TECHNIK UND PHYSIK DES RASTERELEKTRONENMIKROSKOPS

A. Grundlagen

1. Prinzip des Rasterelektronenmikroskops

Mit herkömmlichen Lichtmikroskopen lassen sich Strukturen beobachten, deren Ausdehnung wie z.B. bei Pflanzenzellen etwa im Mikrometerbereich liegen. Möchte man noch feinere Details sichtbar machen, so stößt man mit dem Lichtmikroskop an prinzipielle Grenzen, die durch die Wellenlänge des sichtbaren Lichts gegeben sind. 1932 meldeten die Berliner Wissenschaftler Ernst Ruska und sein Schwager Bodo von Borries das Elektronenmikroskop als Patent an. Mit diesem Gerät konnten zum ersten Mal Einzelheiten dargestellt werden, die bisher nur geahnt worden waren. Ein Beispiel ist in Abb. 1 zu sehen.

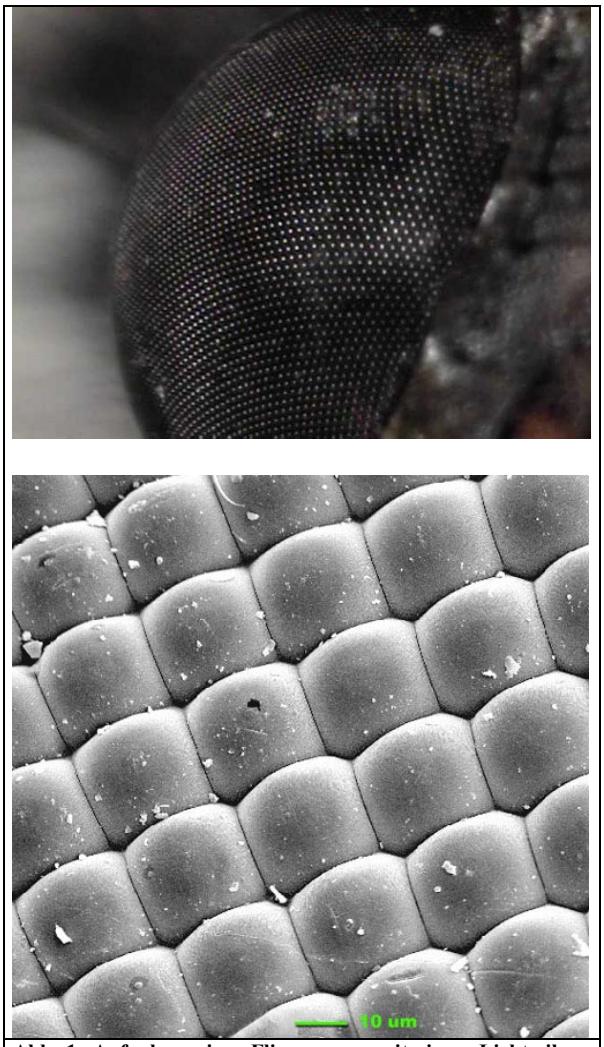

Abb. 1: Aufnahme eines Fliegenauges mit einem Lichtmikroskop (oben) bzw. einem Elektronenmikroskop (unten). Mit Hilfe eines Elektronenmikroskops lassen sich Ausschnitte sehr stark vergrößern. Im Bild unten sieht man das Facettenauge der Fliege in 3000-facher Vergrößerung.
(Bildquelle: http://ion.eas.asu.edu)

Ruska wurde für seine Bahn brechende Entwicklung 1986 mit dem Nobelpreis für Physik belohnt. Die technische Weiterentwicklung seines Mikroskops ermöglicht heute die Beobachtung von Strukturen bis fast in den atomaren Bereich.

In Elektronenmikroskopen werden, wie der Name bereits sagt, Bilder mit Hilfe von Elektronen gewonnen. Dabei gibt es aber unterschiedliche Funktionsweisen. Wir betrachten im Folgenden das *R*aster*e*lektronen*m*ikroskop (Abkürzung: REM), welches in der naturwissenschaftlichen und technischen Forschung und Entwicklung sehr weit verbreitet ist. Das Prinzip dieses Mikroskops ist im Grunde besonders einfach zu verstehen.

Der schematische Aufbau eines Rasterelektronenmikroskops ist in Abb. 2 dargestellt.

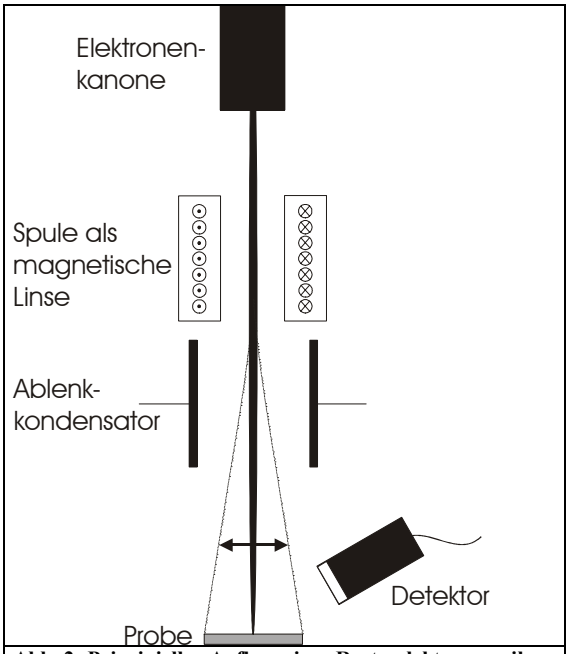

Abb. 2: Prinzipieller Aufbau eines Rasterelektronenmikroskops. Elektronen werden in einer Elektronenkanone beschleunigt und mit Hilfe einer oder mehrerer magnetischer Linsen auf die zu untersuchende Probe fokussiert. Mit Hilfe von Ablenkkondensatoren (oder –spulen) kann die Probe systematisch abgerastert werden (Doppelpfeil). Die Bedeutung des Detektors ergibt sich im weiteren Verlauf des Texts. Der ganze Aufbau befindet sich im Hochvakuum, damit die Elektronen nicht durch Stöße mit Luftmolekülen abgebremst werden.

Um ein Objekt wie z.B. ein Fliegenauge elektronenmikroskopisch abzubilden, werden Elektronen in einer Elektronenkanone beschleunigt. Ähnlich wie beim Fernsehbildschirm wird der Elektronenstrahl mit Hilfe von Ablenkkondensatoren (oder Ablenkmagnetspulen) systematisch Zeile für Zeile über das abzubildende Objekt geführt. Man sagt, die Probe wird mit Hilfe des Elektronenstrahls „abgerastert“. Daher stammt auch der Name „Rasterelektronenmikroskop“. Die hochenergetischen Elektronen des Elektronenstrahls treffen auf die Probe auf und setzen dort weitere Elektronen (so genannte Sekundärelektronen) frei. Diese Sekundärelektronen können zum Teil die Probe verlassen

© Dr. Roland Berger (2002)

und werden von einem positiv geladenen Detektor angezogen und registriert (Abb. 3). Synchron zur Bewegung des Elektronenstrahls auf der Probe wird der Elektronenstrahl des Monitors über die Bildschirmfläche geführt.

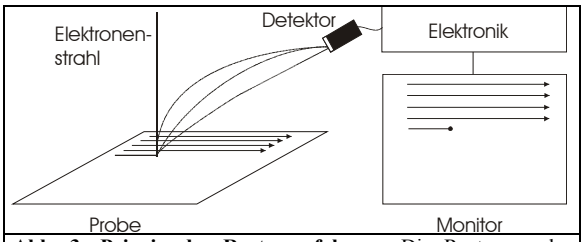

Abb. 3: Prinzip des Rasterverfahrens. Die Rasterung der Probe mit dem Elektronenstrahl erfolgt synchron zum Bildaufbau auf dem Monitor. Die von den Elektronen des Elektronenstrahls in der Probe erzeugten Sekundärelektronen werden aufgrund einer positiven Detektorspannung auf den eingezeichneten gekrümmten Bahnen vom Detektor angezogen. Je höher die Zahl der so registrierten Sekundärelektronen ist, desto heller wird der entsprechende Bildpunkt auf dem Monitor gezeichnet. Der Elektronenstrahl wird aufgrund der hohen Elektronengeschwindigkeit vom elektrischen Feld des Detektors nicht beeinflusst.

Das Prinzip des Bildaufbaus ist in Abb. 4 genauer beschrieben.

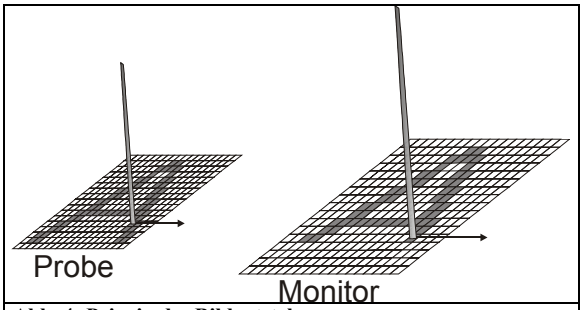

Abb. 4: Prinzip des Bildentstehung.
Links: Die abzubildende Probe (Buchstabe A) wird von dem Elektronenstrahl in Pfeilrichtung entlang des Kästchen-Rasters überstrichen.
Rechts: Synchron zum Elektronenstrahl bewegt sich der Schreibstrahl im Monitor über die Leuchtschicht. Seine Helligkeit wird in Abhängigkeit von der Zahl der pro Sekunde aus der Probe austretenden Sekundärelektronen geändert.

Der Elektronenstrahl trifft auf das abzubildende Objekt, in unserem Fall den Buchstaben A (Abb. 4 links). Diese Probe wird entlang des Kästchen-Rasters vom Elektronenstrahl wie in Abb. 3 überstrichen. An jedem Rasterelement wird mit Hilfe des Detektors die Zahl der Sekundärelektronen gemessen, die in einer bestimmten Zeit aus dem Objekt austreten. Synchron zu diesem Elektronenstrahl bewegt sich der Schreibstrahl über die Monitoroberfläche (Abb. 4 rechts). Die Zahl der freigesetzten Sekundärelektronen ist in der Regel von Rasterelement zu Rasterelement verschieden: Rasterelemente, an denen viele Sekundärelektronen austreten, werden am Bildschirm heller dargestellt als Punkte, an denen nur wenige Sekundärelektronen entstehen (so genannte Graukodierung, vgl. Abb. 5). Auf diese Weise entstehen Bilder wie z.B. das in Abb. 1 unten.

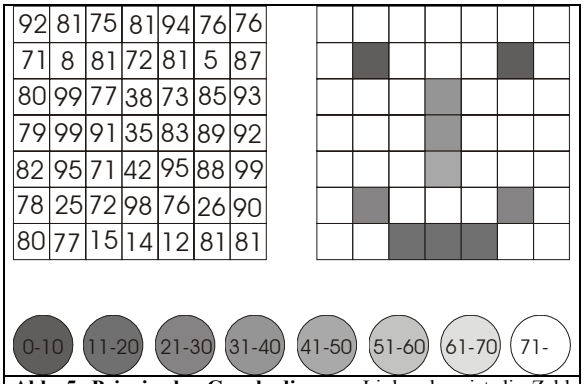

Abb. 5: Prinzip der Graukodierung. Links oben ist die Zahl der Sekundärelektronen abzulesen, wie sie Rasterelement für Rasterelement vom Detektor gemessen wurde. Entsprechend dieser Anzahl werden die Bildpunkte auf dem Monitor unterschiedlich hell dargestellt (rechts oben). Diese Graukodierung erfolgt gemäß der Zuordnung wie sie im Bild unten zu sehen ist.

Die Vergrößerung eines Rasterelektronenmikroskops lässt sich leicht verändern. Wenn die vom Elektronenstrahl abgerasterte Fläche eine Kantenlänge von 10 mm hat und das Resultat auf dem Bildschirm 10 cm breit ist, so beträgt die Vergrößerung $10cm/10mm = 10$ (vgl. Abb. 6). Wenn man die Kantenlänge des Rasters durch eine geringere Spannungsamplitude am Ablenkkondensator (Abb. 2) auf 2 mm verringert und dieser kleinere Bereich den Bildschirm wieder voll ausfüllt, so beträgt die Vergrößerung dagegen $10cm/2mm = 50$. Die Vergrößerung des Rasterelektronenmikroskops ist also im Gegensatz zu den Lichtmikroskopen nicht durch die verwendeten Linsen gegeben, sondern nur durch die Länge des Bereichs, den der Elektronenstrahl auf der Probenoberfläche abrastert.

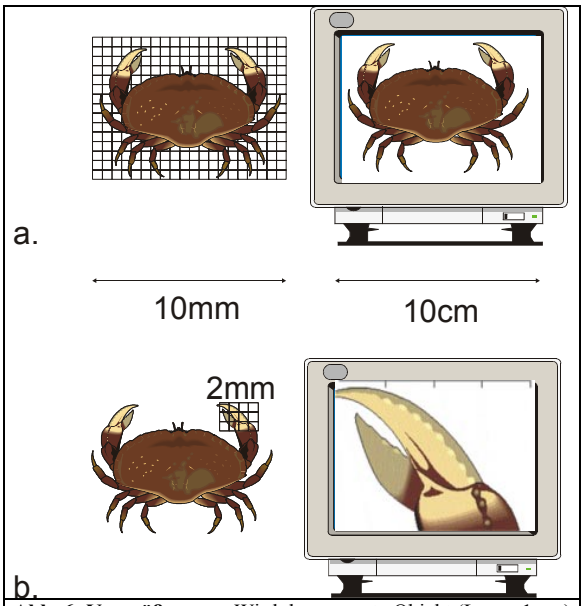

Abb. 6: Vergrößerung. Wird das gesamte Objekt (Länge 1 cm) abgerastert, so beträgt die Vergrößerung 10, da das Monitorbild 10 cm breit ist (a.). Wird dagegen nur ein 2 mm langer Teil vom Elektronenstrahl erfasst, so ist die Vergrößerung 50 (b.)

2. Was geschieht mit den Elektronen in der Probe?

Die Elektronen im Strahl (die so genannten Primärelektronen) haben eine kinetische Energie zwischen etwa 1 und 50 keV und dringen daher in das abzubildende Objekt (z.B. das Fliegenauge aus Abb. 1) ein. In Abb. 7 sind einige mit dem Computer berechnete Bahnen von Primärelektronen in der Probe zu sehen. Ihre Eindringtiefe T ist umso größer, je höher ihre kinetische Energie ist. Sie liegt typischerweise zwischen 0,1 und 10 µm.

Auf ihrem Weg durch die Probe dringen die Primärelektronen manchmal in die Atome der Probe ein und werden im anziehenden elektrischen Feld der Atomkerne abgelenkt (Abb. 8 links). Dies führt zu den typischen Zick-Zack-Bahnen, wie sie in Abb. 7 zu sehen sind.

Außerdem üben diese Elektronen aufgrund ihrer elektrischen Ladung Coulombkräfte auf die Elektronen der Probenatome aus. Sie werden abgestoßen und erhalten dadurch zum Teil so viel kinetische Energie, dass sie sich von den Probenatomen losreißen können (Ionisation, Abb. 8 rechts). Die kinetische Energie dieser Sekundärelektronen ist im Vergleich zu den auf die Probe auftreffenden Primärelektronen des Elektronenstrahls gering. Sie beträgt nur einige Elektronenvolt und ist damit etwa 1000 bis 10000 mal kleiner als die der Primärelektronen. Der Grund ist, dass ein an einem Atom vorbei fliegendes Primärelektronen aufgrund seiner hohen Geschwindigkeit die Coulombkraft nur sehr kurze Zeit wirkungsvoll auf ein Atomelektron ausüben kann. Dadurch bekommen diese Atomelektronen nur wenig Energie übertragen und ihre Geschwindigkeit und damit ihre Reichweite sind entsprechend klein. Die Reichweite beträgt nur einige Nanometer, also nur etwa ein Tausendstel der Reichweite der Primärelektronen. Deshalb können nur solche Sekundärelektronen die Probe verlassen und vom Detektor registriert werden, die aus einer sehr dünnen Oberflächenschicht stammen und sich in Richtung der Probenoberfläche bewegen. Die Dicke dieser Schicht ist in Abb. 7 mit t bezeichnet. In einer maßstabsgerechten Zeichnung wäre sie nicht mehr zu erkennen, da sie wesentlich dünner als die Eindringtiefe T der Primärelektronen ist. Eine elektronenmikroskopische Aufnahme mit Hilfe der Sekundärelektronen zeigt also die Oberfläche der Probe. Jedes Primärelektron kann eine größere Anzahl an Sekundärelektronen erzeugen, da jeweils nur ein kleiner Energiebetrag abgegeben wird.

In Abb. 9 ist die Bahn eines Primärelektrons schematisch dargestellt. Es handelt sich dabei um ein Primärelektron, welches die Probe nach einer Reihe von Richtungsänderungen wieder verlässt. Auf seinem Weg ionisiert es Probenatome. Die Bewegungsrichtungen der dabei freigesetzten Sekundärelektronen sind durch dünnere Striche markiert. Diejenigen Sekundärelektronen, die in der dünnen Oberflächenschicht (Dicke t) erzeugt werden, können die Probe verlassen, sofern sie sich in Richtung zur Oberfläche hin bewegen (dünne Pfeile).

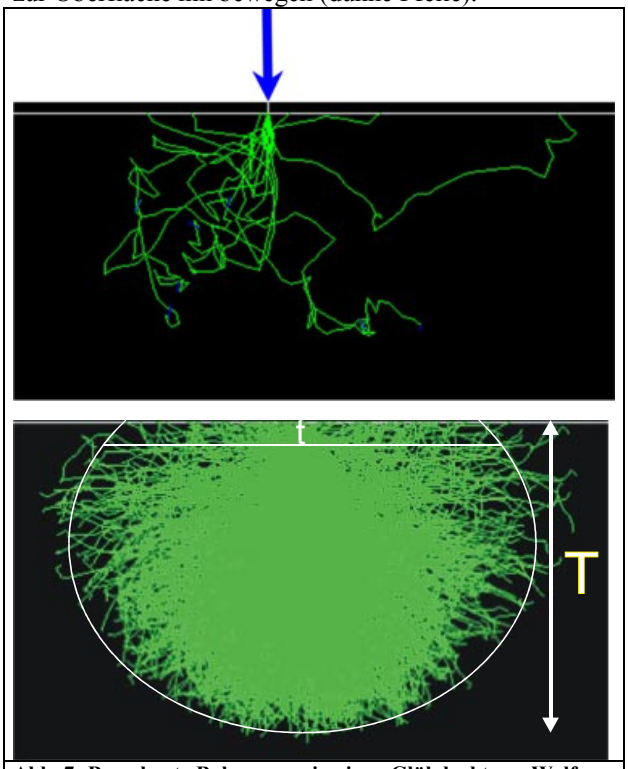

Abb. 7: Berechnete Bahnen von in einen Glühdraht aus Wolfram eindringenden Primärelektronen.
Oben: Die Eintrittsstelle der Strahlelektronen („Primärelektronen") ist mit einem Pfeil markiert. Auf ihrem Weg werden sie im anziehenden elektrischen Feld der Atomkerne abgelenkt und beschreiben somit Zick-Zack-Bahnen. Aufgrund der abstoßenden Wechselwirkung setzen die Primärelektronen weitere Elektronen frei („Sekundärelektronen"). Deren Bahnen sind in der Abbildung nicht eingezeichnet.
Unten: Dargestellt sind wiederum die Bahnen der Primärelektronen. Nur diejenigen Sekundärelektronen, die von den Primärelektronen innerhalb einer dünnen Oberflächenschicht (t≈1-10nm) erzeugt werden, können die Probe verlassen und im Detektor nachgewiesen werden. Die Eindringtiefe der Primärelektronen beträgt etwa T=1µm. Die Abbildung ist daher nicht maßstabsgerecht.

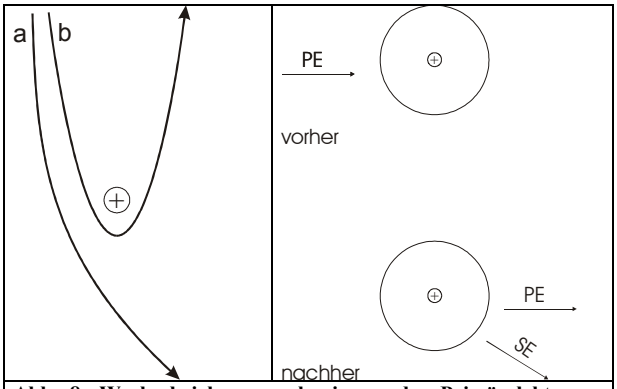

Abb. 8: Wechselwirkungsmechanismen der Primärelektronen mit den Atomen der Probe.
Links: Dringt ein Primärelektron in ein Probenatom ein, so wird es im anziehenden elektrischen Coulombfeld des Atomkerns abgelenkt. Je kleiner der Abstand zum Kern ist, desto stärker ist die Ablenkung (Bahnen a und b).
Rechts: Aufgrund der Abstoßung beschleunigt das Primärelektron (PE) ein Atomelektron. Ist die übertragene kinetische Energie groß genug, so kann das Elektron das Atom verlassen (Sekundärelektron SE).

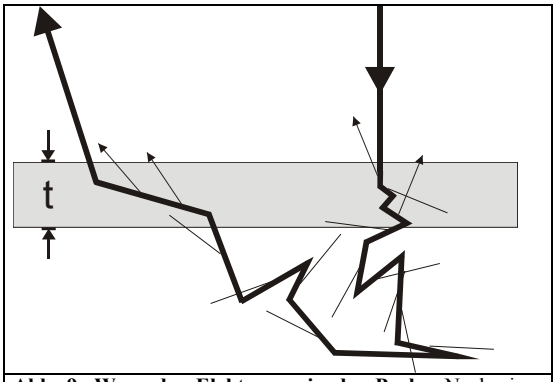

Abb. 9: Wege der Elektronen in der Probe. Nach einer Reihe von Richtungsänderungen aufgrund der Wechselwirkung mit Atomkernen verlässt das Primärelektron die Probe wieder. Auf seinem Weg durch die Probe setzt es eine Reihe von Sekundärelektronen frei, die ihre kinetische Energie in der Probe abgeben (dünne Linien) oder die Probe verlassen (dünne Pfeile). Letztere werden vom Detektor registriert und tragen zum Bildaufbau bei.

3. Woher kommt der Bildkontrast?

Ein Bild einer Oberfläche kann mit dem Rasterelektronenmikroskop nur dann erhalten werden, wenn sich das vom Detektor gemessene Signal von Rasterpunkt zu Rasterpunkt ändert. Ansonsten würde die gesamte Oberfläche gleich hell dargestellt. Wie kommen nun Helligkeitsunterschiede (Kontrast) zustande, auch wenn die Probe aus ein und demselben Material besteht? Zunächst würde man erwarten, dass dann an allen Rasterpunkten gleich viele Sekundärelektronen erzeugt wurden. Das ist aber bei einer unebenen Oberfläche nicht der Fall.

Kanten und Schrägen sind auf elektronenmikroskopischen Aufnahmen häufig besonders hell und sorgen damit für einen guten Kontrast. Z.B. sind in Abb. 1 die schrägen Begrenzungen jeder der Facetten des Fliegenauges heller als die flachen Bereiche. Damit sind die einzelnen Facetten gut zu unterscheiden. Diese erhöhte Helligkeit ist vor allem darauf zurückzuführen, dass der abtastende Elektronenstrahl an den Rändern der Vertiefungen nicht mehr senkrecht, sondern wesentlich flacher auftrifft. Warum dies zu dem beschriebenen Helligkeitseffekt führt, lässt sich mit Hilfe von Abb. 10 verstehen. Die vom Elektronenstrahl freigesetzten Sekundärelektronen können nur dann aus der Probe austreten und vom Detektor registriert werden, wenn sie aus einer dünnen Oberflächenschicht (Dicke t ca. 1-10 nm) stammen. Dieser Bereich ist in Abb. 10 oben schraffiert dargestellt und wird als „Austrittsvolumen“ bezeichnet. Das Austrittsvolumen wird größer, wenn der Elektronenstrahl schräg auf die Grenzfläche auftrifft (Abb. 10 oben rechts). An Schrägen werden daher entsprechend mehr Sekundärelektronen registriert und die zugehörigen Bildpunkte erscheinen in der rastermikroskopischen Aufnahme deshalb heller.

In Abb. 10 unten sind die Sekundärelektronenzahlen („Signal“) unter Berücksichtigung des Flächenneigungseffekts für verschiedene einfache Objekte schematisch dargestellt.

In Abb. 11 ist eine Stahlkugel abgebildet. Aufgrund des diskutierten Flächenneigungseffekts ist der Rand der Kugel besonders hell (vgl. auch Abb. 10 unten rechts). Zusätzlich ist die Anzahl der über einen Kugelquerschnitt registrierten Sekundärelektronen eingezeichnet. Hier sieht man die erhöhte Sekundärelektronenausbeute am Kugelrand besonders deutlich.

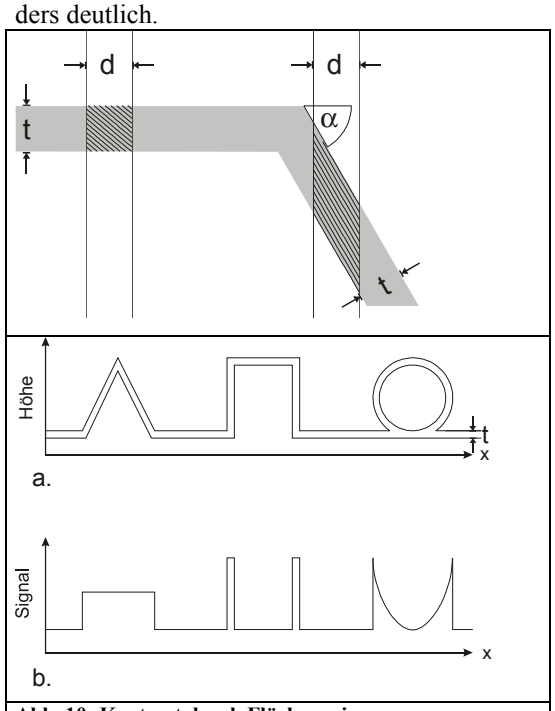

Abb. 10: Kontrast durch Flächenneigung.
Oben: Der Elektronenstrahl (Durchmesser d) trifft auf die Probe. Sekundärelektronen, die in der dünnen Oberflächenschicht (Dicke t) erzeugt werden, können die Probe verlassen und tragen zum Signal bei. Das entsprechende Austrittsvolumen ist schraffiert dargestellt. Trifft der Elektronenstrahl auf die Schräge rechts im Bild, so ist das Austrittsvolumen größer und entsprechend mehr Sekundärelektronen verlassen die Probe und werden vom Detektor registriert.
Unten: Aufgrund des beschriebenen Effekts gelangen aus Bereichen mit stärkerer Neigung mehr Sekundärelektronen zum Detektor, sodass ein größeres Signal registriert wird und die entsprechenden Bildpunkte auf dem Monitor heller erscheinen.

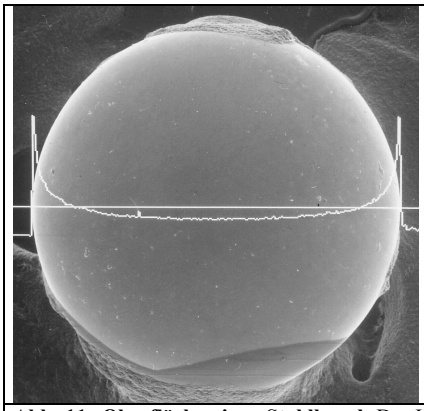

Abb. 11: Oberfläche einer Stahlkugel. Der Kugelrand ist besonders hell. Dies ist darauf zurückzuführen, dass dort aufgrund des Flächenneigungseffekts mehr Sekundärelektronen freigesetzt werden. Um dies zu verdeutlichen ist zusätzlich die Anzahl dieser Sekundärelektronen über einen Kugelquerschnitt abgebildet. Der Verlauf entspricht dem erwarteten Signalprofil der Abb. 10 unten rechts. (Ich danke H. Rühling, Zellbiologie Universität Kassel, für die Aufnahme.)

B. Vertiefende Fragen

1. Wie funktioniert die Elektronenkanone?

In Abb. 2 ist die Elektronenkanone noch als Black-Box dargestellt. Sie muss folgendes leisten: Zunächst müssen freie Elektronen erzeugt werden, die anschließend auf die gewünschte Energie zu beschleunigen sind.

Um freie Elektronen zu bekommen, können wir den glühelektrischen Effekt ausnutzen: Heizt man einen Draht, indem man durch ihn einen elektrischen Strom fließen lässt, so werden die Elektronen im Draht mit steigender Temperatur immer schneller. Denn eine höhere Temperatur bedeutet mikroskopisch gesehen ja nichts anderes als eine höhere kinetische Energie der Teilchen, also auch der frei beweglichen Elektronen im Metall. Wenn deren Geschwindigkeit hinreichend groß ist, können sie den Draht verlassen. Außer den Elektronen wird auch Licht erzeugt, das Metall glüht. In der Glühlampe interessiert uns dieses Licht, die Elektronen sind unwichtig. In der Elektronenkanone ist es umgekehrt. Die kinetische Energie der Elektronen reicht durch das Aufheizen bei weitem noch nicht aus, sie müssen nach Verlassen des Glühdrahts noch weiter beschleunigt werden. Dazu lässt man die Elektronen ein elektrisches Feld durchlaufen, welches durch die Beschleunigungsspannung U_B erzeugt wird. Typischerweise beträgt die Beschleunigungsspannung 10 kV. Das Innere der Elektronenkanone ist in Abb. 12 abgebildet.

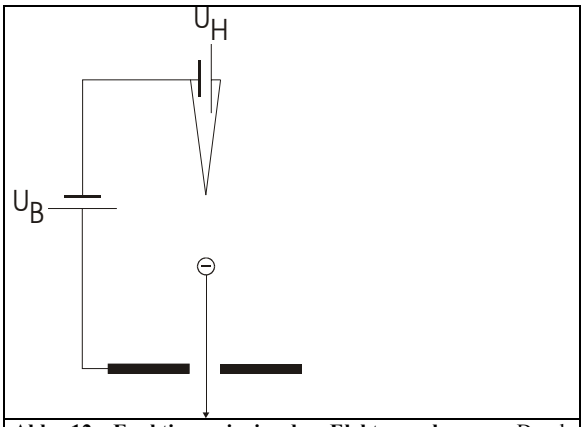

Abb. 12: Funktionsprinzip der Elektronenkanone. Durch Anlegen der Heizspannung U_H an den Glühdraht können Elektronen aufgrund des glühelektrischen Effekts aus dem Draht austreten. Diese freien Elektronen werden anschließend durch die Beschleunigungsspannung U_B auf die gewünschte kinetische Energie beschleunigt.

2. Wie kann man die Elektronen nachweisen?

Wir haben schon einige Male über den Detektor, das Nachweisgerät für die freigesetzten Elektronen gesprochen. In diesem Abschnitt soll die Funktionsweise des am häufigsten zum Nachweis der Sekundärelektronen verwendeten so genannten Everhart-Thornley-Detektors (benannt nach seinen Entwicklern) beschrieben werden.

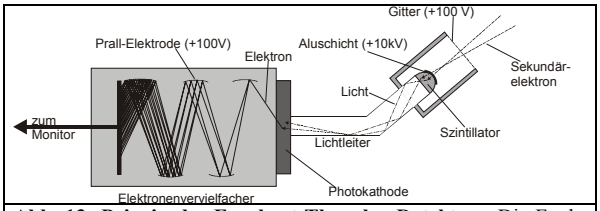

Abb. 13: Prinzip des Everhart-Thornley-Detektors. Die Funktionsweise ist im Text beschrieben.

Die in Abb. 13 von rechts kommenden Sekundärelektronen werden durch ein positiv gepoltes Gitter angezogen. Die Spannung zwischen Probe und Gitter beträgt dabei etwa 100 V. Die meisten der Elektronen gelangen durch das Gitter. Dort stehen sie unter dem Einfluss des starken elektrischen Feldes zwischen dem Gitter und der ca. 50 Nanometer dünnen Metallschicht auf der Oberfläche des so genannten Szintillators und werden dadurch auf eine Energie von etwa 10 keV beschleunigt. Diese Energie reicht aus, um die dünne Metallschicht zu durchdringen und in das Szintillationsmaterial zu gelangen. Ein Szintillator hat die Eigenschaft, dass er von den eindringenden Elektronen zum Leuchten angeregt wird. Das im Szintillator erzeugte Licht wird mit Hilfe eines Lichtleiters auf eine Photokathode geleitet. In der Photokathode setzt das Licht Elektronen frei. Diese werden im Elektronenvervielfacher von einer positiv gepolten Prallelektrode angezogen. Beim Aufprall werden pro Elektron ca. 10 weitere Elektronen freigesetzt. Diese werden von weiteren Prall-Elektroden angezogen und setzen jeweils wiederum ca. 10 zusätzliche Elektronen frei. Über mehrere weitere Prall-Elektroden entsteht somit eine regelrechte Elektronenlawine. Sie dient als Signal zur Helligkeitsregelung der Monitorröhre. Das Signal ist umso stärker, je mehr Sekundärelektronen die Probe pro Sekunde verlassen haben.

Dieses kompliziert anmutende Verfahren (Umwandlung der Sekundärelektronen in Licht, welches wieder in Elektronen umgewandelt wird) wird hauptsächlich deshalb verwendet, um den Elektronenvervielfacher außerhalb der Probenkammer betreiben zu können und dort somit erheblich Platz einzusparen.

3. Wie kann man die Probe abrastern?

Um den Elektronenstrahl über das abzubildende Objekt zu führen, muss er abgelenkt werden. Dies kann mit Hilfe von Ablenkkondensatoren wie in Abb. 2 erreicht werden, geschieht aber in der Regel mit stromdurchflossenen Spulen. Die Ursache der Strahlablenkung im Magnetfeld der Ablenkspule kann mit Hilfe von Abb. 14 a. verstanden werden. Die Richtung des Magnetfeldes ergibt sich mit der Linken-Hand-Regel aus der Bewegungsrichtung der Elektronen in den Drähten der Spule der Rechten-Hand-Regel (oder mit der Rechten-Hand-Regel aus der technischen Stromrichtung), die wiederum durch die Polung der angelegten elektrischen Spannung gegeben ist. In diesem Magnetfeld wird eine Lorentzkraft $\vec{F}$ auf die Elektronen des Strahls

(Geschwindigkeit $\vec{v}$) ausgeübt. Dadurch wird die Bahn entsprechend gekrümmt (im homogenen Magnetfeld ist die Bahn ein Kreissegment). Die Lorentzkraft steht senkrecht auf $\vec{B}$ und $\vec{v}$ und ihre Richtung ergibt sich mit Hilfe der Dreifingerregel. Polt man die Spannung an der Magnetspule um, so wird der Elektronenstrahl in die andere Richtung abgelenkt (Abb. 14 b.). Mit Hilfe einer Wechselspannung kann so die gesamte Probe entlang einer Linie erfasst werden. Je größer die Amplitude der Wechselspannung ist, desto größer ist der erfasste Bereich. Und je größer die Frequenz der Wechselspannung, desto schneller erfolgt die Abrasterung. Dies ist wichtig für einen schnellen Bildaufbau. Mit Hilfe einer zweiten Ablenkspule kann man die gesamte Probe abrastern (Wie muss diese Spule relativ zur ersten Spule angeordnet sein?).

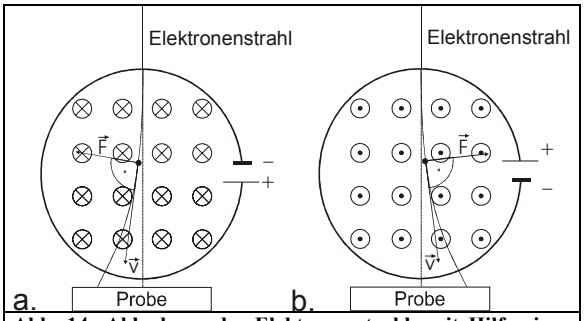

Abb. 14: Ablenkung des Elektronenstrahls mit Hilfe einer Magnetspule. Die Orientierung des Magnetfeldes kann durch die Polung der elektrischen Spannung an der Spule verändert werden (a. bzw. b.). Dadurch ändert sich gemäß der Dreifingerregel die Richtung der Lorentzkraft $\vec{F}$ und ein Abrastern der gesamten Probe wird möglich. Die Lorentzkraft steht zu jedem Zeitpunkt senkrecht auf dem Vektor der momentanen Geschwindigkeit $\vec{v}$ und senkrecht auf der Richtung des Magnetfeldes. Die Richtung des Magnetfelds kann mit der Linke-Hand-Regel bestimmt werden.

4. Wie funktioniert die Elektronenlinse?

Beim Durchgang durch eine stromdurchflossene Spule wird der Elektronenstrahl senkrecht zur Ausbreitungsrichtung gedreht und zur Achse der Spule hin abgelenkt (Fokussierung, Abb. 15).

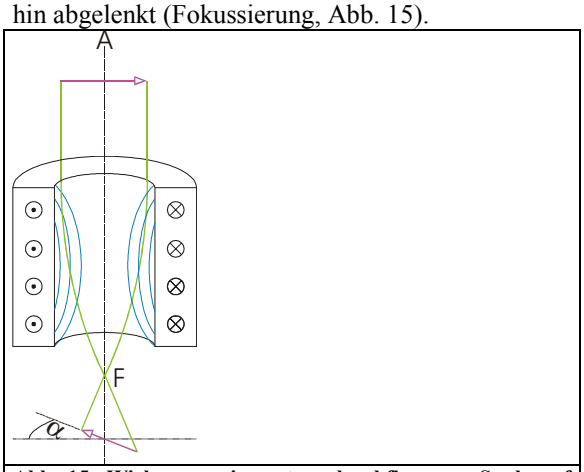

Abb. 15: Wirkungen einer stromdurchflossenen Spule auf Elektronenbahnen. Die technische Stromrichtung ist durch die Symbole ⊙ und ⊗ dargestellt. Parallel in das inhomogene Magnetfeld einfallende Elektronen werden senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung um den Winkel α gedreht und in Richtung zur Achse A der Spule hin abgelenkt.

Diese beiden Beobachtungen lassen sich mit Abb. 16 verstehen. Dies geschieht durch zweimaliges Anwenden der Drei-Finger-Regel. Das erste Anwenden zeigt, dass auf die Elektronen eine Lorentzkraft $\vec{F}_1$ senkrecht zur Zeichenebene wirkt. Dadurch erhalten die Elektronen eine Geschwindigkeitskomponente $\vec{v}_z$ senkrecht zur Zeichenebene und erfahren somit eine Drehung um die Spulenachse. Die zweite Anwendung der Drei-Finger-Regel ergibt, dass diese zusätzliche Geschwindigkeitskomponente eine Lorentzkraft $\vec{F}_2$ verursacht. Diese ist zur Spulenachse gerichtet und bewirkt daher die Fokussierung. Eine detaillierte Erläuterung findet sich in der Bildunterschrift zu Abb. 16.

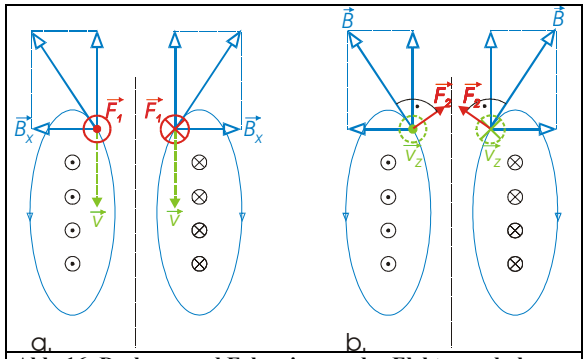

Abb. 16: Drehung und Fokussierung der Elektronenbahnen.
a.: Die beiden Elektronen treten in der Zeichenebene parallel zur Spulenachse A mit der Geschwindigkeit $\vec{v}$ (gestrichelte Pfeile) in das inhomogene Magnetfeld ein. Gezeichnet ist der Übersichtlichkeit halber nur jeweils eine Magnetfeldlinie. Der Vektor der magnetischen Feldstärke und seine Komponenten in x-Richtung ($\vec{B}_x$) und y-Richtung am Ort des Elektrons sind mit offenen Pfeilspitzen eingezeichnet.
Die Lorentzkraft $\vec{F}_1$ wirkt senkrecht zu $\vec{v}$ und $\vec{B}_x$ aus der Zeichenebene heraus (Symbol: ⊙) bzw. in die Zeichenebene hinein (Symbol: ⊗). $\vec{F}_1$ bewirkt also eine Rotation der Elektronen um die Spulenachse.
b.: Die Lorentzkraft $\vec{F}_1$ aus Abbildung a. bewirkt eine Geschwindigkeitskomponente $\vec{v}_z$ aus der Zeichenebene heraus (gestricheltes Symbol: ⊙) bzw. in die Zeichenebene hinein (gestricheltes Symbol: ⊗).
Die Lorentzkraft $\vec{F}_2$ wirkt senkrecht zu $\vec{v}_z$ und $\vec{B}$. $\vec{F}_2$ beschleunigt also die beiden Elektronen in Richtung zur Spulenachse. Einfallende Elektronen werden daher zur Spulenachse hin abgelenkt und der Elektronenstrahl somit fokussiert.

C. Weiterführende Anwendungen

1. Materialbestimmung mit Röntgenstrahlung

Mit den austretenden Sekundärelektronen lassen sich Abbildungen der Oberfläche einer zu untersuchenden Probe gewinnen. Häufig ist es darüber hinaus aber wünschenswert zu ermitteln, aus welchen chemischen Elementen die Probe besteht. Dabei kommt uns zu Hilfe, dass die schnellen Primärelektronen nicht nur Sekundärelektronen erzeugen, sondern auch Röntgenstrahlung (Abb. 17).
Die Energie der emittierten Röntgenstrahlung ist gleich der Energiedifferenz der beiden am Prozess beteiligten Schalen (in Abb. 17 die K- und die L-

Schale) und ist charakteristisch für das jeweilige Element.

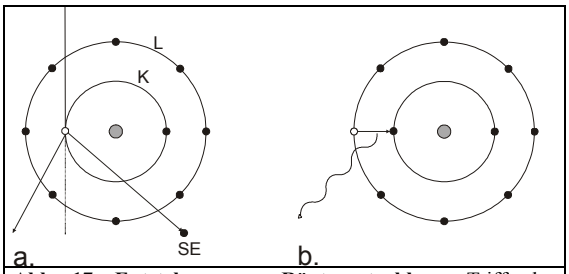

Abb. 17: Entstehung von Röntgenstrahlung. Trifft das schnelle Primärelektron auf ein Atomelektron einer inneren Schale, so wird dieses aufgrund der Coulomb-Abstoßung aus dem Atom gestoßen (Sekundärelektron SE, Abb. a.). Ein Elektron aus einer höheren Schale kann die Lücke auffüllen (Übergang von der L- in die K-Schale). Der Energieunterschied zwischen der L-Schale und der K-Schale wird durch Abgabe eines Röntgen-Photons freigesetzt (wellenförmige Linie in Abb. b.).

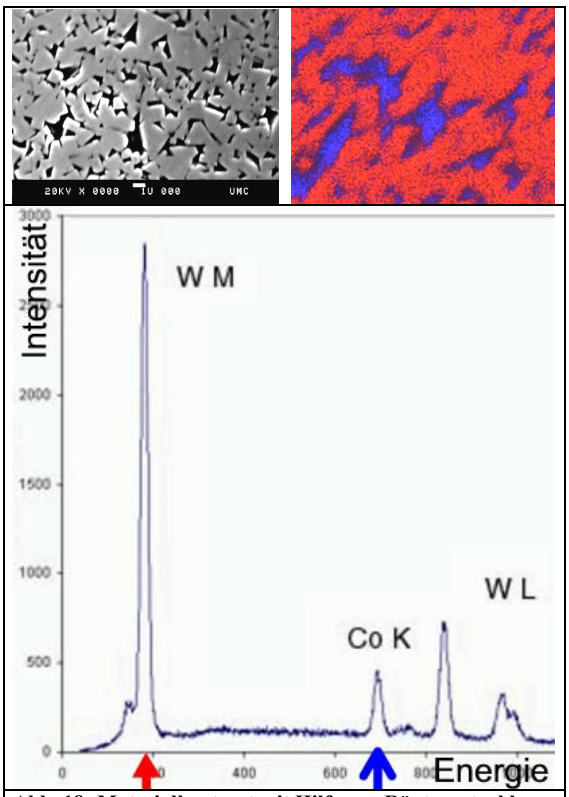

Abb. 18: Materialkontrast mit Hilfe von Röntgenstrahlung. Links oben ist eine rastermikroskopische Aufnahme einer Probe aus Wolfram und Cobalt abgebildet. Die Primärelektronen erzeugen in der Probe Röntgenstrahlung, deren Energie für das jeweilige Element charakteristisch ist („Charakteristische Strahlung"). In der Abbildung unten ist die Intensität der Röntgenstrahlung als Funktion ihrer Energie zu sehen (so genanntes Röntgenspektrum): Eine charakteristische „Linie" von Cobalt (Co) der beim Übergang in die K-Schale freigesetzten Röntgenstrahlung (Co K) sowie zwei Linien des Wolfram (W) aus Übergängen in die L- bzw. M-Schale (W L bzw. W M). Abbildung oben rechts: Tritt an einem bestimmten Rasterpunkt Röntgenstrahlung des Elements Wolfram aus (W M-Strahlung), so wird der entsprechende Punkt auf dem Bildschirm gemäß des roten (geschlossenen) Pfeils im Energiespektrum rot dargestellt. Handelt es sich um Cobalt-Strahlung (offener, blauer Pfeil), so wird der zugehörige Rasterpunkt auf dem Bildschirm blau dargestellt. Rote Bereiche im Bild oben rechts sind also aus Wolfram, blaue aus Cobalt[2]. (Bildquelle: J.W. Paggett (UMC), http://www.missouri.edu/~jwp832/xray/)

Die Messung der Energien der bei Elektronenbeschuss freigesetzten Röntgenstrahlung ermöglicht daher einen Rückschluss auf die in der Probe enthaltenen chemischen Elemente. Abb. 18 zeigt links oben eine „herkömmliche" Aufnahme einer Probe mit Hilfe von Sekundärelektronen. Während der Elektronenstrahl die Probe abrastert, wird mit einem Röntgendetektor die Anzahl der erzeugten Röntgen-Photonen und deren jeweilige Energie gemessen. Trägt man diese Information in ein Diagramm ein, so erhält man das so genannte Röntgenspektrum der Probe (Abb. 18 unten). Um anschließend die räumliche Verteilung der nachgewiesenen chemischen Elemente darzustellen, misst man an jedem Rasterpunkt die Energie der Röntgenstrahlung und kann daraus mit Hilfe des Röntgenspektrums auf das Element an diesem Punkt schließen. Am Bildschirm wird dann je nach Element dieser Punkt in einer bestimmten Farbe dargestellt[1] (Abb. 18 rechts oben).

Aufgaben zum Rasterelektronenmikroskop

1. Erzeugung und Beschleunigung der Elektronen

a. Erläutern Sie anhand einer Skizze, wie der Elektronenstrahl in einer Elektronenkanone erzeugt werden kann.

b. Berechnen Sie die Geschwindigkeit v_0 der Elektronen, wenn sie mit 10 kV beschleunigt wurden. Welchem Bruchteil der Lichtgeschwindigkeit entspricht das?

c. Welche zusätzliche Geschwindigkeit ergibt sich durch die Erdanziehung auf dem 50 cm langen Weg von der Elektronenkanone bis zur Probe?

2. Ablenkung des Elektronenstrahls

Zum Abrastern der Probe wird der Elektronenstrahl entweder mit einem Plattenkondensator oder einer Magnetspule abgelenkt. Die beiden Varianten sind in Abb. 19 dargestellt.

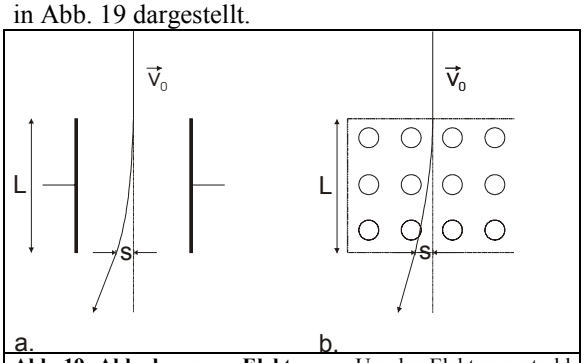

Abb. 19: Ablenkung von Elektronen. Um den Elektronenstrahl über die zu untersuchende Probe zu rastern, wird er entweder durch ein elektrisches Feld (a.) oder ein magnetisches Feld (b.) abgelenkt.

a. Wie müssen das elektrische Feld bzw. das Magnetfeld gerichtet sein, damit sich die eingezeichneten Bahnen der Elektronen ergeben? Welche Bahnkurven beschreiben die Elektro-

[1] In einer Schwarz-Weiß-Darstellung des Bildes erscheinen die blauen Bereiche des Bildes etwas dunkler als die roten Bereiche.

nen im Kondensator bzw. im Magnetfeld? Geben Sie für Ihre Antworten jeweils eine Begründung.

b. Bestimmen Sie für beide Anordnungen die Änderung der kinetischen Energie eines Elektrons in Abhängigkeit von der Feldstärke sowie v_0 und L (vgl. Abb. 1).

c. Die Elektronen treten mit der Geschwindigkeit v_0 in das elektrische (Abb. 1 a.) bzw. das magnetische (Abb. 1 b.) Ablenkfeld E_0 bzw. B_0. Leiten Sie für beide Ablenkvarianten jeweils einen Ausdruck für die benötigten Feldstärken E_0 und B_0 in Abhängigkeit von der Ablenkung s sowie v_0 und L her.

d. Zeigen Sie mit den Ergebnissen von Teilaufgabe c., dass für gleiche Ablenkungen, die klein gegen L sind ($s \ll L$) , $\frac{E_0}{B_0} = v_0$ gilt. Begründen Sie damit, dass die notwendige Magnetfeldstärke technisch leichter zu realisieren ist als die entsprechende elektrische Feldstärke.

3. Energieübertrag bei inelastischer Streuung

Ein Sekundärelektron hat im Vergleich zu einem Primärelektron eine geringe kinetische Energie E. Diese Energie soll im Folgenden mit einigen groben Näherungen abgeschätzt werden. Zunächst nehmen wir an, dass die Wechselwirkung zwischen Primärelektron und Atomelektron nur innerhalb des Atoms (Radius R) stattfindet. Diese Näherung ist nicht schlecht, da ja das Primärelektron aufgrund der Ladungsneutralität des Atoms keine Ladung „sieht“ und daher keine Kraft ausgeübt wird. Weiter nehmen wir an, dass innerhalb des Atoms (Radius R) die Coulombkraft durch $F_0 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{e^2}{R^2}$ gegeben und damit konstant ist (vgl. Abb. 20). Dies ist natürlich eine grobe Näherung, da sich der Abstand zwischen Primärelektron und Atomelektron während des Vorbeiflugs dauernd ändert. Schließlich wird angenommen, dass die Bindungsenergie des Atomelektrons vernachlässigbar ist.

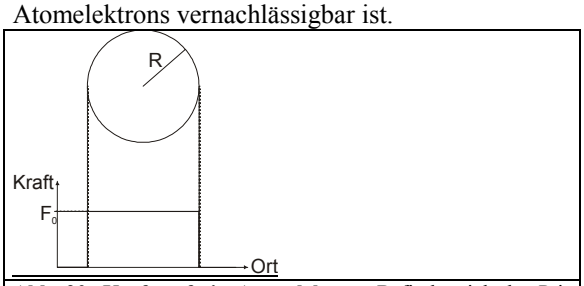

Abb. 20: Kraft auf ein Atomelektron. Befindet sich das Primärelektron außerhalb des Atoms, so ist die Kraft auf das Atomelektron Null. Im Atom übt das Primärelektron näherungsweise eine ortsunabhängige Kraft F_0 auf das Atomelektron aus.

a. Bestimmen Sie unter diesen Annahmen die Zeit, die das Primärelektron (Geschwindigkeit v_0) im Atom ist. Nehmen Sie dazu an, dass es mit konstanter Geschwindigkeit v_0 zentral durch das Atom fliegt und daher den Weg $2R$ zurücklegt.

b. Berechnen Sie in Abhängigkeit von v_0 und R die Geschwindigkeit, auf die das Atomelektron durch das Primärelektron beschleunigt wird und daraus seine kinetische Energie E. Setzen Sie in den erhaltenen Ausdruck für v_0 und R vernünftige Werte ein und diskutieren Sie das Ergebnis.

4. Elementbestimmung im Elektronenmikroskop

Treffen die schnellen Primärelektronen auf die Probe, so wird neben den Sekundärelektronen auch Röntgenstrahlung erzeugt.

a. Skizzieren Sie den Verlauf eines typischen Röntgenspektrums (Frequenz-Intensitäts-Diagramm). Was ist die physikalische Ursache der beiden typischen Anteile des Spektrums?

b. Warum gibt es eine maximale Frequenz? Welchen Wert hat diese Grenzfrequenz bei einer Primärelektronenenergie von 20 keV?

c. Mit Hilfe der Bragg-Beugung an einem LiF-Kristall (Netzebenenabstand d=2,0 Å) wird ein Maximum in der ersten Beugungsordnung unter 27° beobachtet. Bestimmen Sie die Wellenlänge der Röntgenstrahlung.

d. Die in Teilaufgabe c. beobachtete Röntgenstrahlung ist beim Übergang eines Elektrons aus der L-Schale in die K-Schale entstanden. Bestimmen Sie mit Hilfe des Gesetzes von Moseley das Element, welches die beobachtete Röntgenstrahlung emittiert hat.

5. ExB-Filter

Der Everhart-Thornley-Detektor saugt mit Hilfe eines elektrischen Feldes die Sekundärelektronen ab. Der Nachteil ist, dass durch dieses elektrische Feld auch der Elektronenstrahl beeinflusst wird. Um dies zu verhindern, verwendet die Firma Hitachi in einigen ihrer Rasterelektronenmikroskope ein so genanntes ExB-Filter (vgl. Abb. 21).

a. Wie müssen elektrisches Feld und Magnetfeld gerichtet sein, damit die Sekundärelektronen zum Detektor hin beschleunigt werden?

b. Wie muss das Verhältnis E/B gewählt werden, damit die Elektronen des Strahls das ExB-Filter ohne Ablenkung passieren? Die Beschleunigungsspannung in der Elektronenkanone betrage 10 kV.

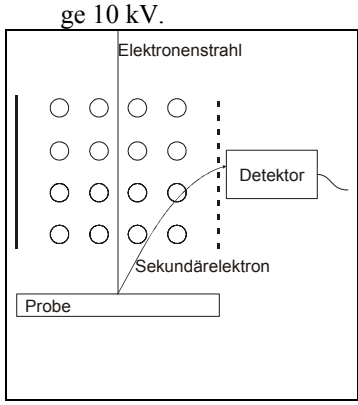

Abb. 21: ExB-Filter. Um die Ablenkung des Elektronenstrahls durch den Detektor zu verhindern, wird ein Geschwindigkeitsfilter aus gekreuztem elektrischem und magnetischem Feld verwendet. Die rechte Platte des Kondensators ist durchlöchert, damit die Sekundärelektronen zum Detektor gelangen können.