

**Fakultät für Physik**

Technische Universität Wien

**Projektarbeit  
im Studiengang Technische Physik**

vorgelegt von

**Lukas Schrangl**

**2011**



# **Systematische Untersuchung hoher elektrischer Felder zwischen Neutronenspiegeln für das qBounce-Experiment**

Die Projektarbeit wurde von Lukas Schrangl ausgeführt am  
Atominstitut  
der Technischen Universität Wien  
unter der Betreuung von  
Herrn Prof. Hartmut Abele



**Kurzzusammenfassung** Im Rahmen der qBounce-Experimente soll mit Hilfe einer Spektroskopiemethode von ultrakalten Neutronen im Gravitationspotential der Erde die elektrische Ladung des Neutrons langfristig um bis zu zwei Größenordnungen besser als bisher bestimmt werden. Dazu müssen die Neutronen ein möglichst starkes elektrisches Feld durchqueren. Diese Arbeit beschäftigt sich damit, wie ein solches Feld erzeugt werden kann und welche Effekte und Probleme dabei auftreten.

**Abstract** In the context of the qBounce experiments the electric charge of the neutron is to be measured – in the long run – by up to two orders of magnitude more accurately than in the best previous experiments. This goal shall be achieved utilizing a technique of spectroscopy of ultracold neutrons in the gravity potential of the earth. In the course of the experiment the neutrons have to traverse an electric field, which has to be as strong as possible. This paper concerns itself with how such a field can be created and what effects and problems arise in doing so.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung und Motivation</b>	<b>7</b>
<b>2. Erste Versuche an der Luft</b>	<b>8</b>
<b>3. Versuche im Vakuum</b>	<b>11</b>
3.1. Vorbereitungen . . . . .	11
3.2. Messungen . . . . .	12
<b>4. Offene Fragen und Probleme</b>	<b>15</b>
4.1. Abschalten der Hochspannungsquelle . . . . .	15
4.2. Schäden an den Neutronenspiegeln durch Spannungsüberschläge . . . . .	15
4.3. Toleranz des Experiments gegenüber Feldschwankungen . . . . .	15
<b>5. Conclusio</b>	<b>16</b>
<b>A. Screenshot des Computerprogramms</b>	<b>17</b>

# 1. Einleitung und Motivation

Vor wenigen Jahren wurde zum ersten Mal experimentell nachgewiesen, dass Neutronen im Gravitationsfeld der Erde gebundene Quantenzustände einnehmen (siehe [1] und [2]). Zu diesem Zwecke ließ man ultrakalte Neutronen auf Neutronenspiegeln „hüpfen“ und verglich ihr Verhalten mit dem, was nach klassischer Rechnung zu erwarten gewesen wäre.

Weiters konnte man zeigen (siehe [3]), dass sich die Quantenzustände der Neutronen durch mechanische Bewegung der Neutronenspiegel präparieren und manipulieren lassen. Dies eröffnet unter anderem die Möglichkeit, Spektroskopie zu betreiben. Da das Gravitationsfeld der Erde sehr schwach ist und folglich die Energieeigenwerte der gebundenen Neutronenzustände sehr klein (im pico-eV-Bereich) sind, können auf diese Art und Weise extrem kleine Energieunterschiede detektiert werden.

Eine Anwendung dafür wäre ein geplantes Experiment zur neuen Vermessung der elektrischen Ladung des Neutrons. Eine genaue Beschreibung dieses Vorhabens findet man in [4]. Motiviert wird es dadurch, dass das Standardmodell der Teilchen keine Vorhersagen über die Ladung beziehungsweise über eine Ladungsquantisierung macht. Die Ladung des Neutrons könnte jeden beliebigen Wert annehmen. Das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein dieser Ladung hat jedoch große Auswirkungen auf Theorien, die über das Standardmodell hinausgehen.

Bisherige Experimente ergaben eine obere Schranke von  $1,1 \times 10^{-21}$  (90% C. L.) Elektronenladungen. Mit dem neuen Experiment könnte diese Schranke langfristig um mehrere Größenordnungen gesenkt werden.

Die Funktionsweise ist die folgende: Ein homogenes elektrisches Feld wird parallel (bzw. antiparallel) zum Gravitationsfeld angelegt. Hat das Neutron eine Ladung, so wird dadurch seine gesamte potentielle Energie als Summe von Gravitationsanteil und elektrischem Anteil erhöht (bzw. verringert). Diese Veränderung kann dann durch Spektroskopiemethoden gemessen werden.

Ein offensichtlich wesentlicher Bestandteil des Experiments ist ebendieses elektrische Feld. Da die potentielle Energie linear mit der (homogenen) Feldstärke skaliert, sollte diese möglichst groß sein, um einen starken Effekt zu erzielen. Vorarbeiten auf diesem Gebiet finden sich aber eher spärlich. Nach [5] konnten Felder von 20 kV/mm bei einem Elektrodenabstand von 4 mm bzw. nach [6] von 70 kV/mm bei 100  $\mu\text{m}$  erreicht werden. Allerdings hängen diese Ergebnisse stark von der Geometrie des Aufbaus ab.

Im Experiment sollen die Neutronenspiegel selbst als Elektroden dienen. Zwei Spiegel werden in einem Abstand in der Größenordnung von 100  $\mu\text{m}$  zueinander montiert. Diese sind quaderförmig, weshalb an den Kanten bei gleicher Spannung höhere Feldstärken als weiter innen zu erwarten sind. Weil aber gerade das (näherungsweise homogene) Feld im Inneren von Wichtigkeit für das Experiment ist, bedeutet dies eine Reduktion der maximal erreichbaren Feldstärke.

Herauszufinden nicht nur ob und wie stark dieser Effekt zu beobachten ist, sondern generell welche Feldstärken wie erzeugbar sind und welche Probleme dabei auftreten, war das Ziel dieser Projektarbeit, deren Ergebnisse im Folgenden präsentiert werden.

## 2. Erste Versuche an der Luft

Um sich einen Überblick z. B. über die benötigte Hochspannung zu verschaffen, wurden zwei Alublöcke der Größe  $100\text{ mm} \times 70\text{ mm} \times 30\text{ mm}$  so übereinander gelegt, dass sich zwischen ihnen ein Luftspalt wohldefinierter Breite befand. Skizzen des Versuchsaufbaus finden sich in den Abbildungen 2.1 und 2.2. Anfangs dienten Beilagsscheiben aus Plastik als Abstandshalter zwischen den Blöcken. So wurde ein Spalt von etwa  $650\text{ }\mu\text{m}$  Breite erzeugt.

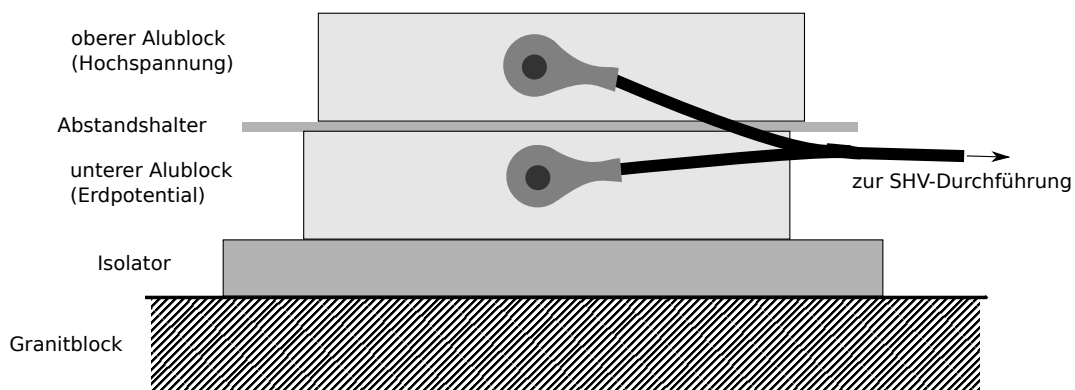


Abbildung 2.1.: Anordnung der Aluminiumblöcke (Seitenansicht)

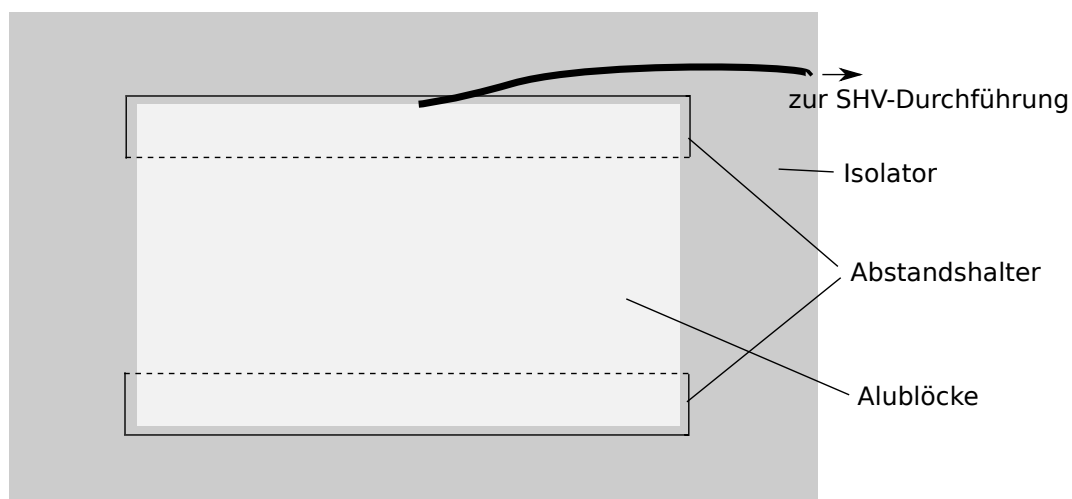


Abbildung 2.2.: Anordnung der Aluminiumblöcke (Draufsicht)

Der obere Alublock wurde auf Hochspannung gelegt, der untere befand sich auf Erdepotential. Mit einer manuell regelbaren Hochspannungsquelle wurde die Spannung langsam soweit erhöht, bis es zu einem Funkenüberschlag zwischen den Blöcken kam. Der Überschlag konnte einerseits akustisch und optisch deutlich wahrgenommen werden, andererseits wurde auch die Strombegrenzung der Hochspannungsquelle so niedrig eingestellt, dass der mit dem Funken verbundene Strom die Hochspannung abschaltete.



30 Messungen dieser Art ergaben, dass die Durchschlagsspannung bei 1359(97) V lag, was einem elektrischen Feld von 2,10(15) kV/mm entspricht. Zum Vergleich dazu: Der theoretische Wert für die Durchschlagfeldstärke in Luft beträgt etwa 3 kV/mm.

Was schon während dieser Messungen auffiel (und sich in den danach durchgeführten Versuchen noch bestätigte), waren zweierlei Dinge:

- Die oben ermittelten Werte sind nicht sehr aussagekräftig. Neben der angelegten Spannung muss es noch eine zweite, nicht reproduzierbare Komponente geben, die die Bildung von Funkenüberschlägen beeinflusst. Zum Beispiel konnte man die Spannung auf 1300 V einstellen und einige Minuten so belassen – irgendwann kam es zum Überschlag. Denkbare Kandidaten für diese Komponente wären z. B. kleine Partikel in der Luft, die in den Spalt zwischen den Elektroden gelangen.
- Es gibt einen eher starken „Lerneffekt“. Bei den ersten Messungen lag die erreichte Spannung bei etwas mehr als 1000 V, nach der 30. wurden Spannungen bis 1700 V erreicht. Noch viel stärker war dieser Effekt dann bei neu hergestellten Alublöcken zu beobachten; siehe auch Abschnitt 3.2. Mögliche Ursache für diesen Effekt könnten Verunreinigungen der Elektrodenoberflächen sein, die durch die Funken zerstört werden.

Es stellte sich weiters heraus, dass die vorhandenen Neutronenspiegel mit einer nichtleitenden Anti-Kratz-Beschichtung aus Zeroxid bzw. Magnesiumfluorid versehen waren. Aus diesem Grund konnten mit den Spiegeln im Rahmen der Projektarbeit keine Versuche ausgeführt werden. An ihrer statt wurden weiterhin Aluminiumblöcke verwendet. Da diese sehr zerkratzt waren, wurden sie mit einem Messerkopf abgefräst. Das entfernte zwar die Kratzer, aber die Oberfläche bekam eine größere Welligkeit und Rauigkeit.

Außerdem wurde eine Overhead-Folie (ein Erzeugnis der Firma MST, Art. Nr. 43110) in ca. 1 cm × 2 cm große Stücke zerschnitten. Diese Stücke sollten als neue Abstandshalter für zukünftige Messungen dienen. Mit einer Dicke von 105 µm – 112 µm kamen sie dem, was im tatsächlichen Neutronenexperiment (siehe Einleitung, Kapitel 1) dann verwendet werden sollte, schon viel näher. Auch die Hochspannungsquelle wurde ausgetauscht gegen eine N1470 der Firma CAEN. Diese erlaubte höhere Spannungen (bis zu 8 kV bei 1 mA; die verwendeten SHV-Leitungen erlaubten allerdings maximal 5 kV) und ermöglichte die Steuerung mit einem PC über eine RS232-Schnittstelle bzw. mittels eines eingebauten USB-RS232-Konverters. Das war notwendig um später automatisierte Messungen über mehrere Stunden hinweg durchführen zu können; siehe auch Abschnitt 3.1.

Bei ersten Experimenten mit den neuen Komponenten ergab sich überraschend, dass die Funken nicht wie zu erwarten an den Kanten der Alublöcke bildeten, sondern am Rand der Abstandshalter, siehe Abbildung 2.3. Zu dieser Erkenntnis gelangte man, indem man einfach eine hinreichend hohe Spannung anlegte und mit freiem Auge schaute, wo die Überschläge auftraten.

Wahrscheinlich verstärkt also das Dielektrikum an seinem Rand das elektrische Feld.

Dieser Effekt scheint aber materialabhängig zu sein. Bei späterer Verwendung von PET-Blättchen („LDS 1260“ der Firma „Precision Brand Products“) als Abstandshalter war er nicht mehr zu beobachten. Hier stellte sich heraus, dass bei sehr kleinen Abständen (25 µm) die Funken meist an den Kanten der Elektroden auftraten, bei größeren immer mehr auf der gesamten Fläche verteilt. Dieses Ergebnis sollte allerdings mit ein wenig Vorsicht genossen werden: Bei solch kleinen Abständen zwischen den vergleichsweise großen Alublöcken war oft nicht hundertprozentig zuverlässig erkennbar, wo genau die Funken entstanden; es handelt sich also um einen eher subjektiven Eindruck.

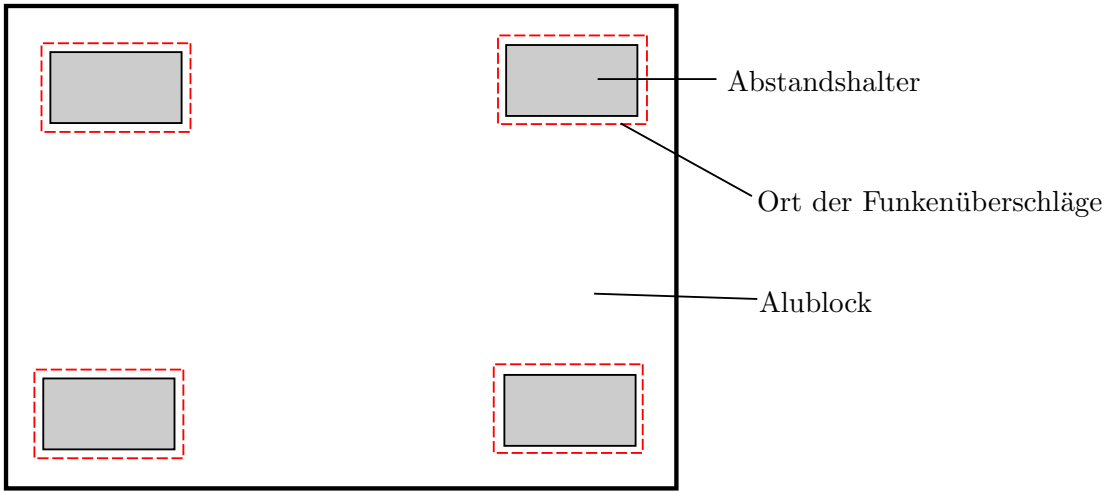


Abbildung 2.3.: Alublock mit Abstandshaltern (Draufsicht)

## 3. Versuche im Vakuum

### 3.1. Vorbereitungen

Da Luft kein besonders guter Isolator (der spezifische elektrische Widerstand beträgt  $1,3 \times 10^{16} \Omega\text{m}$  bis  $3,3 \times 10^{16} \Omega\text{m}$ , siehe [7]) ist, wurde der Versuchsaufbau ins Vakuum verlegt; genauer: in die Vakuumkammer, in der später das gesamte Neutronenexperiment stattfinden sollte; siehe Abbildungen 3.1 und 3.2. Der Druck in der Kammer erreichte (nach etwa 24 h des Abpumpens) ca.  $3 \times 10^{-5}$  mbar. Oftmals war es jedoch nicht zielführend, so lange zu warten (z. B. weil Veränderungen am Aufbau in der Kammer vorgenommen werden mussten) oder nicht möglich (weil die Vakuumpumpen über Nacht abgeschaltet werden mussten). Darum fanden viele Messungen bei höheren Drücken (im Bereich von  $7 \times 10^{-5}$  mbar bis  $3 \times 10^{-5}$  mbar) statt. Es konnten deswegen aber keine Veränderungen im Verhalten beobachtet werden. Genaue Versuche zu diesem Thema konnten aber nicht durchgeführt werden, da es keine Möglichkeit gab, gezielt den Druck in der Kammer zu manipulieren.

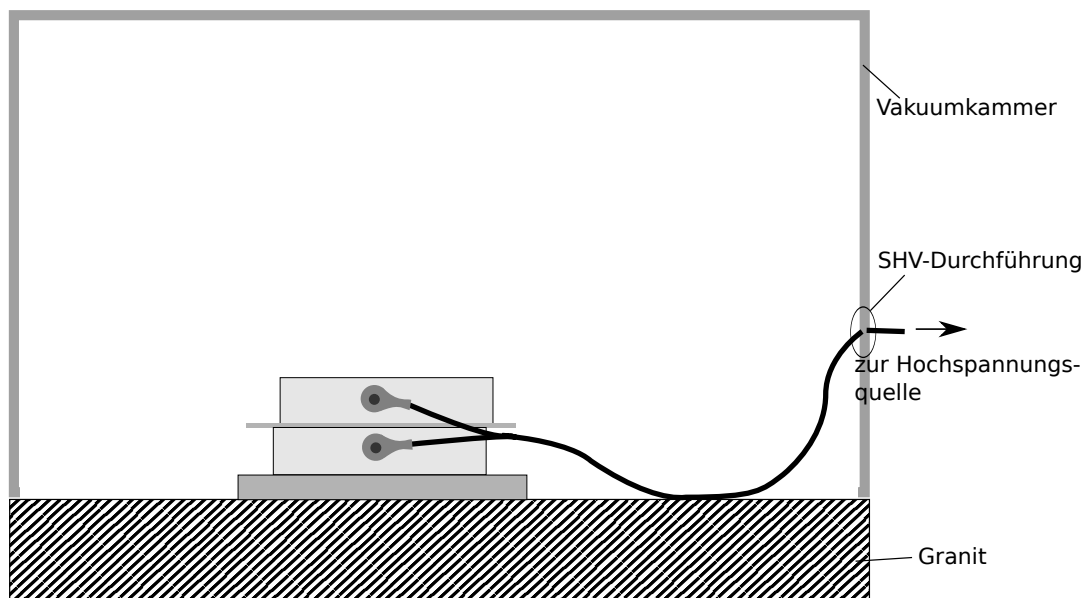


Abbildung 3.1.: Anordnung in der Vakuumkammer (Seitenansicht)

Über eine SHV-Durchführung konnte die Hochspannung an die Aluminiumblöcke angelegt werden.

Des Weiteren wurde ein Computerprogramm geschrieben (in C++/Qt), mit dem einerseits die Hochspannungsquelle gesteuert und andererseits die Monitore der Quelle (Spannung und Stromstärke) ausgelesen und aufgezeichnet werden konnten (Abbildung A.1 zeigt einen Screenshot.) Dies war nötig um mit geringem Aufwand länger dauernde Messungen (im Bereich von Stunden) durchführen zu können; wie in Kapitel 2 schon erwähnt, finden Funkenüberschläge ja (zumindest bis zu einer gewissen Feldstärke) „unvorhersehbar“ statt. Um etwas über die Häufigkeit des Auftretens sagen zu können, sollten also lange Messungen aufgezeichnet werden. Ein Beispiel für solch eine Aufzeichnung ist in Abbildung 3.3 gezeigt. Sehr deutlich sind die kurzzeitigen Anstiege der Stromstärke bzw. die Abfälle der Spannung zu erkennen, wie sie bei einem

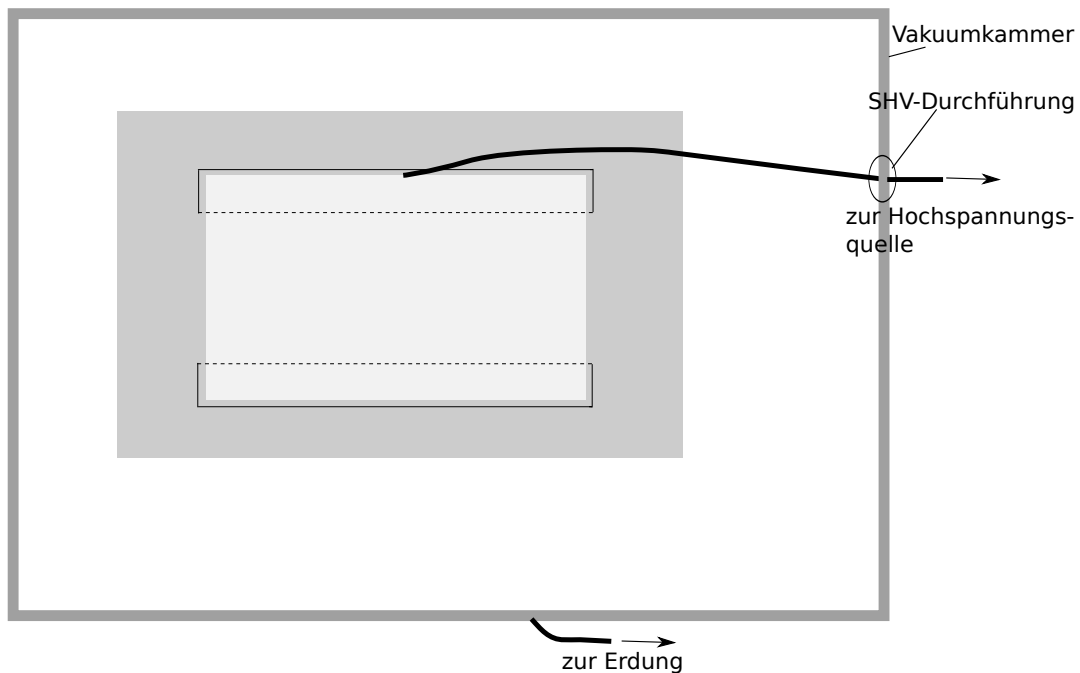


Abbildung 3.2.: Anordnung in der Vakuumkammer (Draufsicht)

Funkenüberschlag zu erwarten sind.

Bei den in Folge durchgeführten Messungen traten allerdings zwei Probleme auf:

- Die als Abstandshalter verwendeten Overheadfolien waren nur relativ schlechte Isolatoren. Ab einer Spannung von etwa 2000 V floss ein Dauerstrom von einigen  $\mu\text{A}$ . Dieses Problem konnte umgangen werden, indem die schon erwähnten PET-Folien „LDS 1260“ von „Precision Brand Products“ verwendet wurden. Diese Folien waren auch in verschiedenen Dicken verfügbar, was es später ermöglichte, den Einfluss des Elektrodenabstandes auf das Verhalten des Versuchsaufbaus zu untersuchen.
- Ab etwa 2700 V schaltete sich die Hochspannungsquelle auf eine undokumentierte Art und Weise ab. Das Problem ist zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Textes noch nicht behoben. Eine detaillierter Beschreibung findet sich in Abschnitt 4.1.

## 3.2. Messungen

Mit den neuen Abstandshaltern wurde eine erste Reihe von Versuchen durchgeführt. Die Dicke der Abstandshalter betrug  $100(2) \mu\text{m}$ . Die Spannung wurde jeweils mit  $100 \text{ V/s}$  hochgefahren, dann für eine Stunde konstant gehalten und abschließend wieder heruntergefahren. In Tabelle 3.1 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

Diese Resultate zeigen tendentiell schon, was sich in weiteren Versuchsreihen noch bestätigen ließ: Bis 2400 V passierte generell nicht viel, d. h. es traten weder Funkenüberschläge noch dauerhafte Stromflüsse noch Komplikationen mit der Hardware auf. Bei höherer Spannung gab es dann vereinzelt Funkenüberschläge. Zusätzlich machte sich der im Kapitel 2 angesprochene „Lerneffekt“ bemerkbar: Mit der Zahl der Versuche verbessern sich auch die Ergebnisse. Dass es allerdings selbst bei 2700 V (wie bei der in Tabelle 3.1 dargestellten Versuchsreihe) keine Überschläge gab, ist jedoch als Einzelfall anzusehen; in der Regel traten bei dieser und höheren Spannungen die schon erwähnten Probleme mit der Hochspannungsquelle (siehe Abschnitt 4.1) auf.

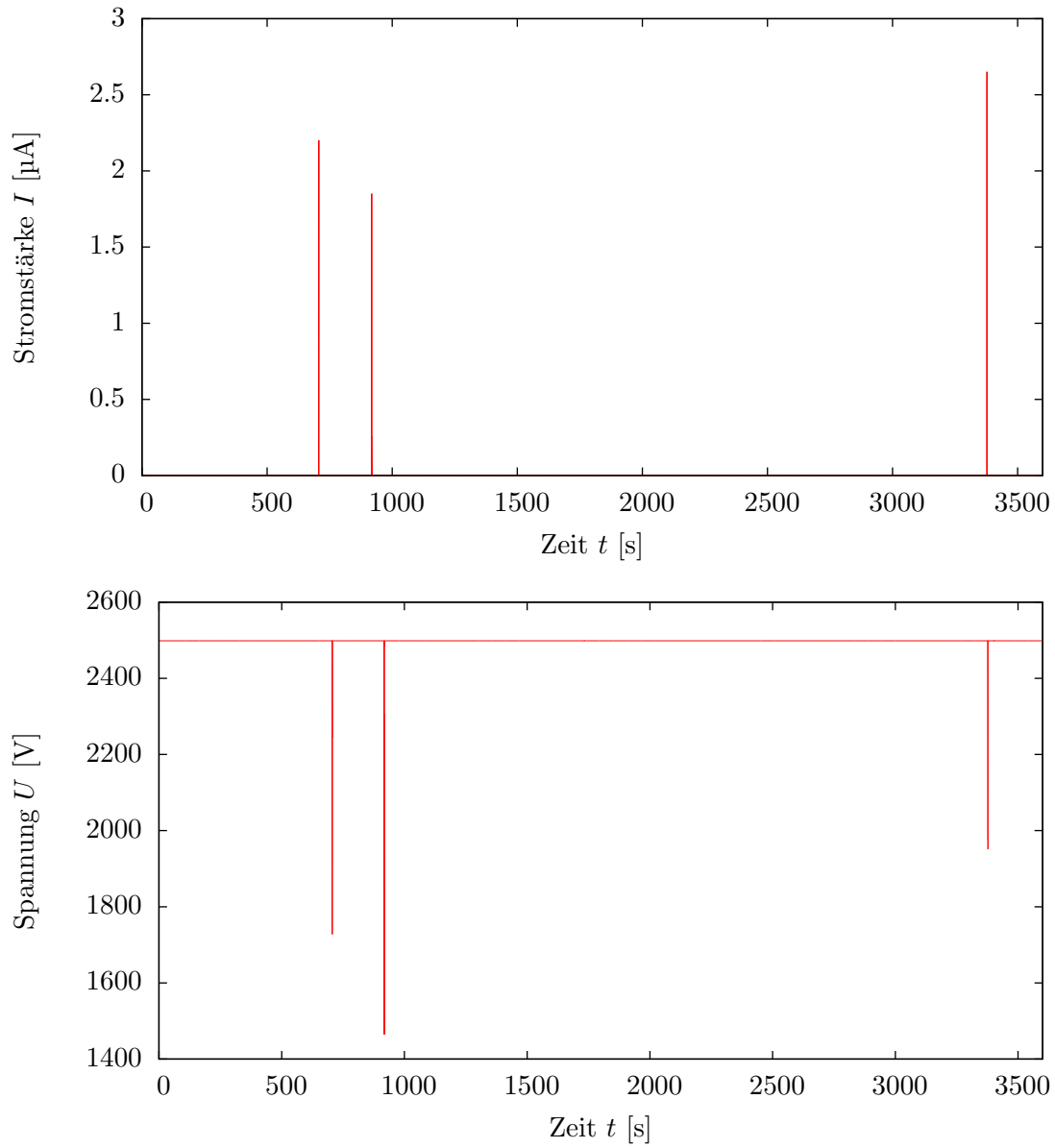


Abbildung 3.3.: Beispiel für eine Messaufnahme

$p$ [ $10^{-5}$ mbar]	$U$ [V]	Zahl der Überschläge
3,7	2400	0
3,6	2450	3
3,6	2500	3
3,6	2550	2
3,5	2600	0
3,5	2650	0
3,5	2700	0

Tabelle 3.1.: Messreihe bei einem Abstand der Elektroden von 100  $\mu\text{m}$

Weitere Erkenntnisse ließen sich mit neuen Aluminiumblöcken, welche eine minimale Rauigkeit und Welligkeit aufwiesen, gewinnen.

Als erstes fiel auf, dass es anfangs schon bei 2000 V und darunter Überschläge gab, die sich allerdings bald einstellten. Der „Lerneffekt“ war also ganz besonders ausgeprägt. Tabelle 3.2 fasst die Ergebnisse der ersten beiden Messtage mit den neuen Elektroden zusammen.

$U$ [V]	18.11.2011		21.11.2011	
	$p$ [ $10^{-5}$ mbar]	Überschläge [ $\text{h}^{-1}$ ]	$p$ [ $10^{-5}$ mbar]	Überschläge [ $\text{h}^{-1}$ ]
2400	3,5	8	6,5	0
2450	3,2	2	—	—
2500	3,2	1	5,1	0
2550	3,2	0	—	—
2600	—	—	4,7	Gerätefehler

Tabelle 3.2.: Messreihen mit neuen Elektroden bei 100  $\mu\text{m}$  Abstand

In weiteren Versuchen wurde nun der Abstand zwischen den Elektroden variiert. Dies geschah durch den Einsatz von Abstandshalter-Folien unterschiedlicher Dicke. Neben den schon ausfuhrlieh getesteteten 100  $\mu\text{m}$ -Folien wurden noch kurze Messungen (jeweils ca. 10 min) mit Folien der Stärke 23  $\mu\text{m}$  – 24  $\mu\text{m}$ , 51  $\mu\text{m}$  – 52  $\mu\text{m}$  und 76  $\mu\text{m}$  – 77  $\mu\text{m}$  ausgeführt.

Dabei ist aufgefallen, dass (für die beiden kleineren Abstände – bei den großen schaltete sich die Hochspannungsquelle vorher ab) ab einer gewissen Spannung (etwa 1200 V bei 24  $\mu\text{m}$  und 2100 V bei 51  $\mu\text{m}$ ) es nicht nur zu Funkenüberschlägen kam, sondern auch immer wieder für längere Zeit Strom von mehr als 10  $\mu\text{A}$  floss. Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über diese Ergebnisse. Weil die Messungen wegen der zeitlich begrenzten Verfügbarkeit der Hochspannungsquelle nur einmal durchgeführt werden konnten, kann keine Aussage über den Messfehler getroffen werden. Die Ergebnisse sollte man also maximal als Richtwerte für eventuelle zukünftige Experimente verstehen.

Abstand [ $\mu\text{m}$ ]	max. Feldstärke [kV/mm]	Begrenzung
24	52	dauerhafter Stromfluss
51	39	dauerhafter Stromfluss
76	33	Gerätefehler
100	27	Gerätefehler

Tabelle 3.3.: Maximal erreichte Feldstärken

## 4. Offene Fragen und Probleme

### 4.1. Abschalten der Hochspannungsquelle

Wie schon erwähnt, schaltet sich die Hochspannungsquelle, eine CAEN N1470, ab einer gewissen Spannung spontan komplett aus. Diese Spannung hängt vom Abstand der Elektroden ab. Bei 100  $\mu\text{m}$  beträgt sie etwa 2700 V, bei 75  $\mu\text{m}$  2500 V.

Laut Dokumentation des Geräts sollte dies nicht passieren. Das Gerät bietet lediglich die Funktion, dass bei Erreichen einstellbarer Parameter (z. B. Überschreitung einer maximalen Stromstärke über eine gewisse Zeit) die Hochspannung heruntergefahren wird. Offensichtlich handelt es sich hier also um eine Fehlfunktion.

Mit dem Hersteller wurde bereits Kontakt aufgenommen <sup>1</sup>. Dessen Vorschläge zur Lösung des Problems (wie z. B. die Trennung der Hochspannungs-Seite des Geräts von der Erde) brachten bis dato jedoch keine Verbesserung.

Zum Zeitpunkt des Schreibens dieser Arbeit versucht die Herstellerfirma gerade, dieses (Fehl-) Verhalten in ihren eigenen Labors zu reproduzieren. Es bleibt zu hoffen, dass sich dadurch eine Lösung ergibt.

### 4.2. Schäden an den Neutronenspiegeln durch Spannungsüberschläge

Bei der Verwendung der Overheadfolien-Stücke als Abstandshalter traten Funken fast ausschließlich neben den Rändern der Folien auf. Nach einigen Tagen Versuchsdurchführung konnte man mit freiem Auge erkennen, wo sich die Abstandshalter befunden hatten, weil sich deren Umrisse „eingebraunt“ hatten.

Darum sollte überprüft werden, welche Auswirkungen Spannungsüberschläge auf die ungleich filigraneren Neutronenspiegel mit ihren Beschichtungen von wenigen Nanometern Dicke haben. Falls durch die Funken die Oberfläche der Spiegel beschädigt werden sollte, würde sich ein weiteres Problem auf tun: Man könnte dann nicht mehr einfach warten, bis der „Lerneffekt“ (vorausgesetzt, er tritt bei echten Spiegeln ebenfalls in dem Ausmaß auf) stattgefunden hat; bis dahin wären die Spiegel womöglich unbrauchbar.

### 4.3. Toleranz des Experiments gegenüber Feldschwankungen

Es stellt sich auch die Frage, wie stark die Auswirkungen von gelegentlichen Überschlägen auf die Qualität des Neutronenexperiments wären, das heißt, ob und, wenn nein, bis zu welcher Rate Funkenüberschläge und die einhergehenden Schwankungen der Feldstärke die Messungen negativ beeinflussen würden. Denn je geringer dieser Einfluss ist, desto höhere Spannungen könnten angelegt werden (bis hin zu dem Punkt, ab dem dauerhaft Strom fließt).

---

<sup>1</sup>Kontakt: Andrea Testa, a.testa@caen.it

## 5. Conclusio

Die im Rahmen dieser Projektarbeit gewonnenen Erkenntnisse sind vielfältig:

- Es gibt einen starken „Lerneffekt“. Je öfter und je länger Messungen durchgeführt werden, desto besser werden die Ergebnisse. Dies könnte bei der Verwendung von echten Neutronenspiegeln zu Problemen führen, siehe Abschnitt 4.2.
- Es ist schwierig, eine genaue Angabe über die maximal erreichbare Feldstärke zu geben. Einerseits spielt der nun schon ausführlich besprochene „Lerneffekt“ eine wichtige Rolle, andererseits muss man auch feststellen, wie tolerant die Neutronenspiegel bzw. das Experiment allgemein gegenüber Funkenüberschlägen und den damit verbundenen Effekten wie zum Beispiel dem kurzfristigen Einbrechen des elektrischen Feldes sind.
- Messungen bei kleinen Abständen legen nahe, dass es einen gewissen Punkt gibt, ab dem es nicht nur einzelne Überschläge gibt, sondern ab dem auch dauerhaft Strom fließt.
- Wo am Aufbau Funkenüberschläge stattfinden, hängt mitunter auch von den verwendeten Abstandshaltern ab.
- Es lassen sich auch mit diesem suboptimalen Aufbau (man denke an die scharfen Kanten der Alublöcke) schon sehr ansehnliche Feldstärken erreichen.

Bei einer Spaltbreite von  $100\ \mu\text{m}$  scheint eine Spannung von  $2400\ \text{V}$  noch „sicher“ zu sein, das heißt keine Überschläge zu verursachen. Dies entspricht einer elektrischen Feldstärke von  $24\ \text{kV/mm}$ , ist also bereits in der Größenordnung des besten jemals und unter dafür optimierten Bedingungen erzeugten Feldes von  $70\ \text{kV/mm}$  (siehe [6]). Falls sich gelegentliche Überschläge als tolerierbar herausstellen, kann man auch zu noch höheren Feldstärken übergehen.

Des Weiteren wurde mit der Computersteuerung für die Hochspannungsquelle ein Werkzeug entworfen, mit dem es in Zukunft ein Leichtes sein sollte, neue Neutronenspiegel zu testen, um herauszufinden, welche Feldstärken im Experiment dann tatsächlich verwendet werden können.



# A. Screenshot des Computerprogramms

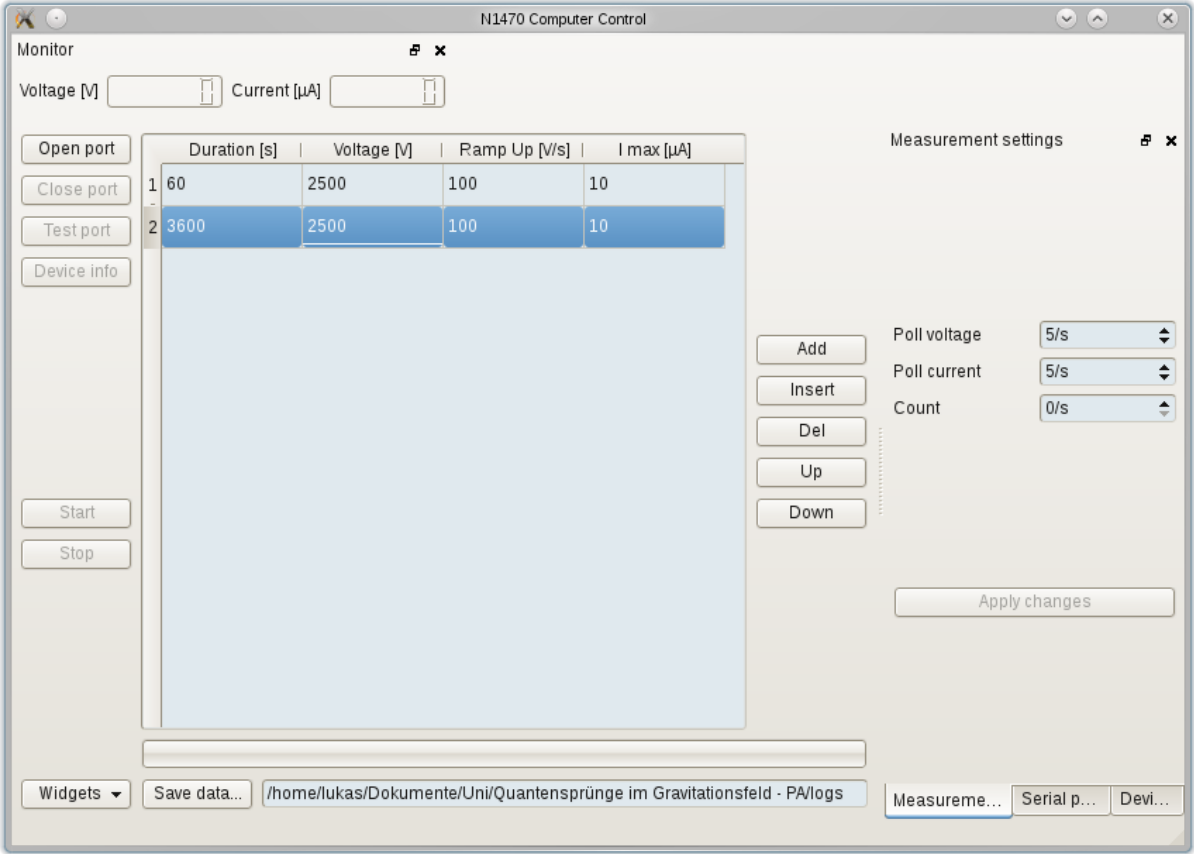


Abbildung A.1.: Screenshot

# Literaturverzeichnis

- [1] V. Nesvizhevsky et al., “Quantum states of neutrons in the earth’s gravitational field,” *Nature*, vol. 415, p. 297, 2002.
- [2] H. Abele, T. Jenke, D. Stadler, and P. Geltenbort, “Q-bounce: Experiments with quantum bouncing ultracold neutrons,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 611, pp. 318–321, 2009.
- [3] T. Jenke, P. Geltenbort, L. H., and H. Abele, “Realization of a gravity-resonance-spectroscopy technique,” *Nature Physics*, vol. 7, pp. 468–472, 2011.
- [4] K. Dursberger-Rennhofer, J. T., and A. H., “Probing neutron’s electric neutrality with ramsey spectroscopy of gravitational quantum states of ultra-cold neutrons,” *Phys. Rev. D*, vol. 84, p. 036004, 2011.
- [5] M. Kurrat et al. in *Proceedings of the XIII International Symposium on High Voltage Engineering*, Delft University of Technology, Netherlands, 2003.
- [6] P. N. Chistyabov and N. P. Dubini *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Radiofiz.*, vol. 22, p. 1020, 1979.
- [7] S. D. Pawar, P. Murugavel, and D. M. Lal, “Effect of relative humidity and sea level pressure on electrical conductivity of air over Indian Ocean,” *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, vol. 114, p. 2205, Jan. 2009.