

Gruppe Nr. 25

Kurs: ☒ Mo

☐ Mi

SS 2014

Versuch: Dünne Schichten

Namen: Tobias Renz

Raphael Schmager

Assistent: Sebastian Skacel

durchgeführt am: 19.05 2014

Protokollabgabe am: _____

Note gesamt

☐ +

☐ -

☐ 0

Datum: _____

anerkannt: _____

Bemerkung:

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen	1
1.1 Vakuumherzeugung und Vakuummessung	1
1.1.1 Vakuumpumpen	1
1.1.2 Vakuummessung	2
2 Experiment	3
2.1 Ziel des Versuchs	3
2.2 Aufbau	3
2.3 Vorbereitung der Proben	5
2.4 Aufgabe 1: Schichtdickenabhängigkeit R des Widerstands von Silber	6
2.5 Aufgabe 2: Zeitlicher Verlauf $R(t)$ nach dem Aufdampfen	7
2.6 Aufgabe 3: Abhängigkeit des Widerstandes beim Aufdampfen weniger Monolagen Ag bzw. In	7
2.7 Aufgabe 4: Verlauf $R(t)$	7
3 Auswertung	7
3.1 Aufgabe 1: Messung der Schichtdickenabhängigkeit des Widerstands von Silber	7
3.2 Aufgabe 2: Zeitlicher Verlauf des Widerstands nach dem Aufdampfen	9
3.3 Aufgabe 3: Abhängigkeit des Widerstands von der Temperatur	11
3.4 Aufgabe 4: Widerstand beim weiteren Aufdampfen von Ag und In	15
4 Anhang	18

Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene 2

Dünne Schichten

Protokoll von
Tobias Renz und **Raphael Schmager**

Gruppe: **25**

Durchgeführt am 19.05 2014

1 Grundlagen

1.1 Vakuumerzeugung und Vakuummessung

Zunächst werden die Funktionsweisen der im Versuch verwendeten Instrumente zur Erzeugung und Messung des Vakuums erläutert. Ein Vakuum wird je nach Druck p in die folgenden Druckbereiche eingeteilt [nach: <http://de.wikipedia.org/wiki/Vakuum>]:

Großvakuum: $1 \text{ mbar} < p < 300 \text{ mbar}$

Feinvakuum: $10^{-3} \text{ mbar} < p < 1 \text{ mbar}$

Hochvakuum: $10^{-7} \text{ mbar} < p < 10^{-3} \text{ mbar}$

Ultrahochvakuum: $10^{-12} \text{ mbar} < p < 10^{-7} \text{ mbar}$

Extrem hohes Vakuum: $p < 10^{-12} \text{ mbar}$

1.1.1 Vakuumpumpen

Drehschieberpumpen:

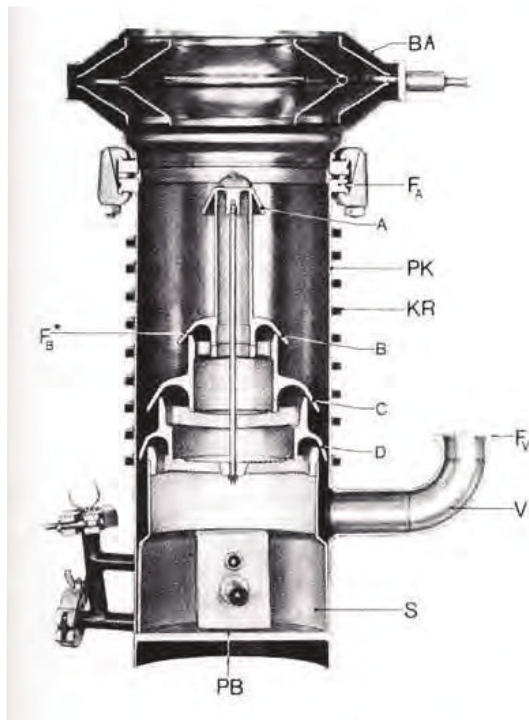
Die Drehschieberpumpe wird meist als Vorpumpe genutzt und kann ein Großvakuum oder sogar ein Feinvakuum erzeugen. Eine Drehschieberpumpe besteht aus einem im Inneren zylindrischen Gehäuse (Stator). In diesem Gehäuse dreht sich ein exzentrischer Rotor, in dessen Schlitzen Schieber angebracht sind. Diese Schieber werden durch die Zentrifugalkraft an die Gehäusewand gedrückt. Diese teilen den Raum zwischen Rotor und Stator in unterschiedlich große Volumina ein. Durch den Einlass gelangt das Gas in den sogenannten Schöpfraum, welcher sich bei der Rotation vergrößert. Die Saugwirkung kommt durch das sich vergrößernde Volumen zustande. Hat der Schöpfraum das maximale Volumen erreicht, verschließt ein Schieber den Schöpfraum zum Einlass. Beim Weiterdrehen verkleinert sich der Schöpfraum und das Gas wird verdichtet und die Verdichtungskammer wird zum Auslass geöffnet. Das Gas entweicht und ein neuer Zyklus beginnt.

Diffusionspumpen:

Die Diffusionspumpe ist eine Hoch- bis Ultrahochvakuumpumpe und basiert auf dem Prinzip einer Strahlpumpe. Die Pumpe besteht aus einem rohrförmigen Pumpenkörper, der oben mit einem Hochvakuumflansch versehen ist. Die darüber befindliche Dampfsperre verhindert das Eindringen von Treibmitteldampf in den Vakuumbehälter. Am Boden befindet sich der Siede- raum für das Treibmittel. An der Seite befindet sich das Vakuumrohr, das mit der Vorpumpe verbunden ist. Im Inneren befindet sich das Düsensystem. Das Treibmittel wird erhitzt, verdampft und steigt in den Dampfrohren des Innenteils nach oben, wo es in die Düsen gelangt. Durch die Düsen wird der Treibmitteldampf nach unten umgelenkt. Hinter dem engsten Querschnitt expandiert der Dampf und gelangt in den Bereich zwischen Düsensystem und gekühlter Wand. In dem Raum unter jeder Düsenkappe entsteht ein schirmförmiger Dampfstrahl der mit hoher Übergeschwindigkeit nach unten strömt. Die abzupumpenden Gasteilchen treten durch

den Hochvakuumflansch ein, gelangen in den Dampfstrahl der verschiedenen Düsen und nehmen durch Stöße deren Geschwindigkeitsrichtung an und werden nach unten abtransportiert. Das komprimierte Gas tritt in das Vorvakuumrohr ein und wird abgepumpt.

1

**Bild 8.10**

Schnitt durch eine vierstufige Diffusionspumpe mit aufgesetzter Dampfsperre (Baffle). A, B, C, D Ringdüsen; BA Dampfsperre (Baffle); F_A Hochvakuumflansch; F_V Vorvakuumflansch; F_B engster Querschnitt; KR Kühlrohr (Wasserkühlung); PB Pumpenboden; PK Pumpenkörper; V Vorvakuumrohr; S Siederaum.

Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Diffusionspumpe. Aus: Vorbereitungsmappe

1.1.2 Vakuummessung

Wärmeleitungsvakuummeter - Pirani Messröhre

Wärmeleitungsvakuummeter messen den druckabhängigen Wärmeverlust eines erhitzten Drahts. Sie dienen zur Messung für das Grob- und Feinvakuum. Der erhitzte Draht wird als Teil einer Wheatstoneschen Brücke verwendet um den Draht mit der nötigen Leistung zu versorgen und seinen Widerstand (und damit die Temperatur) zu messen. Eine Möglichkeit der Druckmessung ist die Drahttemperatur konstant zu halten und die dazu nötige Heizleistung zu messen. Die benötigte Leistung ist ein Maß für den Druck.

Ionisationsvakuummeter - Penning-Vakuummeter

Um niedrige Drücke zu messen, wird beim Ionisationsvakuummeter eine ausreichend hohe Spannung zwischen zwei Metallelektroden angelegt um vorhandene Elektronen zu beschleunigen und durch Stoßprozesse Gasteilchen zu ionisieren. Es bildet sich eine Gasentladung, wobei der Gasentladungsstrom druckabhängig ist und als Messgröße dient. Um sehr niedrige Drücke zu messen, wird ein Magnetfeld so angelegt, dass die Elektronen auf ihrem Weg von der Kathode

zur Anode Spiralbahnen durchführen. Dadurch wird der Weg der Elektronen verlängert und eine höhere Ionenausbeute erreicht. Mit einem Ionisationsvakuummeter lassen sich somit Drücke im Hoch- Ultrahochvakuumbereich messen.

2 Experiment

2.1 Ziel des Versuchs

In diesem Versuch soll der Umgang mit einer Hochvakuumapparatur zum Aufdampfen dünner metallischer Schichten erlernt werden. Dabei wird während des Schichtwachstums der elektrische Widerstand gemessen.

2.2 Aufbau

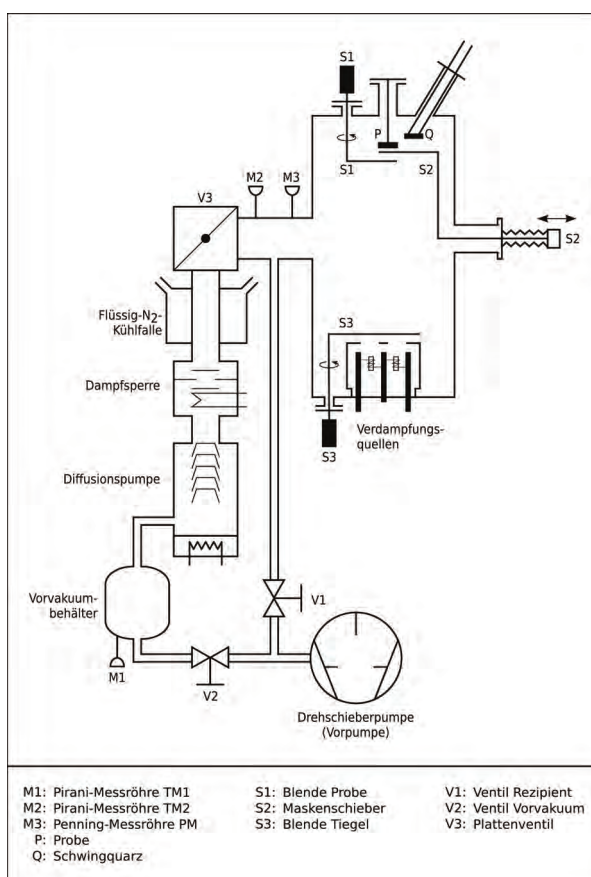


Abbildung 2: Schematischer Versuchsaufbau. Aus: Vorbereitungsmappe

Um die Schichten auf die Probe aufzudampfen wird die in Abbildung 2 und 4 gezeigte Vakuumanlage genutzt. Die Messvorrichtung ist in Abbildung 3 zu sehen. Durch eine Öldiffusionspumpe mit vorgeschalteter Drehschieberpumpe wird im Rezipienten ein Hochvakuum erzeugt. Im Rezipient befinden sich beheizbare Tiegel, die mit Metallen (Ag, In) befüllt sind. Nach

Erreichen des Hochvakuums werden die Tiegel erhitzt und die Metalle verdampft. Trifft das Metall auf das Glassubstrat kondensiert es. Durch verschiedene Blenden können die einzelnen Metalle an die gewünschte Probenstelle aufgedampft werden. Die Schichtdicke des aufgedampften Substrats wird durch einen Schwingquarz bestimmt. Durch das Bedampfen des Quarzes nimmt die Masse zu und die Eigenfrequenz wird niedriger.

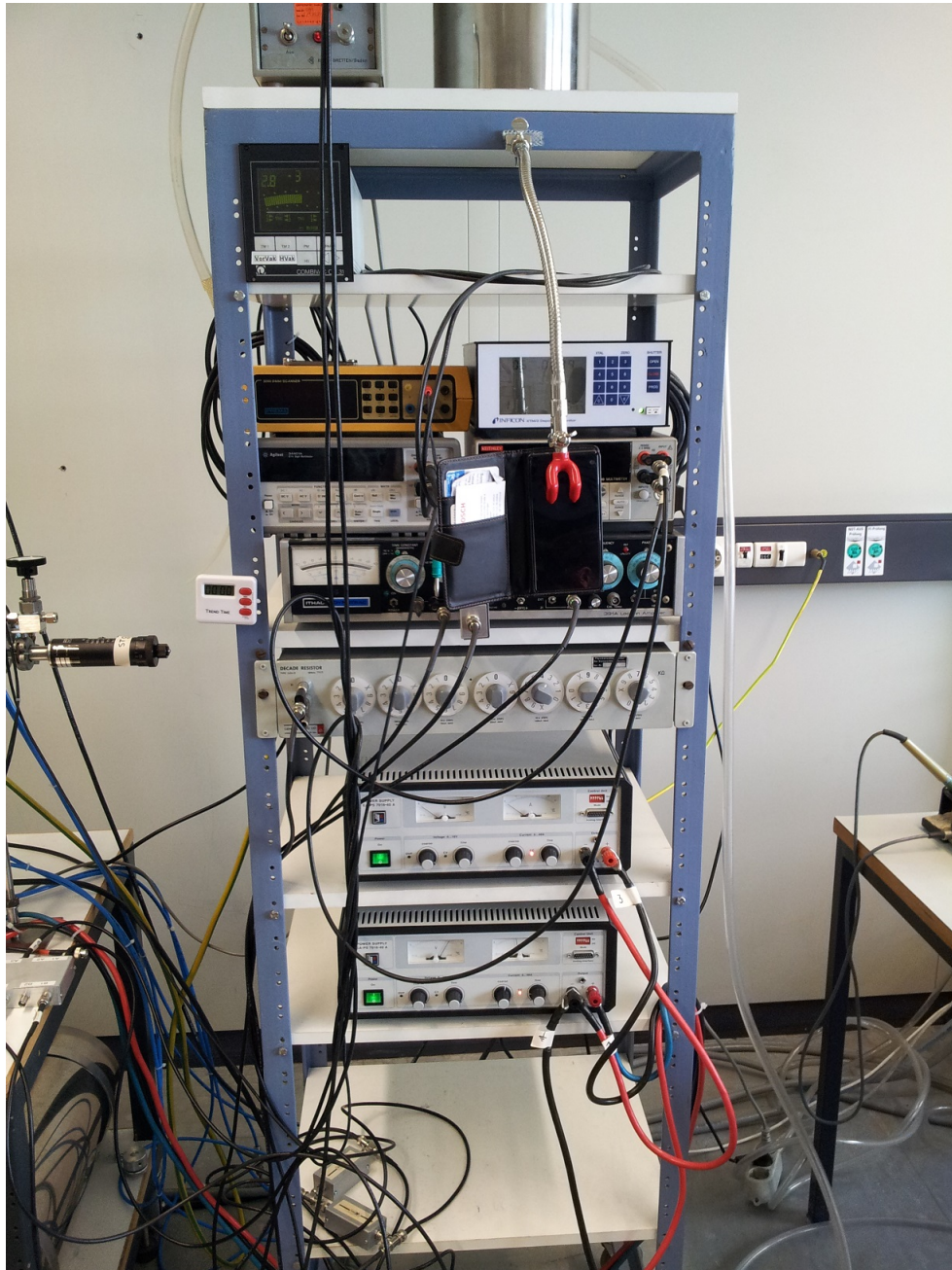


Abbildung 3: Versuchsstand im Praktikumslabor: Messvorrichtung.

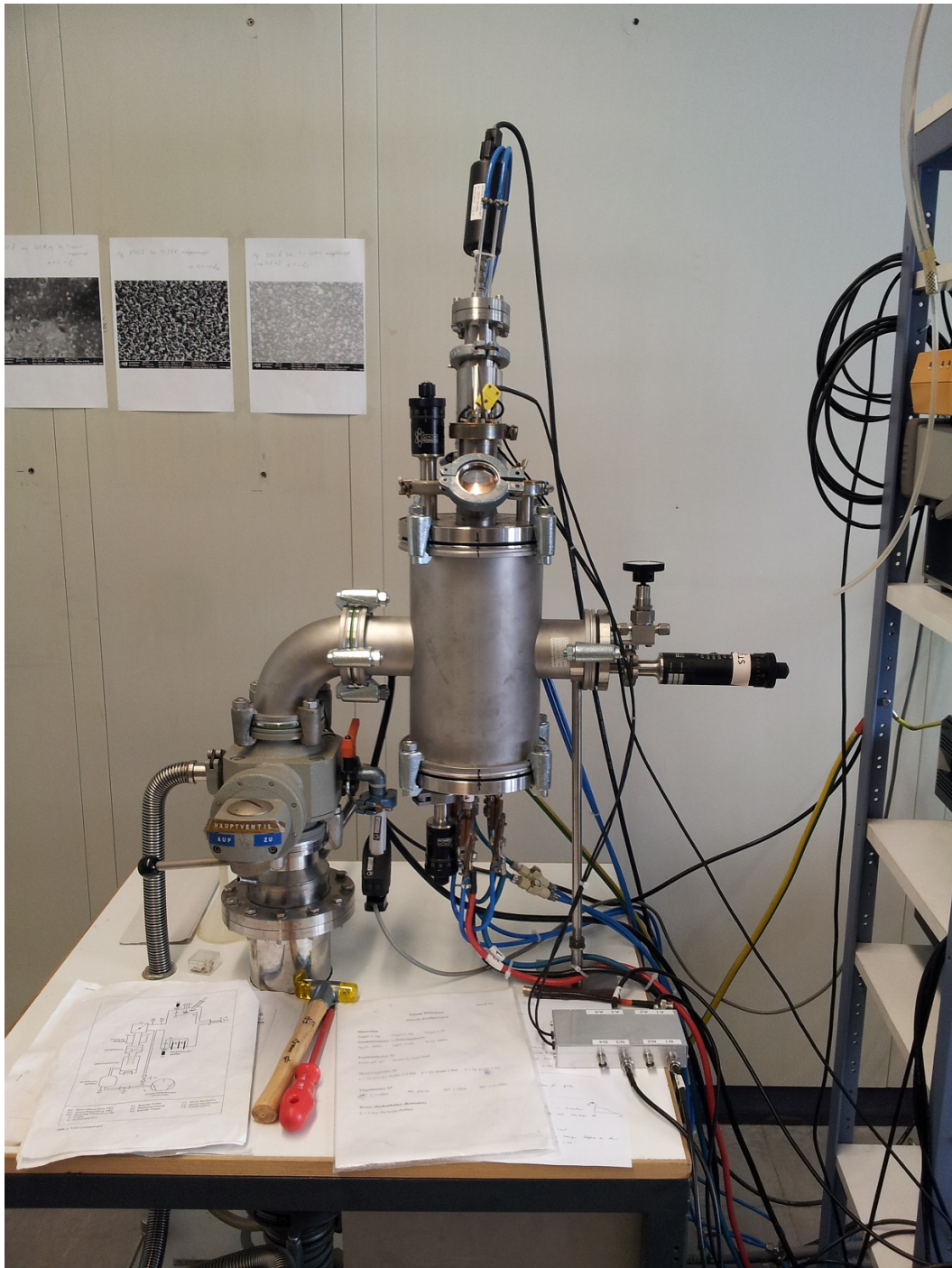


Abbildung 4: Versuchsstand im Praktikumlabor: Vakuumapparatur in der die Probe eingebaut wurde.

2.3 Vorbereitung der Proben

Um später den elektrischen Widerstand messen zu können, werden zunächst Kontakte auf das Glassubstrat aufgedampft. Dazu wird auf den Halter eine Schicht Indium als Untergrund (ca.

30 Å) und eine Silberschicht als Kontakt (ca. 500 Å) aufgedampft. Es werden drei Kontakte zur elektrischen Kontaktierung aufgetragen, so dass zwei Zwischenräume für die zu untersuchende Schicht frei bleiben. Der Widerstand kann entweder über eine Vierpunkt oder eine Brückenschaltung gemessen werden. Bei der Vierpunktmethode werden vier Messspitzen auf einer Probe angebracht. Über die beiden äußeren wird ein bekannter Strom angelegt und zwischen den beiden Inneren wird die Spannung gemessen.

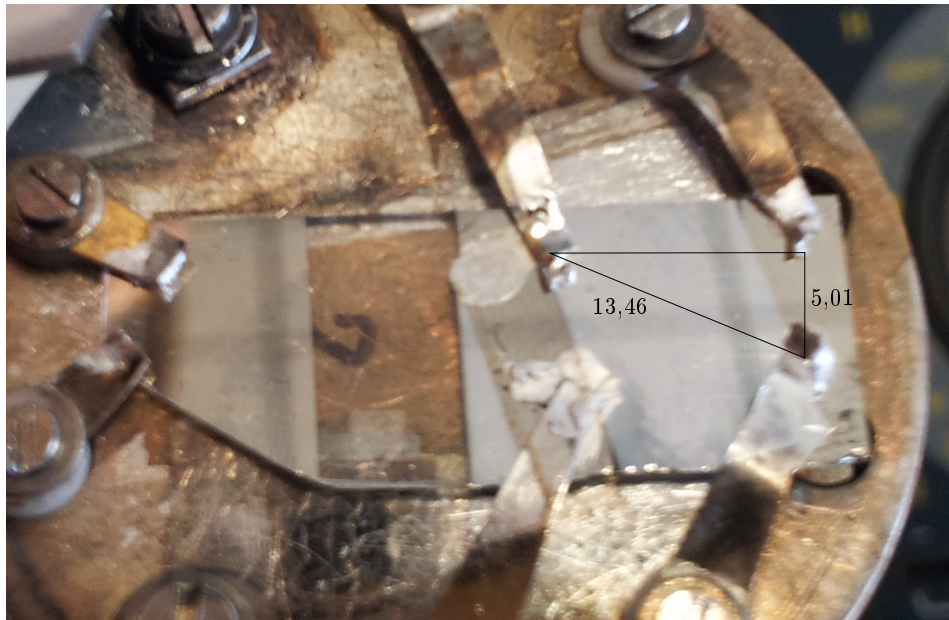


Abbildung 5: Bedampfte Probe. Links ist der freie Streifen auf dem Substrat erkennbar. Hier wurde nichts aufgedampft. Die bedeckte Schicht auf der rechten Hälfte der Probe (Blende 1) wurde von uns mit Silber und Indium bedampft und untersucht.

Bei den Aufgaben soll neben dem absoluten Widerstand R auch der spezifische Widerstand ρ bestimmt werden. Dazu benötigt man den Widerstand R , die Schichtdicke d_s sowie die von den Probenabmessungen abhängigen Größen b und L . Die Größe b gibt die Breite und L die Länge der Probe an, durch welche der Strom fließt. Die Bestimmung dieser Größen ist in Abbildung 5 dargestellt und haben folgende Ausdehnungen: $b = 5,01$ mm; $L = 13,46$ mm. Der spezifische Widerstand lässt sich folgendermaßen berechnen:

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

2.4 Aufgabe 1: Schichtdickenabhängigkeit R des Widerstands von Silber

Es soll der Widerstand in Abhängigkeit der Silberschichtdicke beim aufdampfen gemessen werden. Beim Aufdampfen werden sich zunächst Inseln aus Silber ausbilden, wobei ein Stromfluss somit nur über Tunneleffekte möglich ist. Sobald sich die Inseln verbinden und die Silberschicht homogen ist, sollte der Widerstand stark sinken.

2.5 Aufgabe 2: Zeitlicher Verlauf $R(t)$ nach dem Aufdampfen

Die Blende wird geschlossen. Die Menge an Silber ändert sich nun nicht mehr und der Widerstand soll in Abhängigkeit der Zeit gemessen werden. Besitzt das Silber noch Fehler in der Kristallstruktur gibt es Streuung von Elektronen an Störstellen und Defekten, was zu einem höheren Widerstand führt. Diese Fehler werden durch thermische Bewegungen im Laufe der Zeit ausgeglichen und der Widerstand sollte sinken.

2.6 Aufgabe 3: Abhängigkeit des Widerstandes beim Aufdampfen weniger Monolagen Ag bzw. In

In diesem Versuchsteil soll untersucht werden, wie sich der Widerstand ändert, wenn weitere Lagen Silber oder Indium aufgedampft werden.

Wird die Silberschichtdicke verändert, so besitzt der Widerstand folgende Abhängigkeit:

$$R = A + \frac{B}{d} \quad (2)$$

wobei d die Schichtdicke beschreibt. Wir erwarten deshalb eine Abnahme des Widerstandes bei zunehmender Schichtdicke.

Wird Indium auf die Silberschicht aufgetragen, so sollte der Widerstand, durch Streuung an der zu Silber verschiedenen Kristallstruktur, zunächst steigen. Bei ausreichend dicker Indium Schicht sollte der Widerstand durch die Leitfähigkeit der Indium Schicht wieder fallen.

2.7 Aufgabe 4: Verlauf $R(t)$

Der Probenhalter soll gekühlt werden und die Abhängigkeit des Widerstands von der Temperatur gemessen werden. Für den temperaturabhängigen Teil des Widerstand ist hauptsächlich die Elektron-Phonon Streuung zuständig. Durch Abkühlen nimmt die thermische Anregung der Gitteratome im Kristall ab und die Elektron-Phonon Streuung nimmt ab. Deshalb sollte der Widerstand für niedrige Temperaturen niedriger sein.

3 Auswertung

3.1 Aufgabe 1: Messung der Schichtdickenabhängigkeit des Widerstands von Silber

Nach dem Aufdampfen der Kontaktschicht wurde die Probe nach dem Belüften des Rezipienten ausgebaut und auf einen anderen Halter montiert. Dieser ist in Abbildung 5 zu sehen. Die Kontaktierung wurde wie in Abschnitt 2.3 beschrieben durchgeführt.

Anschließend kam die Probe wieder in die Anlage. Ein Vakuum von 2,5 mPa hat sich durch erneutes Evakuieren eingestellt. Nun wurde der Strom, welcher den Tiegel mit Silber beheizt, schrittweise auf $I=21\text{ A}$ erhöht. An der Ausleseelektronik des Schwingquarz war ein konstante Rate von $0,6\text{ \AA/s}$ abzulesen. Gemessen wurde nun der Spannungsabfall über der Probe bei

konstantem Strom. Die Messwerte befinden sich in Tabelle 1 im Anhang.

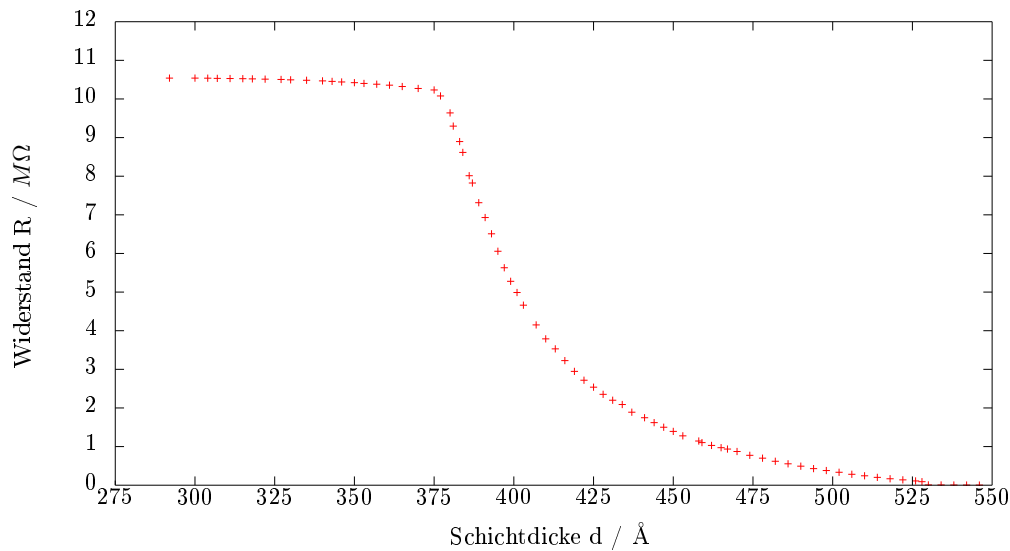


Abbildung 6: Widerstand R in Abhängigkeit der Schichtdicke d . Fällt der Widerstand unter die messbare Grenze so fällt er rasch ab bis auf einen Wert von $3,13 \text{ k}\Omega$.

Ab einer Schichtdicke von etwa $375 \text{ \AA}$ fällt die Spannung rasch ab. Folglich verringert sich der Widerstand nach $R = \frac{U}{I}$. In Abbildung 6 ist die gemessene Abhängigkeit dargestellt. Unsere Erwartungen haben sich so bestätigt. Die Leitfähigkeit ($\propto \frac{1}{R}$) nimmt rasch zu, nachdem sich die einzelnen Inseln zu einer flächendeckenden Silberschicht ausbilden können.

Nach Gleichung 1 lässt sich der spezifische Widerstand in Abhängigkeit der Schichtdicke auftragen. Dies ist in Abbildung 7 zu sehen. Die Werte für $b = 5,01$ und $L = 13,46$ sind in Abbildung 5 zu sehen. Beide Werte werden hier ohne Einheiten angegeben, da sie als Verhältnisse in die Formel eingehen und lediglich relative Größenverhältnisse wiedergeben.

Zu beachten ist hier, dass der Anstieg des spezifischen Widerstands mit zunehmender Schichtdicke in der Tatsache resultiert, dass die gemessene Spannung in diesem Bereich einen Maximalwert besitzt. Dies liegt vermutlich an der Auflösungsgrenze des verwendeten Messgeräts. Sinnvolle Ergebnisse für den spezifischen Widerstand sind demnach nur ab einer Schichtdicke von $375 \text{ \AA}$ zu betrachten.

Die Abhängigkeit $R \propto \frac{1}{d}$ sowie $\rho \propto \frac{1}{d}$ kann nicht explizit erkannt werden. Der Abfall des (spez.) Widerstands ist bei $375\text{-}450 \text{ \AA}$ deutlich steiler und gegen Ende bei $500 \text{ \AA}$ flacher als eine Kurve nach Gleichung 2. Es ist daher zu Vermuten, dass direkt nach dem Aufdampfen eine Umordnung stattfindet. Die permanente Umordnung lässt den Widerstand damit schneller als $\frac{1}{d}$ abfallen.

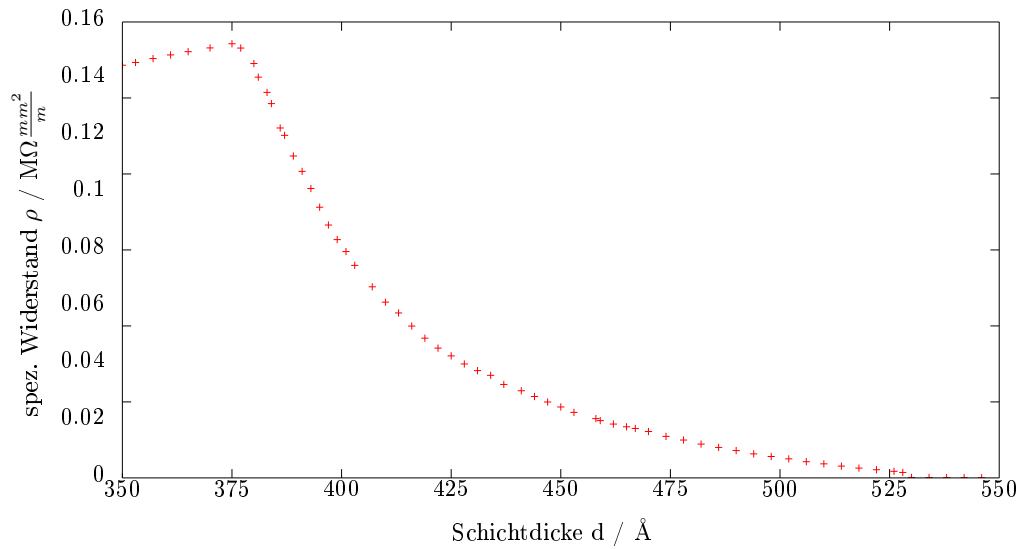


Abbildung 7: Normierung von Abbildung 6 auf die Schichtdicke und von Strom durchflossene Fläche. ρ Bezeichnet den spezifischen Widerstand der Probe.

3.2 Aufgabe 2: Zeitlicher Verlauf des Widerstands nach dem Aufdampfen

Nachdem die Schichtdicke von 500 Å aufgetragen wurde, wurde durch Schließen der Blende der Aufdampfprozess gestoppt und der zeitliche Verlauf der Spannung gemessen. Der Druck während dieser Messung betrug ca. 1,5 mPa. Der Widerstand lässt sich aus der Spannung und der konstanten Stromstärke berechnen und ist in Abbildung 8 dargestellt. Außerdem wurde wie schon in Aufgabe 1 der spezifische Widerstand berechnet und in Abbildung 9 über der Zeit aufgetragen.

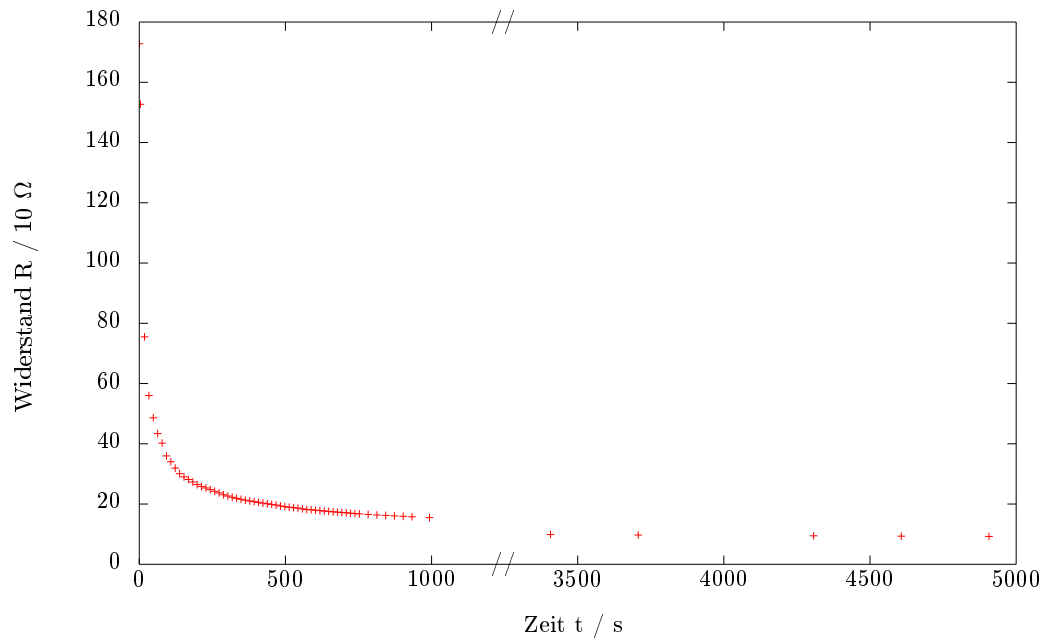


Abbildung 8: Zeitlicher Verlauf des Widerstands nach dem Aufdampfen.

Vergleicht man den absoluten Widerstand R (Abbildung 8) mit dem spezifischen Widerstand ρ (Abbildung 9) wird deutlich, dass der Verlauf für beide Größen gleich ist. Dies liegt daran, dass die Schichtdicke von Silber konstant ist und der spezifische Widerstand sich vom absoluten Widerstand nur um einen konstanten Faktor unterscheidet. Wird im folgenden von Widerstand gesprochen ist sowohl der Verlauf des absoluten als auch des spezifischen Widerstand gemeint.

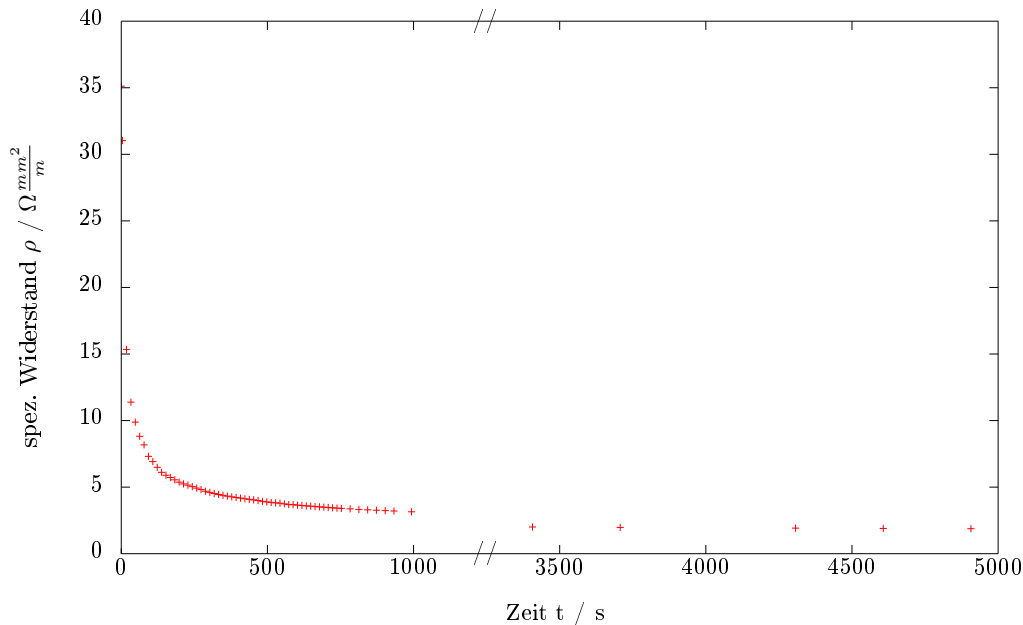


Abbildung 9: Zeitlicher Verlauf des spezifischen Widerstands nach dem Aufdampfen.

Betrachtet man sich nun den Verlauf des Widerstandes über der Zeit, erkennt man zunächst einen starken Abfall des Widerstands, der sich für große Zeiten einem konstanten Wert annähert. Dieser Verlauf ist, wie schon in der Vorbereitung beschrieben, zu erwarten, da sich das aufgedampfte Silber ordnet und somit Störstellen und Korngrenzen im Gitter abgebaut werden.

3.3 Aufgabe 3: Abhängigkeit des Widerstands von der Temperatur

Bevor wir den Widerstand in Abhängigkeit der Temperatur gemessen haben, wurde durch Auffüllen der Flüssig-N₂-Kühlfalle mit neuem Stickstoff das Vakuum verbessert. Die folgende Messung wurde bei einem Druck von ca. 0,78 mPa durchgeführt. Um die Temperaturabhängigkeit zu messen, wurde der Probenhalter mit flüssigem Stickstoff auf eine Temperatur von 90 K abgekühlt. Der Widerstand in Abhängigkeit der Temperatur wurde sowohl beim Abkühlvorgang als auch bei Aufwärmvorgang gemessen. Die Temperatur wurde hierbei nicht direkt in Kelvin sondern als Spannung angezeigt. Die angezeigte Spannung kann folgendermaßen umgerechnet werden:

$$T(K) = 25,717U(mV) + 273. \quad (3)$$

Da sich auch hier der absolute und der spezifische Widerstand nur um einen konstanten Faktor unterscheiden, wird im folgenden nur von Widerstand gesprochen.

Schaut man sich den Verlauf des Widerstands in Abhängigkeit der Temperatur beim Abkühlen (Abbildung 10 bzw. 11) an, so erkennt man einen fast linearen Verlauf. Dies entspricht dem Ohmschen Gesetz und ist deshalb auch zu erwarten. Für niedrige Temperaturen hätten wir

nach dem Bloch–Grüneisen-Gesetz:

$$\rho \propto \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^5 \quad (4)$$

eine T^5 Abhängigkeit erwartet. Dabei ist Θ_D die Debye-Temperatur, oberhalb von ihr sind alle Schwingungsmoden des Kristalls besetzt.

Dies ist beim Abkühlvorgang nicht zu sehen. Da sich beim Abkühlen der Widerstand trotz Erreichen der niedrigsten Temperatur noch weiter geändert hat, ist der Widerstandsverlauf beim Abkühlen für niedrige Temperaturen auch nicht exakt bestimmbar. Dies liegt vermutlich an der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Glasplättchens und die angezeigte Temperatur entspricht bei schnellen Temperaturänderungen somit nicht der Probentemperatur.

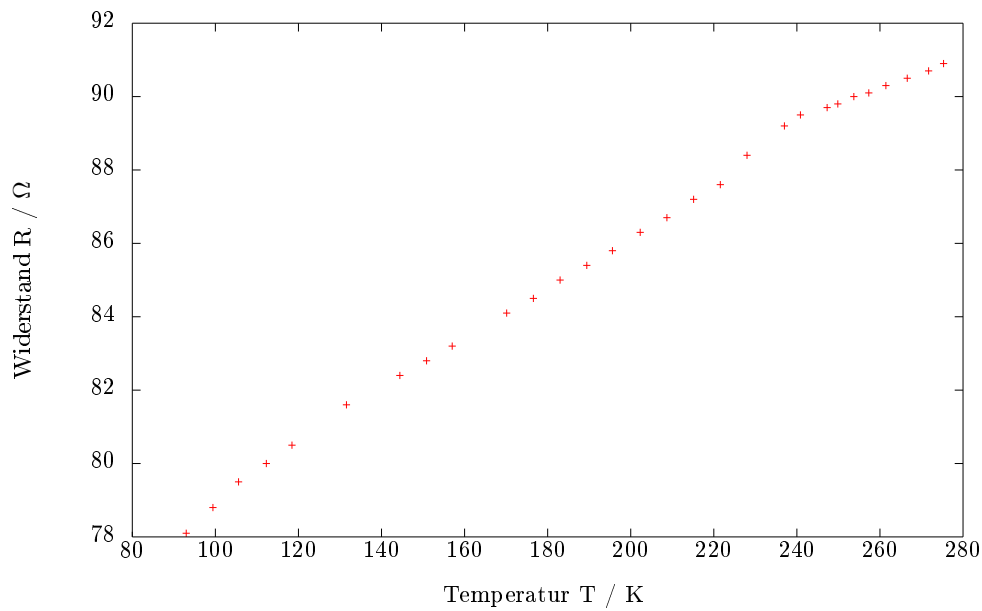


Abbildung 10: Verhalten des Widerstands beim Abkühlen der Probe.

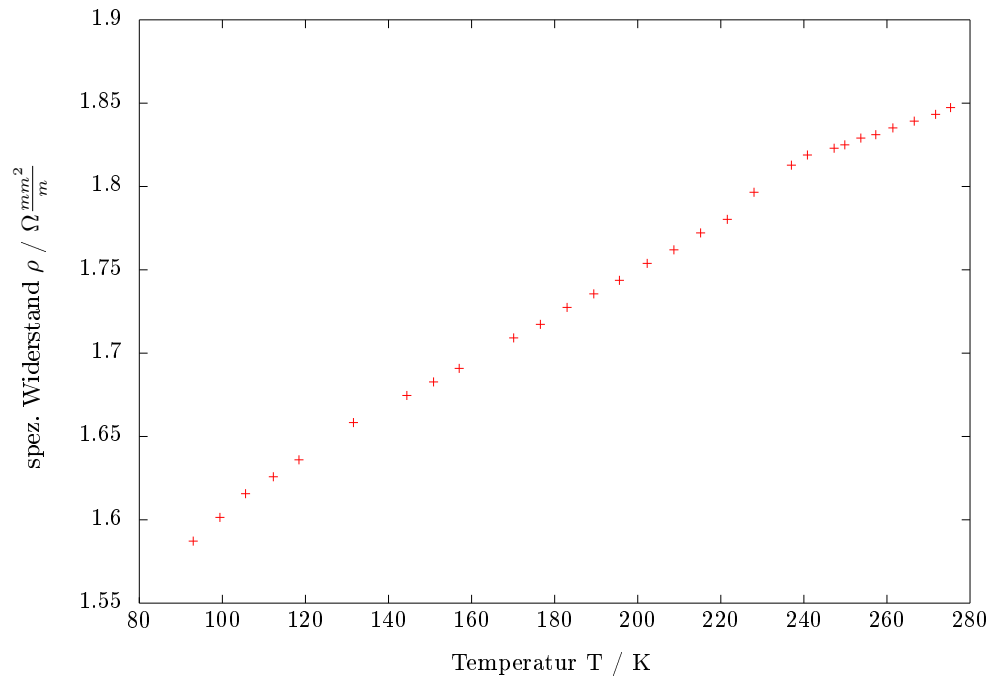


Abbildung 11: Verhalten des spezifischen Widerstands beim Abkühlen der Probe.

Der Verlauf des Widerstands beim Aufheizen (Abbildung 12 bzw. 13) zeigt für hohe Temperaturen auch einen linearen Verlauf. Für niedrige Temperaturen (ab ca. 140 K) weicht der Verlauf des Widerstands davon ab. Dies könnte der zu erwartende T^5 Verlauf sein. Die Messwerte für sehr niedrige Temperaturen weichen vom erwarteten Verlauf ab und sind deshalb nicht zu gebrauchen. Dies könnte an der Messungenauigkeit des Widerstands und der Temperatur für solch tiefe Temperaturen liegen.

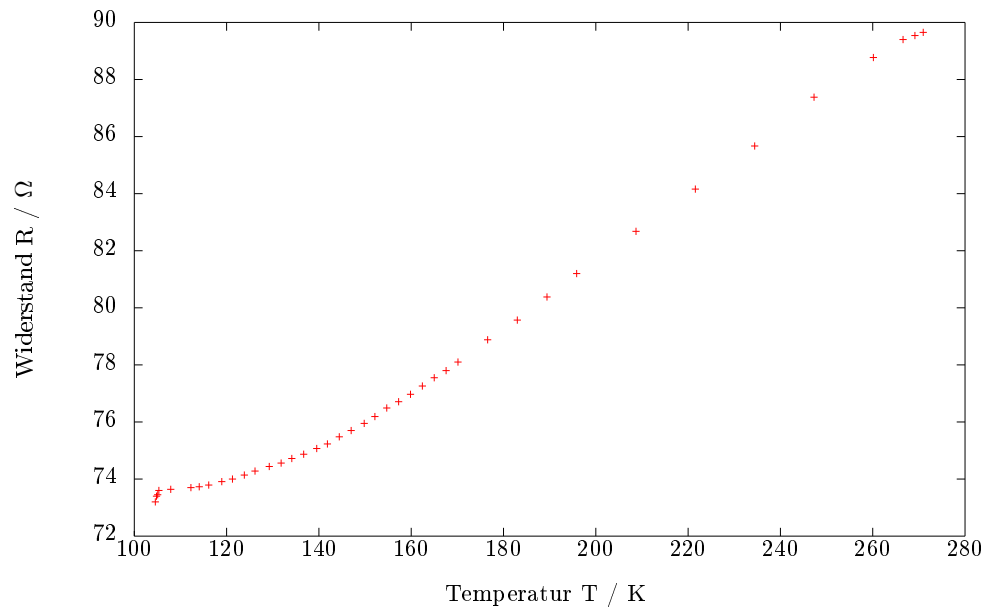


Abbildung 12: Verhalten des Widerstands beim Aufheizen der Probe.

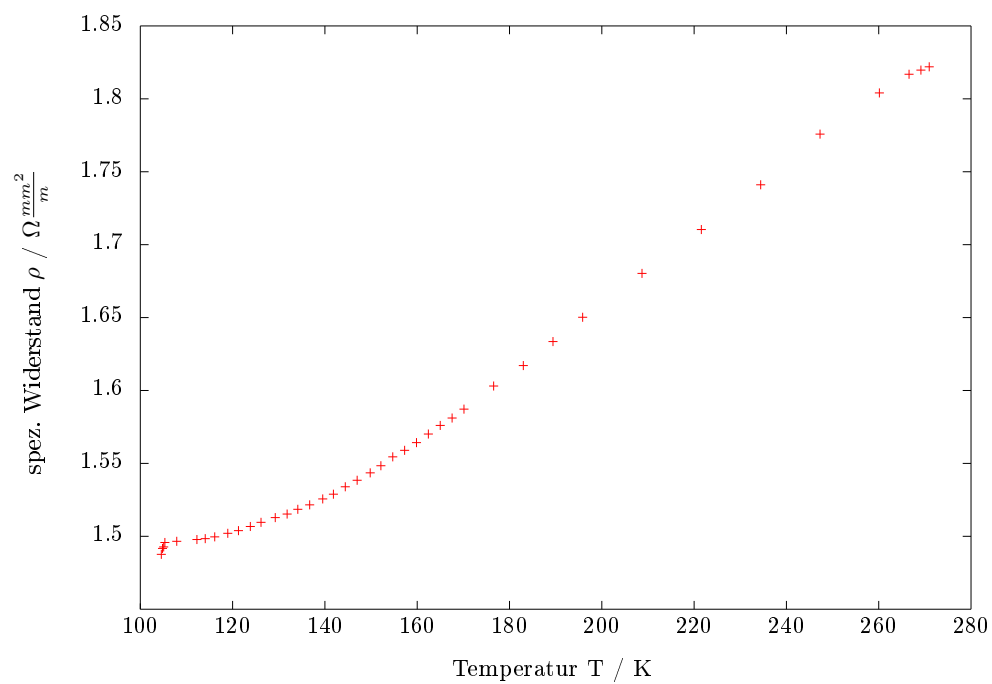


Abbildung 13: Verhalten des spezifischer Widerstands beim Aufheizen der Probe.

3.4 Aufgabe 4: Widerstand beim weiteren Aufdampfen von Ag und In

Im letzten Versuchsteil sollte die Auswirkung auf den Widerstand bei weiterem Aufdampfen von Ag bzw. In untersucht werden. Zur Messung des Widerstands nutzten wir eine Wheatstonesche Brückenschaltung. Ein variabler Widerstand wird dabei immer so nachgeregelt, dass die Differenzspannung einen Wert nahe null annimmt. Der so eingestellte Widerstand entspricht somit dem Widerstand unserer Probe.

In Abbildung 14 und 15 ist der absolute Widerstand R bzw. der spezifische Widerstand ρ bei weiterem Aufdampfen von Silber aufgetragen. Wie erwartet fällt R sowohl auch ρ für eine dicker werdende Silberschicht ab. Der spezifische Widerstand bleibt beim zusätzlichen Aufdampfen von Silber zunächst konstant und fällt dann stark ab. Dies könnte daran liegen, dass das Silber sich zunächst wieder als Inseln ausbildet und deshalb noch keine Erniedrigung des spezifischen Widerstands bewirkt.

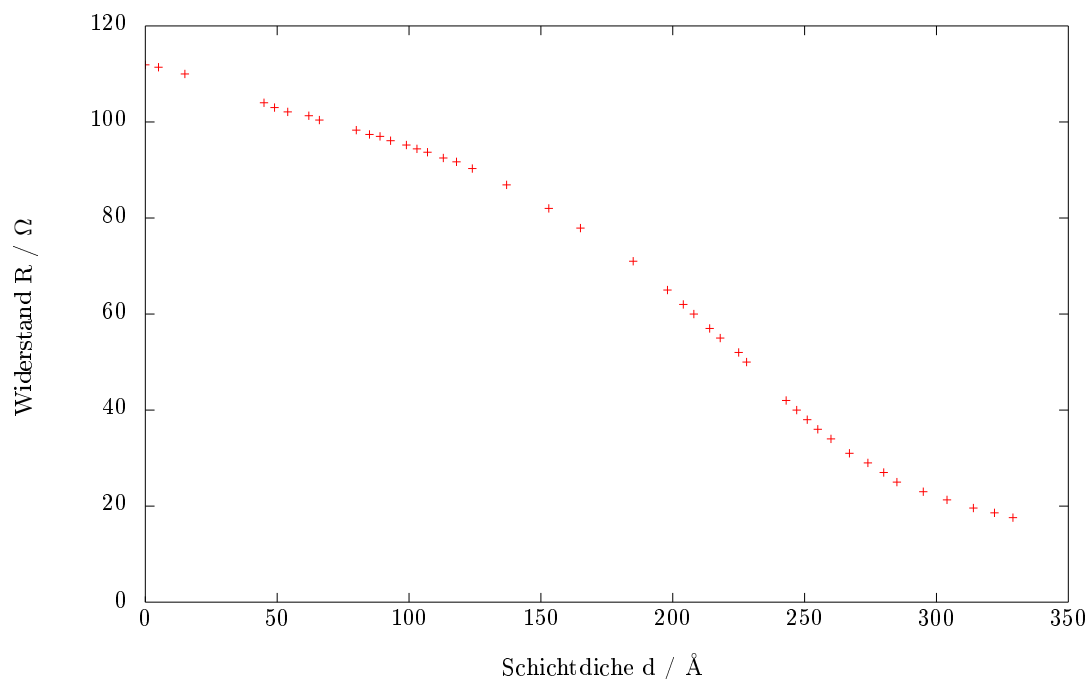


Abbildung 14: Widerstand in Abhängigkeit von zusätzlich aufgedampftem Ag.

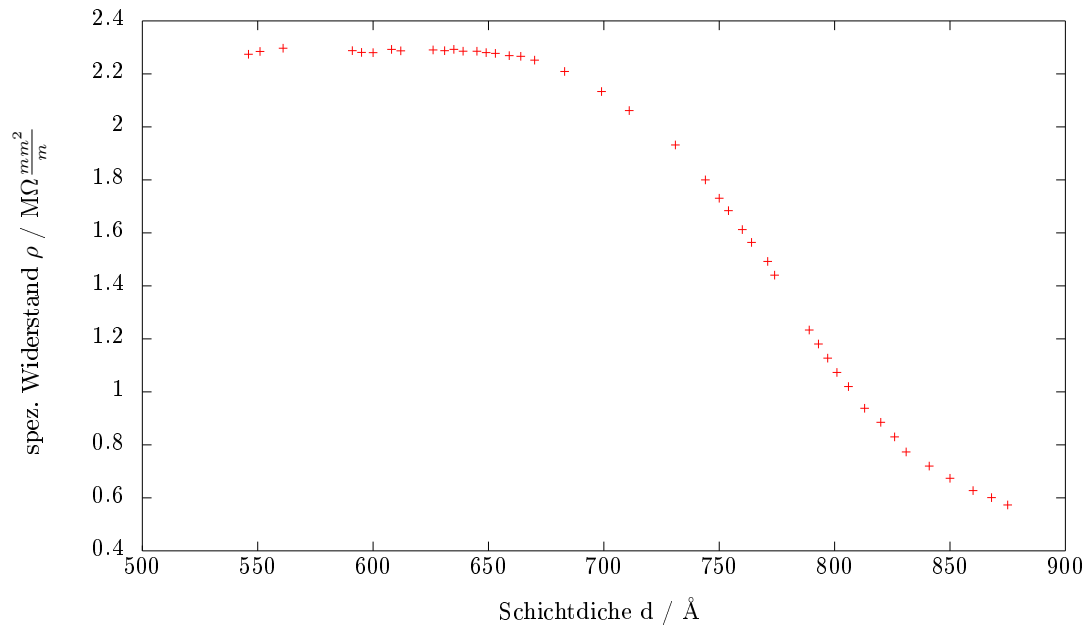


Abbildung 15: Spezifischer Widerstand von Ag in Abhängigkeit der Gesamtschichtdicke.

Dampft man nun eine Schicht Indium auf das Silber auf, so erwartet man einen Anstieg des Widerstands bei dünnen Indiumschichten. Aufgrund der unterschiedlichen Kristallstruktur sollte der Widerstand aufgrund von zusätzlicher Streuung zunächst ansteigen. Ist die Indiumschicht ausreichend dick um selbst einen signifikanten Strom zu leiten nimmt der Widerstand ab. Bei unserer Messung des Widerstands (Abbildung 16) ist dieser Anstieg nicht sichtbar. Der Widerstand ist bei dünnen Indiumschichten zunächst konstant und fällt mit steigender Schichtdicke stark ab. Es könnte sein, dass der Effekt durch zusätzliche Streuung bei unserer Probe nicht ausreichend groß war um einen Anstieg des Widerstands messen zu können. Bei der Messung des zeitlichen Verlaufs des Widerstandes haben wir gesehen, dass der Widerstand durch Umordnung in der Kristallstruktur noch weiter abnimmt. Es könnte auch sein, dass die in der zuvor aufgedampften Silberschicht noch solche Prozesse stattgefunden haben und dieser Effekt in Konkurrenz zum Effekt durch das aufgedampfte Indium stand.

Schaut man sich den Verlauf des spezifischen Widerstands an (Abbildung 17) so sieht man einen leichten Anstieg des spezifischen Widerstands bei dünner Indiumschichtdicke. Mit steigender Schichtdicke von In fällt er stark und ab einer absoluten Dicke von ca. 930 Å (entspricht einer Indium Schichtdicke von ca. 50 Å) nimmt ρ einen annähernd konstanten Wert an. Der leichte Anstieg des spezifischen Widerstands könnte auf die Streuung an der Silber/Indium Grenzschicht zurückzuführen sein.

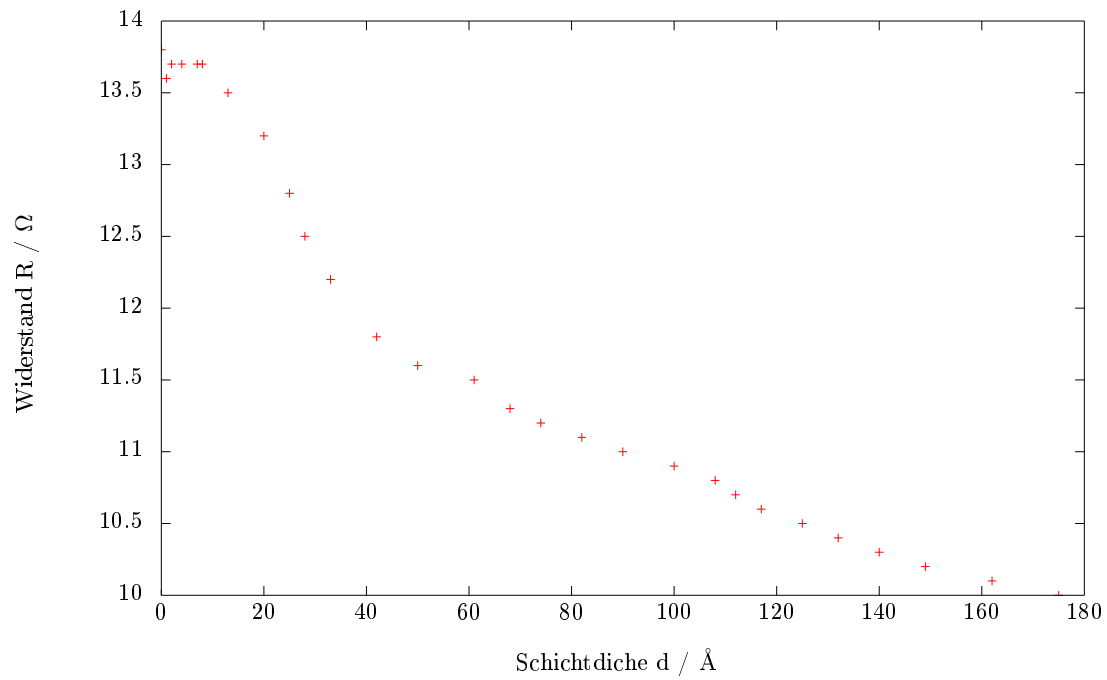


Abbildung 16: Widerstand in Abhängigkeit von zusätzlich aufgedampftem In.

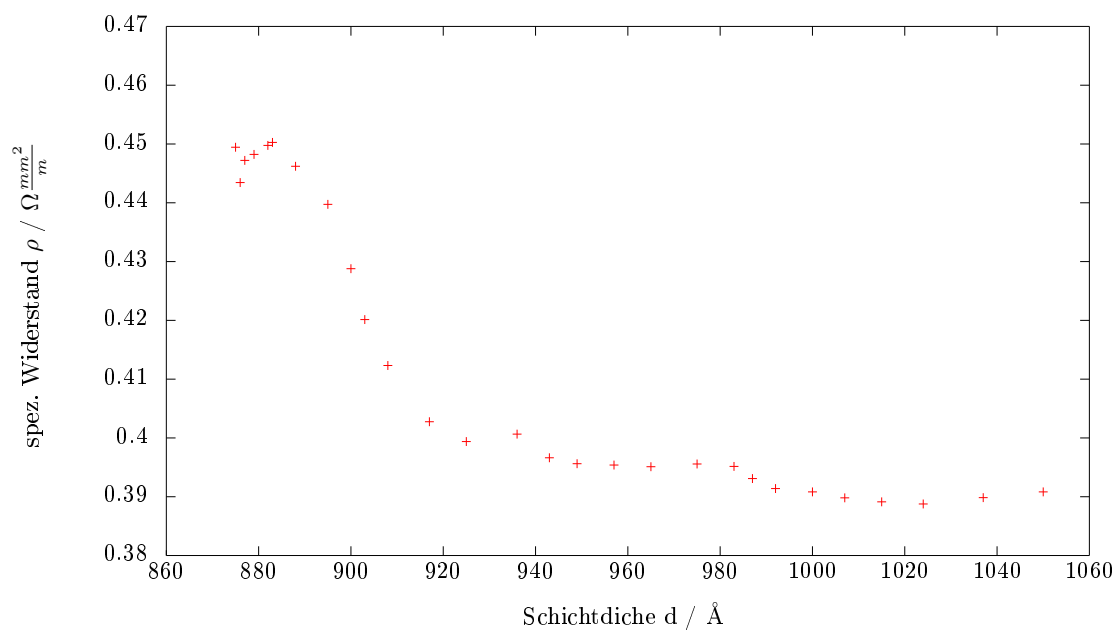


Abbildung 17: Spezifischer Widerstand von Ag+In für im Bereich von zusätzlich aufgedampften In in Abhängigkeit der Gesamtschichtdicke.

4 Anhang

Tabelle 1: Aufgabe 1. Widerstand einer dünnen Si-Schicht in Abhängigkeit der Dicke d.

Schichtdicke d / Å	Spannung U / V	Widerstand / Ω	spez. Widerstand ρ / Ω Å
292	10,54	10540000	1145555483
300	10,54	10540000	1176940565
304	10,538	10538000	1192406799
307	10,533	10533000	1203602623
311	10,529	10529000	1218821708
315	10,525	10525000	1234028882
318	10,52	10520000	1245189718
322	10,513	10513000	1260013511
327	10,505	10505000	1278605227
330	10,495	10495000	1289107244
335	10,484	10484000	1307267563
340	10,468	10468000	1324754175
343	10,455	10455000	1334783481
346	10,44	10440000	1344526181
350	10,422	10422000	1357724889
353	10,402	10402000	1366734700
357	10,382	10382000	1379564171
361	10,357	10357000	1391662241
365	10,322	10322000	1402327288
370	10,272	10272000	1414651293
375	10,233	10233000	1428324573
377	10,078	10078000	1414191981
380	9,639	9639000	1363352764
381	9,297	9297000	1318440310
383	8,897	8897000	1268338077
384	8,616	8616000	1231486288
386	8,013	8013000	1151264501
387	7,824	7824000	1127022205
389	7,314	7314000	1059003080
391	6,93	6930000	1008562132
393	6,509	6509000	952137100,3
395	6,057	6057000	890527500
397	5,63	5630000	831939160,5
399	5,279	5279000	784002095,8
401	4,989	4989000	744647168,6
403	4,661	4661000	699160388,6

407	4,15	4150000	628688001,5
410	3,789	3789000	578230676,1
413	3,53	3530000	542647020,8
416	3,226	3226000	499517099,6
419	2,947	2947000	459607201,3
422	2,718	2718000	426927931,6
425	2,538	2538000	401488595,8
428	2,353	2353000	374850731,1
431	2,2	2200000	352933283,8
434	2,089	2089000	337458860,3
437	1,89	1890000	307422682
441	1,747	1747000	286763690,2
444	1,62	1620000	267726062,4
447	1,501	1501000	249735844,7
450	1,393	1393000	233322325,4
453	1,278	1278000	215487321
458	1,144	1144000	195022252,6
459	1,103	1103000	188443370,7
462	1,03	1030000	177121738,5
465	9,714	971400	168129421,2
467	9,36	936000	162699191,7
470	8,726	872600	152653136,7
474	7,739	773900	136538728,5
478	7	700000	124542793,5
482	6,198	619800	111196540,6
486	5,539	553900	100198287,8
490	4,928	492800	89879251,11
494	4,294	429400	78955366,72
498	3,798	379800	70400698,66
502	3,349	334900	62576537,74
506	2,828	282800	53262627,64
510	2,435	243500	46223391,53
514	2,029	202900	38818417,98
518	1,669	166900	32179460,77
522	1,384	138400	26890523,63
526	1,105	110500	21634192,42
528	9,11	91100	17903789,6
530	0,767	7670	1513086,999
534	0,614	6140	1220400,267
538	0,473	4730	947187,7712
542	0,384	3840	774681,4859
546	0,313	3130	636106,2259

Tabelle 2: Aufgabe 2. Widerstand einer dünnen Si-Schicht in Abhängigkeit der Zeit.

Zeit t / s	Spannung U / mV	Widerstand	spez. Widerstand ρ / $\Omega\text{\AA}$
0	172,8	1728	351179,4116
4	152,7	1527	310330,4175
18	75,5	755	153437,7637
33	56,02	560,2	113848,7884
48	48,62	486,2	98809,85527
63	43,39	433,9	88180,98767
78	40,22	402,2	81738,63388
93	35,98	359,8	73121,73165
108	34,04	340,4	69179,09242
123	31,93	319,3	64890,96419
138	30,08	300,8	61131,23091
153	29	290	58936,35958
168	28,16	281,6	57229,23744
183	27,31	273,1	55501,79242
198	26,45	264,5	53754,02452
213	25,8	258	52433,03715
228	25,34	253,4	51498,18455
243	24,8	248	50400,74889
258	24,24	242,4	49262,66746
273	23,7	237	48165,2318
288	23,09	230,9	46925,53596
303	22,67	226,7	46071,97489
318	22,26	222,6	45238,7367
333	21,9	219	44507,11293
348	21,58	215,8	43856,78068
363	21,27	212,7	43226,77132
378	21,02	210,2	42718,69926
393	20,79	207,9	42251,27296
408	20,55	205,5	41763,52377
423	20,3	203	41255,45171
438	20,09	200,9	40828,67117
453	19,89	198,9	40422,21352
468	19,67	196,7	39975,1101
483	19,36	193,6	39345,10074

498	19,13	191,3	38877,67444
513	18,96	189,6	38532,18544
528	18,81	188,1	38227,3422
543	18,65	186,5	37902,17608
558	18,41	184,1	37414,42689
573	18,15	181,5	36886,03195
588	18,12	181,2	36825,0633
603	17,95	179,5	36479,57429
618	17,82	178,2	36215,37682
633	17,68	176,8	35930,85646
648	17,57	175,7	35707,30475
663	17,42	174,2	35402,46152
678	17,32	173,2	35199,23269
693	17,19	171,9	34935,03522
708	17,09	170,9	34731,80639
723	16,95	169,5	34447,28603
738	16,84	168,4	34223,73432
753	16,75	167,5	34040,82838
783	16,57	165,7	33675,01649
813	16,37	163,7	33268,55884
843	16,22	162,2	32963,7156
873	16,07	160,7	32658,87236
903	15,92	159,2	32354,02912
933	15,78	157,8	32069,50877
993	15,49	154,9	31480,14517
3693	9,88	98,8	20079,00802
3993	9,71	97,1	19733,51902
4593	9,45	94,5	19205,12407
4893	9,34	93,4	18981,57236
5193	9,24	92,4	18778,34354

Tabelle 3: Aufgabe 3. Widerstand beim Abkühlen der Si-Schicht.

Temperatur / mV	Spannung / mV	Temperatur / K	Widerstand / Ω	ρ / $\Omega\text{\AA}$
0,09	9,09	275,31453	90,9	1,84735003
-0,05	9,07	271,71415	90,7	1,843285453
-0,25	9,05	266,57075	90,5	1,839220877
-0,45	9,03	261,42735	90,3	1,8351563

-0,61	9,01	257,31263	90,1	1,831091724
-0,75	9	253,71225	90	1,829059435
-0,9	8,98	249,8547	89,8	1,824994859
-1	8,97	247,283	89,7	1,822962571
-1,25	8,95	240,85375	89,5	1,818897994
-1,4	8,92	236,9962	89,2	1,812801129
-1,75	8,84	227,99525	88,4	1,796542823
-2	8,76	221,566	87,6	1,780284517
-2,25	8,72	215,13675	87,2	1,772155364
-2,5	8,67	208,7075	86,7	1,761993923
-2,75	8,63	202,27825	86,3	1,75386477
-3,01	8,58	195,59183	85,8	1,743703328
-3,25	8,54	189,41975	85,4	1,735574175
-3,5	8,5	182,9905	85	1,727445022
-3,75	8,45	176,56125	84,5	1,717283581
-4	8,41	170,132	84,1	1,709154428
-4,51	8,32	157,01633	83,2	1,690863834
-4,75	8,28	150,84425	82,8	1,682734681
-5	8,24	144,415	82,4	1,674605527
-5,5	8,16	131,5565	81,6	1,658347221
-6,01	8,05	118,44083	80,5	1,635992051
-6,25	8	112,26875	80	1,625830609
-6,51	7,95	105,58233	79,5	1,615669168
-6,75	7,88	99,41025	78,8	1,60144315
-7	7,81	92,981	78,1	1,587217132

Tabelle 4: Aufgabe 3. Widerstand beim Aufheizen der Si-Schicht.

Temperatur / mV	Spannung / mV	Temperatur / K	Widerstand / Ω	ρ / $\Omega\text{\AA}$
-6,55	7,32	104,55365	73,2	1,487635007
-6,54	7,34	104,81082	73,4	1,491699584
-6,53	7,345	105,06799	73,45	1,492715728
-6,52	7,36	105,32516	73,6	1,49576416
-6,42	7,364	107,89686	73,64	1,496577076
-6,25	7,37	112,26875	73,7	1,497796449
-6,18	7,373	114,06894	73,73	1,498406135
-6,1	7,379	116,1263	73,79	1,499625508
-5,99	7,391	118,95517	73,91	1,502064254

-5,9	7,4	121,2697	74	1,503893314
-5,8	7,414	123,8414	74,14	1,506738517
-5,71	7,428	126,15593	74,28	1,509583721
-5,59	7,444	129,24197	74,44	1,512835382
-5,49	7,456	131,81367	74,56	1,515274128
-5,4	7,472	134,1282	74,72	1,518525789
-5,3	7,487	136,6999	74,87	1,521574221
-5,19	7,507	139,52877	75,07	1,525638798
-5,1	7,523	141,8433	75,23	1,528890459
-5	7,548	144,415	75,48	1,53397118
-4,9	7,57	146,9867	75,7	1,538442214
-4,79	7,595	149,81557	75,95	1,543522935
-4,7	7,619	152,1301	76,19	1,548400426
-4,6	7,649	154,7018	76,49	1,554497291
-4,5	7,671	157,2735	76,71	1,558968325
-4,4	7,697	159,8452	76,97	1,564252275
-4,3	7,726	162,4169	77,26	1,570145911
-4,2	7,755	164,9886	77,55	1,576039547
-4,1	7,78	167,5603	77,8	1,581120267
-4	7,81	170,132	78,1	1,587217132
-3,75	7,888	176,56125	78,88	1,603068981
-3,5	7,957	182,9905	79,57	1,61709177
-3,25	8,038	189,41975	80,38	1,633553305
-3	8,12	195,849	81,2	1,650218068
-2,5	8,268	208,7075	82,68	1,680295935
-2	8,416	221,566	84,16	1,710373801
-1,5	8,567	234,4245	85,67	1,741061354
-1	8,738	247,283	87,38	1,775813483
-0,5	8,877	260,1415	88,77	1,80406229
-0,25	8,94	266,57075	89,4	1,816865706
-0,15	8,954	269,14245	89,54	1,819710909
-0,08	8,9651	270,94264	89,651	1,821966749

Tabelle 5: Aufgabe 4. Widerstand beim erneuten Aufdampfen von Silber.

Schichtdicke / Å	Widerstand / Ω	spez. Widerstand ρ / $\Omega\text{Å}$
546	111,9	2,274130565
551	111,4	2,284701441

561	110	2,296932392
591	104	2,287775929
595	103	2,281113299
600	102,1	2,280182764
608	101,3	2,292480713
612	100,4	2,287061278
626	98,3	2,290448425
631	97,4	2,28760471
635	97	2,292651932
639	96,1	2,285687808
645	95,2	2,285542645
649	94,4	2,280391204
653	93,7	2,277432103
659	92,5	2,268923291
664	91,7	2,266366181
670	90,3	2,251931724
683	86,9	2,209190394
699	82	2,133456018
711	77,9	2,061577779
731	71	1,931827712
744	65	1,800026746
750	62	1,730794948
754	60	1,683895988
760	57	1,612430906
764	55	1,564043091
771	52	1,492280238
774	50	1,440468053
789	42	1,233442645
793	40	1,180662704
797	38	1,127287221
801	36	1,073316196
806	34	1,020015156
813	31	0,938090862
820	29	0,885124814
826	27	0,83011159
831	25	0,773274517
841	23	0,719973477
850	21,3	0,673893388
860	19,6	0,627403863
868	18,6	0,600932006
875	17,6	0,57320951

Tabelle 6: Aufgabe 4. Widerstand beim erneuten Aufdampfen von Indium.

Schichtdicke / $\text{\AA}$	Widerstand / Ω	spez. Widerstand ρ / $\Omega\text{\AA}$
875	13,8	0,449448366
876	13,6	0,443440832
877	13,7	0,44721136
879	13,7	0,448231226
882	13,7	0,449761025
883	13,7	0,450270958
888	13,5	0,446210104
895	13,2	0,439733581
900	12,8	0,42879049
903	12,5	0,420136516
908	12,2	0,412323744
917	11,8	0,402757845
925	11,6	0,399385587
936	11,5	0,400651114
943	11,3	0,396627481
949	11,2	0,395618782
957	11,1	0,395391731
965	11	0,395105126
975	10,9	0,395570394
983	10,8	0,395157236
987	10,7	0,393091449
992	10,6	0,391390431
1000	10,5	0,390824666
1007	10,4	0,389812244
1015	10,3	0,389131092
1024	10,2	0,388770045
1037	10,1	0,389845743
1050	10	0,390824666