

Aufbau und Inbetriebnahme eines Elektroneninterferometers

Wissenschaftliche Arbeit zur
Wissenschaftlichen Prüfung für das
Lehramt an Gymnasien

vorgelegt von
Dorothee Kunschner

Stuttgart, den 13. November 2013



Universität Stuttgart

Fachbereich Physik
Pfaffenwaldring 57
70550 Stuttgart

Betreuer:
Prof. Dr. Tilman Pfau
Dr. Robert Löw
5. Physikalisches Institut
Universität Stuttgart

Übersicht

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Aufbau eines Elektroneninterferometers im Rahmen der „Konzeption einer Versuchsreihe zu Quanteneffekten für Schüler“ [25]. In der Arbeit von D. Neubauer, die dieser Arbeit als Basis diente, wurden bereits einige Bauteile angefertigt, wie zum Beispiel der Anodenzyylinder der Elektronenquelle, die Ablenkelemente und die Quadrupollinsen. Die Aufgabe dieser Arbeit war es, die Reihe der Bauteile zu vervollständigen und das Interferometer aufzubauen. Das fehlende Herzstück des Elektroneninterferometers, die Wolframspitze, die die Elektronen emittiert, wurde mit Hilfe der Universität Tübingen in einem speziellen Ätzverfahren hergestellt. Zuvor musste die Spitze mit ihrem Wolframhaltebügel verbunden werden. Dazu wurden zwei verschiedene Schweißverfahren, das Punktschweißverfahren und das Laserschweißverfahren, getestet. Zur Detektion der interferierenden Elektronen wurde eine „Sandwich“-Halterung für die Mikrokanalplatten (MCPs) und den Phosphorschirm konstruiert und angefertigt. Zudem wurde die Vakuumkammer zusammengebaut und ausgepumpt und die einzelnen Bauteile verdrahtet.

Aufgrund dessen, dass bis zum Ende dieser Arbeit keine Elektronen auf dem Phosphorschirm zu erkennen waren, wurde eine Fehlersuche durchgeführt. Dabei wurden die MCPs als Fehlerquelle ausgeschlossen, die eigentliche Ursache jedoch nicht gefunden.

Erklärung

Ich erkläre, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken, gegebenenfalls auch elektronischen Medien, entnommen sind, sind von mir durch Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht. Entlehnungen aus dem Internet sind durch Angabe der Quelle und des Zugriffsdatums sowie dem Ausdruck der ersten Seiten belegt; sie liegen zudem für den Zeitraum von 2 Jahren entweder auf einem elektronischen Speichermedium im PDF-Format oder in gedruckter Form vor.

Ort, Datum

Dorothee Kunschner

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Die Elektronenquelle	3
2.1. Die FEE-Kanone	4
2.2. Elektronenemission	5
3. Die Spitzenherstellung	9
3.1. Punktschweißen	10
3.1.1. Ergebnis des Punktschweißens	11
3.2. Laserschweißen	12
3.2.1. Parametertests	13
3.2.2. Ergebnis des Laserschweißens	16
3.3. Ätzen der Spitze	17
3.4. Zentrierung der Spitze	20
4. Der Detektor	23
4.1. Die MCPs und der Phosphorschirm	23
4.2. Die Halterung für die MCPs und den Phosphorschirm	24
5. Die Vakuumkammer	27
5.1. Das Pumpensystem	27
5.2. Das Ausheizen der Vakuumkammer	29
5.3. Die Hochspannungsdurchführungen	29
6. Experimentelle Vorbereitungen	31
6.1. Vakuumreinigung	31
6.2. Verdrahtung der Bauteile	32
6.3. Beschaltung der Netzteile	34
7. Erste Inbetriebnahme	37
7.1. Fehleranalyse	37
7.2. Ergebnisse der Fehleranalyse	39
8. Zusammenfassung und Ausblick	41
A. Tabellen	45
B. Bilder	49

1. Einleitung

Interferometer haben eine wichtige Rolle in der Entwicklung der Physik des 20. Jahrhunderts gespielt. Bereits Ende des 19. Jahrhunderts gelang es A. Michelson ein Interferometer zu bauen, mit dem er beweisen konnte, dass die Lichtgeschwindigkeit unabhängig vom Bezugssystem ist. Dieses Ergebnis war eines der ersten Schritte zur speziellen Relativitätstheorie, die A. Einstein 1905 vorstellte [27]. Zudem gelang es A. Michelson und J. R. Benoit 1892, die Wellenlänge der roten Cadmiumlinie mit Hilfe der Interferometrie und dem Vergleich des Urmeters zu bestimmen [9]. Auch heute noch werden Michelson-Interferometer oder Varianten davon verwendet, zum Beispiel in der Präzessionsspektroskopie oder der Laserphysik. Selbst in der Astronomie sind Interferometer nicht mehr wegzudenken. So sollen zum Beispiel mit Hilfe eines Gravitationswellendetektors, dem GEO600 in Hannover, Gravitationswellen nachgewiesen werden. Auch dieser Detektor basiert auf dem gleichen Prinzip wie das Michelson-Interferometer [1].

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde nicht nur der Grundstein für die Relativitätstheorie gelegt, sondern auch für die Quantenmechanik, wie wir sie heute kennen. Ein wichtiger Schritt war die These vom Welle-Teilchen-Dualismus, die von L. de Broglie im Jahre 1924 aufgestellt wurde [4]. Bereits 1927 konnten C. Davisson und sein Assistent L. Germer diese These bestätigen [8]. Sie streuten Elektronen an einem Nickelkristall und entdeckten – entgegen der klassischen Vorstellung – ein Interferenzmuster. Damit war klar, dass sich die Elektronen wie elektromagnetische Strahlung verhalten und nicht nur wie einzelne Teilchen. In den folgenden Jahren wurden daher viele weitere Experimente durchgeführt, die sich mit der Beugung und Interferenz von Teilchen beschäftigten.

Im Jahre 1954 gelang G. Möllenstedt und H. Düker ein „FRESNELScher Interferenzversuch mit einem Biprisma für Elektronenwellen“ [24]. Der Versuch wurde in Analogie zum Fresnelschen Interferenzexperiment, bei dem die Doppellichtquelle mit Hilfe eines Biprismas erzeugt wird, durchgeführt. Das von G. Möllenstedt und H. Düker verwendete elektronenoptische Biprisma bestand aus einem metallischen Quarzfaden mit einem Durchmesser von wenigen Mikrometern und aus zwei geerdeten Elektroden. An den Quarzfaden wurde hierbei eine Spannung von +10 kV angelegt und die Elektroden waren in einem Abstand von 2 mm neben dem Faden platziert (vgl. Abbildung 1.1). Der große Vorteil dieses Aufbaus bestand in der „Aufspaltung eines Elektronenstrahls in kohärente Teilstrahlen [...] im elektronenoptischen Biprisma durch bequem einstellbare Potentialfelder“ [24].

Alle Elektroneninterferometer, die nach dem Vorbild von G. Möllenstedt und H. Düker gebaut wurden, hatten allerdings Probleme mit magnetischen Streufeldern und mechanischen Vibrationen [25]. F. Hasselbach konstruierte 1988 ein weiterentwickeltes Elektroneninterferometer, das deutlich besser vor äußeren Einflüssen geschützt ist und damit

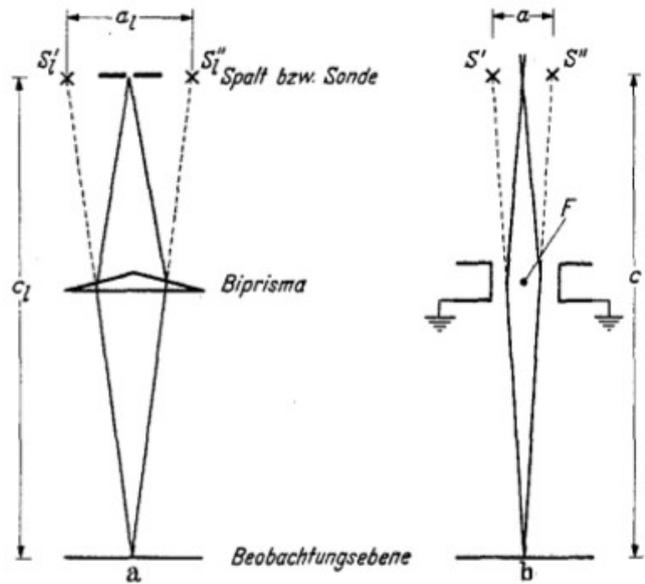


Abb. 1.1.: Schematischer Strahlengang im Biprisma a) Fresnelsches Biprisma; Die virtuellen Quellen S'_I und S''_I werden vom Biprisma im Abstand a_I erzeugt. Das Interferenzmuster entsteht durch die Überlagerung der kohärenten Wellenfronten in der Beobachtungsebene. b) Elektronenoptisches Biprisma; F bezeichnet den metallischen Quarzfaden. Das elektronenoptische Interferenzmuster entsteht analog zum lichtoptischen; aus [23].

neue fundamentale Experimente und Anwendungen ermöglichte [20]. Das Elektroneninterferometer dieser Arbeit beruht auf dem Prinzip des verbesserten Interferometers von F. Hasselbach. Teilweise wurden die Bauteile sogar anhand von seinen Tuschezeichnungen nachkonstruiert und angefertigt [25].

2. Die Elektronenquelle

Die Elektronenquelle des Elektroneninterferometers muss bestimmte Kriterien erfüllen, damit Interferenz möglich ist. So müssen die virtuellen Quellen S'_i und S''_i aus Abbildung 1.1 punktförmig sein und kohärente Wellen aussenden. Dabei bedeutet kohärent hier sowohl räumliche Kohärenz als auch Längenkohärenz. Prinzipiell ist die Kohärenz bei einem Biprisma schon von vornherein gegeben, da die virtuellen Bilder von genau einer realen Quelle stammen. Würde man anstatt den beiden virtuellen Quellen zwei reale Quellen platzieren, so würde man kein Interferenzmuster erkennen können. Allerdings muss auch diese eine Quelle die Bedingung der räumlichen Kohärenz und der Längenkohärenz erfüllen.

Bei der räumlichen Kohärenz muss man beachten, dass sowohl die Quelle als auch der Biprismafaden eine räumliche Ausdehnung haben. Für die Ausdehnung der Quelle gilt analog zur Beugung am Einzelspalt die Kohärenzbedingung 2.1 (vgl. Abbildung 2.1). Dabei wurde angenommen, dass der Abstand zwischen Quelle und beugendem Objekt groß gegenüber der Ausdehnung der Quelle ist, wodurch die beiden Strahlen quasi unter dem gleichen Winkel austreten. Zudem muss der Gangunterschied der Strahlen kleiner sein als die Wellenlänge, damit sich die Strahlen nicht gegenseitig auslöschen ($g \ll \lambda$). Die Ungleichung, die diese Bedingungen zusammenfasst ist die Verdettsche Kohärenzbedingung [25].

$$\sin \alpha = \frac{g}{D} \ll \frac{\lambda}{D} \quad \Rightarrow \quad D \cdot \sin \alpha \ll \lambda \quad (2.1)$$

Dabei ist a der Abstand zwischen Quelle und Biprismafaden, D die räumliche Ausdehnung der Quelle, g der Gangunterschied der interferierenden Strahlen und α der Austrittswinkel. Die De Broglie Wellenlänge der Elektronen ist bestimmt durch ihre Energie, die sie in der Apparatur durch die angelegten Spannungen im Bereich von $2,5 \text{ kV}$ bis 7 kV liegt. Es ergeben sich Wellenlängen

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}} \quad (2.2)$$

im Bereich von $1,46 \cdot 10^{-11} \text{ m}$ bis $2,45 \cdot 10^{-11} \text{ m}$.

Die räumliche Ausdehnung des Biprismafadens $2r$ wird durch die Längenkohärenz der Quelle beschränkt. Die Längenkohärenz ist abhängig von der Verteilung der kinetischen Energie der Elektronen, denn nur für eine deltaförmige Frequenzverteilung ergibt sich

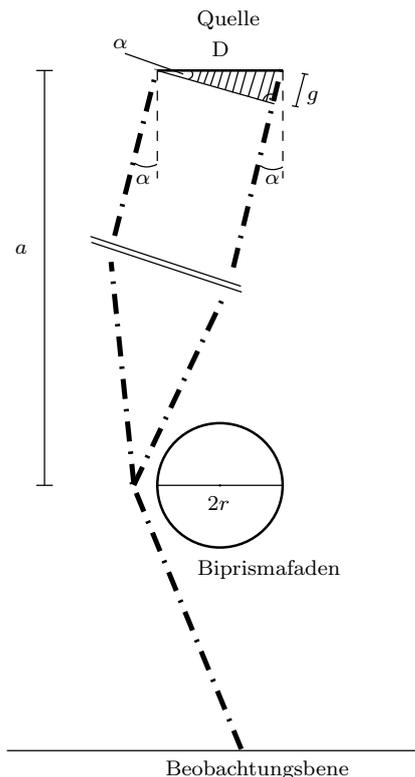


Abb. 2.1.: Skizze zur Herleitung der Verdetschen Kohärenzbedingung; a bezeichnet den Abstand zwischen Quelle und Biprismafaden, D die Ausdehnung der Quelle, $2r$ die Ausdehnung des beugenden Objekts und g den Gangunterschied.

eine ebene Welle unendlicher Ausdehnung. Die endliche Energieverteilung einer realen Elektronenquelle führt zu Wellenpaketen endlicher Länge [26] ohne festen Phasenbezug. Damit Interferenz möglich ist, muss die Wegdifferenz Δx der aufgespaltenen Strahlen kleiner sein als die Kohärenzlänge l . Um das zu ermöglichen sollte das Energiespektrum möglichst scharf sein und das Beugende Objekt eine möglichst kleine Ausdehnung haben. Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass die Quelle und der Biprismafaden möglichst klein sein sollten und die Energieverteilung der Elektronen einen möglichst scharfen Peak besitzen sollte. Auf Grund dieser Forderungen eignet sich für das Elektroneninterferometer am besten eine Feldemissionskathode, bestehend aus einer geätzten Wolframspitze [5].

2.1. Die FEE-Kanone

Feldemissionskathoden basieren auf dem quantenmechanischen Tunneffekt¹. Die Elektronen werden durch ein starkes elektrisches Feld von ungefähr $10^{10} \frac{\text{V}}{\text{m}}$ aus der Kathode

¹Der Tunneffekt wird in Kapitel 2.2 genauer erklärt.

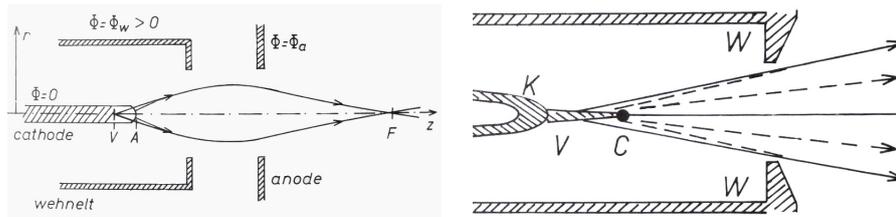


Abb. 2.2.: Schematischer Aufbau einer Feldemissions-Elektronenkanone;

Links: Prinzip der Triode. Die Strahlen sind durch die Kathode und die erste Anode (*wehnelt*) so gekrümmt, dass es so scheint, als würden sie aus der virtuellen punktförmigen Quelle V stammen. Durch die zweite Anode (*anode*) kommt es im Punkt F zur Überschneidung der Strahlen.

Rechts: Prinzip der Diode. K bezeichnet hier die Kathode, C die Spitze, V die virtuelle Quelle und W die Anode (*wehnelt*); aus [21].

gelöst. Ein solch starkes Feld lässt sich relativ einfach mit einer spitz zulaufenden Kathode erzeugen [21]. Im Experiment wird eine solche Spitze auf einem dünnen Haltebügel befestigt, der zugleich als Kontakt zur Spannungsquelle dient.

Typischerweise besteht der Aufbau einer Feldemissions-Elektronenkanone aus drei Teilen und wird daher auch als Triode bezeichnet (vgl. Abbildung 2.2 links). Die Triode besteht aus einer Kathode (*cathode*), die die Elektronen emittiert, sowie aus zwei Anoden (*wehnelt* und *anode*). Das Potential nimmt von der zweiten Anode (*anode*) zur ersten Anode (*wehnelt*) und von der ersten Anode (*wehnelt*) zur Kathode ab. Die erste Anode mit schmaler Apertur schirmt die Kathode gegenüber der zweiten Anode ab, sodass diese keinen signifikanten Einfluss auf das elektrische Feld in der Nähe der Kathode hat, wodurch der Elektronenfluss ausschließlich vom Potential der ersten Anode abhängt [21]. Durch das von der zweiten Anode verursachte Feld schneiden sich die Elektronenstrahlen im Punkt F.

Dass die zweite Anode keinen Einfluss auf den Extraktionsprozess hat, hat den Vorteil, dass man statt einer komplizierten Triode das einfachere System der Diode verwenden kann (vgl. Abbildung 2.2 rechts). Die Diode besteht also lediglich aus einer Kathode (K) und einer Anode (W) zur Extraktion der Elektronen. Bei diesem Aufbau besteht im Strahlengang vor dem Biprisma kein Crossover. Ein weiterer Vorteil ist, dass durch die fehlende zweite Anode keine Aberrationsfehler entstehen, die durch zusätzliche Optiken aufwendig korrigiert werden müssten.

Der Nachteil dieser Anordnung besteht darin, dass man mit nur einer Anode die kinetische Energie der Elektronen nicht unabhängig einstellen kann. Das heißt, man ist gezwungen, mit der kinetischen Energie zu arbeiten, die die Elektronen durch die Emissionsspannung erhalten.

2.2. Elektronenemission

Wie schon im vorigen Kapitel erwähnt wurde, beruht die Emission der Elektronen aus der Kathode auf einem quantenmechanischen Phänomen, dem Tunneleffekt. Befindet

sich zum Beispiel ein Teilchen mit einer Gesamtenergie V_0 in einem Potentialtopf, wie er in Abbildung 2.3 links dargestellt ist, so kann es klassisch gesehen den rechten, bzw. den linken Potentialberg nicht überschreiten, da $V_0 < V$ gilt. In der Quantenmechanik wird jedem Teilchen aufgrund des Welle-Teilchen-Dualismus eine Welle zugeordnet, mit der die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Teilchens innerhalb und außerhalb des Potentialbergs berechnet werden kann². Man bezeichnet nun den Effekt, dass die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Teilchens außerhalb des Potentialbergs – trotz seiner eigentlich zu geringen Energie V_0 – nicht Null ist, als Tunneleffekt.

Dieser Effekt soll nun speziell im Bezug auf metallische Oberflächen nach [21] beschrieben werden, da im Elektroneninterferometer eine Wolframspitze als Kathode verwendet wird. Im Sommerfeld-Bethe Modell wird das Potential im Metall ($z < 0$) vereinfacht als konstantes Potential $V(z) = \text{const}$ betrachtet, welches tiefer liegt als das angrenzende Potential des Vakuums ($z > 0$) (vgl. Abbildung 2.3 rechts). An der Metalloberfläche, d.h. beim Übergang zwischen Metall und Vakuum, steigt das Potential stark an und bildet einen Potentialwall. Nach dem Bändermodell für Metalle bilden Elektronen im Leitungsband ein ideales freies Gas, in welchem ihre negativen Ladungen von den Atomrümpfen neutralisiert werden. Quantenmechanisch werden die Elektronen mit Hilfe von stehenden Wellen beschrieben. Die Knoten der stehenden Welle im Leitungsband befinden sich an der Metalloberfläche. Am absoluten Temperaturnullpunkt³ sind die Energieniveaus aufgrund des Pauliprinzips vom Grundzustand (unterer Rand des Leitungsbands) bis zur Fermienergie ζ_0 mit Elektronen besetzt.

Wie stark das Potential für $z > 0$ abfällt ist abhängig vom angelegten elektrischen Feld. Der Potentialwall wird umso schmaler, je stärker das elektrische Feld wird. Die Dicke und die Höhe des Walls sind dafür verantwortlich, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass Elektronen durch die Barriere tunneln können. Dabei gilt: Je schmaler und niedriger der Potentialwall, umso höher die Tunnelwahrscheinlichkeit. Betrachtet man die reine Feldemission aus einer ebenen Oberfläche bei der Nullpunktstemperatur, so beschreibt eine Gleichung vom Fowler-Nordheim Typ den Tunnelstrom [16]

$$J = \lambda_z a \phi^{-1} F^2 P_F \cdot \exp\left(\frac{-\nu_F b \phi^{\frac{3}{2}}}{F}\right). \quad (2.3)$$

Dabei bezeichnen a und b die erste und zweite Fowler-Nordheim Konstante, ϕ die Barrierenhöhe und F die Fermienergie. λ_z , P_F und ν_F sind im Allgemeinen Funktionen, die von der konkreten Form des Barrierenpotentials und dem externen Feld abhängen [16]. Für den einfachen Fall eines Kastenpotentials gilt $\lambda_z = P_F = \nu_F = 1$. Diese Vereinfachung führt jedoch zu nur unzureichenden Vorhersagen. Bessere Näherungen können mittels numerisch berechneter Vorfaktoren erreicht werden [17]. Die genaue Beschreibung dieses Verfahrens würde jedoch im Rahmen dieser Arbeit zu weit führen.

²Eine Einführung in die Quantenmechanik würde den Rahmen dieser Arbeit überschreiten. Einen Einblick in diese Thematik findet man z.B. in [19] oder [7].

³Bei anderen Temperaturen wird der obere Rand des Leitungsbands durch eine glatte Kurve (Fermi-Dirac-Statistik) ersetzt. Eine detailliertere Erklärung findet sich in [21].

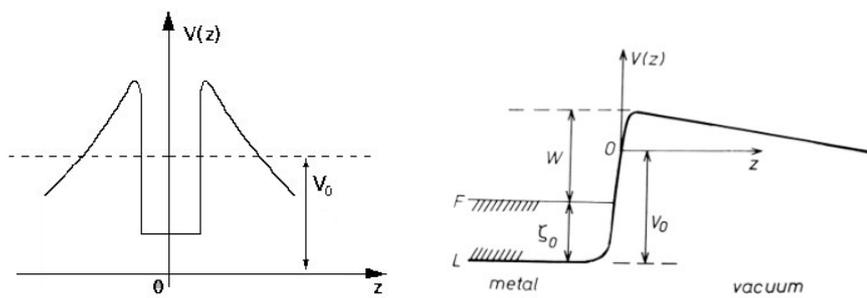


Abb. 2.3.: Potentialverlauf $V(z)$; Links: Potentialverlauf zur Erklärung des Tunneffekts. Rechts: Potentialverlauf an der Oberfläche der Kathodenspitze. L : Unterer Rand des Leitungsbands; ζ_0 : Fermienergie; W : Austrittsarbeit (nicht korrigiert). Die langsam abfallende negative Flanke von $V(z)$ im Vakuumbereich stammt von einem schwachen elektrischen Feld. Die Definition des Ursprungs und somit auch die Konstante V_0 ist beliebig; aus [21].

3. Die Spitzenherstellung

Wie im vorigen Kapitel erklärt wurde, benötigt man für Interferenzeffekte im Elektroneninterferometer eine möglichst punktförmige Quelle mit einem scharfen Energiespektrum. Hierfür ist eine spezielle Spitze aus dünnem monokristallinen Wolframdraht geeignet [5]. Sie wird aus dem Draht mit Hilfe eines speziellen Ätzverfahrens gewonnen. Da ein solcher Draht sehr teuer ist, wurde die Spitzenherstellung in dieser Arbeit mit dünnen polykristallinen Drähten der Dicken $100\ \mu\text{m}$, $150\ \mu\text{m}$ und $175\ \mu\text{m}$ getestet. Zur Befestigung im Elektroneninterferometer wurden die Spitzen mit einem Haltebügel verschweißt. Dieser steckt in der Makorhalterung und stellt die Verbindung zu den Kupferelektroden her (vgl. Abbildung 3.1). Für die Haltebügel wurden Wolframdrähte mit einem Durchmesser von $440\ \mu\text{m}$ verwendet, die passend zur Makorhalterung geformt wurden.

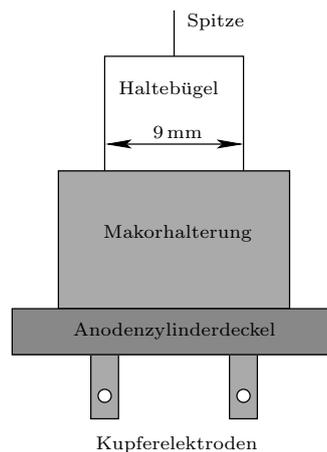


Abb. 3.1.: Skizze der Spitze mit Halterung.

Der erste Schritt zur Herstellung der Spitze ist das Verbinden des dünnen Drahtes mit dem Haltebügel. Dazu wurde sowohl das Punktschweißverfahren (Kapitel 3.1) als auch das Laserschweißverfahren (Kapitel 3.2) getestet, wobei nur ersteres verwendbare Resultate lieferte. Im zweiten Schritt wird die Spitze mit dem Verfahren nach W. Chang et al. [6] geätzt (Kapitel 3.3). Die Reihenfolge der Schritte muss beachtet werden, da eine fertige Spitze beim Schweißen zerstört werden würde. Die Spitze ist nach der Herstellung nicht zwangsläufig zentriert, weshalb eine Korrektur mit Hilfe der Makorhalterung nötig werden kann. Dafür wurde eine Konstruktion entwickelt, mit der die Position der Spitze im Anodenzylinder überprüfbar wird (Kapitel 3.4).

3.1. Punktschweißen

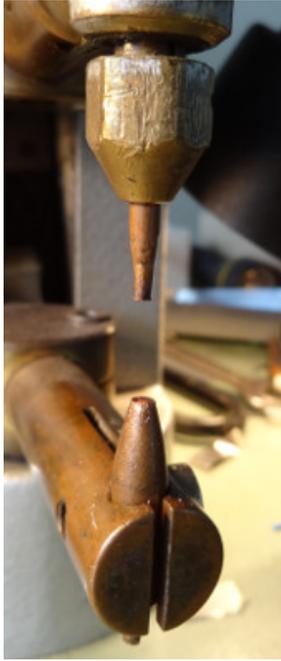


Abb. 3.2.: Kupferelektroden des Punktschweißgeräts.

Das Punktschweißen ist ein Schweißverfahren, das zur Gruppe des elektrischen Widerstandsschweißens gehört [3]. Bei diesem Verfahren ist es wichtig, dass die zu schweißenden Materialien elektrisch leitfähig sind, denn es müssen starke Ströme fließen können. Die für das Schweißen nötige Wärme entsteht durch die Wärmewirkung des elektrischen Stroms an den Widerständen im Schweißkreis. Das hier zugrunde liegende physikalische Gesetz ist das Joulesche Gesetz. Die Drähte werden auf Grund des starken Stroms und des Materialwiderstands so stark erhitzt, dass sie aufschmelzen. Nachdem der Schweißstrom abgeschaltet wurde, kühlt der Schweißpunkt sehr schnell ab. Ein weiterer wichtiger Aspekt beim Punktschweißen ist die Anwendung von Presskräften. Die abgeflachten Kupferelektroden des Punktschweißgeräts (vgl. Abbildung 3.2), die den Schweißstrom leiten, drücken gleichzeitig auch die Drähte zusammen und üben somit den nötigen Pressdruck aus. Wichtig ist, dass der Strom erst nach dem Zusammendrücken durch die Elektroden eingeschaltet wird. Um zu verhindern, dass sich Fehlschweißungen bilden, sollte man den Pressdruck auch erst nach dem Schweißvorgang wieder wegnehmen. Beim Öffnen der Elektroden muss man langsam vorgehen, da es vorkommen kann, dass die Drähte an einer Elektrode haften. Wenn das passiert muss man die Drähte vorsichtig hin und herbewegen, bis sie sich lösen.

Für die ersten Testspitzen wurden $100\ \mu\text{m}$ dünne Wolframdrähte an der Universität Tübingen in Zusammenarbeit mit dem Institut für angewandte Physik¹ gepunktet. Dazu wurde der dünne Draht auf dem Haltebügel aufliegend auf die abgeflachten Kupferkontakte des Punktgeräts gelegt und per Fußpedal wurde der Kontakt hergestellt. Die Parameter für die Stromstärke, die Spannung und die Stromzeit hängen von der Dicke und der Oberflächenbeschaffenheit des Materials ab. Sie wurden von einem Mitarbeiter des Instituts auf Grund seiner jahrelangen Erfahrung im Punktschweißen mit Wolframdrähten eingestellt. Der Schweißpunkt war allerdings sehr empfindlich sodass kleinste Berührungen dazu führten, dass sich der dünne Draht löste. Trotzdem war es möglich diese Spitzen zu ätzen und anschließend in die Vakuumkammer einzubauen.



Abb. 3.3.: Spitze 5 mit Bügel auf dem Makorspitzenhalter.

¹Ansprechpartner: Herr Herzog (Mitarbeiter des Instituts für angewandte Physik Universität Tübingen)

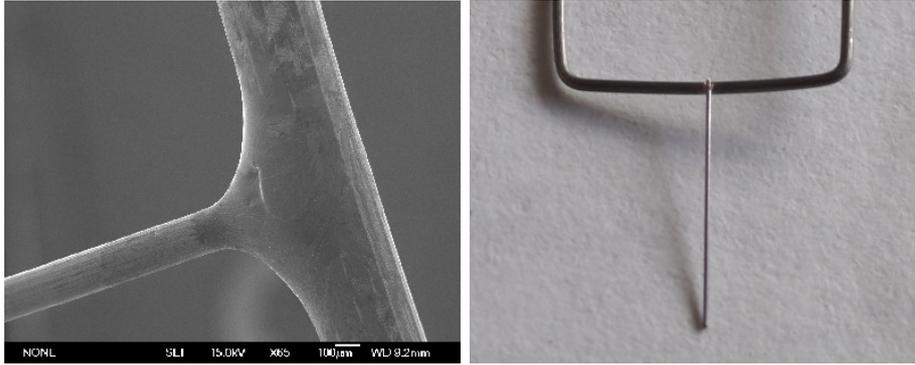


Abb. 3.5.: Links: Rasterelektronenmikroskopaufnahme der Schweißnaht eines $175\ \mu\text{m}$ -dicken Drahtes mit dem Haltebügel; Rechts: Foto eines gepunkteten $150\ \mu\text{m}$ -dicken Drahtes.

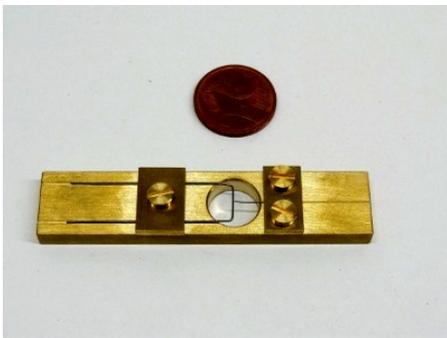


Abb. 3.4.: Neu konstruierte Halterung, um genaueres Schweißen zu ermöglichen.

Ein Nachteil war, dass es keine passende Halterung gab, um die Drähte einzuspannen. Von Hand war es schwierig sowohl die Mitte des Bügels zu treffen, als auch den Draht waagrecht zum Bügel auszurichten. Wie in Abbildung 3.3 zu sehen ist, sitzt die Spitze schief und nicht mittig auf dem Bügel. Deswegen wurde eine passende Halterung konstruiert, mit der man die Drähte zentriert zusammenschweißen kann (vgl. Abbildung 3.4). Sie wurde aus Messing hergestellt und ist so konstruiert, dass die Drähte mittig übereinander festgeklemmt werden können. Dazu wurden auf der Oberfläche längliche Kerben gezogen, in denen die Drähte

zum Liegen kommen. Dies verhindert ein seitliches Verschieben der Drähte. Man kann die Drähte mit der Halterung sogar so genau aufeinander legen, dass der dünne Draht nicht hinten über den Haltebügel hinausragt.

In einem weiteren Versuch wurden Drähte mit einer Dicke von $150\ \mu\text{m}$ und $175\ \mu\text{m}$ mit der neuen Schweißhalterung gepunktet. Die Stromstärke betrug $8\ \text{mA}$, die Spannung $1,5\ \text{V}$ und die Stromzeit $1\ \text{s}$. Für beide Drahtdicken wurden die gleichen Parameter verwendet. Die Verbindungsstelle sieht sauber aus und der Schweißpunkt ist sehr stabil, selbst bei vorsichtigem Gegentippen hielt die Spitze. Abbildung 3.5 zeigt zwei Schweißnähte, die mit den genannten Parametern gepunktet wurden. Die linke Aufnahme zeigt einen $175\ \mu\text{m}$ -dicken Draht auf dem Haltebügel. Sie wurde mit einem Rasterelektronenmikroskop an der Universität Tübingen aufgenommen. Die rechte Aufnahme zeigt das Foto eines auf den Haltebügel gepunkteten $150\ \mu\text{m}$ -dicken Drahtes.

3.1.1. Ergebnis des Punktschweißens

Die Wolframdrähte der Dicken $100\ \mu\text{m}$, $150\ \mu\text{m}$ und $175\ \mu\text{m}$ ließen sich auf die Haltebügel der Dicke $440\ \mu\text{m}$ gut punktschweißen. Bei dem $100\ \mu\text{m}$ -dicken Draht waren die Para-

meter wahrscheinlich nicht ganz perfekt eingestellt, wodurch der Schweißpunkt nicht so stabil war. Die Parameter hierfür sind nicht mehr bekannt.

Die Drähte mit den Dicken $150\ \mu\text{m}$ und $175\ \mu\text{m}$ wurden mit einer Spannung von $1,5\ \text{V}$, einer Stromstärke von $8\ \text{mA}$ und einer Stromzeit von $1\ \text{s}$ gepunktet. Die Verbindungsstelle zwischen dem dünnen und dem dicken Wolframdraht sieht gut aus und ist auch bei Berührung stabil (vgl. Abbildung 3.5 links). Auf Grund der neuen Halterung konnte der dünne Draht mittig und gerade auf den Haltebügel gepunktet werden.

3.2. Laserschweißen

Eine andere Methode um die beiden Wolframdrähte zu verbinden ist das Laserschweißen. Obwohl dieses Verfahren laut M. Beckert und A. Neumann in [3] besonders gut zum Schweißen von Metallen und insbesondere zum Verbinden von Drähten geeignet sein soll, gelang es uns nicht, die Drähte zu verschweißen. Beim Laserschweißen wird normalerweise so wie beim Punktschweißen kein verbindender Stoff zugeführt. Das bedeutet, dass nur die beiden Drahtstücke – in unserem Fall der $440\ \mu\text{m}$ -dicke und der $175\ \mu\text{m}$ -dicke Draht – übereinandergelegt und dann geschweißt werden. Wie der Name schon sagt, ist das Kernstück beim Laserschweißen der Laser. Die nötige Wärme für den Schweißvorgang wird durch die Absorption des Laserlichts im zu schweißenden Material erzeugt [3]. Deswegen ist sowohl die Wellenlänge des Lasers, als auch das Absorptionsverhalten des Materials für das Ergebnis des Schweißvorgangs wichtig. Das Modell, mit dem wir am Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) an der Universität Stuttgart arbeiteten, ist ein Scheibenlaser von der Firma Trumpf (vgl. Abbildung 3.7). Ein Scheibenlaser ist eine spezielle leistungsstarke Bauart des Festkörperlasers, dessen aktives Medium wie eine dünne Scheibe aussieht [2]. Fokussiert wird der Laserstrahl mit einem Linsensystem, das im Wesentlichen aus einer Kollimationslinse und einer Fokussierlinse besteht [18].

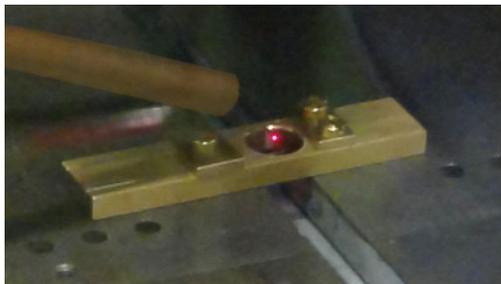


Abb. 3.6.: Halterung im Fokus des Pilotlasers (rot) mit Schutzgaszuführung.

Zusätzlich zum Arbeitslaser gibt es noch den sogenannten Pilotlaser (vgl. Abbildung 3.6). Mit seiner Hilfe kann man die zu schweißende Probe einfacher in den Fokus des Arbeitslasers legen. Ein weiterer wichtiger Teil ist das Kühlsystem. Es besteht aus einem Wasserkreislauf, der sequenziell den Laser und dann die Linsen kühlt. Damit während des gesamten Vorgangs keine Oxidation am Wolframdraht stattfindet, wurde noch ein Kupferrohr angebracht (vgl. Abbildung 3.6) durch das das Schutzgas Argon direkt auf die Probe geleitet wurde.

Der große Vorteil des Laserschweißens ist, dass sich Werkstoffe mit einer sehr hohen Schmelztemperatur, die mit einer Flamme nicht schweißbar wären, gut fügen lassen [15]. Da unsere Spitze aus Wolframdraht besteht und Wolfram eine Schmelztemperatur von

3422°C hat, schien dieses Verfahren für unsere Zwecke geeignet zu sein. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass man die Werkstoffe sowohl an der Oberfläche, als auch tiefer im Material zusammenschweißen kann. Die Schweißtiefe lässt sich ändern, indem man die Lage des Fokus mit Hilfe des Linsenssystems justiert. Allerdings lässt sich das nicht beliebig genau einstellen, da die Rayleighlänge des Laserstrahls die Genauigkeit begrenzt. Sie ist abhängig von der Dicke der Faser und damit vom austretenden Strahlprofil. Eine detailliertere Beschreibung des Laserschweißens würde im Rahmen dieser Arbeit zu weit führen. Eine genauere Beschreibung findet man zum Beispiel in der Studienarbeit von T. Baier [2].

3.2.1. Parametertests

Für das Laserschweißen sind fünf verschiedene Parameter von Bedeutung. Zum einen lassen sich mit dem Bedienelement der Apparatur die Laserleistung und die Pulsdauer einstellen. Wir haben mit Leistungen von 50 W - 2 kW und mit Pulsdauern von 50 ms - 5 s gearbeitet. Ein weiterer veränderlicher Parameter ist die Position des Laserfokus. Zu Beginn haben wir im Fokus gearbeitet und anschließend mit einem Defokus von 7 mm, um eine größere Trefferfläche zu haben. Während der Arbeit mit dem Laser wurde klar, dass es auch einen Unterschied macht, ob der dünnere Draht auf dem dickeren Draht aufliegt, oder darunter klemmt. Ein weiterer Parameter ist die Anwendung des Schutzgases. Es hat im Ergebnis einen deutlichen Unterschied gemacht, ob wir mit oder ohne Gas gearbeitet haben. Allgemein kann man sagen, dass mit Gas eine wesentlich höhere Leistung notwendig war als ohne. Das liegt daran, dass beim Oxidationsvorgang Energie freigesetzt wird, die bei der Verwendung des Schutzgases fehlt. Alle Werte für die verwendeten Parameter sind in den Tabellen im Anhang A zu finden.

Bei den ersten fünf Versuchen haben wir im Fokus des Lasers gearbeitet und den dünnen Draht über den dicken Draht gelegt. Das Schutzgas war aus. Die dazugehörigen Werte stehen in Tabelle A.1 im Anhang. Bei 500 W und 1 s sind uns beide Drähte komplett durchgeglüht (vgl. Abbildung 3.8), woraufhin wir mit weniger Leistung und einer kürzeren Pulsdauer gearbeitet haben, bis bei 50 W und 0,1 s nichts mehr geschmolzen war. Dann haben wir die Leistung wieder auf 100 W erhöht und Pulsdauern von 0,2 s und 0,5 s eingestellt. Beides mal schmolz der dünne Draht weg, während sich am dicken Draht nichts verändert hatte.

Daraufhin haben wir den dünnen Draht unter den dicken Draht geklemmt unter Beibehaltung des Fokus und ohne Schutzgas. Bei 200 W und 0,4 s wurde der dünne Draht mit dem dicken zwar verschweißt (vgl. Abbildung 3.9), aber ein Stück des dicken Drahtes wurde komplett weg geschmolzen und der dünne Draht brach kurz nach der Schweißnaht. Weitere Versuche, den dicken Draht nicht wegzuschmelzen, sind fehlgeschlagen (vgl. Tabelle A.2 im Anhang).

Als Nächstes haben wir den Fokus verändert, sodass wir einen Defokus von 7 mm hatten. Den dünnen Draht haben wir wieder oben auf den dicken gelegt. Das Schutzgas war wie zuvor aus. Bei 250 W und 0,5 s ist nichts geschmolzen und bei 500 W und 1 s sind beide

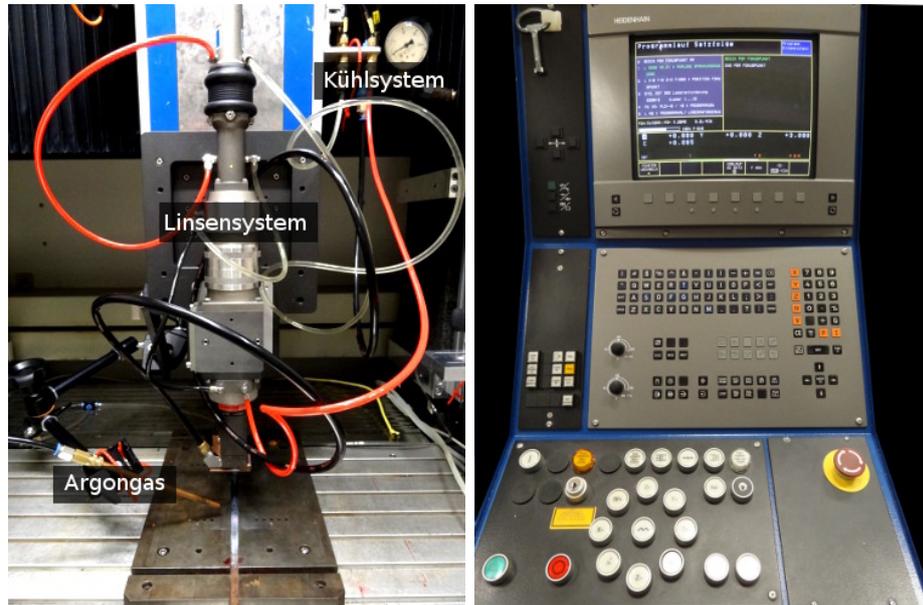


Abb. 3.7.: Laserschweißgerät von der Firma Trumpf; Links: Die Laserkammer: Durch die Schläuche läuft das Kühlwasser. In dem mittleren Bauteil sind die Kollimationslinse und die Fokussierlinse eingebaut. Von links unten wird das Schutzgas Argon durch ein dünnes Kupferrohr eingebracht. Rechts: Das Bedienelement.

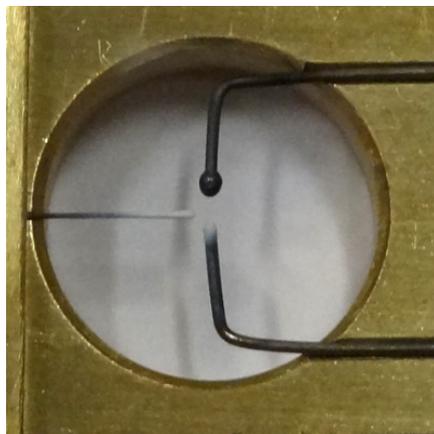


Abb. 3.8.: 1s bei 500 W im Fokus, dünner Draht unter dem Dicken.

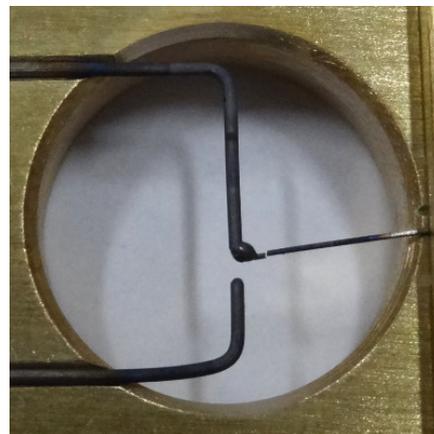


Abb. 3.9.: 0,4s bei 200 W im Fokus, dünner Draht unter dem Dicken.

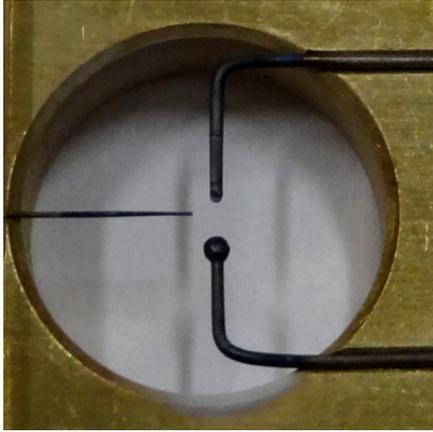


Abb. 3.10.: 1 s bei 500 W mit einem Defokus von 7 mm, dünner Draht auf dem Dicken.

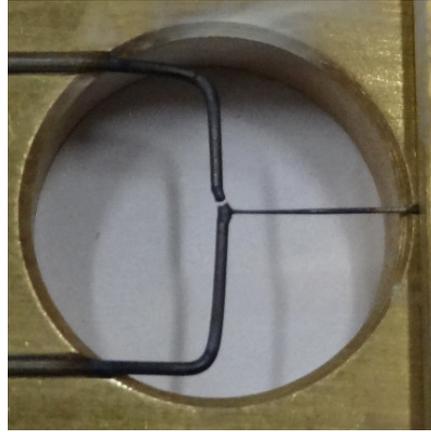


Abb. 3.11.: 2 s bei 200 W mit einem Defokus von 7 mm, dünner Draht auf dem Dicken.

Drähte geschmolzen, wobei sich an einem Ende des dicken Drahtes ein Schweißpunkt gebildet hat (vgl. Abbildung 3.10). Den ersten Erfolg hatten wir dann bei 200 W und 2 s. Die Drähte waren gut verschweißt (vgl. Abbildung 3.11), nur war der dicke Draht kurz hinter der Schweißnaht gebrochen, allerdings war er nicht komplett weg geschmolzen, wie in Abbildung 3.9. Auch bei den anderen Versuchen mit Leistungen von 100 W - 200 W und Pulsdauern von 2 s - 5 s brachen jedes mal die Drähte. Auch die Zuführung von Schutzgas brachte keinen Erfolg, wie die beiden ersten Versuche aus Tabelle A.4 im Anhang zeigen. Das Schutzgas führte sogar dazu, dass bis zu einer Leistung von 250 W gar nichts mehr geschah.

Da wir auf Grund der Oxidation, die zu einer Verfärbung der Drähte führte, nun Schutzgas verwenden wollten, sind wir dazu übergegangen mit mehr Leistung und kürzeren Pulsdauern zu arbeiten. Bei 800 W und 0,1 s ist der dünne Draht, der auf dem Dicken lag, komplett weg geschmolzen (vgl. Tabelle A.4 im Anhang), wohingegen am dicken Draht nichts passiert ist. Deswegen haben wir von da an den dünnen Draht nur noch unter den Dicken geklemmt. Bei 500 W und 0,1 s ist der dicke Draht nur leicht angeschmolzen (vgl. Tabelle A.5 im Anhang), aber bei 650 W und 0,1 s hatten wir unsere erste „perfekte“ Schweißnaht (siehe Abbildung 3.12). Das Ergebnis war allerdings nicht reproduzierbar.

Der nächste Ansatz war, wesentlich mehr Leistung bei einer minimalen Pulsdauer von 50 ms einzustellen. Bisher hatten wir für jeden Versuch einen neuen Drahtbügel und einen neuen dünnen Draht genommen. Da aber bei 1 kW und 50 ms nicht allzu viel passiert war, benutzten wir die gleichen Drähte ein zweites und dann sogar ein drittes Mal. Jedes Mal steigerten wir die Leistung um 0,5 kW (vgl. Tabelle A.6 im Anhang). Das Ergebnis war, dass sich zwei Schweißtropfen am dicken Draht jeweils rechts und links vom dünnen Draht bildeten, die den dünnen Draht fest klemmten. Abbildung 3.13 zeigt das Foto von diesem Versuch, wobei die Tropfen hier nicht erkennbar sind. Auch dieses Ergebnis war nicht reproduzierbar.

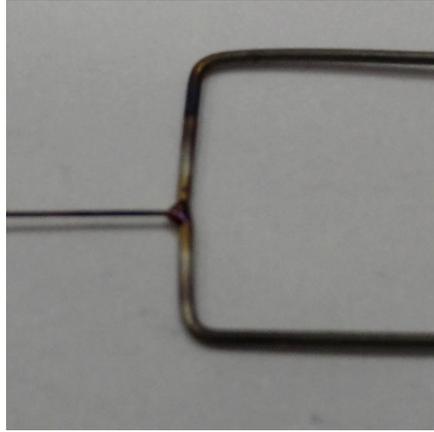


Abb. 3.12.: 0,1s bei 650 W mit einem Defokus von 7 mm, dünner Draht unter dem Dicken.

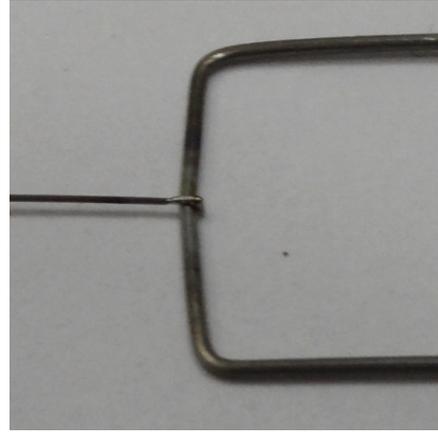


Abb. 3.13.: 50 ms bei 2000 W mit einem Defokus von 7 mm, dünner Draht unter dem Dicken.

Die nachfolgenden Versuche haben wir wieder alle im Fokus des Lasers und mit Schutzgas gemacht, da das Arbeiten im Defokus keine weiteren Vorteile gebracht hat. Zu Beginn haben wir weiterhin mit hoher Leistung und kurzer Pulsdauer gearbeitet (vgl. Tabelle A.7 im Anhang). Bei 1,5 kW und 50 ms brach der dicke Draht, allerdings wurde die Bruchstelle anschließend trotzdem zusammengeschweißt. Der dünne Draht war damit zwar am Dicken festgeschweißt, aber das Ergebnis war für uns nicht zufriedenstellend. Unser Ziel war es, dass der Draht nicht bricht, denn dadurch kam es zu Verschiebungen (vgl. Abbildung 3.14). Aber auch hier brachten weitere Versuche mit ähnlichen Leistungswerten keinen Erfolg.

Zuletzt haben wir es nochmal mit weniger Leistung und wesentlich längeren Pulsen probiert, wobei wir die anderen Parameter gleich wie zuvor gelassen haben (vgl. Tabelle A.8). Bei 50 W und 5 s konnte man am dicken Draht die Korngrenzen und eine Blauverfärbung der Drähte erkennen. Der dünne Draht ist an einer Stelle noch dünner geworden und es gab keine Verbindung zwischen dickem und dünnem Draht. Bei 100 W und 3 s war eine sehr feine Verbindung zwischen den Drähten, die aber nicht stabil genug war. Daraufhin haben wir die Parameter nur wenig verändert und bei 110 W und 3 s war die Schweißnaht zwar gut (vgl. Abbildung 3.15), aber der dicke Draht brach sofort beim Antippen auseinander.

3.2.2. Ergebnis des Laserschweißens

Wir haben viele verschiedene Kombinationen der Parameter getestet. Zu Beginn hatten wir Leistungen im Bereich von 50 W - 500 W mit Pulsdauern zwischen 0,1 s und 2,5 s. Dann haben wir die Leistung deutlich auf Werte zwischen 1 kW und 2,5 kW erhöht und mussten dazu Pulsdauern im Millisekundenbereich einstellen, damit die Drähte nicht durchschmelzen. Die Mindestpulsdauer betrug 50 ms. Anschließend haben wir wieder in

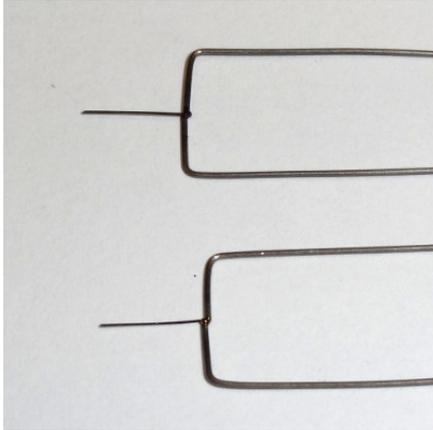


Abb. 3.14.: 0,1s bei 650 W mit einem Defokus von 7 mm, dünner Draht unter dem Dicken.

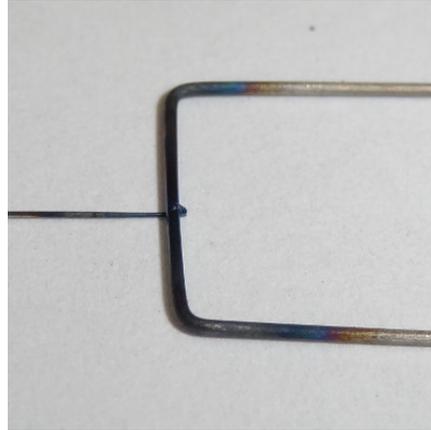


Abb. 3.15.: 50 ms bei 2000 W mit einem Defokus von 7 mm, dünner Draht unter dem Dicken.

einem niedrigeren Leistungsbereich von ca. 100 W gearbeitet, wobei wir die Pulsdauern deutlich erhöht haben, auf bis zu 5 s.

Es ist uns nicht gelungen Parameter zu finden, mit denen man zwei Wolframdrähte der Dicke $440\ \mu\text{m}$ und $175\ \mu\text{m}$ zufriedenstellend und vor allem zuverlässig laserschweißen kann. Eine Möglichkeit wäre zu testen, ob sich Drähte mit gleicher Dicke zusammenschweißen lassen. Wenn das funktionieren würde, könnte man eine Hülse über den dünneren Draht ziehen, damit die Drähte an der Schweißstelle gleich dick sind.

Eine weitere Idee wäre das Verschweißen der Drähte mit Hilfe von Wolframpulver, ähnlich wie beim Löten der Lötzinn. Allerdings kann man das Pulver nicht einfach auf die Schweißstelle geben. Dazu bräuchte man eine Art Bindematerial, um das Pulver an der gewünschten Stelle zu fixieren.

3.3. Ätzen der Spitze

Um aus dem dünnen Wolframdraht eine Wolframspitze herzustellen, wurde das elektrochemische Ätzverfahren nach W. Chang et al. [6] angewandt. Es ist ein neues und einfaches Verfahren, um Wolframspitzen herzustellen. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass sowohl die Länge der Spitze als auch die Oberflächenbeschaffenheit nach Bedarf angepasst werden kann.

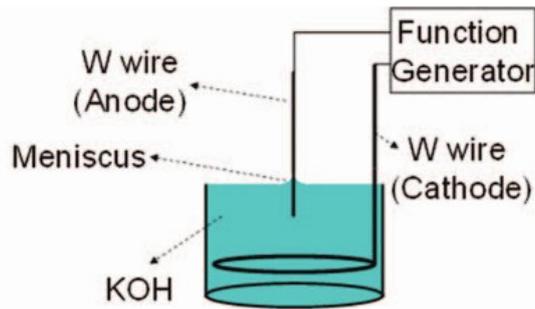


Abb. 3.16.: Schematischer Aufbau der Ätzvorrichtung, aus [6].

Abbildung 3.16 zeigt den schematischen Aufbau der Ätzvorrichtung. Als Elektrolytlösung dient eine hochkonzentrierte Kaliumhydroxidlösung (KOH; 10 mol pro l). Eine Wolframdrahtschleife, die im Becherglas mit der Lösung befestigt wird, ist die Kathode. Der dünne Wolframdraht dient als Anode und wird mit Hilfe einer speziell angefertigten Halterung in die Lösung getaucht.

In Zusammenarbeit mit einem Doktoranden aus der Arbeitsgruppe von Andreas Günther an der Universität Tübingen², der sich mit dem Ätzen von Wolframspitzen beschäftigt hat, wurden die zuvor gepunkteten Drähte geätzt. Im nachfolgenden Text wird der genaue Ablauf des Ätzzvorgangs beschrieben. Die genauen Werte für die jeweilige Spannung und die Pulsdauer zu den unterschiedlichen Drahtdicken befinden sich in Tabelle A.9 und A.10 im Anhang A.

Bevor man den eigentlichen Ätzzvorgang beginnt, müssen die Spitzen mit Aceton und Isopropanol gereinigt und mit Druckluft getrocknet werden. Anschließend wird der Wolframbügel mit dem gepunkteten dünnen Wolframdraht in der Halterung des Ätzgeräts so befestigt, dass man die Spitze senkrecht einige Millimeter in die Kaliumhydroxidlösung eintauchen kann. Beim Eintauchen bildet sich ein konkaver Meniskus am Draht (vgl. Abbildung 3.16) auf Grund der Oberflächenspannung der Lösung. Dieser Meniskus ist dafür verantwortlich, dass sich eine Verengung beim Ätzen ausbildet, aus der dann die wenige nm-dicke Spitze entsteht. Die ausführliche Beschreibung des chemischen Ätzens findet man in [22], [29]. Der Ätzzvorgang besteht aus insgesamt fünf Schritten, deren Durchführung nachfolgend beschrieben wird.

Im ersten Schritt wird der dünne Draht komplett in die Kaliumhydroxidlösung eingetaucht und mit Hilfe eines negativen Potentials, bezogen auf die Ringelektrode, für 5 s bei -6 V gereinigt. Die Reinigung erfolgt durch eine starke Blasenbildung, die mögliche Schmutzpartikel vom Draht entfernt [29]. Anschließend wird die Polarität geändert, also positive Spannung angelegt und die Spitze wird für 2 s bei +6 V vorgeätzt. Dieses Vorätzen führt zu einer glatteren Oberfläche und sorgt dafür, dass der folgende Ätzzvorgang gleichmäßiger verläuft. Die Drahtdicke spielt hierbei keine Rolle. Das bedeutet, dass die gleichen Werte sowohl für den 100 μm -dicken, als auch für den 175 μm -dicken Draht gelten.

Bevor man zum dritten Schritt übergehen kann holt man die Spitze aus der Lösung heraus und entfernt durch vorsichtiges Pusten übriggebliebene Blasen von der Oberfläche der Lösung. Dann taucht man den Draht zwischen 1 mm und 2,5 mm tief in die Lösung. Im dritten Schritt wird eine positive Gleichspannung von +6 V für einige Sekunden angelegt, diese Phase nennt man die DC-Phase. Je nachdem, wie lang sie dauert, ändert sich die Länge der Spitze – je länger die Phase, umso kürzer die Spitze. Das liegt daran,

²Markus Stecker

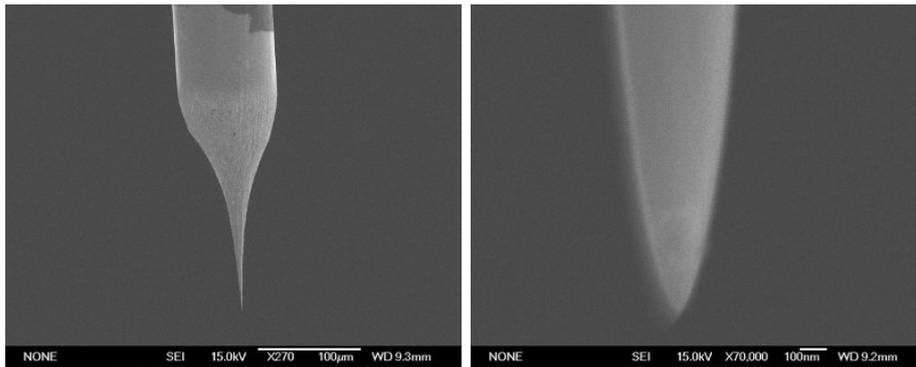


Abb. 3.17.: Links: Spitze 4 mit einer Spitzenlänge von ca. $100\ \mu\text{m}$; Rechts: Spitze 4 mit einer stärkeren Vergrößerung; Die Breite der Spitze beträgt einige Nanometer.

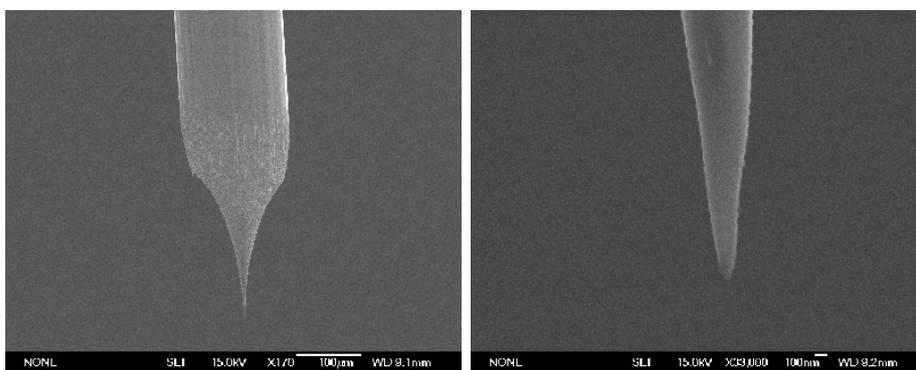


Abb. 3.18.: Links: Spitze B1 mit einer Spitzenlänge von ca. $200\ \mu\text{m}$; Rechts: Spitze B1 mit einer stärkeren Vergrößerung; Die Breite der Spitze beträgt einige Nanometer.

dass die Verengung ausgeprägter wird, je länger die DC-Phase dauert. Wir haben für beide Drahtdicken eine Spannung von $+6\ \text{V}$. Die Zeiten für den $100\ \mu\text{m}$ -dicken Draht variierten zwischen $10\ \text{s}$ und $22\ \text{s}$. Die Spitzen hatten Längen zwischen ca. $250\ \mu\text{m}$ und ca. $100\ \mu\text{m}$ (vgl. Abbildung 3.17). Für den $175\ \mu\text{m}$ -dicken Draht wurden DC-Phasen mit einer Dauer von $30\ \text{s}$ bzw. $40\ \text{s}$ verwendet. Die Länge der Spitzen betrug dabei ca. $200\ \mu\text{m}$ bzw. ca. $120\ \mu\text{m}$ (vgl. Abbildung 3.18).

Im vierten Schritt werden schnelle Pulse mit einer Spannung von $+6\ \text{V}$ gegeben. Schnell bedeutet hier, dass die Spannung für $1\ \text{ms}$ an und für $100\ \text{ms}$ aus ist. Diese Pulssequenz bewirkt, dass der eingetauchte Draht, insbesondere die Verengung, gleichmäßig dünner wird. Die Dauer dieser Phase benötigt ein wenig Erfahrung mit dem Ätzen, weil es keine vorgegebenen Zeiten gibt. Man stoppt sie, wenn man mit dem Mikroskop nur noch eine hauchdünne Verengung erkennen kann. Der Durchmesser der Verengung sollte ungefähr $10\ \mu\text{m}$ dick sein [6]. Es ist allerdings auch kein Problem, wenn der Durchmesser mehr als $10\ \mu\text{m}$ beträgt. Man muss dann lediglich die fünfte Phase verlängern. Wichtig ist, dass die Spitze nicht in dieser Phase abfällt, weil dies dazu führen würde, dass sie kürzer und stumpfer wird.



Abb. 3.19.: Stoßisolierung der Ätzapparatur mit Sand, Sorbothan und optischem Tisch.

In der fünften und letzten Phase werden nun langsamere Pulse gegeben. Langsamer bedeutet hier, dass die Spannung für 1 ms an und für 1000 ms aus ist. Die Aus-Zeit ist speziell so lange gewählt, dass die menschliche Reaktionszeit ausreichend ist, um die Pulse sofort nach dem Abfallen des restlichen Drahtes ausschalten zu können. Durch diese Pulse wird somit der untere Teil des Drahtes komplett abgetrennt und übrig bleibt eine Spitze, die aus der anfänglichen Verengung entstanden ist. Die angelegte Spannung wurde hier zwischen +3 V, 4 V und 6 V variiert, wobei ersteres am geeignetsten erschien. Bei der Phase mit +4 V löste sich der untere Teil nicht komplett von der Spitze und bei +6 V bildete sich eine Verdickung am Ende der Spitze (vgl. Abbildungen B.1-B.3 im Anhang).

Zum Schluss taucht man die ganze Spitze noch in destilliertes Wasser, damit die Reste der Lauge abgespült werden.

Während des gesamten Ätzvorgangs ist es wichtig, dass es an der Apparatur keine Vibrationen gibt. Deswegen wurde die Halterung auf einen massiven Messingblock geschraubt, der wiederum in einer mit Sand gefüllten Box liegt [29]. Diese Box steht, isoliert durch stoßabsorbierendes Sorbothan, auf einem luftgedämpften optischen Tisch (vgl. Abbildung 3.19). Die fertig geätzten Spitzen sind äußerst empfindlich und dürfen auf keinen Fall berührt werden, oder mit einem Gegenstand in Kontakt kommen. Um sie optimal zu schützen wurden sie auf dünne Schaumstoffunterlagen gesteckt, die wiederum in einer mit Aluminiumfolie umwickelten Pappschachtel liegen.

3.4. Zentrierung der Spitze

Da die ersten Spitzen, wie in Unterkapitel 3.1 erklärt wurde, noch nicht mit der neuen Schweißhalterung (vgl. Abbildung 3.4) gepunktet wurden, sitzen die dünnen Drähte

nicht mittig und auch nicht waagrecht auf dem Haltebügel. Damit die Elektronen trotzdem ungehindert durch das Loch im Anodenzyylinder gelangen können, kann man die Spitze mit Hilfe von drei seitlich angebrachten Schrauben im Anodenzyylinder zentrieren. Dazu wurde ein Makorspitzenhalter mit passenden Vertiefungen konstruiert (vgl. Abbildung 3.3), den man mit den Schrauben bewegen kann. Das bedeutet, dass man mit den Schrauben die Position des Makorhalters und damit die Position des Haltebügels und der Spitze verändern kann. Um zu überprüfen, ob die Spitze zentral im Anodenzyylinder sitzt wurde eine geeignete Konstruktion konzipiert. Mit ihr lassen sich nicht nur die alten Spitzen, sondern auch die neuen, die mit der Schweißhalterung gepunktet wurden, auf ihre Position hin kontrollieren.

Abbildung 3.20 zeigt ein Foto der Konstruktion. Sie besteht im Wesentlichen aus einem Cagesystem mit einer Linse, wie es auch bei Optikexperimenten im Labor verwendet wird. Auf der linken Seite wurde der Anodenzyylinder eingeklemmt und in der Mitte der Konstruktion sitzt die Linse. Rechts, außerhalb des Bildes, ist eine LED befestigt. Die Linse muss so platziert werden, dass sie die Lichtstrahlen der LED auf das Loch in der Vorderseite des Anodenzyinders fokussiert. Dadurch entsteht ein dünner zentrierter Lichtstrahl im Inneren des Zylinders. Durch die Löcher in der Seitenwand des Zylinders kann man erkennen, ob die Spitze im Lichtstrahl leuchtet und damit mittig sitzt. Wenn dies nicht der Fall ist, kann man die Position der Spitze mit den Schrauben neu einstellen.

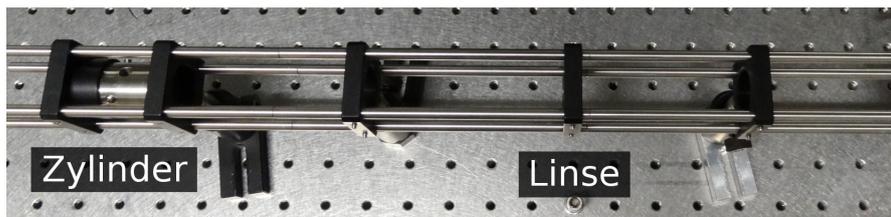


Abb. 3.20.: Cagesystem zur Überprüfung der Position der Wolframspitze im Anodenzyylinder.

4. Der Detektor

Der Detektor hat die Aufgabe, die ankommenden Elektronen – und damit die Interferenz – sichtbar zu machen. Er besteht im Wesentlichen aus zwei verschiedenen Komponenten: Zum einen aus zwei Mikrokanalplatten, die die Anzahl der Elektronen vervielfachen und zum anderen aus dem Phosphorschirm, der beim Auftreffen der Elektronen leuchtet (Kapitel 4.1). Die MCPs werden von einer selbst konstruierten Halterung wie in einem Sandwich zusammengedrückt, wobei der Phosphorschirm auf der Rückseite der Halterung befestigt werden kann (Kapitel 4.2). Die Halterung ist so konzipiert, dass die Mittelachsen der Komponenten auf der selben Höhe liegen, wie die der Bauteile auf der optischen Bank.

4.1. Die MCPs und der Phosphorschirm

Für die Detektion der Elektronen wurden zwei Mikrokanalplatten¹ oder auch sogenannte Vielkanalplatten, kurz MCPs (aus dem Englischen: Multi-Channel-Plates oder Micro-Channel-Plates) und ein Phosphorschirm² gekauft.

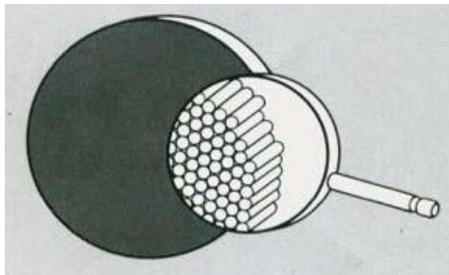


Abb. 4.1.: Innerer Aufbau einer MCP aus [30].

MCPs sind meist runde, manchmal auch eckige Platten, die aus vielen kleinen hexagonal angeordneten dünnen Glasröhrchen, den sogenannten Elektronenvervielfacher-Kanälen bestehen [30]. Abbildung 4.1 zeigt diese innere Struktur einer MCP. Die Platten sind rund und haben laut der Firma Tectra [14] einen Außendurchmesser von $50 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ und eine Dicke von $0,5 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$. Dabei haben die Kanäle einen Durchmesser von $21 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ und sind um $6^\circ \pm 1^\circ$ zur Normalen der Oberfläche der Platte geneigt.

Trifft nun ein Elektron die Wand eines Kanals, so löst es Sekundärelektronen aus. Diese werden durch die angelegte Spannung beschleunigt, treffen erneut auf die Wand und lösen somit weitere Elektronen aus. Dieser Lawineneffekt sorgt dafür, dass am Ende ein starkes Signal entsteht, welches man mit Hilfe eines Phosphorschirms sichtbar machen kann. Beim Zusammenlegen der MCPs muss man darauf achten, dass sie im richtigen Winkel zueinander liegen. Dazu hält man beide MCPs gegen das Licht und dreht sie so

¹Modell "MCP-050-d-40-21" von der Firma Tectra GmbH, Frankfurt/Main

²Modell "PHOS-UP22GL-C7x7-R1500 (UHV)" von der Firma Tectra GmbH, Frankfurt/Main

lange, bis man hindurch sehen kann. Diese Richtung muss man sich merken und dann die erste MCP ohne sie zu drehen vorsichtig ablegen. Dann dreht man die zweite MCP um 180° im Uhrzeigersinn und legt sie ebenfalls ab. Später beim Zusammenbauen des Detektors legt man dann zwischen die richtig gedrehten MCPs einen Metallkontaktring.

Der hier verwendete Phosphorschirm ist für ein Ultrahochvakuum von $1 \cdot 10^{-8}$ torr und mehr ausgelegt, was für unser Experiment mehr als ausreichend ist. Er besteht laut der Firma Tectra [14] aus einer $50 \mu\text{m}$ bis $70 \mu\text{m}$ dicken Phosphorschicht, die auf einer leitenden Glasplatte mit einem Durchmesser von 1,5 inch (38,1 mm) und einer Dicke von 0,03 inch (0,762 mm) aufgedampft wurde. Die Glasplatte ist zwischen zwei quadratische C7x7 Edelstahlplatten³ mit einer Kantenlänge von 2 inch (50,8 mm) eingepasst, welche dann an die selbst konstruierte MCP-Halterung geschraubt werden können. Geliefert wird der Phosphorschirm sicher verpackt und zusätzlich geschützt durch eine von vorne fest angeschraubte Metallplatte. Sie soll die empfindliche Phosphorschicht vor Kratzern schützen. Bevor man also den Phosphorschirm an die Halterung schrauben kann, muss man sowohl die Schutzplatte als auch alle Schrauben, die den Schirm festhalten entfernen. Dann kann man den ganzen Schirm mit Keramikschauben und jeweils zwei Keramikbeilagscheiben als Abstandshalter an die MCP-Halterung schrauben, siehe auch Abbildung 4.3.

Achtung: Nicht die beiden Edelstahlplatten, die den eigentlichen Schirm halten entfernen, sonst rutscht er aus seiner Einpassung und geht kaputt. Der Phosphorschirm ist sehr empfindlich und darf auf der beschichteten Seite auf keinen Fall berührt werden.

4.2. Die Halterung für die MCPs und den Phosphorschirm

Die von D. Neubauer in [25] geplante und vorkonstruierte Halterung für die MCPs und den Phosphorschirm wurde komplett überarbeitet und neu konstruiert. Die Grundidee für die neue Halterung war nun das "Sandwich-Prinzip". Hierfür wurden 2 Titanplatten mit einem Durchmesser von 44 mm konstruiert, die die inneren Teile einschließen und mit Hilfe von drei M4x16 Titanschrauben zusammendrücken sollen.

Im Inneren der Titanplatten liegen von vorne nach hinten gesehen folgende Teile (vgl. Abbildungen 4.2, 4.3).

Der erste Ring ist ein Makorring, der dazu vorgesehen ist, den nachfolgenden ersten Metallring abzuschirmen und in einem Abstand von 3 mm zur vorderen Titanplatte zu halten. Dieser erste Metallring selbst ist nur 0,5 mm dick und hat eine Anschlusslasche, damit die Vorderseite der ersten MCP, die nach ihm anliegt, auf Erdpotential gelegt werden kann. Zwischen der ersten MCP und der zweiten MCP sorgt ein weiterer Metallring mit einer Dicke von 0,5 mm, ohne Anschlusslasche, für einen kleinen Abstand zwischen den MCPs. Nach der zweiten MCP kommt der dritte Metallring, wieder mit einer Dicke von 0,5 mm und mit einer Anschlusslasche, um die Rückseite der zweiten

³C7x7: 7 Löcher an jeder Kante



Abb. 4.2.: MCP-Halterung ohne Phosphorschirm; Computer 3D-Zeichnung.

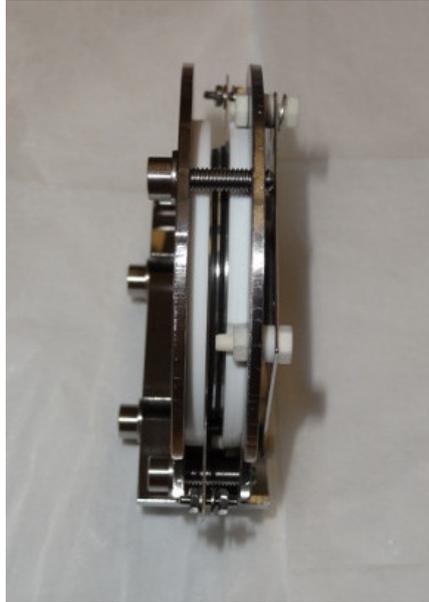


Abb. 4.3.: Aufbau des MCP-Sandwichs mit angeschraubtem Phosphorschirm.

MCP auf bis zu +2,5kV zu legen. Diese Anordnung der zwei MCPs garantiert einen gleichmäßigen Spannungsabfall. Nach dem dritten Metallring kommt wieder ein Makorring, der die gleiche Funktion hat wie der erste, nämlich die Abschirmung des dritten Metallrings. Dieser Makorring hat, anders als der erste, vier Aussparungen im Material. Sie wurden ausgefräst, damit die Schrauben und die Muttern, die den Phosphorschirm halten, ausreichend Platz haben.

Der Phosphorschirm wird mit Hilfe von vier M3x10 Keramikschrauben und Keramikmuttern an die hintere Titanplatte geschraubt, siehe Abbildung 4.3. Hierfür wurden extra vier auf die C7x7 Edelstahlplatte angepasste Löcher durch die Titanplatte gebohrt. Die Keramikschrauben⁴ sind wichtig, damit der Phosphorschirm, der auf ca. +7kV liegt, nicht leitend mit den restlichen Bauteilen verbunden ist. Zudem wurden zwischen dem Phosphorschirm und der Titanplatte noch jeweils zwei Beilagscheiben als Abstandhalter eingebaut. In Abbildung 4.3 kann man an der oberen Keramikschraube noch eine Edelstahlbeilagscheibe erkennen. Sie ist dazu da, dass man am Schirm eine Spannung anlegen kann. Für das Zusammenbauen empfiehlt es sich, zuerst den Phosphorschirm mit den Beilagscheiben an die hintere Titanplatte zu schrauben und dann die einzelnen Bauteile daraufzuschichten.

Um dieses ganze Bauteil mit Phosphorschirm hinter dem μ -Metallrohr befestigen zu können, wurde eine Backe konstruiert, wie sie in Abbildung 4.4 zu sehen ist. Sie ist außen abgerundet, sodass sie in dem CF100 Vakuumrohr⁵ so zum liegen kommt, dass die MCPs

⁴Alumina Screws "AS-M3x10" von der Firma tectra GmbH, Frankfurt/Main

⁵Modell "SC100-304" von der Firma Vacom GmbH, Jena

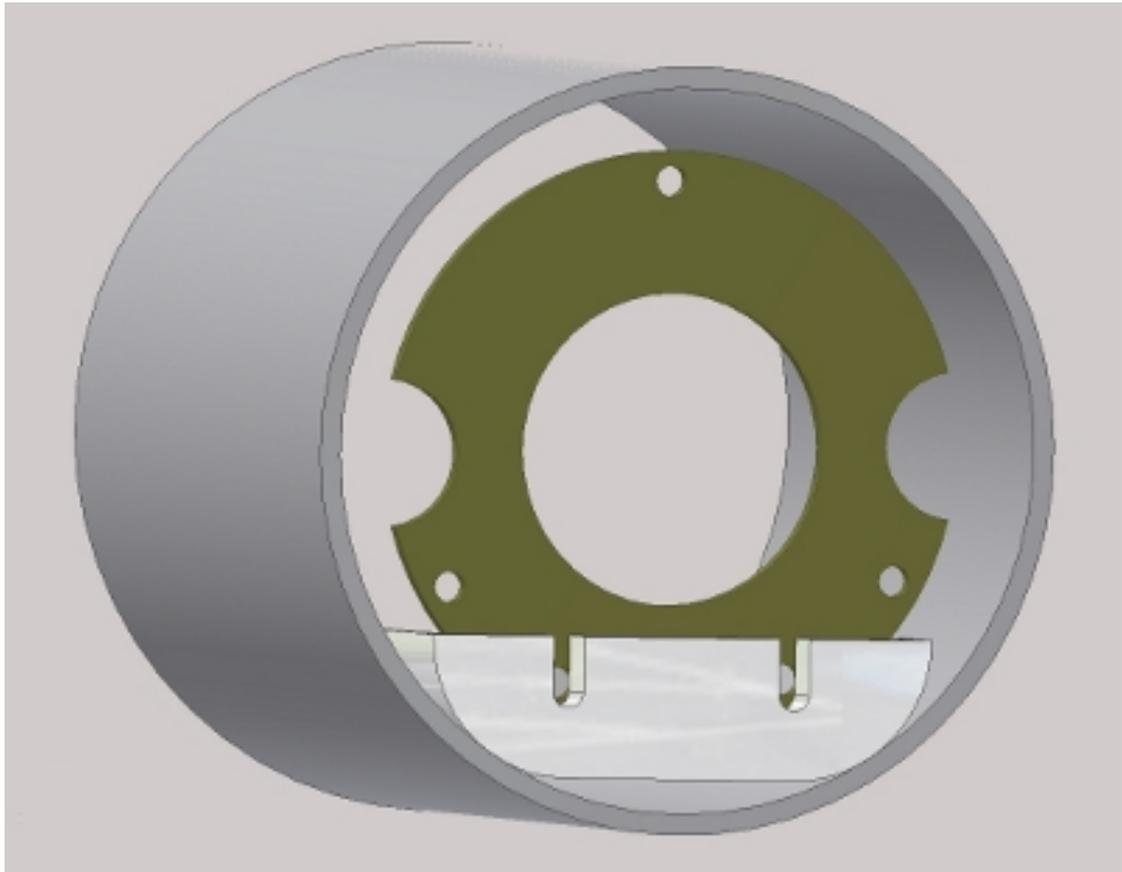


Abb. 4.4.: Backe im CF100-Rohr; Computer 3D-Zeichnung.

und der Phosphorschirm zentriert in dem Rohr liegen. Die Backe wird an der vorderen Titanplatte, die zwei dafür vorgesehene Schlitze hat, mit zwei M4x10 Titanschrauben befestigt.

5. Die Vakuumkammer

Das Herzstück der Vakuumkammer ist ein CF100 6-Wege-Kreuz¹, wie es in Abbildung 5.1 zu sehen ist. An einem waagrechten Flansch ist ein CF100 Zwischenstück² mit einer Länge von 270 mm angeflanscht, damit das μ -Metallrohr³ und der Detektor entsprechend Platz in der Kammer haben. Am anderen Ende des Zwischenstücks befindet sich ein CF100 Fenster, durch das man das Interferenzbild beobachten kann. Um die einzelnen Bauteile an die Netzteile anschließen zu können, wurde hinten am 6-Wege-Kreuz ein Reduzierstück CF100/40⁴ angeflanscht und mit Durchführungen für bis zu 5 kV versehen. Für weitere Durchführungen wurde ein 3-fach Reduzierstück⁵ gekauft, das man dann anstatt dem einfachen Reduzierstück anflanschen kann. Für die Hochspannungskabel wurde auf der rechten Seite ein weiteres Reduzierstück CF100/40 mit Kupferdurchführungen für Hochspannung angeflanscht. Auf der linken Seite und unten wurde die Kammer mit einem Blindflansch verschlossen. Man könnte seitlich auch noch ein Fenster anbringen, damit man in das Innere der Kammer sehen kann. Für die untere Seite ist eine kleine Ionenpumpe geplant, die allerdings bis zum Abschluss dieser Arbeit noch nicht bestellt wurde. Die Turbopumpe, die ein Vakuum von bis zu 10^{-9} mbar erzeugen kann, wurde über ein Eckventil⁶ oben angeflanscht. Mit diesem Eckventil kann man die Kammer später verschließen, um die Pumpe abzuschalten. Die gesamte Vakuumkammer wurde auf einer extra angefertigten Laborplatte mit vier Tragegriffen⁷ mit Hilfe von zwei höhenverstellbaren Aluminiumhaltern, wie sie in [25] konstruiert wurden, festgeschraubt. Die Griffe ermöglichen zwei Personen den Transport der gesamten Vakuumkammer ohne Pumpensystem.

5.1. Das Pumpensystem

Um die Vakuumkammer auszupumpen benötigt man zwei verschiedene Pumpen, eine Vorpumpe und eine Turbopumpe. Die Vorpumpe muss in der Kammer einen Druck von ungefähr 4 mbar erzeugen, damit die Turbopumpe arbeiten kann. Schaltet man die

¹6-Way Cross „DN100CF“ von der Firma Kurt J. Lesker Company

²Modell „SC100-304“ von der Firma Vacom GmbH, Jena

³ μ -Metallrohr von der Firma Meca Magnetic (Frankreich), Dicke 2 mm, Innendurchmesser 50 mm, Länge 300 mm

⁴CF-Reduzierflansch, DN100/40 von der Firma Vacom GmbH, Jena

⁵CF-Cluster-Flansch, DN100/40, „CF3P-304“ von der Firma Vacom GmbH, Jena

⁶UHV-Eckventil „4AVM-40CF-MC-S“ von der Firma Vacom GmbH, Jena

⁷Bügelgriffe „06916-120061“ von der Firma norelem Normelemente KG, Markgröningen

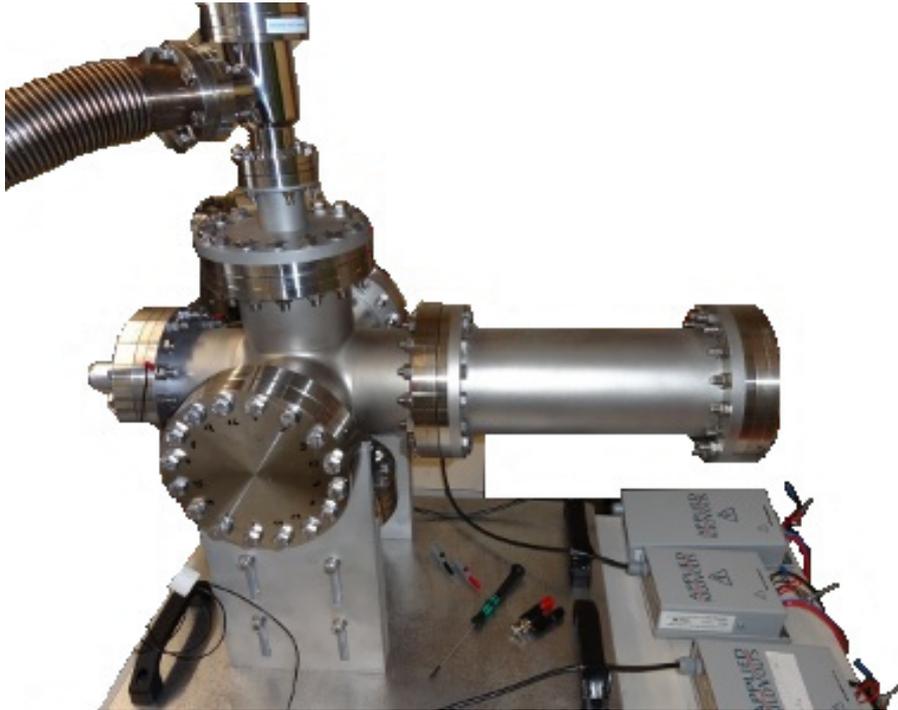


Abb. 5.1.: Vakuumpumpe mit CF-Zwischenstück (rechts) und Eckventil (oben)

Turbopumpe ein bevor dieser Druck erreicht ist besteht die Gefahr, dass die Turbopumpe zerstört wird.

Als Vorpumpe wurde eine Membranpumpe⁸ von der Firma Pfeiffer Vacuum verwendet. Eine solche Pumpe erzeugt ein trockenes und ölfreies Vakuum mit dem geeigneten Druck für die Turbopumpe.

Die Turbopumpe⁹ ist eine kleine, aber sehr leistungsstarke Pumpe und bringt schon eine integrierte Antriebselektronik mit. Sie kann einen Enddruck von 10^{-7} mbar und kleiner erzeugen und wird mit Hilfe einer Kontrolleinheit¹⁰ gesteuert. Die Kontrolleinheit dient der Spannungsversorgung und der Bedienung aller Parameter der Antriebselektronik der Turbopumpe. Die für uns wichtigste Anzeige auf dem Display der Kontrolleinheit ist die Anzeige Nummer 340. Sie zeigt den aktuellen Druck in der Vakuumpumpe an. Mit dem rechten Druckknopf schaltet man die Turbopumpe an und aus und mit den Pfeiltasten kann man zwischen den verschiedenen Menüeinstellungen hin- und herspringen.

Die Drücke, die wir mit diesem Pumpensystem erreichen konnten, lagen in einem Bereich von 10^{-7} - 10^{-8} mbar. Um ein besseres Vakuum, d.h. ein Vakuum mit einem Druck von ca. 10^{-9} mbar zu erreichen, kann man die Kammer noch zusätzlich ausheizen.

⁸Modell "MVP 040-2" von der Firma Pfeiffer Vacuum, Asslar

⁹Modell "HiPace 80" mit TC110, von der Firma Pfeiffer Vacuum, Asslar

¹⁰Modell "DCU110" Display Controlle Unit mit Netzteil, von der Firma Pfeiffer Vacuum

5.2. Das Ausheizen der Vakuumkammer

Wie bereits erwähnt, kann man ein Vakuum verbessern, indem man die Kammer ausheizt. Das bedeutet, dass man die gesamte Kammer mit Heizbändern umwickelt. Da die Heizbänder aus Glasfaser bestehen, sollte man die Kammer zuvor mit einer Schicht Aluminiumfolie einpacken. Anschließend muss die gesamte Kammer mit den Heizbändern eingewickelt werden und zwar so, dass auch die Flansche seitlich erwärmt werden können. Um die Wärmeabstrahlung möglichst zu minimieren, werden zum Schluss zwei Schichten dicker Aluminiumfolie um die Kammer gewickelt. Die Temperatur kann man mit Temperatursensoren, die rund um die Kammer angebracht werden, kontrollieren. Dabei ist es wichtig, dass die Kammer nicht zu schnell heiß wird und auch nicht zu schnell abkühlt, da sonst das Glas platzen würde. Das bedeutet, dass man die Temperatur langsam über mehrere Stunden hoch- bzw. herunterregeln muss. Insgesamt sollte die Kammer mehrere Tage bei ca. 160°C ausgeheizt werden. Das Vakuum wird während des Ausheizvorgangs schlechter und verbessert sich erst wieder, nachdem die Kammer abgekühlt ist.

5.3. Die Hochspannungsdurchführungen

Die Kammer besitzt zwei unterschiedliche Systeme zur Durchführung. Das eine besteht aus vier dicken Kupferdrähten, die durch ein Reduzierstück mit dem Inneren der Kammer verbunden sind. An diese Kupferdrähte kann man die Kaptonkabel der MCPs und des Phosphorschirms anlegen, denn sie sind für Spannungen von bis zu 10 kV geeignet. Für die Verbindung der Drähte im Vakuum mit den Kaptonkabeln wurden sog. Inline Barrel Connectors¹¹ benutzt. Diese wurden speziell für die Anwendung im Vakuum entwickelt. Auf der Atmosphärenseite wurden die Kabel mit einzelnen Lüsterklemmen an den Kupferdrähten befestigt.

Das andere System zur Durchführung ist ein Stecksystem von der Firma Vacom. Es besteht aus zwei Steckern, den Plugs und einem Durchführungsstück¹², das an ein Reduzierstück geflanscht wird (vgl. Abbildung 5.2). Alle drei Teile sind für Spannungen von bis zu 5 kV geeignet. Einer der Plugs ist für die Vakuumseite¹³ und der andere für die Atmosphärenseite¹⁴. Beide sind in Abbildung 5.3 zu sehen. Im oberen Bild ist der Vakuumplug zu sehen. Er wurde über Kaptondrähte mit den Bauteilen auf der optischen Bank verbunden. Das mittlere Bild zeigt den Atmosphärenplug. Er ist an Kupferdrähte angeschlossen, die zum Schutz mit einem Schrumpfschlauch überzogen wurden. Im Inneren beider Stecker befinden sich Crimpkontakte¹⁵ (vgl. Abbildung 5.3 unten), mit denen man die jeweiligen Kabel crimpen und anschließend in die dafür vorgesehenen Löcher stecken kann.

¹¹Be/Cu Inline Barrel Connectors von der Firma Kurt J. Lesker Company

¹²Multipin feedthroughs „SFT12C“ von der Firma Vacom GmbH, Jena

¹³Plug „VC12I“ von der Firma Vacom GmbH, Jena

¹⁴Plug „VC12E“ von der Firma Vacom GmbH, Jena

¹⁵Buchsen-Steckkontakte „300152“ von der Firma Vacom GmbH, Jena



Abb. 5.2.: Flansch mit eingebautem Plugverbindungsstück



Abb. 5.3.: Oben: Plug für die Vakuumseite mit Elektronenquelle und Ablenkelement auf der optischen Bank; Mitte: Atmosphärenplug; Unten: Crimpkontakt mit Kaptondrahtstück

6. Experimentelle Vorbereitungen

Bevor man die einzelnen Bauteile auf der optischen Bank und die MCP-Halterung mit Phosphorschirm zusammenbauen und in die Vakuumkammer legen kann, muss man noch einige Schritte durchführen. Dazu zählt unter anderem die Vakuumreinigung jedes Elements, von der Beilagscheibe bis zur Haltebacke. Des Weiteren muss man die Einzelteile zusammenschrauben und auf der optischen Bank befestigen. Zum Schluss müssen die Bauteile verdrahtet und die Netzteile für die Spannungsversorgung vorbereitet werden.

6.1. Vakuumreinigung

Wie oben erwähnt müssen alle Teile, die in die Vakuumkammer eingebaut werden sollen, zuvor speziell gereinigt werden. Dazu zählen nicht nur die größeren Bauteile sondern auch die Schrauben, Muttern und Beilagscheiben, mit denen man die Bauteile befestigt.

Im Folgenden wird der gesamte Reinigungsprozess beschrieben. Die Teile, die bisher gereinigt wurden, beschränken sich hierbei auf ein Ablenkelement, die Elektronenquelle mit dem Makor-Spitzenhalter, die MCP-Halterung mit der Haltebacke, die Backen für das μ -Metallrohr und die Backen für die Optische Bank sowie alle zugehörigen Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben. Die beiden Keramikstäbe und das μ -Metallrohr wurden nur mit Aceton abgespült und mit Ethanol gereinigt.

Zubehör, das man zum Reinigen benötigt:

- Ethanol und Kimwipes¹ zum Vorreinigen
- Aceton und ein Acetonabfallkanister für die Hauptreinigung
- Isopropanol zum Endreinigen
- mit Ethanol gereinigte Pinzetten
- neue saubere Aluminiumfolie
- saubere Bechergläser
- Untersuchungshandschuhe

¹Kimwipes sind fusselfreie Spezialputztücher von der Firma Kimtech Science

Bevor man mit der gesamten Reinigung anfangen kann, sollte man einige Dinge bereitstellen. Dazu gehört, dass man Aluminiumfolie in großen Stücken bereit legt, Aceton in ein passendes Becherglas füllt, das Ultraschallbad mit Wasser befüllt und die Isopropanolflasche bereitstellt. Beim Befüllen des Becherglases mit Aceton ist darauf zu achten, dass man den Acetonstand in etwa so wählt, dass alle Teile später bedeckt sind. Im Ultraschallbad sollte der Wasserpegel dann ungefähr genauso hoch aufgefüllt werden, wie der Acetonpegel im Becherglas. Das Becherglas muss im Ultraschallbad mit einer Aluminiumfolie abgedeckt werden, um zu verhindern, dass Schmutzpartikel hineinfallen.

Anschließend zieht man sich die Handschuhe an und beginnt damit, die Bauteile mit Ethanol auf den Kimwipes vorzureinigen. Hierbei sollte man darauf achten, dass man sich nicht an Metallschnittkanten verletzt. Wenn man keine Verschmutzung der Oberfläche mit dem bloßen Auge mehr erkennen kann, legt man die Teile vorsichtig in die dafür vorbereiteten Bechergläser mit Aceton und deckt diese mit dem Aluminiumdeckel ab. Dann stellt man die Gläser in das Wasser im Ultraschallbad. Der Wasserstand sollte, wie schon erwähnt, ungefähr so hoch sein, wie das Aceton im Becherglas. In das Ultraschallbad passen ca. zwei Bechergläser, je nach Größe der Becher. Außen am Ultraschallbad lassen sich die gewünschte Temperatur und die Reinigungszeit einstellen. Hier empfiehlt sich für Aceton eine Temperatur von 20-30 °C und eine Dauer von ungefähr 30 Minuten (Schalter auf ∞ stellen). Ist die Zeit abgelaufen, kann man die Teile vorsichtig mit der gereinigten Pinzette aus dem Becherglas nehmen und mit Isopropanol abspritzen. Anschließend legt man sie auf die vorbereitete Aluminiumfolie und lässt sie trocknen. Dabei hilft es, wenn man die Teile ab und zu wendet und an eine trockene Stelle legt. Wenn sie trocken sind, wickelt man sie in die Aluminiumfolie ein und beschriftet jedes "Päckchen". Ist während des Reinigungsvorgangs irgendetwas auf den Boden gefallen, ist es am besten, das Teil nochmal komplett zu reinigen, da schon die kleinsten Staubpartikel zu einer Verunreinigung führen.

Achtung: Die Handschuhe lösen sich in Aceton langsam auf, deswegen ist es ratsam, die Teile nur mit der Pinzette aus dem Becherglas zu holen. Das Aceton wird nach Gebrauch in einen dafür vorgesehenen Abfallkanister geschüttet und darf auf keinen Fall in den Abfluss gegossen werden!

6.2. Verdrahtung der Bauteile

Jedes Bauteil muss mit mindestens einem Kabel verdrahtet werden. Denn selbst die Bauteile, an die keine Spannung angelegt wird, müssen auf definiertem Potential liegen, d.h. geerdet sein. Die hier verwendeten Kabel sind Kapton isolierte Kupferdrähte² von der Firma Kurt J. Lesker. Diese Kaptondrähte sind speziell für das Hochvakuum entwickelt worden [12]. Kapton besitzt eine hohe Festigkeit, gute elektrisch isolierende Eigenschaften und eine sehr geringe Ausgasrate. Je nach Dicke, sind die Drähte für verschiedene Maximalspannungen geeignet. Die verwendeten Drähte für die Bauteile auf der optischen

²„KaptonTM Insulated Wire“ von der Firma Kurt J. Lesker Company

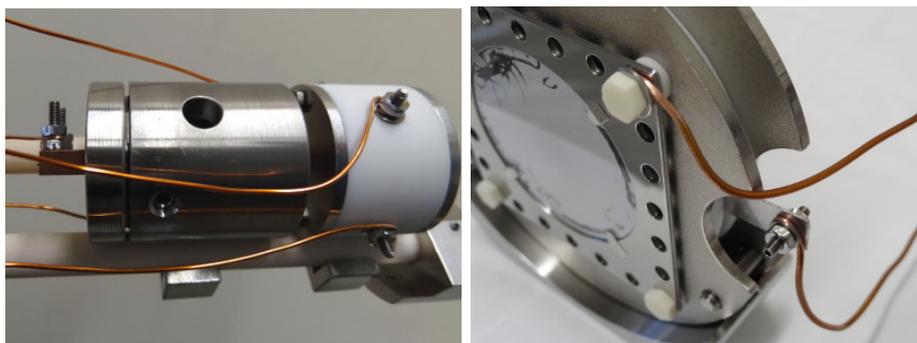


Abb. 6.1.: Links: Verdrahtung der Elektronenquelle und des Ablenkelements ; Rechts: Verdrahtung der MCP-Halterung und des Phosphorschirms

Bank haben eine Dicke von 0,6 mm und sind für eine Spannung von bis zu 2 kV ausgelegt. Die Drähte für die MCPs und den Phosphorschirm haben eine Dicke von 1,0 mm und sind für Spannungen von bis zu 10 kV geeignet. Sie sind sehr beweglich und lassen sich in alle Richtungen gut biegen. Das zugrunde liegende Prinzip beim Befestigen der Drähte an den Bauteilen ist das Einklemmen eines Kabels mit Hilfe einer Mutter oder einer Beilagscheibe. Bevor man die Kabel an den Bauteilen befestigt, müssen sie abisoliert werden. Das heißt, dass man das Kapton mit einem Drahtlappen oder mit einem Teppichmesser abreiben oder abkratzen muss. Um die Drähte fest mit den Bauteilen zu verbinden empfiehlt es sich vorne in den Draht einen kleinen Haken zu biegen. Diesen kann man dann an der Schraube oder der Gewindestange zwischen Beilagscheibe und Mutter einhängen und mit der Mutter festziehen (vgl. Abbildung 6.1).

Der Anodenzyylinder wird mit einer Gewindestange und einer Metallklammer, wie in [25] geplant, an der optischen Bank befestigt. Der Draht, der den Zylinder erdet, wird mit einer Beilagscheibe und einer Mutter unten an der Gewindestange befestigt. Der Draht, der die Wolframspitze mit Spannung versorgt, ist über einen Kupferkontakt (vgl. Abbildung 6.1 links) mit der Spitze verbunden. Bei dem Ablenkelement wurden alle vier Titanelektroden verdrahtet. Die Titanblenden vorne und hinten am Ablenkelement wurden so verdrahtet, dass sie gemeinsam geerdet werden können. Dieser "Erdungsdraht" ist auch mit dem Draht verbunden, der den Anodenzyylinder erdet. Die Kabel, die die MCPs mit Spannung versorgen, wurden an den beiden Laschen der Metallringe festgeklemmt. Dazu wurde jeweils eine Gewindestange durch das Loch im Metallarm geschoben und mit zwei Muttern und zwei Beilagscheiben wurde der Draht befestigt (vgl. Abbildung 6.1 rechts). Am Phosphorschirm wurde das Kabel zwischen der Keramikschraube und einer Beilagscheibe festgeklemmt. Wichtig ist, dass alle Teile, wie oben erwähnt, auf einem definierten Potential liegen. Dies geschieht nicht nur über Kabel, wie zum Beispiel bei dem Anodenzyylinder oder dem Ablenkelement, sondern auch über den Kontakt zwischen leitenden Metallen. So ist die optische Bank geerdet, da ihre Backen direkt auf dem μ -Metallrohr aufliegen und dieses wiederum durch seine Backen mit dem Vakuumrohr, also der gesamten Vakuumkammer verbunden ist. Die Vakuumkammer wiederum ist geerdet da sie auf einer Metallplatte steht, die man zum Beispiel über eine Steckdose erden muss.

Ebenso ist die MCP-Halterung über ihr Backe mit der Vakuumkammer verbunden und dadurch geerdet.

6.3. Beschaltung der Netzteile

Für die Spannungsversorgung der einzelnen Elemente in der Vakuumkammer benötigt man einige Hochspannungsmodule. D. Neubauer beschreibt in seiner Arbeit [25] im Kapitel 2.1.10 die möglichen Maximalspannungen an den Bauteilen auf der optischen Bank. Die Maximalspannungen für die MCPs liegen bei +2 kV und beim Phosphorschirm bei +7 kV. Die Hochspannungsmodule müssen eine stabile Spannungsversorgung und einen geringen Rippelstrom gewährleisten, damit es nicht zu unerwünschten Auf- und Entladevorgängen kommt. Die Module von der Firma Applied Kilovolts aus der HP-Serie zeichnen sich gerade durch diese beiden Eigenschaften aus [10]. Die Netzteile können in verschiedenen Ausführungen bestellt werden. Zum Beispiel bedeutet **HP0.5POC025**, dass das Netzteil aus der *HP-Serie* stammt und eine positive Spannung von maximal 0,5 kV liefert. Die Bezeichnung **OC** steht für die "Option Codes". Hier kann man verschiedene Optionen dazu bestellen, wie zum Beispiel Ausgänge für das externe Potentiometer oder verschiedene Monitoranschlüsse. Die unterschiedlichen Beschaltungen für die Netzteile sind in Abbildung 6.2 zu sehen. Bei unseren Netzteilen wurden keine speziellen Optionen dazu bestellt. Da wir dennoch die Spannung regeln wollten, wurden externe Drehpotentiometer³ nach der Beschaltung "External 10V" angelötet. Die Metallklammern und die Plastikhalterung werden mit den Netzteilen mitgeliefert, sodass man nur noch geeignete Kabel⁴ an die Klammern anlöten muss. In Abbildung 6.3 ist zu sehen, wie das Kabel an die Klammer gelötet werden muss und wie die Schaltung anschließend zusammengesteckt wurde. Die Potentiometer sind so angelötet worden, dass sie „aus“ sind, wenn der Dreharm ganz nach links gedreht wurde. Als Versorgungsspannung wird ein 9-Volt-Block an das rote und das schwarze Kabel des Potentiometers geklippt.

³Drehpotentiometer „PC16BU 22k A F21 CGW“ von der Firma Conrad Electronic

⁴Messleitung „PVC 200/1 MM“ (1 mm²/200 cm) von der Firma Conrad Electronic

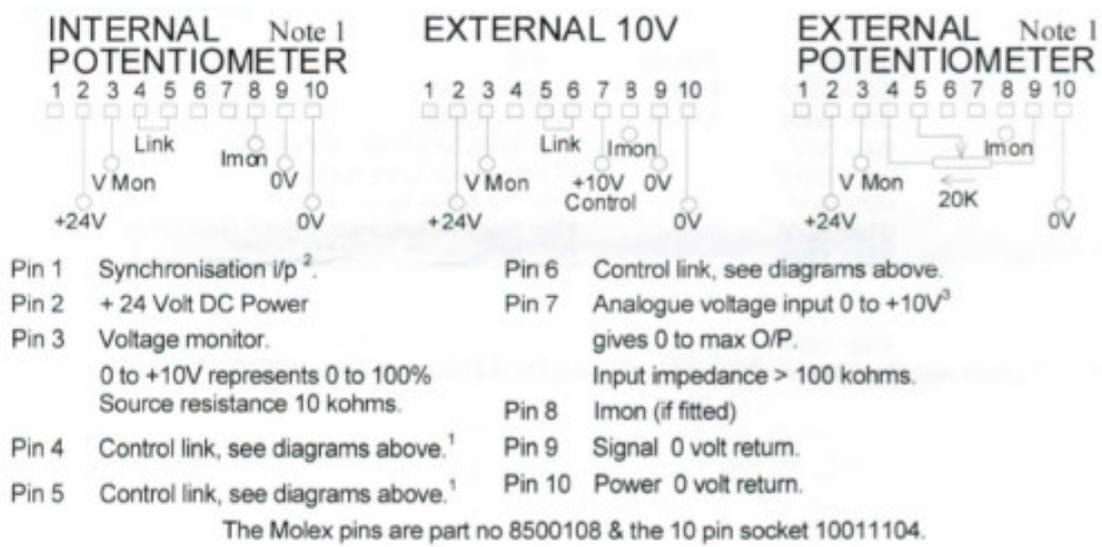


Abb. 6.2.: Beschaltungsmöglichkeiten der Hochspannungsmodule aus [10]

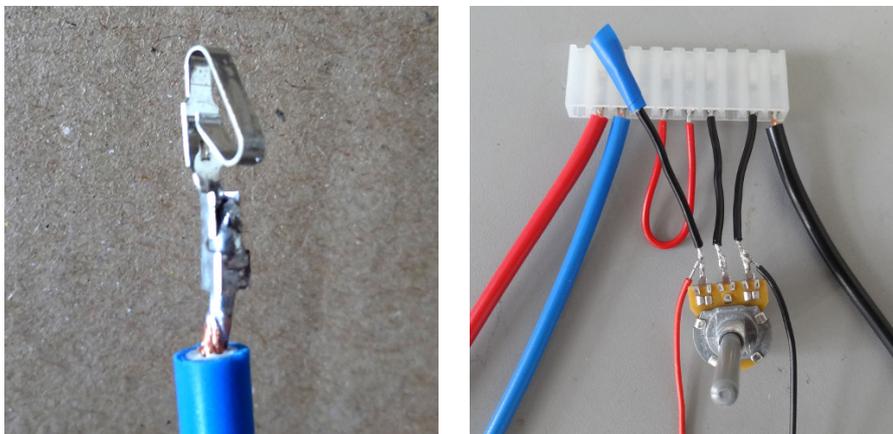


Abb. 6.3.: Links: Kabel gelötet an Metallklammer; Rechts: Zusammengesteckte Schaltung mit Drehpotentiometer

7. Erste Inbetriebnahme

Für den ersten Versuch wurde die Elektronenquelle auf der optischen Bank zusammen mit der MCP-Halterung und dem Phosphorschirm in der Vakuumkammer verdrahtet. Wichtig dabei ist immer, dass man genau notiert, wo welches Kabel nach außen geführt wird, bevor man die Vakuumkammer verschließt. Hat man die Vakuumkammer einmal verschlossen, so kommt man nicht mehr an die Bauteile und ihre Anschlüsse heran.

Nachdem die Vakuumkammer ungefähr zwei Tage ausgepumpt wurde, lag der Druck bei $1,6 \cdot 10^{-6}$ mbar. Bevor die Netzteile angeschaltet wurden, mussten die einzelnen Anschlüsse mit Hilfe eines Amperemeters überprüft werden, um Kurzschlüsse zu verhindern. Die Netzteile, die eine Spannung von bis zu 10 kV liefern können, wurden mit einer Hochspannungsspitze getestet. Nachdem alles überprüft worden war, wurde die Spitze auf -2,5 kV gelegt, die Vorderseite der ersten MCP auf 0 V, die Rückseite der zweiten MCP auf +2,0 kV und der Phosphorschirm auf ungefähr +4,0 kV. Der Anodenzyylinder wurde über ein Kabel mit der Vakuumkammer verbunden und die gesamte Kammer lag durch die Verbindung mit dem Pumpensystem auf Erdpotential.

Trotz komplett dunklem Raum war auf dem Phosphorschirm kein Leuchten zu erkennen. Auch durch Erhöhen der Spannungen an der hinteren MCP auf bis zu +2,5 kV und dem Phosphorschirm auf bis zu +7,0 kV blieb alles dunkel.

7.1. Fehleranalyse

Um herauszufinden warum nichts auf dem Phosphorschirm zu erkennen war, wurde eine Fehleranalyse durchgeführt. Nacheinander wurden die einzelnen Bauteile auf ihre Funktion hin getestet. Zuvor wurde noch ein „HV-Check“ durchgeführt, um zu überprüfen, ob es irgendwo im Inneren der Kammer zu Überschlägen gekommen war. Dazu wurde ein externes HV-Netzteil mit Strombegrenzung und einer Strom- und Spannungsanzeige an die verschiedenen Anschlüsse angeschlossen und hohe Spannungen von bis zu +10 kV angelegt. Das Ergebnis war, dass es keine Überschläge zwischen den Bauteilen gab.

Als Nächstes wurde die Elektronenemission an der Wolframspitze überprüft. Hierfür wurde mit dem externen HV-Netzteil eine Spannung an der Spitze angelegt, die langsam erhöht wurde. Der Einbruch der Spannung ist ein Zeichen dafür, dass Elektronen emittiert werden. Dies geschah bei einem ungewöhnlich hohen Wert von -5,0 kV. Gleichzeitig wurde das Vakuum beim Erhöhen der Spannung an der Spitze um eine Zehnerpotenz schlechter. Das ist nur dadurch zu erklären, dass durch das Anlegen der Spannung Schmutzpartikel von der Spitze gelöst wurden. Aufgrund dessen wurde die Spitze für

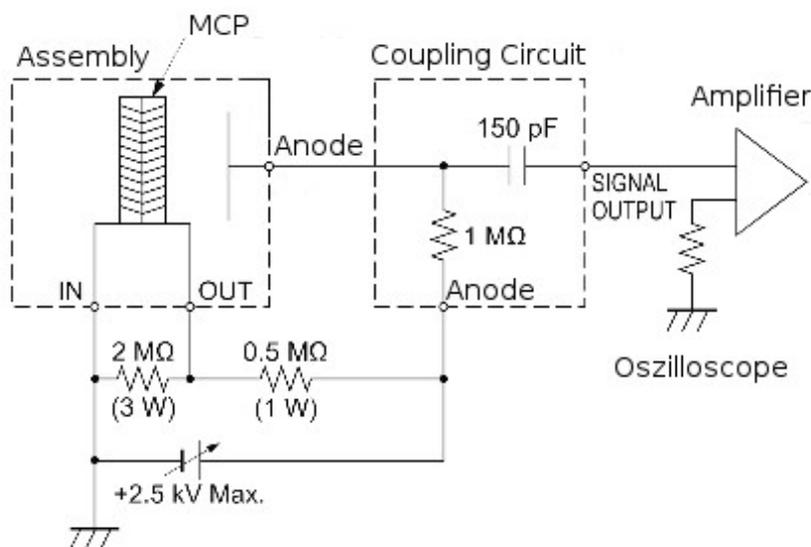


Abb. 7.1.: Schaltplan zur Beschaltung der MCPs und der Metallplatte (Anode) zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit der MCPs; nach [11].

die weiteren Schritte nicht mehr verwendet. Das bedeutet aber auch, dass die Elektronenemission noch ein Problem darstellt, das gelöst werden muss. Bis zum Abschluss dieser Arbeit wurden neue Spitzen aus einem $175\ \mu\text{m}$ -dicken Wolframdraht hergestellt. Sie konnten allerdings noch nicht getestet werden.

Um die Funktionsfähigkeit der MCPs zu testen, wurde der Phosphorschirm durch die Metallplatte des Schirms ersetzt. Mit Hilfe eines Mini-Circuits-Verstärkers¹, der eine Verstärkung von 10 dB hat, und einem Oszilloskop sollten Elektronen der Hintergrundstrahlung gemessen und dadurch die Funktionsfähigkeit der MCPs bestätigt werden [13]. Dazu wurde eine Verstärkerschaltung nach Schaltplan 7.1 auf eine Lochrasterplatine gelötet (vgl. Abbildung 7.2). Die einzelnen Bauteile müssen hierbei für Hochspannung geeignet sein. Auf Grund der Hochspannung wurden auch die leitenden Kupferstreifen auf der Rückseite der Platine zwischen den Kabeln entfernt, um Überschläge zu vermeiden.

Anschließend wurde die Platine entsprechend dem Schaltplan an die MCPs, die Metallplatte, den Verstärker und das Oszilloskop angeschlossen und eine Spannung von $+2,5\ \text{kV}$ angelegt. Mit einem 600 MHz-Oszilloskop² wurden Elektronensignale aufgenommen, Abbildung 7.3 zeigt ein solches Signal. Die stark ansteigende Flanke des ersten Peaks mit einem Maximum bei ca. $1,5\ \text{V}$ und die Dauer des Peaks von ca. $8\ \text{ns}$ weisen daraufhin, dass hier das Signal eines Elektrons gemessen wurde (vgl. [28]). Die nachfolgenden Peaks sind Schwankungen, die durch die Messapparatur entstanden sind.

¹„Mini-Circuits ZX60-V81-S+“ von der Firma Mini-Circuits, Brooklyn. Eingangswiderstand $50\ \Omega$.

²„WaveRunner 64Xi“ von der Firma Teledyne LeCroy GmbH

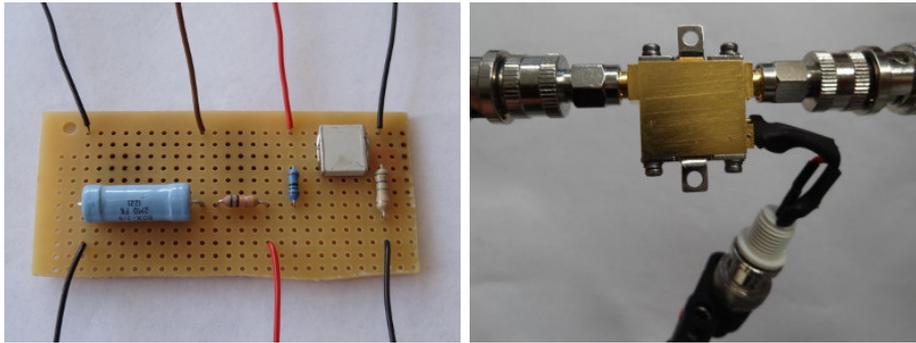


Abb. 7.2.: Links: Verstärkerschaltung zum Messen der Hintergrundstrahlung mit dem Oszilloskop, aufgebaut nach Schaltplan 7.1; Rechts: Minicircuit-Verstärker

Die Abbildung B.4 im Anhang zeigt weitere Aufnahmen, die mit dem Oszilloskop gemacht wurden. Die maximalen Spannungen liegen hier zwischen 1,2 V und 1,6 V und die Dauern der Peaks betragen ungefähr 8 ns. Anhand dieser Daten und den Daten des Mini-Circuits-Verstärkers kann die Verstärkung der MCPs wie folgt berechnet werden.

Eine Verstärkung von 10 dB bedeutet, dass die Ausgangsspannung U_2 um den Faktor 10 größer ist, als die Eingangsspannung U_1 . Anhand dieser Überlegung und dem $50\ \Omega$ Eingangswiderstand des Verstärkers kann man wie in Gleichung 7.1 den Strom berechnen. Mit der Peakdauer lässt sich dann die Gesamtladung der Elektronen wie in Gleichung 7.2 berechnen. Folgende Rechnung wurde mit den Werten aus Messung 7.3 durchgeführt (verstärkte Maximalspannung 1,5 V, Pulsdauer 8 ns):

$$I = \frac{U}{R} = \frac{0,15\ \text{V}}{50\ \Omega} = 3\ \text{mA} \quad (7.1)$$

$$Q = I \cdot t = 3\ \text{mA} \cdot 8\ \text{ns} = 2,4 \cdot 10^{-11}\ \text{C} \quad (7.2)$$

Die Anzahl der Elektronen lässt sich dann über die Elektronenladung q_e bestimmen. Man erhält als Verstärkung durch die MCPs einen Faktor von ungefähr 10^8 , der mit dem Wert aus dem Datenblatt des Herstellers [11] übereinstimmt. Damit konnte die Funktionsfähigkeit der MCPs bestätigt werden.

7.2. Ergebnisse der Fehleranalyse

Bei den Bauteilen im Inneren der Vakuumkammer kam es selbst bei hohen Spannungen von bis zu 10 kV nicht zu unerwünschten Überschlägen. Die Überprüfung der MCPs ergab, dass die Elektronen der Hintergrundstrahlung mit dem Oszilloskop gemessen werden konnten. Bei der Überprüfung der Elektronenquelle kam es erst bei -5 kV zu Spannungseinbrüchen. Für weitere Versuche wurden neue Spitzen geätzt, die allerdings noch nicht getestet wurden.

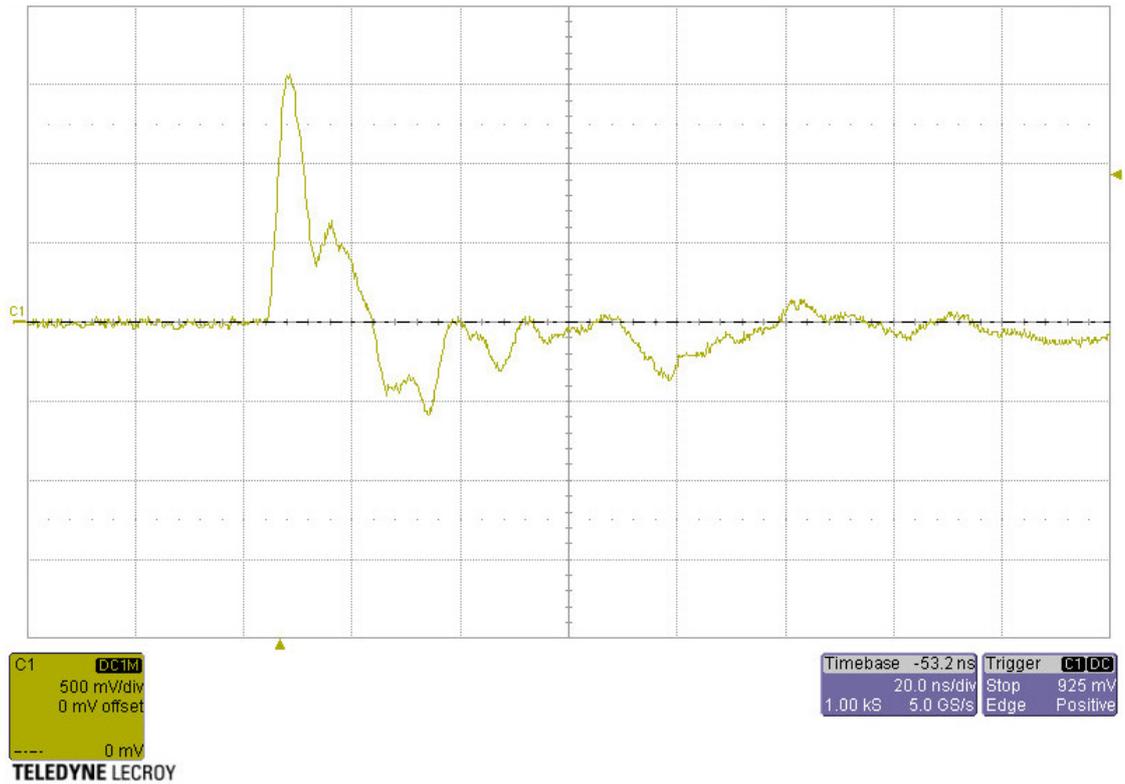


Abb. 7.3.: Elektronensignal abgetragen über die Zeit, aufgenommen mit einem 600 MHz-Oszilloskop, bei einer angelegten Spannung von 2,5 kV. Gitterlinien in 20 ns Abschnitten in x-Richtung und 500 mV Abschnitten in y-Richtung.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der wissenschaftlichen Arbeit war es, das Elektroneninterferometer aufzubauen und in Betrieb zu nehmen. Hierfür wurden Wolframspitzen als Feldemissionskathoden mit dem speziellen Ätzverfahren nach W. Chang et al. [6] an der Universität Tübingen geätzt. Die Spitzen bestanden allerdings noch nicht aus monokristallinen Wolframdrähten, diese müssen noch geätzt werden. Vor dem Ätzen wurden die Drähte mit Hilfe des Punktschweißverfahrens mit Haltebügeln verbunden. Dafür wurde eine Halterung aus Messing konstruiert, die es ermöglicht, einen dünnen Draht mit einem Haltebügel präzise zu verschweißen. Als Alternative zum Punktschweißverfahren wurde das Laserschweißverfahren getestet, was allerdings im Rahmen dieser Arbeit keine verwendbaren Resultate lieferte. Prinzipiell sollte es möglich sein, zwei Wolframdrähte mit Hilfe der Laserschweißtechnik zu verbinden [3]. Es kann sein, dass diese Schweißtechnik jedoch nur bei gleich dicken Drähten funktioniert. Ein weiterer Ansatz könnte die Verwendung von Wolframpulver sein, welches man auf die Verbindungsstelle aufbringt.

Um die emittierten Elektronen sichtbar zu machen, wurde eine Halterung mit Haltebacke konstruiert, die die MCPs und den Phosphorschirm hinter der optischen Bank in der Vakuumkammer zentriert. Da man auf dem Phosphorschirm keine Elektronensignale erkennen konnte, wurde eine Fehleranalyse mit einem Oszilloskop durchgeführt, bei der Elektronensignale der Hintergrundstrahlung aufgezeichnet werden konnten. Dadurch wurden die MCPs als Fehlerquelle ausgeschlossen, der Phosphorschirm hingegen sollte noch genauer untersucht werden.

Die Ablenkelemente und die Quadrupollinsen wurden bisher zwar noch nicht eingebaut, aber alle nötigen Schrauben und Muttern zur Befestigung und Verdrahtung wurden vorbereitet, sodass diese Bauteile im Rahmen der nachfolgenden Arbeit direkt eingebaut werden können. Das Biprisma konnte aus Zeitgründen nicht fertiggestellt werden. Es existieren aber bereits die Titanelemente, die Makorstäbchen und die Abstandsringe aus Makor [25]. Des Weiteren muss zum Vervollständigen des Pumpensystems noch eine Ionenpumpe bestellt werden. Ansonsten sollten soweit alle nötigen Teile – inklusive der Netzteile – vorhanden sein, sodass das Elektroneninterferometer in der nächsten Arbeit komplett aufgebaut werden kann.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich *allen* fleißigen Helfern danken, die mir bei dieser Arbeit unter die Arme gegriffen haben. Im Besonderen möchte ich mich bei Herrn Dr. Herzog und bei Markus Stecker von der Universität Tübingen bedanken, die sich sehr viel Zeit genommen haben, um mir bei der Herstellung der Spitzen zu helfen. Ebenso möchte ich den Mitarbeitern des Instituts für Strahlwerkzeuge an der Universität Stuttgart danken, die mir beim Laserschweißen geholfen haben (Danke Ivan, dass du so tapfer sieben Stunden am Stück mit mir durchgehalten hast). Zudem danke ich den Mitarbeitern der Mechanikwerkstatt, insbesondere Herrn Kamella und Herrn Neuwirth, die sich immer sehr viel Zeit für mich genommen haben und mir hilfreiche Tipps geben konnten. Des Weiteren danke ich Thomas Schmid, der mir am Anfang bei allen Problemen zur Seite gestanden und mir den Vorgang des Vakuumreinigen erklärt hat. Bernhard Huber und Andreas Kölle danke ich für ihren Rat und die Hilfe beim Aufbau der Konstruktion zur Zentrierung der Spitzen und Renate Daschner und Harald Kübler danke ich für die Unterstützung im Elektroniklabor. Des Weiteren danke ich Michael Schlagmüller und Graham Lohead für die Hilfe bei der Fehlersuche mit dem Oszilloskop. Für die Unterstützung und die Motivation bei der Arbeit danke ich Georg Epple, Hannes Gorniaczyk, Holger Kadau, Kathrin Kleinbach, Alexander Krupp, Thomas Maier, Fabian Ripka, Ralf Ritter, Jahn Rührig und Matthias Schmitt, ihr habt mir immer viele kleine Tipps und Tricks für den Physikalltag verraten, die mir sehr weiter geholfen haben. Für die nette und geduldige Betreuung bedanke ich mich ganz herzlich bei Herrn Dr. Robert Löw und bei Herrn Prof. Dr. Pfau, der mir diese interessante Arbeit erst ermöglicht hat.

Georg Rempfer, Andreas App und Guntram Kunschner danke ich für das Korrekturlesen meiner Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt Hendrik Röhm, der mich während der gesamten Zeit in jeder Hinsicht unterstützt hat und ermutigt hat.

A. Tabellen

Leistung [W]	Impulsdauer [s]	Ergebnis
500	1.0	beide Drähte weggeschmolzen
250	0.5	beide Drähte weggeschmolzen
100	0.2	nur dünner Draht angeschmolzen
100	0.5	nur dünner Draht angeschmolzen
50	0.1	nichts passiert

Tabelle A.1.: Drähte im Fokus, dünner Draht liegt auf dem Dicken, Schutzgas aus.

Leistung [W]	Impulsdauer [s]	Ergebnis
200	0.4	Drähte verschweiß, aber Dicker durchgeschmolzen
150	0.3	nichts passiert
150	0.4	Drähte verschweiß, aber Dicker gebrochen
150	0.4	wahrscheinlich nicht getroffen

Tabelle A.2.: Drähte im Fokus, dünner Draht liegt unter dem Dicken, Schutzgas aus.

Leistung [W]	Impulsdauer [s]	Ergebnis
500	1.0	beide Drähte weggeschmolzen
350	0.5	beide Drähte weggeschmolzen
300	0.5	nichts passiert
250	0.5	nichts passiert
200	2.0	Schöner Schweißpunkt, aber Dicker gebrochen
150	2.0	Dünner abgebrochen
150	2.0	Schweißpunkt, aber gebrochene Drähte
100	2.5	nichts passiert
100	5.0	nichts passiert

Tabelle A.3.: Defokus von 7 mm, dünner Draht liegt auf dem Dicken, Schutzgas aus.

Leistung [W]	Impulsdauer [s]	Ergebnis
150	2.0	nichts passiert
250	2.5	nichts passiert
500	2.0	beide Drähte weggeschmolzen
800	0.1	Dünner weggeschmolzen, Dicker nichts passiert

Tabelle A.4.: Defokus von 7 mm, dünner Draht liegt auf dem Dicken, Schutzgas an.

Leistung [W]	Impulsdauer [s]	Ergebnis
500	0.1	Dicker nur leicht angeschmolzen
650	0.1	Sehr gute Schweißnaht
650	0.1	Dicker nur leicht angeschmolzen
650	0.1	Dicker nur leicht angeschmolzen

Tabelle A.5.: Defokus von 7 mm, dünner Draht liegt unter dem Dicken, Schutzgas an.

Leistung [W]	Impulsdauer [s]	Ergebnis
1000	0.05	Dicker leicht angeschmolzen
1500	0.05	Beide leicht angeschmolzen
2000	0.05	2 Schweißpunkte, die dünnen Draht halten
2200	0.05	Verschweißt mit Verdünnung am Draht, brüchig

Tabelle A.6.: Defokus von 7 mm, dünner Draht liegt unter dem Dicken, Schutzgas an, deutlich höhere Leistungen. Die ersten 3 Versuche wurden an den selben Drähten durchgeführt.

Leistung [W]	Impulsdauer [s]	Ergebnis
400	0.05	nichts passiert
1000	0.05	Dicker leicht angeschmolzen
1400	0.06	Beide durchgeschmolzen
1400	0.05	Nicht verbunden, aber beide angeschmolzen
1450	0.05	Dünner gebrochen, kaum angeschmolzen
1500	0.05	Dicker gebrochen, aber wieder zusammengeschweißt
1500	0.05	Dicker gebrochen, aber wieder zusammengeschweißt
2000	0.05	Dünner weggeschmolzen

Tabelle A.7.: Drähte im Fokus, dünner Draht liegt unter dem Dicken, Schutzgas an, deutlich höhere Leistungen.

Leistung [W]	Impulsdauer [s]	Ergebnis
50	3.0	nichts passiert
50	5.0	Dünnere stark verdünnt, Struktur auf dem dicken sichtbar
100	3.0	Schwache Verbindung, keine richtige Schweißnaht
100	4.0	Schweißtropfen am dünnen Draht, hält nicht
110	3.0	Dünnere hält an Dickem, sehr brüchig, blauverfärbung
110	3.0	Dünnere hält an Dickem, sehr brüchig, blauverfärbung

Tabelle A.8.: Drähte im Fokus, dünnere Draht liegt unter dem Dicken, Schutzgas an, deutlich längere Pulse.

Tauchtiefe	Vorreinigen	Vorätzen	DC-Spannung	Schnelle Pulse	Langsame Pulse
1000 μm	5 s/-6 V	2 s/+6 V	10 s/+6 V	1 ms/100 ms/6V	1 ms/1000 ms/3V
2000 μm	5 s/-6 V	2 s/+6 V	22 s/+6 V	1 ms/100 ms/6V	1 ms/1000 ms/3V
2000 μm	5 s/-6 V	2 s/+6 V	22 s/+6 V	1 ms/100 ms/6V	1 ms/1000 ms/3V
2500 μm	5 s/-6 V	2 s/+6 V	15 s/+6 V	1 ms/100 ms/6V	1 ms/1000 ms/3V
2500 μm	5 s/-6 V	2 s/+6 V	15 s/+6 V	1 ms/100 ms/6V	1 ms/1000 ms/3V

Tabelle A.9.: Ätzen des 100 μm dicken Wolframdrahts. Die erste Spalte ist die Eintauchtiefe des Drahts in die Lösung. Spalte 4 ist die Gleichspannungsphase, die die Länge der Spitzen bestimmt. Spalte 5 sind die schnellen Pulse bei einer Spannung von +6 V und Spalte 6 die langsamen Pulse bei +3 V.

Tauchtiefe	Vorreinigen	Vorätzen	DC-Spannung	Schnelle Pulse	Langsame Pulse
1500 μm	5 s/-6 V	2 s/+6 V	30 s/+6 V	1 ms/100 ms/6V	1 ms/1000 ms/3V
1000 μm	5 s/-6 V	2 s/+6 V	40 s/+6 V	1 ms/100 ms/6V	1 ms/1000 ms/6V
1000 μm	5 s/-6 V	2 s/+6 V	30 s/+6 V	1 ms/100 ms/6V	1 ms/1000 ms/4V
1000 μm	5 s/-6 V	2 s/+6 V	30 s/+6 V	1 ms/100 ms/6V	1 ms/1000 ms/6V

Tabelle A.10.: Ätzen des 175 μm dicken Wolframdrahts. Die erste Spalte ist die Eintauchtiefe des Drahts in die Lösung. Spalte 4 ist die Gleichspannungsphase, die die Länge der Spitzen bestimmt. Spalte 5 sind die schnellen Pulse (für die Zeitangaben gilt: on/off) bei einer Spannung von +6 V und Spalte 6 die langsamen Pulse bei unterschiedlichen Spannungen.

B. Bilder

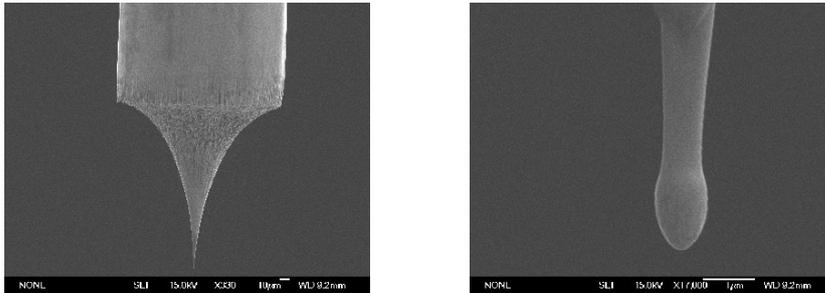


Abb. B.1.: Links: Spitze B2; Rechts: Spitze B2 mit stärkerer Vergrößerung

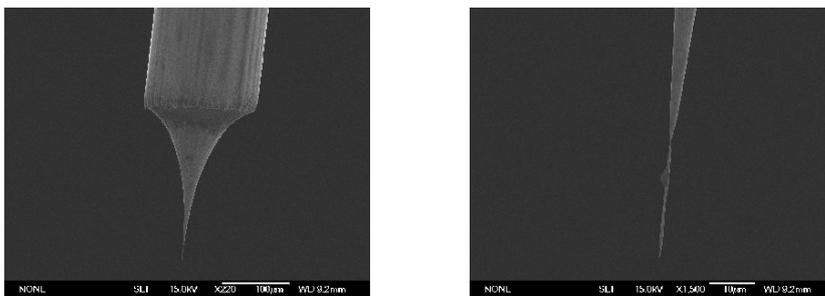


Abb. B.2.: Links: Spitze B3; Rechts: Spitze B3 mit stärkerer Vergrößerung

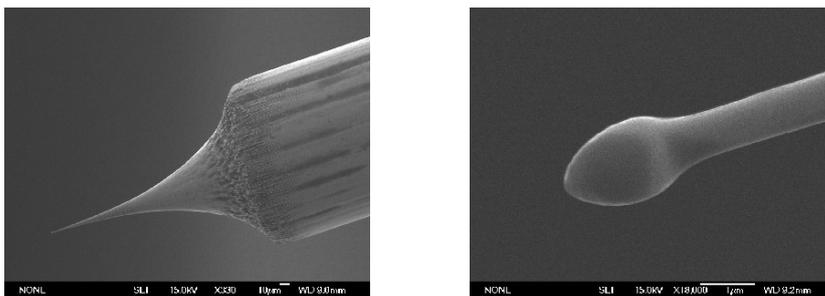


Abb. B.3.: Links: Spitze B4; Rechts: Spitze B4 mit stärkerer Vergrößerung

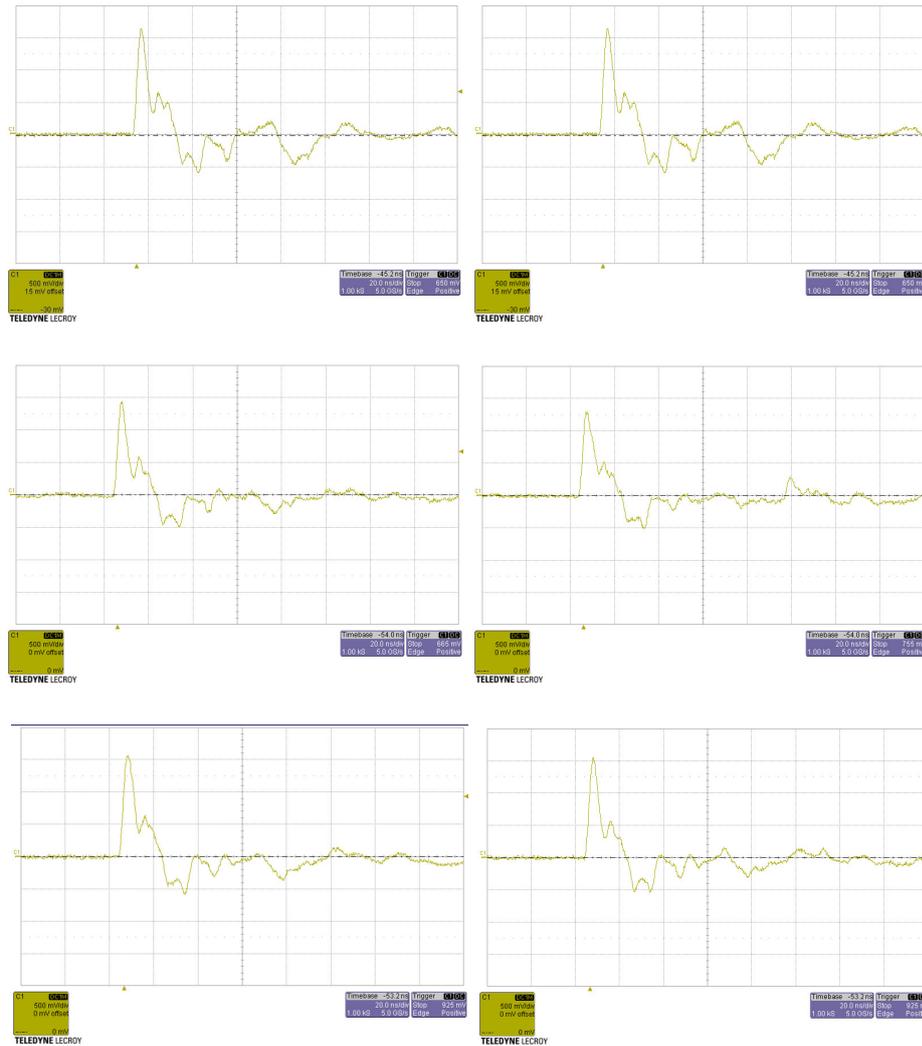


Abb. B.4.: Elektronensignal abgetragen über die Zeit, aufgenommen mit einem 600 MHz-Oszilloskop, bei einer angelegten Spannung von 2,5 kV. Gitterlinien in 20 ns Abschnitten in x-Richtung und 500 mV Abschnitten in y-Richtung.

Literatur

- [1] B. Abbott u. a. “Detector Description and Performance for the First Coincidence Observations between LIGO and GEO”. In: *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A* 517 (2004), S. 154–179.
- [2] T. Baier. “Untersuchung verschiedener Ansätze zur Online Prozesskontrolle beim Remote-Laserstrahlschweißen”. Studienarbeit. Institut für Strahlwerkzeuge, Universität Stuttgart, 2008.
- [3] M. Beckert und A. Neumann. *Grundlagen der Schweißtechnik*. München: Verlag Technik GmbH Berlin, 1993.
- [4] L. de Broglie. “A tentative theory of light quanta”. In: *Phil. Magazine Series 6* Vol. 47 (1942), S. 446–458.
- [5] W. Brünger. “Feldemissionskathode zur kohärenten Beleuchtung des Elektronen-Biprismas”. In: *Naturwissenschaften* Vol. 55 (1968), S. 295.
- [6] W. Chang u. a. “Method of electrochemical etching of tungsten tips with controllable profiles”. In: *Rev. Sci. Instrum.* Vol. 83 (2012). 083704.
- [7] C. Cohen-Tannoudji, B. Diu und F. Laloë. *Quantenmechanik Teil 1*. Berlin: De Gruyter Verlag, 2009.
- [8] C. Davisson und L. Germer. “Diffraction of Electrons by a Crystal of Nickel”. In: *Phys. Rev.* 30 (1927), S. 705–740.
- [9] Hermann Ebert. “Band 2 Teil 2: Die strahlende Energie”. In: *Lehrbuch der Physik*. Hrsg. von Curt Heinke. De Gruyter Verlag, 1923.
- [10] Firma Applied Kilovolts Ltd. *Safety & Installation Instructions for HP Series*. Datenblatt. West Sussex, 2009.
- [11] Firma Hamamatsu Photonics K. K., Japan. *MCP & MCP Assembly; Selection Guide*. http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/MCPassy_TMCP0001E10.pdf. Stand 08.11.2013. 2006.
- [12] Firma Kurt J. Lesker. *KaptonTM Insulated Wire*. http://www.lesker.com/newweb/feedthroughs/wire_kapton.cfm?pgid=0. Stand 08.11.2013.
- [13] Firma Mini-Circuits, Brooklyn New York. *Coaxial Wideband Amplifier ZX60-V81+*. <http://217.34.103.131/pdfs/ZX60-V81+.pdf>. Datenblatt, Stand 08.11.2013.
- [14] Firma Tectra. *Microchannel Plates MCP and Microchannel Plate Detectors*. <http://www.tectra.de/MCP.htm>. Stand 08.11.2013.

- [15] Firma Trumpf. *Laserschweißen und Laserlöten*. <http://www.trumpf-laser.com/loesungen/anwendungsfelder/laserschweissen.html>. Stand 08.11.2013.
- [16] R. G. Forbes. “Physics of generalized Fowler-Nordheim-type equations”. In: *Journal of Vacuum Science & Technology B* Vol. 26 (2008), S. 788–793.
- [17] R. G. Forbes und Jonathan H. B Deane. “Reformulation of the standard theory of Fowler-Nordheim tunnelling and cold field electron emission”. In: *Proc. R. Soc. A* Vol. 463 (2007), S. 2907–2927.
- [18] *Gespräch mit Peter Stritt, Mitarbeiter des Instituts für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart*.
- [19] H. Haken und H. C. Wolf. *Atom- und Quantenphysik*. Heidelberg: Springer Verlag Berlin, 2004.
- [20] F. Hasselbach. “A ruggedized miniature UHV electron biprism interferometer for new fundamental experiments and applications”. In: *Zeitschr. Phys. B – Condensed Matter* Vol. 71 (1988), S. 443–449.
- [21] P. W. Hawkes und E. Kasper. *Principles of Electron Optics, Volume 2: Applied geometrical optics*. Academic Press London, 1989.
- [22] A.-S. Lucier. “Preparation and Characterization of Tungsten Tips Suitable for Molecular Electronics Studies”. Masterarbeit. Center for the Physics of Materials, McGill University, Montréal Canada, 2004.
- [23] G. Möllenstedt und H. Düker. “Beobachtungen und Messungen an Biprisma-Interferenzen mit Elektronenwellen”. In: *Zeitschr. Phys.* Vol. 145 (1956), S. 377–379.
- [24] G. Möllenstedt und H. Düker. “FRESNELScher Interferenzversuch mit einem Biprisma für Elektronenwellen”. In: *Naturwissenschaften* Vol. 42 (1955), S. 41.
- [25] David Neubauer. “Konzeption einer Versuchsreihe zu Quanteneffekten für Schüler”. Wissenschaftliche Arbeit. Universität Stuttgart, 2011.
- [26] M. Nicklaus. “Ein Sagnac-Experiment mit Elektronenwellen”. Diss. Universität Tübingen, 1989.
- [27] Ernst W. Otten. *Repetitorium Experimentalphysik*. Heidelberg: Springer Verlag Berlin, 1998.
- [28] T. Schmid. “High precision excitation, manipulation and detection of Rydberg atoms”. Masterarbeit. 5. Physikalisches Institut, Universität Stuttgart, 2013.
- [29] M. Stecker. “Feldionisation an Wolfram-Nanospitzen”. Diplomarbeit. Physikalisches Institut, Eberhard Karls Universität Tübingen, 2013.
- [30] M. Wolf. “Multi-Channel-Plates”. In: *Physik in unserer Zeit* Vol. 12 (1981), S. 90–95.