UNTERRICHTSEINHEIT RASTERELEKTRONENMIKROSKOP

Als Einführung in die Thematik des Rasterelektronenmikroskops (REM) wird die Lektüre des Lehrtextes empfohlen. Dort sind die physikalischen und technischen Grundlagen beschrieben, auf die im vorliegenden Text daher nicht mehr näher eingegangen wird. Die im Text angegebenen Folien sind am Ende zu finden.

I. Grundlagen

1. Prinzip des Rasterelektronenmikroskops

Motivation: Bilder REM/Lichtmikroskop
(Folie 1, viele weitere Bilder gibt es im Internet.
Vorteile des REM gegenüber dem Lichtmikroskop:

- wesentlich höhere Vergrößerungen möglich
- im Vergleich zum Lichtmikroskop große Schärfentiefe
- dreidimensionaler Eindruck

Aufbau eines REM

In diesem ersten Abschnitt sollen die wesentlichen Teile des REM zum Beispiel an der Tafel entsprechend Folie 2 entwickelt werden. Eine kleine Animation findet sich unter http://www.mos.org/sln/sem/seminfo.html

Der Elektronenstrahl aus den so genannten Primärelektronen wird mit Hilfe einer Elektronenlinse möglichst gut gebündelt (etwa 1-10 nm) und mit Hilfe eines Kondensators (oder einer magnetischen Ablenkspule) über die Probe geführt. Die Primärelektronen erzeugen beim Auftreffen in der Probe weitere so genannte Sekundärelektronen. Diese Elektronen werden von einem Detektor registriert.

Bildentstehung

Trifft der Elektronenstrahl die Oberfläche der Probe, so werden an dieser Stelle Elektronen ausgelöst. Diese werden vom Detektor registriert. Der Elektronenstrahl des Monitors wandert synchron zum Primärelektronenstrahl über den Bildschirm. (Folie 3). Wenn Elektronen registriert werden, so erscheint auf dem Monitor ein Punkt. Registriert der Detektor an einem Punkt keine Elektronen, so erscheint auf dem Monitor an der entsprechenden Stelle kein Punkt. So baut sich bei genügend feiner Rasterung das Bild des Objekts auf dem Monitor auf. In der Regel werden die Punkte auf dem Monitor „graukodiert“: Je mehr Elektronen vom Detektor registriert werden, desto heller erscheint der Punkt auf dem Monitor (Folie 4).

Bemerkung: Viele Schülerinnen und Schüler gehen auch nach der Besprechung des Rasterprinzips davon aus, dass der Elektronenstrahl deshalb abgelenkt werden muss, weil er nicht die ganze Probe gleichzeitig erfassen kann. Dies sollte noch mal explizit thematisiert werden: Wenn der Elektronenstrahl durch Aufweiten mit einer Zerstreuungslinse die ganze Probe erfassen würde (und dass wird z.B. beim Transmissionselektronenmikroskop gemacht), würde der Detektor sehr viele Elektronen aus der ganzen Probe zählen, könnte sie dann aber nicht einem Bildpunkt zuordnen. Es ist daher wichtig, den Elektronenstrahl so stark wie möglich zu bündeln!

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 (Folie 5). Beim Rasterelektronenmikroskop gilt also:

$$Vergrößerung = \frac{Kantenlänge\ des\ Monitors}{Kantenlänge\ des\ Rasters}$$

© Dr. Roland Berger (2002)

2. Was geschieht mit den Elektronen in der Probe?

Die Wechselwirkung der Primärelektronen aus dem Elektronenstrahl und den Atomen der Probe geschieht aufgrund der Coulombkraft:

1. mit den Atomelektronen (Abstoßung, da negativ geladen)
2. mit den Atomkernen (Anziehung, da positiv geladen)

zu 1.:

Ein Primärelektron (PE) ionisiert ein Atom. Das erzeugte freie Elektron wird als Sekundärelektron (SE) bezeichnet (Folie 6).

Die SE besitzen eine Energie von nur ca. 10 eV, da das schnelle Primärelektron aufgrund seiner hohen Geschwindigkeit nur wenig Zeit hat, um das Atomelektron wirkungsvoll abzustoßen (vgl. Aufgabe 2.)

Diese Art von Wechselwirkung wird als inelastische Streuung bezeichnet, da das PE einen Energieverlust erleidet. Dies ist bei der im Folgenden beschriebenen Wechselwirkung nicht der Fall:

zu 2.)

Das Primärelektron wird im Coulombfeld des Atomkerns abgelenkt (Folie 7). Das PE erleidet praktisch keinen Energieverlust[1], da auf den Kern aufgrund seiner im Vergleich zum Elektron hohen Masse keine Energie übertragen wird[2]. Der Vorgang wird daher als elastische Streuung bezeichnet.

Auf einer Mikrometer-Skala betrachtet legt das PE daher aufgrund der elastischen Streuung eine Art Zick-Zack-Weg zurück und setzt dabei wegen der inelastischen Streuung Sekundärelektronen frei (Folie 8). Aufgrund ihrer geringen Energie können nur diejenigen Sekundärelektronen aus der Probe austreten und zum Detektor gelangen, die innerhalb einer dünnen Oberflächenschicht (1-10 nm) erzeugt wurden und sich in Richtung zur Oberfläche hin bewegen. Die Abbildung mit Sekundärelektronen ist daher eine Abbildung der Probenoberfläche.

Da man die Bahnen der Elektronen in der Probe nicht direkt verfolgen kann, ist man auf Computersimulationen angewiesen. Ein geeignetes Programm findet sich im Internet auf der Seite http://www.matter.org.uk/tem/electron_scattering.htm. Eine entsprechende Abbildung zeigt Folie 9.

3. Ursachen des Bildkontrasts

Es ist erstaunlich, dass auch Objekte aus ein- und demselben Material abgebildet werden können. Denn man würde zunächst erwarten, dass an jeder Stelle der (homogenen) Probe gleich viele Sekundärelektronen erzeugt und vom Detektor nachgewiesen werden. Dann würden durch die gleichmäßige Graukodierung alle Punkte auf dem Bildschirm gleich hell erscheinen und nichts wäre zu erkennen. Die Frage ist also, wie der Kontrast bei rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen zustande kommt. Im Wesentlichen sind dafür drei Mechanismen verantwortlich. Der Kontrast durch Flächenneigung ist in der Regel dominierend.

Die vom Elektronenstrahl direkt erzeugten Sekundärelektronen können nur aus einer geringen Schichtdicke t ca. 10 nm stammen. Dieser rechteckige Bereich ist in Folie 10 schraffiert dargestellt. Der Bereich ist größer, wenn der Elektronenstrahl schräg auf die Grenzfläche auf-

[1] abgesehen von der Röntgen-Bremsstrahlung, die durch die Änderung der Richtung des Geschwindigkeitsvektors hervorgerufen wird, siehe unten.

[2] Die Kernmasse ist 1860 mal größer als die Elektronenmasse. Analogie: Eine Wand bekommt Impuls übertragen, wenn sie von einem Ball getroffen wird aber praktisch keine Energie.

© Dr. Roland Berger (2002)

trifft. Wie man leicht nachweist, hat das schraffierte Rechteck eine um den Faktor cos α kleinere Fläche als die schraffierte Raute.
Als Ergebnis erhält man, dass das Austrittsvolumen der Sekundärelektronen umso größer ist, je stärker die Fläche gegen den Elektronenstrahl geneigt ist. Schrägen erscheinen im Bild daher heller (Folie 11).
Die beiden anderen Kontrastmechanismen (Schatten- bzw. Diffusionskontrast) sind in der Regel weniger bedeutend und können daher im Lehrgang evtl. weggelassen werden.

Schattenkontrast
Die langsamen Sekundärelektronen können vom Detektor mit einer vergleichsweise geringen Spannung abgesaugt werden. Da der Detektor in der Regel seitlich steht, gelangen Elektronen aus dem „Schattenraum" nicht so leicht zum Detektor. Diese Bereiche erscheinen daher dunkler (Folie 12).

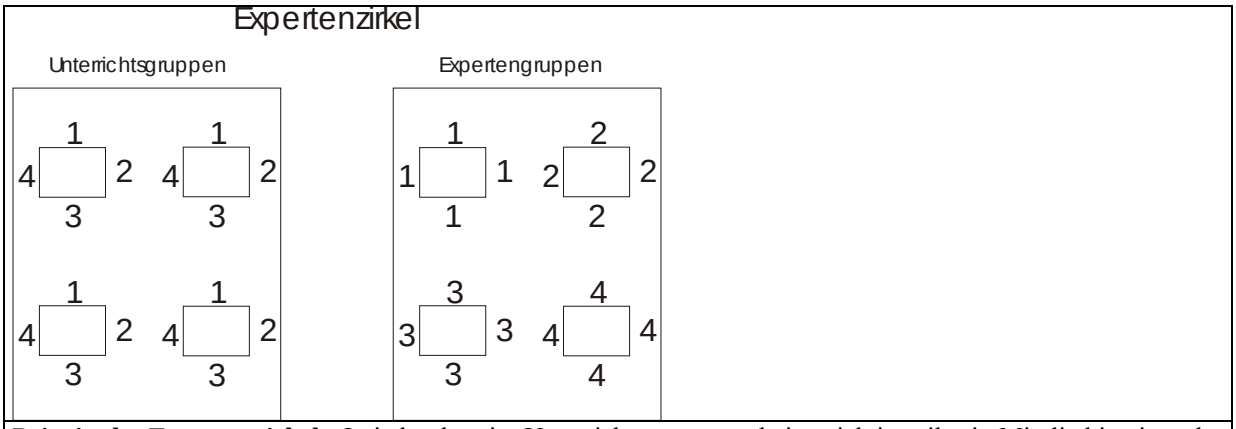
Diffusionskontrast
Bei schrägem Auftreffen der Primärelektronen diffundieren diese in erhöhtem Maße in der dünnen Schicht, aus der die erzeugten Sekundärelektronen die Probe verlassen und zum Signal beitragen können (Folie 13).

II. Physik der Elektronen im Rasterelektronenmikroskop

Weitere Aspekte können mit der so genannten Puzzle-Methode (engl.: jigsaw), welche im Folgenden als Expertenzirkel bezeichnet wird, erarbeitet werden. Eine kurze Einführung in diese Methode mit weiter führenden Literaturhinweisen wurde von A. Frey-Eiling und K. Frey verfasst und findet sich hier. Befinden sich in der Klasse 16 Schülerinnen und Schüler, so werden vier so genannte Unterrichtsgruppen gebildet. In jeder dieser Unterrichtsgruppen arbeitet sich jeweils ein Mitglied anhand von vorbereiteten Materialien und Versuchen in eines der folgenden vier Themen ein, und wird so zum Experten für dieses Teilgebiet:

1. Wie funktioniert die Elektronenkanone?
2. Wie kann man den Elektronenstrahl ablenken?
   Experimenteller Hinweis dazu
3. Wovon hängt die Eindringtiefe der Elektronen in die Probe ab?
4. Wie funktioniert ein Elektronendetektor?

Die Einarbeitung findet innerhalb von vier so genannten Expertengruppen statt, um einen engen Austausch der Experten untereinander zu ermöglichen und so eine möglichst optimale Einarbeitung zu gewährleisten (vgl. Abbildung).



Prinzip des Expertenzirkels. In jeder der vier Unterrichtsgruppen arbeitet sich jeweils ein Mitglied in eines der vier vorgesehenen Themen ein (links). Um eine optimale Vorbereitung für die anschließende Unterrichtung der anderen Gruppenmitglieder zu gewährleisten, bereiten sich die vier Experten im Rahmen der Expertengruppen gemeinsam auf ihre Lehrtätigkeit vor (rechts).

Anschließend unterrichteten die Experten in ihrer Unterrichtsgruppe die drei anderen Mitglieder. Mit diesem System ist gewährleistet, dass jede Schülerinnen und jeder Schüler selber

© Dr. Roland Berger (2002)

Experte/Expertin in einem der vier Themen ist und in jedem der restlichen drei Themen von einem anderen Experten unterrichtet wurde[3].
Der Vorschlag liefert somit einen Beitrag zur Entwicklung von Aufgaben für die Kooperation von Schülerinnen und Schülern, einem wichtigen Anliegen der BLK-Projektgruppe „Innovationen im Bildungswesen“ [...]. Kooperative Lernformen können fachliche Lernprozesse unter Umständen fördern. Denn die Schülerinnen und Schüler werden dazu veranlasst, Gedachtes sprachlich verständlich zu fassen, zu argumentieren und andere Perspektiven einzunehmen. Für die Motivierung des Lernens spielt die soziale Einbindung durch Kooperation eine wichtige Rolle.

Die Zahl der Expertenthemen kann auch noch um die Funktion der Elektronenlinse aufgestockt werden. Allerdings ist dieses Thema deutlich schwieriger als die ersten Themen. Zu Überlegen wäre daher, ob die Elektronenlinse im Unterrichtsgespräch behandelt wird.

5. Wie verändert eine Elektronenlinse die Elektronenbahn?
   Experimenteller Hinweis dazu

III. Weitere Aspekte der Bilderzeugung

1. Schärfentiefe

Ein wesentlicher Vorteil von rastermikroskopischen Aufnahmen im Vergleich zu Bildern, die mit einem Lichtmikroskop gewonnen wurden ist die wesentlich größere Schärfentiefe. Unter günstigen Bedingungen erscheint das Objekt in einem Bereich senkrecht zur Bildebene scharf, der etwa so groß wie die Kantenlänge des Bildes ist. Dies ist um einen Faktor 100 bis 1000 mehr als beim Lichtmikroskop (Reimer & Pfefferkorn, 1977). Die Erklärung der Schärfentiefe beim Rasterelektronenmikroskop ist in der Bildunterschrift von Folie 14 zu finden. Dieser Aspekt ist im Schülertext nicht beschrieben.

2. Nutzung der Röntgenstrahlung

Die Ablenkung der Elektronen im Coulombfeld der Atomkerne ist genau genommen nicht elastisch. Denn jede Beschleunigung einer Ladung, d.h. auch jede Richtungsänderung, ist nach einem grundlegenden Gesetz der Elektrodynamik mit der Emission elektromagnetischer Strahlung verbunden. Die Energie des emittierten Photons ist umso größer, je höher diese Beschleunigung ist. Nimmt man mit Hilfe eines Röntgendetektors das Energiespektrum der Strahlung auf, so ergibt sich ein breiter Untergrund der so genannten Bremsstrahlung. Deren Maximalenergie ist gleich der kinetischen Energie eines Primärelektrons. Außerdem erkennt man im Spektrum scharfe Linien, die so genannte „charakteristische Strahlung“. Die Primärelektronen stoßen durch Coulombwechselwirkung ein Atomelektron z.B. aus der K-Schale. Ein Elektron z.B. der L-Schale kann dadurch in die energetisch tiefer liegende K-Schale übergehen und emittiert die Energiedifferenz als Röntgenquant mit der Energie $hf = E_L - E_K$. Da die Energien der einzelnen Schalen für die einzelnen Elemente charakteristisch sind, kann aus der energetischen Lage dieser charakteristischen Linien auf das Element zurück geschlossen werden, welches das Röntgenquant emittiert hat. Dies macht die Röntgenspektroskopie auch für das Elektronenmikroskop interessant. Denn nun können Bilder erstellt werden, die die Elementverteilung widerspiegeln. Konkrete Beispiele hierzu sind in Folie 15 und Folie 16 zu sehen[4]. Details zu dieser Anwendung im Rahmen der Elektronenmikroskopie finden sich im Buch von Goldstein et al. (1992).

---

[3] Weicht die Klassengröße von der angegebenen Zahl ab, so können in einer Unterrichtsgruppe z.B. auch zwei Experten unterrichten. Hinweise für die Gruppenbildung finden sich hier.
[4] Im Spektrum auf Folie 15 ist die Bremsstrahlung bereits abgezogen, sodass nur die interessanten charakteristischen Linien zu sehen sind.

© Dr. Roland Berger (2002)

3. Verwertung der Rückstreuelektronen

Folie 8 und Folie 9 zeigen schematisch bzw. in der Computersimulation, dass die Primärelektronen unter Umständen die Probe auch wieder verlassen und vom Detektor nachgewiesen werden können. Diese so genannten Rückstreuelektronen sind für die Bildgebung sehr interessant, denn die Anzahl der Rückstreuelektronen hängt von der Kernladungszahl Z ab und ist daher im Gegensatz zur Emission von Sekundärelektronen elementspezifisch. Dies ist plausibel, denn die Ablenkung der Primärelektronen im Kernfeld ist bei gleichem Stoßparameter aufgrund der Coulomb-Wechselwirkung umso größer, je stärker der Kern geladen ist. Ein Vergleich der Bilder auf der Grundlage von Sekundärelektronen bzw. von Rückstreuelektronen aus ein und derselben Proben ist auf Folie 17 zu sehen. Der Kontrast im Sekundärelektronenbild entsteht im Wesentlichen durch die Oberflächentopographie aufgrund des Flächenneigungskontrastes[5]. Das Rückstreuelektronenbild gewinnt seinen Kontrast dagegen aus den unterschiedlichen Elementen, die innerhalb der Eindringtiefe der Primärelektronen zu finden sind.

Man kann sich nun fragen, wie der Detektor Sekundärelektronen von Rückstreuelektronen unterscheiden kann. Wir haben bereits gesehen, dass die Sekundärelektronen sehr langsam sind. Sie werden vom Everhart-Thornley-Detektor mit Hilfe einer Saugspannung von ca. +100V angezogen. Legt man aber eine abstoßende Spannung an (z.B. – 100V), so können die Sekundärelektronen den Szintillator nicht mehr erreichen. Die Rückstreuelektronen haben häufig nach dem Austritt aus der Probe noch eine ausreichend Geschwindigkeit, um gegen dieses Feld anzulaufen und nachgewiesen zu werden[6]. Der Nachweis der Rückstreuelektronen mit Hilfe des Everhart-Thornley-Detektors ist aber nicht besonders effektiv, da er einen kleinen Öffnungswinkel hat und daher die meisten Rückstreuelektronen daran vorbeifliegen. Daher verwendet man häufig einen zweiten Detektor mit großem Öffnungswinkel, um die Nachweiswahrscheinlichkeit für Rückstreuelektronen zu erhöhen (Folie 18).

4. Auflösungsvermögen

Das Bild ist so lange scharf, solange die nachgewiesenen Elektronen aus einem einzigen Rasterpunkt kommen. Da die Sekundär- und Rückstreuelektronen aus einem Volumen mit einem Durchmesser von ca. 1 µm stammen (Folie 9), ist diese Grenze bei einer 1000x1000 – Rastermatrix und einer Kantenlänge des Bildschirms von 10 cm schon bei einer Vergrößerung von 100 erreicht (Folie 19). Denn dann hat jedes Pixel auf dem Bildschirm eine Kantenlänge von $0{,}1\text{m}/1000=10^{-4}\text{m}$ und die Kantenlänge des Rasters auf der Probe beträgt $10^{-4}\text{m}/100=1\mu\text{m}$ Daher versucht man die Elektronen herauszufiltern, die direkt an der Auftreffstelle des Elektronenstrahls erzeugt werden. Woran erkennt man sie? Das sind diejenigen Primärelektronen, die sofort zurückgestreut werden und daher noch praktisch ihre gesamte Energie besitzen (Folie 20). Dies gelingt mit einem geeigneten Energiefilter. Das Auflösungsvermögen ist dann nur noch durch den Strahldurchmesser begrenzt. Dieser lässt sich aber auf einen Durchmesser von ca. 1 nm fokussieren.

---

[5] Eine genauere Betrachtung zeigt, dass auch die mit Hilfe der Sekundärelektronen erzeugten Bilder einen mehr oder weniger starken Elementkontrast zeigen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Rückstreuelektronen zweimal durch die dünne Oberflächenschicht kommen, aus denen Sekundärelektronen austreten können. Einmal beim Eintritt in die Probe und nochmals beim Verlassen der Probe (vgl. Folie 8). Beim Verlassen erzeugen sie aufgrund ihrer bereits reduzierten Geschwindigkeit und dem schrägen Durchdringen der Oberflächenschicht sogar etwa 3-4 mal mehr Sekundärelektronen. Deren Anzahl hängt also über die Zahl der Rückstreuelektronen wiederum von der Kernladungszahl ab.

[6] Natürlich sieht man den Elektronen nach Austritt aus der Probe nicht mehr an, ob sie in der Probe erzeugt wurden, oder bereits im Elektronenstrahl vorhanden waren. Daher legt man die Grenze mehr oder weniger willkürlich bei einer Energie von 50eV.

© Dr. Roland Berger (2002)

Letztlich ist das Auflösungsvermögen aller Mikroskope durch die Wellenlänge der verwendeten Strahlung gegeben. Mit Licht können daher Objekte noch unterschieden werden, die einen Abstand in der Größenordnung von 1 µm haben, weil sichtbares Licht eine Wellenlänge von 0,4-0,8 µm besitzt. Nach De-Broglie haben auch Elektronen eine Wellenlänge $\lambda = \frac{h}{p}$ mit dem Elektronenimpuls p. Dieser hängt mit der kinetischen Energie E_{kin} der Elektronen nach dem Energieerhaltungssatz über $E_{kin} = \frac{p^2}{2m}$ zusammen. Da $E_{kin} = eU_B$ folgt $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m \cdot eU_B}}$.
Bei einer typischen Beschleunigungsspannung von $U_B = 10kV$ ergibt sich eine Elektronenwellenlänge von $1{,}2 \cdot 10^{-11}$ m. Das Auflösungsvermögen eines Elektronenmikroskop würde demnach atomare Auflösung gestatten. Es gibt allerdings andere Faktoren, die das Auflösungsvermögen begrenzen. Dazu gehört beim Elektronenmikroskop vor allem die sphärische Aberration der Elektronenlinsen. Diese lässt sich im Gegensatz zu optischen Linsen nicht vollständig korrigieren, weil es keine zerstreuenden Elektronenlinsen gibt. Die sphärische Aberration ist in Folie 21 dargestellt. Wird der Elektronenstrahl mit Hilfe der Spule fokussiert, so werden achsenferne Elektronenbahnen aufgrund der Inhomogenität des Magnetfeldes stärker gekrümmt als die achsennahen Bahnen, sodass sie früher die optische Achse schneiden. Dadurch lässt sich der Elektronenstrahl nicht mehr auf einen Punkt, sondern nur auf ein „Scheibchen“ mit Durchmesser d fokussieren (Folie 21a.). Um den Durchmesser des Scheibchens weiter zu verringern, kann eine Blende in den Strahlengang eingebracht werden. Zunächst nimmt der Durchmesser des Scheibchens mit abnehmendem Blendendurchmesser D auch ab. Allerdings kommt es aufgrund der Beugung der Elektronenwellen bei zunehmende kleineren Durchmessern d wieder zu einer Aufweitung des Elektronenstrahls. Das erste Beugungsmaximum („Beugungsscheibchen“) ist umso breiter, je kleiner der Durchmesser der Blende ist (Folie 22). Aus diesem Grund gibt es einen Durchmesser D_{opt} der Blende, der zur optimalen Fokussierung des Elektronenstrahls gehört. Damit lässt sich der Elektronenstrahl auf ca. 1 Nanometer fokussieren.
Anhand dieses Problems lässt sich im Unterricht im Rahmen des Rasterelektronenmikroskops auch die Welleneigenschaften der Elektronen diskutieren. Da die Elektronenwellenlänge klein gegen den Strahldurchmesser ist, spielt die Welleneigenschaft bei der Ausbreitung des Elektronenstrahls ansonsten keine Rolle. Beim Transmissionselektronenmikroskop kann die Elektronenbeugung an Probenkristallen aber für die Bildinterpretation wesentlich werden. Für die Rasterelektronenmikroskopie wird sie für einige Spezialanwendungen wichtig. Näheres dazu findet sich im Buch von Reimer (1998).

Aufgaben mit Lösungen

Literatur

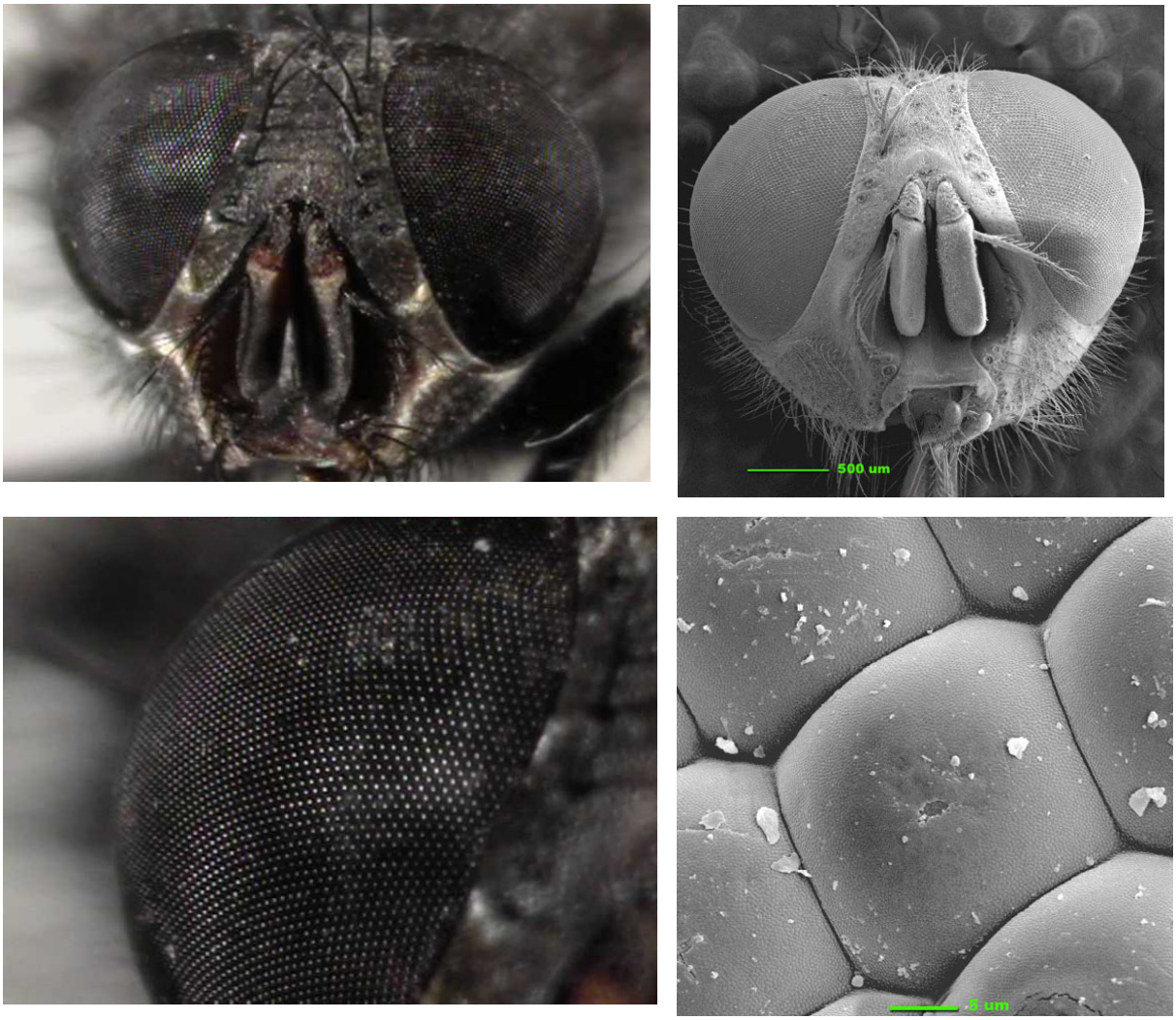
- Ohnsorge, J. & Holm, R. Rasterelektronenmikroskopie (1978). Eine Einführung für Mediziner und Biologen. Stuttgart: Thieme.
- Goldstein,J.I. et al. (1992). Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis (A Text for Biologists, Materials Scientists, and Geologists). 2. Auflage. New York: Plenum Press
- Reimer, L. & Pfefferkorn G. (1977). Raster-Elektronenmikroskopie. Berlin: Springer
- Reimer, L. (1998). Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis. Berlin: Springer
- Eine knappe, aber sehr gute Einführung, von der auch der vorliegende Text stark profitiert hat, stammt von R. F. Egerton (http://laser.phys.ualberta.ca/~egerton/SEM/sem.htm)

© Dr. Roland Berger (2002)

Weitere Lehrtexte zum Rasterelektronenmikroskop im Internet:

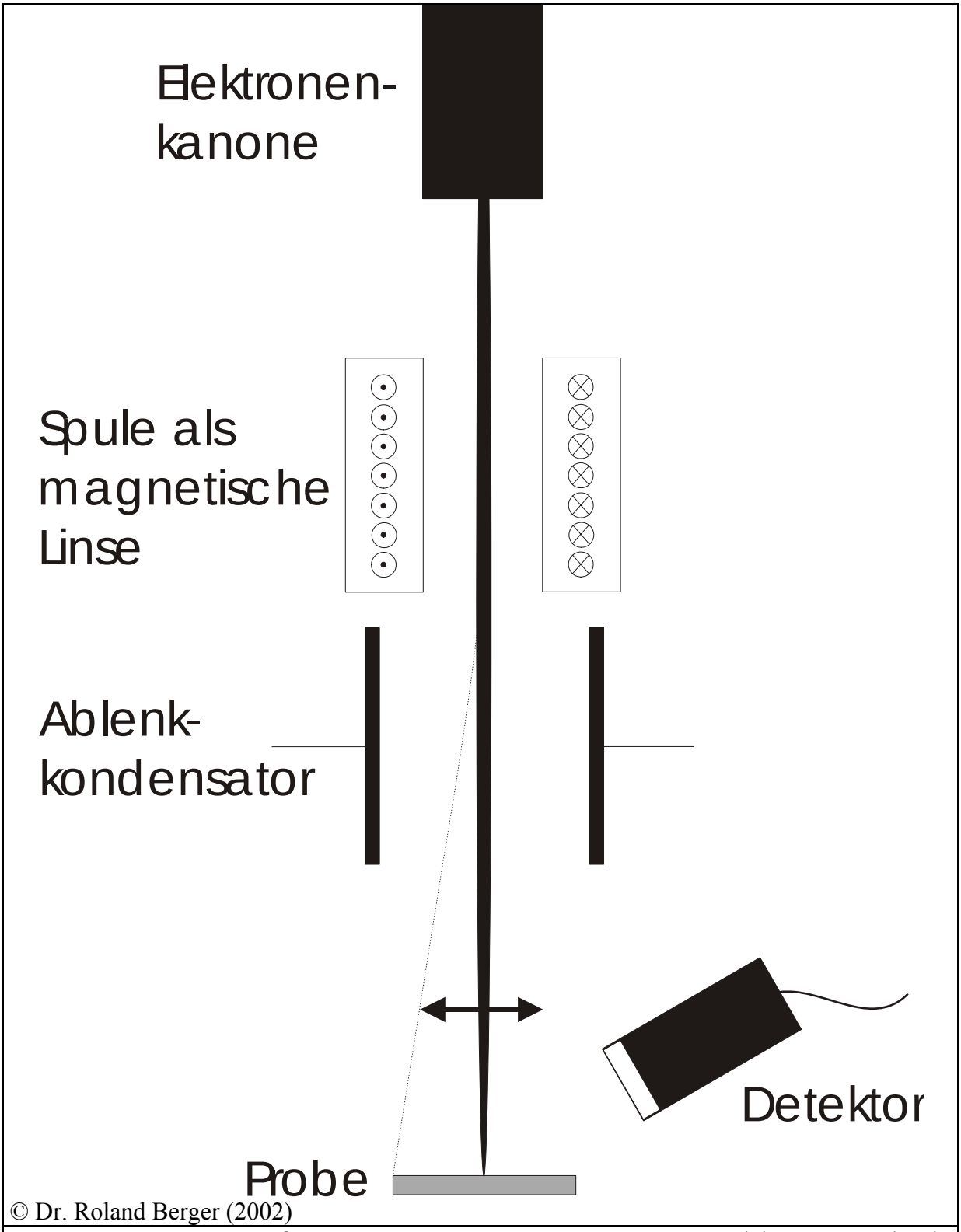
- Ein kleiner Lehrtext zum Rasterelektronenmikroskop mit einigen hübschen Animationen findet sich unter http://www.seallabs.com/how.html
- Ein umfangreicheres Lernprogramm auch mit technischen und physikalischen Details als Hintergrundinformation für Lehrkräfte findet man unter http://em-outreach.sdsc.edu/web-course/toc.html
- Für Lehrkräfte könnte auch der Lehrtext http://www.jeol.com/sem_gde/tbcontd.html nützlich sein. Dieser Text kann dort auch als pdf-Datei herunter geladen werden.

© Dr. Roland Berger (2002)

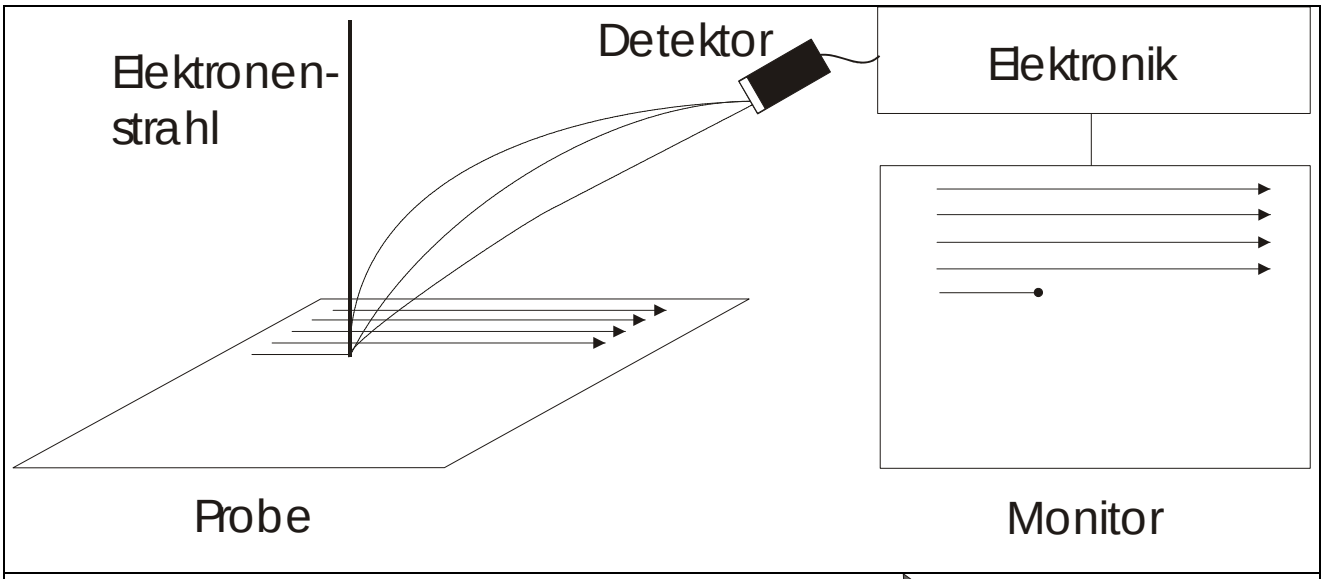


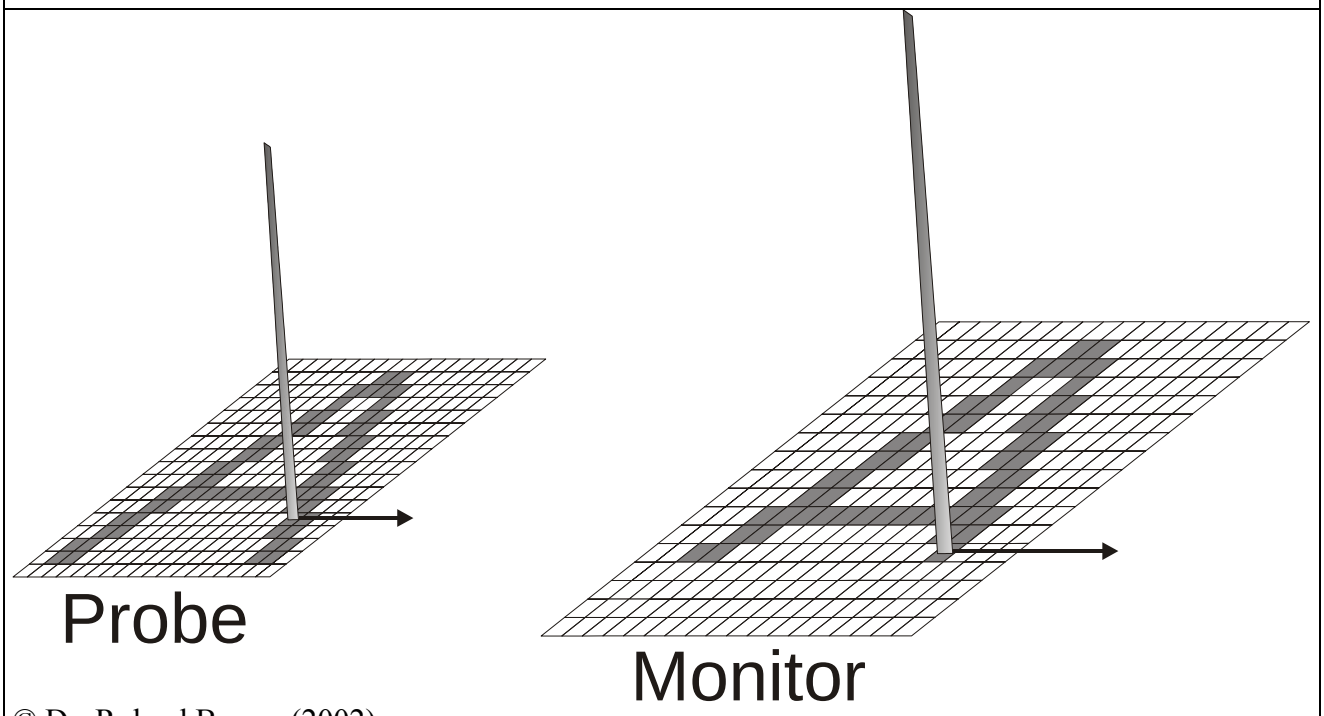
© Arizona State University, USA (http://ion.eas.asu.edu)

Folie 1: Aufnahmen eines Fliegenkopfs mit dem Lichtmikroskop (links) bzw. dem Rasterelektronenmikroskop (rechts).



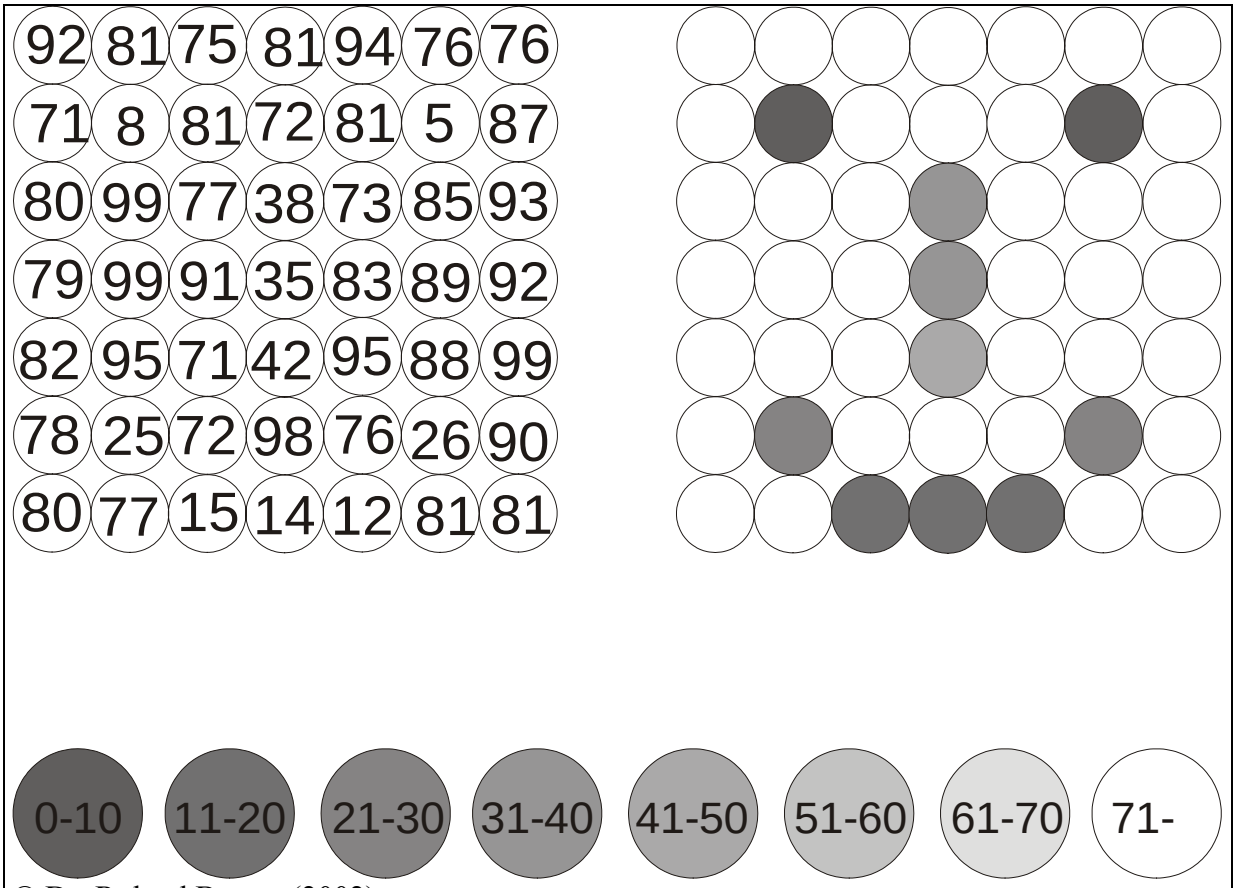
Folie 2: Prinzipieller Aufbau eines Rasterelektronenmikroskops. Elektronen werden in einer Elektronenkanone beschleunigt und mit Hilfe einer oder mehrerer magnetischer Linsen auf die zu untersuchende Probe fokussiert. Mit Hilfe von Ablenkkondensatoren (oder –spulen) kann die Probe systematisch abgerastert 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.





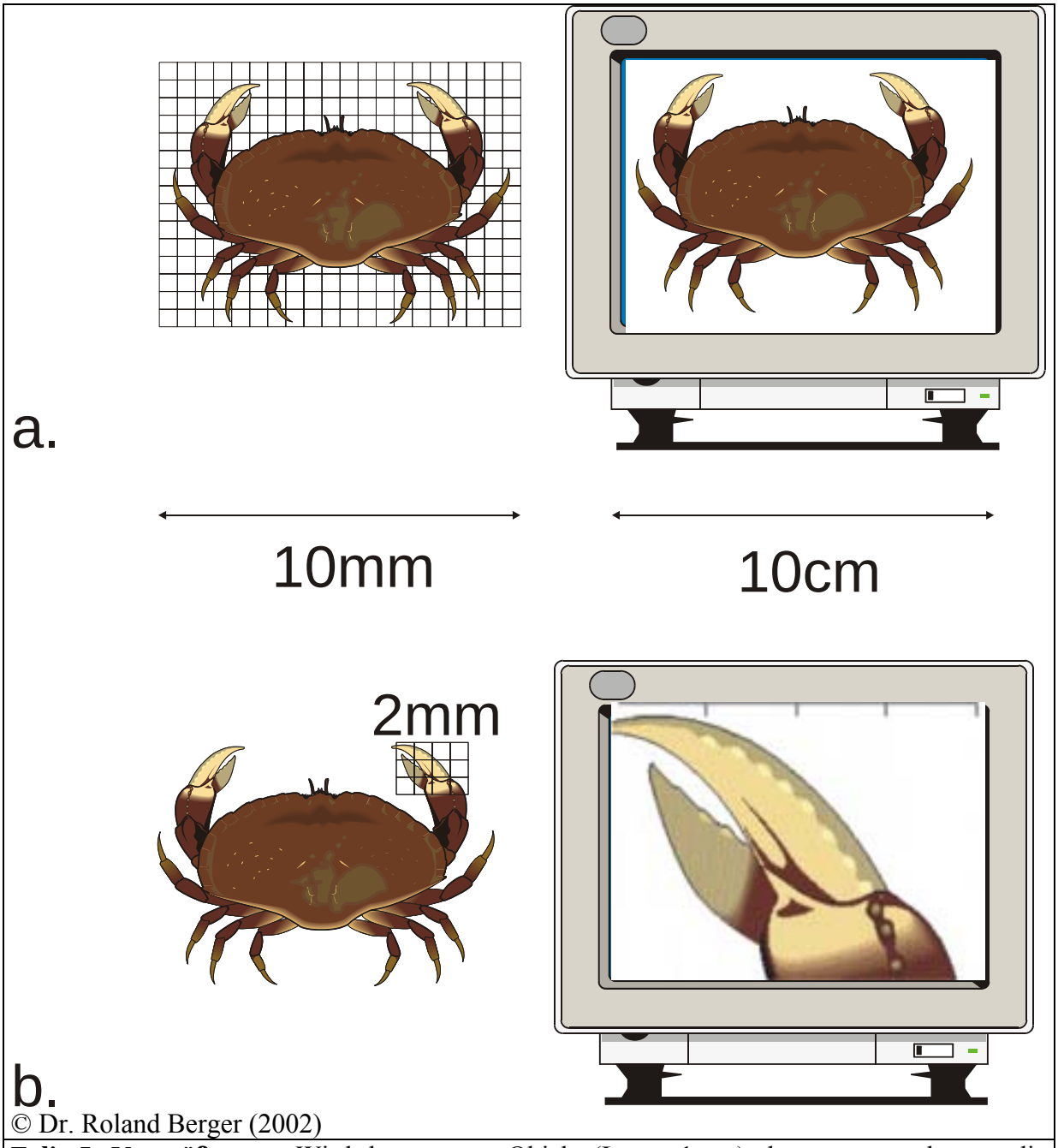
© Dr. Roland Berger (2002)

Folie 3: Prinzip des Rasterverfahrens und der Bildentstehung.
Oben: 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.
Unten 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.



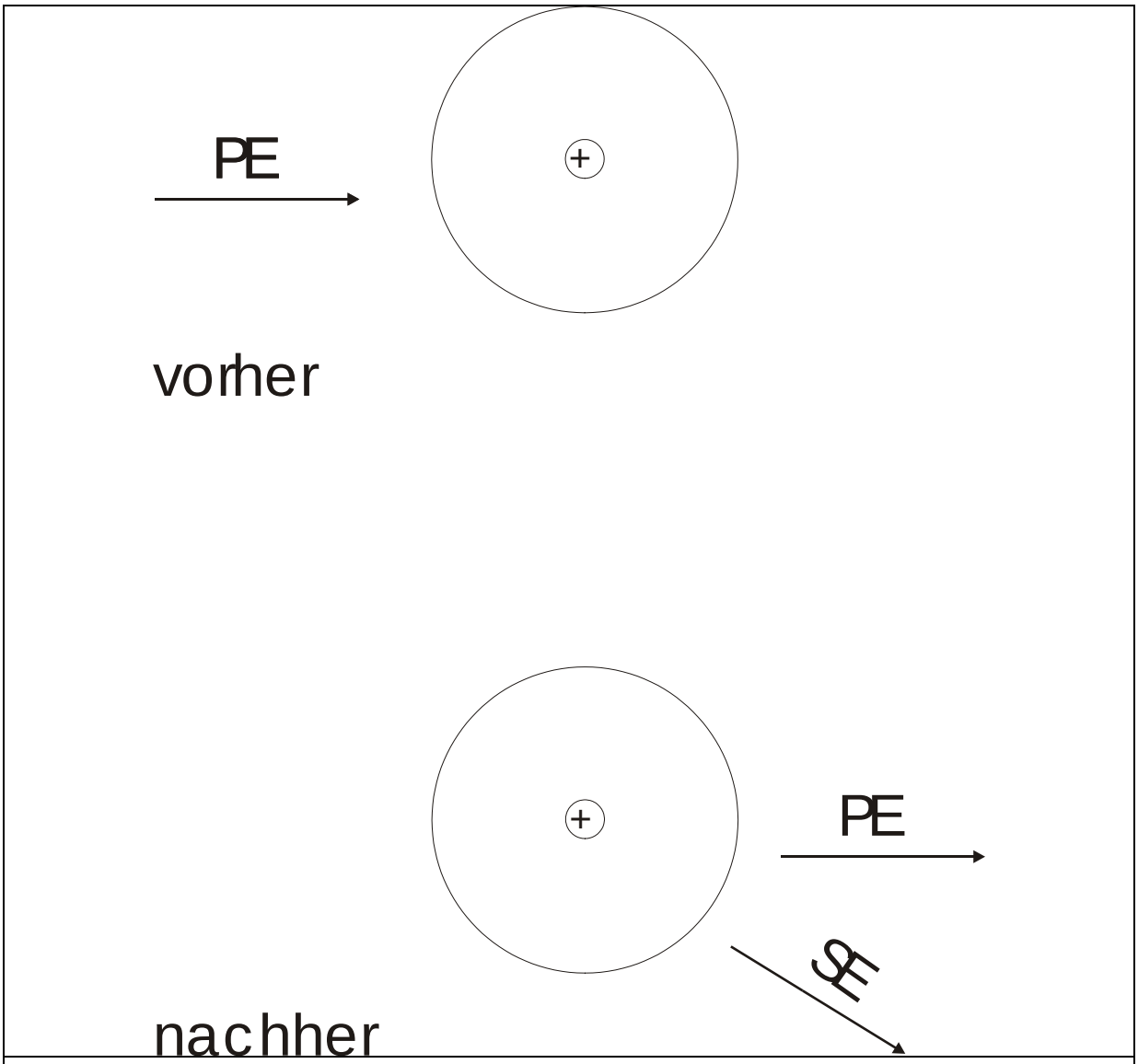
© Dr. Roland Berger (2002)

Folie 4: Prinzip der Graukodierung. Links oben ist die Zahl der Sekundärelektronen abzulesen, wie sie Rasterpunkt für Rasterpunkt 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.



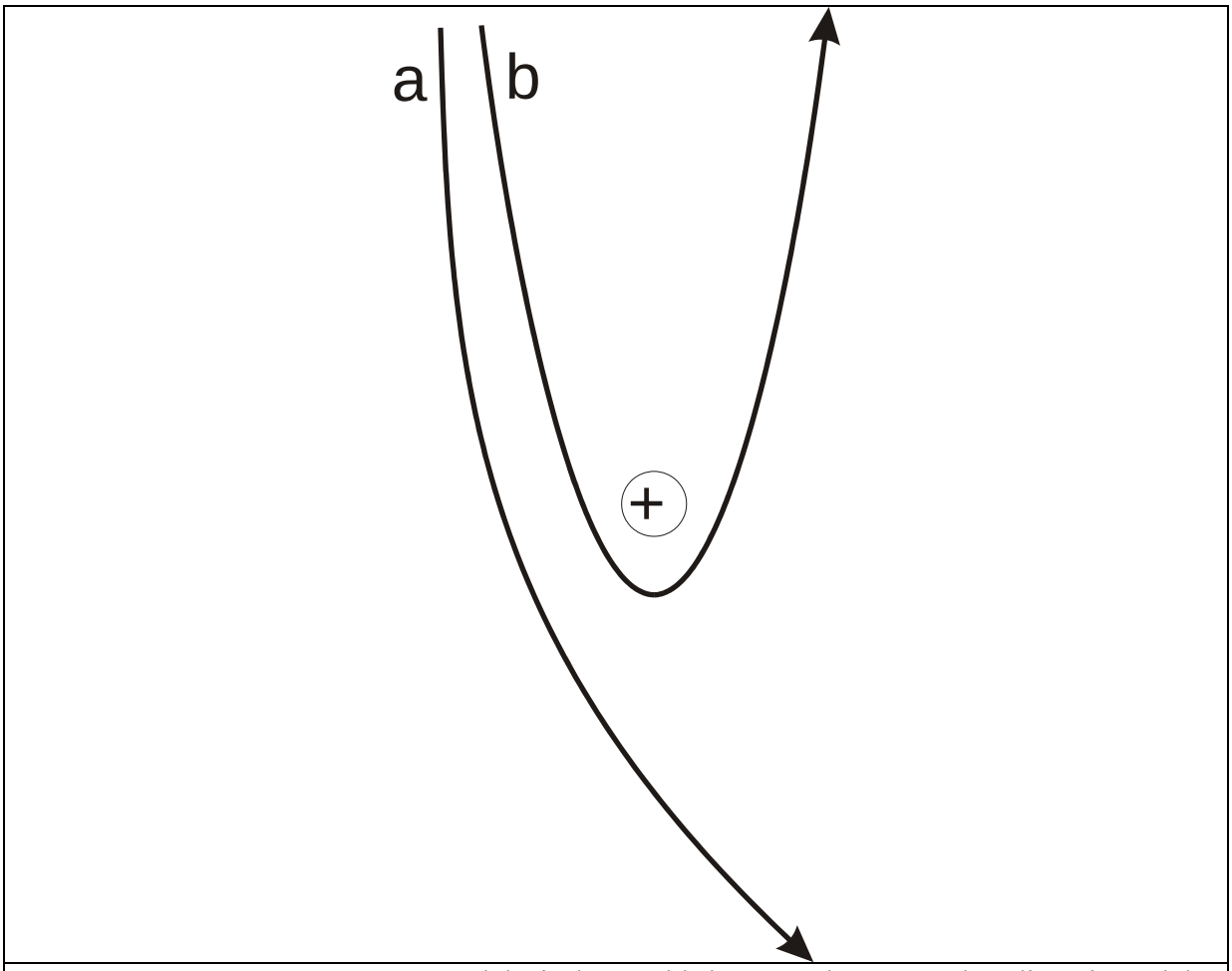
© Dr. Roland Berger (2002)

Folie 5: 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.)



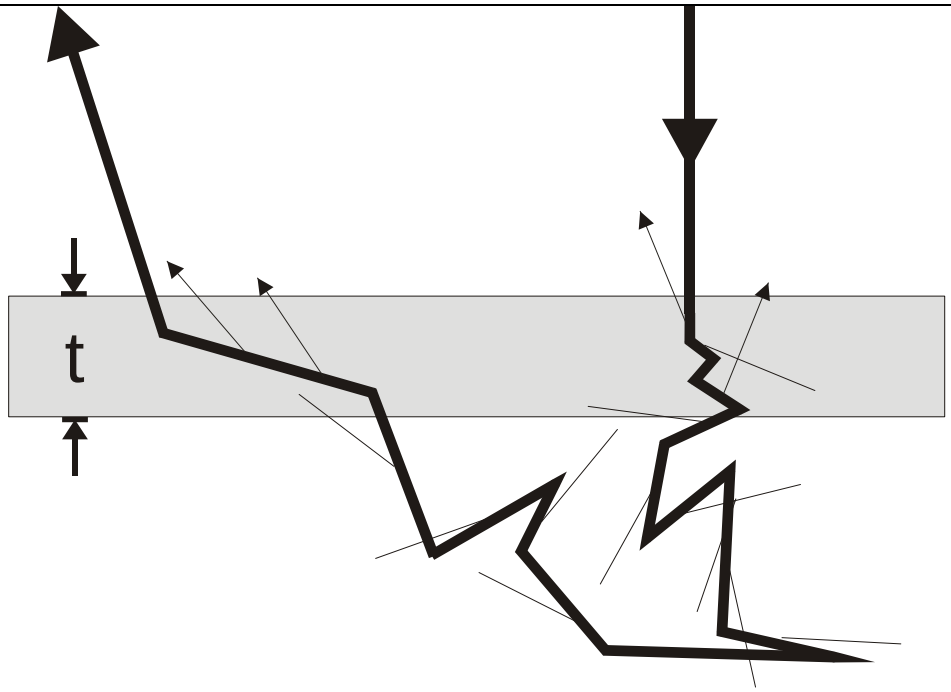
Folie 6: Inelastische Streuung. Aufgrund der Abstoßung beschleunigt das Primärelektron (PE) ein Atomelektron. Ist die übertragene kinetische Energie groß genug, so kann das Elektron das Atom verlassen (Sekundärelektron SE).

© Dr. Roland Berger (2002)



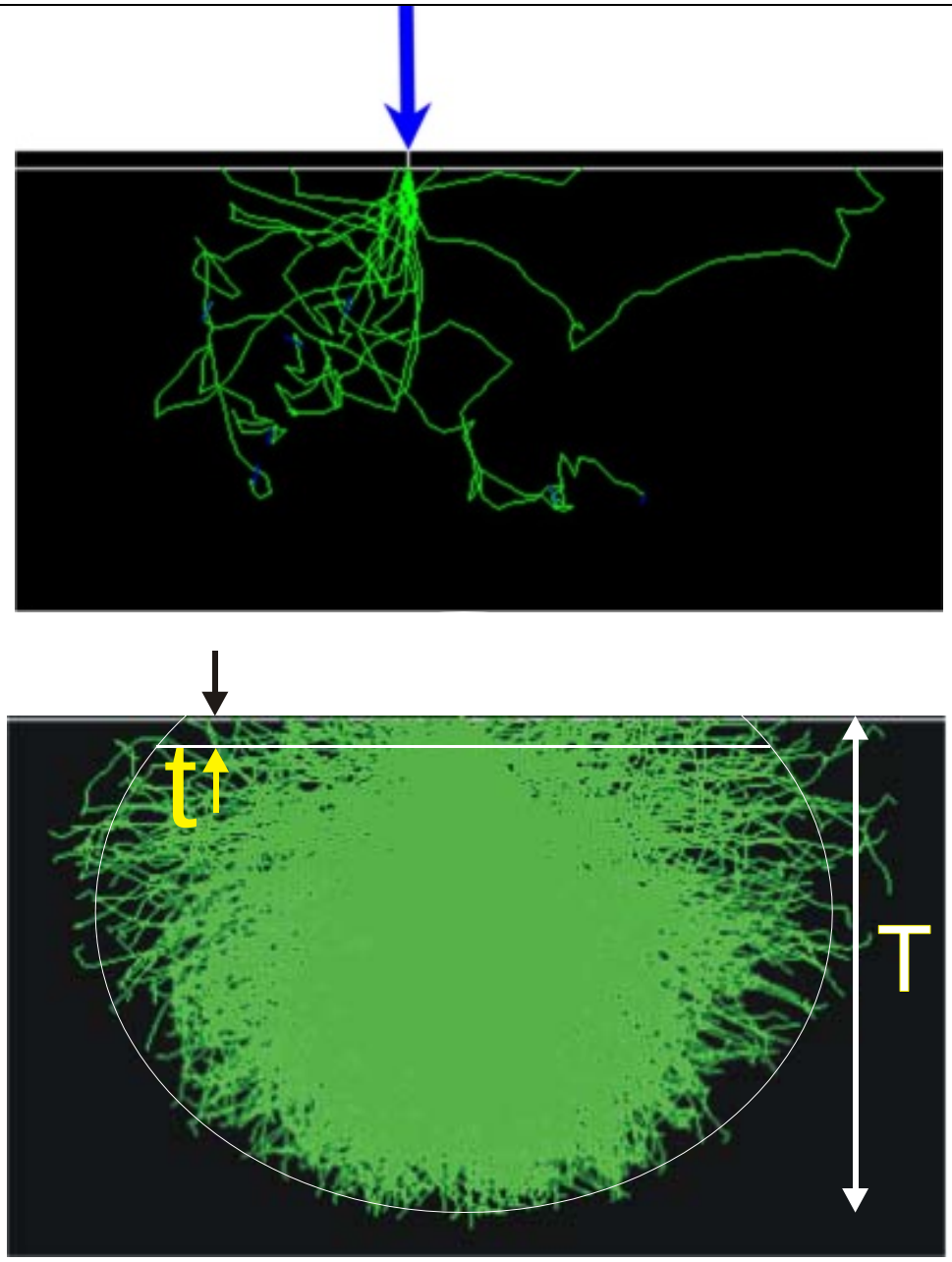
Folie 7: Elastische Streuung. Im elektrischen Feld des Atomkerns werden die Primärelektronen umso stärker abgelenkt, je näher sie dem Kern kommen. Unter umständen können sie sogar in die entgegen gesetzte Richtung umgelenkt werden.

© Dr. Roland Berger (2002)



© Dr. Roland Berger (2002)

Folie 8: Weg eines Primärelektrons in der Probe (schematisch). Aufgrund der elastischen Wechselwirkung mit den Atomelektronen entsteht die dargestellte Zick-Zack-Bahn. Wegen der inelastischen Wechselwirkung werden Sekundärelektronen erzeugt (dünne Linien). Entstehen diese in einer dünnen Oberflächenschicht (t=1-10nm), so können sie die Probe zum Teil verlassen (dünne Pfeile). Auch das Primärelektron kann in seltenen Fällen wie hier dargestellt wieder aus der Probe austreten.

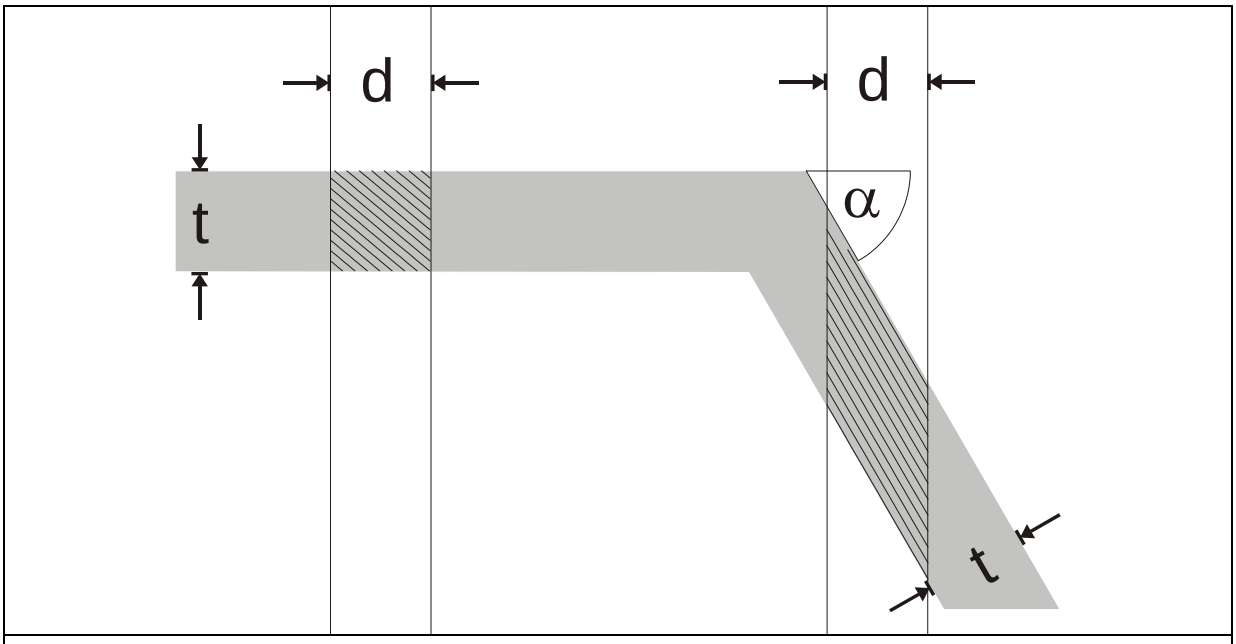


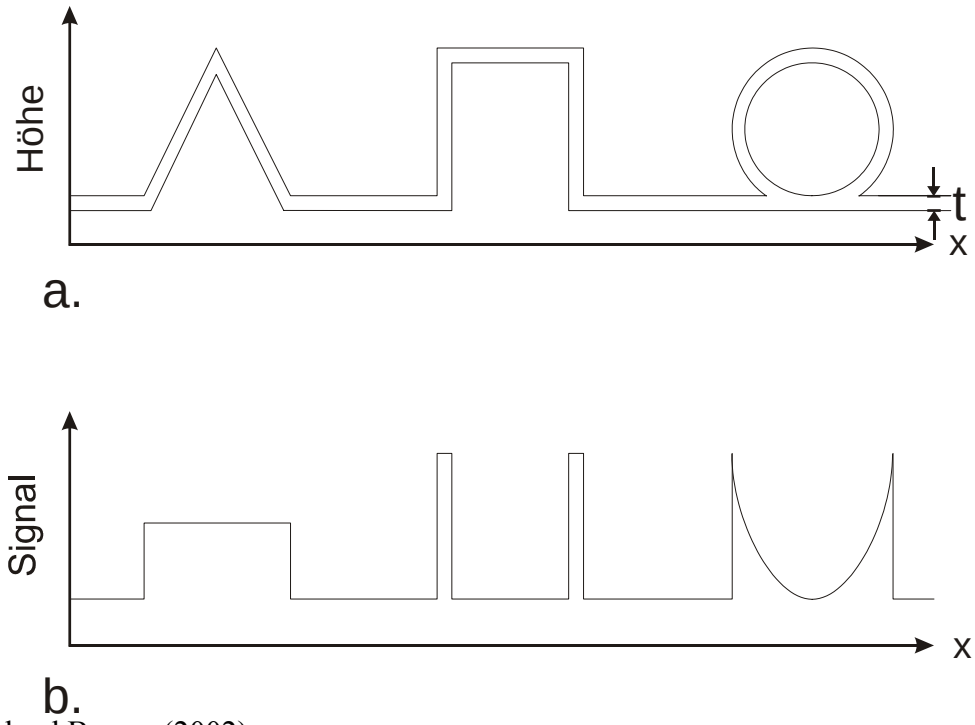
© 2000 MATTER, The University of Liverpool

Folie 9: 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 erzeugen die Primärelektronen weitere freie Elektronen („Sekundärelektronen“). Deren Bahnen sind in der Abbildung nicht eingezeichnet.

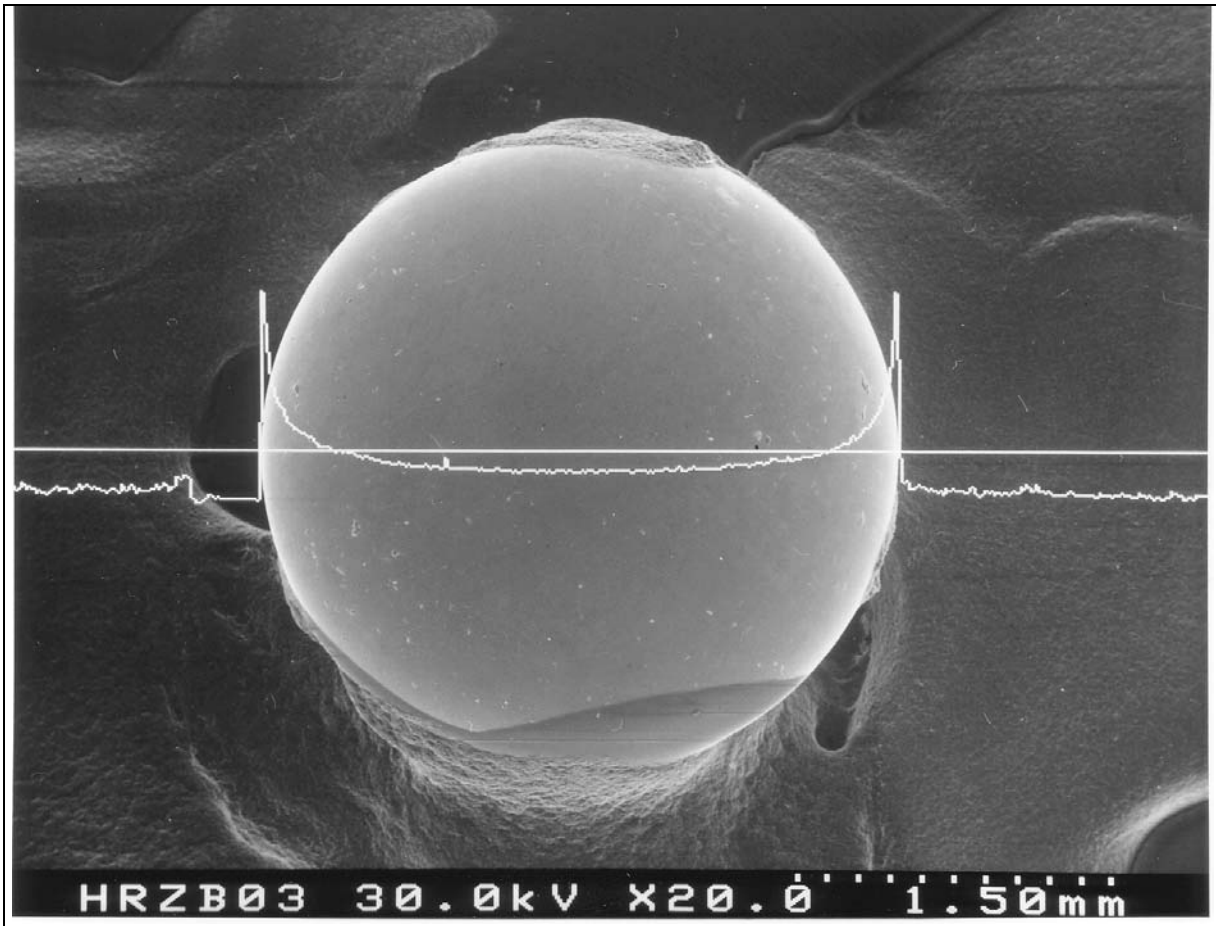
Unten: Dargestellt sind wiederum die Bahnen der Primärelektronen. Nur diejenigen Sekundärelektronen, die von den Primärelektronen innerhalb einer dünnen Oberflächenschicht ($t \approx 1$-10nm) erzeugt werden, können die Probe verlassen und im Detektor nachgewiesen werden. Die Eindringtiefe der Primärelektronen beträgt etwa $T=1\mu m$. Die Abbildung ist daher nicht maßstabsgerecht.





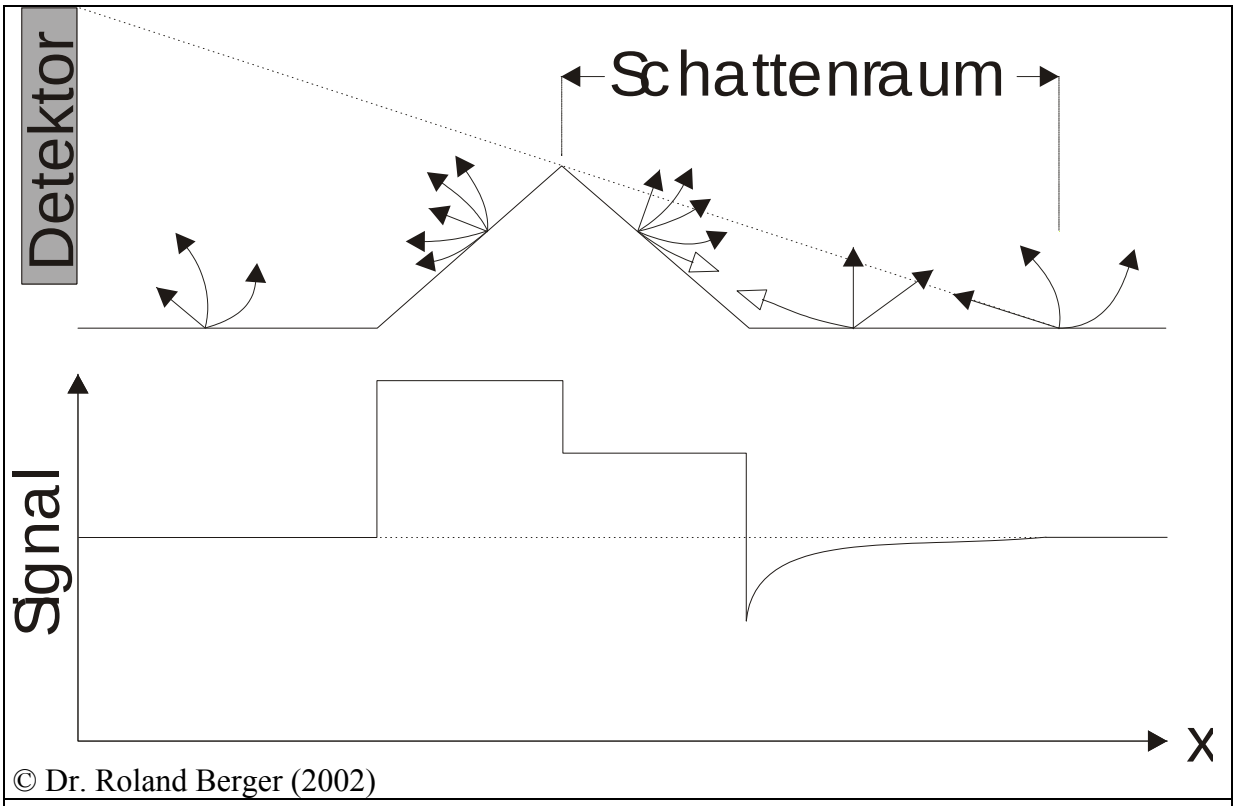
© Dr. Roland Berger (2002)

Folie 10: Kontrast durch Flächenneigung.
Oben: Der Elektronenstrahl mit 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.



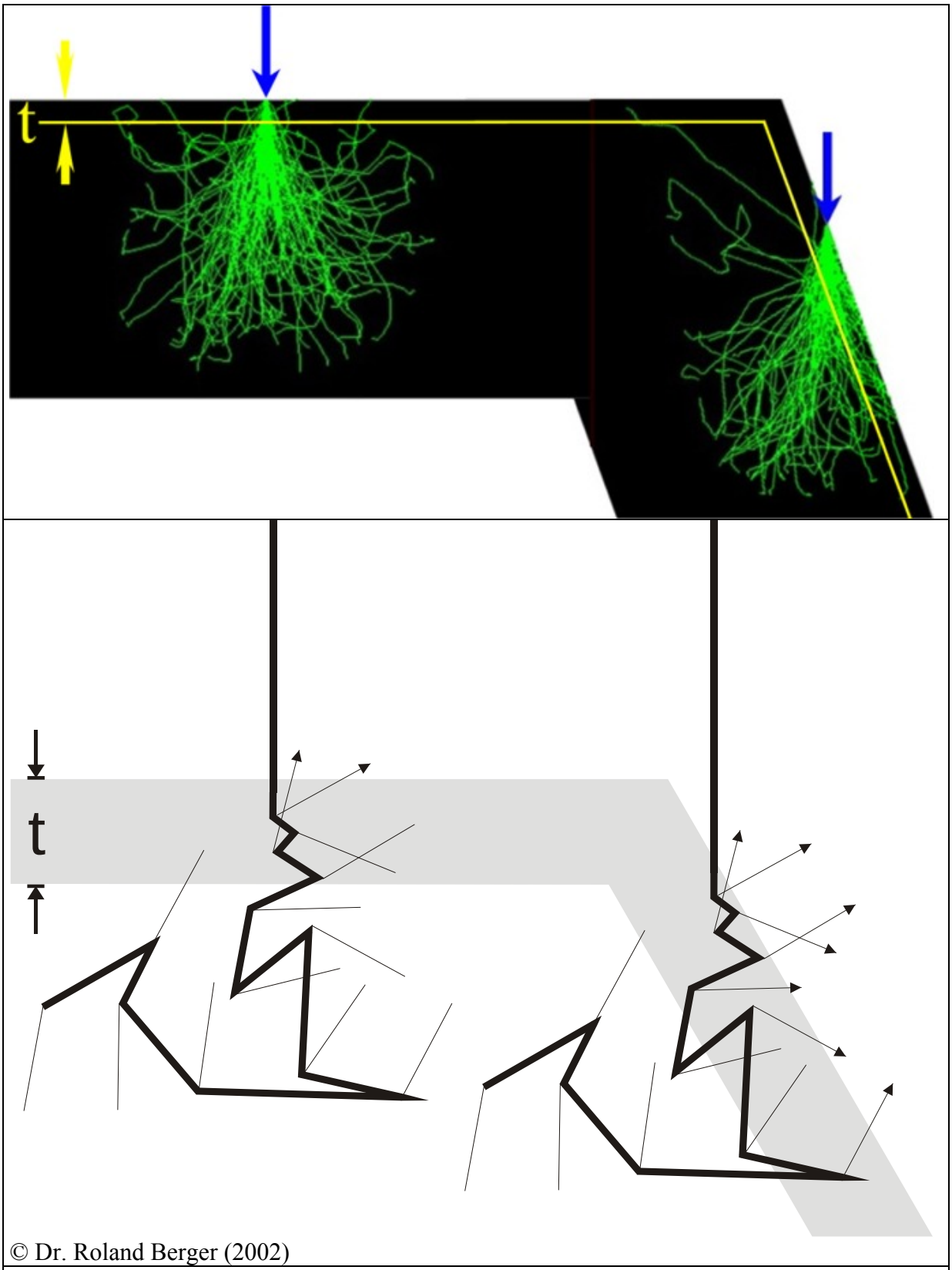
© Harald Rühling (2002)

Folie 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 („Line-Scan“). Der Verlauf entspricht dem erwarteten Signalprofil der Abb. 10 unten rechts.



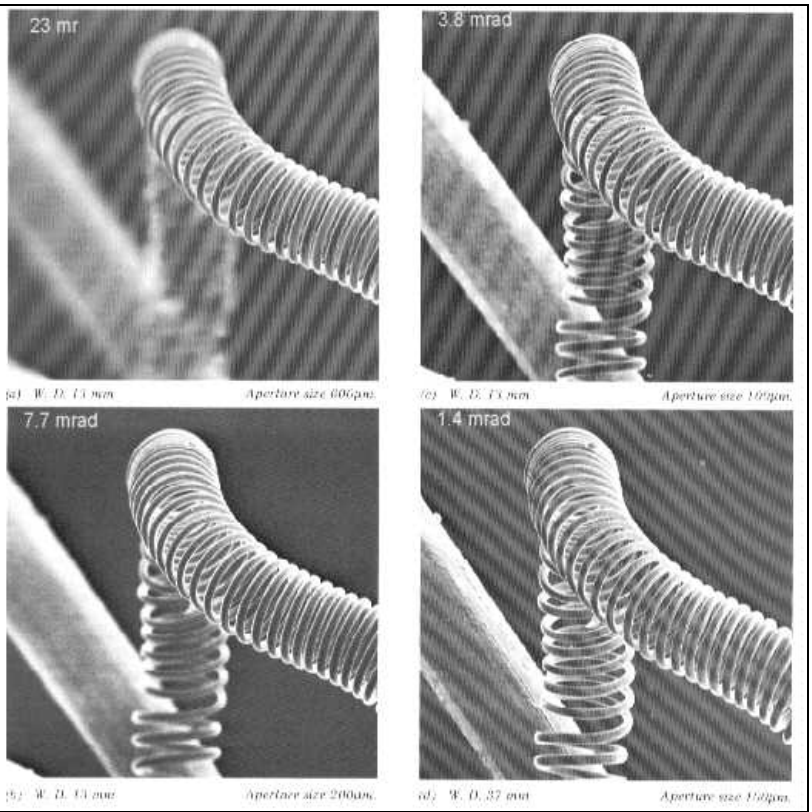
© Dr. Roland Berger (2002)

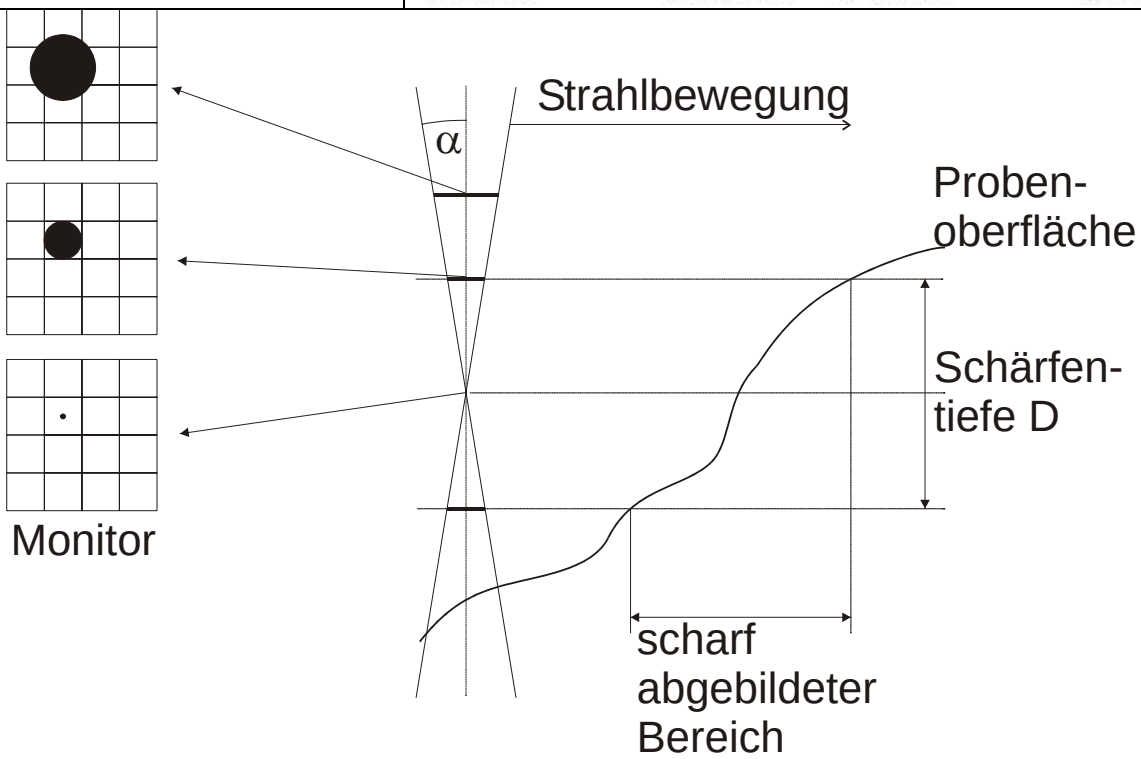
Folie 12: Schattenkontrast. Die Sekundärelektronen, die auf einer vom Detektor abgewandten Seite erzeugt werden, können diesen trotz positiver Saugspannung zum Teil nicht erreichen (offene Pfeile). Solche Bereiche erscheinen auf der Aufnahme daher dunkler als Schrägen, die dem Detektor zugewandt sind. Unten ist die entsprechende Helligkeit („Signal“) dargestellt.



© Dr. Roland Berger (2002)

Folie 13: Diffusionskontrast.
Oben: Simulierte Elektronenbahnen bei unterschiedlichem Auftreffwinkel.
Unten: Ist der Winkel zwischen Elektronenstrahl und Probenoberfläche kleiner als 90°, so bewegt sich das Primärelektron (dicke Bahn) länger in der dünnen Oberflächenschicht, aus der Sekundärelektronen die Probenoberfläche verlassen können (Pfeile).



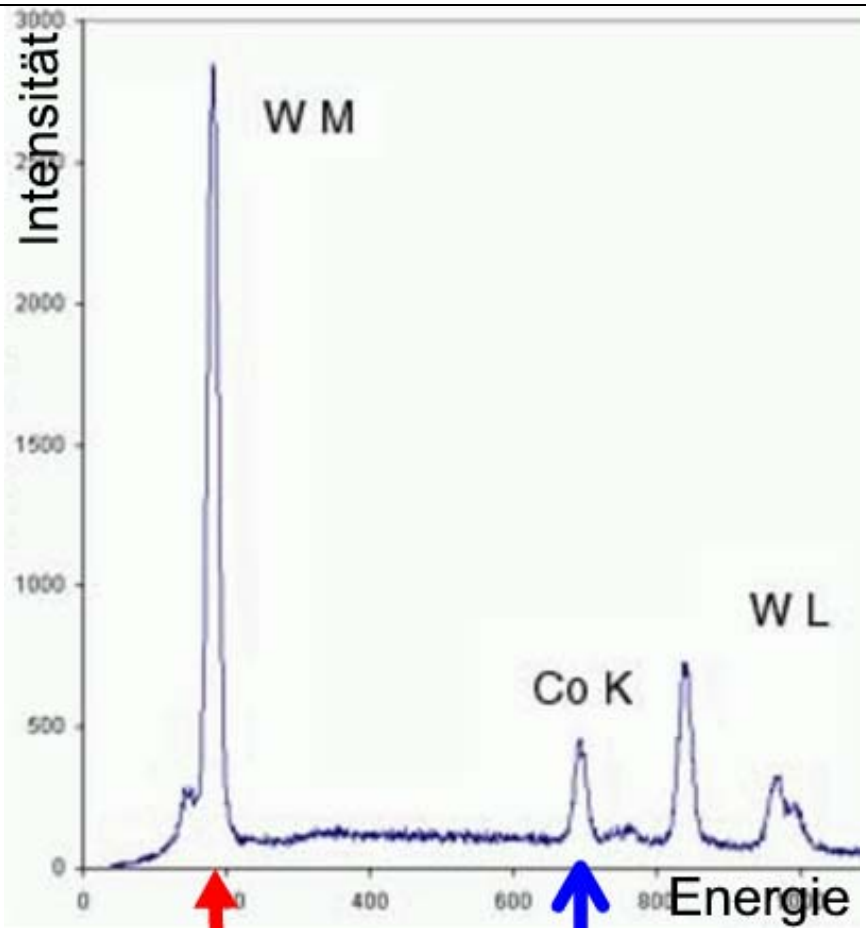


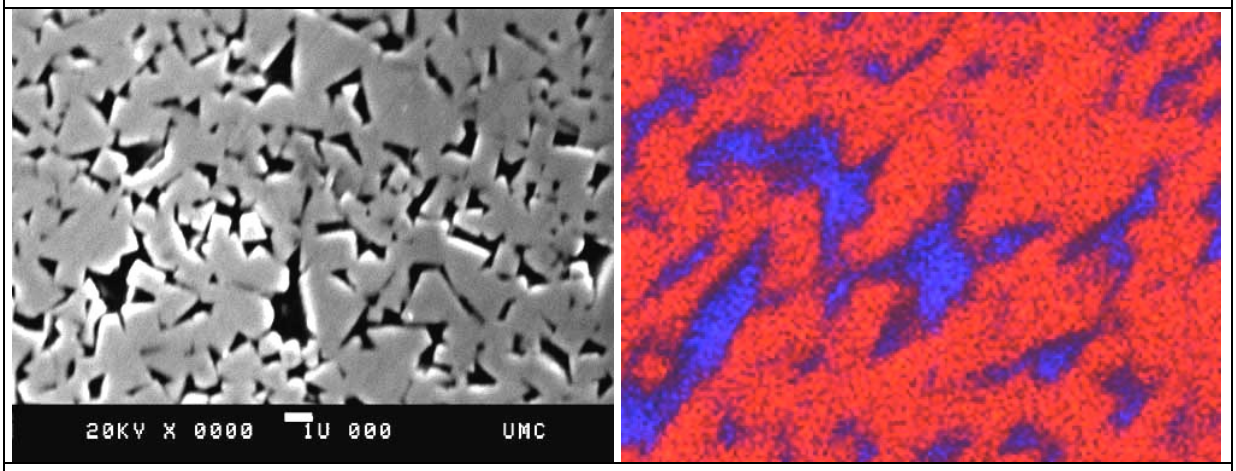
© Dr. Roland Berger (2002)

Folie 14: Schärfentiefe.

Oben: Der Bereich, in welchem das Objekt scharf erscheint, ist beim Lichtmikroskop verhältnismäßig klein. Im Elektronenmikroskop kann diese Schärfentiefe durch Änderung des Strahlöffnungswinkels verändert werden.

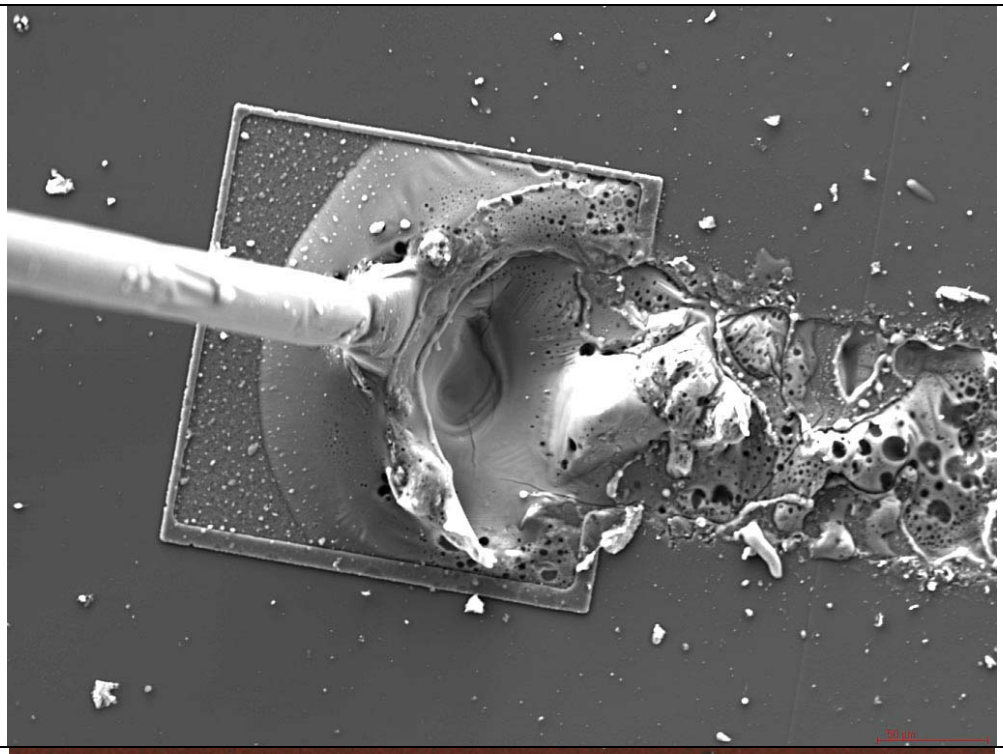
Unten: Ein Objekt erscheint auf dem Monitor solange scharf, wie der Bildpunkt auf ein Pixel beschränkt bleibt. Diese Bedingung definiert die Schärfentiefe D und kann daher durch Variation des Strahlöffungswinkels α variiert werden.

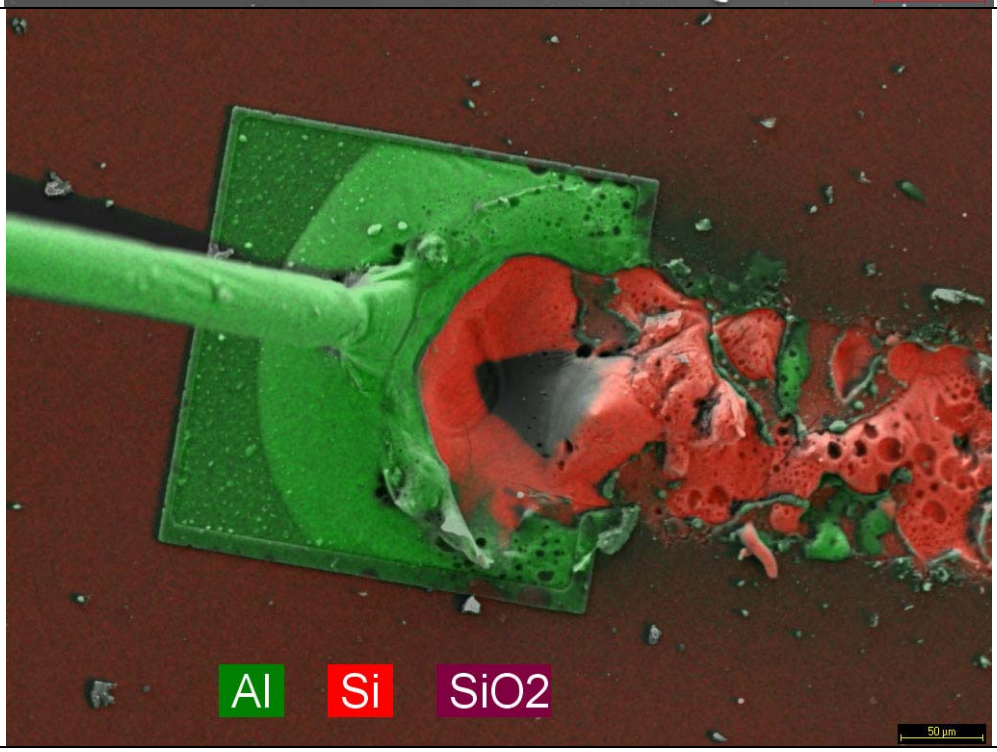




Folie 15: Röntgenstrahlung.
Oben: Energiespektrum der Probe.
Unten links: Abbildung der Probe mit Sekundärelektronen.
Unten rechts: Abbildung der Probe mit Röntgenstrahlung. Wird an einem Rasterpunkt charakteristische Wolframstrahlung registriert (roter Pfeil im Spektrum), so wird der Bildpunkt rot dargestellt. Bei Cobalt-Strahlung (blauer Pfeil) erscheint der Bildpunkt auf dem Monitor blau.
(Mit freundlicher Genehmigung von J.W. Paggett (UMC), www.missouri.edu/~jwp832/xray/)

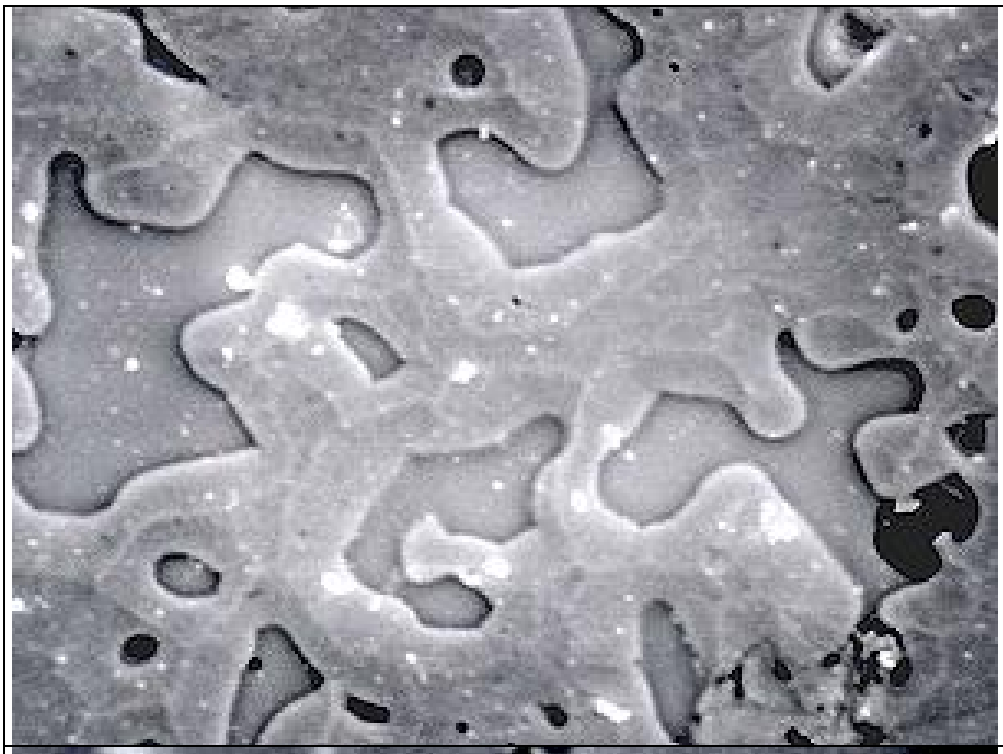
© Dr. Roland Berger (2002)

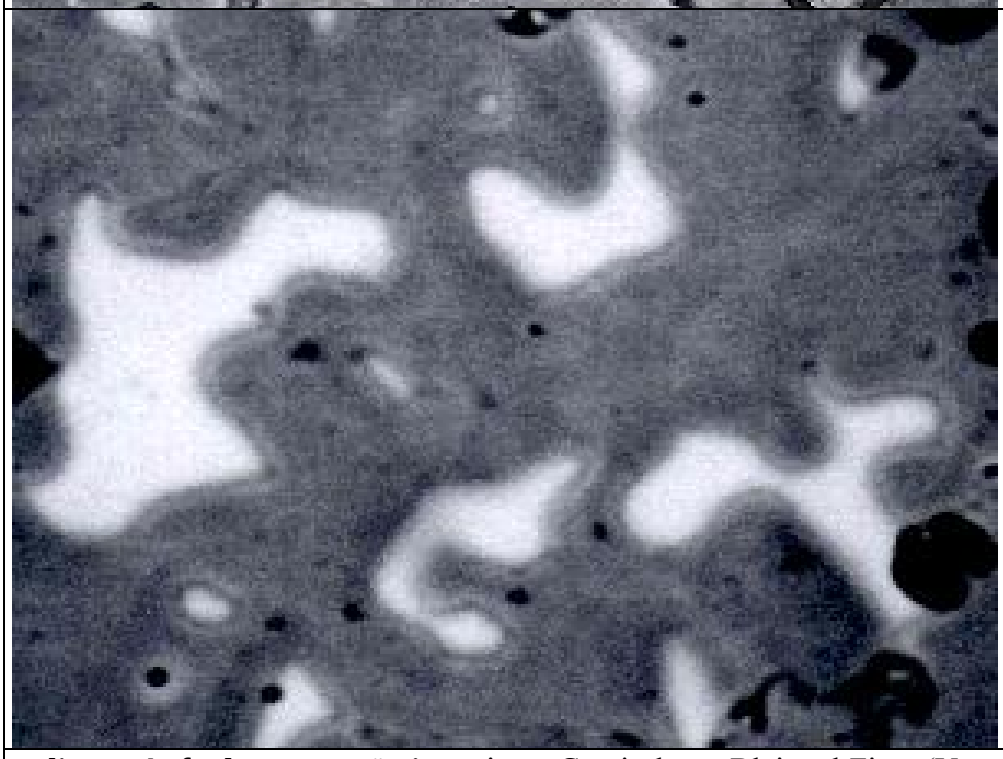




Folie 16: Zerstörtes Bondpad eines Drucksensors.
Durch elektrische Überlastung ist die Al-Beschichtung zerschmolzen und das darunter liegende Si tritt hervor.
Oben: Sekundärelektronenbild.
Unten: Farbkodierung entsprechend der charakteristischen Röntgenstrahlung. (Beschleunigungsspannung: 20 kV, Strahlstrom: 50µA (an Kathode), Impulsrate: 100.000 cps Aufnahmezeit: 8 Minuten)
(Quelle: Dr. B. Schiewe, Technische Fachhochschule Berlin
Hergestellt mit dem Röntgendetektor XFlash der Firma RÖNTEC, Berlin.
Mit freundlicher Genehmigung der Firma Röntec, Berlin.)

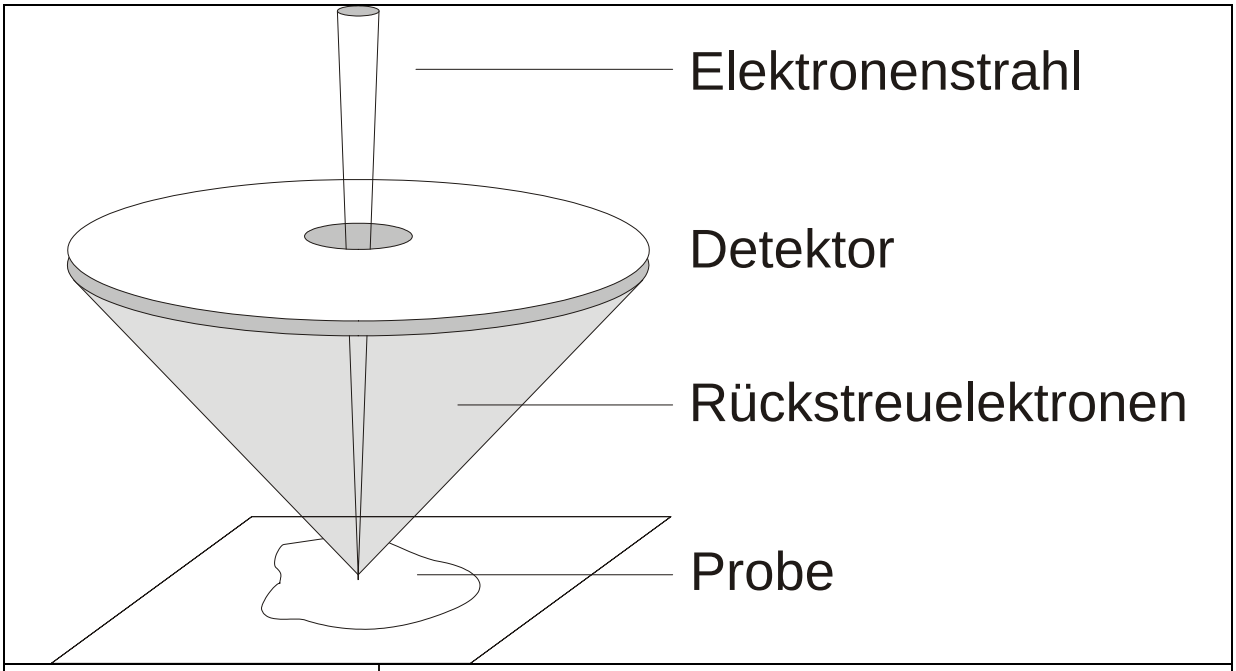
© Dr. Roland Berger (2002)

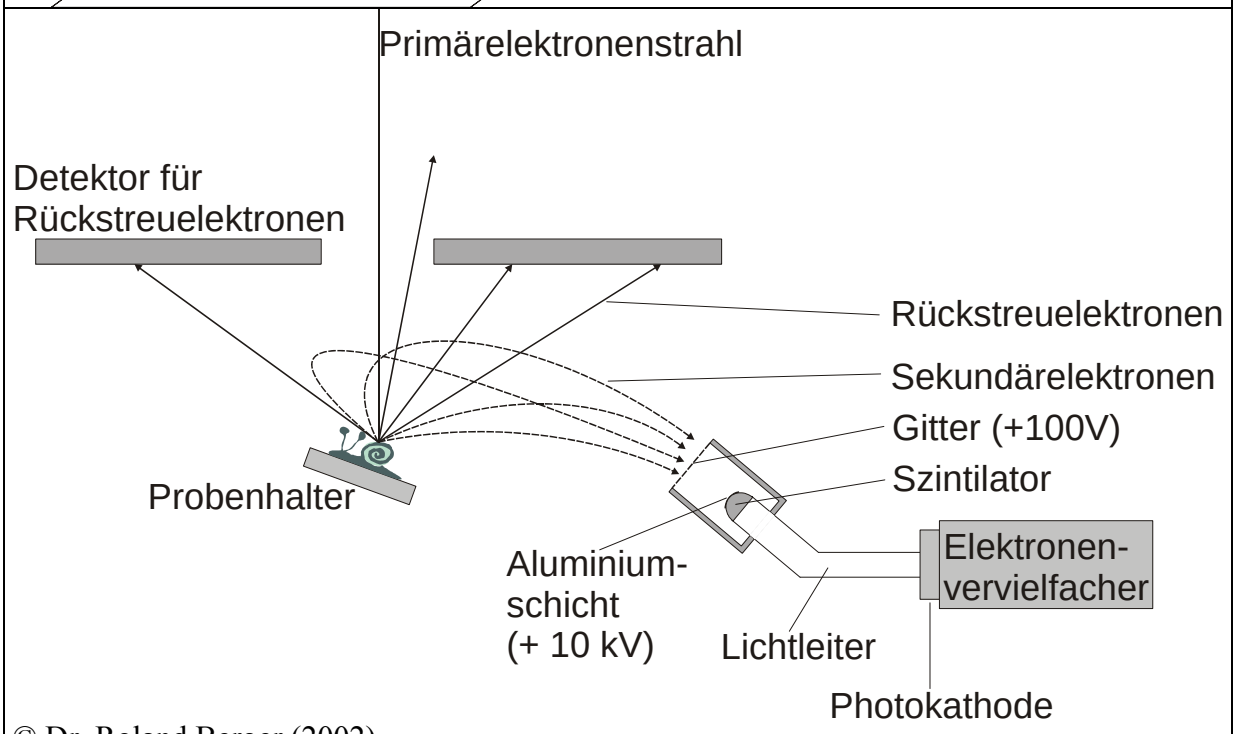




Folie 17: Aufnahme von Lötzinn, einem Gemisch aus Blei und Zinn. (Vergrößerung 2500).
Oben: Sekundärelektronen-Bild.
Unten: Bild mit Rückstreuelektronen. Man erkennt den deutlichen Materialkontrast. Das Blei erscheint heller, da an diesen Stellen aufgrund der größeren Kernladungszahl mehr Rückstreuelektronen austreten und vom Detektor registriert werden. Man erkennt den deutlich besseren Kontrast im Vergleich zum oberen Bild.
(Quelle: SEAL Laboratories, http://www.seallabs.com/exam1.html)

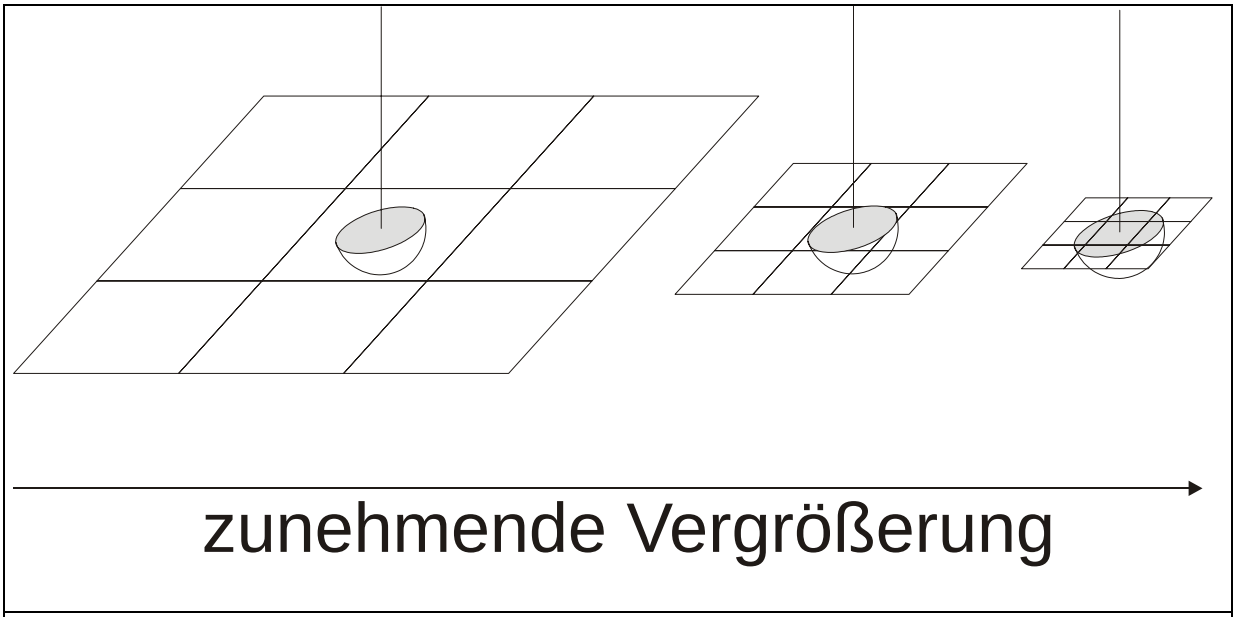
© Dr. Roland Berger (2002)





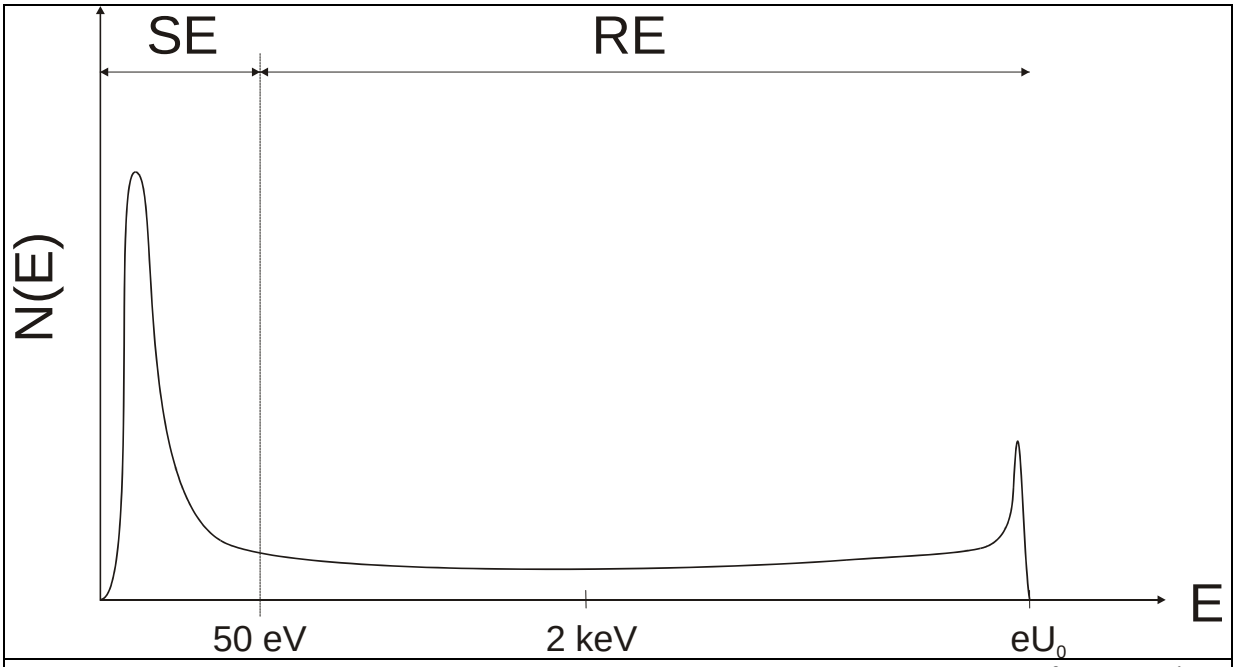
© Dr. Roland Berger (2002)

Folie 18: Detektor für Rückstreuelektronen.
Oben: Aufgrund des großen Öffnungswinkels werden vom ringförmigen Halbleiterdetektor im Vergleich zum Everhart-Thornley-Detektor relativ viele Sekundärelektronen nachgewiesen.
Unten: Wegen ihrer im Vergleich zu den Sekundärelektronen hohen Geschwindigkeit fliegen die meisten Rückstreuelektronen am Everhart-Thornley-Detektor vorbei. Man kann daher in ein- und derselben Abrasterung der Probe ein Bild mit Sekundärelektronen und ein Bild mit Rückstreuelektronen gewinnen.



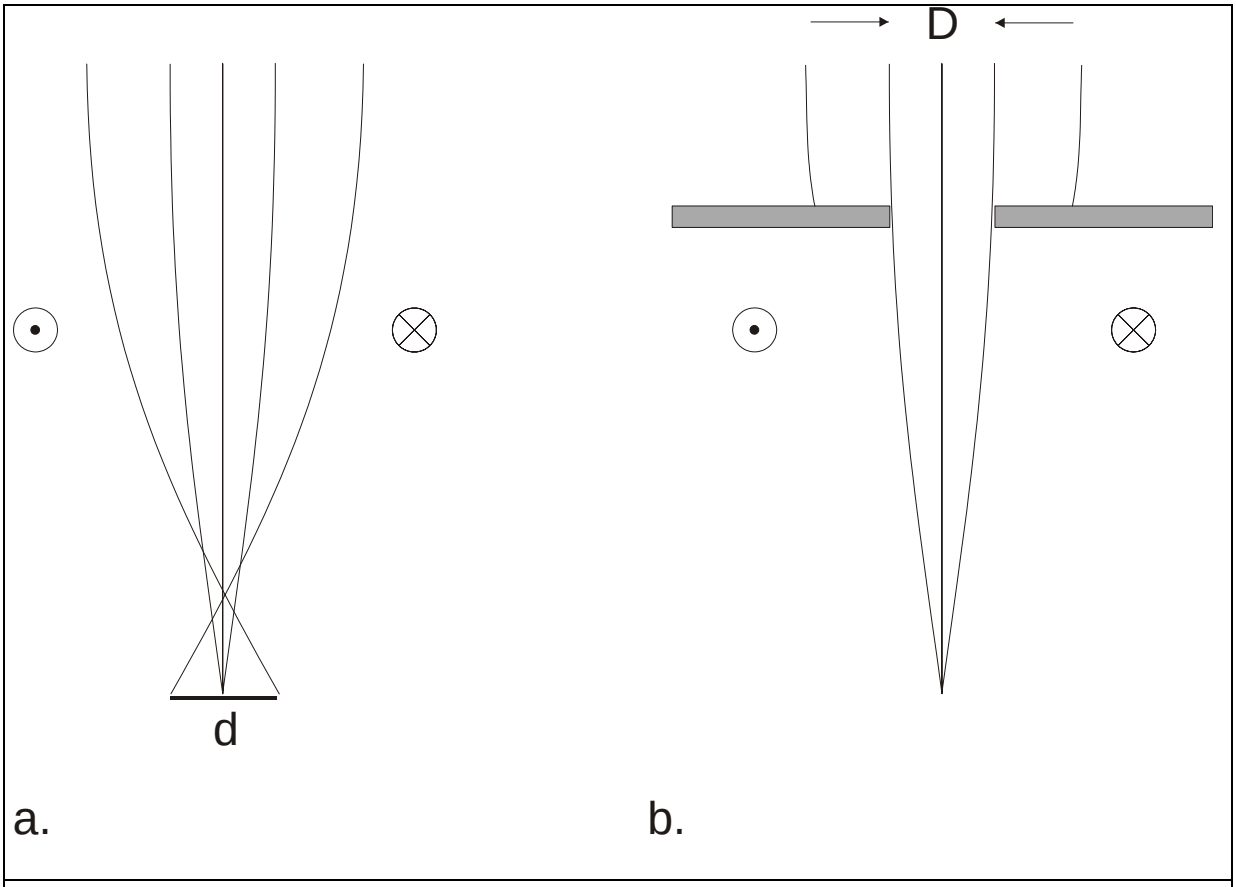
Folie 19: Auflösungsvermögen. Mit zunehmender Vergrößerung wird die Seitenlänge des Rasters immer kleiner. Die aus der grauen Fläche (Durchmesser ca. 1 µm) austretenden Elektronen stammen in der linken Abbildung aus einem einzigen Rasterpunkt. Bei hoher Vergrößerung (Abbildung rechts) ist dies nicht mehr der Fall und das Bild wird unscharf.

© Dr. Roland Berger (2002)



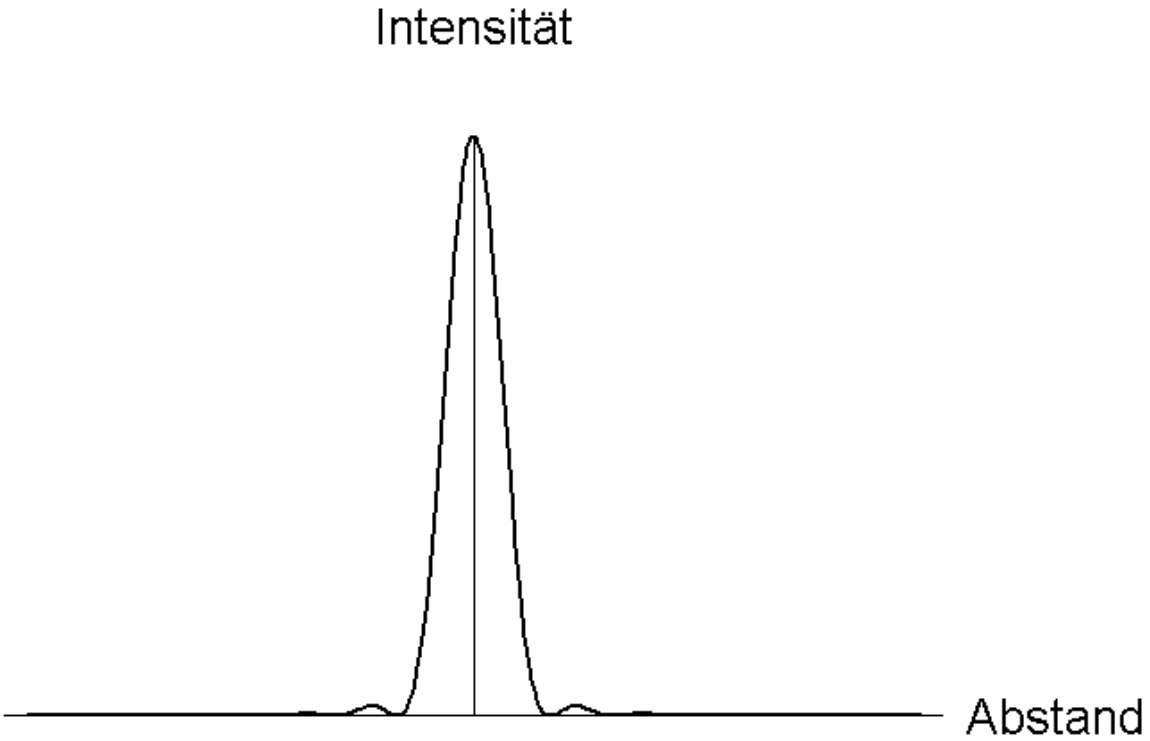
Folie 20: Energieverteilung der Elektronen, die aus der Probe austreten. Aufgetragen ist die Anzahl N der Elektronen mit einer bestimmten Energie E. Auffällig sind die beiden Spitzen in der Verteilung. Die niederenergetischen Elektronen sind die langsamen Sekundärelektronen. Außerdem gibt es eine größere Zahl von Elektronen, die ihre Anfangsenergie eU_0 praktisch behalten haben. Dies sind die Rückstreuelektronen mit niedrigem Energieverlust (Spitze rechts). Diese stammen direkt vom Auftreffpunkt des Elektronenstrahls und liefern daher hochauflösende Bilder.

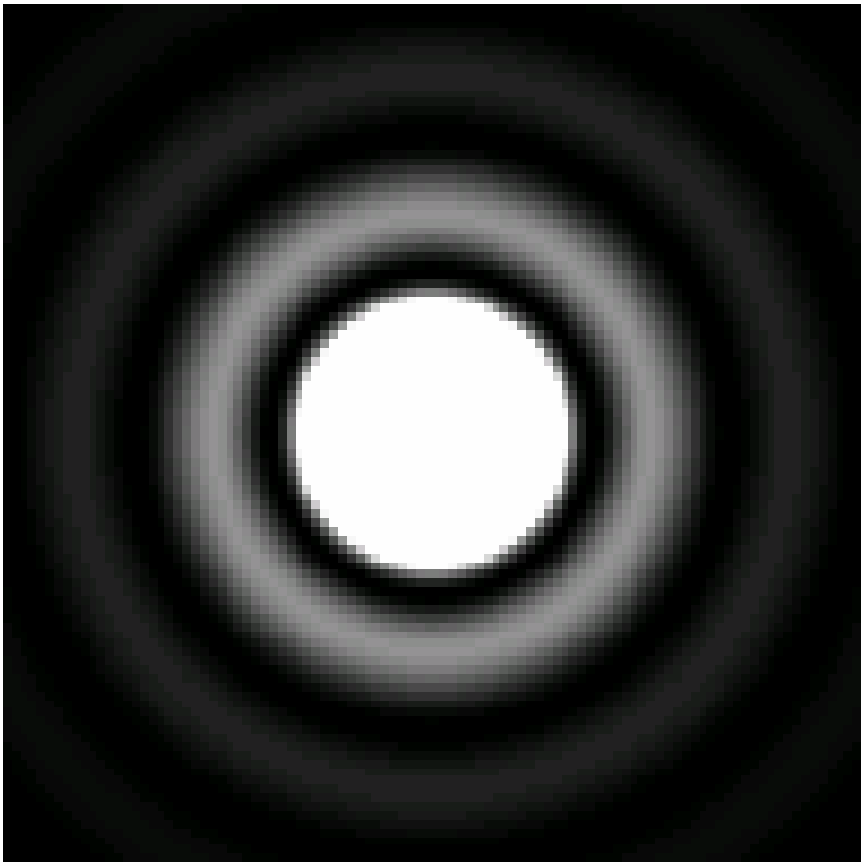
© Dr. Roland Berger (2002)



Folie 21: Sphärische Aberration. Da die achsenfernen Elektronenbahnen im magnetischen Feld der Spule stärker gekrümmt werden als die achsennahen, lässt sich ein Elektronenstrahl nicht auf einen Punkt, sondern nur auf ein Scheibchen mit Durchmesser d fokussieren (a.). Mit Hilfe einer Blende kann diese so genannte sphärische Aberration verringert werden.

© Dr. Roland Berger (2002)



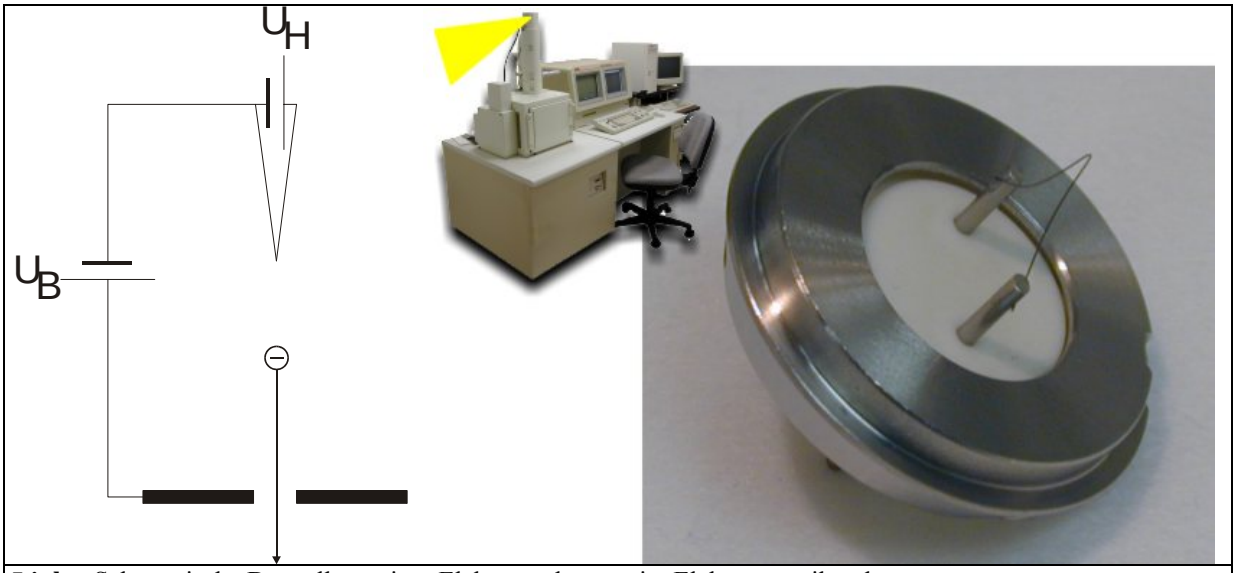


Folie 22: Beugung des Elektronenstrahls an einer Blendenöffnung.
Oben: Intensität als Funktion des Abstandes von der optischen Achse.
Unten: Zweidimensionale Darstellung des Beugungsbildes. Deutlich zu sehen ist das Hauptmaximum sowie das erste Nebenmaximum.

© Dr. Roland Berger (2002)

1. Wie funktioniert die Elektronenkanone?

In der Abbildung ist der prinzipielle Aufbau zur Erzeugung des Elektronenstrahls für die Elektronenmikroskopie zu sehen. Diese „Elektronenkanone“ besteht aus einer Metallspitze (aus Wolfram) und einer Beschleunigungsstrecke.
Mit Hilfe des Heizspannung U_H kann man die Wolframspitze wie die Glühwendel in einer Glühlampe zum Leuchten bringen. Dabei wird nicht nur Licht erzeugt, sondern auch Elektronen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die kinetische Energie der Elektronen im Metall mit zunehmender Temperatur immer größer wird. Die schnellsten Elektronen können die Wolframspitze verlassen.
Die so erzeugten freien Elektronen haben nach dem Verlassen des Glühdrahts eine Energie von etwa 1 Elektronenvolt (eV). Für die Elektronenmikroskopie sind aber wesentlich höhere Energien im Bereich von einigen 1000 eV notwendig. Daher werden die freien Elektronen mit Hilfe der Beschleunigungsspannung U_B auf den gewünschten Wert beschleunigt.



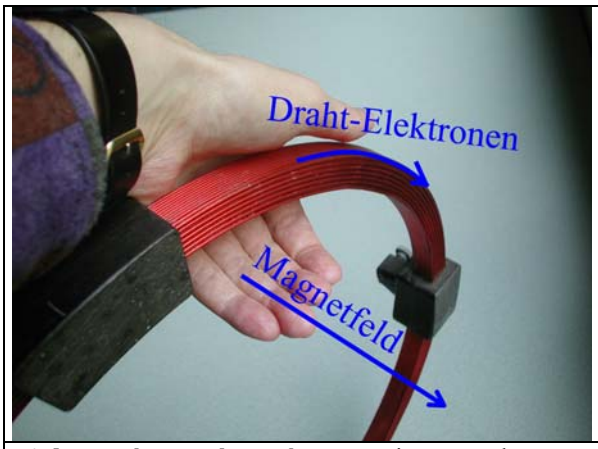
Links: Schematische Darstellung einer Elektronenkanone im Elektronenmikroskop.
Rechts: Aufnahme der Glühspitze und Position der Elektronenkanone im Mikroskop (gelber Pfeil).

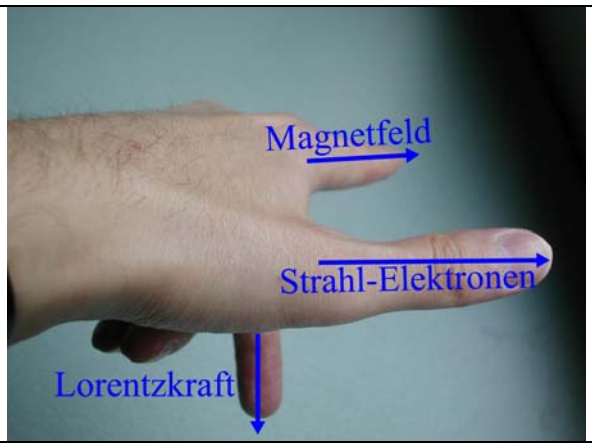
Formulieren Sie in schriftlicher Form stichpunktartig die wichtigsten Aspekte der Funktionsweise einer Elektronenkanone als Grundlage für die Unterrichtung Ihrer Mitschülerinnen und Mitschüler.

Falls Sie noch Zeit haben können Sie folgende Fragen bearbeiten:
1. Warum kann man zum Heizen auch eine Wechselspannung verwenden, zum Beschleunigen aber nicht?
2. Wie kann man die Zahl der Elektronen erhöhen, die die Glühspitze verlassen?
3. Welche Geschwindigkeit haben Elektronen nach Durchlaufen einer Beschleunigungsspannung von 10 kV?
4. Warum hängt die Energie der Elektronen nicht von der Länge der Beschleunigungsstrecke ab?
5. Warum muss das Innere des Elektronenmikroskops mit Hilfe einer Pumpe evakuiert werden?

© Dr. Roland Berger (2002)

2. Wie kann man den Elektronenstrahl ablenken?





Links: *Linke-Hand-Regel* zur Bestimmung der Magnetfeldrichtung in der Spule. Der Daumen zeigt in Bewegungsrichtung der Elektronen im Spulendraht, die vom Minus- zum Pluspol der Spannungsquelle fließen. Die gekrümmten Finger geben die Magnetfeldrichtung in der Spule an.

Rechts: *Dreifingerregel* der linken Hand zur Bestimmung der Richtung der Lorentzkraft auf den Primärelektronenstrahl.

- Daumen: Bewegungsrichtung der Strahl-Elektronen.
- Zeigefinger: Richtung des Magnetfeldes (mit der Linke-Hand-Regel ermittelt).
- Mittelfinger: Lorentzkraft auf die Strahlelektronen

Bearbeiten Sie bitte folgende Fragen:

1. Machen Sie mit Hilfe dieser beiden Regeln eine Vorhersage der Ablenkungsrichtung und überprüfen Sie diese experimentell.
2. Von welchen beiden Größen hängt es ab, wie groß die Ablenkung der Elektronen ist? Überprüfen Sie auch dies experimentell. (Damit lässt sich im Elektronenmikroskop die Bildvergrößerung einstellen.)
3. Wie kann man die Rastergeschwindigkeit (und damit die Aufnahmezeit für ein Bild) verändern?
4. Welche technische Alternative gibt es zur magnetischen Ablenkung?

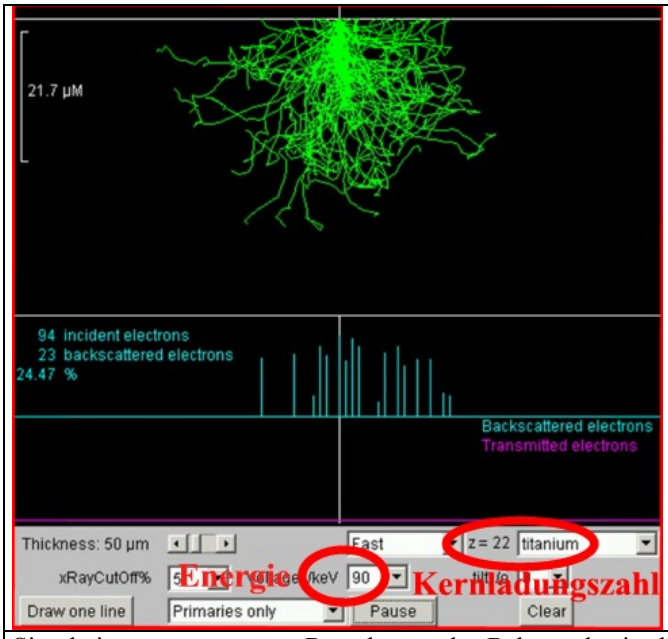
Formulieren Sie in schriftlicher Form stichpunktartig die wichtigsten Aspekte zur Ablenkung des Elektronenstrahls als Grundlage für die Unterrichtung Ihrer Mitschülerinnen und Mitschüler.

Erläutern Sie in Ihrem Unterricht auch die Bedeutung der Strahlablenkung für das Rasterelektronenmikroskop.

© Dr. Roland Berger (2002)

3. Wovon hängt die Eindringtiefe der Elektronen in die Probe ab?

Laden Sie am Computer die Seite http://www.matter.org.uk/tem/electron_scattering.htm
Dort finden Sie ein Simulationsprogramm, welches die Bahnen der Primärelektronen in einer Probe berechnet.



Simulationsprogramm zur Berechnung der Bahnen der in die Probe eindringenden Primärelektronen. Markiert sind die Energie der auf die Probe treffenden Primärelektronen und die Kernladungszahl des Materials.

Im Folgenden soll die Abhängigkeit der Eindringtiefe der Primärelektronen

- von der Energie der auftreffenden Primärelektronen und
- von der Kernladungszahl Z des Materials, in welches die Primärelektronen eindringen,

untersucht werden.

Aufgabe 1.
Warum ist die Bahnlänge der Primärelektronen (grüne Linien im Simulationsprogramm) immer größer als ihre Eindringtiefe in die Probe? Versuchen Sie eine Erklärung zu finden, welche die Wechselwirkung zwischen den Primärelektronen mit den Atomkernen der Probe enthält (so genannte „elastische Streuung“).

Aufgabe 2.
Überprüfen Sie mit Hilfe des Programms, wie die Eindringtiefe der Primärelektronen

1. von ihrer Energie (bei fester Kernladungszahl Z) und
2. von der Kernladungszahl des Materials (bei fester Energie des auftreffenden Primärelektrons) abhängt.

Begründen Sie die beiden Abhängigkeiten über die Wechselwirkung der Primärelektronen mit den Atomkernen („elastischen Streuung“).

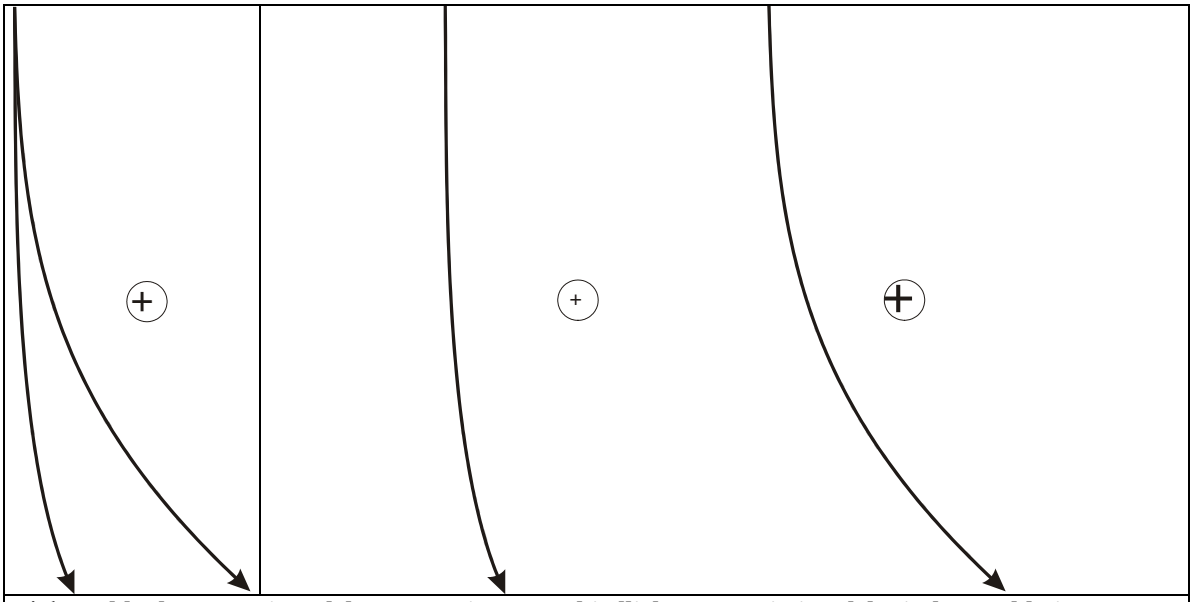
Formulieren Sie als Grundlage für die Unterrichtung Ihrer Mitschülerinnen und Mitschüler in schriftlicher Form stichpunktartig

1. **warum sich die Bahnlänge der Primärelektronen von ihrer Eindringtiefe unterscheidet und**
2. **wie die Eindringtiefe der Elektronen von den beiden diskutierten Parametern abhängt (Je-Desto-Formulierungen) und begründen Sie dies mit der elastischen Streuung.**

Fertigen Sie entsprechende Skizzen zur Verdeutlichung! (Vorschläge finden Sie auf dem Beiblatt.)

© Dr. Roland Berger (2002)

Skizzen zur Veranschaulichung

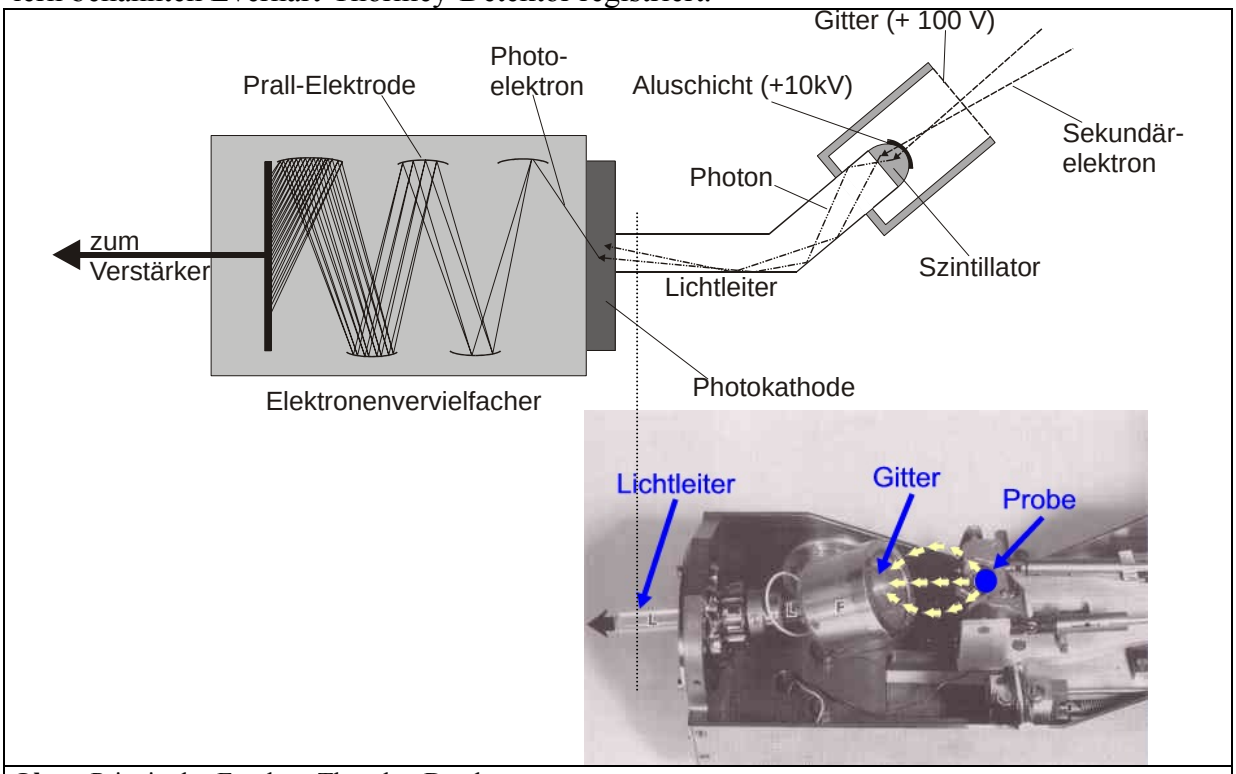


Links: **Ablenkung zweier Elektronen mit unterschiedlicher Energie im elektrischen Feld eines Atomkerns.**
Rechts: **Ablenkung zweier Elektronen mit gleicher Energie bei unterschiedlicher Kernladungszahl.**

© Dr. Roland Berger (2002)

4. Wie funktioniert ein Elektronendetektor?

Die Sekundärelektronen, die aus der Probe austreten, werden mit dem nach seinen Entwicklern benannten Everhart-Thornley-Detektor registriert.



Oben: Prinzip des Everhart-Thornley-Detektors.
Unten: Die Sekundärelektronen werden von der Probe entlang der hellen Pfeile zum Gitter gezogen. Der Elektronenvervielfacher links vom Lichtleiter ist nicht abgebildet.

Die in der Zeichnung von rechts kommenden Sekundärelektronen werden (wie im Unterricht besprochen) von dem positiv gepolten Gitter angezogen. 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 eines Leuchtstoffs (des so genannten Szintillators) und werden dadurch auf hohe Energie beschleunigt. Diese Energie reicht aus um die dünne Metallschicht zu durchdringen und den Szintillator zum Leuchten anzuregen. Das Licht wird mit Hilfe eines Lichtleiters auf die so genannte Photokathode geleitet. Dort setzt das Licht Elektronen frei[7]. 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 liefern jeweils wiederum ca. 10 freie Elektronen. Über mehrere Prall-Elektroden entsteht somit eine regelrechte Elektronenlawine. Sie dient als Signal zur Helligkeitsregelung des Bildpunktes auf dem Monitor. Das Signal ist umso stärker, je mehr Sekundärelektronen die Probe pro Sekunde verlassen haben.

Formulieren Sie in schriftlicher Form stichpunktartig die wesentlichen Aspekte zum Verständnis des Detektors als Grundlage für die Unterrichtung Ihrer Mitschülerinnen und Mitschüler.

Was könnte der Grund dafür sein, dass man die Sekundärelektronen zunächst in Licht und anschließend wieder in Elektronen umwandelt? Hinweis: Die Probe befindet sich im Vakuum (warum?). Dieser Bereich wird möglichst klein gehalten, um das Vakuum leichter aufrecht erhalten zu können.

[7] diesen so genannten „Photoeffekt“ werden Sie im Rahmen der Quantenphysik noch näher kennen lernen.

© Dr. Roland Berger (2002)

5. Wie verändert eine Elektronenlinse die Elektronenbahn?

Beim Durchgang durch eine stromdurchflossene Spule wird der Elektronenstrahl gedreht und gebündelt. Diese beiden Beobachtungen lassen sich mit den folgenden Abbildungen erklären. 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. Arbeiten Sie dazu bitte die detaillierte Argumentation unter den Bildern durch und versuchen Sie diese Schritt für Schritt zu verstehen.

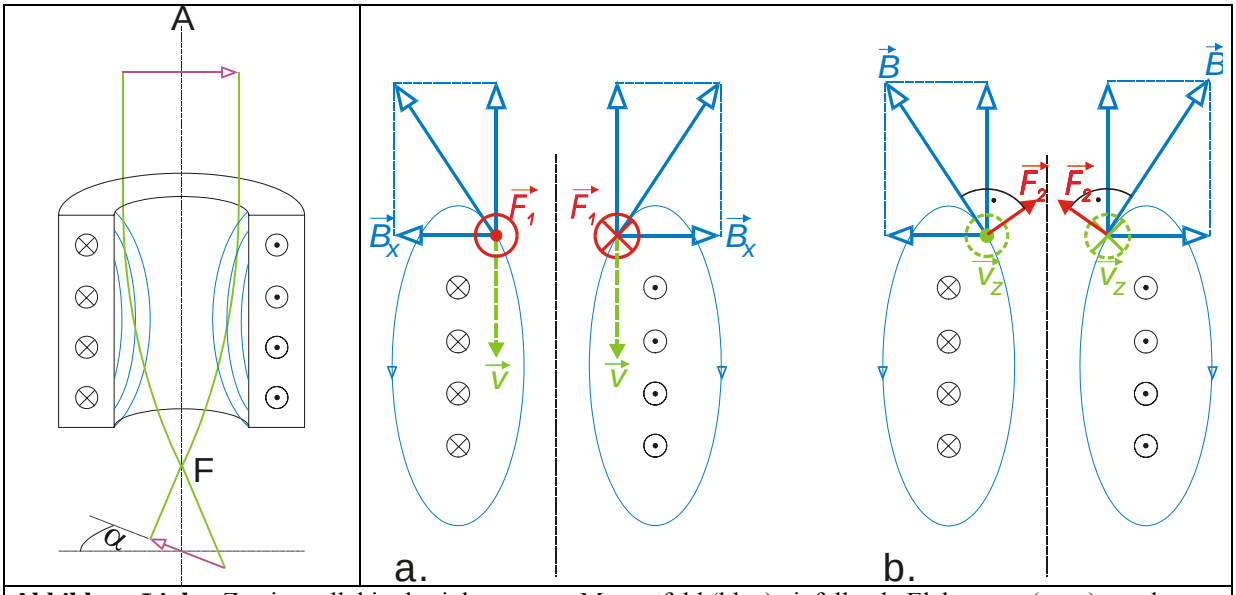


Abbildung Links: Zwei parallel in das inhomogene Magnetfeld (blau) einfallende Elektronen (grün) werden zur Achse A hin abgelenkt.

Abbildung Rechts: Die Erklärung dieser fokussierenden Wirkung erfolgt in zwei Schritten entsprechend der Abbildungen a. und b.

Zu Abbildung a.: Die beiden Elektronen treten in der Zeichenebene parallel zur Spulenachse A mit der Geschwindigkeit $\vec{v}$ (gestrichelte grüne Pfeile) in das inhomogene Magnetfeld ein. Gezeichnet ist der Übersichtlichkeit halber nur eine Feldlinie (blau). Der Vektor der magnetischen Feldstärke und seine Komponenten in x-Richtung ($\vec{B}_x$) und y-Richtung am Ort des Elektrons sind blau eingezeichnet (offene Pfeilspitzen).

Die Lorentzkraft $\vec{F}_1$ wirkt senkrecht zu $\vec{v}$ und $\vec{B}_x$ aus der Zeichenebene heraus (rotes Symbol: ⊙) bzw. in die Zeichenebene hinein (rotes Symbol: ¨). $\vec{F}_1$ bewirkt also eine Rotation der Elektronen um die Spulenachse.

Zu Abbildung b.: Die Lorentzkraft $\vec{F}_1$ aus Abbildung a. bewirkt eine Geschwindigkeitskomponente $\vec{v}_z$ aus der Zeichenebene heraus (gestricheltes grünes Symbol: ⊙) bzw. in die Zeichenebene hinein (gestricheltes grünes Symbol: ¨).

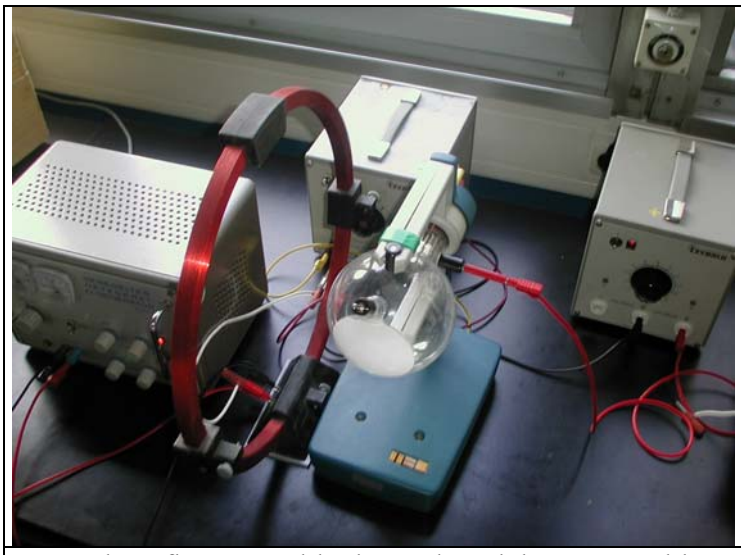
Die Lorentzkraft $\vec{F}_2$ wirkt senkrecht zu $\vec{v}_z$ und $\vec{B}$. $\vec{F}_2$ beschleunigt also die beiden Elektronen in Richtung zur Spulenachse. Einfallende Elektronen werden daher zur Spulenachse hin abgelenkt und der Elektronenstrahl somit fokussiert.

Formulieren Sie in schriftlicher Form stichpunktartig die wesentlichen Aspekte zum Verständnis der Wirkung einer Magnetlinse auf einen Elektronenstrahl als Grundlage für die Unterrichtung Ihrer Mitschülerinnen und Mitschüler.

© Dr. Roland Berger (2002)

Experimentelle Hinweise

Versuch: *Abrastern der Probenoberfläche mit dem Elektronenstrahl im Magnetfeld*
Zubehör: Perrin-Röhre (Leybold Nr. 55511), 1 große Spule (vgl. Abbildung), Frequenzgenerator



Versuchsaufbau zur Ablenkung des Elektronenstrahls.

Beobachtung: Die Wechselspannung des Frequenzgenerators verschiebt den Elektronenstrahl in vertikaler Richtung über den Leuchtschirm. Die horizontale Verschiebung erhält man mit einer weiteren Spule, die senkrecht zur ersten angeordnet ist.

Erklärung: Die vertikal gerichtete Spule in der Abbildung erzeugt ein horizontales Magnetfeld senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Elektronen. Diese werden nach der Dreifingerregel daher in vertikaler Richtung abgelenkt. Ein Wechselstrom in der Spule führt zu einer periodischen Ablenkung des Strahls. Für die horizontale Abrasterung wird eine entsprechend horizontal angeordnete Spule verwendet.

Versuch: *Fokussierung des Elektronenstrahls mit einer magnetischen Linse*
Hinweis: Wichtig ist, einen Pol der Stromversorgung für die Spule mit einem Pol der 6V-Heizspannung (der wiederum mit einem Pol der Hochspannungsquelle verbunden ist) zu verbinden um elektrostatische Verzerrungen des Bildpunktes zu vermeiden.
Zubehör: Perrin-Röhre (Leybold Nr. 55511) mit Hochspannungsgerät, 1 große Spule (vgl. Abbildung), Netzwürfel für Spulenstrom und Glühemission.
Versuchsaufbau:

Prinzip der magnetischen Linse. Im inhomogenen Magnetfeld der Spule wird der Leuchtfleck, welcher durch

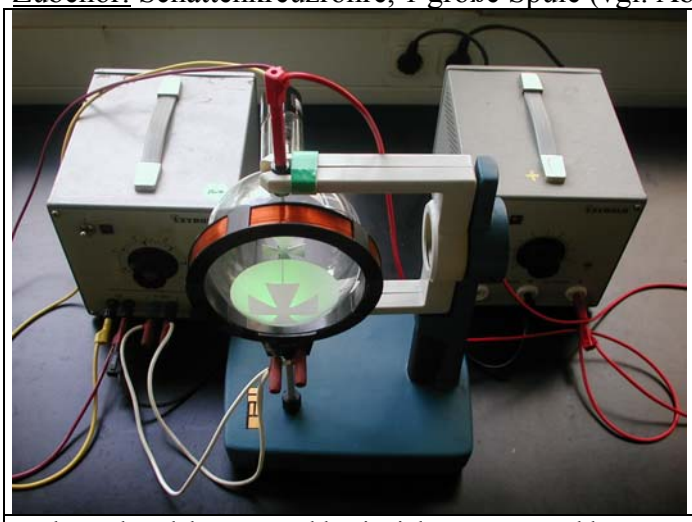
© Dr. Roland Berger (2002)

den Elektronenstrahl in der Röhre hervorgerufen wird, kleiner.

Beobachtung: Der Leuchtpunkt wird kleiner, wenn Strom durch die Spule fließt.

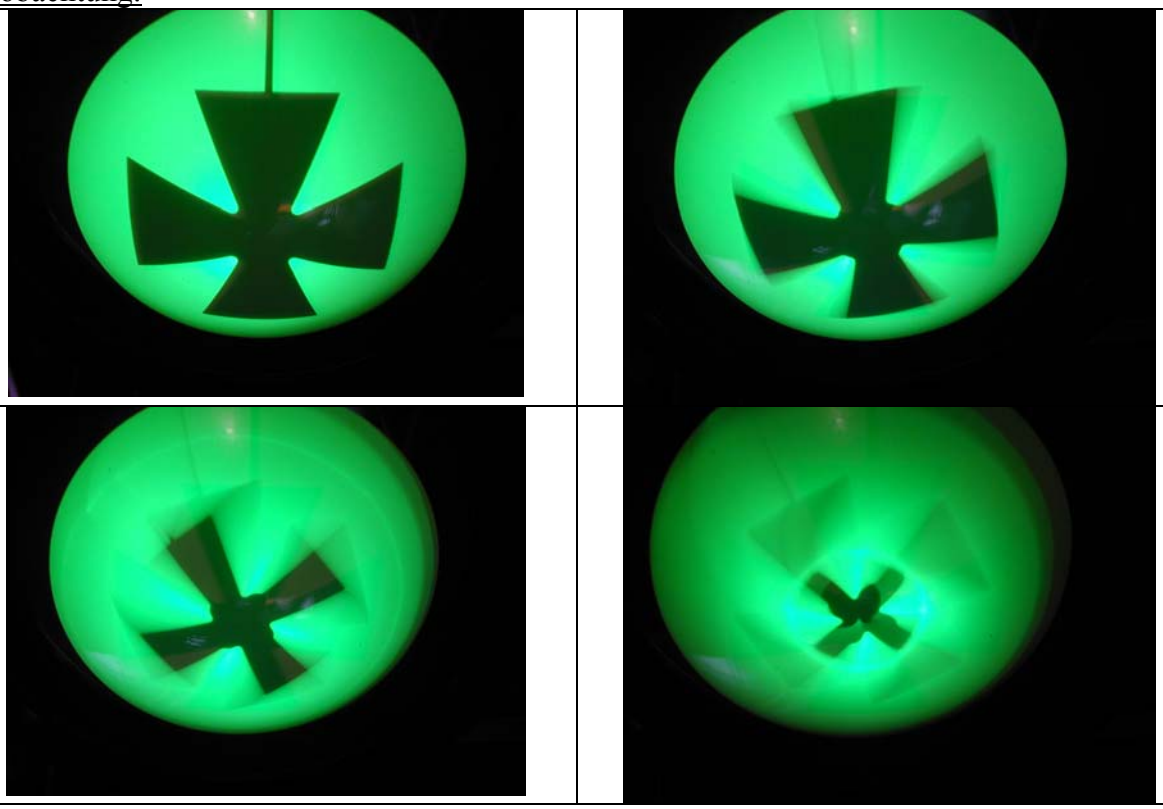
Der Aufbau hat allerdings einen Nachteil. Denn die Elektronenstrahlen werden senkrecht zur Ausbreitungsrichtung gedreht:

Versuch: *Drehung des Bildes durch eine magnetische Linse*
Zubehör: Schattenkreuzröhre, 1 große Spule (vgl. Abbildung)



Drehung der Elektronenstrahlen im inhomogenen Feld

Beobachtung:



Wirkung des zunehmenden Magnetfelds. Je größer das Magnetfeld, desto stärker werden die Elektronen zur optischen Achse hin abgelenkt. Das Bild des Kreuzes wird daher zunehmend kleiner. Außerdem kommt es zu einer Drehung der Elektronen senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung. Dies bewirkt eine zunehmende Drehung des Schattens.

© Dr. Roland Berger (2002)

Aufgaben zum Rasterelektronenmikroskop

1. Aufgabe: 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. Aufgabe: Ablenkung des Elektronenstrahls

Zum Abrastern der Probe wird der Elektronenstrahl entweder mit einem Plattenkondensator oder einer Magnetspule abgelenkt. Die beiden Varianten sind in Abb. 1 dargestellt.

a. Wie müssen das elektrische Feld bzw. das Magnetfeld gerichtet sein, damit sich die eingezeichneten Bahnen der Elektronen ergeben? Welche Bahnkurven beschreiben die Elektronen im Kondensator bzw. im Magnetfeld? Geben Sie für Ihre Antworten jeweils eine Begründung.

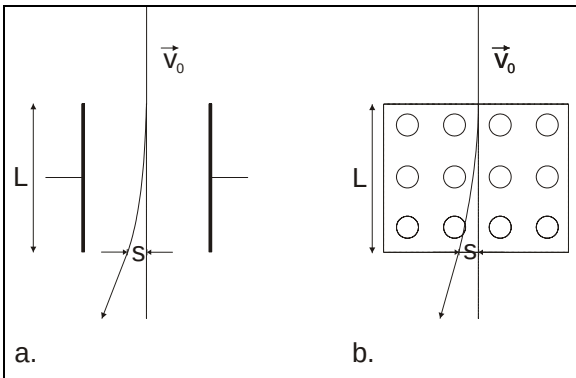


Abb. 1: Ablenkung von Elektronen. Um den Elektronenstrahl über die zu untersuchende Probe zu rastern, wird er entweder durch ein elektrisches Feld (a.) oder ein magnetisches Feld (b.) abgelenkt.

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. Aufgabe: 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

© Dr. Roland Berger (2002)

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. 2). 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.

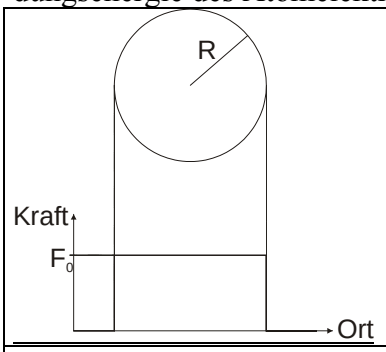


Abb. 2: Kraft auf ein Atomelektron. Befindet sich das Primärelektron außerhalb des Atoms, so ist die Kraft auf das Atomelektron Null. Im Atom übt das Primärelektron näherungsweise eine ortsunabhängige Kraft F_0 auf das Atomelektron aus.

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. Aufgabe: Elementbestimmung mit dem Rasterelektronenmikroskop

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

5. Aufgabe: 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 Rasterelektronenmikroskopen ein so genanntes ExB-Filter (vgl. Abb. 3).

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.

© Dr. Roland Berger (2002)

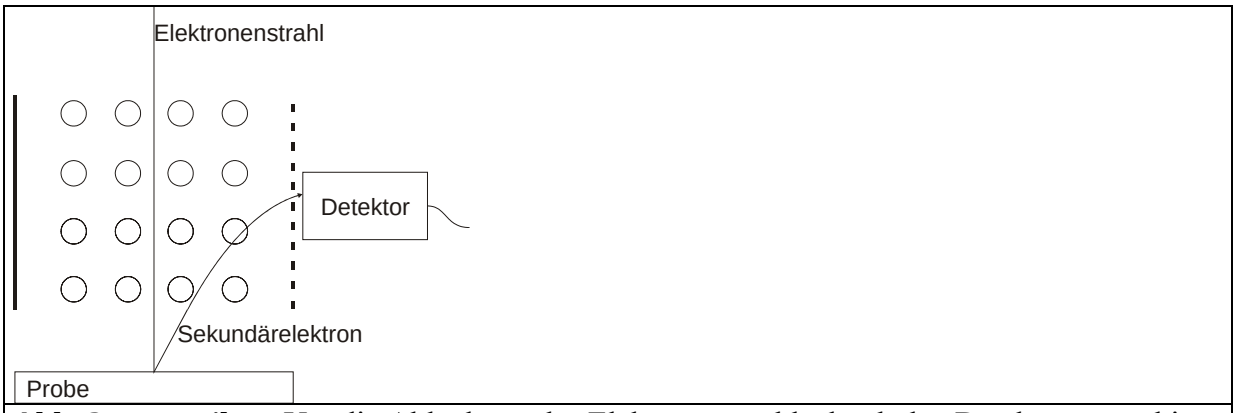


Abb. 3: ExB-Filter. Um die Ablenkung des Elektronenstrahls durch den Detektor zu verhindern, wird ein Geschwindigkeitsfilter aus gekreuztem elektrischem und magnetischem Feld verwendet. Die rechte Platte des Kondensators ist durchlöchert, damit die Sekundärelektronen zum Detektor gelangen können.

6. Aufgabe: Strahleigenschaft

Die Primärelektronen bewegen sich in einem zylinderförmigen Strahl der Länge L=10cm und dem Radius r_0=1µm mit einer Geschwindigkeit von v=8,4·10^7m/s. Die Stromstärke beträgt I=1,0 nA.

a. Wie groß ist die relativistische Massenzunahme der Elektronen in Prozent der Ruhemasse? Im Folgenden werde nichtrelativistisch weitergerechnet.
b. Wie groß war die Beschleunigungsspannung?
c. Die Elektronen wurden in der Kanone innerhalb von einem Zentimeter auf die angegebene Geschwindigkeit beschleunigt. Wie groß war die mittlere Beschleunigung? Vergleichen Sie mit der Erdbeschleunigung.
d. Wieviele Elektronen befinden sich im Mittel gleichzeitig im Strahl?
e. Wie groß ist die Wellenlänge der Elektronen? Begründen Sie damit, dass es zu keiner wesentlichen Strahlaufweitung durch Beugung kommt.

Lösung der Aufgaben

1. Aufgabe: Erzeugung und Beschleunigung der Elektronen

a. Vgl. Abb. 12 im Lehrtext.
b. Aus dem Energieerhaltungssatz $\frac{1}{2}mv_0^2 = eU_B$ ergibt sich für $U_B = 1,0 \cdot 10^4 V$ eine Geschwindigkeit von $v_0 = 5,9 \cdot 10^7 \frac{m}{s}$, also etwa 20% der Lichtgeschwindigkeit. Dies rechtfertigt eine nichtrelativistische Rechnung.
c. Die Zusatzgeschwindigkeit v_G ergibt sich aus dem Energieerhaltungssatz $\frac{1}{2}mv_G^2 = mgh$ zu 3,1 m/s und ist daher gegen v_0 vernachlässigbar klein.

2. Aufgabe: Ablenkung des Elektronenstrahls

a. Für die dargestellte Bahnkrümmung muss die linke Platte des Kondensators positiv gepolt sein, damit die Elektronen des Strahls angezogen werden. Das elektrische Feld ist daher von links nach rechts gerichtet. Die Bahnkurve ist eine Parabel, da in horizontaler Richtung die konstante Feldkraft eE_0 wirkt und die Bewegung in vertikaler Richtung kräftefrei ist. (Die Gravitation ist vernachlässigbar, vgl. Aufgabe 1. c.).
   Das Magnetfeld in Abb. 1 b. muss in die Zeichenebene hinein gerichtet sein. Dann ergibt

© Dr. Roland Berger (2002)

sich mit der Drei-Finger-Regel die eingezeichnete Bahn. Es handelt sich um einen Kreisabschnitt. Denn die Lorentzkraft ist stets senkrecht zur Bewegungsrichtung gerichtet und ändert den Betrag der Bahngeschwindigkeit nicht.

b. Da die Lorentzkraft stets senkrecht zur Bewegungsrichtung des Elektrons wirkt, erfolgt keine Änderung der kinetischen Energie im Magnetfeld. Im elektrischen Feld E_0 des Kondensators erhält das Elektron während der Laufzeit $T = \frac{L}{v_0}$ eine Quergeschwindigkeit von $v_x = aT = \frac{eE_0}{m}\frac{L}{v_0}$. Der Geschwindigkeitsbetrag ist durch $v^2 = v_0^2 + v_x^2$ gegeben. Die Änderung der kinetischen Energie beträgt daher $\Delta E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2m}\left(\frac{eE_0L}{v_0}\right)^2$.

c. Kondensator: Die Laufzeit im Kondensator ist durch $T = \frac{L}{v_0}$ gegeben. Die horizontale Ablenkung beträgt daher $s = \frac{1}{2}aT^2 = \frac{1}{2}\frac{eE_0}{m}\left(\frac{L}{v_0}\right)^2$. Damit ergibt sich $E_0 = \frac{2smv_0^2}{eL^2}$.

Magnetfeld: Die Lorentzkraft liefert die für die Kreisbahn des Elektrons im Magnetfeld nötige Zentripetalkraft: $m\frac{v_0^2}{R} = B_0ev_0$ (1). Der Radius R der Kreisbahn ergibt sich mit Hilfe des rechtwinkligen Dreiecks in der folgenden Abbildung aus $L^2 + (R-s)^2 = R^2$ und damit $R = \frac{L^2+s^2}{2s}$ (2). Einsetzen von Gleichung (2) in (1) liefert $B_0 = \frac{mv_0}{e}\frac{2s}{L^2+s^2}$.

d. Das Verhältnis der Feldstärken ist also durch $\frac{E_0}{B_0} = v_0 \cdot \left(1 + \left(\frac{s}{L}\right)^2\right) \approx v_0$ für $s \ll L$ gegeben.

Erreicht man die gewünschte Ablenkung mit einer leicht zu realisierenden Magnetfeldstärke von 1 mT, so benötigt man mit der in Aufgabe 1 b. berechneten Geschwindigkeit eine hohe elektrische Feldstärke von $6 \cdot 10^4$ V/m.

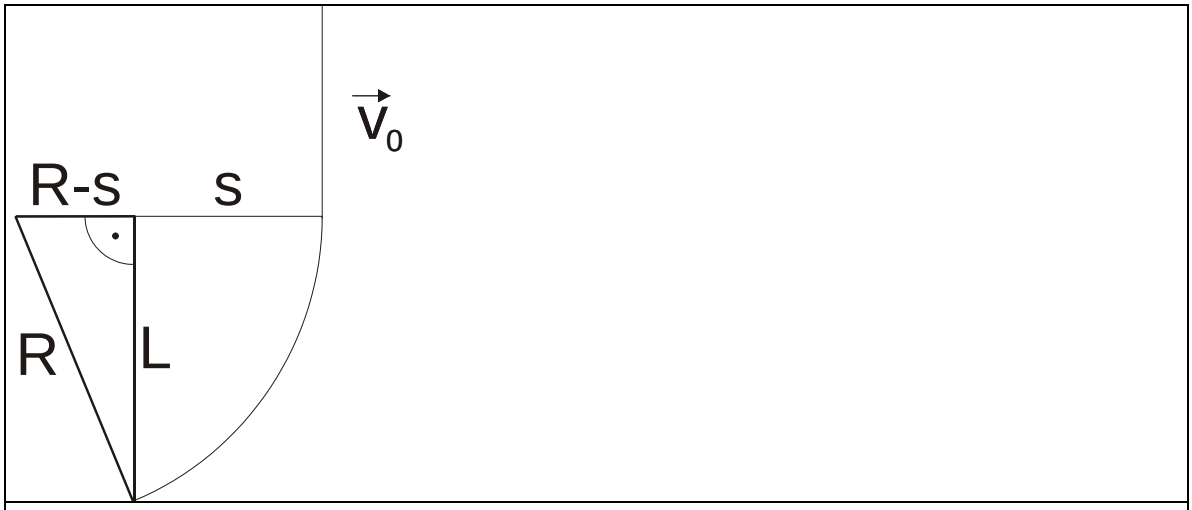


Abb. 4: Geometrie der Kreisbewegung im Magnetfeld.

3. Aufgabe: Energieübertrag bei inelastischer Streuung

© Dr. Roland Berger (2002)

a. Das Primärelektron benötigt zum Durchlaufen des Atomdurchmessers die Zeit $t = \frac{2R}{v_0}$. Die Beschleunigung des Atomelektrons während dieser Zeit ist $a = \frac{F_0}{m}$.

b. Damit ergibt sich die Endgeschwindigkeit des Sekundärelektrons zu $v = a \cdot t = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{e^2}{mv_0 R}$.

Die kinetische Energie beträgt daher $E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2} \cdot \frac{e^4}{E_0 R^2}$ (Dabei wurde $E_0 = \frac{1}{2}mv_0^2$ verwendet). Daraus erkennt man, dass die übertragene kinetische Energie E umso kleiner ist, je größer die kinetische Energie E_0 des Primärelektrons ist. Physikalisch liegt dies wie im Lehrtext beschrieben daran, dass bei höherer Geschwindigkeit die Zeit t, in der das Sekundärelektron wirkungsvoll abgestoßen wird, kleiner wird. Einsetzen von $E_0 = 10keV$ und einem Atomdurchmesser von $R = 10^{-10}m$ liefert $E = 21meV$. Die Abschätzung ist zwar grob, zeigt aber, dass die übertragene kinetische Energie sehr klein gegen die Anfangsenergie E_0 des Primärelektrons ist.

4. Aufgabe: Elementbestimmung im Rasterelektronenmikroskop

a. Charakteristische Strahlung: Ein Atomelektron wird vom Primärelektron aus einer tiefen Schale gestoßen. Die entstandene Lücke wird von einem Elektron aus einer höheren Schale gefüllt. Die Energiedifferenz hängt von der Protonenzahl Z und damit vom Element ab. Sie wird als Röntgenstrahlung emittiert.
Bremsstrahlung: Das Primärelektron wird im Coulombfeld des Atomkerns abgelenkt. Durch diese Beschleunigung wird Röntgenstrahlung emittiert.

b. Wenn die gesamte kinetische Energie E_0 des Primärelektrons auf ein einziges Röntgenphoton übergeht, so hat dieses die Energie $hf_{\max} = E_0$. Bei einer Energie von 20 keV beträgt die Grenzfrequenz $f_{\max} = 4{,}8 \cdot 10^{18}\,Hz$.

c. Nach dem Bragg-Gesetz $n\lambda = 2d\sin\alpha$ folgt für die erste Beugungsordnung (n=1) eine Wellenlänge von $\lambda = 1{,}8 \cdot 10^{-10}m$ bzw. die Frequenz $f = \frac{c}{\lambda} = 1{,}7 \cdot 10^{18}\,Hz$.

d. Aus dem Moseley-Gesetz $f = (Z-1)^2 \cdot f_R \cdot \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{m^2}\right)$ (Rydbergfrequenz $f_R = 3{,}29 \cdot 10^{15}\,Hz$) ergibt sich für den Übergang von der L-Schale (d.h. m=2) die Kernladungszahl zu Z=27. Bei dem gesuchten Element handelt es sich also um Cobalt (Co).

5. Aufgabe: ExB-Filter

a. Damit die Sekundärelektronen sowohl durch das elektrische als auch durch das magnetische Feld zum Detektor hin abgelenkt werden, muss die rechte Platte des Kondensators positiv die linke negativ geladen sein. Das elektrische Feld zeigt also von rechts nach links. Damit die Lorentzkraft ebenfalls nach rechts gerichtet ist, muss das Magnetfeld in die Zeichenebene hinein gerichtet sein. Die beiden Felder sind in Abb. 5 eingezeichnet.

b. Ein Elektron im Strahl wird dann im überlagerten Feld nicht abgelenkt, wenn ein Kräftegleichgewicht zwischen elektrischer Feldkraft und Lorentzkraft herrscht: $eE = ev_0B$. Es muss also die Bedingung $\frac{E}{B} = v_0$ erfüllt sein. Die Geschwindigkeit ergibt sich aus dem Energieerhaltungssatz $\frac{1}{2}mv_0^2 = eU_B$ bei einer Beschleunigungsspannung U_B=10kV zu v_0=5,9·10^7 m/s. Beispielsweise muss bei einer Magnetfeldstärke von 10mT eine elektrische Feldstärke von 5,9·10^5 V/m gewählt werden. Bei einem Abstand der Kondensator-

© Dr. Roland Berger (2002)

platten von 1,0 cm benötigt man dazu eine Spannung von 5,9 kV.

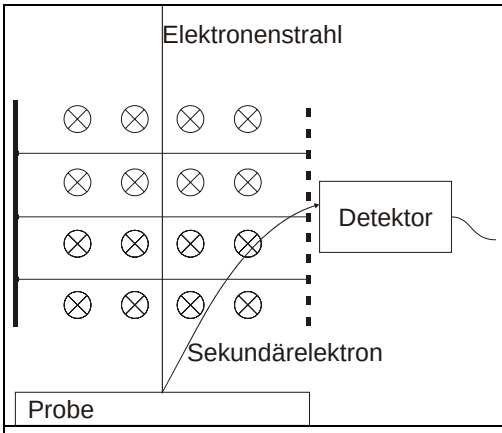


Abb. 5: Elektrisches und magnetisches Feld im ExB-Filter.

6. Aufgabe: Strahleigenschaft

a. $\frac{m}{m_0} = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$=1,04. Da die Massenzunahme klein ist (4%) kann nichtrelativistisch gerechnet werden.

b. Aus $\frac{1}{2}mv^2 = eU_B$ folgt U_B=20kV.

c. Aus $Fs = eU_B$ folgt mit $F=ma$ und s=1cm die Beschleunigung $a=3{,}5\cdot 10^{17}\,\mathrm{m/s^2}$

Alternativer Weg: Aus $s = \frac{1}{2}at^2$ und $v = at$ folgt $a = \frac{v^2}{2s}$

d. $I = \frac{Q}{T} = \frac{Ne}{L/v} \Rightarrow N = \frac{IL}{ev} = 7{,}4$. Die mittlere Anzahl der Elektronen im Strahl ist also überraschend gering.

e. Nach De-Broglie ist $\lambda = \frac{h}{mv} = 8{,}7\cdot 10^{-12}\,m$. Der Öffnungswinkel zum ersten Beugungsminimum ist $\alpha \approx \frac{\lambda}{2r_0} = 4{,}4\cdot 10^{-6}\,rad = 2{,}5\cdot 10^{-4}\,Grad$ (Näherungen: Kleiner Öffnungswinkel; Beugung am Einzelspalt). Auf die Strecke von L=10cm kommt es also zu einer Aufweitung von $x = L\tan\alpha$ =0,44 µm. Dies ist vergleichbar mit dem anfänglichen Strahlradius r_0, sodass es zu keiner großen Aufweitung des Strahles kommt.

© Dr. Roland Berger (2002)