



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT
GÖTTINGEN

Fakultät für Physik
Friedrich-Hund-Platz 1
37077 Göttingen

master-fp.physik.uni-goettingen.de

Master-Forschungspraktikum

Schwerpunkt Festkörper- und Materialphysik (M.phy.403)

Versuchsanleitung zu FM.TES

Tunneleffekt bei Supraleitern

Versuch FM.TES

Tunneleffekt bei Supraleitern

1 Vorbemerkung

Als Tunneleffekt wird der Durchtritt von Teilchen durch eine Potentialbarriere bezeichnet, die höher ist als die Teilchenenergie. Dieser Effekt ist nur im Rahmen der Quantenmechanik zu verstehen. Klassisch gibt es keine Möglichkeit für das Teilchen die Barriere zu überwinden. Die Quantenmechanik sagt für eine Potentialbarriere endlicher Höhe eine nichtverschwindende Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Teilchens jenseits der Barriere voraus. Da das Teilchen die Barriere nicht überspringen kann, stellt man sich anschaulich vor, dass es den Potentialwall „durchtunnelt“.

Die Tunnelwahrscheinlichkeit hängt dabei von der Beschaffenheit der Barriere (Höhe und Breite) ab. Wegen des Pauli- Prinzips müssen bei Fermiteilchen auf der anderen Seite der Barriere außerdem unbesetzte Zustände vorhanden sein.

2 Theorie

Im vorliegenden Experiment betrachten wir den Elektronenstrom zwischen zwei Metallen durch eine einige Atomlagen dünne isolierende Metalloxidschicht. Der Einfachheit halber sei im folgenden $T = 0 \text{ K}$.

Zunächst seien beide Metalle im normalleitenden Zustand. Solange keine Potentialdifferenz zwischen Metall 1 und Metall 2 anliegt, befinden sich ihre elektrochemischen Potentiale auf gleicher Höhe. Es fließt kein Tunnelstrom. Legen wir nun mit Hilfe einer Batterie eine Potentialdifferenz an, so verschieben wir die elektrochemischen Potentiale relativ zueinander und Elektronen können durch die Barriere hindurch von einem Metall in das andere hineintunneln. Es fließt ein Strom I , der proportional zur Potentialdifferenz, d.h. zur angelegten Spannung, ist. Wir erwarten als I-U- Kennlinie eine Gerade durch den Koordinatenursprung. Der Grund dafür ist, dass die Elektronen in dem Metall, in das sie hineintunneln, schon bei beliebig kleiner Potentialdifferenz freie Zustände vorfinden, deren Zustandsdichte in dem interessierenden Energiebereich praktisch konstant ist.

Dieses Verhalten ändert sich drastisch wenn eines der Metalle ein Supraleiter ist. Der supraleitende Zustand kommt dadurch zustande, dass die Elektronen, die sich als Teilchen mit gleicher Ladung im normalleitenden Zustand abstoßen, nunmehr eine durch das Kristallgitter vermittelte attraktive Wechselwirkung spüren. Dies führt zur Kondensation aller Leitungselektronen in einen gemeinsamen Zustand, den sogenannten supraleitenden Grundzustand, der nicht mehr durch einzelne Elektronen aufgebaut wird, sondern aus Elektronenpaaren, sogenannten Cooper- Paaren, besteht. Ein Cooper- Paar setzt sich aus zwei Elektronen mit entgegengesetzten Impulsen und Spins zusammen. Die attraktive Wechselwirkung wird durch virtuelle Phononen vermittelt.

In einem Supraleiter im Grundzustand kann man nicht so ohne weiteres ein Elektron injizieren bzw. aus ihm extrahieren. In beiden Fällen entsteht nämlich ein ungepaartes Elektron. Ein solches Elektron stört aber den Supraleiter bei der Paarbildung und schwächt damit den gesamten supraleitenden Zustand. Der Supraleiter befindet sich dadurch nicht mehr im energetisch tiefsten (d.h. Grundzustand), sondern in einem angeregten Zustand. Eine solche Anregung nennt man Quasiteilchen, da sie sich formal wie ein Teilchen in der Quantenmechanik behandeln lässt.

Solche Anregungen des Grundzustands sind aber nicht bei beliebig kleinen Energien möglich, sondern es existiert eine Energielücke $\Delta(T)$ zwischen Grundzustand und angeregtem Zustand. Deshalb kann man Elektronen in den Supraleiter nur injizieren, wenn ihre Energie um mindestens $\Delta(T)$ höher liegt als das elektrochemische Potential μ_p der Cooper- Paare, bzw. nur in einen Platz im Normalleiter extrahieren, der energetisch um mindestens $\Delta(T)$ tiefer liegt als μ_p . Das Paarpotential μ_p ist dabei das Analogon zum elektrochemischen Potential μ im Normalleiter in dem Sinne, dass ein Hinzufügen von Paaren zum Kondensat im Gleichgewicht möglich ist, wenn diese die Energie $2\mu_p$ besitzen. Im thermodynamischen Gleichgewicht ist $\mu = \mu_p$.

Durch die Existenz der Energielücke wird die I-U- Kennlinie des Tunnelkontakts stark verändert. Elektronen, die vom Normalleiter in den Supraleiter tunneln wollen, können bei kleinen Potentialdifferenzen nicht in den Supraleiter eindringen. Ein Tunnelstrom kann erst dann fließen, wenn ihre Energie genügend hoch ist. Deshalb wird man eine Kennlinie erwarten, bei der man zunächst eine Spannung am Kontakt beobachtet, aber kein Tunnelstrom fließt. Dieser setzt erst bei einer bestimmten Spannung $U = \Delta/e$ schlagartig ein. Der Anstieg des Tunnelstroms mit der Spannung ist sehr steil, da die Zustandsdichte der Quasiteilchenanregungen bei Energien direkt oberhalb der Energielücke divergiert. Der Tunneleffekt bietet somit eine Möglichkeit, die Grundvorstellung der Existenz einer Energielücke im Supraleiter zu überprüfen und diese Energielücke quantitativ zu bestimmen.

Bei Temperaturen $T > 0$ K ist die Tunnelkennlinie weniger scharf, behält aber ihre charakteristischen Züge. In dieser Anleitung kann nur eine kurze Übersicht über das Phänomen gegeben werden. Eine ausführliche Darstellung findet man in der angegebenen Literatur. Bitte lesen Sie sich die angegebenen Kapitel [1] und [2] sorgfältig durch. [3, 4] dient zur Vertiefung des Begriffs der Quasiteilchenanregung. Wir werden während des Praktikums Zeit haben, darüber zu diskutieren.

Abschließend noch einige Hinweise zu [1]:

Es wird dort das sogenannte Halbleiterbild des Supraleiters verwendet. In diesem Bild sind Cooper- Paare nicht eingezeichnet, sondern es ist die Zustandsdichte für Quasiteilchen als Funktion der Energie dargestellt. Die Darstellung gibt also Auskunft darüber, wie sich die Zahl der Zustände, in die im Supraleiter injiziert werden kann (oberer Ast) bzw. aus denen Elektronen extrahiert werden können (unterer Ast), als Funktion der Energie verändert. Ein leeres oberes Band bedeutet dabei, dass noch keiner dieser Plätze besetzt ist; ein volles unteres Band besagt, dass noch alle möglichen Plätze zur Extraktion zur Verfügung stehen.

3 Versuchsdurchführung

3.1 Herstellung des Tunnelkontaktes

Es wird ein Aluminium / Aluminiumoxid / Blei (Al / Al_2O_3 / Pb)- Tunnelkontakt auf einem Siliziumoxid (SiO_2)- Substrat hergestellt. Dazu werden das gereinigte Substrat und die verwendeten Elemente in die Aufdampfanlage eingebaut. Danach wird die Anlage auf einige 10^{-5} mbar evakuiert. Als erstes werden die Goldelektroden ($d = 100$ nm) durch eine Maske auf das Substrat gesputtert (sputtern s.u.). Danach wird die Maske gedreht und das Aluminium thermisch verdampft ($d = 50$ nm). Nach dem Aufdampfen von Aluminium wird in die Anlage Luft auf ca. 40 mbar eingelassen und somit die Aluminiumschicht oberflächlich oxidiert. Nach dem erneuten evakuieren der Anlage wird die Aufdampfmaske wieder gedreht und Blei thermisch verdampft ($d = 300$ nm). Somit entstehen zwei Tunnelkontakte.

3.2 Magnetronsputtern

Zwischen dem Target (Au) und dem Substrat (SiO_2) wird eine hohe Spannung angelegt (500-1000 V) (siehe Abbildung 1) und ein Arbeitsgas, in unserem Fall Argon, auf einige 10^{-2} mbar eingelassen.

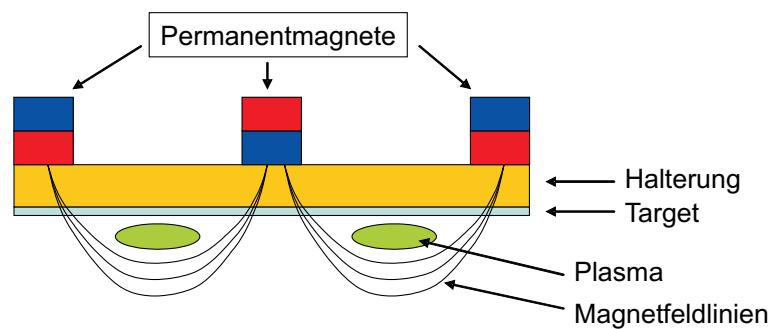


Abbildung 1: Aufbau und Funktionsweise eines DC- Magnetrons

Durch die Spannung wird das Argongas ionisiert und ein Plasma gezündet. Die Ar^+ -Ionen werden durch die Spannung auf das Target beschleunigt und schlagen aus diesem die Atome heraus, welche sich dann auf dem Substrat abscheiden. Dieser Prozess ist mit einer geringen Abtragsrate verbunden und wird in der Regel dadurch verstärkt, dass das Plasma unter dem Target gefangen wird. Durch eine geeignete Anordnung von Permanentmagneten am Target werden die Elektronen auf eine Kreisbahn unter dem Target gebracht, dabei werden große mittlere freie Weglängen erreicht. Die Argonatome die nun in das Plasma gelangen werden ionisiert und durch die anliegende Spannung auf das Target beschleunigt, wo sie die Goldatome herausschlagen.

3.3 Thermisches Verdampfen

In einer aus Wolframdraht gewickelten Spirale befindet sich ein Aluminiumstab. Der Wolframdraht wird zwischen zwei Elektroden eingespannt. Mit einer Stromquelle kann man durch den Draht einen Strom schicken der aufgrund des elektrischen Widerstandes von Wolfram zu einer Erwärmung führt. Je nach eingestellter Stromstärke schmilzt das Aluminium ($T_S = 933 \text{ K}$) und verdampft anschließend. Bei diesem Prozess ist es wichtig die oxidierte Oberfläche von Aluminium durch längeres Aufschmelzen zu reinigen.

Das Blei befindet sich in einem Wolframtiegel welcher ebenfalls zwischen zwei Elektroden eingespannt ist und resistiv geheizt wird. Um das Blei aufzuschmelzen und zu verdampfen sind wesentlich kleinere Leistungen erforderlich ($T_S = 600 \text{ K}$).

3.4 Schwingquarzwage

Um beim Abscheidungsverfahren die Schichtdicken überwachen zu können wird eine Schwingquarzwage benutzt. Dazu wird diese ebenfalls mit dem Material bedampft. Die Schwing-

quarzwaage besteht aus einem Quarzplättchen einer bekannten Masse und Fläche welches mit einer Frequenz von ca. 6 MHz betrieben wird. Durch das aufgedampfte Material verändert sich die Masse und somit die Eigenfrequenz des Schwingquarzes. Aus der Frequenzänderung kann man bei bekannter Dichte des abgeschiedenen Materials auf die Dicke schließen.

3.5 Aufdampfvorrichtung

Die Masken für die aufzudampfenden Materialien befinden sich in einem Kreis angeordnet auf einem Edelstahlblech. Das Blech kann dann mit Hilfe eines Schrittmotors gedreht werden, so dass sich die jeweilige Maske über dem Substrat befindet. Das Magnetron mit dem Target befindet sich in der Aufdampfanlage oben und die Elektroden für das thermische Verdampfen befinden sich am Boden der Kammer, somit muss nach dem Sputtern von Gold der Substrathalter so gedreht werden, dass danach wieder Aluminium und Blei verdampft werden können.

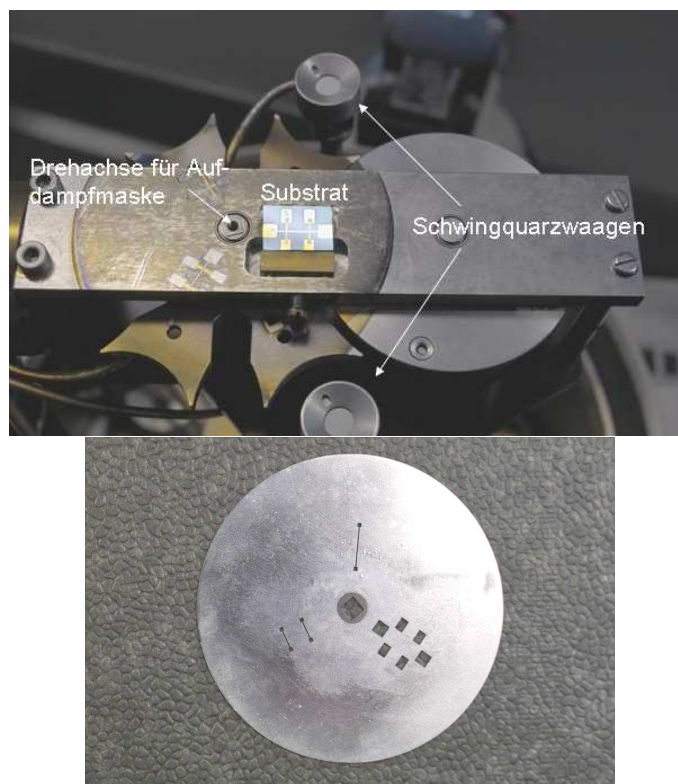


Abbildung 2: Substrathalter (oben) und Masken (unten)

3.6 Vakuumanlage

Die Vakuumanlage wird mit einer Drehschiebervorpumpe und Turbomolekularpumpe evakuiert. Dabei benutzt man die Vorpumpe um die Vakuumkammer grob zu evakuieren. Das ist notwendig beim ersten abpumpen und nach dem Belüften der Kammer zur Oxidation von Aluminium. Es gibt zwei Möglichkeiten am Rezipienten zu pumpen. Als erstes kann man nur mit der Vorpumpe pumpen dabei sind Ventile 5 und \ominus geschlossen und Ventil 1 offen oder man pumpt mit der Turbopumpe und dabei sind Ventile 5 und \ominus offen und Ventil 1 geschlossen. Dabei kann der Druck über eine Anzeige kontrolliert werden. Um das Aluminium oxidieren zu können wird über ein Belüftungsventil Luft bis auf ca. 40 mbar eingelassen. Das Prinzip der Aufdampfvorrichtung ist schematisch in folgender Abbildung 3 dargestellt.

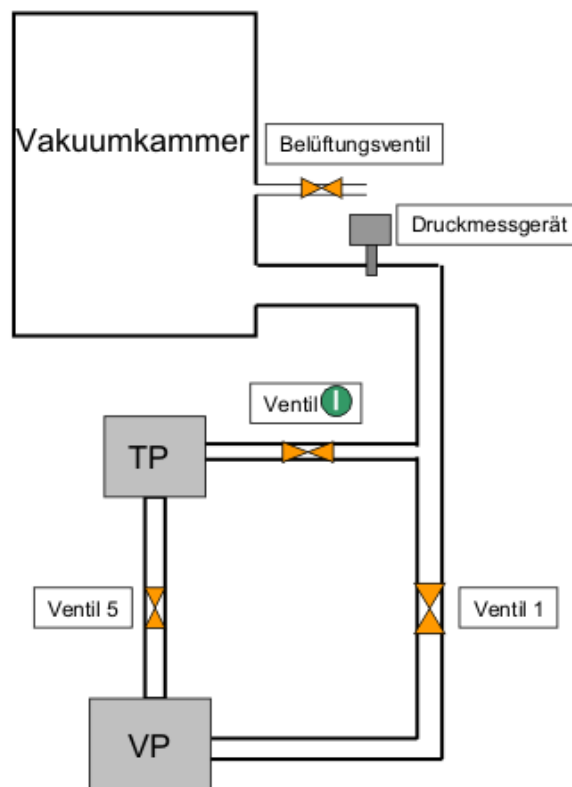


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Vakuumanlage und der dazugehörigen Pumpen (VP = Drehschiebervorpumpe, TP = Turbomolekularpumpe).

Das 15 x 10 mm große SiO₂- Substrat wurde aus einem 2" Wafer herausgeschnitten und mit Iso- Propanol gereinigt. Zum Aufdampfen des Aluminiums wird eine Spirale aus Wolframdraht verwendet (Drahtdurchmesser 1.0 mm), zum Aufdampfen des Bleis wird ein Wolframschiffchen (Blechstärke 0.11 mm) verwendet. Das Herstellen der Tunnelschicht geschieht nach einem Rezept, welches wir ausprobiert haben und von dessen Einhaltung die Qualität der Probe entscheidend abhängt. Nach dem das Substrat in den dafür vorgesehenen Halter eingebaut wurde und die zu verdampfenden Materialien sich in der Anlage befinden, kann diese evakuiert werden. Nach ca. 1 Stunde ist ein Druck von einigen 10⁻⁵ mbar erreicht und man kann mit der Herstellung der Tunnelkontakte beginnen. Es wird nicht nur ein Tunnelkontakt hergestellt, sondern es entstehen zwei Tunnelschichten, indem gleichzeitig zwei Pb- Schichten auf die oxidierte Al- Oberfläche aufgedampft werden.

3.7 Messung der Tunnelkennlinie

Das mit 2 Tunnelkontakten versehene Substrat wird in eine Messsonde eingebaut und kontaktiert. Zunächst wird bei Raumtemperatur die Normalleiter- Normalleiter- Tunnelkennlinie aufgenommen. Danach wird die Probe in einem Kryostat (Aufbau vgl. Abbildung 5) auf die Temperatur des flüssigen Heliums (4.2 K) abgekühlt. Bei dieser Temperatur ist das Blei bereits supraleitend ($T_{C,Pb} = 7.2$ K, $T_{C,Al} = 1.19$ K), so dass jetzt eine Normalleiter- Supraleiter- Kennlinie aufgenommen werden kann. Anschließend können durch Dampfdruckerniedrigung Temperaturen bis 1.5 K erreicht werden, so dass die Temperaturabhängigkeit des Normalleiter- Supraleiter- Tunnelkontaktes gemessen werden kann.

Die I- U- Kennlinien der Tunnelkontakte werden mit einer sogenannten 4- Punkt Methode durchgeführt (vgl. Abbildung refmessanordnung). Durch dieses Messprinzip wird der Einfluss der Zuleitungen und weiterer Widerstände im Stromkreis vermieden. Für die Messung des Tunnelkontaktes 1 (TK 1) wird durch die Zuleitungen I_{1,2} und I₁ der Messtrom geschickt und der zum Tunnelkontakt gehörende Spannungsabfall wird an den Kontakten U_{1,2} und U₁ gemessen. Dementsprechend sind für TK 2: I_{1,2} und I₂ die Stromzuleitungen und U_{1,2} und U₂ die Spannungszuleitungen.

Der Strom wird von einer Gleichstromquelle erzeugt. Für die Messung der Kennlinie wird der Strom von einem maximalen negativen bis zu einem maximalen positiven Wert durchgeführt und dabei der am Tunnelkontakt auftretender Spannungsabfall gemessen. Beide Signale werden digital im Computer registriert.

4 Auswertung und Protokoll

1. Erläutern Sie im Protokoll die für die Auswertung benötigten Begriffe: Zustandsdichte, Fermiverteilung, Besetzungsdichte
2. Beschreiben Sie den Tunneleffekt. Was passiert mit der Wellenlänge und Amplitude der transmittierten Welle? Wodurch ist in unserem Versuch die Höhe und die Breite der Barriere gegeben?
3. Was sind Cooper- Paare und wie entstehen diese (mikroskopische Theorie der Supraleitung)? Erläutern Sie den Begriff der Quasiteilchen und begründen Sie das Anregungsspektrum der Quasiteilchen. Was ergibt sich daraus für die Zustandsdichte des Supraleiters?
4. Begründen Sie die Form der NL/NL- Tunnelkennlinie und bestimmen Sie den Tunnelwiderstand. Wie ändert sich dieser mit der Temperatur?
5. Wieso ist zur Messung des Tunnelwiderstandes eine Vierpunktmessung notwendig?
6. Begründen Sie die Form der NL/SL- Tunnelkennlinie und ihre Veränderung mit sinkender Temperatur.
7. Bestimmen Sie die Energielücke des Bleis aus dem Spannungswert U_{max} , bei dem die Steigung dI/dU der Kennlinie bei der tiefsten Messtemperatur maximal ist. Man berechne $2\Delta(T)$ sowohl in der Einheit Elektronenvolt als auch als ein Vielfaches von $k_B T_{C,Pb}$ (dabei ist k_B die Boltzmann- Konstante und $T_{C,Pb} = 7.2$ K die kritische Temperatur von Blei).

Begründen Sie, warum das Auswerteverfahren für eine grobe Auswertung vernünftig ist (qualitativ). Berechnen Sie einen korrigierten Wert $\Delta_K(T)$ mit Hilfe der folgenden Beziehung:

$$\Delta_K(T) = \left[(eU_{max} - ak_B T)^h - (bk_B T)^h \right]^{1/h} \quad (1)$$

mit $a = 1.113$; $b = 2.107$ und $h = 2.138$

Diese Beziehung berücksichtigt, dass für $T > 0$ K Quasiteilchenanregungen im Supraleiter vorhanden sind und deshalb der maximale Anstieg des Tunnelstroms bei einer Spannung erfolgt, die etwas höher liegt als der Wert V_m , bei dem das elektrochemische Potential des Normalleiters die Oberkante der Energielücke des Supraleiters überschreitet [5]. Berechnen Sie $2\Delta_K(T) / k_B T_{C,Pb}$ und vergleichen Sie das

Ergebnis mit dem Literaturwert für Blei $2\Delta_{pb}(T = 1 \text{ K}) / k_B T_{C,pb} = 4.33 \pm 0.10$ [6].
Vergleichen Sie $\Delta_K(T)$ weiterhin mit der Vorhersage der BCS- Theorie. Wieso unterscheidet sich der gemessene Wert von dem theoretischen?

4.1 Bemerkungen zum Protokoll

Lesen sich bitte gründlich die in der Mappe enthaltene Literatur durch und beantworten Sie im Protokoll oben gestellten Fragen. Jeder Praktikant soll innerhalb von 2 Wochen ein eigenes Protokoll abgeben. Dabei sollen vorallem der theoretische Teil sowie die Beantwortung der Fragen in eigenen Worten geschrieben werden.

Literatur

- [1] W. Buckel, R. Kleiner: „*Supraleitung*“, Wiley-VCH Verlag
Kap.3 „Die Cooper- Paarung“
- [2] C. Enss, S. Hunklinger: „*Tieftemperaturphysik*“, Springer Verlag
Kap.10.4 „Mikroskopische Theorie der Supraleitung“
- [3] R. Tidecks: „*Nichtgleichgewichtssupraleitung in stromtragenden Haarkristallen*“, Dissertation, Universität Göttingen 1980, Kap. IX „Quasiteilchenanregungen“, p. 107-114
- [4] R. Tidecks: „*Current-induced nonequilibrium phenomena in quasi-one-dimensional superconductors*“, Habilitation, Universität Göttingen 1990, Kap. 5.2 „BCS Ground State and Quasiparticle Excitations“, p. 21-25
- [5] G.E. Pike J. Appl. Phys. **42**, 883 (1971)
- [6] Ivar Giaever and Karl Megerle Phys. Rev. Vol. 122, **4**, pp. 1101 (1961)

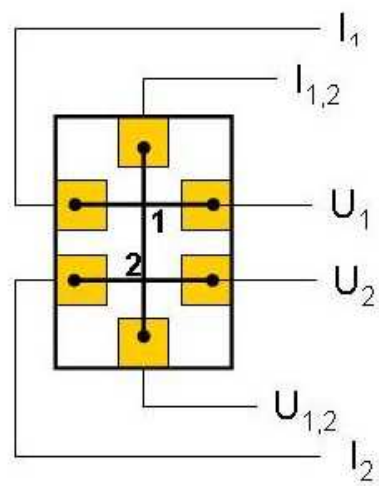


Abbildung 4: Darstellung der Messanordnung

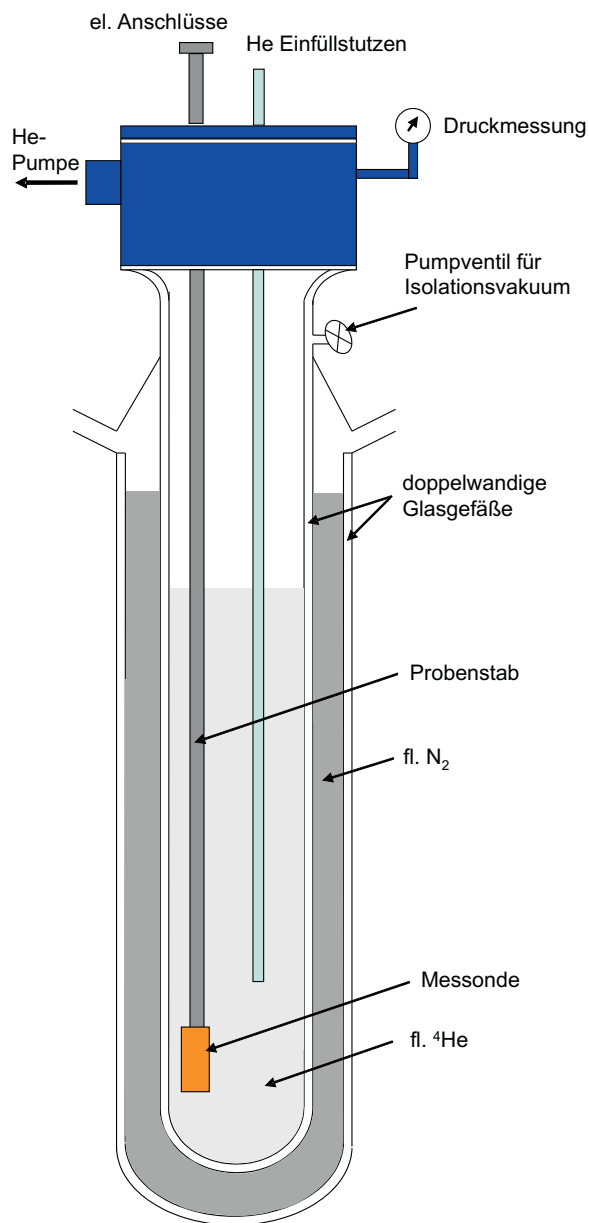


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines ⁴He- Verdampfungskryostaten