufendem Betrieb die Magnetfeldstärke zu variieren, weswegen bei allen Messungen eine Feldstärke von 3,1 T vorliegt.

Durch eine Öffnung an der einen Seite des Magneten können Geräte in einen etwa 40 cm langen, homogenen Magnetfeldbereich eingebracht werden. Auf der anderen Seite sind eine Turbopumpe mit einem Saugvermögen von 350 l/s, sowie drei kommerzielle Manometer angebracht. Ein Ionisationsmanometer zu Vakuumkontrolle direkt an der Turbopumpe, sowie ein weiteres Ionisations- und ein kapazitives Manometer etwas näher am Magneten. Mit der Pumpe und einem Gaseinlass nahe dem Test-Manometer können Wasserstoff- und Heliumgasdrücke in einem Bereich von  $1 \cdot 10^{-5}$  bis  $1 \cdot 10^{-1}$  mbar realisiert werden.

Die Ansteuerung des  $\text{LaB}_6$ -Kristalls findet mithilfe eines Hardware-Karteneinschubs und LabView-Programmes statt, wie sie auch beim ASDEX-Manometer zum Einsatz gekommen sind. Da es bei ersten Experimenten zu Spannungsspitzen kam, durch welche ein Kristall zerstört wurde, ist in den folgenden Messungen der Heizstrom über die Karte auf 3 A begrenzt. Bei den Ionen- und Elektronenströmen liegt auf der Software-Seite eine Begrenzung von 1 mA vor. Über die Software können Abtastfrequenz und Empfindlichkeit der Ionenstromaufnahme eingestellt werden. Es bestehen dabei die Möglichkeiten Messungen in zwei Modi aufzunehmen: Im feedforward-Modus wird ein fester Heizstromwert eingestellt, anhand welchem sich je nach den Umgebungsbedingungen Elektronen- und Ionenstrom einstellen. Der feedback-Modus gibt ein Elektronenstrom vor und passt durch die feedback-Regelung den Heizstrom an, so dass der Elektronenstrom nahezu konstant bleibt.

# Bisherige Messungen

## 4. Vergleich der Manometer im Magnetfeld

In einer ersten Messung wurde zunächst die Funktion der verschiedenen Manometer an der PAX-Anlage getestet. Dies sollte Aufschluss über den Einfluss des Magnetfelds auf die Manometer und einen ersten Vergleich zu dem ASDEX-Manometeter mit Wolfram-Glühwendel liefern. Dabei wurden die Druckwerte zweier Ionisationsmanometer (Ionivac), eines kapazitiven Manometers (Baratron) sowie eines ASDEX-Manometers aufgenommen. In Abbildung 3 sind die Messwerte der verschiedenen Manometer über den Baratron-Druck aufgetragen.

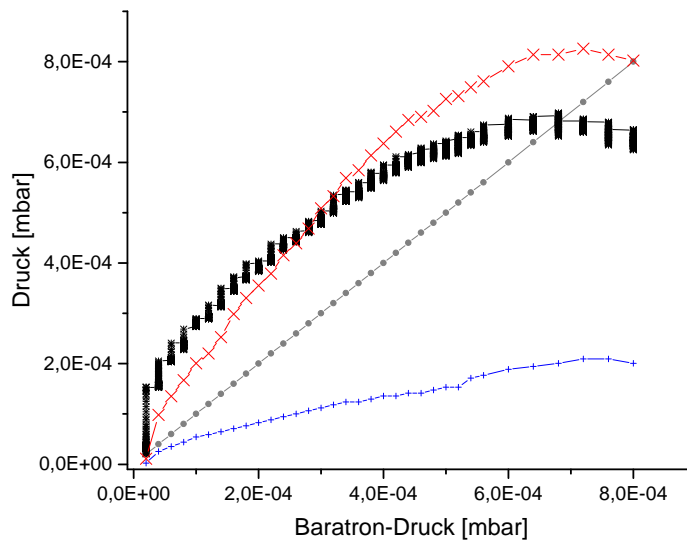


Figure 3: Druckwerte der verschiedenen Manometer am PAX-Magneten aufgetragen über den Baratron-Druck. Das ASDEX-Manometer in schwarz, das Ionivac nahe des Magneten in rot, das Ionivac am Pumpstand in blau und das Baratron in grau. Alle Druckwerte wurden entsprechend der Gasart (Helium) korrigiert.

Man kann erkennen, dass das ASDEX-Manometer sowie das Ionivac nahe des Magneten (dort:  $B = 15 \text{ mT}$ ), sich mit zunehmenden Druck annähern, während das Ionivac an der Turbopumpe wie zu erwarten deutlich niedrigere Werte anzeigt. In die Messwerte der Ionivac gingen hierbei der Eichfaktor für Helium ( $5,7 \cdot 10^{-4} \text{ mbar}/\mu\text{A}$  bei  $250 \mu\text{A}$ , ermittelt während OP1.1 am W7-X) ein. In den weiteren Messungen dient das Baratron im höheren Druckbereich (Schwellwert bei  $3 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$ ) als Referenz und wird dabei immer wieder mit dem Ionivac nahe des Magneten verglichen. Bei niederen Drücken werden sich die Druckmesswerte anhand dieses Ionisationsmanometers orientieren. Des Weiteren wurden diese beiden Manometer um den Einfluss des Streumagnetfelds auf die



Messwerte zu reduzieren mit einer magnetischen Abschirmfolie ( $\mu$ -Folie) zusätzlich vom Magnetfeld abgeschirmt.

## 5. Ermittlung eines Arbeitspunktes

Nach dieser vorbereitenden Messung wurde das LaB<sub>6</sub>-Manometer in die Anlage eingebaut. Um sich mit diesen langsam vertraut zu machen, galt es zunächst einen Arbeitspunkt zu bestimmen, bei welchem das Manometer in den weiteren Messungen betrieben werden kann.

In diesem Rahmen wurde zunächst die Spannung am Kontrollgitter variiert. Da die Spannungen über die Steuer-Karte fest eingestellt werden, ist es aufwendig die Spannungen an den verschiedenen Elektroden zu verändern. Deswegen wird bei dieser Suche eines ersten Arbeitspunktes für das Manometer nur die Spannung an der Kontrollelektrode variiert, da diese Spannung - wie im folgenden zu sehen ist - einen großen Einfluss darauf hat, welcher Maximalstrom vom Kristall genutzt werden kann. Hierzu wurden bei verschiedenen Spannungen am Kontrollgitter Messungen in Restgasatmosphäre ( $\approx 1 \cdot 10^{-5}$  mbar) im feedback-Modus durchgeführt, wobei der Elektronenstrom fest vorgegeben wird, und die feedback-Regelung den Heizstrom dementsprechend einstellt. Die hieraus resultierenden Verläufe sind in Abbildung 4 dargestellt.

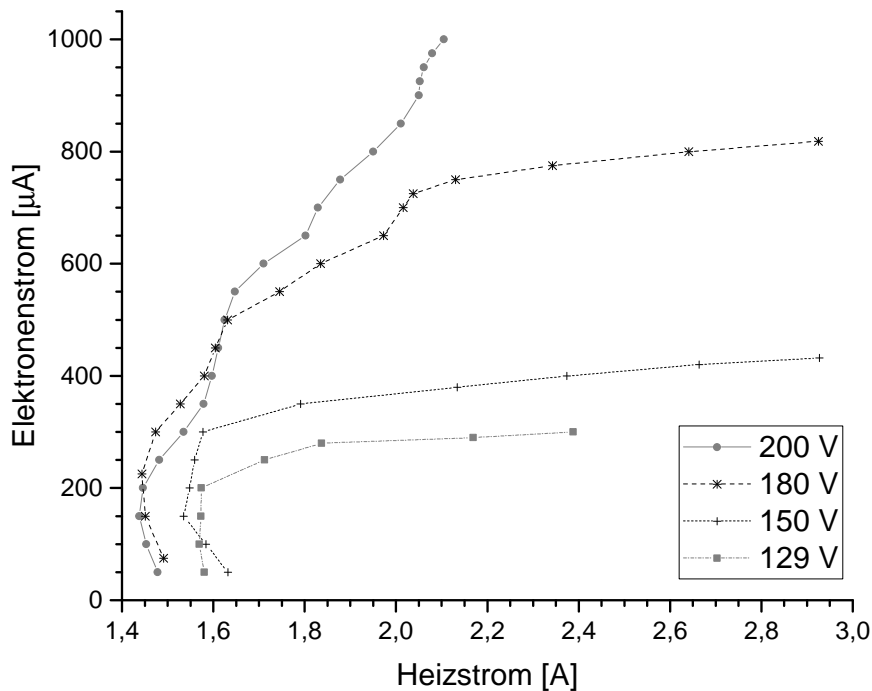


Figure 4: Heizstromkurven für verschiedene Potentiale am Kontrollgitter.

Es kann zunächst festgestellt werden, dass sich die Kurven grob aus zwei Bereichen zusammensetzen: Einen Bereich des steilen Anstiegs bei geringeren Strömen. In diesen resultieren großen Änderungen des Elektronenstroms aus kleinen Veränderungen im Heizstrom. Und einen weiteren Bereich der Sättigung, bei welchem der Heizstrom starker Änderungen bedarf um eine signifikante Änderung des Elektronenstroms zu bewirken. Im Sättigungsbereich wird das sogenannte Raumladungs-Limit erreicht. Dieser Bereich kann mit Erhöhung des Potentials am Kontrollgitter zu höheren Strömen verschoben werden, und ist bei der 200 V-Kurve nur nicht zu sehen, da er außerhalb der elektrischen Begrenzung des Messbereichs (bei 1 mA) liegt.

Der Bereich des steilen Anstiegs fällt durch die Bifurkation im Heizstrom auf. Für manche Heizstromwerte sind hier zwei verschiedene Werte möglich, in welchen sich der Elektronenstrom einstellen kann. Diese Besonderheit wird im Weiteren noch näher untersucht werden. Eine andere Auffälligkeit dieses Bereiches liegt darin, das bei festen Heizstrom der Elektronenstrom einer Weile bedarf, um einen konstanten Wert anzunehmen. Dies ist in Abbildung 5(a) gut zu erkennen. Bei der ersten Messung (schwarze Kurve) wurden die Messwerte für den Elektronenstrom direkt nach Einstellung des Heizstroms aufgenommen. Es resultierte der erwartete Elektronenstromverlauf mit steilen Anstieg und Sättigungsbereich. Im zweiten Fall (graue Kurve) wurde mit Aufnahme der Heizstromwerte fünf Minuten gewartet. Zwar sind nun immer noch beide Bereiche deutlich zu erkennen, jedoch hat der Anstiegs-Bereich seine Form merklich verändert.

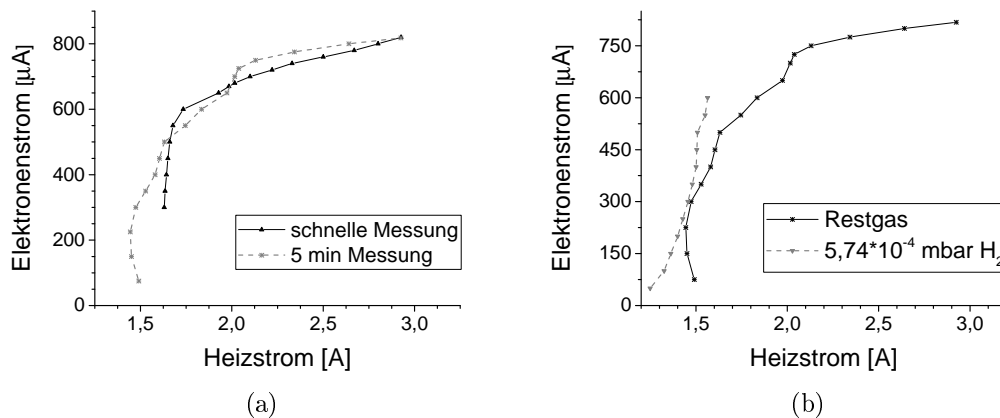


Figure 5: Heizstromkurven bei einer Spannung von 180 V am Kontrollgitter. In (a) wurde zwei Messungen verglichen, bei welchen zwischen Einstellung des Heiz- und Aufnahme des Elektronenstroms verschiedene Zeiten vergangen sind. (b) veranschaulicht den Einfluss einer Wasserstoffatmosphäre bei  $5,74 \cdot 10^{-4}$  mbar auf den Verlauf der Heizstromkurve.

Dieses Verhalten könnte auf das Heizen des LaB<sub>6</sub>-Kristalls mithilfe von Konvektion zurück geführt werden. Gerade bei geringen Heizströmen könnte es unter Umständen eine Weile dauern, bis sich der Kristall gleichmäßig erwärmt hat. Es zeigt uns, dass das Verhalten dieser Kristalle noch einer näheren Untersuchung bedarf.

Dies zeigt sich auch beim Vergleich der zwei Heizstromkurven aus Abbildung 5(b). Hier ist in schwarz der Elektronenstromverlauf bei 180 V aus Abbildung 4 zu sehen, und in grau derselbe Messvorgang unter Wasserstoffatmosphäre. Es fällt auf, dass die Kurve im zweiten Fall ein wenig verschoben ist und ihren Verlauf gerade bei kleinen Heizströmen merklich ändert. Das Verhalten der Emission unter Wasserstoffatmosphäre wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch näher betrachtet werden.

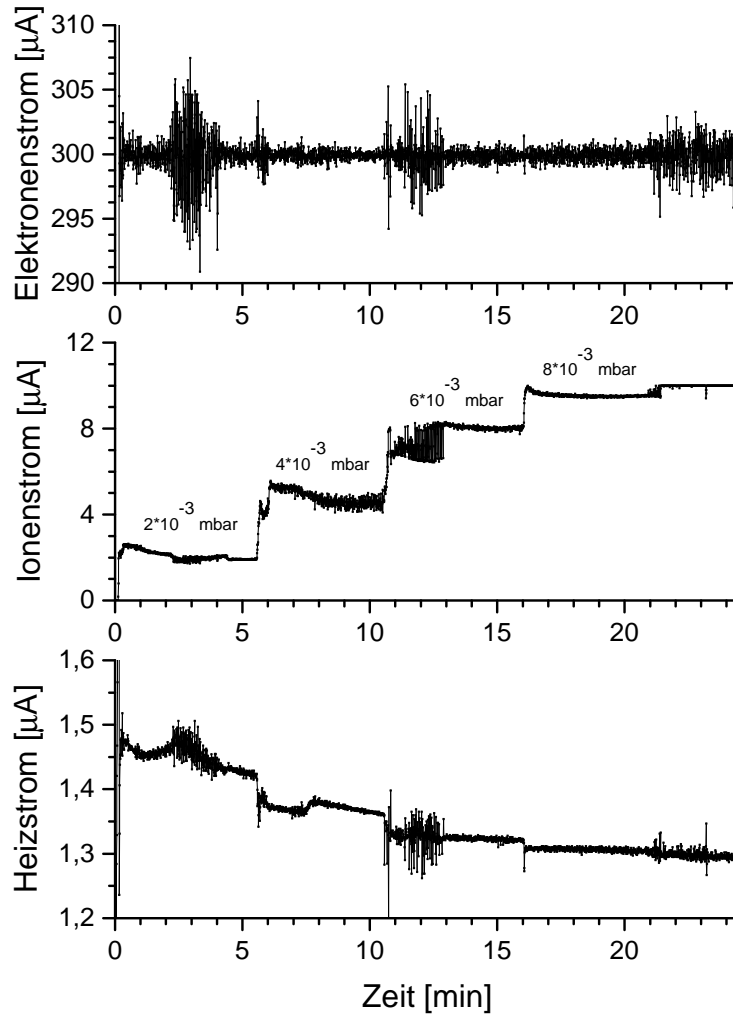


Figure 6: Drucktreppe bei  $I_e = 300 \mu$  über einen Druckbereich von  $2 \cdot 10^{-3}$  mbar bis  $8 \cdot 10^{-3}$  mbar. Auf jeder Druckstufe wurde knapp fünf Minuten der Druck konstant gehalten.

Für die Wahl des Elektronenstroms wurde zunächst eine Messung bei  $I_e = 300 \mu\text{A}$  durchgeführt (Abbildung 6), bei welcher eine Drucktreppe aufgenommen wurde. Hierzu wurde Wasserstoffdruck in der Anlage von  $2 \cdot 10^{-3}$  mbar stufenweise auf  $8 \cdot 10^{-3}$  mbar erhöht, wobei auf jeder Stufe der Druck etwa fünf Minuten konstant gehalten wurde. Zunächst kann festgestellt werden, dass die feedback-Regelung funktioniert. Nur während der ersten und dritten Stufe sind im Elektronen- sowie Heizstrom größere Fluktuationen zu erkennen, die sich auch nur während der dritten Stufe auf den Ionenstrom auszuwirken scheinen. Ansonsten schafft es die feedback-Regelung den Elektronenstrom mit geringen Fluktuationen von maximal  $\pm 9 \mu\text{A}$  konstant zu halten.

Wie erwartet nimmt der Ionenstrom mit ansteigendem Druck zu. Überraschend ist jedoch, dass der Heizstrom bei konstantem Elektronenstrom mit zunehmendem Druck abnimmt. Mit zunehmend dichterem Wasserstoffatmosphäre um den  $\text{LaB}_6$ -Kristall wird immer weniger Heizstrom benötigt um denselben Elektronenstrom zu generieren, obwohl man zunächst annehmen könnte, dass das Wasserstoffgas eher einen kühlenden Effekt auf den Kristall haben könnte, wodurch der zum Heizen benötigte Strom ansteige. Dieses ist ein Verhalten, welches sich in Abbildung 5(b) schon angedeutet hat und das in vielen folgenden Messungen immer wieder beobachtet werden kann.

Wird diese Messung nun mit einer weiteren bei  $I_e = 200 \mu\text{A}$  (Abbildung 8) verglichen, sieht man, dass bei einem niedrigeren Elektronenstrom die Fluktuationen im Heiz- und Elektronenstrom deutlich abnehmen. Außerdem spiegeln sich diese hier nicht im Ionenstrom wider, obwohl es auch hier einige Bereiche gibt, in denen die Fluktuationen etwas zunehmen.

Um das Verhalten des Elektronenstroms näher zu untersuchen wurde auch eine Messung aufgenommen, bei welcher der Elektronenstrom bei einem konstanten Druck von  $5,8 \cdot 10^{-4}$  mbar schrittweise erhöht wurde. Dies ist in Abbildung 7 zu sehen. Im Vorlauf zur Messung wurde der Kristall 30 Minuten bei konstantem Elektronenstrom ( $I_e = 50 \mu\text{A}$ ) auf Betriebstemperatur gebracht und der Druck eingestellt. Im zeitlichen Verlauf kann man im Ionenstrom sehen, wie der Druck sich nach 5–10 Minuten auf einen konstanten Wert einstellt. Ebenso kann anhand des exponentiellen Heizstromabfalls ausgemacht werden, dass der Kristall etwa 15–20 Minuten braucht um eine konstante Temperatur zu erreichen.

Die Treppenstruktur von Elektronen- und Ionenstrom zeigt, dass wie zu erwarten auch bei konstantem Druck mit dem Elektronenstrom der gemessene Ionenstrom zunimmt, sowie auch der benötigte Heizstrom. Des weiteren kann man erkennen, dass der Elektronenstrom sich, bis auf einige Ausreißer bei  $450 \mu\text{A}$ , relativ ruhig verhält. Wohin gegen der Heizstrom mal mehr, mal weniger stark fluktuiert, und sich bei einem Elektronenstrom von  $200 - 300 \mu\text{A}$ , sowie zwischen  $500 - 600 \mu\text{A}$  am ruhigsten verhält.

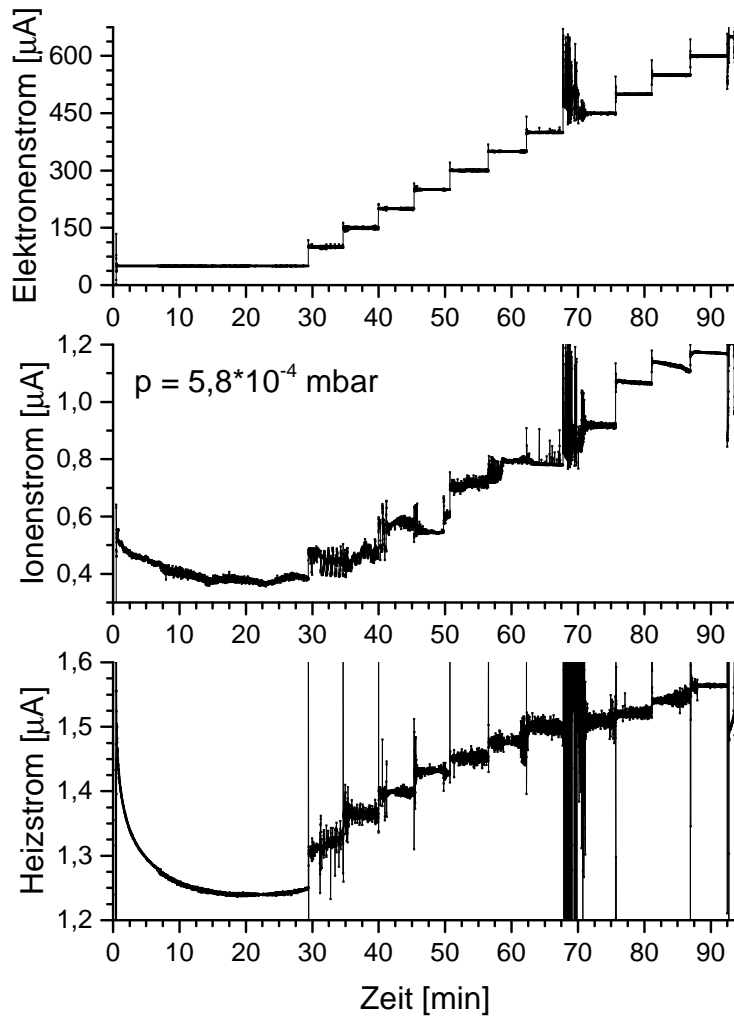


Figure 7: Elektronenstromtreppe im feedforward-Modus bei einem konstanten Druck von  $5,8 \cdot 10^{-4}$  mbar. Zuvor eine 30 Minütige Aufwärmphase bei  $I_e = 50 \mu\text{A}$ .

Aufgrund dessen wurde entschieden, für einen ersten Arbeitspunkt des LaB<sub>6</sub>-Manometers eine Spannung von 180 V am Kontrollgitter zu wählen und den Kristall bei einem Heizstrom von 200  $\mu\text{A}$  zu betreiben. Auf diese Weise befindet sich dieser Punkt in Abbildung 4 noch auf der steilen Flanke der 180 V-Kurve, so dass eine geringe Variation des Heizstroms eine große Veränderung im Emissionsstrom bewirken kann. Dies ist insbesondere für die feedback-Regelung von Bedeutung, da diese somit den Heizstrom nur gering variieren muss, um den Elektronenstrom konstant halten zu können. Deswegen kann dieser bei 200  $\mu\text{A}$  unter geringeren Fluktuationen gehalten werden.

## 6. Funktionstests

Mit diesem Arbeitspunkt bei einer Spannung von 180 V am Kontrollgitter und mit einem Elektronenstrom von  $I_e = 200 \mu\text{A}$  wurde die Funktionsweise des Manometers zunächst mithilfe mehrere Wasserstoff-Drucktreppen untersucht, wie sie zuvor schon beschrieben wurden. In Abbildung 8 ist eine solcher Drucktreppe abgebildet, bei welcher der Druck von  $3 \cdot 10^{-5}$  mbar in Intervallen von etwa vier Minuten über einen weiten Druckbereich bis hin zu  $7 \cdot 10^{-3}$  mbar erhöht wird.

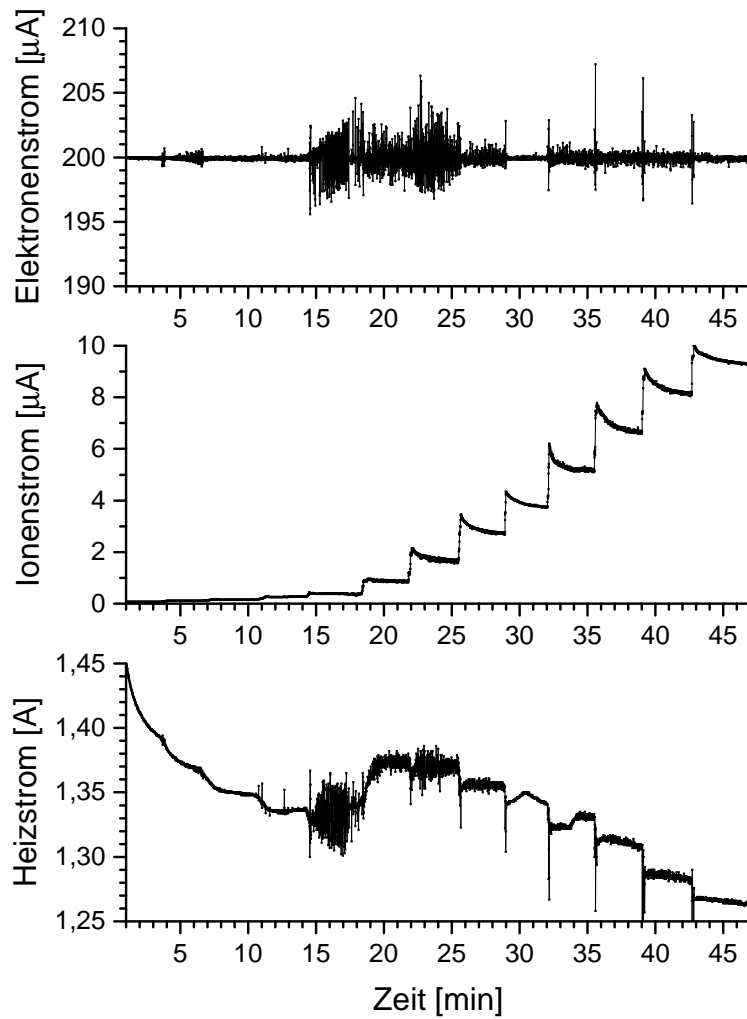


Figure 8: Drucktreppe mit 13 Stufen über einen weiten Druckbereich von  $3 \cdot 10^{-5}$  mbar bis hin zu  $6,3 \cdot 10^{-3}$  mbar. Besonders auffällig sind hier die Bifurkationen um die 30 bis 35 Minute.

Dass in dieser Messung der Ionenstrom bei höheren Drücken auf einer Mess-Stufe abfällt ist darauf zurück zu führen, dass bei den Experimenten kein Ventil vorhanden war, welches aktiv den Druck regelt. Sollte mit dem Nadelventil ein Druck eingestellt werden, so fiel der zunächst eingestellte Druck bei hohen Drücken mit der Zeit immer wieder exponentiell ab. Dieser Abfall ist bei jeder der Stufen annähernd konstant und gibt in etwa die Zeit an, die das Vakuumsystem benötigt um sich bei höheren Drücken auf einen konstanten Zustand einzustellen (ca. 1,5 bis 2,5 Minuten).

Auch hier ist mit steigendem Druck ein abnehmender Heizstrom zu beobachten. Dagegen konnte jedoch in einer anderen Drucktreppen-Messung (Abbildung 17 im Anhang) in einem niedrigeren Druckbereich ( $5 \cdot 10^{-6}$  mbar bis  $1,1 \cdot 10^{-5}$  mbar) ein Anstieg des Heizstroms mit zunehmendem Druck beobachtet werden. Dieses ist ein Verhalten, welches dem ähnelt, das von H.E. Gallagher [1] bei Untersuchungen der Elektronenemission von  $\text{LaB}_6$ -Kristallen unter Atmosphären beschrieben wurde.

Des weiteren können im Zeitraum von 30 – 35 Minuten auf zwei Stufen Bifurkationen im Heizstrom beobachtet werden. Dieses Verhalten hat sich schon in Abbildung 4 angedeutet und tritt hier nun in zwei verschiedenen Erscheinungen auf. Bei der ersten Stufe um die dreißigste Minute bei  $2,8 \cdot 10^{-3}$  mbar kann ein kontinuierlicher Übergang von einem Niveau (1,34 A) zu einem zweiten, höheren (1,35 A) und wieder zurück beobachtet werden. Die nächste Stufe bei  $3,8 \cdot 10^{-3}$  mbar dagegen weist eine Diskontinuität im Heizstrom auf, bei welcher dieser von einem niedrigeren Niveau (1,32 A) auf ein höheres (1,33 A) springt. Diese zweite Art der Bifurkation ist derjenige Typ, welcher in den bisherigen Messungen am häufigsten aufgetreten ist. Ob es sich hierbei um einen statistischen Zufall handelt kann bis jetzt nicht gesagt werden, da dieses Phänomen bisher noch nicht eindeutig reproduziert werden konnte. Es ist immer nur spontan aufgetreten und bis zum jetzigen Stand konnten noch keine speziellen Umgebungsparameter außer dem bloßen Vorhandensein einer Wasserstoffatmosphäre gefunden werden, die dieses Verhalten des Kristalls bedingen.

Um die Phänomene der Bifurkation und das Abnehmen des Heizstroms mit höheren Drücken näher zu untersuchen wurden zwei weitere Messungen im feedforward-Modus bei einem konstantem Heizstrom von 1,47 A durchgeführt. In der ersten Messung (siehe Abbildung 9) wurde zunächst ein konstanter Druck von  $5,6 \cdot 10^{-4}$  mbar eingestellt und etwa 8,5 Minuten gehalten. Danach wurde der Gaseinlass abrupt geschlossen, sodass nach kurzer Zeit nur noch ein Restgasdruck von etwa  $1 \cdot 10^{-6}$  mbar im Aufbau vorhanden war. In dem Bereich konstanten Druck trat hierbei eine Bifurkation im Elektronenstrom auf. Bei konstantem Heizstrom wechselte der Elektronenstrom, und dementsprechend auch der Ionenstrom, diskontinuierlich zwischen zwei Niveaus hin und wieder zurück. Dabei kommt es im Elektronenstrom zu einem Anstieg von  $150 \mu\text{A}$  und von 0,3 A im Ionenstrom. Auffällig ist, dass auf dem niedrigeren der beiden Niveaus die Fluktuationen ausschließlich positive, und auf dem höheren Niveau nur negative Werte bezüglich des Niveaus annehmen. Somit kann eventuell anhand der Richtungen der Fluktuationen im den Strömen zumindest bei feedforward-Messungen das Niveau erkannt werden, auf welchem sich das System befindet.

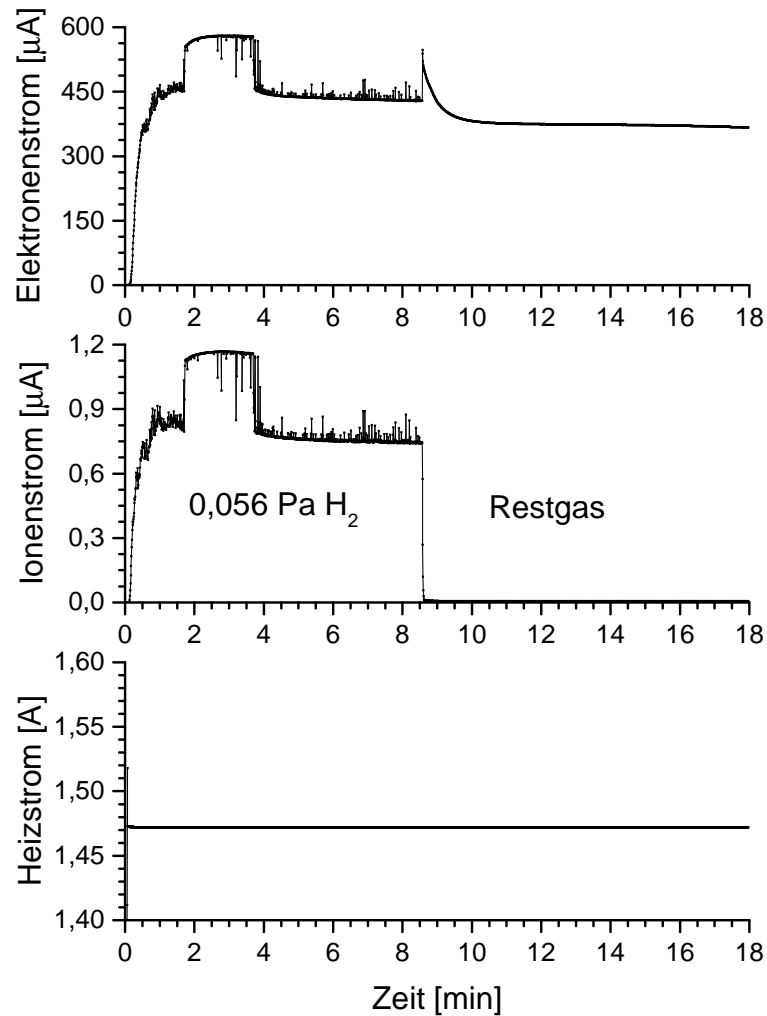


Figure 9: Feedforward-Messung bei  $I_h = 1,47$  A. In den ersten acht Minuten sollte das Verhalten des Elektronenstrom insbesondere dessen Bifurkation bei gleichbleibendem Heizstrom unter konstanter Wasserstoffatmosphäre untersucht werden. Im zweiten Bereich dient der Untersuchung des Ausschaltprozesses unter denselben Bedingungen.

Bei dem Ausschaltvorhang kann dagegen festgestellt werden, dass der Elektronenstrom bei konstantem Heizstrom von  $430 \mu\text{A}$  unter Wasserstoffatmosphäre auf  $375 \mu\text{A}$  im Restgas abfällt. Dies entspricht der Umkehrung des schon zuvor beschriebenen Effekts, wobei bei konstantem Elektronenstrom mit zunehmendem Druck immer geringere Heizströme benötigt werden. Hier wird scheinbar die Emission von Elektronen durch den Kristall in der Wasserstoffatmosphäre begünstigt, sodass bei Wegfall dieser der Elek-



tronenstrom merklich abnimmt. Dieses Verhalten könnte durch unbekannte chemische Effekte des Kristalls mit der Atmosphäre oder durch Elektronen aus der Ionisationsregion erklärt werden. Jedoch erscheint zweite Erklärung bei dem geringen Druck in der obigen Messung eher unwahrscheinlich.

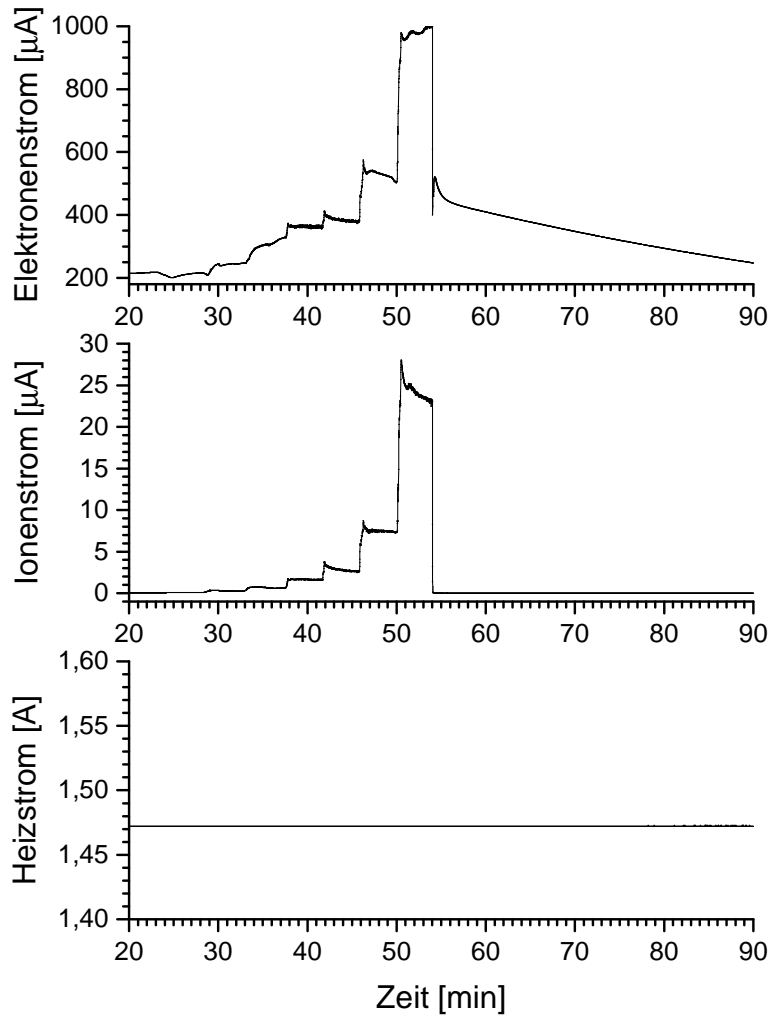


Figure 10: Feedforward-Messung bei  $I_h = 1,47$  A. Hier soll der Einfluss des Wasserstoffs bei konstantem Heizstrom auf den Elektronenstrom veranschaulicht werden. Hierzu wurde der Druck von  $5,1 \cdot 10^{-6}$  mbar gleichmäßig bis auf  $1,3 \cdot 10^{-2}$  mbar erhöht.

Um dieses Phänomen näher zu betrachten wurde bei der zweiten Messung (siehe Abbildung 10) bei konstantem Heizstrom der Druck von  $5,1 \cdot 10^{-6}$  mbar stufenweise bis

auf  $1,3 \cdot 10^{-2}$  mbar erhöht. Danach wurde das Ventil geschlossen und die Messung noch knapp 30 Minuten weiter laufen gelassen, um zu ermitteln, auf welchen Endzustand sich der Elektronenstrom einstellen würde. Hier ist deutlich zu erkennen, wie der Elektronenstrom mit steigendem Druck stark ansteigt. Liegt beim Anfangsdruck noch ein Strom von  $I_e = 220 \mu\text{A}$  vor, so steigt dieser zum Ende hin bis auf 1 mA an. Ohne elektronische Begrenzung hätten wahrscheinlich noch höhere Ströme erreicht werden können.

## 7. Erste Kalibrierung

Um das LaB<sub>6</sub>-Manometer auch als Druckmessgerät nutzen zu können muss dieses kalibriert werden. Die Kalibrierung findet hier anhand der aufgenommenen Drucktreppen und mithilfe des Baratron sowie Ionivac statt, deren Funktion in Abschnitt 4 untersucht wurden. Druckwerten unter  $3 \cdot 10^{-5}$  mbar orientieren sich hierbei am Ionivac, während Drücke über diesem Schwellwert anhand des Baratron bestimmt wurden. Für jede Druckstufe einer Messung wurden hierbei die Mittelwerte aus Ionenstrom und Druck gebildet, welche in Abbildung 11 doppelt-logarithmisch aufgetragen sind. Auf diese Weise kann gezeigt werden, dass das LaB<sub>6</sub>-Manometer in einem Druckbereich von  $1 \cdot 10^{-5}$  mbar bis zu  $1 \cdot 10^{-2}$  mbar funktioniert und es kann anhand dieser Druckwerte kalibriert werden.

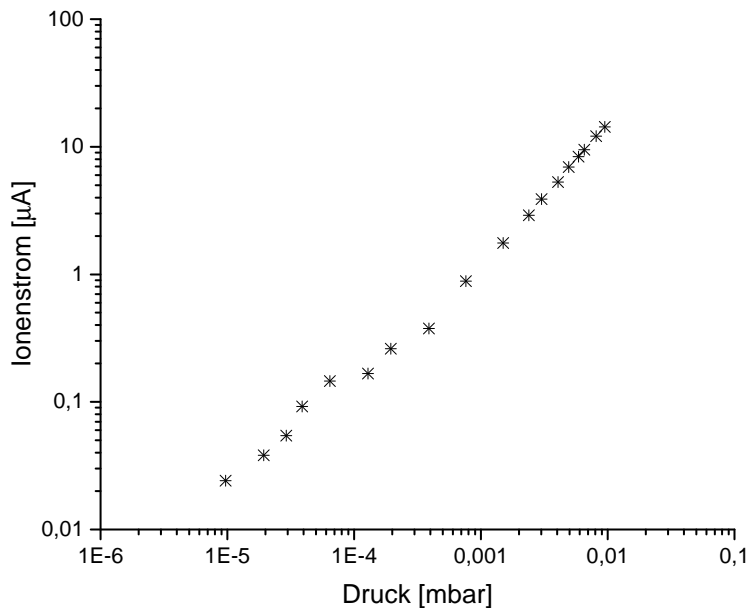


Figure 11: Kalibrierungswerte des Manometers über dem Druck doppelt-logarithmisch aufgetragen. Hierbei ist zu beachten das der obere Kalibrationsbereich (ab  $3 \cdot 10^{-5}$  mbar) in einer und der untere in zwei weiteren separaten Messungen aufgenommen wurden.

Um die Kalibrierung des Manometers vorzunehmen und mit anderen zu vergleichen wird eine lineare Anpassung vorgenommen, wie in Abbildung 18 zu sehen. Durch diese kann die Kalibrierungsgrade zu

$$p(I_i) = 6,73 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mbar}}{\mu\text{A}} \cdot I_i + 1,31 \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$$

bestimmt werden, womit es nun möglich ist zu jedem Ionenstromwert  $I_i$  [ $\mu\text{A}$ ] einen korrespondierenden Druck  $p$  [mbar] anzugeben.

Laut C.R. Tilford [5] lässt sich die Sensitivität  $S$  [1/mbar] eines Ionisationsmanometers über

$$S = \frac{I_i}{I_e \cdot p} \quad (1)$$

ermitteln, wobei  $I_i$  den Ionen- und  $I_e$  den Elektronenstrom [A] und  $p$  den Druck [mbar] bezeichnen. Auf diese Weise ergibt sich aus der Steigung  $6,76 \cdot 10^{-4}$  [mbar/ $\mu\text{A}$ ] bei einem über die betrachteten Messungen konstanten Elektronenstrom von  $I_e = 200 \mu\text{A}$  eine mittlere Sensitivität von  $S = 7,4 \text{ mbar}^{-1}$ . Jedoch muss hierbei beachtet werden, dass in diese Bestimmung der Sensitivität das Magnetfeld  $B$  [T] in keiner Weise eingeht und eigentlich in der Betrachtung berücksichtigt werden müsste.

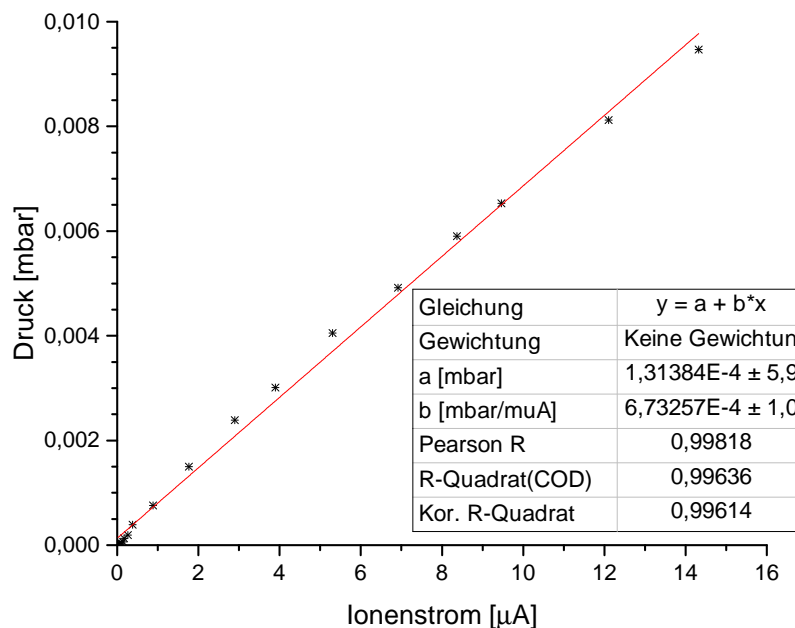


Figure 12: Kalibrierungswerte des Manometers über dem Baratron-Druck mit invertierten Achsen. Die lineare Anpassung wurde hierbei ohne Gewichtung durchgeführt.

Bei Tests der ASDEX-Manometer mithilfe eines 2 T-Magneten konnte die Sensitivität bei einem Elektronenstrom von  $200 \mu\text{A}$  zu  $8 \text{ mbar}^{-1}$  bestimmt werden [3]. Handelsübliche Manometer können je nach Hersteller in ihren Arbeitsbereichen Sensitivitäten von 6 bis  $24 \text{ mbar}^{-1}$  erreichen. Das  $\text{LaB}_6$ -Manometer gliedert sich somit anhand seiner mittleren Sensitivität schon im ersten Testlauf in die Reihe der bekannten Manometer ein.

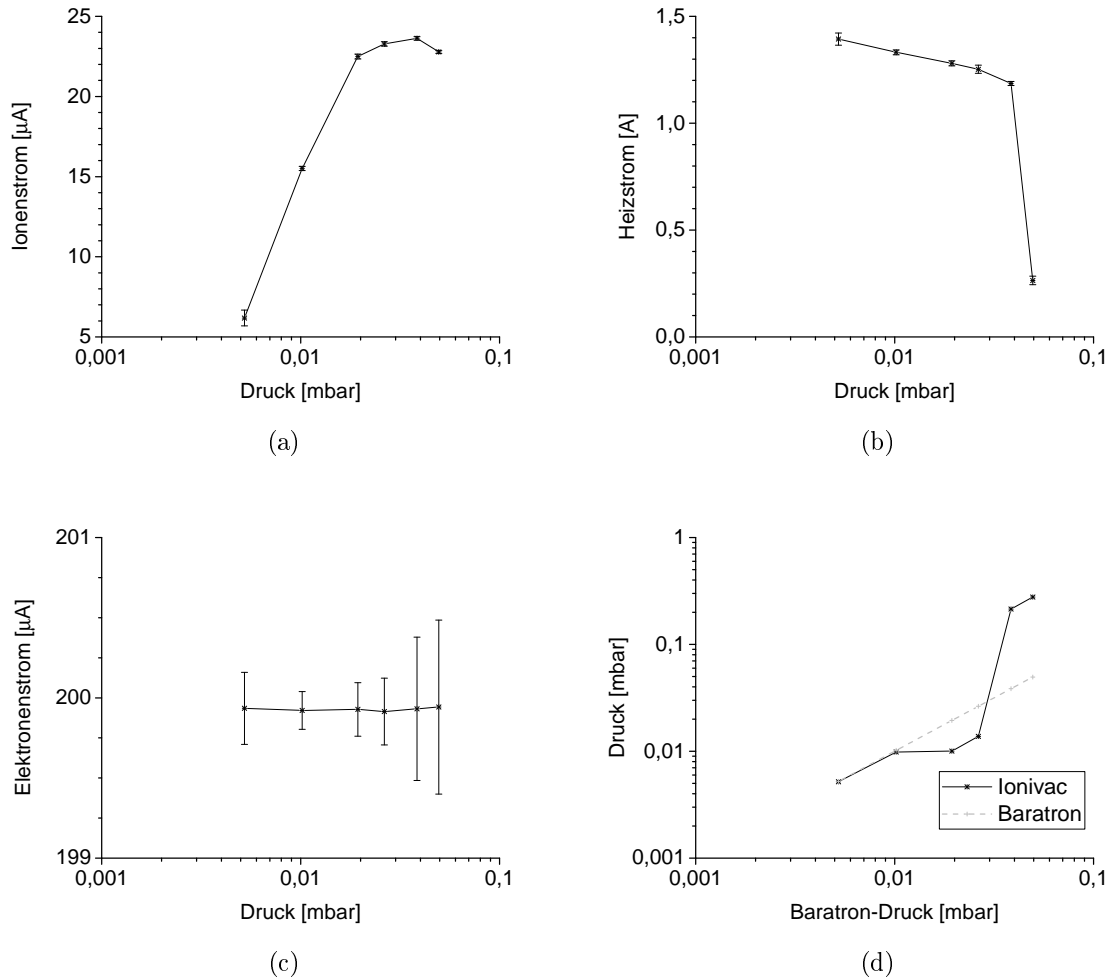


Figure 13: Funktionsüberprüfung bei hohen Drücken. Aufgetragen sind jeweils die Mittelwerte aus einer Messung. In (a) ist der mittlere Ionenstrom in (b) der Heizstrom und in (c) der mittlere Elektronenstrom über dem Baratron-Druck aufgetragen. Abbildung (d) visualisiert die am Baratron und Ionivac (korrigiert) aufgenommenen Druckwerte über dem Baratron-Druck.

## 8. Hochdrucktest

Bei einem weiteren Test sollte noch das Verhalten des Kristalls bei hohen Drücken näher untersucht werden. Hierzu wurde abermals eine Drucktreppe aufgenommen, welche jedoch diesmal einen Bereich von  $5 \cdot 10^{-3}$  mbar bis zu  $5 \cdot 10^{-2}$  mbar umfasste. Dabei wurde für jede Druckstufe eine neue Messung gestartet und versucht der Druck 15 Minuten konstant zu halten, welches sich mit dem Nadelventil bei den höheren Drücken schwierig gestaltete. In Abbildungen in 13 sind für jede der Stufen die Mittelwerte (a) des Ionenstroms [ $\mu\text{A}$ ], (b) des Heizstroms [A] und des (c) Elektronenstroms [ $\mu\text{A}$ ] sowie (d) des Drucks [mbar] über den Baratron-Druck [mbar] aufgetragen. Die Fehlerbalken wurden hierbei mithilfe der Standardabweichung bestimmt.

Zunächst soll darauf hingewiesen werden, dass der plötzliche Anstieg des Drucks in den Inivac-Werten (schwarzer Verlauf in (d)) darauf zurück zu führen ist, dass es sich bei diesem Gerät um ein Kombi-Gerät aus Ionisations- und kapazitiver Manometer handelt, wobei sich scheinbar um  $2,6 \cdot 10^{-2}$  mbar die Messweise ändert.

Des weiteren lässt sich festhalten, dass der Elektronenstrom gesamten Messbereich gut von der feedback-Regelung ausgeglichen wird und konstant bleibt. Lediglich die Fluktuationen scheinen bei höheren Drücken zuzunehmen. Dagegen folgt der Ionenstrom nur innerhalb der ersten drei Druckstufen dem aus der Kalibrierung bekannten Verlauf. Ab einem Druck von  $1,94 \cdot 10^{-2}$  mbar steigt der Ionenstrom nur noch sehr gering mit zunehmendem Druck an. Er läuft sogar in eine Art Sättigung hinein. Dies könnte zum einen auf eine Limitierung des Messbereichs hinweisen, in welchem mithilfe des  $\text{LaB}_6$ -Manometers Drücke bestimmt werden können. Zum Anderen könnte es sich hierbei aber auch um einen Effekt handeln, welcher aus dem bisherigen Aufbau oder der Potentialverteilung am Manometer resultiert. Dieses ließe sich mit einem optimierten Versuchsaufbau bei dem z.B. die Potentiale variiert werden können, beantworten.

Zuletzt soll nun doch der Heizstrom betrachtet werden. Wieder ist deutlich das Phänomen des abfallenden Heizstroms bei zunehmendem Druck zu beobachten. Bloß fällt dieses Mal ein plötzlicher Abfall besonders ins Auge. Zwischen einem Druck von  $3,9 \cdot 10^{-2}$  mbar bis  $5 \cdot 10^{-2}$  mbar nimmt der Heizstrom, welcher für einen Elektronenstrom  $200 \mu\text{A}$  benötigt wird von anfänglich  $1,186$  A auf  $0,264$  A ab. Dies entspricht einer Abnahme um knapp 78%. Im letzteren Zustand kann vom Kristall kaum noch ein optisches Leuchten wahrgenommen werden, so dass man annehmen muss, dass auch die Kristalltemperatur stark abgenommen hat. Es macht den Anschein, dass hier irgendeine Art der Zustandsänderung eintritt. Dieses Verhalten könnte durch die Annahme irgendeiner unbekanntem chemischen Reaktion des  $\text{LaB}_6$ -Kristalls mit der Wasserstoffatmosphäre, bei welcher es zu einem erhöhten Elektronenstrom kommt der vom Kristall ausgeht, erklärt werden. Aber es kann sich dabei ebenso auch um ein Phänomen handeln, dass seinen Ursprung im Ionisationsvolumen hat. Mit zunehmendem Druck entstehen aus dem Ionisationsprozess immer mehr Elektronen, welche teilweise zum Beschleunigungsgitter zu dem gemessenen Elektronenstrom beitragen, weswegen die feedback-Regelung den Heizstrom anpasst und vermindert. Die Erklärung dieses Phänomens bleibt also offen für weitere Untersuchungen.

## 9. Langzeitmessung

Zwar konnten die bisher diskutierten Messungen zeigen, dass das  $\text{LaB}_6$ -Manometer bei kurzen Messläufen zuverlässig funktionierte, aber für eine Verwendung als Druckmessmittel gilt es diese Zuverlässigkeit über längere Zeiträume zu demonstrieren. Hierzu wurden im Laufe von eine Arbeitswoche das Manometer jeden Tag 12 Stunden betrieben. Hierbei wurde es in Intervallen von je 30 Minuten aus- und nach kurzer Zeit wieder angeschaltet, woraus sich eine Betriebszeit von knapp 60 Stunden ergibt.

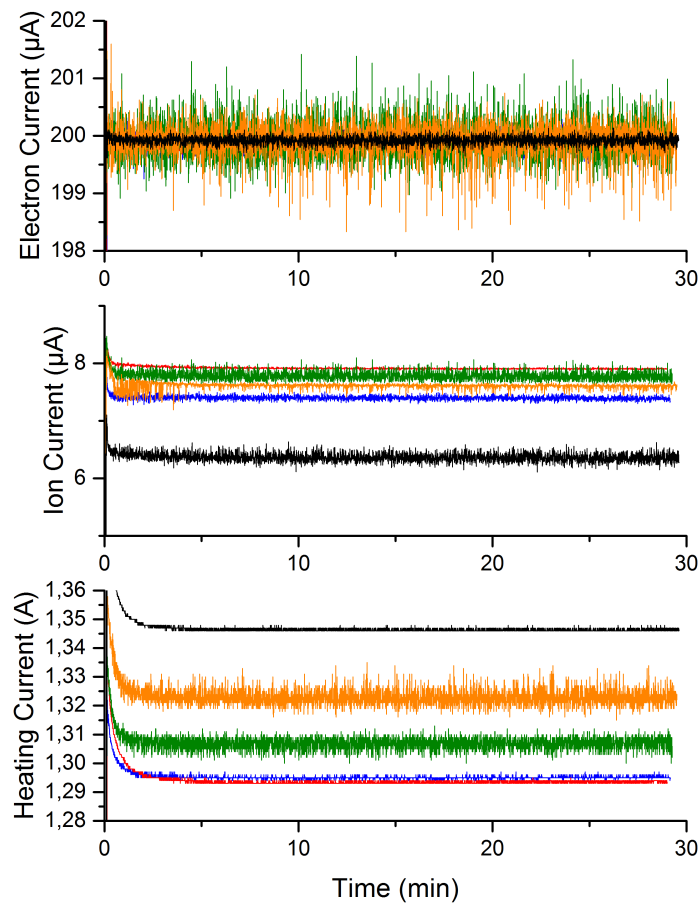


Figure 14: Elektronen-, Ionen- und Heizstrom aufgetragen über der Zeit. Farbkodiert zu sehen sind jeweils die 30 Minuten langen Messungen von jedem Tag um 15 Uhr. Dabei sind in die Messwerte des ersten Tags in rot, des zweiten in blau, die des dritten in grün, jene vom vierten in gelb und die Messergebnisse des letzten Tages in schwarz dargestellt.

In Abbildung 14 sind Elektronen-, Ionen- und Heizstrom, für jeden Tag die Messung, welche um 15 Uhr begann, farbkodiert über der Zeit aufgetragen (Tag 1 [rot], Tag 2 [blau], Tag 3 [grün], Tag 4 [gelb], Tag 5 [schwarz]). Anhand des Elektronenstrom kann zunächst festgestellt werden, dass dieser über den gesamten Zeitraum relativ konstant bleibt. Die Fluktuationen scheinen sogar mit jedem Betriebstag ein wenig abzunehmen.

Was jedoch auffällt ist, dass der Heizstrom mit jedem Tag zunimmt, obwohl die restlichen Parameter am Experiment konstant bleiben. Am ersten Messtag liegt der Heizstrom noch bei 1,295 A und steigt bis zum letzten Tag auf 1,35 A an. Dies entspricht einer Zunahme von 4% und kann als ein Hinweis auf eine mögliche Verschmutzung der Kathode betrachtet werden. Des Weiteren können wir feststellen, dass der Ionenstrom über die gesamte Messzeit respektive der sich leicht verändernden Drücke relativ konstant bleibt. Nur am letzten Tag springt der Ionenstrom von  $8\ \mu\text{A}$  auf  $6,5\ \mu\text{A}$ . Für dieses Verhalten konnte bis jetzt noch keine Erklärung gefunden werden. Jedoch kann man schon sagen, dass wenn dies ein Verhalten sein sollte welches öfters während der Langzeitmessungen auftrat, dann durch dieses die Genauigkeit des  $\text{LaB}_6$ -Manometers limitiert wird.

## 10. Fazit und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich zunächst also eine Funktionsfähigkeit des  $\text{LaB}_6$ -Manometers feststellen. Es konnte eine zuverlässige Funktionalität über drei Größenordnungen im Druck (von  $1 \cdot 10^{-5}$  bis  $1 \cdot 10^{-2}$  mbar) nachgewiesen werden. Hierbei wurde das Manometer anhand des Baratrons und Ionivacs kalibriert sowie die Sensibilität zu  $7,4\ \text{mbar}^{-1}$  bestimmt, was in einem Bereich liegt, in welchem allgemein viele Manometer arbeiten.

Ein erster Arbeitspunkt konnte für eine Kontrollgitter-Spannung von 180 V und bei einem Elektronenstrom von  $200\ \mu\text{A}$  bestimmt werden. Dieser ist jedoch noch optimierungswürdig, da bei der Ermittlung bisher nur eine der Spannungen variiert werden konnte. Bei einem nächsten Prototyp böte es sich an, unabhängig von der Elektroden-Geometrie frei variierbare Spannungen zu ermöglichen. Auf diese Weise könnte ein optimierter Arbeitspunkt gesucht und unter Umständen mit größeren Elektronenströmen gearbeitet werden.

Einige Effekte sollten vor einem Einsatz des  $\text{LaB}_6$ -Kristalls als Manometer noch genauer untersucht werden. Zum einen ist dies die Abnahme des Heizstroms bei zunehmendem Wasserstoff-Druck. Es muss geklärt werden, welcher Effekt für dieses Phänomen zuständig ist, und ob dies nur bei Wasserstoff auftritt oder der Effekt auch durch andere Gase oder gar spontan ausgelöst wird. Außerdem muss bei weiteren Tests geklärt werden, ob die niedrige Temperatur des Kristalls mit fallendem Heizstrom Verunreinigungen des begünstigen, was sich negativ auf seine mögliche Betriebszeit auswirken könnte. Zum Anderen sollte der Effekt der Bifurkation im Elektronen- oder Heizstrom näher untersucht werden. Es wäre interessant zu erfahren, ob diese Bifurkationen spontan auftreten oder durch Umgebungsbedingungen angeregt werden, und wenn zweites, was sie initiiert. Außerdem könnte auch noch untersucht werden, ob diese Bifurkationen nur unter Wasserstoffatmosphäre, oder auch bei anderen Gasen auftreten.

Des Weiteren stellte sich im Langzeittest heraus, dass der Kristall auch eine Betrieb-

szeit von knapp 60 Stunden am Stück aushält und auch danach noch zuverlässig funktioniert. Dabei konnte eine Zunahme im Heizstrom von 5 % über die Woche beobachtet werden, welches als ein erstes Zeichen für eine Verunreinigung der Kristall-Kathode gedeutet werden könnte. Auch konnten während der Langzeitmessungen Sprünge im Ionenstrom beobachtet werden. Da dies beides das Potential birgt die Messgenauigkeit des Manometers sowie seine Lebensdauer zu limitieren, bedarf es auch hier noch genaueren Untersuchungen vor einem Betrieb des LaB<sub>6</sub>-Manometers.

Bei einer abschließenden Messung bei hohen Drücken konnten noch weitere Features ermittelt werden. So funktioniert die feedback-Steuerung zur Angleichung des Elektronenstroms insgesamt gut und es kann nur eine leichte Zunahme der Fluktuationen bei hohen Drücken festgestellt werden. Im Ionenstrom dagegen scheint bei hohen Drücken eine Art Sättigung einzutreten. Dies kann den Messbereich limitieren, aber genauso gut auch ein Effekt des Aufbaus des Prototyps sein. Bezüglich des abnehmenden Heizstroms bei zunehmenden Wasserstoff-Druck eröffnet diese Messung ein Schwellwert, bei welchem der Heizstrom über einen engen Druckbereich um knapp 78 % abfällt. Dies weist ein weiteres Mal auf die Wichtigkeit hin, den Effekt des abnehmenden Heizstroms mit zunehmender Wasserstoff-Druck zu verstehen, insbesondere, da Wasserstoff-Gase bei Fusionsexperimenten von essentieller Bedeutung sind.

## Danksagung

Hiermit möchte ich allen MitarbeiterInnen des IPP Greifswald danken, welche mich durch dieses aufregende Praktikum begleitet haben. Insbesondere Prof. Thomas Sunn Pedersen, welcher das Praktikum ermöglicht hat, Norbert Paschkowski, welcher den Aufbau im PAX-Labor unterhält und bei vielen Messungen eine große Hilfe war. Dann noch Andreas Graband und Dirk Pilopp für ihre Unterstützung bei den Langzeitmessungen. Und ganz besonders Uwe Wenzel für seine Geduld, die intensive Betreuung und vielen anregenden Gespräche!



## A. Anhang und zusätzliche Abbildungen

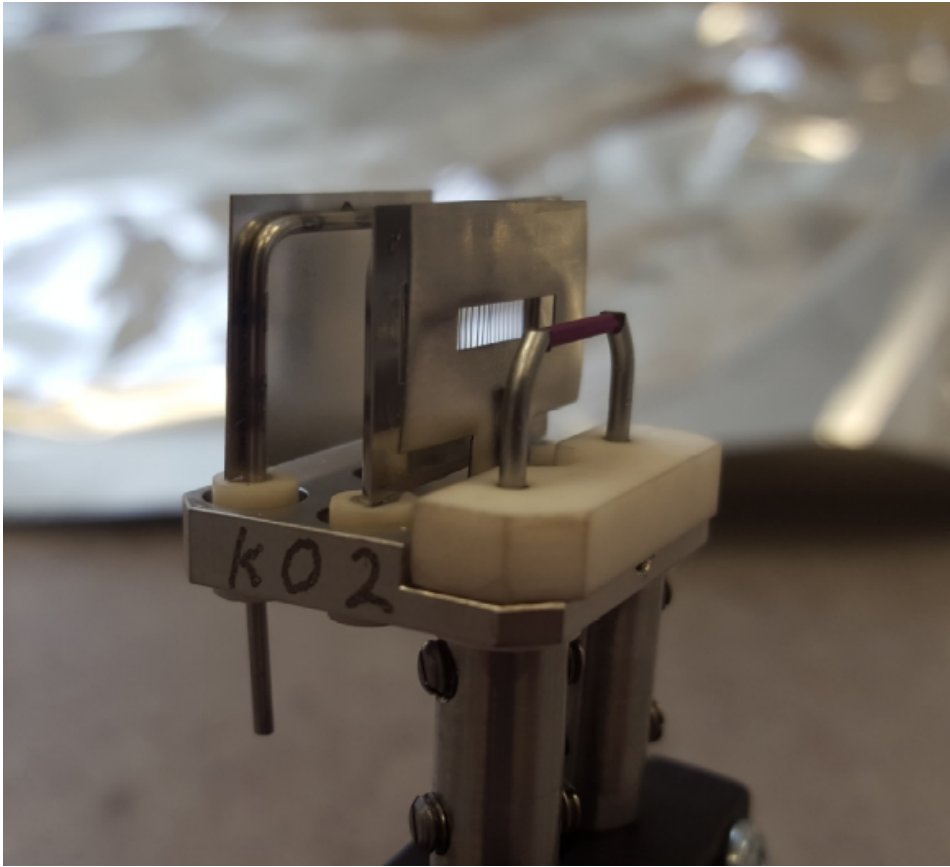


Figure 15: Foto des getesteten  $\text{LaB}_6$ -Manometers. Ganz rechts sitzt der  $\text{LaB}_6$ -Kristall und links daneben in kleinen Abständen zunächst das Kontroll- und Beschleunigungsgitter. Ganz links sieht man den Ionen Kollektor sowie zwischen diesen und dem zweiten Gitter das Ionisationsvolumen.

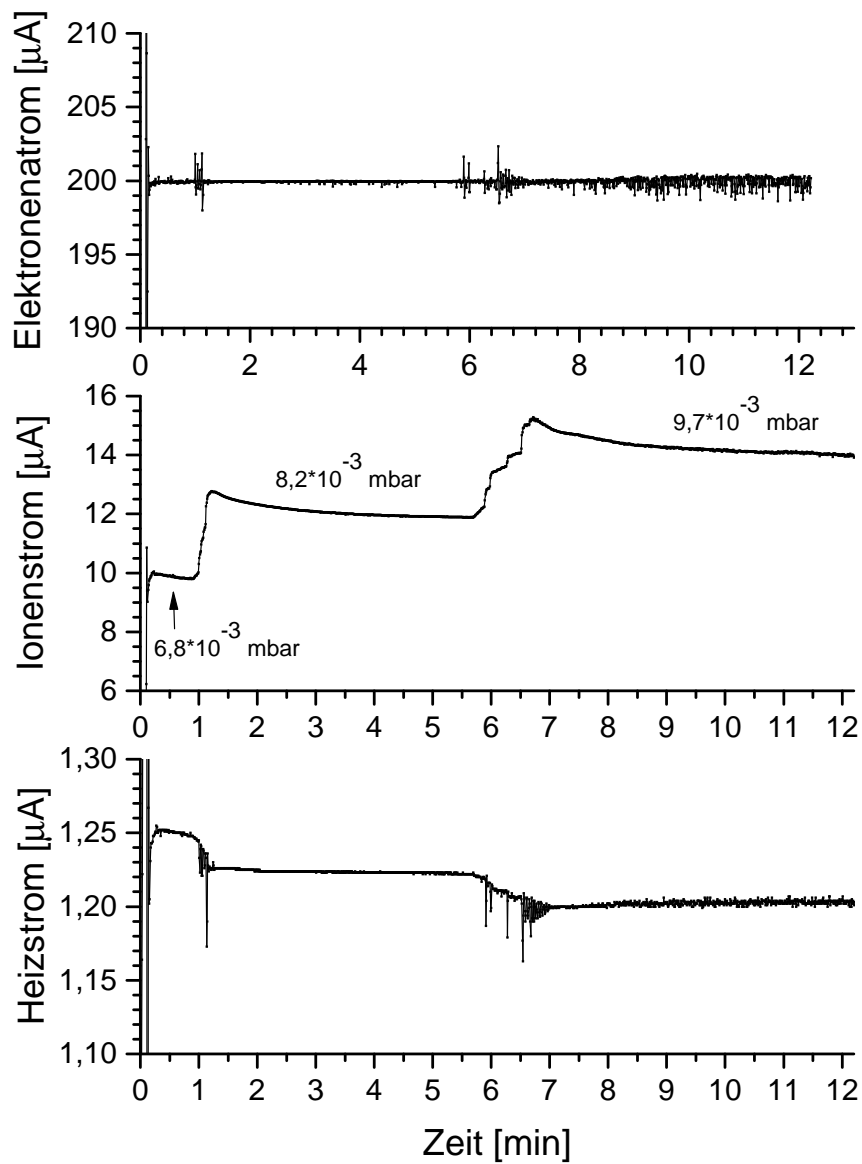


Figure 16: Drucktreppe aus Tag 3 des Wasserstoffbetriebs in einem hohen Druckbereich von  $6,8 \cdot 10^{-3}$  mbar bis  $9,7 \cdot 10^{-3}$  mbar. Die Ergebnisse dieser Messung flossen in die Kalibrierung (Abbildung 11) mit ein.

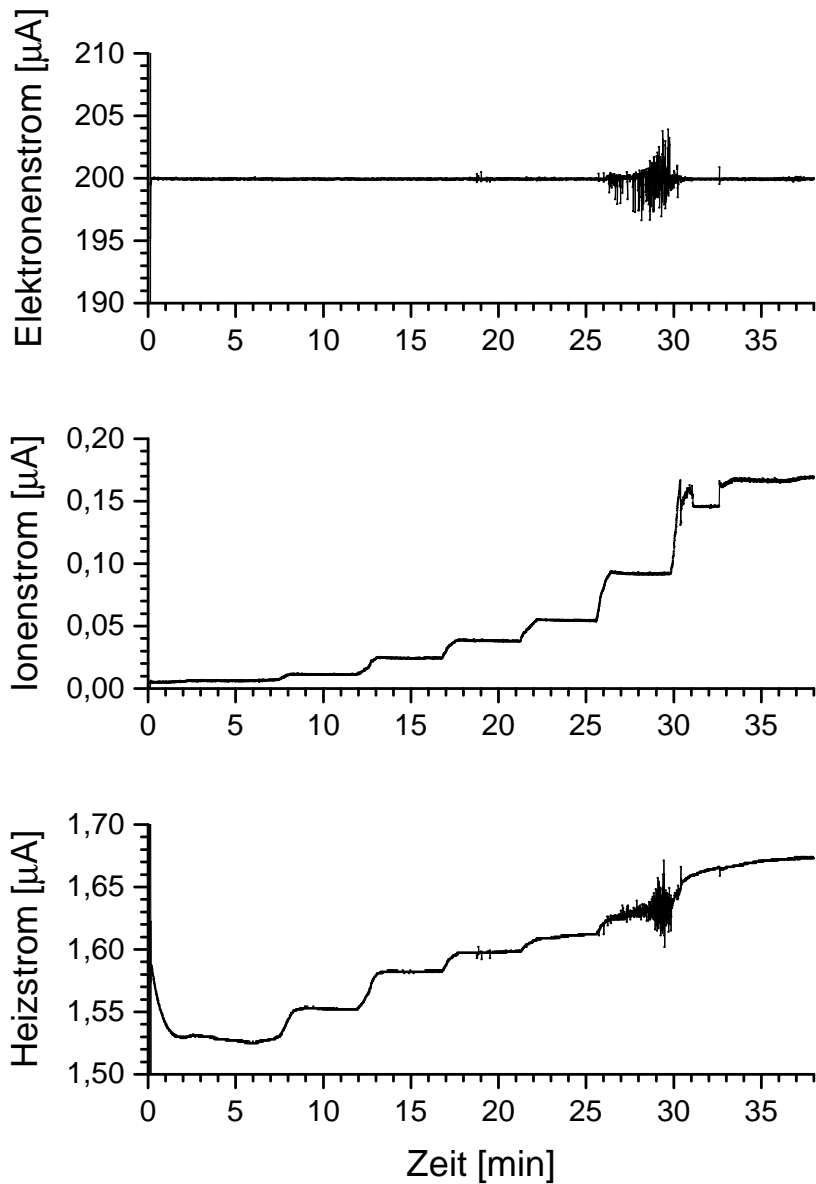


Figure 17: Drucktreppe aus Tag 7 des Wasserstoffbetriebs in einem niedrigen Druckbereich von  $5 \cdot 10^{-6}$  mbar bis  $1,1 \cdot 10^{-5}$  mbar. Auffällig sind die geringen Fluktuationen im Elektronen- sowie Heizstrom, als auch, dass bei dieser Messung der Heizstrom mit dem Druck ansteigt.

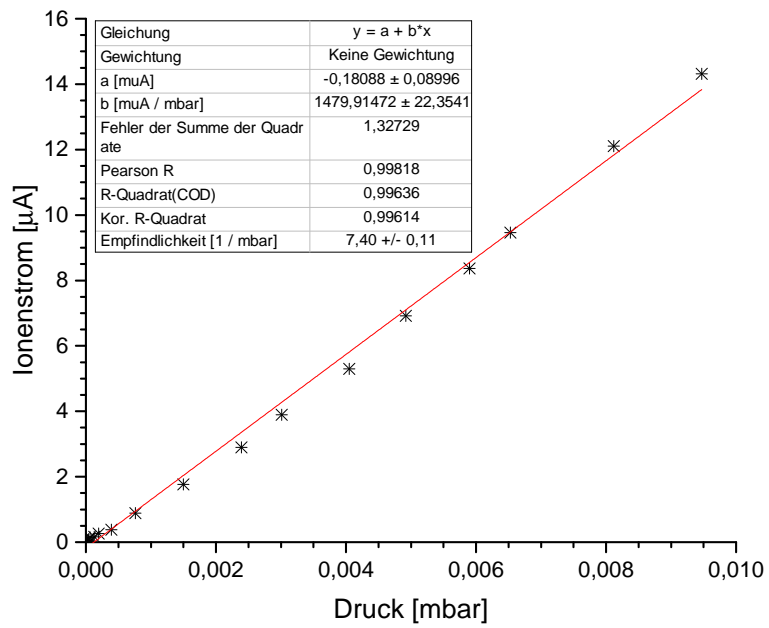


Figure 18: Kalibrierungswerte des Manometers über dem Baratron-Druck. Über einen linearen Anpassung der Werte ohne Gewichtung wurde die Empfindlichkeit des Manometers bestimmt.

## References

- [1] HE Gallagher. Poisoning of lab6 cathodes. *Journal of Applied Physics*, 40(1):44–51, 1969.
- [2] Pfeiffer Vacuum GmbH. The vacuum technology book - volume ii. [https://www.pfeiffer-vacuum.com/filepool/File/Vacuum-Technology-Book/Vacuum-Technology-Book-II-Band-2.pdf?referer=1456&request\\_locale=de\\_DE](https://www.pfeiffer-vacuum.com/filepool/File/Vacuum-Technology-Book/Vacuum-Technology-Book-II-Band-2.pdf?referer=1456&request_locale=de_DE), April 2013. Volume II.
- [3] G Haas and HS Bosch. In vessel pressure measurement in nuclear fusion experiments with asdex gauges. *Vacuum*, 51(1):39–46, 1998.
- [4] MKS Instruments. Baratron capacitive Vakuummeter. <https://www.mksinst.com/product/Category.aspx?CategoryID=72>, 2017. Zuletzt aufgerufen am 14.12.2017, 12:45 Uhr.
- [5] Charles R Tilford. Sensitivity of hot cathode ionization gages. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 3(3):546–550, 1985.
- [6] Dr. Walter Umrath. Grundlagen der vakuumentchnik. oerlikon leybold vacuum, Juni 2007.
- [7] wikipedia. Ionisations-Vakuummeter. <https://de.wikipedia.org/wiki/Ionisations-Vakuummeter>, 2017. Zuletzt aufgerufen am 14.12.2017, 12:40 Uhr.

# List of Figures

1.	Oben ist der skizzierte Aufbau des getesteten Ionisationsmanometers zu sehen. Ganz links sitzt der $\text{LaB}_6$ -Kristall und rechts daneben in kleinen Abständen zunächst das Kontroll- und Beschleunigungsgitter. Ganz rechts sieht man den Ionenkollektor sowie zwischen diesen und dem zweiten Gitter das Ionisationsvolumen. Das untere Bild zeigt den idealisierten Potentialverlauf der Anordnung. . . . .	4
2.	Optischer Vergleich der beiden Ionisationsmanometer im laufendem Betrieb. Links das ASDEX-Manometer mit Wolframkathode und rechts der Prototyp mit $\text{LaB}_6$ -Kristall als Elektronenemitter. . . . .	6
3.	Druckwerte der verschiedenen Manometer am PAX-Magneten aufgetragen über den Baratron-Druck. Das ASDEX-Manometer in schwarz, das Ionivac nahe des Magneten in rot, das Ionivac am Pumpstand in blau und das Baratron in grau. Alle Druckwerte wurden entsprechen der Gasart (Helium) korrigiert. . . . .	7
4.	Heizstromkurven für verschiedene Potentiale am Kontrollgitter. . . . .	8
5.	Heizstromkurven bei einer Spannung von 180 V am Kontrollgitter. In (a) wurde zwei Messungen verglichen, bei welchen zwischen Einstellung des Heiz- und Aufnahme des Elektronenstroms verschiedene Zeiten vergangen sind. (b) veranschaulicht den Einfluss einer Wasserstoffatmosphäre bei $5,74 \cdot 10^{-4}$ mbar auf den Verlauf der Heizstromkurve. . . . .	9
6.	Drucktreppe bei $I_e = 300 \mu$ über einen Druckbereich von $2 \cdot 10^{-3}$ mbar bis $8 \cdot 10^{-3}$ mbar. Auf jeder Druckstufe wurde knapp fünf Minuten der Druck konstant gehalten. . . . .	10
7.	Elektronenstromtreppe im feedforward-Modus bei einen konstanten Druck von $5,8 \cdot 10^{-4}$ mbar. Zuvor eine 30 Minütige Aufwärmphase bei $I_e = 50 \mu\text{A}$ . 12	12
8.	Drucktreppe mit 13 Stufen über einen weiter Druckbereich von $3 \cdot 10^{-5}$ mbar bis hin zu $6,3 \cdot 10^{-3}$ mbar. Besonders auffällig sind hier die Bifurkationen um die 30 bis 35 Minute. . . . .	13
9.	Feedforward-Messung bei $I_h = 1,47$ A. In den ersten acht Minuten sollte das Verhalten des Elektronenstrom insbesondere dessen Bifurkation bei gleichbleibendem Heizstrom unter konstanter Wasserstoffatmosphäre untersucht werden. Im zweiten Bereich dient der Untersuchung des Ausschaltprozesses unter denselben Bedingungen. . . . .	15
10.	Feedforward-Messung bei $I_h = 1,47$ A. Hier soll der Einfluss des Wasserstoffs bei konstantem Heizstrom auf den Elektronenstrom veranschaulicht werden. Hierzu wurde der Druck von $5,1 \cdot 10^{-6}$ mbar gleichmäßig bis auf $1,3 \cdot 10^{-2}$ mbar erhöht. . . . .	16
11.	Kalibrierungswerte des Manometers über dem Druck doppelt-logarithmisch aufgetragen. Hierbei ist zu beachten das der obere Kalibrationsbereich (ab $3 \cdot 10^{-5}$ mbar) in einer und der untere in zwei weiteren separaten Messungen aufgenommen wurden. . . . .	17

12.	Kalibrierungswerte des Manometers über dem Baratron-Druck mit invertierten Achsen. Die lineare Anpassung wurde hierbei ohne Gewichtung durchgeführt. . . . .	18
13.	Funktionsüberprüfung bei hohen Drücken. Aufgetragen sind jeweils die Mittelwerte aus einer Messung. In (a) ist der mittlere Ionenstrom in (b) der Heizstrom und in (c) der mittlere Elektronenstrom über dem Baratron-Druck aufgetragen. Abbildung (d) visualisiert die am Baratron und Ionivac (korrigiert) aufgenommenen Druckwerte über dem Baratron-Druck. . . . .	19
14.	Elektronen-, Ionen- und Heizstrom aufgetragen über der Zeit. Farbkodiert zu sehen sind jeweils die 30 Minuten langen Messungen von jedem Tag um 15 Uhr. Dabei sind in die Messwerte des ersten Tags in rot, des zweiten in blau, die des dritten in grün, jene vom vierten in gelb und die Messergebnisse des letzten Tages in schwarz dargestellt. . . . .	21
15.	Foto des getesteten LaB <sub>6</sub> -Manometers. Ganz rechts sitzt der LaB <sub>6</sub> -Kristall und links daneben in kleinen Abständen zunächst das Krontröll- und Beschleunigungsgitter. Ganz links sieht man den Ionen Kollektor sowie zwischen diesen und dem zweiten Gitter das Ionisationsvolumen. . . . .	24
16.	Drucktreppe aus Tag 3 des Wasserstoffbetriebs in einem hohen Druckbereich von $6,8 \cdot 10^{-3}$ mbar bis $9,7 \cdot 10^{-3}$ mbar. Die Ergebnisse dieser Messung flossen in die Kalibrierung (Abbildung 11) mit ein. . . . .	25
17.	Drucktreppe aus Tag 7 des Wasserstoffbetriebs in einem niedrigen Druckbereich von $5 \cdot 10^{-6}$ mbar bis $1,1 \cdot 10^{-5}$ mbar. Auffällig sind die geringen Fluktuationen im Elektronen- sowie Heizstrom, als auch, dass bei dieser Messung der Heizstrom mit dem Druck ansteigt. . . . .	26
18.	Kalibrierungswerte des Manometers über dem Baratron-Druck. Über einen lineare Anpassung der Werte ohne Gewichtung wurde die Empfindlichkeit des Manometers bestimmt. . . . .	27