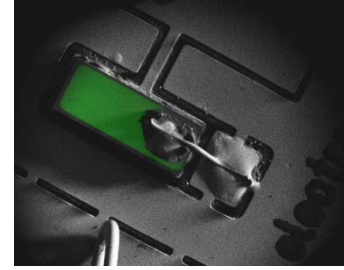




Martin-Luther-Universität  
Halle-Wittenberg  
Institut für Physik

## Fortgeschrittenen- Praktikum

Stand der Anleitung:  
09.04.2026



# Versuch B07: Rasterelektronen- mikroskopie

## 1. Aufgaben

1. Bestimmen Sie am Sekundärelektronenbild einer Musterprobe den Bildmaßstab und das Auflösungsvermögen bei verschiedenen Beschleunigungsspannungen und Blendeneinstellungen. Dabei muss zunächst der ideale Arbeitspunkt beim Heizstrom des Filaments gefunden werden, dann sind Filament und Apertur zu zentrieren und schließlich Bildfehler zu korrigieren. Führen Sie die Justage durch bis die bestmögliche Auflösung erreicht wird. Machen Sie dabei Aufnahmen bei kleiner Spotsizes für hohe Auflösung mit der 50  $\mu\text{m}$  und 30  $\mu\text{m}$  Blende jeweils bei 10, 15 und 20 kV. Bei Veränderung der Beschleunigungsspannung sind die Justageschritte ab dem „Wobbeln“ zu wiederholen, beim Wechsel der Blende auch die Zentrierung des Filaments. Prüfen Sie die Zentrierung von Filament und Apertur auch am Schluss und vergleichen sie die Position mit den Aufnahmen zu Beginn des Experiments. Was sind begrenzende Faktoren für das Auflösungsvermögen? geeignete Rastergeschwindigkeit (Slowscan) für gute Bildqualität wählen!
2. Bestimmen Sie für alle Bilder auch das S/N (Signal zu Rausch Verhältnis). Variieren Sie die Scangeschwindigkeit. Was beobachten Sie? Welchen Zusammenhang zwischen S/N Ratio und Scangeschwindigkeit stellen sie fest (mind. 8 Bilder bei verschiedenen Scangeschwindigkeiten aufnehmen). Welche externen Störeinflüsse beobachten Sie und wie beeinflussen diese das Auflösungsvermögen?
3. Ermitteln Sie die Abhängigkeit der Ausbeuten der Sekundär- und der Rückstreuelekttronen vom Kippwinkel der Probe und von der Ordnungszahl der Probenatome.
4. Nehmen Sie mittels Sekundär- und Rückstreuelekttronen Bilder eines Halbleiterbauelements auf und optimieren Sie jeweils die Parameter, die die Bildqualität bestimmen.

Freiwillige Zusatzaufgabe:

5. Nehmen Sie ein topografisches Bild ihrer Probe mit Hilfe des Quadranten- BSE-detektors auf und bestimmen Sie die Höhenunterschiede möglichst genau.

## 2. Kontrollfragen

Wie funktioniert eine Elektronenoptik (grundsätzlich)?

Was sind Filament, Heizstrom, Filamentstrom, primärer Elektronenstrom, Filamentposition, Beschleunigungsspannung, Blende, Apertur, Ablenkspule und magnetische Linsen?

Wodurch wird das Auflösungsvermögen im REM bestimmt und wie lässt sich das Auflösungsvermögen beeinflussen?

Wie verhält sich die Auflösungsgrenze zur de-Broglie-Wellenlänge von Elektronen?

Was ist der grundsätzliche Unterschied zwischen REM und TEM, der dazu führt, dass man im TEM tatsächlich einzelne Atome sehen kann, im REM aber nicht.

Welche Streuvorgänge führen zur Erzeugung von Sekundär- und Rückstreuelektronen?

Aus welcher Tiefe in der Probe stammen die Sekundär- und Rückstreuelektronen?

Wovon hängen die Ausbeuten der Sekundär- und der Rückstreuelektronen ab? Erstellen Sie qualitative Skizzen der relevanten Abhängigkeiten.

Wie werden im REM Elektronen detektiert?

Mit welcher Methode können im REM Elementmappings durchgeführt werden?

Durch welche Materialeigenschaften wird jeweils der Kontrast mittels Sekundärelektronen und Rückstreuelektronen im erzeugten Bild bestimmt?

## 3. Grundlagen

### 3.1 Einleitung

Die Auflösungsgrenze von Lichtmikroskopen wurde erstmals 1933 mit dem Transmissionselektronenmikroskop überwunden, das Ernst Ruska im Rahmen seiner Doktorarbeit gemeinsam mit Max Knoll entwickelte. Darauf aufbauend erfand Manfred von Ardenne 1937 das Rasterelektronenmikroskop. Während Strahlführung und Abbildung im Rasterelektronenmikroskop weitgehend vom Teilchencharakter der Elektronen bestimmt sind, hängt die maximale Auflösungsgrenze im Transmissionselektronenmikroskop mit dem Wellencharakter zusammen. Es heißt, dass Ruska enttäuscht war, dass wieder ein Wellenphänomen die Auflösung des Elektronenmikroskops begrenzt, auch wenn die Wellenlänge von Elektronen viel kleiner als die von Licht ist.

Es soll deutlich werden, welche Informationen sich im Allgemeinen mit dem Rasterelektronenmikroskop gewinnen lassen. Die Bedeutung der Eigenschaften von Primärelektronen, Sekundärelektronen, Rückstreuelektronen und induzierten Elektronenströmen für das bildgebende Verfahren soll in diesem Versuch vermittelt werden. Insbesondere soll deutlich werden, wie Materialeigenschaften das Bild im Rasterelektronenmikroskop beeinflussen und dass mit der Wellenlänge von Photonen bzw. Elektronen längst nicht alles über die Auflösung im Mikroskop gesagt ist.

### 3.2 Auflösung in einem Spektrum oder Bild

Ein gemessenes Spektrum oder Bild ( $S_{Signal}$ ) kann man als mathematische Faltung [1] des Objekts ( $S_{Object}$ ) mit der Antwortfunktion des Instruments oder Apparats, kurz Apparate- oder Instrumenten-Funktion, (instrument response function,  $R_{instrument}$ ) beschreiben. Dabei beschreibt die Apparate- oder Instrumenten-Funktion die Form des Messsignals am Ausgang des Gerätes, nachdem ein Pulssignal den Apparat durchlaufen hat.

$$S_{Signal}(x) = S_{Object} * R_{instrument}(x) := \int S_{Object}(\tau) \cdot R_{instrument}(x - \tau) d\tau \quad (1)$$

Für manche Instrumente kann man analytisch zeigen, dass die Apparatefunktion die Form einer Gauß- oder Lorentz-Funktion [2,3] hat. Ist die Form der Apparatefunktion nicht bekannt, dann ist die einfachste Annahme ebenfalls die Gauß-Funktion.

$$\text{Gauß-Funktion: } y = y_0 \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-x_0}{\sigma} \right)^2} \quad (2)$$

$$\text{Lorentz-Funktion: } y = y_0 \cdot \frac{\sigma}{\sigma^2 + (x-x_0)^2} \quad (3)$$

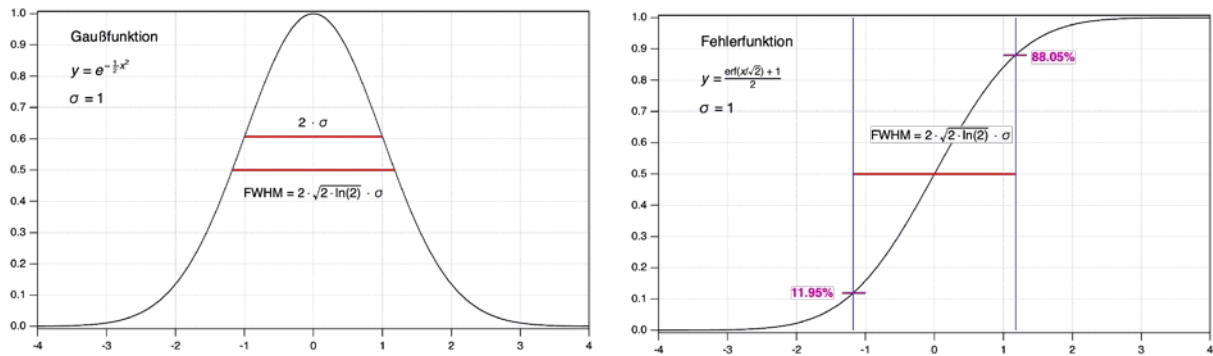
$y_0$ : Amplitude

$x_0$ : Peak-Position

$\sigma$ : Breite, Standardabweichung

Für die Breite der Kurve kann man statt der Standardabweichung  $\sigma$  auch die Halbwertsbreite (full width at half maximum, FWHM) angeben. Die FWHM kann in einem Diagramm als Breite auf halber Peakhöhe ermittelt werden. Für die Lorentz-Funktion ist die FWHM gleich  $2 \cdot \sigma$ , für die Gauß-Funktion gilt:  $FWHM = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \ln(2)} \cdot \sigma$ , also  $2.355 \cdot \sigma$ .

Als beliebig scharfe Objekte geht man von Punkten oder Kanten aus. Punkte beschreibt man mit der Delta-Funktion und Kanten mit der Stufenfunktion [4], die ihrerseits das Integral der Delta-Funktion ist. Das Signal eines Punktes ergibt sich aus der Faltung der Delta-Funktion mit einer Gauß-, Lorentz- oder jeder anderen Verteilungsfunktion. Diese Faltung ergibt einfach wieder diese Verteilungsfunktion, lediglich auf die Position der Delta-Funktion verschoben. Die Verbreiterung eines Punktes oder einer Linie entspricht damit der Verbreiterung durch die Apparatefunktion und damit der Auflösung.



**Abb. 1:** Gaußfunktion und Fehlerfunktion

Eine Kante wird bei der Faltung mit einer Gauß-Funktion zur Fehlerfunktion,  $\text{erf}(x)$  [5] und mit einer Lorentz-Funktion zum Arkustangens ( $\arctan$ ) [6]. Die Fehlerfunktion ist nicht als eine einfache, geschlossene Funktion beschreibbar, sondern wird numerisch berechnet und steht in wissenschaftlichen Auswerteprogrammen über Funktionsbibliotheken zur Verfügung. Man kann herleiten, dass der Funktionswert bei der halben Halbwertsbreite links und rechts des Wendepunkts 0,1195 und 0,8805 der Stufenhöhe beträgt. In Umkehrung folgt, dass in einer vereinfachten Auswertung ohne Kurvenanpassung die Distanz zwischen 11,95% und 88,05% der Stufenhöhe der FWHM entspricht (siehe Abbildung). Alternativ dazu kann man die FWHM auch über einen Fit der Daten mit einer entsprechend definierten Stufenfunktion bestimmen.

### 3.3 Aufbau und Funktionsweise des Rasterelektronenmikroskops

Das Rasterelektronenmikroskop (REM, engl.: Scanning Electron Microscope, SEM) ist ein Gerät zur Oberflächenstrukturanalyse von Festkörpern und findet in Forschung und Entwicklung verschiedener Disziplinen, aber auch in der industriellen Fertigung bis hin zur Kriminaltechnik vielfältige Anwendungen.

Im Unterschied zu Licht- und Transmissionselektronenmikroskopen liefert ein REM keine Direktbilder, denn bei dieser Mikroskopiemethode wird ein sehr fein gebündelter Elektronenstrahl zeilenweise über die Probenoberfläche geführt. Bei der Wechselwirkung der Primärelektronen mit der Probe werden unterschiedliche Wechselwirkungsprodukte erzeugt, von denen die Sekundär- und Rückstreuielektronen am wichtigsten für die Bildgebung sind. Ihre Anzahl wird punktweise mit Detektoren erfasst und das Signal elektronisch zu einem Bild zusammengesetzt. Die Vergrößerung lässt sich durch die Größe des abgerasterten Bereiches einstellen.

Mithilfe des REM können Strukturen mit einem Auflösungsvermögen von nur wenigen Nanometern mit einer gegenüber dem Lichtmikroskop tausendfachen Schärfentiefe un-

tersucht werden. Dabei wird die Auflösung im Wesentlichen durch die Größe des Wechselwirkungsbereichs der Primärelektronen in der Probe bestimmt. Durch die Analyse weiterer Wechselwirkungsprodukte können zusätzliche Informationen über die Probe gewonnen werden. Hierauf wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.

Zunächst sollen die Komponenten eines REM vorgestellt werden (Abb. 2). Wegen der zur Beschleunigung der Elektronen notwendigen Hochspannung und um eine Streuung der Elektronen auf dem Weg zur Probe zu vermeiden, befinden sich alle Komponenten im Hochvakuum.

### **Strahlerzeugung**

Die Primärelektronen werden durch thermische Emission erzeugt. Der Emittor im REM besteht aus Kathode, Anode und dem Wehnelt-Zylinder. Ein haarnadelförmig gebogener Wolframdraht bildet die Kathode und wird durch einen Stromfluss auf ca. 2800 K erhitzt. Die Gesamtheit der dadurch von der Kathode emittierten Elektronen wird als Emissionsstrom bezeichnet. Die auf eine Flächeneinheit bezogene Emissionsstromdichte kann nach der Richardson-Gleichung berechnet werden:

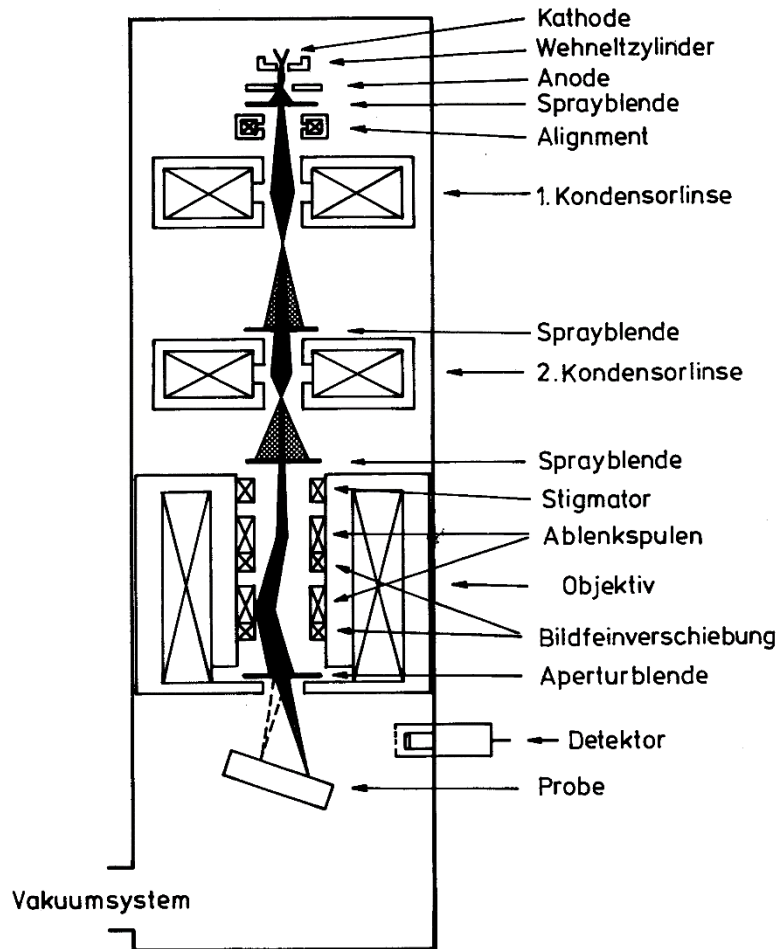
$$j_E = AT^2 e^{-W/kT} \quad (4)$$

mit der Temperatur  $T$  und der Austrittsarbeit  $W$  der Kathode sowie der Richardson-Konstante  $A = 4\pi k^2/h^3 \cdot me$  und der Boltzmann-Konstante  $k$ .

Durch die Beschleunigungsspannung werden die Elektronen zur Anode hin beschleunigt und passieren dabei den Wehnelt-Zylinder, der auf einem negativen Potential gegenüber der Kathode liegt und eine Fokussierung des Elektronenstrahls bewirkt. Am sog. Crossover öffnet sich der Elektronenstrahl kegelförmig zur Anode hin und tritt durch ein Loch durch sie hindurch.

Der Strom am Crossover ergibt sich aus der Emissionsstromdichte und dem Strahlquerschnitt mit dem Durchmesser  $d_C$ :

$$I_C = \frac{\pi d_C^2}{4} j_E \quad (5)$$



**Abb. 2:** Schematischer Aufbau eines Rasterelektronenmikroskops. [7]

Eine weitere wichtige Kenngröße des Elektronenstrahls ist der Richtstrahlwert. Er wird auch als Helligkeit bezeichnet und ist definiert als das Verhältnis aus der Stromdichte am Crossover und dem Raumwinkel. Letzterer berechnet sich nach  $4\pi \sin^2(\alpha/4) \approx \pi\alpha^2/4$ , wenn  $\alpha$  der halbe Öffnungswinkel des Strahlkegels, die sogenannte Apertur, ist. Damit folgt für den Richtstrahlwert:

$$\beta = \frac{4I_C}{\pi^2 d_C^2 \alpha} \quad (6)$$

Er ist also umso größer, je besser die Fokussierung am Crossover, je höher die Temperatur der Kathode und je geringer ihre Austrittsarbeit ist. Aus diesem Grund wird meist Wolfram wegen seiner hohen Schmelztemperatur mit einer Beschichtung, um die Austrittsarbeit zu reduzieren, als Kathode verwendet. Größe und Ausrichtung des Strahlstroms können durch eine nach der Anode angeordnete Strahlblende und Alignmentspulen eingestellt werden.

### **Linsen- und Ablenksystem**

Das Linsensystem eines REM besteht aus Kondensor- und Objektivlinse und mehreren Blenden. Es bewirkt eine mehrfach verkleinerte Abbildung des Crossover auf die Probe. Das Auflösungsvermögen ist durch den daraus resultierenden Strahldurchmesser auf der Probe einschließlich der Abbildungsfehler begrenzt. Abbildungsfehler führen dazu, dass die von einem Punkt ausgehenden Elektronen nach dem Durchlaufen der Linsen nicht wieder in einem Punkt zusammenlaufen, sondern ein Fehlerscheibchen bilden, wodurch es zu einer Strahlverbreiterung kommt. In weitgehender Analogie zur Optik treten im REM die gleichen Abbildungsfehler wie in einem Lichtmikroskop auf: sphärische Aberration, Astigmatismus und Beugungsfehler.

Das Ablenksystem dient dazu, den Elektronenstrahl zum Abrastern über die Probenoberfläche zu führen. Außerdem enthält es Spulen zur Astigmatismuskorrektur und eine Aperturblende zur finalen Einstellung des Strahldurchmessers.

### **Detektoren und Bildgebung**

Die bei der Wechselwirkung des Elektronenstrahls mit der Probe entstehenden Sekundär- und Rückstreuelektronen werden von einem Everhart-Thornley-Detektor erfasst. Dabei handelt es sich um eine Kombination aus einem Szintillator und einem Photomultiplier. Auftreffende Elektronen erzeugen im Szintillator Photonen, die auf die Photokathode des Photomultipliers geleitet werden, der daraus ein elektrisches Signal erzeugt. Von einer Auswerteelektronik werden die detektierten Elektronen für jeden Rasterpunkt gezählt. Die Ergebnisse werden in die Graustufenwerte des angezeigten Bildes übersetzt. Durch Variation der elektrischen Verstärkungsparameter des Detektors können Helligkeit und Kontrast des Bildes gesteuert werden.

Eine Diskriminierung bezüglich der kinetischen Energie der Sekundär- und Rückstreuelektronen wird durch ein metallisches Gitter erreicht, das vor dem Szintillator angeordnet ist und entweder auf einem positiven Potential liegt, um die Sekundärelektronen anzuziehen, oder auf einem negativen Potential liegt, so dass nur die Rückstreuelektronen mit höherer kinetischer Energie den Szintillator erreichen. Wenn das Potential variiert werden kann, oder - wie im vorliegenden Aufbau - zwei verschiedene Detektoren verwendet werden, können separate Sekundär- und Rückstreuelektronenbilder erzeugt werden.

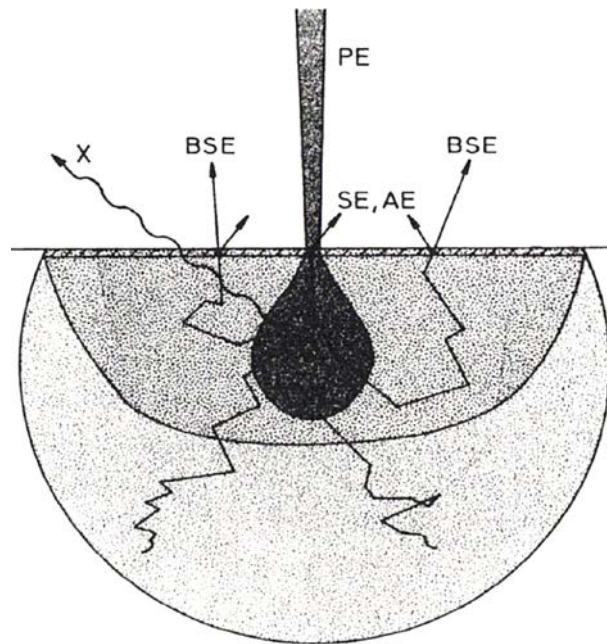
## **3.4 Wechselwirkungsprodukte und Bildkontrast**

Aufgrund der Beugung des Elektronenstrahls beim Eintritt in die Probe ergibt sich ein birnenförmiger Bereich, in dem die Primärelektronen absorbiert werden und der sich - je nach Energie der Primärelektronen - bis in eine Tiefe von wenigen Mikrometern erstreckt. Gestreute Elektronen können aus dieser Anregungsbirne hinaus diffundieren und weiter wechselwirken. Als Wechselwirkungsprodukte verlassen Elektronen und elektromagnetische Strahlung verschiedener Energie die Probe und können analysiert werden (Abb.3).

### **Sekundär- und Rückstreuelektronen**

Für die Bildgebung im REM sind vor allem Sekundärelektronen und Rückstreuelektronen relevant. Die Anzahl der vom jeweiligen Detektor erfassten Sekundär- bzw. Rückstreuelektronen im Verhältnis zur Anzahl der einfallenden Primärelektronen wird als Ausbeute bezeichnet. Für die folgenden Betrachtungen wird angenommen, dass die Ausbeuten proportional zur Anzahl der erzeugten Sekundär- bzw. Rückstreuelektronen sind.

Sekundärelektronen entstehen durch Wechselwirkung mit der Elektronenhülle der Probenatome. Dabei handelt es sich um stark inelastische Streuvorgänge, bei denen nur ein kleiner Teil der Energie der Primärelektronen auf die Sekundärelektronen übertragen wird.



**Abb. 3:** Bereich und Produkte der Wechselwirkung des Elektronenstrahls mit der Probe. Bezeichnungen: PE - Primärelektronen, BSE - Rückstreuerelektronen, SE - Sekundärelektronen, AE - Auger-Elektronen, X - Röntgenstrahlen. [8]

Sekundärelektronen mit einer Energie, die größer als die Austrittsarbeit ist, können die Probe verlassen, wobei die Wahrscheinlichkeit dafür wie  $\exp(-z/w)$  mit dem Abstand  $z$  von der Oberfläche abfällt. Hierbei ist  $w$  die mittlere freie Weglänge der Sekundärelektronen, die bei einigen nm liegt und damit den Tiefenbereich markiert, aus dem das Signal der Sekundärelektronen stammt.

Wird die Probenoberfläche gegenüber dem Elektronenstrahl um den Winkel  $\varphi$  gekippt, so reduziert sich der Abstand zur Oberfläche um  $\cos(\varphi)$ . Für die Anzahl der Sekundärelektronen bedeutet das:

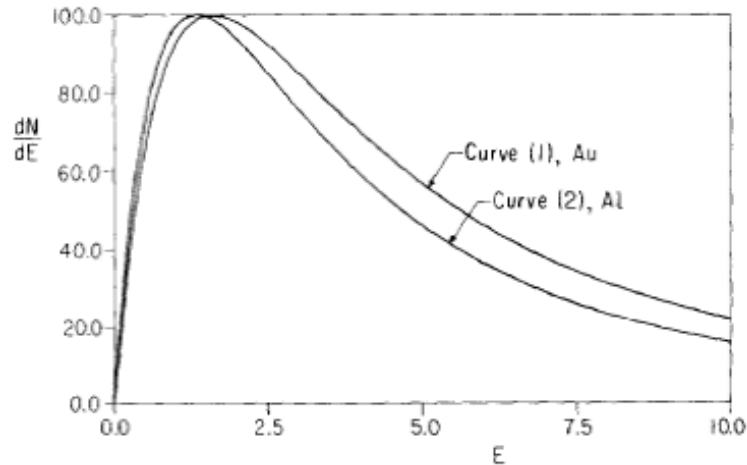
$$N_{SE}(\varphi) \propto \int_0^\infty \exp\left(-\frac{z \cos(\varphi)}{w}\right) dz = \frac{w}{\cos(\varphi)} \quad (7)$$

Das Energiespektrum der Sekundärelektronen lässt sich mit einigen vereinfachenden Annahmen wiedergeben durch:

$$\frac{dN_{SE}}{dE_{SE}} \propto \frac{E_{SE}}{E_{PE}} (E_{SE} + W_A)^{-4} \quad (8)$$

wobei  $E_{SE}$  bzw.  $E_{PE}$  die Energien der Primär- bzw. Sekundärelektronen sind und  $W_A$  die Austrittsarbeit ist. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 4 wiedergegeben.

Das Spektrum der Sekundärelektronen hat ein Maximum bei wenigen eV und fällt zu höheren Energien hin ab. Häufig wird eine Energie von 50 eV als obere Grenze für Sekundärelektronen verwendet, indem der Detektor entsprechend eingestellt wird.



**Abb. 4:** Spektrum der Sekundärelektronen nach (8), normiert auf das Maximum und berechnet mit den Austrittsarbeiten von Gold bzw. Aluminium. [9]

Weiterhin ist aus (8) ersichtlich, dass die Ausbeute der Sekundärelektronen von der Energie der Primärelektronen abhängt, was auf die sich verändernde Eindringtiefe der Primärelektronen und die dadurch beeinflusste Wahrscheinlichkeit für die Sekundärelektronen, die Probe zu verlassen, zurückzuführen ist.

Als Rückstreuielektronen werden alle Elektronen mit einer Energie größer als die der Sekundärelektronen bezeichnet (Abb. 5). Sie entstehen bei annähernd elastischen Streuvorgängen der Primärelektronen an den Atomkernen der Probe. Tendenziell nimmt ihre Energie mit zunehmender Tiefe ihres Entstehungsortes aufgrund von inelastischen Streuungen auf dem Weg zur Probenoberfläche ab. Die „low-loss-Elektronen“, die einen großen Teil der Energie der Primärelektronen tragen und die auch den größten Teil der Ausbeute der Rückstreuielektronen ausmachen, entstammen daher aus einem ähnlichen Tiefenbereich wie die Sekundärelektronen.

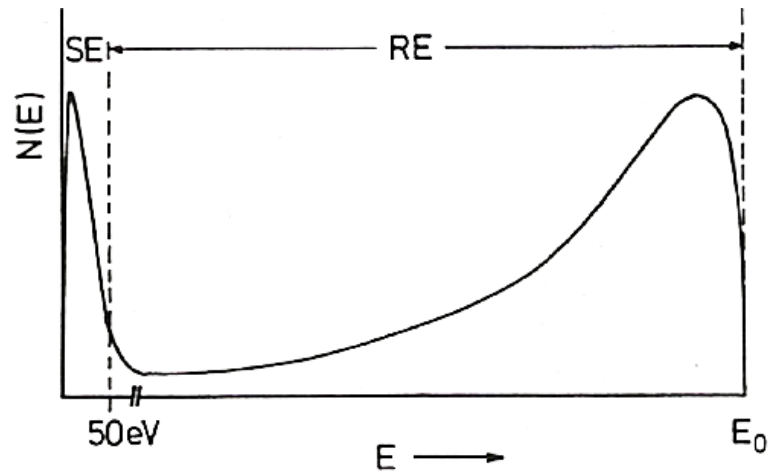
Aufgrund der mit höherer Energie größeren mittleren freien Weglänge ist die Wahrscheinlichkeit, die Probe zu verlassen, für Rückstreuielektronen weniger von der Energie der Primärelektronen und vom Kippwinkel der Probenoberfläche abhängig als für Sekundärelektronen. Jedoch ist die Ausbeute der Rückstreuielektronen deutlich stärker von der Ordnungszahl der Atome in der Probe abhängig als die der Sekundärelektronen.

Zum Kontrast im REM-Bild tragen verschiedene Effekte bei, die für Sekundär- und Rückstreuielektronen unterschiedlich ausgeprägt sind.

Der Flächenneigungskontrast äußert sich darin, dass gegenüber der Richtung des Elektronenstrahls geneigte Flächen auf der Probenoberfläche heller erscheinen. Er kommt aufgrund der Winkelabhängigkeit der Ausbeute zustande und trägt wesentlich zum Kontrast im Sekundärelektronenbild bei.

Der Materialkontrast trägt hauptsächlich zum Kontrast im Rückstreuelektronenbild bei und resultiert aus der höheren Ausbeute bei größeren Ordnungszahlen des Probenmaterials.

Der Abschattungskontrast lässt vom Detektor abgewandte Bereiche der Probe dunkler erscheinen und trägt in Verbindung mit der hohen Schärfentiefe des REM-Bildes zum dreidimensionalen Eindruck bei.



**Abb. 5:** Schematische Darstellung eines Elektronenspektrums im REM mit Sekundärelektronen (SE), Rückstreuelektronen (RE) und dem elastischen Peak bei der Energie der Primärelektronen ( $E_0$ ). [7]

Ferner spielen auch Kanten- und Rauheitseffekte (herauspringende Kanten erscheinen heller, Gräben und glatte Flächen dunkler) sowie sog. Channeling- und Potentialeffekte (Bereiche unterschiedlicher Kristallorientierung und mit verschiedenem elektrischem Potential erscheinen unterschiedlich hell) eine Rolle.

### Auger-Elektronen und charakteristische Röntgenstrahlung

Auger-Elektronen entstehen aufgrund der Ionisation oder der Anregung einer inneren Schale der Elektronenhülle der Probenatome. Beim anschließenden Übergang eines Elektrons von einer energetisch höheren Schale wird Energie frei, die ein weiteres Elektron auf einer äußeren Schale anregen kann. Auger-Elektronen, die nahe der Probenoberfläche erzeugt werden, können die Probe verlassen und haben ein für die Probenatome charakteristisches Energiespektrum, das mithilfe eines energieauflösenden Detektors aufgenommen werden kann.

Parallel zur Erzeugung von Auger-Elektronen tritt bei der Anregung oder Ionisation der inneren Schalen die Emission von charakteristischer Röntgenstrahlung auf, die spektrometrisch erfasst werden kann. Dieses Analyseverfahren ist als energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDS oder EDX) bekannt. Das Verhältnis der Erzeugung von Röntgenphotonen und Augerelektronen beim Nachrücken äußerer Elektronen nach der Anregung oder Ionisation innerer Schalen hängt von der Ordnungszahl ab. Bei schweren Kernen überwiegt die Emission von Röntgenstrahlung.

### 3.5 Literatur

N. Erdmann, D. C. Bell, R. Reichelt in: Handbook of Microscopy. Springer (2019), [https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-030-00069-1\\_5.pdf](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-030-00069-1_5.pdf)

H. Bethge, J. Heydenreich (Hrsg.): Elektronenmikroskopie in der Festkörperphysik. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften (1982), Kapitel 6

[1] [https://de.wikipedia.org/wiki/Faltung\\_\(Mathematik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Faltung_(Mathematik))

[2] <https://de.wikipedia.org/wiki/Normalverteilung>

[3] <https://de.wikipedia.org/wiki/Cauchy-Verteilung>

[4] <https://de.wikipedia.org/wiki/Heaviside-Funktion>

[5] <https://de.wikipedia.org/wiki/Fehlerfunktion>

[6] [https://de.wikipedia.org/wiki/Arkustangens\\_und\\_Arkuskotangens](https://de.wikipedia.org/wiki/Arkustangens_und_Arkuskotangens)

[8] L. Reimer: Scanning Electron Microscopy. Springer (1998)

[7] P. F. Schmidt: Praxis der Rasterelektronenmikroskopie. expert (1994)

[9] M.S. Chung and T. E. Everhart, J. Appl. Phys. 45, 707 (1974)

[10] Carl-von-Ossietzky-Universität Oldenburg: Grundlagen EBIC. <http://oops.uni-oldenburg.de/401/8/ebic.pdf>

## 4. Hinweise

### Justage des Systems:

- Settings für default Einstellungen können gespeichert werden (oben rechts).

#### 1. Filament und Apertur positionieren

- Filament (source image, dazu: Signal monitor einstellen)
  - Brightness im Signal Monitor so einstellen, dass Nulllinie auf Null sitzt, dann nur noch über Kontrast arbeiten
  - Beim Einschalten Filamentstrom etwas runternehmen
  - Filamentstromeinstellung im optimalen Arbeitsbereich (Beginn des zweiten Maximums) – Filament – optimale Helligkeit einstellen und auch homogenes Bild, keine Schatten
  - Emissionsstrom anpassen, bis das Filament richtig geheizt ist (gleichmäßige Helligkeit)
  - Typisch: 100  $\mu$ A
  - Zentrierung des Filaments – Align slider – Hellen spot in die Mitte zentrieren.
  - Center Filament – Positionierung des Filaments
  - mit Align Aperture – Positionierung der Apertur
- 
- Testen, ob das Filament zentral bleibt, wenn die Spot size verändert wird
  - Center filament bei hoher resolution testen (Stufe 6, hier den Spot mit center filament zentrieren)
  - Bei Blende 3 dann mit center aperture positionieren.
  - Bei optimalen Einstellungen bleibt das Filamentbild zentral, wenn die Spot size variiert wird.
  - Am Ende muss man die center position behalten, wenn man die Spotsizes über alle Werte variiert

#### 2. Einstellung von Arbeitsabstand und Fokus

- Arbeitsabstand von ca. 10 mm wählen – Achtung Z- Position nie ohne chamber scope verschieben! Betreuer sollten die Sicherheitsbarriere einschalten, so dass die Probe nicht gegen den BSE Detektor oder das REM gefahren werden kann.
- SE Bild der Probe aufnehmen – Fokus muss etwa bei 10 mm liegen.
- chamber scope benutzen, um Abstand der Probe zu kontrollieren. Keinesfalls darf die Probe zu nahe an den Detektor herangefahren werden, sonst besteht Beschädigungsgefahr.

#### 3. Einstellung der optischen Achse inkl. Objektivlinse

- Nun die optische Achse vollständig inkl. Objektivlinse einstellen. Minimierung der Sphärischen Aberration
- Wobbler → Strom durch die Objektivlinse wird variiert.
- ROI auswählen
- Wobbler- Frequenz und Amplitude so einstellen, dass man gut sehen kann, wie sich das Bild auf und zuzieht
- Stigmator einstellen: man sieht, dass die „Schärfelinie“ beim Wobbeln mal in x- Mal in y- Richtung ein Optimum durchläuft, aber nicht gleichzeitig scharf ist
- Astigmatismus korrigieren:
- Wieder zurück auf Wobbeln, Blende verschieben, bis sich das Bild gleichmäßig auf- und zuzieht
- Bild ist dann evtl. mal in x und mal in y-Richtung scharf (beim Wobbel-Vorgang): so einstellen (Astigmatismus- Korrektur), dass es homogen herum unscharf ist – Focus dann nachstellen

#### 4. Begrenzung der Auflösung durch äußere Einflüsse:

Äußere Einflüsse wie Schwingungen oder elektromagnetische Störungen beeinflussen die Elektronen auf ihrer Flugbahn. Die Stärke dieses Einflusses hängt ab von

- Hochspannung/Beschleunigungsspannung
- Arbeitsabstand
- Strahlstrom
- Der Arbeitsabstand für die optimale Auflösung sollte möglichst kurz sein, mit welchem Arbeitsabstand man eine gute Auflösung erreicht ist aber wiederum auch Abhängig von der Beschleunigungsspannung. Ideal sind ca. 10 mm

## 5. mechanische Blenden

Mechanische Blenden, auf der  $\mu\text{m}$ -Schraube von außen nach innen markiert: 750  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$  – die 30  $\mu\text{m}$  mechanische Blende würde die beste Auflösung erreichen.

## 6. Einfluss der Beschleunigungsspannung:

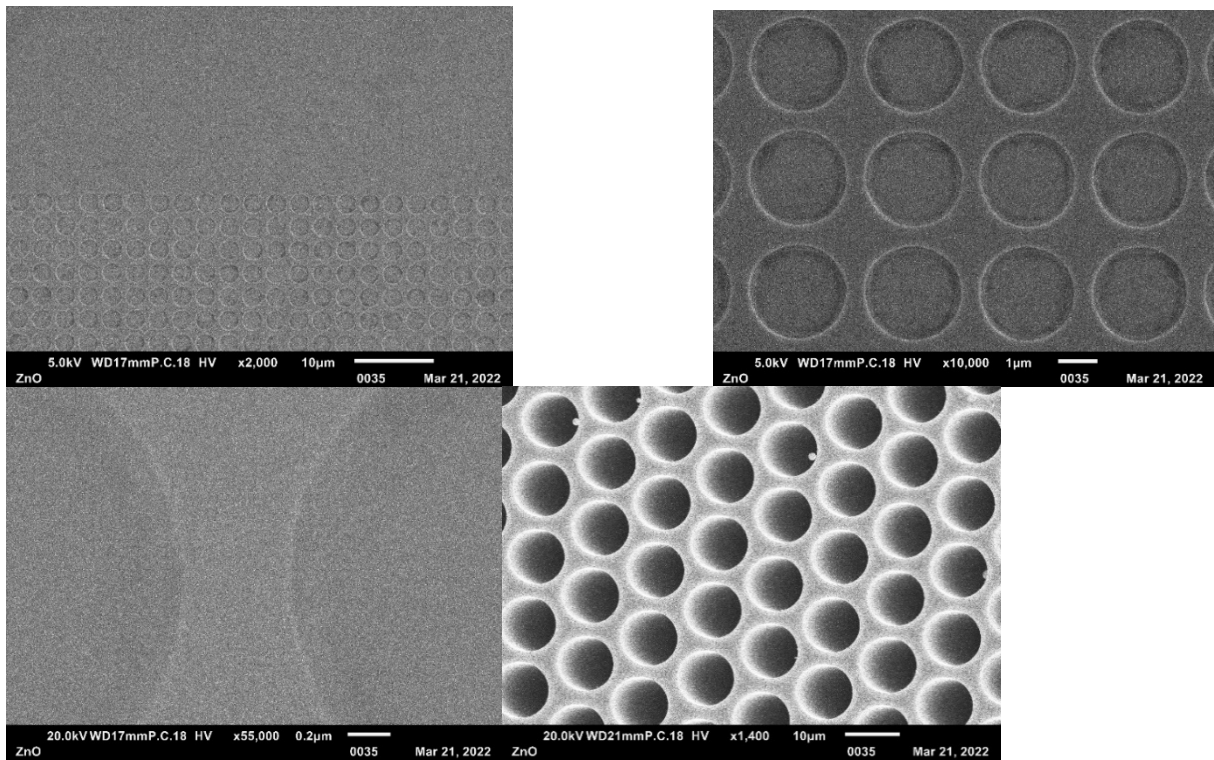
Bei Veränderung der Beschleunigungsspannung wird das Bild vor allem durch die Veränderung der Strahlgeometrie unscharf, deshalb sollte man zu mindest wieder wobbeln und die Aberrationen minimieren - denn die Hochspannung verändert die Strahlführung (Objektivlinsen sind nicht mehr auf den passenden Hochspannungswert angepasst).

## Hinweise zu den Aufgaben

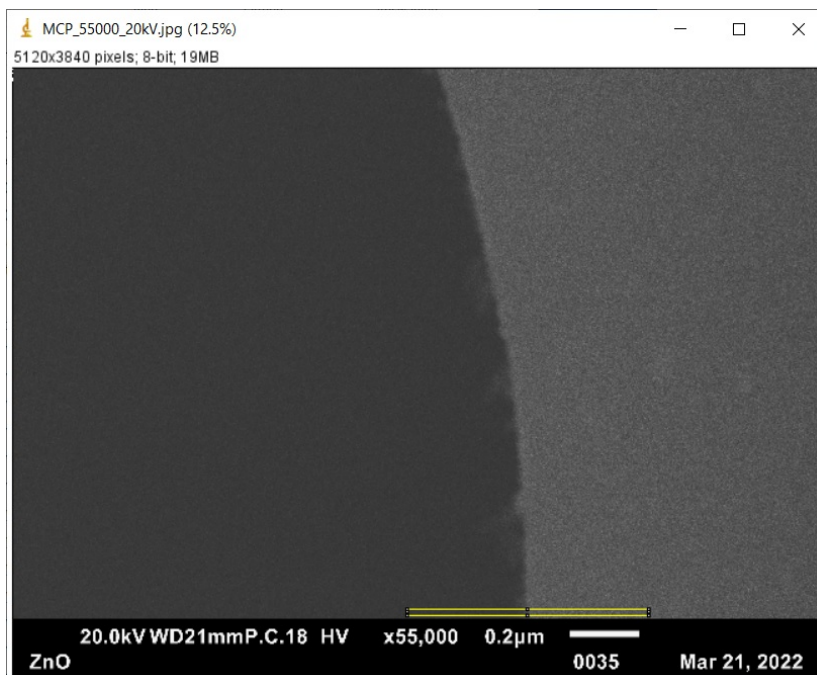
### Zu Aufgabe 1

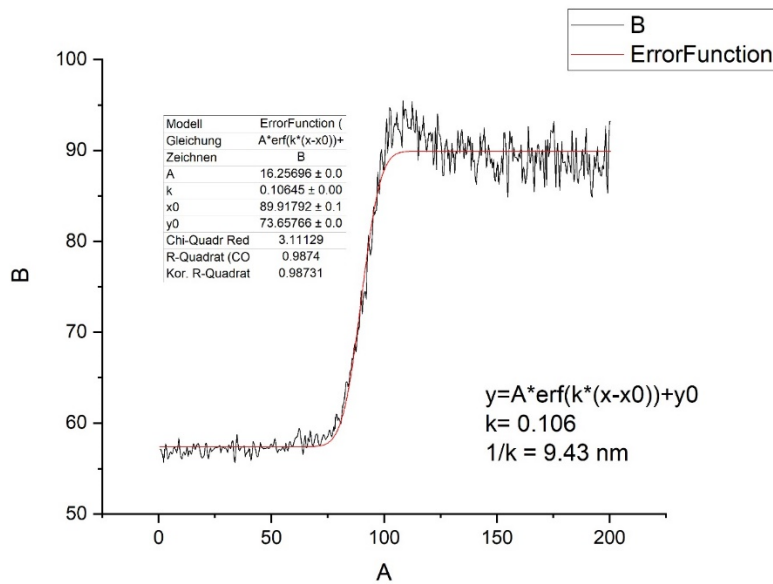
Die Musterprobe weist z.B. periodische Strukturen mit einem Abstand von 3  $\mu\text{m}$  auf. Nehmen Sie Sekundärelektronenbilder bei hoher Vergrößerung und ca drei verschiedenen Beschleunigungsspannungen bei 10 .. 20 kV auf (geeignete Rastergeschwindigkeit (Slowscan) für gute Bildqualität wählen).

Machen Sie dabei Aufnahmen bei geringer Spotsize / hoher Auflösung mit der 50  $\mu\text{m}$  und 30  $\mu\text{m}$  Blende jeweils bei 10, 15 und 20 kV. Bei Veränderung der Beschleunigungsspannung sind die Justageschritte ab dem „Wobbeln“ zu wiederholen, beim Wechsel der Blende auch die Zentrierung des Filaments. Prüfen Sie die Zentrierung von Filament und Apertur auch am Schluss und vergleichen sie die Position mit den Aufnahmen zu Beginn des Experiments. Was sind begrenzende Faktoren für das Auflösungsvermögen?



**Abb. 9:** Sekundärelektronenbild der Musterprobe in verschiedenen Vergrößerungen sowie Bild einer Mikrokanalplatte (unten rechts)





**Abb. 10:** Bild einer scharfen Kante in Richtung des Kantenüberstands für die Mikrokanalplatte aus Abb. 9 (entsprechende Sichtrichtung muss beachtet werden!) mit Line Profile in ImageJ, Plot des Linienprofils und Fit mit einer Fehlerfunktion zur Bestimmung des Auflösungsvermögens.

Analysieren Sie die Bilder mit dem Programm ImageJ. Nutzen Sie dabei die Möglichkeit zur Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses durch Summation von Bildinformationen ggf. durch Wahl eines breiten Line Profile (was passiert dabei an gekrümmten Linien? Abb. 10); Bestimmen Sie den Abstand der Strukturen in einem der Bilder und vergleichen Sie das Ergebnis mit dem angegebenen Bildmaßstab. Ermitteln Sie das Auflösungsvermögen als FWHM (full width at half maximum) eines Fits mit der Fehlerfunktion und stellen Sie die Werte für verschiedene Blenden und Beschleunigungsspannungen.

## Zu Aufgabe 2

Bestimmen Sie für alle Bilder auch das S/N (Signal zu Rausch Verhältnis). Was beobachten Sie? Machen Sie für eine gute Einstellung Bilder mit verschiedenen Scangeschwindigkeiten und stellen Sie das S/N Ratio über der Scangeschwindigkeit dar. Überlegen Sie, welchen Einfluss das Rauschen auf das erzielte Auflösungsvermögen haben könnte. Welche externen Störeinflüsse beobachten Sie und wie beeinflussen diese das Auflösungsvermögen?

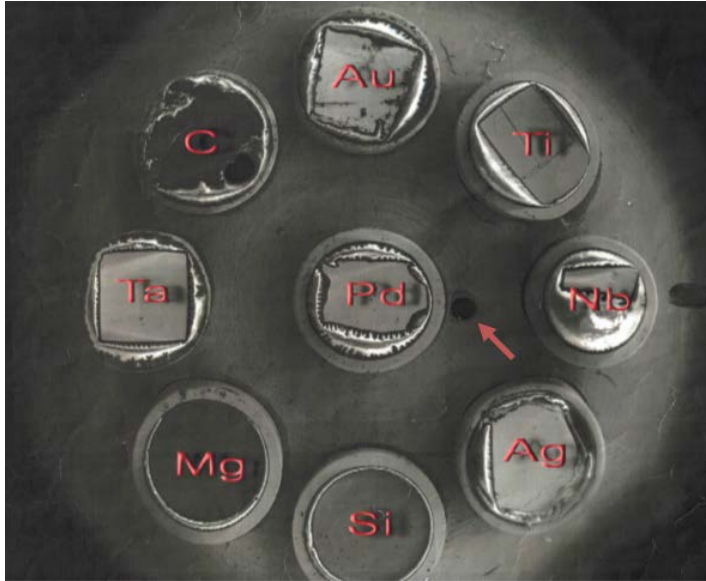
Analysieren Sie die Bilder mit dem Programm ImageJ.

## Aufgabe 3

Ermitteln Sie die Abhängigkeit der Ausbeuten der Sekundär- und der Rückstreuerelektronen vom Kippwinkel der Probe und von der Ordnungszahl der Probenatome.

Die Ausbeute der Sekundärelektronen (SE) bzw. der Rückstreuerelektronen (SE) ist das Verhältnis aus der Zählrate des jeweiligen Detektors und dem Fluss der Primärelektronen. Daher müssen die Detektoreinstellungen und der Strahlstrom während der Bestimmung ihrer Abhängigkeiten konstant gehalten werden. Außerdem muss der Strahlstrom gemessen werden. Dies geschieht im vorliegenden Aufbau mittels einer Ringelektrode. Damit diese Messung nicht von SE und RE beeinflusst wird, befindet sich im Probenhalter mit den verschiedenen Elementen eine durchgehende Bohrung (Abb. 11).

Fahren Sie den RE-Detektor und die Aperturblende heraus und stellen Sie eine Beschleunigungsspannung von 15 keV ein. Stellen Sie Vergrößerung und Bildausschnitt so ein, dass die Pd-Probe vollständig zu sehen ist. Wählen Sie eine mittlere Helligkeits- und Kontrasteinstellung für das SE-Bild. Achten Sie darauf, dass die Probe für die Messungen immer scharfgestellt ist.



**Abb. 11:** Probenhalter mit verschiedenen Elementproben zur Bestimmung der Abhängigkeiten der Ausbeuten der Sekundär- und Rückstreuelektronen. Der Pfeil markiert die durchgehende Bohrung zur Messung des Stroms der Primärelektronen.

Für die Messung des Probenstroms stellen Sie die Bohrung in die Mitte des Bildes. Erhöhen Sie sukzessive die Vergrößerung, bis kein Teil des Probenhalters mehr zu sehen ist. Der Elektronenstrahl fällt nun vollständig in die Bohrung. Stellen Sie den Strahlstrom mittels der Strahlblende (Spotsize) auf einen bequem reproduzierbaren Wert.

Messen Sie an 10 bis 20 möglichst ungestörten Stellen auf der Pd-Probe die Zählrate des SE-Detektors bei ca. fünf Einstellungen der Beschleunigungsspannung zwischen 10 und 20 kV. Dabei muss der Strahlstrom für jede Beschleunigungsspannung wieder eingestellt werden. Wiederholen Sie die Messreihe mit dem RE-Detektor.

Überprüfen Sie die Helligkeits- und Kontrasteinstellungen des Detektors, wenn Sie den Kippwinkel der Probe zwischen 0 und 45° variieren. Messen Sie dann die Zählraten bei konstanter Beschleunigungsspannung und bei ca. fünf Winkeleinstellungen. Wiederholen Sie die Messreihe mit dem anderen Detektor. Messen Sie schließlich nacheinander die Zählraten der beiden Detektoren bei konstanter Beschleunigungsspannung und bei einem Kippwinkel von 0° für die verschiedenen Elemente.

Berechnen Sie die Ausbeuten der SE und der RE und stellen sie die Abhängigkeiten von der Beschleunigungsspannung, dem Kippwinkel und der Ordnungszahl dar. Vergleichen Sie die Ergebnisse mit Ihren Erwartungen.

#### Zu Aufgabe 4

Nehmen Sie mittels Sekundär- und Rückstreuelektronen Bilder eines Halbleiterbauelements auf und optimieren Sie jeweils die Parameter, die die Bildqualität bestimmen.