

Elektrische Leitfähigkeit in zwei Dimensionen (10 Punkte)

Lies bitte die allgemeinen Hinweise in dem separaten Umschlag, bevor du mit dieser Aufgabe beginnst.

Einleitung

Für die Entwicklung der nächsten Generation von Halbleiterbauelementen, wie Computerchips oder Solarzellen suchen Forscher nach Materialien mit herausragenden Leitungseigenschaften, z.B. einem niedrigen spezifischen Widerstand. Die Messungen solcher Eigenschaften werden an Proben von endlicher Größe und mit bestimmter Geometrie sowie mit Kontakten durchgeführt, die einen endlichen Kontaktwiderstand besitzen. Diese Effekte müssen berücksichtigt werden, um auf die tatsächlichen material-spezifischen Eigenschaften zu schließen. Darüberhinaus kann sich eine dünne Schicht eines Materials möglicherweise anders verhalten als voluminöses Material.

In dieser Aufgabe sollst du elektrische Eigenschaften durch Messungen untersuchen. Dabei werden die beiden folgenden Definitionen verwendet:

- **Elektrischer Widerstand R :** Der elektrische Widerstand ist eine elektrische Eigenschaft einer Probe oder eines Bauteils. Es ist die Größe, die an einer Probe mit gegebenen Abmessungen gemessen wird.
- **Spezifischer Widerstand ρ :** Der spezifische Widerstand ist die Materialeigenschaft, welche den elektrischen Widerstand definiert. Er hängt vom Material selbst und von externen Faktoren wie der Temperatur, nicht jedoch von der Geometrie der Probe, ab.

In den Aufgaben sollst du insbesondere den (*spezifischen*) *Flächenwiderstand* betrachten, der definiert ist als der spezifische Widerstand geteilt durch die Dicke einer sehr dünnen Schicht.

Die Aufgaben beschäftigen sich mit dem Einfluss der folgenden Parameter auf die Messung des elektrischen Widerstandes von dünnen Schichten eines Materials:

- die Mess-Schaltung,
- die Messanordnung,
- die Abmessungen der Proben.

Ein Bogen aus leitfähigem Papier sowie ein metallbeschichteter Siliziumwafer dienen dabei als Proben.

Materialien

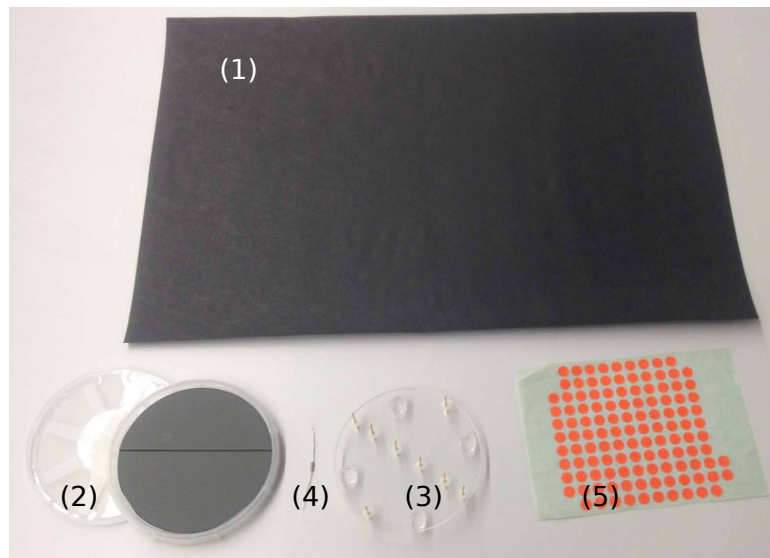


Abbildung 1: Zusätzliches Material für dieses Experiment.

1. Graphit-beschichtetes leitfähiges Papier
2. Ein Siliziumwafer mit einer dünnen Chromschicht (aufbewahrt in einem Wafer-Halter)
3. Plexiglasplatte mit 8 federgelagerten Stiften
4. Ein Ohmscher Widerstand (wird nicht benötigt)
5. Farbige Aufkleber

Wichtige Vorsichtsmaßnahmen

- Der bereitgestellte Siliziumwafer zerbricht leicht, wenn er fallengelassen oder verbogen wird. Achte darauf, die metallisch glänzende Oberfläche nicht zu berühren oder zu zerkratzen.

Hinweise zum Experimentieren

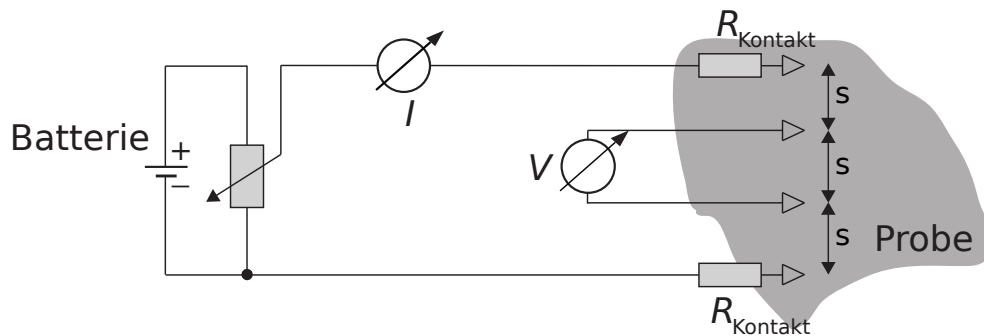
- In dem Experiment wird der Signalgenerator als Gleichspannungsquelle verwendet. In diesem Modus liefert der Signalgenerator eine konstante Spannung zwischen der Spannungsbuchse (5 - *voltage*) und der *GND*-Buchse (7). Die Zahlen beziehen sich auf die Abbildung in den allgemeinen Hinweisen.
- Die Spannung kann am linken Potentiometer (3 - *adjust voltage*) mit einem Schraubendreher eingestellt werden. Die Ausgangsspannung liegt zwischen 0 und etwa 5 V.
- Achte darauf, dass der Lautsprechermodus des Signalgenerators während dieses Experiments ausgeschaltet ist. Benutze dazu den Kippschalter (8). Durch Messung der Spannung zwischen der Buchse "*speaker amplitude*- (6)" und der *GND*-Buchse (7) kannst du diese Einstellung überprüfen. Wenn der Lautsprecherbetrieb ausgeschaltet ist, ist die Spannung zwischen den beiden Buchsen Null.

Teil B. Vier-Punkt-Messungen (4PP) (1,2 Punkte)

Um den Widerstand einer Probe genau zu messen, sollten die Kontakte zur Spannungsmessung und die Kontakte zur Stromeinleitung getrennt werden.

Da für eine solche Messung vier Kontakte benötigt werden, wird diese Methode Vier-Punkt-Messung genannt, im Folgenden mit 4PP abgekürzt. Die vier Kontakte sind dabei in einer möglichst einfachen symmetrischen Geometrie angeordnet: Der Strom I fließt in die Probe durch einen der äußeren Kontakte (source genannt), dann durch alle möglichen Wege in der Probe und aus der Probe hinaus durch den anderen Kontakt (drain). Dazwischen wird die Spannung V über eine gewisse Länge s auf der Probe gemessen.

Im Folgenden ist ein möglichst einfacher und symmetrischer Aufbau dargestellt: Die Kontakte besitzen jeweils den gleichen Abstand s zu dem/den benachbarten.



Der Graph von I über U stellt die Strom-Spannungs-Charakteristik der Probe dar und erlaubt es, den Widerstand dieses Probensegments zu bestimmen. Im Folgenden sollst du die 4PP Technik verwenden und dazu die lineare, *äquidistante* Anordnung von vier der acht Messspitzen (Kontakte) verwenden (vgl. mit dem folgenden Foto).

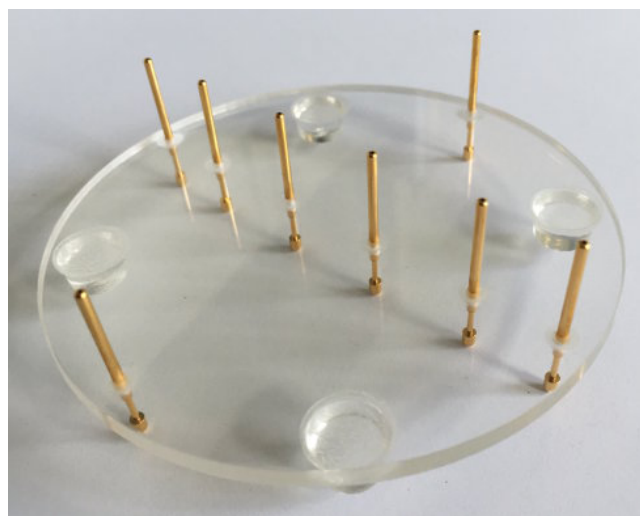


Abbildung 2: Acrylglasplatte mit federgelagerten Kontakten für die 4PP Messungen. Die Platte besitzt insgesamt acht Kontakte und vier Gummifüße.

Verwende für die folgende Messung den gesamten Bogen leitfähigen Papiers.

Wichtige Hinweise für alle folgenden Messungen:

- Die lange Seite des Bogens ist die Referenzseite. Die vier Kontakte müssen parallel zu dieser Seite ausgerichtet werden.
- Achte darauf, die beschichtete Seite (schwarz) zu verwenden, nicht die braune Rückseite des Papiers! Du kannst die richtige Orientierung mit farbigen Aufklebern markieren.
- Achte darauf, dass das Papier keine Löcher hat.
- Platziere die Kontakte für die Messung möglichst mittig auf der Papierprobe.
- Drücke die Kontakte mit genügend Kraft auf die Probe, um für alle Kontakte einen guten Kontakt zu gewährleisten. Die Kunststofffüße sollten gerade so die Probe berühren.

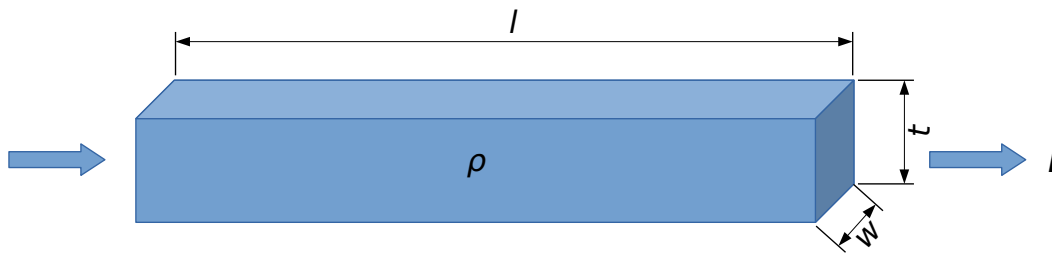
A.1	Vier-Punkt-Messung (4PP): Miss den Spannungsabfall U über eine Strecke s als Funktion der Stromstärke I durch dieses Probensegment. Nimm insgesamt mindestens 4 Messungen auf. Erstelle eine Tabelle und zeichne die Stromstärke I über dem Spannungsabfall U in Graph A.1 ein.	0.6pt
------------	--	-------

A.2	Bestimme den auftretenden elektrischen Widerstand $R = \frac{U}{I}$ aus dem Graphen A.1 .	0.2pt
------------	--	-------

A.3	Benutze den Graphen A.1 , um die Unsicherheit ΔR des Widerstandes R für die 4PP-Messung zu bestimmen.	0.4pt
------------	--	-------

Teil C. Flächenwiderstand (0,3 Punkte)

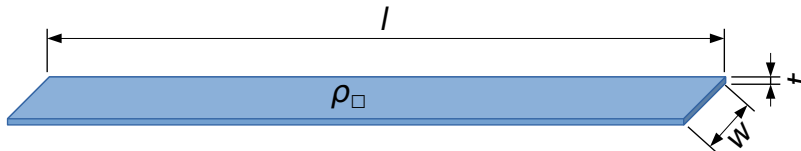
Der spezifische Widerstand ρ ist eine Materialeigenschaft, mit welcher für einen voluminösen Leiter gegebener Abmessungen der elektrische Widerstand berechnet werden kann. Betrachte einen Stab mit Länge l , Breite w , und Dicke t :



Der elektrische Widerstand R des obigen, dicken Leiters ist gegeben durch:

$$R = R_{3D} = \rho \cdot \frac{l}{w \cdot t} \quad (1)$$

In gleicher Weise lässt sich der elektrische Widerstand eines dünnen Leiters mit sehr geringer Dicke $t \ll w$ beschreiben durch:



$$R = R_{2D} = \rho_{\square} \cdot \frac{l}{w}. \quad (2)$$

Dabei ist $\rho_{\square} \equiv \rho/t$ ("rho box") der (*spezifische*) *Flächenwiderstand* mit der Einheit Ohm: $[\rho_{\square}] = 1 \, \Omega$.

Wichtig: Gleichung 2 ist nur bei einer homogenen Stromdichte und einem konstanten Potential in der Querschnittsebene des Leiters gültig. Bei punktförmigen Kontakten auf der Oberfläche gilt dieses nicht. Stattdessen kann man zeigen, dass der Flächenwiderstand mit dem elektrischen Widerstand wie folgt zusammenhängt:

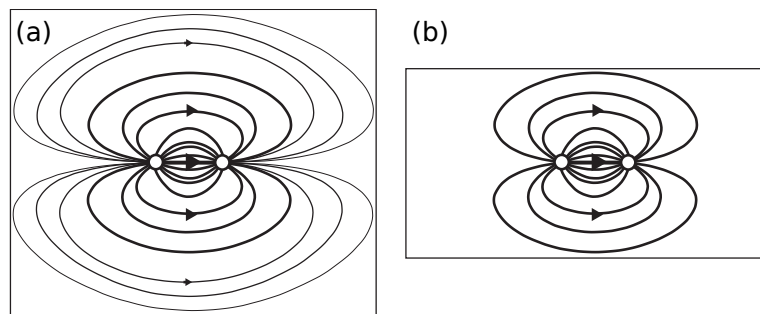
$$\rho_{\square} = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot R \quad (3)$$

für $l, w \gg t$.

- B.1** Berechne den spezifischen Flächenwiderstand $\rho_{\square}$ des Papiers aus der 4PP-Messung in Teil A. Dieser Wert soll im Folgenden als ρ_{∞} bezeichnet werden (und der gemessene elektrische Widerstand aus Teil A als R_{∞}), weil die Probenabmessungen des ganzen Papierbogens wesentlich grösser sind als der Abstand zwischen den Kontakten s : $l, w \gg s$. 0.3pt

Teil C. Messungen für unterschiedliche Probenabmessungen (3,2 Punkte)

Bisher wurden die endlichen Probenabmessungen w und l nicht berücksichtigt. Wenn die Probe kleiner wird, kann sie bei konstanter Spannung weniger Strom führen: Wenn eine Spannung zwischen den beiden Punktkontakten (weiße Kreise) angelegt wird, fließt Strom auf allen möglichen, sich nicht kreuzenden Wegen, durch die Probe, wie durch die Linien dargestellt. Je länger die Linie ist, desto kleiner ist der Strom, wie durch die Strichstärke angedeutet. Für eine kleine Probe (b) mit gleicher angelegter Spannung wird sich der Gesamtstrom verringern, weil es weniger mögliche Wege gibt. Somit erhöht sich der gemessene Widerstand:



Der Flächenwiderstand ändert sich natürlich nicht mit der Probengröße. Um also den gemessenen Widerstand gemäß Gleichung 3 in den Flächenwiderstand umzurechnen, muss daher ein Korrekturfaktor $f(w/s)$ eingeführt werden:

$$\rho_{\square} = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot \frac{R(w/s)}{f(w/s)}. \quad (4)$$

Der Faktor f hängt nur vom Verhältnis w/s ab und ist grösser als 1: $f(w/s) \geq 1$. Aus Gründen der Einfachheit werden wir nur auf die Abhängigkeit von der Breite w eingehen und dabei sicher stellen, dass die Probe lang genug für unsere Messungen ist. Wir nehmen an, dass der Wert für große Abmessungen das korrekte Resultat $\rho_{\square}$ annimmt:

$$R(w/s) = R_{\infty} \cdot f(w/s) \quad \text{with} \quad f(w/s \rightarrow \infty) \rightarrow 1, 0. \quad (5)$$

- C.1** Miss mit der oben beschriebenen 4PP-Methode den Widerstand $R(w, s)$ für 4 Verhältnisse w/s im Bereich zwischen 0,3 und 5 und notiere die Ergebnisse in **Tabelle C.1**. Achte darauf, dass die Probelänge größer als das Fünffache der Messlänge ist: $l > 5s$ und dass die Länge l immer entlang derselben (langen) Seite des Papierbogens ausgerichtet ist. Miss für jeden Wert von w/s die Spannung für 4 verschiedene Stromstärken und bestimme den mittleren Widerstand $R(w, s)$ aus den vier Messungen. Trage deine Ergebnisse in **Tabelle C.1** ein. 3.0pt

- C.2** Berechne $f(w/s)$ für jede dieser Messungen.

0.2pt

Teil E. Geometrischer Korrekturfaktor: Skalierungsgesetz (1,9 Punkte)

Du hast in Teil C festgestellt, dass der gemessene Flächenwiderstand mit dem Verhältnis w/s der Breite

und dem Abstand der Kontakte skaliert. Betrachte, ausgehend von den in Teil C erfassten Daten, die folgende generische Funktion, um die Daten im Bereich der Messungen zu beschreiben:

$$\text{Fitfunktion: } f(w/s) = 1,0 + a \cdot \left(\frac{w}{s}\right)^b \quad (6)$$

Für sehr große w muss $f(w/s)$ gegen 1,0 gehen.

D.1	Mit Hilfe von Gleichung 6 und den Daten für $f(w/s)$ aus Teil C soll nun ein Modellfit erstellt werden. Zeichne dazu auf geeignetem Papier (linear Graph D.1a , semi-logarithmisch Graph D.1b , oder doppelt logarithmisch Graph D1.c) $(f(w/s) - 1)$ über w/s auf.	1.0pt
------------	---	-------

D.2	Bestimme die Parameter a und b aus der graphischen Darstellung der Daten.	0.9pt
------------	---	-------

Teil F. Der Siliziumwafer und die van der Pauw-Methode (3,4 Punkte)

In der Halbleiterindustrie ist das Wissen um den elektrischen Flächenwiderstand von Halbleitern und dünnen Metallschichten sehr wichtig, weil es die Eigenschaften der Bauteile bestimmt. Im Folgenden arbeitest du mit dem Siliziumwafer in der Kunststoff-Box. Der halbleitende Wafer ist mit einer sehr dünnen Schicht aus Chrommetall beschichtet (auf der glänzenden Seite).

Öffne den Waferbehälter, indem du den Deckel in Richtung des Pfeils RELEASE drehst und nimm den Wafer heraus. Lass ihn nicht fallen, verbiege ihn nicht, berühre oder zerkratze die glänzende Oberfläche nicht! Lege für die Messung den Wafer mit der glänzenden Seite nach oben auf den Tisch.

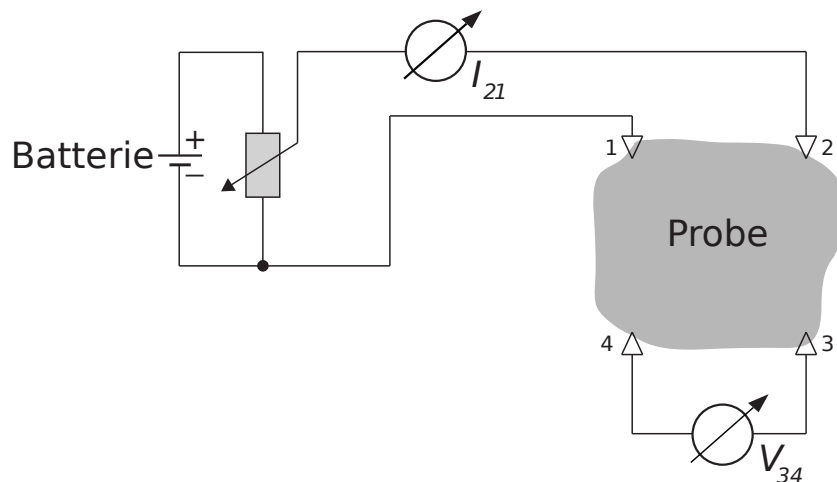
E.1 Miss mit Hilfe der 4PP-Methode wie zuvor die Spannung U als Funktion der Stromstärke I .
Trage die Nummer deines Wafers im Antwortbogen ein. Sie befindet sich auf dem Deckel des Behälters. 0.4pt

E.2 Trage Deine Daten in **Graph E.2** ein und bestimme den elektrischen Widerstand R_{4PP} . 0.4pt

E.3 Um die Korrektur für eine runde Probe wie diesen Wafer zu bestimmen, kannst Du für die effektive Breite w der Probe näherungsweise den Durchmesser $D = 100 \text{ mm}$ des Wafers verwenden. Bestimme unter dieser Annahme das Verhältnis w/s . Nutze die Fitfunktion aus Gleichung 6 und die Parameter a und b , um den Korrekturfaktor $f(w/s)$ für die Messung am Wafer zu erhalten. 0.2pt

E.4 Berechne den Flächenwiderstand $\rho_{\square}(4PP)$ der Chromschicht nach Gleichung 4. 0.1pt

Um den Flächenwiderstand präzise und ohne Notwendigkeit von geometrischen Korrekturen zu bestimmen, hat der Ingenieur L.J. van der Pauw von Philips einen einfachen Messaufbau entworfen: Die vier Kontakte sind am Umfang einer Probe von beliebiger Form angebracht, wie in der Abbildung gezeigt (nummeriert von 1 bis 4). Der Strom fließt durch zwei benachbarte Kontakte, wie z.B. Kontakte 1 und 2, und die Spannung wird über den Kontakten 3 und 4 gemessen. Daraus ergibt sich ein Widerstandswert von $R_{I,U} = R_{21,34}$.



Aus Symmetriegründen gilt $R_{21,34} = R_{34,21}$ und $R_{14,23} = R_{23,14}$. Van der Pauw hat gezeigt, dass für eine beliebige zusammenhängende Form der Probe (ohne Löcher) und punktförmige Kontakte folgende Gleichung gilt:

$$e^{-\pi R_{21,34}/\rho_{\square}} + e^{-\pi R_{14,23}/\rho_{\square}} \equiv 1. \quad (7)$$

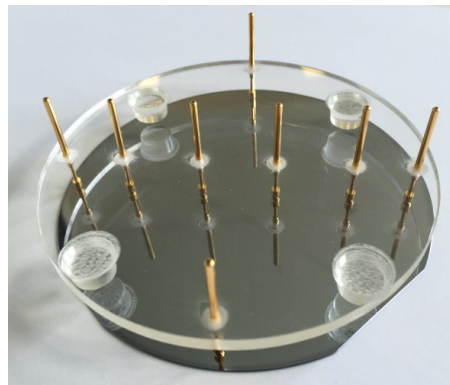


Abbildung 3: 4PP-Aufbau auf dem metallbeschichteten Siliciumwafer. Beachte den Ausschnitt auf der rechten Seite des kreisförmigen Wafers. Der Schnitt wird als *flat* bezeichnet.

Verbinde die vier Federkontakte, so dass die Messkontakte ein Quadrat bilden. Schließe zwei benachbarte Kontakte an die Stromquelle mit dem Amperemeter an und verbinde die beiden verbleibenden Federkontakte mit dem Voltmeter. Drehe das Quadrat, bis eine seiner Kanten parallel zum *flat* des Wafers ist.

E.5 Skizziere die Ausrichtung der stromführenden Kontakte und die Ausrichtung des *flat* des Wafers. Miss die Spannung U für mindestens 6 verschiedene Werte der Stromstärke I . Die Werte von I sollten ungefähr in gleichen Abständen zueinander sein. Trage deine Ergebnisse in **Tabelle E.5** ein. 0.6pt

E.6 Wiederhole diese Prozedur, wobei nun die stromführenden Kontakte senkrecht zu denen der vorherigen Anordnung sein sollen. Trage Deine Ergebnisse in **Tabelle E.6** ein. 0.6pt

E.7 Trage alle Datenpunkte in **Graph E.7** ein. Verwende unterschiedliche Symbole und/oder Farben für die verschiedenen Messreihen. Bestimme den Durchschnittswert $\langle R \rangle$ aus den beiden Kurven. 0.5pt

E.8 Ersetze alle Widerstände $R_{kl,mn}$ durch $\langle R \rangle$, löse Gleichung 7 nach $\rho_{\square}$ auf und berechne den Flächenwiderstand $\rho_{\square}$ der Chromschicht. 0.4pt

E.9 Vergleiche Deine Ergebnisse der linearen Anordnung (**F.4**) mit denen der van der Pauw Methode (**E.8**). Gib den Unterschied der zwei Messmethoden als relativen Fehler in Prozent an. 0.1pt

E.10 Die Dicke der Chromschichten (Cr) wird mit 8 nm angegeben. Benutze diesen Wert und die Ergebnisse der van der Pauw Methode, um den spezifischen Widerstand von Chrom mit Hilfe der Gleichungen 1 und 2 zu berechnen. 0.1pt