



FAKULTÄT FÜR PHYSIK
PHYSIKALISCHES PRAKTIKUM FÜR FORTGESCHRITTENE
PRAKTIKUM MODERNE PHYSIK

Gruppe Nr. 14

Kurs: **Mo**

WS 13/14

Versuch: Dünne Schichten

Namen: Fleig, Georg

Krause, Marcel

Assistent: Dr. Marz, Michael

durchgeführt am: 13. Januar 2014

Protokollabgabe am: _____

Note gesamt

+

-

0

Datum: _____

anerkannt: _____

Bemerkung:

I. Vorbereitung

Vorwort

In diesem Versuch werden wir uns mit der Herstellung und der Leitfähigkeit dünner Metallschichten auseinandersetzen. Dabei untersuchen wir vor allem die Änderung des Widerstandes bei verschiedenen Gegebenheiten.

Versuchsaufbau

Zunächst muss die zu untersuchende Probe hergestellt werden. Zur Herstellung dünner Schichten von Metallen kann man sich der Vakuumtechnik bedienen. Im Versuch werden wir dazu in einem Rezipienten ein Hochvakuum von $10^{-6} - 10^{-5}$ mbar erzeugen. Dies erreichen wir mit einer Öldiffusionspumpe, der allerdings noch eine Drehschieberpumpe zur Erzeugung eines Vorvakuums vorgeschaltet wird. Der Aufbau ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

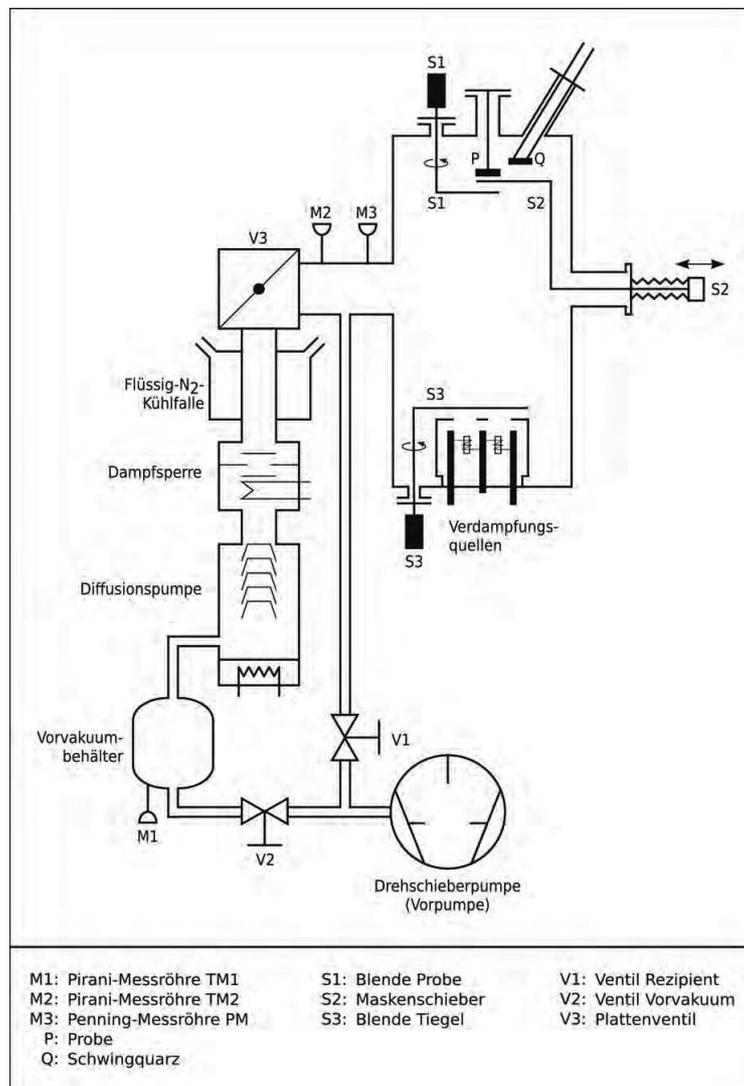


Abbildung 1: Schematische Skizze der Vakuumapparatur [1].

Innerhalb des Rezipienten befinden sich drei beheizbare Tiegel, die mit Indium bzw. Silber gefüllt sind. Durch Aktivieren der Heizung eines Tiegels wird das darin enthaltene Material erhitzt und verdampft. Trifft es auf eine kalte Oberfläche auf, kann es dort kondensieren. Genau diese Methode wird verwendet, um dünne Schichten von Silber respektive Indium auf ein Glassubstrat aufzutragen. Zwischen Glassubstrat und Tiegel ist zudem eine Blende angebracht, um unerwünschtes Aufdampfen von Material zu verhindern.

Um die Dicke der aufgedampften Schicht bestimmen zu können, wird ein Schwingquarz eingesetzt. Auf diesem wird während des Bedampfens des Glassubstrates ebenfalls eine Schicht aufgedampft. Durch die Massenzunahme ändert sich die Eigenfrequenz der Schwingung, wodurch sich letztendlich die Schichtdicke bestimmen lässt. Diese wird uns direkt vom Steuergerät des Schwingquarzes ausgegeben.

Vorbereitung der Probe

Für die spätere Bestimmung des Widerstands der aufgedampften Schichten müssen zunächst elektrische Kontaktflächen auf das Glassubstrat aufgedampft werden. Dazu dampfen wir eine dünne Schicht Indium von etwa 30 \AA auf, damit eine weitere Schicht von etwa 500 \AA Silber, die letztendlich als Kontakt dient, besser haftet. Die Kontakte werden so aufgetragen, dass danach zwei Zwischenräume für die zu untersuchenden Schichten frei bleiben. Anschließend bauen wir das Glassubstrat in den vorgesehenen Probenhalter ein, damit die Kontaktflächen mit Kabeln verbunden und uns damit zur Untersuchung zugänglich gemacht werden. Zur Bestimmung des Widerstandes kann entweder klassisch über einen Vierpunkt der Spannungsabfall bei konstantem Gleichstrom mit einem Voltmeter gemessen werden, oder man verwendet eine Wheatstone-Brückenschaltung für genauere Ergebnisse bei geringen Widerstandsänderungen.

Aufgabe 1: Messung der Schichtdickenabhängigkeit des Widerstands von Silber

In einen der Freiräume soll Silber aufgedampft und gleichzeitig der Widerstand in Abhängigkeit der Schichtdicke vermessen werden. Während des Aufdampfens werden sich zunächst Inseln aus Silber ausbilden, die dann im weiteren Verlauf anwachsen und sich miteinander verbinden. Die Silberschicht ist also zu Beginn nicht homogen. Selbst ohne Kontakt der Inseln ist ein Stromfluss durch Tunneln der Elektronen möglich. Während sich die Inseln vergrößern, sollte der Widerstand leicht abnehmen, da die Tunnelwahrscheinlichkeit der Elektronen zunimmt. Da der resultierende Stromfluss insgesamt dennoch sehr gering ist, erwarten wir beim Übergang von einzelnen Inseln zu einer zusammenhängenden Schicht einen starken Abfall des Widerstandes.

Aufgabe 2: Zeitlicher Verlauf des Widerstandes nach dem Aufdampfen

Nachdem eine dünne Silberschicht auf das Glassubstrat aufgedampft wurde, werden wir das Verhalten des Widerstandes beobachten. Die Menge an Silber ändert sich also nicht mehr. Wir erwarten, dass der Widerstand mit zunehmender Zeit weiter abnimmt und sich dann einem unteren Grenzwert annähert. Das liegt daran, dass Fehler in der Kristallstruktur des Silbers durch thermische Bewegung mit der Zeit ausgeglichen werden. Dadurch reduziert sich die Anzahl der Störstellen an denen die Elektronen beim Durchfluss streuen können. Entsprechend nimmt so der Widerstand ab. Da nur endlich viele Störstellen korrigiert werden können, wird der Widerstand nach einiger Zeit nicht weiter abnehmen können.

Aufgabe 3: Aufdampfen bei tiefen Temperaturen

Ähnlich zu Aufgabe 1 soll eine Probe mit Silber hergestellt werden, allerdings erfolgt das Aufdampfen auf das mit flüssigem Stickstoff gekühltes Glassubstrat. Durch die sehr tiefen Temperaturen erwarten wir, dass sich das Silber grobkörnig auf der Oberfläche absetzt. Dadurch erhöht sich der Widerstand im Gegensatz zu dem bei derselben Schichtdicke bei Raumtemperatur.

Aufgabe 4: Verhalten des Widerstandes in Abhängigkeit von der Temperatur

In diesem Versuchsteil soll das Verhalten des Widerstands in Abhängigkeit der Temperatur untersucht werden. Hierfür werden wir den Probenhalter mit flüssigem Stickstoff zunächst abkühlen und während des anschließenden Erwärmens eine Widerstandsmessung durchführen. Wir erwarten eine Zunahme des Widerstandes während des Erwärmens, da die thermische Anregung der Gitteratome im Kristall zunimmt. Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit für die Streuung von Elektronen an Phononen, was letztendlich in einem höheren Widerstand resultiert.

Aufgabe 5: Widerstandsverlauf beim weiteren Aufdampfen von Ag oder In

Als abschließender Versuchsteil soll das Verhalten des Widerstandes bei weiterem Aufdampfen von Silber oder Indium auf die bisherige Silberschicht untersucht werden. Dabei ist der Zusammenhang zwischen Schichtdicke d_S und dem Widerstand R durch

$$R = \frac{L \cdot \rho}{b \cdot d_S} \quad (1)$$

gegeben. Hier bezeichnet ρ den spezifischen Widerstand, b die Breite des Glassubstrats und L den Abstand zwischen den Kontaktpunkten. Durch das Aufdampfen von weiteren Silberschichten auf das be-

stehende Silber nimmt die Schichtdicke d_S zu und damit der Widerstand ab.

Wird Indium auf das Silber aufgetragen, so erwarten wir, dass der Widerstand zunächst zunimmt. Das rührt daher, dass Indium eine zu Silber verschiedene Kristallstruktur aufweist und es zur Ausbildung von Kristallfehlern im Übergangsbereich von Silber und Indium kommt. Nimmt die Dicke der Indiumschicht weiter zu, entwickelt diese mit der Zeit eine ausreichende Leitfähigkeit, wodurch der Widerstand insgesamt wieder abnimmt und unter den der ursprünglichen Silberschicht fallen sollte. Das entspricht etwa dem Verlauf in Abbildung 2, der durch das Aufdampfen von Gold auf zwei unterschiedlich präparierte Goldschichten entsteht.

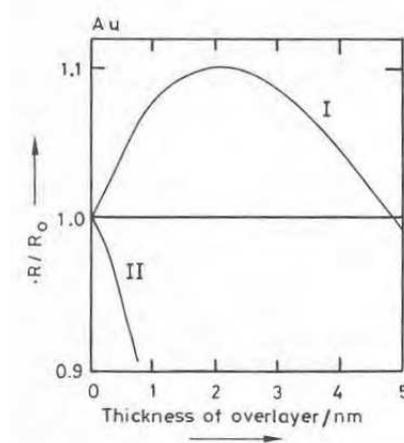


Abbildung 2: Normiertes Verhalten des Widerstandes von Gold bei Raumtemperatur während des Aufdampfens von weiterem Gold. Schicht (I) wurde zuvor erhitzt, Schicht (II) befand sich durchgehend bei Raumtemperatur [2].

Literatur

[1] Vorbereitungsmappe zum Versuch *Dünne Schichten*

[2] Schuhmacher, Dieter: *Surface Scattering Experiments with Conduction Electrons*, Springer, Tracts in Modern Physics (Springer, Berlin 1993).

II. Auswertung

Aufgabe 0: Vorbereiten der Probe

Zunächst wurde eine Probe hergestellt, an welcher die späteren Messungen durchgeführt werden sollten. Dazu wurden auf einem Glassubstrat elektrische Kontakte unter Hochvakuum-Bedingungen aufgedampft. Das gereinigte Glasplättchen der Breite $b = 1,035 \text{ cm}$ befand sich bereits im Rezipienten, sodass direkt mit dem Aufdampfen begonnen werden konnte. Zunächst wurde eine Indiumschicht der Dicke 30 \AA als Träger sowie anschließend eine 500 \AA dicke Silberschicht als Leiter aufgetragen. Das Aufdampfen erfolgte dabei durch eine Blende, welche zwei Streifen der Breiten $L_1 = 0,535 \text{ cm}$ sowie $L_2 = 0,540 \text{ cm}$ abdeckte, sodass diese Stellen des Glases nicht mit In und Ag beschichtet wurden.

Anschließend wurde die Probe aus dem Rezipienten entnommen und vorsichtig in den Probenhalter eingebracht, wo sorgfältig die elektrischen Kontakte hergestellt wurden. Dabei haben wir darauf geachtet, mit den Kontakten nicht auf der Silberschicht zu kratzen, da dies die Leitfähigkeit erheblich beeinträchtigt hätte. Durch einen kurzen Test mit einem Multimeter haben wir sichergestellt, dass die Kontakte korrekt angebracht wurden. Abschließend wurde der Probenhalter wieder in den Rezipienten eingebracht und das Vakuum hergestellt, sodass die Probe bereit für die eigentlichen Messungen war.

Aufgabe 1: Messung der Schichtdickenabhängigkeit des Widerstands von Silber

Zunächst wurde von uns die Blende so eingestellt, dass die freie Schicht 1 mit Silber bedampft wurde. Die Nummerierung folgt dem Schema, wie es in der Vorbereitungshilfe angegeben wurde. Die entsprechende Länge L_1 der freien Schicht, welche gleichzeitig der Abstand der Elektroden darstellt, ist in Aufgabe 0 angegeben. Zunächst haben wir den Heizstrom des Wolframdrahts für die Verdampfertiegel schrittweise erhöht, bis sich eine konstante Verdampfungsrate des Silbers eingestellt hat. Nach Öffnen der Blende zur Probe war es möglich, die freie Schicht 1 bei einer konstanten Rate mit Silber zu bedampfen.

Mit Hilfe einer Digitalkamera wurde über einen Zeitraum von fünf Minuten die an der Probe abfallende Spannung U bei fest vorgegebener Stromstärke I in Abhängigkeit der Schichtdicke d_S aufgenommen und später in Form eines Messprotokolls zusammengetragen. Im Bereich unter $d_S \approx 135 \text{ \AA}$ war ein schwacher linearer Abfall im Verlauf der Spannung zu sehen, welcher allerdings an der Begrenzung der mit dem Messgerät feststellbaren Spannung liegt. Da dieser Bereich für die Diskussion nicht relevant ist, wurde er nicht weiter betrachtet.

Ab etwa $d_S \approx 140 \text{ \AA}$ Schichtdicke ergab sich eine schnelle Abnahme in der abfallenden Spannung. In diesem Bereich wurde die Stromstärke zweimal ausgehend von $I = 1 \mu\text{A}$ jeweils um einen Faktor 10 erhöht, um die Genauigkeit in der gemessenen Spannung zu erhöhen. Aus den fest eingestellten Stromstärken und den gemessenen Spannungen lässt sich vermöge

$$R = \frac{U}{I} \quad (2)$$

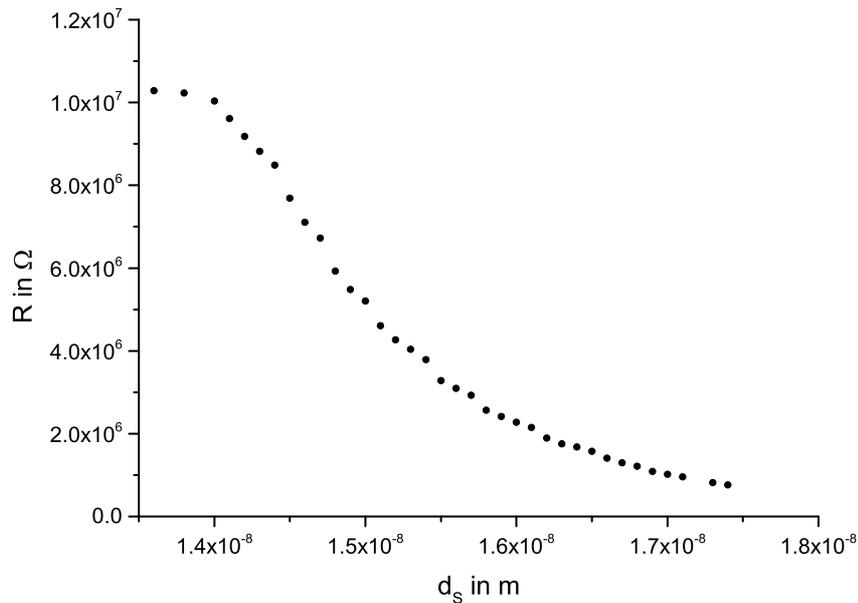


Abbildung 3: Widerstand R der Probe 1 über der Schichtdicke d_S des aufgedampften Silbers. Man erkennt einen schnellen Abfall in dem Bereich, in dem sich die Silberinseln zu einer durchgängigen Schicht zusammenschließen.

unmittelbar der Widerstand der Probe 1 bestimmen. Dieser ist in Abbildung 3 über der Schichtdicke d_S aufgetragen. Es lässt sich gut erkennen, wie der Widerstand ab einer Schichtdicke von etwa $d_S \approx 140 \text{ \AA}$ rasch abnimmt. Die Vermutung aus unseren Vorbereitungen hat sich also bestätigt. Beim Zusammenschluss der Silberinseln zu einer durchgängigen Schicht nimmt die Leitfähigkeit der Probe 1 rasch zu, was gleichbedeutend ist mit einem schnellen Abfall des Widerstands.

Anschließend lässt sich der Widerstand über Gleichung (1) mit den Geometrieangaben b und L_1 aus Aufgabe 0 in den spezifischen Widerstand ρ umrechnen, welcher in Abbildung 4 über der Schichtdicke d_S aufgetragen ist. Zunächst lässt sich ein linearer Anstieg im spezifischen Widerstand erkennen. Dieser findet sich in dem zuvor ignorierten Messbereich wieder, welcher eine konstante Spannung für eine zunehmende Schichtdicke lieferte. In Gleichung (1) erkennt man, dass ein fälschlicherweise konstanter Widerstand bei steigender Schichtdicke einen linearen Anstieg in d_S produziert.

Ab einer Schichtdicke von etwa $d_S \approx 140 \text{ \AA}$ sinkt der spezifische Widerstand ebenfalls schnell ab, wie es in Abbildung 3 schon für den Widerstand zu erkennen war. Auch hier lässt sich der Abfall durch den Zusammenschluss der Silberinseln zu einer leitenden Schicht erklären. Laut Vorbereitungshilfe ist in beiden Diagrammen ein Abfall des Widerstands proportional zu d_S^{-1} zu erwarten. Mit Origin wurde versucht, eine solche Kurve an die Messdaten anzupassen, allerdings war der beobachtete Abfall stärker in d_S . Es ist daher zu vermuten, dass dieser Abfall aufgrund einer ständigen Umordnung der Kristallstrukturen des Silbers, durch thermische Anregung oder durch weitere, unbekannte Effekte gebremst wird.

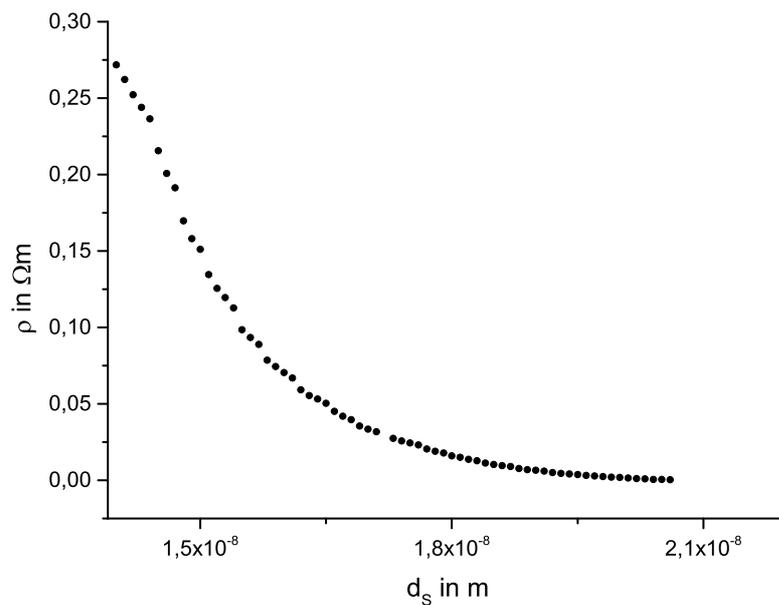


Abbildung 4: Spezifischer Widerstand R der Probe 1 über der Schichtdicke d_s des aufgedampften Silbers. Man erkennt nach einem zunächst linearen Anstieg einen schnellen Abfall in dem Bereich, in dem sich die Silberinseln zu einer durchgängigen Schicht zusammenschließen.

Aufgabe 2: Zeitlicher Verlauf des Widerstandes nach dem Aufdampfen

Am Ende der Versuchsreihe zu Aufgabe 1 wurde die Blende zum Silbertiegel geschlossen, sodass kein weiteres Aufdampfen auf Probe 1 erfolgte. Mit der Digitalkamera wurde dann über einen Zeitraum von fünfzehn Minuten der Verlauf der Spannung U in Abhängigkeit der Zeit t nach Schließen der Blende aufgenommen und anschließend erneut in ein Messprotokoll eingetragen. Nach Ablauf der fünfzehn Minuten wurde die Probe für weitere 45 Minuten sich selbst überlassen, bevor ein letzter Messwert aufgenommen wurde.

Mit Hilfe der bekannten Stromstärke I lässt sich analog zu Aufgabe 1 der Widerstand R der Probe 1 in Abhängigkeit von der Zeit t seit Schließen der Blende bestimmen. Dieser ist in Abbildung 5 dargestellt. Man erkennt deutlich, dass der Widerstand mit der Zeit stark abfällt. Auch hier bestätigten sich unsere Vermutungen aus der Vorbereitung. Wird kein weiteres Silber auf die Probe aufgedampft, so ordnet sich das vorhandene Metall langsam gleichmäßig in einem Gitter an und baut Korngrenzen ab. Dadurch wird die Streuung von Elektronen am Gitter verringert, wodurch die Leitfähigkeit stark zu- und der Widerstand abnimmt. Bereits nach kurzer Zeit stellt sich jedoch ein Gleichgewicht aus weiterem Korngrenzenabbau sowie Aufbau neuer Störstellen durch thermische Bewegung ein, sodass der Widerstand einem Grenzwert entgegen strebt.

Anschließend konnte vermöge Gleichung (1) der Widerstand R wieder in den spezifischen Widerstand

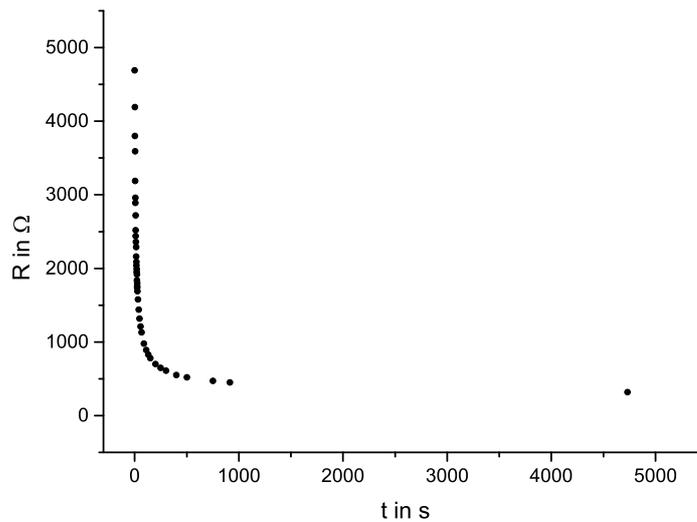


Abbildung 5: Widerstand R der Probe 1 über der Zeit t seit Schließen der Blende zum Silbertiegel. Der Messreihe ging das Aufdampfen einer Silberschicht voraus, wie es in Aufgabe 1 beschrieben wurde. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Widerstand auch ohne weiteres Aufdampfen von Silber mit der Zeit stark abfällt.

ρ umgerechnet werden. Dieser ist in Abbildung 6 über der Zeit dargestellt. Da die Form genau der aus Abbildung 5 folgt, ist deren Diskussion analog zum vorigen Abschnitt.

Aufgabe 3: Aufdampfen bei tiefen Temperaturen

Durch Kühlung mit flüssigem Stickstoff haben wir den Probenhalter auf eine Temperatur von etwa 103 K abgekühlt. Anschließend dampften wir analog zu Aufgabe 1 Silber auf den zweiten Probenplatz auf und beobachteten das Verhalten des Widerstandes durch eine Spannungsmessung. Der Verlauf ist in Abbildung 7 dargestellt. Er gleicht dem aus Aufgabe 1, bei der die Probe bei Raumtemperatur bedampft wurde, daher sei für die Diskussion auf diese Aufgabe verwiesen. Allerdings ist der Abfall des Widerstandes bereits bei einer Schichtdicke von $d_S \approx 90 \text{ \AA}$ zu beobachten. Dieses Verhalten wird später in Aufgabe 4 genauer untersucht und diskutiert. In der Vorbereitung erwarteten wir einen erhöhten Widerstand durch das grobkörnigere Aufdampfen der Silberatome. Dies konnten wir allerdings im Versuch nicht feststellen. Die gemessenen Widerstandsbereiche aus Aufgabe 1 und 3 sind fast identisch.

Auch für diese Messung konnten wir über Beziehung (1) und der Breite L_2 der 2. Probe den spezifischen Widerstand berechnen. Der Verlauf, in Abbildung 8 dargestellt, ähnelt entsprechend dem Widerstandsverlauf auch wieder dem Verlauf aus Aufgabe 1. Das Anpassen einer Funktion proportional zu d_S^{-1} war hier ebenfalls nicht durchführbar.

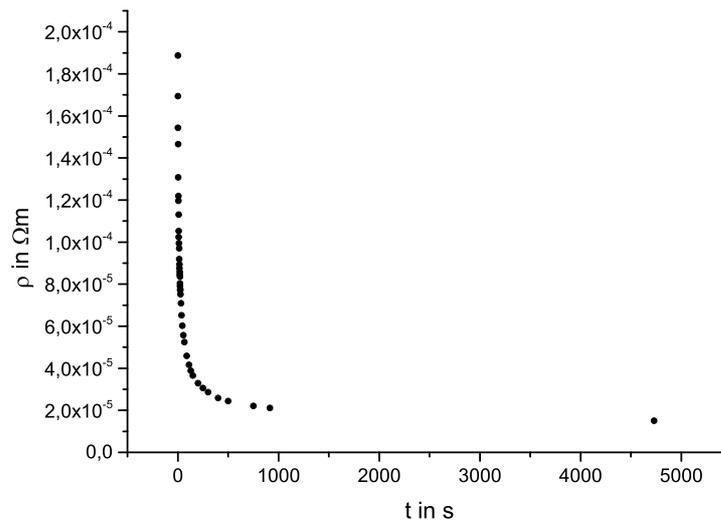


Abbildung 6: Spezifischer Widerstand R der Probe 1 über der Zeit t seit Schließen der Blende zum Silbertiegel. Der Messreihe ging das Aufdampfen einer Silberschicht voraus, wie es in Aufgabe 1 beschrieben wurde. Es ist deutlich zu erkennen, dass der spezifische Widerstand ohne weiteres Aufdampfen von Silber mit der Zeit stark abfällt.

Aufgabe 4: Verhalten des Widerstandes in Abhängigkeit von der Temperatur

Es galt das Verhalten des Widerstandes in Abhängigkeit der Temperatur zu untersuchen. Wir verwendeten hierfür den bereits heruntergekühlten Probenhalter mit den Silberproben 1 und 2. Probe 1 wurde bei Raumtemperatur aufgedampft, bei Probe 2 handelte es sich um die bei tiefen Temperaturen hergestellte Probe. Um das weiterhin abgekühlte System zu erwärmen, wurde Pressluft in den Kühlkreislauf geleitet. In Abbildung 9 ist der Widerstandsverlauf bei zunehmender Temperatur der 1. Probe dargestellt.

Der Verlauf entspricht nicht dem erwarteten in T linearen Verlauf. Eigentlich hätte der Widerstand kontinuierlich mit der Temperatur steigen sollen. Zu sehen sind aber immer wieder Einbrüche im Widerstand. Das rührt daher, dass wir die Heizung für den Silbertiegel nicht vollständig deaktiviert hatten und so immer wieder Silber auf die Probe aufgedampft wurde. Dabei stieg die Schichtdicke und entsprechend sank der Widerstand. Erst ab einer Temperatur von etwa 220 K haben wir die Heizung deaktiviert. Es stellte sich ein annähernd linearer Verlauf in T ein. Da dieser allerdings weiterhin starke Fluktuationen aufweist, verzichten wir an dieser Stelle auf den Fit einer Geraden an die Daten.

Die Größenordnung, in welcher sich der Widerstand aufhält, ist wesentlich niedriger als die in Aufgabe 1. Erklären lässt sich dies mit der in Aufgabe 2 durchgeführten zeitlichen Untersuchung des Widerstandes bei einem permanent angelegten Strom. Dadurch konnten sich Korngrenzen abbauen und der Widerstand erheblich reduziert werden.

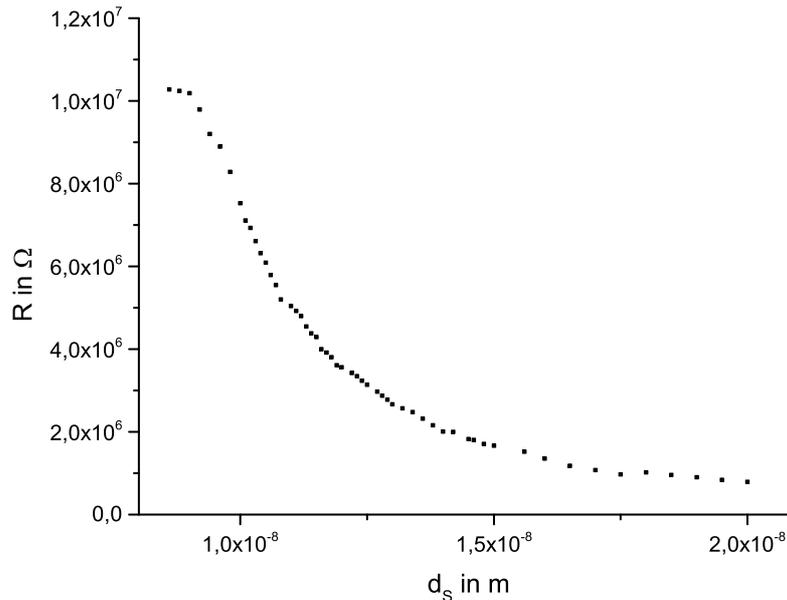


Abbildung 7: Widerstand R der Probe 2 über der Schichtdicke d_s des aufgedampften Silbers. Wie zuvor bei Probe 1 lässt sich ein Abfall in dem Bereich, in dem sich die Silberinseln zu einer durchgängigen Schicht zusammenschließen, erkennen.

Probe 2 war nicht von dem zusätzlichen Silberdampf betroffen, entsprechend zeigt der Verlauf in Abbildung 10 ein ziemlich gutes lineares Verhalten ab einer Temperatur von $T \approx 240$ K. Zur besseren Veranschaulichung haben wir an die entsprechenden Punkte eine Gerade gefittet. Den plötzlichen Abfall beim letzten Messpunkt können wir uns nicht erklären. Wir vermuten, dass es sich um einen Ablesefehler handelt und haben diesen Punkt beim Fit ausgeschlossen. Das lineare Verhalten lässt sich, wie bereits in der Vorbereitung diskutiert, durch die zunehmende Streuung der Elektronen an den Phononen erklären. Mit Hilfe der Fitparameter kann der Widerstand in Abhängigkeit der Temperatur im linearen Bereich über die Beziehung

$$R(T) = (0,141 \cdot T - 34,9) \pm (0,009 \cdot T + 2,33) 10^6 \Omega \quad (3)$$

berechnet werden. Zur Berechnung der Fehler wurde die Größtfehlerabschätzung verwendet, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass die beiden Fitparameter korreliert sind.

Aufgabe 5: Widerstandsverlauf beim weiteren Aufdampfen von Ag oder In

Im letzten Versuchsteil sollten wir das Verhalten des Widerstandes während des Aufdampfens von Silber bzw. Indium auf eine bestehende Silberschicht untersuchen. Zur Bestimmung des Widerstandes verwendeten wir eine Wheatstone-Brückenschaltung. Mit dieser Schaltung konnten wir durch manuelles Nachregeln eines variablen Widerstandes den der Probe bestimmen. Zunächst dampften wir einige Lagen Silber auf Probe 1 auf und beobachteten den Widerstand. Anschließend wiederholten wir den Vorgang mit Indium, welches ebenfalls auf Probe 1 aufgedampft wurde.

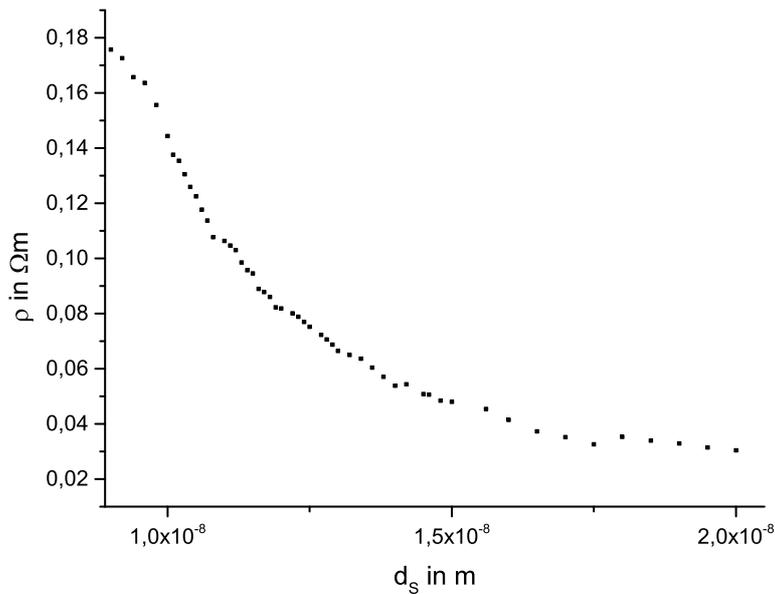


Abbildung 8: Spezifischer Widerstand R der Probe 2 über der Schichtdicke d_S des aufgedampften Silbers. Man erkennt nach einem zunächst linearen Anstieg einen Abfall in dem Bereich, in dem sich die Silberinseln zu einer durchgängigen Schicht zusammenschließen.

Zum besseren Vergleich der beiden Widerstandsverläufe haben wir die gemessenen Widerstände auf den ursprünglichen Widerstand R_0 normiert, der bei einer zusätzlichen Schichtdicke von Δd_S vorhanden war. Das Resultat ist in Abbildung 11 dargestellt. Der Verlauf entspricht unseren Erwartungen aus der Vorbereitung. Das Auftragen von Silber auf Silber resultiert entsprechend Gleichung (1) direkt in einem Abfall des Widerstandes, da die Schichtdicke zunimmt. Hingegen dazu steigt der Widerstand beim Auftragen von Indium auf Silber aufgrund der unterschiedlichen Kristallstruktur zunächst an. Ab einer zusätzlichen Schichtdicke von $\Delta d_S \approx 10 \text{ \AA}$ ist der ursprüngliche Widerstand erreicht und nimmt bei weiteren Indiumlagen ab.

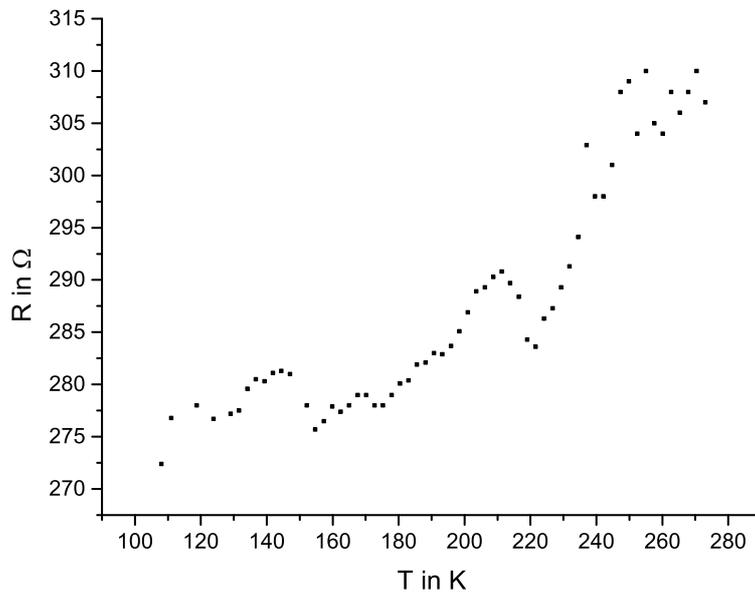


Abbildung 9: Widerstand in Abhängigkeit der Temperatur bei Probe 1. Insgesamt ist ein Anstieg des Widerstandes bei zunehmender Temperatur erkennbar. Allerdings ist der Verlauf nicht ideal, da die Probe weiterhin bedampft wurde.

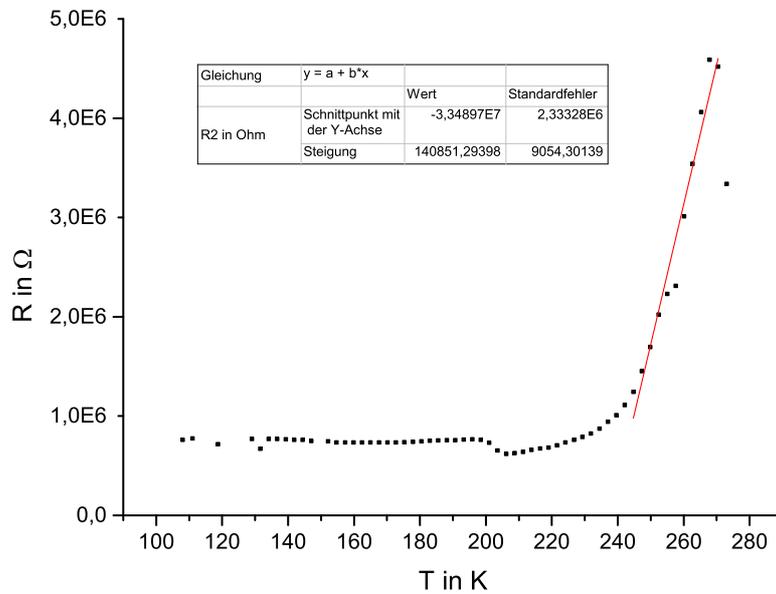


Abbildung 10: Widerstand in Abhängigkeit von der Temperatur bei Probe 2.

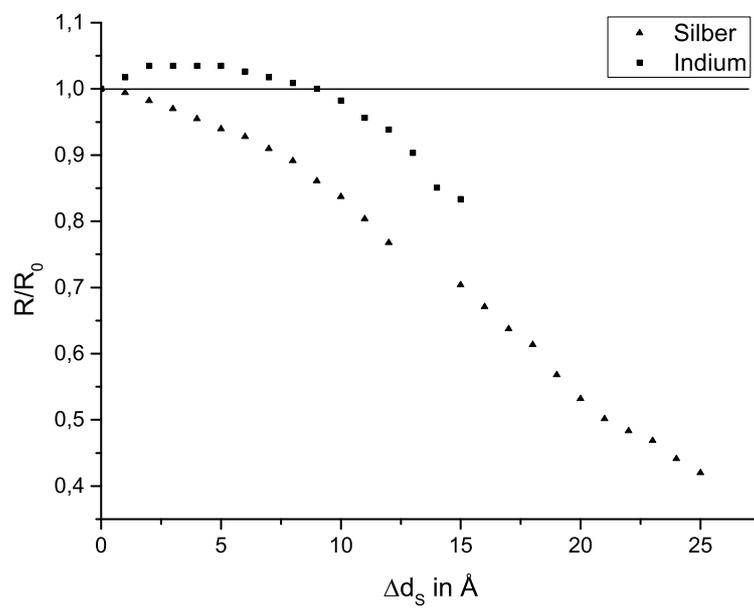


Abbildung 11: Änderung des normierten Widerstandes $\frac{R}{R_0}$ bei Aufdampfen von Silber bzw. Indium auf eine bestehende Silberschicht.