

Rasterelektronenmikroskopie

Autoren: Ruckdeschel, Grünewald

Stand: 9. Juni 2026

Schon im 18. Jahrhundert existierten Mikroskope. Ziel war damals wie heute, mikroskopisch kleine Strukturen sichtbar zu machen und zu untersuchen. Das Mittel der Wahl war dabei lange Zeit das Lichtmikroskop. Dieses ist einfach herzustellen, leicht zu bedienen, und erlaubt die Betrachtung vielfältiger Proben. Grenzen zeigen sich jedoch bei der erreichbaren Auflösung. Diese ist nach der hier in Jena in Stein gemeißelten Abbe-Gleichung auf ca. die Hälfte der Wellenlänge des genutzten Lichtes begrenzt. Einen Ausweg bietet die Elektronenmikroskopie, da die De-Broglie-Wellenlängen beschleunigter Elektronen um ein Vielfaches kleiner sind als die Wellenlängen sichtbaren Lichtes. Durch Ersetzen des Lichtstrahls mit einem Elektronenstrahl erreicht man im sogenannten Transmissionselektronenmikroskop (TEM) Auflösungen von bis zu 0,1 nm. Die Probe wird dabei von dem Elektronenstrahl durchstrahlt, was eine komplexe Präparation extrem dünner Proben (50 bis 250 nm) nötig macht. Um diesen Aufwand zu vermeiden, wurden mehrere Arten der Elektronenmikroskopie entwickelt, die ohne das Durchstrahlen der Probe auskommen. Das gängigste dieser Verfahren ist die in diesem Versuch thematisierte Rasterelektronenmikroskopie.

In einem Rasterelektronenmikroskop (REM) wird analog zum TEM ein Elektronenstrahl erzeugt, dieser durchleuchtet die Probe jedoch nicht, sondern wird auf der Oberfläche der Probe fokussiert. Ein ausgewählter Bereich der Probe wird dann Punkt für Punkt abgerastert, und aus den Produkten der Interaktion zwischen Strahl und Probe ein Bild generiert. Das REM ist heutzutage die verbreitetste Form eines Elektronenmikroskops. Es findet vielfältigen Einsatz in Biologie, Mikro- und Nanotechnologie und Physik. Zu seinen Vorteilen gehören eine vergleichsweise einfache Probenpräparation, sowohl Tiefen-, als auch Materialkontrast und zusätzliche Analysemöglichkeiten (Röntgenspektroskopie).

Lernziele und Methoden

- Arbeit und Umgang mit Elektronenmikroskopen
- Vergleich der wichtigsten Mikroskopie-Verfahren und deren Einsatzgebiete
- Erzeugung freier Elektronen, Strahlformung und Fokus
- Wechselwirkung von Elektronen und Materie
- Detektion von Elektronen und Röntgenstrahlung
- Kontrastentstehung im REM, Tiefen- und Materialkontrast
- Probenpräparation, Vakuumtechnik
- Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX)
- Elektronenbeugung/-kanalisierung (ECP)

Experimentelle Technik

- Rasterelektronenmikroskop Cambridge Stereoscan 120
 - Everhart-Thornley-Detektor (Sekundärelektronen)
 - Halbleiterdetektor für Rückstreuelektronen
 - Detektor für Röntgenspektroskopie (PIN-Diode, Amptek)
- Steuer- und Auswerterechner mit Bildaufnahme- und Verarbeitungssoftware
- Anlage zur Vakuumaufdampfung von Metallschichten auf Proben

Literaturempfehlungen

- **Allgemeine Einführung:**

L. Bergmann und C. Schäfer, *Experimentalphysik*, Walter de Gruyter New York. (Band III Kapitel 10.4 und 10.5 & Band VI Kapitel 3.5)

- **Umfassende Literatur zum REM:**

L. Reimer und G. Pfefferkorn, *Rasterelektronenmikroskopie*, Springer-Verlag Berlin, 1977.

C. Colliex und H. Kohl, *Elektronenmikroskopie: eine anwendungsbezogene Einführung*. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart, 2008.

R. F. Egerton, *Physical Principles of Electron Microscopy*. Springer New York, 2005.

- **Spezielle Literatur:**

W. Demtröder, *Experimentalphysik, Band 3*. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 2005. (Röntgenphysik)

W. Demtröder, *Experimentalphysik, Band 4*. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 2005. (Halbleiterdetektoren Kapitel 4.3)

1 Grundlagen

1.1 Strahlerzeugung und -formung

1.1.1 Theoretische erreichbare Auflösungen

Gemäß der Abbe-Gleichung (Gl. 1.1) hängt die kleinste auflösbare Strukturbreite im Mikroskop maßgeblich von der Wellenlänge der verwendeten Strahlung ab:

$$d = \frac{\lambda}{2NA} \quad (1.1)$$

Im Falle eines Lichtmikroskop ($\lambda = 400$ bis 780 nm) ergibt sich daher eine Auflösung von einigen 100 nm. Zusätzlich zur Wellenlänge spielt die numerische Apertur $NA = n \sin \alpha$ des Objektivs eine Rolle, welche sich aus Brechzahl n des Mediums zwischen Objektiv und Probe und dem Sinus des halben Öffnungswinkels α ergibt.

Die Verwendung eines Elektronenstrahls im REM ermöglicht es, die maximale Auflösung des Lichtmikroskops deutlich zu übertreffen. Für die Berechnung von d bei Elektronenmikroskopen ist die de-Broglie-Wellenlänge relevant:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e E_{kin}}} \quad (1.2)$$

Dabei bezeichnet m_e die Elektronenmasse, $E_{kin} = eU_B$ die kinetische Energie der Elektronen, welche von der Beschleunigungsspannung U_B abhängt. Die theoretische Auflösungsgrenze des REM liegt deutlich unter der des Lichtmikroskops, da die de-Broglie-Wellenlänge bei typischen Beschleunigungsspannungen der Elektronen (5 bis 30 keV) um mehrere Größenordnungen kleiner als die Wellenlänge von sichtbarem Licht. Im REM beträgt die Brechzahl eins, da ein Vakuum vorliegt. Der Öffnungswinkel hängt von der Elektronenoptik und der Probenposition ab, er lässt sich also durch Einstellungen am REM optimieren. Generell ist α im REM jedoch deutlich kleiner als in einem Lichtmikroskop. Im realen REM existieren noch zahlreiche weitere Einflüsse auf die Auflösung, da der Elektronenstrahl auf der Probe in einem möglichst kleinen Punkt fokussiert werden muss. Wichtige Faktoren hierbei sind die Einstellungen der Elektronenlinsen (Abbildungsmaßstab), als auch technische Gegebenheiten, wie die Art der Elektronenquelle (Brilliance) und Abbildungsfehler der Elektronenoptik.

1.1.2 Aufbau des REM

Der Aufbau eines REMs ist schematisch in Abb. 1.1 gezeigt. Wesentliche Komponenten sind:

Kathode Austrittspunkt der Elektronen, meist in Form einer Haarnadel-Glühkathode aus Wolfram, LaB_6 oder einer Feldemissionskathode (vergleiche Anhang A1)

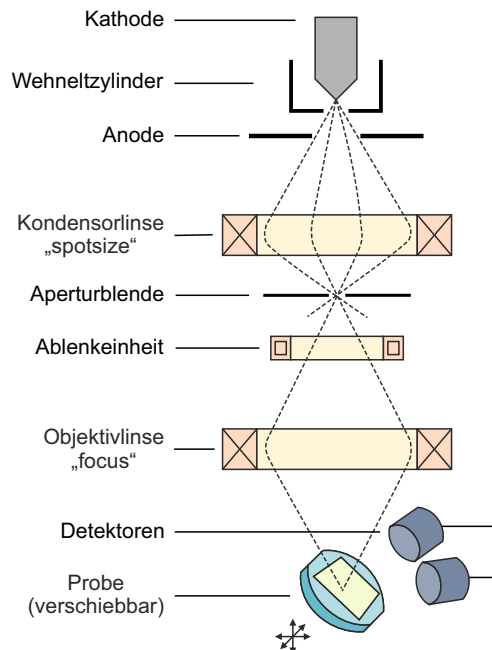


Abbildung 1.1: Schematischer Aufbau des REM (Strahlerzeugung bis Probe).

Wehneltzylinder Hilfselektrode zur Steuerung des Strahlstroms und Fokussierung des Elektronenstrahls, liegt auf variablen, negativem Potential ($\approx -100\text{ V}$)

Anode dient der Beschleunigung der emittierten Elektronen, liegt auf Erdpotential, weist aber gegenüber der Kathode eine Beschleunigungsspannung von ca. 1 bis 100 kV auf.

Elektronenoptik Manipulation des Elektronenstrahls mit elektromagnetischen Feldern (Elektronenlinsen) mit dem Ziel einen möglichst kleinen Fokuspunkt auf der Probe zu erhalten. Gewährleistet wird dies durch:

- Kondensorlinse (Brennweite f_1), Fokussierung des Strahls in die Aperturblende
- Aperturblende, Zwischenblende zur Reduzierung von sphärischen Linsenfehlern
- Objektivlinse (Brennweite f_2), Fokussierung des Strahls auf die Probe

Ablenkeinheit Rastern des Elektronenstrahls über die Probe

Probenhalter Positionieren und Auswählen des Probenausschnitts (x, y, z, tilt)

Detektoren Messung der Interaktionsprodukte zwischen Elektronenstrahl und Probe

1.1.3 Strahlfokus

Im REM wird der Elektronenstrahl mithilfe von Elektronenlinsen fokussiert (genauer siehe Anhang A2). Ziel ist dabei, den Punkt mit kleinstem Strahldurchmesser zwischen Anode und Kathode (Strahldurchmesser d_0) verkleinert auf der Probe abzubilden. Dies geschieht in zwei Stufen: der Strahl wird zunächst auf der Höhe der Aperturblende fokussiert (Strahldurchmesser d_1). Diese dient der Verbesserung der Strahlqualität (achsferne Strahlen werden abgeblendet), sorgt aber für einen erheblichen Intensitätsverlust. Nach dem Durchlaufen der Blende wird der Elektronenstrahl erneut fokussiert, Ziel ist nun diesen in einem möglichst kleinen Punkt (Strahldurchmesser d_2) auf der Probe abzubilden. Für eine zweistufige Abbildung gilt für den Durchmesser der Elektronensonde auf der Probe [reimer-pfefferkorn]:

$$d_2 = \frac{f_2}{L_2} d_1 = \frac{f_2}{L_2} \frac{f_1}{L_1} d_0 \quad (1.3)$$

Der ursprüngliche Durchmesser des Elektronenstrahls d_0 wird hierbei durch Linsen mit Brennweiten f_1 und f_2 und Abständen L_1 und L_2 auf d_2 verkleinert. Die Brennweiten sind dabei veränderbar, da das Magnetfeld dieser von dem elektronisch steuerbaren Stromfluss durch die Spulen abhängt. Im Gegensatz zum Lichtmikroskop erfolgt der Fokus nicht durch die Veränderung von Linsenabständen, sondern durch die Anpassung deren Brennweiten. Limitierend auf den minimalen Strahldurchmesser sind insbesondere Linsenabbildungsfehler, wie sphärische Abberation und Astigmatismus, aber auch chromatische Fehler (Verteilung der Elektronenenergien) und Beugung. In modernen REMs wird ein Strahldurchmesser auf der Probe von $d_2 \approx 1$ nm erreicht, indem Abbildungsfehler aufwendig kompensiert werden.

1.2 Wechselwirkung zwischen Elektronenstrahl und Probe

1.2.1 Streubirne

Das Auftreffen des Primärelektronenstrahls auf der Probe sorgt für zahlreiche Interaktionsprodukte, welche im REM zur Gewinnung von Informationen über die Probe genutzt werden können. Der Volumenanteil der Probe, der mit den Primärelektronen wechselwirkt, wird Streubirne genannt. Ihre Ausdehnung lässt sich zum Beispiel mit Monte-Carlo-Rechnungen simulieren (siehe Anhang A4) und hängt im Wesentlichen von der Energie der Primärelektronen (größer mit zunehmender Energie) und der Kernladungszahl Z des Materials (kleiner mit zunehmendem Z) ab.

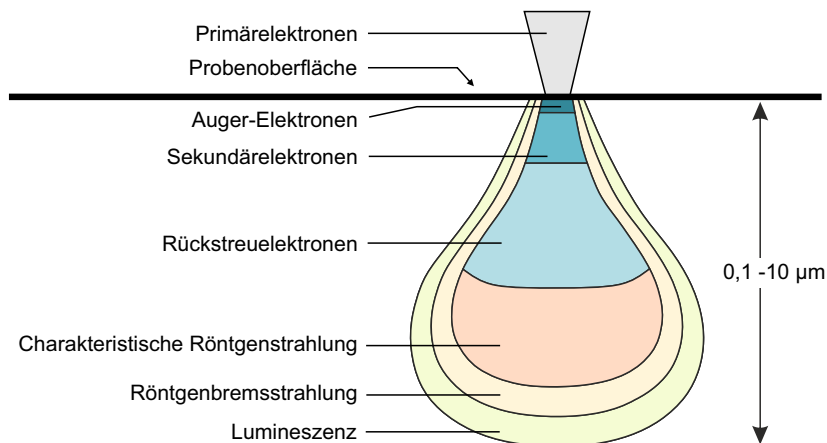


Abbildung 1.2: Schema der Interaktionsprodukte zwischen Elektronenstrahl und Probe (Streubirne). Die unterschiedlichen Bereiche markieren das Volumen aus denen die Interaktionsprodukte aus der Probenoberfläche austreten.

1.2.2 Gestreute Elektronen

Zunächst sollen die elektronischen Produkte betrachtet werden, die durch elastische und inelastische Streuung der einfallenden Primärelektronen in der Probe entstehen.

Rückstreuelektronen (RE): Bei den Rückstreuelektronen handelt es sich um Elektronen, welche in der Probenoberfläche näherungsweise rein elastisch gestreut wurden. Die Elektronen werden dabei im Coulombkraft der Atomkerne in der Probe abgelenkt (Rutherford-Streuung). Sie geraten auf Hyperbelbahnen und verlassen unter Umständen nach mehrfachen Streuungen die Probe wieder. Bei dieser Art der Streuung verlieren die Elektronen kaum Energie. Ihre Energien entsprechen daher etwa den Energien der Primärelektronen. Da die Kernladungszahl Z einen direkten Einfluss auf die Stärke der ablenkenden Coulombkraft hat, hängt die Energieverteilung der RE vom Probenmaterial ab. Hohe Kernladungszahlen sorgen dabei für eine starke Ablenkung der Elektronen, und dadurch für weniger Energieverlust in der Probe. Das Maximum der Energieverteilung der Rückstreuelektronen rückt daher mit steigender Kernladungszahl immer näher an die Primärenergie der Elektronen. Zusätzlich steigt mit steigender Ordnungszahl auch das Verhältnis zwischen einfallenden und zurückgestreuten Elektronen. Rückstreuelektronen treten nahezu aus der gesamten Eindringtiefe der Elektronensonde aus.

Sekundärelektronen (SE): Sekundärelektronen entstehen durch inelastische Streuung der Elektronen in der Probe. Es können dabei drei Möglichkeiten der inelastischen Streuung unterschieden werden [reimer98]:

- Energieverlust der Primärelektronen durch Schwingungsanregung im Fermigas von Metallen (plasmonische Verluste)
- Kollisionen zwischen Primär- und Valenzelektronen, wenn die transferierte Energie viel kleiner als die Ionisierungsenergie des Materials ist
- Ionisierung insbesondere innerer Energieniveaus, danach kann ein strahlungsloser Übergang eines Elektrons aus einem höheren Niveau unter Emission eines Auger-Elektrons (AE) erfolgen

Bei diesen Prozessen werden sowohl eher langsame ($E_{kin} < 50 \text{ eV}$) als auch schnelle SE erzeugt. Die schnellen SE können nicht von Rückstreuelektronen unterschieden werden und werden daher gemeinsam mit diesen detektiert. Die langsamen SE, meist mit Energien von 1 bis 15 eV, lassen sich von den RE trennen und einzeln detektieren (siehe Energiespektrum 1.3).

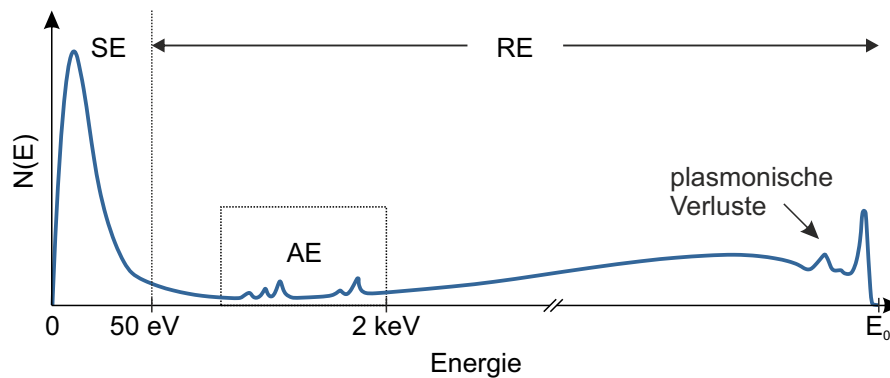


Abbildung 1.3: Anzahl der gestreuten Elektronen $N(E)$ bei einer Primärenergie E_0 . (nach [reimer98]).

Probenstrom: Ein gewisser Teil der Primärelektronen verlässt die Probe nicht mehr, da er durch Stöße in der Probe zu viel Energie verloren hat. Dies sorgt zunächst für elektrische Aufladung der durch den Strahl getroffenen Stelle. Da REM-Proben jedoch generell leitfähig sind, hat diese Ladung keinen Bestand, sondern fließt entlang des Potentialgefälles zu Erde ab. Es entsteht also ein Stromfluss, der sogenannte Probenstrom. Dessen Stärke ist sowohl vom Material, als auch von der Beschaffenheit der Probe abhängig.

1.2.3 Röntgenstrahlung

Bei Bestrahlung eines Körpers mit Elektronen entsteht zusätzlich zu den Produkten der Elektronenstreuung auch immer Röntgenstrahlung. Grundsätzlich entstehen die Röntgenphotonen auf zwei Arten:

Bremsstrahlung: Bremsstrahlung entsteht bei der Beschleunigung von Ladungen, genauer bei der negativen Beschleunigung der Elektronen durch die Coulombkraft in der Nähe eines Atomkerns. Dabei werden Photonen emittiert, deren Energien ein kontinuierliches Spektrum bilden. Die häufigsten Photonenenergien liegen im Röntgenbereich, mit Energien stets geringer als die der einfallenden Primärelektronen.

Charakteristische Strahlung: Charakteristische Röntgenstrahlung entsteht durch das Herausschlagen von Elektronen aus tiefen Schalen der Probenatome. Nach dieser Stoßionisation kommt es zum Zurückfallen von Elektronen aus höheren Schalen in die entstandene Lücke unter Emission eines Röntgenphotons. Da die Energieabstände der Schalen materialabhängig, aber je nach Material konstant sind, lässt sich diese Röntgenstrahlung zur Identifikation des mit Elektronen bestrahlten Materials heranziehen. Wichtig ist hierbei, dass die Energie der einfallenden Elektronen die Ionisierungsenergie des Probenmaterials überschreiten muss. Die Entstehung von charakteristischer Röntgenstrahlung ist umso wahrscheinlicher, je höher die Kernladungszahl des Probenmaterials ist, wohingegen der dazu konkurrierende Auger-Effekt für leichte Elemente wahrscheinlicher ist.

1.3 Bilderzeugung im REM

Die Grundlage der Bilderzeugung im REM ist das Rastern, also die Bewegung der Elektronensonde in kleinen, definierten Schritten über die Probe. Bei jedem dieser Schritte werden die Interaktionsprodukte zwischen Strahl und Probe (vergleiche Abs. 1.2) detektiert und aus der detektierten Intensität ein Grauwert für den resultierenden Bildpunkt errechnet.

1.3.1 Bilderzeugung durch Sekundärelektronen

Die selektive Detektion der Sekundärelektronen wird durch deren geringen kinetischer Energie ermöglicht. Dabei wird ausgenutzt, dass langsamerer Elektronen stärker durch elektrische Felder abgelenkt werden. Beim Szintillator-Photomultiplier-Detektor (auch Everhardt-Thornley-Detektor, siehe Anhang A3.1) wird diese Ablenkung durch einen Kollektor mit gegenüber der Probe positivem Potential realisiert. Dieses Potential wird so gewählt, dass nur die Sekundärelektronen, nicht aber die Rückstreuelektronen angesaugt und nachfolgend detektiert werden. Da die detektierten langsamen Sekundärelektronen nur aus einer sehr geringen Eindringtiefe austreten und die detektierte Intensität stark vom Einfallswinkel auf der Probenoberfläche abhängt, zeigen die so erzeugten Bilder einen deutlichen Topographiekontrast.

1.3.2 Rückstreuelektronen

Zusätzlich zu den Sekundärelektronen lassen sich auch mithilfe der Rückstreuelektronen im REM Bilder erzeugen. Detektiert werden diese häufig über Halbleiterdetektoren, welche kreisförmig um den Primärstrahl angeordnet sind. In vielen REMs lassen sich einzelne Kreissegmente separat auslesen (RE1...RE4). Diese Detektoren messen nicht nur Rückstreuelektronen, sondern alle Elektronen die sie erreichen, zum Beispiel auch energiereiche Sekundärelektronen. Da die RE die Probe auch aus größeren Eindringtiefen verlassen und ihre Streuung vom Probenmaterial abhängt, bieten diese vor allem einen Materialkontrast.

1.3.3 Probenstrom

Auch der Probenstrom lässt sich zur Bilderzeugung nutzen. Beim Abrastern wird hier für jeden Bildpunkt der Probenstrom gemessen und ein Bild generiert. Nützlich sind Probenstrombilder, da sich ein vom elektrischen Widerstand des Materials abhängiger Kontrast zeigt. So lassen sich zum Beispiel verschiedene Dotierungen eines Halbleiters im REM-Bild unterscheiden.

1.3.4 Verarbeitung der Bilder, Line- und Frame-Averaging

An jedem Rasterpunkt verweilt der Elektronenstrahl eine gewisse Zeit („Oversampling“) während die Detektorsignale aufgezeichnet werden. Ist das so erzielte Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) noch nicht ausreichend, kann zusätzlich Zeile für Zeile („Line-Averaging“, n Aufnahmen von Zeile 1, danach n Aufnahmen von Zeile 2...) oder Bild für Bild („Frame-Averaging“, n Aufnahmen des gesamten Bildes) gemittelt werden. Da das Rauschen zeitlich variiert, die Beschaffenheit der Probe jedoch konstant ist, entsteht so ein Bild mit weniger Rauschen als die Ausgangsbilder. Nachteil dieser Methoden ist, dass die Aufnahmezeit mit der Zahl der Einzelmessungen ansteigt, was wiederum die Wahrscheinlichkeit externer Störungen (zum Beispiel durch Vibrationen) erhöht.

1.4 Weitere Analysemöglichkeiten

1.4.1 Röntgenanalyse (EDX)

Bei den ausgesandten Röntgenphotonen handelt es sich um Bremsstrahlung und charakteristische Röntgenstrahlung. Gemeinsam bilden diese Strahlungsarten ein Röntgenspektrum des Probenmaterials. Dieses kann durch eine energiedispersive Röntgenanalyse (EDX) an einem ausgewählten Punkt der Probenoberfläche erhalten werden. Hierzu kommt eine PIN-Diode als Detektor (siehe Anhang A3.3) in Kombination mit einem Vielkanalanalysator (engl. multi channel analyzer, MCA) zum Einsatz.

1.4.2 Rückstreuelektronenmuster (ECP)

Beim Bestrahlen der Oberfläche eines glatten Einkristalls mit einem annähernd parallelen Elektronenstrahl (d.h. Fokus weit hinter der Probenoberfläche) erhält man im REM ein sogenanntes Rückstreuelektronenmuster (engl. electron channeling pattern, ECP). In diesem Modus erhält man keine Ortsauflösung. Stattdessen wird der Einfallswinkel des parallelen Elektronenstrahls durch die Ablenkeinheit verändert. Die Struktur in diesem Diagramm entsteht durch die Orientierungsanisotropie des Einkristalls und hängt daher von der Kristallstruktur ab. Es ist somit möglich, mithilfe des REM Kristallstrukturen zu analysieren und Rückschlüsse auf die Orientierung zu ziehen.

2 Experimentelle Details und Aufbau

2.1 Versuchsaufbau

Zum Versuchsaufbau zur Rasterelektronenmikroskopie gehören:

- das Mikroskop selbst (Cambridge Stereoscan 120)
- Vakuumpumpen (ölfreie Scrollpumpe und Turbomolekularpumpe) zur Aufrechterhaltung des Vakuums im REM
- ein PC zum Empfang von Daten und zur Bilderzeugung
- diverse Proben auf Probenträgern und ein Probenhalter
- Hochvakuum-Metallverdampfer zur Probenpräparation

Generell sollte während des Betriebs im REM ein Vakuum von ca. $2 \cdot 10^{-6}$ bis $2 \cdot 10^{-5}$ mbar vorhanden sein (siehe Steuergerät der Turbomolekularpumpe). Das Vakuum ist notwendig, damit der Elektronenstrahl nicht mit Restgasatomen interagiert.

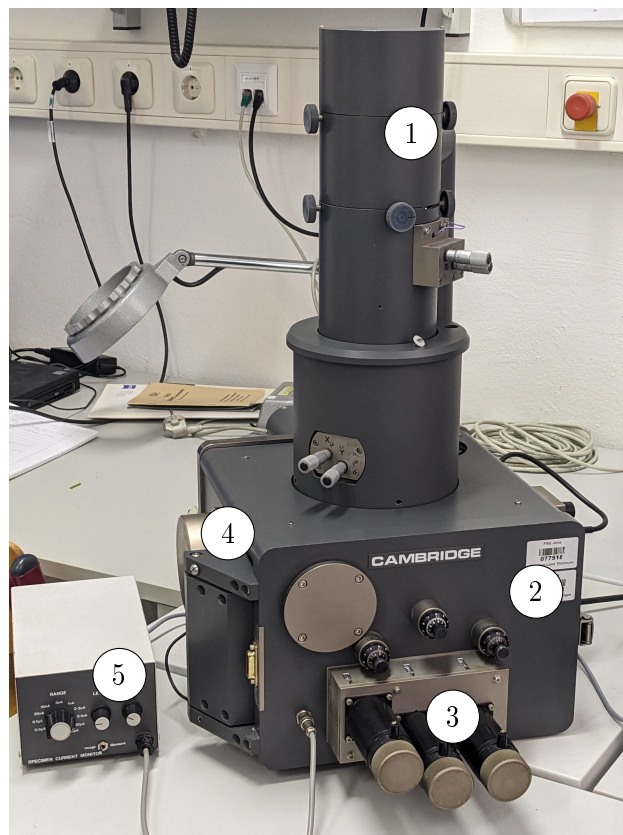


Abbildung 2.1: Foto des Cambridge Stereoscan 120 Elektronenmikroskops mit Beschriftung.

In Abb. 2.1 sind folgende Bestandteile erkennbar:

1. Säule zur Strahlerzeugung und -formung
2. Tür des Probenraums
3. Drehregler zur Einstellung der Probenposition, Rotation und Verkippung
4. Abdeckung des Fensters zum Probenraum mit Interlock-Sicherung
5. Strom-Spannungs-Wandler zur Strahlstrommessung

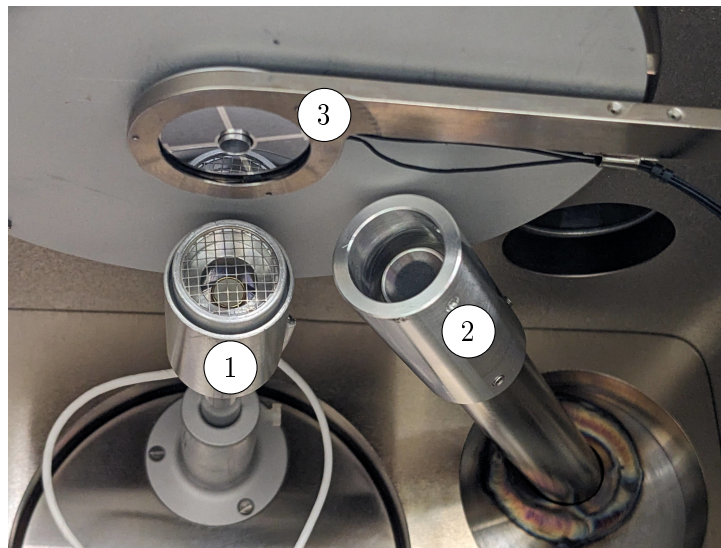


Abbildung 2.2: Foto der Detektorenanordnung im hier genutzten REM

Detektoren:

1. Sekundärelektronendetektor (Szintillator-Photomultiplier-Detektor)
2. PIN-Diode (Röntgendetektor) mit umgebender Schutzhülle aus Nickel
3. Halbleiter-Rückstreuelektronendetektor (segmentiert)

Zu Beginn des Versuches ist der in Abbildung 2.3 abgebildete Probenhalter im REM montiert und das Vakuum bereits hergestellt. Auf den einzelnen Probenträgern finden sich folgende Proben:

- Träger 1: Proben zum Auflösungsstest – Aufgedampftes Metall (kleine Kügelchen), Mikrochip, optischer Datenträger
- Träger 2 (kleiner Träger): Glühwendeln
- Träger 3: Proben für die Elektronenbeugung – Si(111), Si(100) und 6H-SiC(0001)

- Träger 4: Proben für Röntgenspektroskopie – Verschiedene Metallobjekte, am Ende abgeflachter Draht als Referenzprobe aus Edelstahl

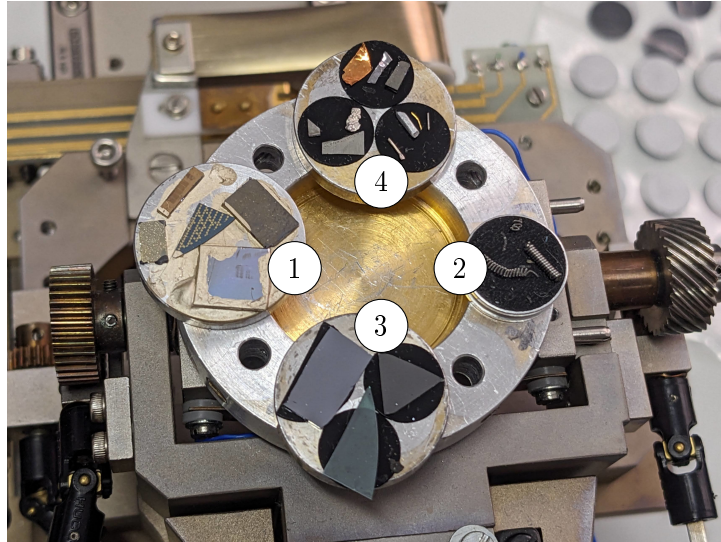


Abbildung 2.3: Foto des Probenhalters zu Versuchsbeginn mit beschrifteten Proben

3 Aufgaben

1. Kennenlernen des REM

- (a) Vertraut machen mit der Bedienung des REM per Software
- (b) Optimierung der Bildparameter und Betrachten einer Probe bei verschiedenen Vergrößerungen
- (c) Bewegung und Auswahl der Proben
- (d) Einstellung der Aufnahmeparameter und Speicherung von Bildern

2. Ermitteln der maximalen Auflösung

Nutzen Sie eine geeignete Probe und optimieren Sie die Einstellungen und Probenposition so, dass die maximale Auflösung des REM erreicht wird. Nehmen Sie dann ein Bild auf und ermitteln Sie aus diesem die erreichte Auflösung.

3. Vergleich der Detektoren

Vergleichen Sie verschiedene Detektoren und gehen Sie dabei insbesondere auf folgende Punkte ein:

- (a) Auflösung
- (b) Kontrast
- (c) Materialabhängigkeit
- (d) Topografie
- (e) Aufladungseffekte

4. Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX)

- (a) Führen Sie eine Energiekalibrierung durch die Aufnahme von Röntgenspektren bekannter Proben durch.
- (b) Bestimmen Sie die Elementzusammensetzung von unbekanntem Proben.
- (c) Untersuchen und diskutieren Sie die Ergebnisse hinsichtlich der lateralen Auflösung.
- (d) Zusatz: Bestimmen Sie die stöchiometrische Zusammensetzung.

5. Rückstreuelektronenmuster (ECP)

Messen Sie die Rückstreuelektronenmuster (ECP) von Einkristallen bei sehr geringer Vergrößerung. Versuchen Sie eine Interpretation hinsichtlich der Kristallstruktur und -orientierung.

6. Probenstrom

- (a) Messen Sie an einer geeigneten Probe den Strahlstrom (Faraday-Becher).

(b) Erstellen Sie ein Bild der Stromverteilung einer Probe.

(c) Zusatz: Ermitteln Sie den Impuls des Primärstrahls.

7. Herstellung eigener Proben (Optional)

Stellen Sie durch Bedampfung eine eigene Probe her. Bedenken Sie dabei die Kriterien für REM-Proben. Möglich wären hier sowohl biologische (Pollen, Insekten,...) als auch technische Proben (Datenträger, Mikrochip,...).

4 Durchführung und Auswertung

4.1 Bedienung des REM

4.1.1 Fokus und Bildoptimierung

Fokus und Bildparameter werden über das Programm „SEM Panel“ eingestellt. Folgende Einstellungen werden für die Aufnahme scharfer, kontrastreicher Bilder benötigt:

Focus Coarse: Fokuseinstellung, steuert den Stromfluss zur Objektivlinse und muss für scharfe Bilder optimal gewählt werden. Um das Fokussieren zu erleichtern, kann in der Software zur Bildaufnahme eine sogenannte „Region of Interest“ (ROI) gewählt werden. Der kleinere Rasterbereich ermöglicht eine höhere Bildwiederholrate und damit ein schnelleres Scharfstellen. Die darunter befindliche Feineinstellung hat bei dem hier eingesetzten REM keine Funktion.

Brightness und Contrast: Legen Helligkeit (Brightness) und Kontrast (Contrast) des Bildes fest. Erhält man in der Vorschau ein rein schwarzes, rein weißes oder sehr verwaschenes Bild, sollten diese Werte angepasst werden. Ziel ist ein kontrastreiches Bild welches weder über, noch unterbelichtet ist. Bei der Aufnahme von RE-Bildern übernehmen die Einstellungen „Offset“ und „Gain“ im Fenster „Signal Monitor“ die Funktion dieser Regler.

Spotsize: Steuert den Fokus des Elektronenstrahls auf Höhe der Zwischenblende (über den Stromfluss zur Kondensorlinse). Die Spotsize entscheidet, wie viele Elektronen die Zwischenblende passieren und auf der Probe auftreffen. Zusätzlich hat die Spotsize Einfluss auf den Abbildungsmaßstab (vergleiche Gleichung 1.3). Liegt der Zwischenfokus genau auf der Höhe der Blende, erhält man die höchste Intensität der messbaren Streuprodukte, aber eine nicht optimale Auflösung, da die Geschwindigkeits- und Richtungsverteilung der Primärelektronen breiter gestreut ist. Wird dieser Fokuspunkt durch die Spotsize-Einstellung Richtung Anode verschoben, passieren weniger Elektronen die Blende. Es werden achsferne Elektronen zurückgehalten, womit die Auflösung auf Kosten der Intensität steigt.

4.1.2 Positionierung und Auswahl von Proben

Im hier genutzten REM lassen sich die Proben im Vakuum über mehrere Drehknäufe positionieren. Zunächst lässt sich der Probenhalter rotieren („Rotation“) und neigen („Tilt“). Nachdem durch die Rotation des Halters der richtige Probenträger ausgewählt wurde, lässt sich die Position der Probe durch die X-, Y- und Z-Einstellungen in allen Raumrichtungen fein steuern. Die gewünschte Probe sollte primär durch Rotation des

Probenhalters ausgewählt werden, die X- und Y-Einstellungen dienen dann der Feineinstellung.

Die Proben sollten beim Bewegen im Probenraum auf keinen Fall an die Detektoren stoßen. Um das zu gewährleisten, darf die Z-Einstellung bei flachen Proben 155 nicht überschreiten. Im Zweifelsfall kann die Probe während dem Positionieren oder Neigen durch das seitliche Fenster des REMs beobachtet werden.

4.1.3 Aufnahme von Bildern

Die Bildaufnahme wird in diesem Versuch durch die Software „Digital Image Scanning System 5“ gewährleistet. Diese zeigt nach Inbetriebnahme des REM ein Live-Bild der Probe an und ermöglicht es, Bilder mit verschiedenen Detektoren aufzunehmen und abzuspeichern. Die wichtigsten Einstellmöglichkeiten bei der Bildaufnahme sind die Auflösung des abgespeicherten Bildes, Oversampling, Line Averaging und Frame Averaging. Oversampling regelt dabei, wie oft (bzw. wie lange) an einem Rasterpunkt gemessen wird, Line und Frame Averaging betreffen die Wiederholung der Aufnahme von einzelnen Zeilen (Lines) oder ganzen Bildern (Frames) unter Bildung des Durchschnittes (vergleiche Abschnitt 1.3.4).

4.1.4 Röntgenspektroskopie

Vor der Nutzung der PIN-Diode zur Röntgenspektroskopie muss diese gesondert eingeschaltet und rund 10 Minuten gewartet werden, bis die Diode ihre Betriebstemperatur erreicht hat.

Zur Röntgenspektroskopie sollte zunächst die Probe so positioniert werden, dass möglichst viel Röntgenstrahlung auf dem Detektor auftrifft. Dazu sollte die Probe rund 30° in Richtung des Röntgendetektor geneigt werden. Da Röntgen- und SE-Detektor direkt nebeneinander angeordnet sind, erscheinen Stellen, welche besonders viel Röntgenstrahlung aussenden, häufig auch im SE-Bild sehr hell. Nachdem ein SE-Bild aufgenommen wurde, lässt sich mit der Option „Beam“ der Elektronenstrahl fest positionieren und die Software zur Aufnahme der Röntgenspektren („MCA-3“) geöffnet werden. Um eine nach Photonenenergie eingeteilte x-Achse zu erhalten, ist eine Kalibrierung notwendig. Aus dem Spektrum eines bekannten Materials lässt sich durch Regression ein Zusammenhang zwischen den auf der x-Achse aufgetragenen Werten und Energiebeträgen ermitteln. Nach Kalibrierung mit einer Probe bekannter Zusammensetzung lassen sich die Energien von Peaks unbekannter Proben ermitteln und mithilfe von Vergleichstabellen (siehe Anhang) die chemische Zusammensetzung analysieren. Die Positionen dieser Peakmaxima lassen sich

direkt in der Software ermitteln. Dazu wird ein Fenster mit der linken Maustaste definiert. Mittels „Gaussian-Fit“ erhält man die gewünschten Werte mit Subpixel-Genauigkeit.

4.2 Ermitteln der Auflösung aus einem Bild

Zur Auflösungsermittlung wird meistens Probenhalter 1 genutzt (siehe 2.1), dort befindet sich eine Probe mit sehr kleinen, aufgedampften Metallkügelchen. Ziel ist nun, zwei Kügelchen zu finden, welche sich gerade so noch unterscheiden lassen, und deren Abstand zu ermitteln. Zur Abstandsermittlung kann mit der Software „DIPS“ der lineare Helligkeitsverlauf entlang des Bildes ermittelt und zur Verarbeitung in Origin exportiert werden. Nach Umskalierung der Abszissenachse von Pixeln zu Metern lässt sich nun der Abstand dieser Kugeln messen, und damit die in diesem Beispiel erreichte Auflösung.

4.3 Messung des Proben- bzw. Strahlstroms

Der Probenstrom ist ein Teil des Strahlstroms, welcher über die Probe zur Masse abfließt. Zur Messung des Probenstroms kommt ein Strom-Spannungs-Wandler zum Einsatz. Der Strom ergibt sich nach:

$$I = 2,57 \text{ V}^{-1} \cdot \text{Range} \cdot U \quad (4.1)$$

mit der am Multimeter angezeigten Spannung U und dem eingestellten max. Strombereich „Range“ (z.B. 0,1 nA). Zur Messung des Strahlstroms wird ein Faraday-Becher verwendet, welcher aufgrund seiner Geometrie, das Entweichen von Sekundärelektronen verhindert.

4.4 Probenpräparation

4.4.1 Auswahl von geeigneten Proben

Geeignete REM-Proben müssen folgende Bedingungen erfüllen:

- Vakuumfest, d. h. die Probe muss fest sein, sie darf kaum Wasser oder andere Flüssigkeiten und auf keinen Fall Gaseinschlüsse enthalten.
- Leitfähige Oberfläche, bei nichtmetallischen Proben meist durch eine vorherige Bedampfung mit Metall (hier Gold oder Silber) gewährleistet.

Bei der Auswahl eigener Proben ist vor allem der erste Punkt zu beachten, werden biologische Proben genutzt, müssen diese vorher getrocknet werden, da das enthaltene Wasser durch den Druckabfall sieden und die Probe zerstören würde.

4.4.2 Vorbereitung für die Elektronenmikroskopie

Zunächst werden die gewünschten Proben auf dem Probenträger aufgebracht, dessen Oberfläche leitfähig und selbstklebend (Kohlenstoff-Klebe-pad), die Präparate können daher wie gewünscht angeordnet und aufgeklebt werden. Nachfolgend werden diese durch Bedampfung mit Gold beschichtet. Zum Einschleusen der neuen Probe ins REM wenden Sie sich an den Versuchsbetreuer.

Die Probenträger, -halter, Proben und interne Teile des REM sollten nicht mit bloßen Händen berührt werden. Zum Tauschen von Proben reicht normalerweise eine Pinzette aus, zusätzlich liegen im Experimentierraum auch Handschuhe aus.

5 Fragen zur Vorbereitung

Fragen und Aufgaben zur Vorbereitung auf den Versuch:

1. Wie ist ein REM aufgebaut? Benennen Sie wichtige Teile und deren Funktion?
2. Wo liegt der Unterschied zwischen einem REM und einem TEM?
3. Nennen Sie jeweils Vor- und Nachteile von REM, TEM und einem Lichtmikroskop. Was sind jeweils die Anwendungsgebiete?
4. Welche physikalischen und technischen Zusammenhänge limitieren die Auflösung eines REMs?
5. Welche Auflösungen können erreicht werden?
6. Welche Abbildungsfehler gibt es bei Elektronenmikroskopen und was sind deren Ursachen?
7. Welche Wechselwirkungsprodukte entstehen beim Beschuss einer Festkörperoberfläche durch einen Elektronenstrahl?
8. Wie unterscheiden sich die Kontraste und die erreichbaren Auflösungen bei der Bildgebung durch SE und RE?
9. Wie werden die SE im REM detektiert? Erklären Sie Aufbau und Funktion des Detektors!
10. Wie kann die Messung der RE im REM erfolgen? Erklären Sie Aufbau und Funktion des Detektors!
11. Worauf muss bei der Probenvorbereitung geachtet werden?
12. Warum ist es unter Umständen notwendig die Probenoberfläche leitfähig zu machen? Welche Möglichkeiten werden hierfür genutzt?
13. Welche zwei grundlegenden Techniken werden zur Aufnahme von Röntgenspektren am REM eingesetzt? Erklären Sie deren Funktion, Vorteile und Grenzen!
14. Wie funktioniert ein Multikanalanalysator (engl. multichannel analyser, MCA)
15. Welche Verteilungsfunktion nutzt man zur Beschreibung von Röntgenspektren (Teilchenstrahlung mit seltenen Ereignissen) und was bedeuten deren Parameter?.
16. Welches Bezeichnungsschema nutzt man für Röntgenübergänge?
17. Mit welchem Verfahren lassen sich am REM Aussagen über die Struktur kristalliner Materialien gewinnen? Wie kann man den Kontrast im Bild physikalisch deuten?

Anhang

A1 Erzeugung freier Elektronen

Bei der Erzeugung von freien Elektronen im REM werden ein möglichst hoher Richtstrahlwert (Strahlstromdichte pro Raumwinkel), ein möglichst kleiner Bereich des Elektronenaustritts und eine schmale Geschwindigkeitsverteilung der Elektronen angestrebt.

Im hier genutzten REM wird der Elektronenstrahl per Glühemission erzeugt. Diese beruht auf der Emission von Elektronen aus Festkörpern bei ausreichend hohen Temperaturen. Hierbei erreichen einige Elektronen im Festkörper eine Energie (siehe Fermi-Dirac-Verteilung), die größer als die Austrittsarbeit des entsprechenden Materials ist. Diese Elektronen können den Festkörper dann verlassen. Glühemissionskathoden bestehen aus Wolfram und haben typischerweise Haarnadelgeometrie (siehe Abb. A1.1 a)), womit eine Punktquelle sichergestellt wird. Die thermische Emission hat den Nachteil, dass die austretenden Elektronen eine vergleichsweise breite Geschwindigkeitsverteilung haben.

Alternativ dazu liefern Feldemissionskathoden (siehe Abb. A1.1 c)) einen erheblich besseren Strahlrichtwert. Der Bereich der Elektronenemission ist hier besonders klein, womit dieser Quellentyp einer Punktquelle am nächsten kommt. Nachteilig sind die hohen technischen Anforderungen, wie beispielsweise ein Ultrahochvakuum im Quellenbereich.

Kathoden aus Lanthan-Hexaborid (LaB_6) können als Zwischenschritt zwischen den oben genannten angesehen werden (siehe Abb. A1.1 b)). Aufgrund der viel kleineren Austrittsarbeit kann die Elektronenemission bereits bei moderaten Temperaturen erfolgen. Die Abbildungsqualität liegt demnach zwischen der Haarnadel- und Feldemissionskathode.

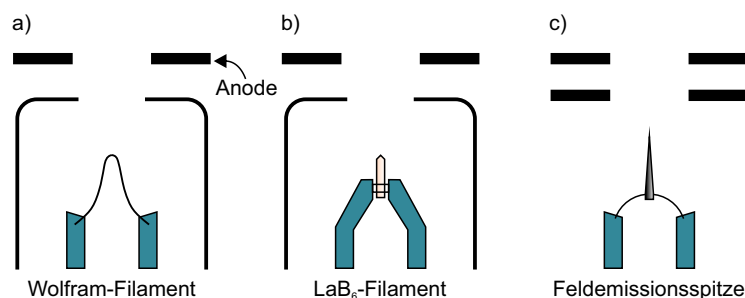


Abbildung A1.1: Schematische Darstellung von a) Haarnadel-Kathode mit Wolfram-Filament, b) LaB_6 -Kathode und c) Feldemissionskathode. Ein Wehneltzylinder kommt in den Varianten a) und b) zum Einsatz, wohingegen bei c) eine zusätzliche Anode zur Extraktion der Elektronen verwendet wird.

A2 Funktionsweise und Aufbau elektromagnetischer Linsen

In modernen REMs werden nahezu ausschließlich magnetfeldbasierte Elektronenlinsen verwendet. Bei diesen handelt es sich grundsätzlich um eine Spule, welche so von Eisen umgeben ist, dass nur ein kleiner Spalt bleibt, welcher im Allgemeinen mit einem nicht ferromagnetischen Material (z. B. Kupfer) gefüllt wird. So konzentriert sich der magnetische Fluss auf diesen Spalt, und es entsteht ein glockenförmiger Verlauf der magnetischen Flussdichte. Dieser kann beschrieben werden durch:

$$B = \frac{B_0}{1 + \left(\frac{x}{a}\right)^2} \quad (2.1)$$

Dabei bewegen sich die Elektronen entlang der x-Achse, die magnetische Flussdichte hat den maximalen Wert B_0 , und a beschreibt die Halbwertsbreite des Feldes. Da die Elektronen sich durch dieses Feld bewegen, lenkt die Lorentzkraft $\vec{F} = -e(\vec{v} \times \vec{B})$ sie auf schraubenförmige Bahnen, welche sich in einem Fokuspunkt treffen. Die Brennweite dieser Linsen hängt dabei von der Stärke des durch die Spule erzeugten Magnetfeldes ab und ist somit durch den Stromfluss durch die Spule steuerbar. Dies sorgt dafür, dass im REM keine beweglichen Teile benötigt werden, um den Fokus herzustellen.

A3 Detektion der Streuprodukte

A3.1 Szintillator-Photomultiplier-Detektor (Detektion der Sekundärelektronen)

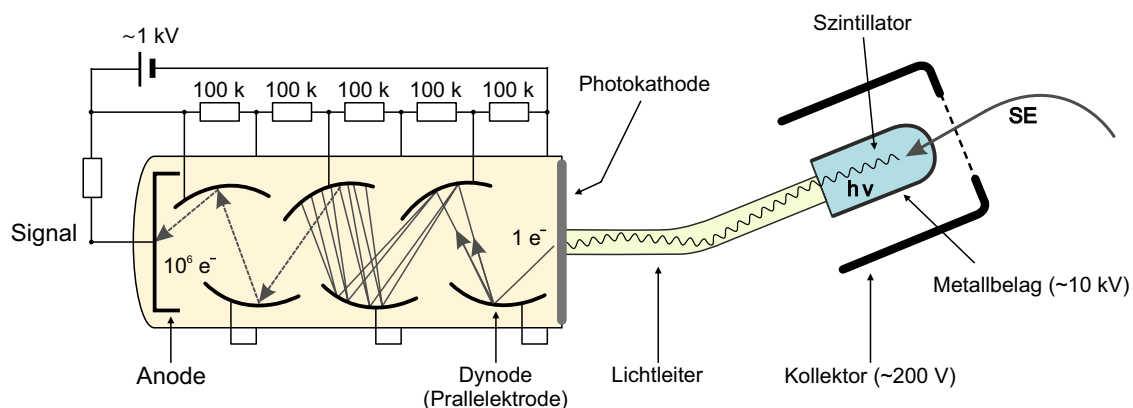


Abbildung A3.1: Schematischer Aufbau des Szintillator-Photomultiplier-Detektors.

Sekundärelektronen werden in diesem REM mithilfe eines Szintillator-Photomultiplier-Detektors (auch Everhardt-Thornley-Detektor) detektiert. Vor diesem befindet sich ein

Kollektor, welcher gegenüber der Probe ein positives Potential von ca. 200 V aufweist. Der Detektor ist seitlich zur Strahlführung angebracht, was in Kombination mit dem Kollektor dafür sorgt, dass ihn nahezu ausschließlich Sekundärelektronen mit kleineren Energien erreichen. Die schnellen Rückstreuelektronen passieren den Detektor, ohne angesaugt zu werden. Zwischen Kollektor und Szintillator werden die Elektronen beschleunigt ($U_B \approx 10 \text{ kV}$). Beim Auftreffen auf den Szintillator erzeugen diese durch Kathodolumineszenz dann Lichtblitze, welche über einen Lichtleiter zum Photomultiplier geführt werden. In diesem werden zunächst aufgrund des äußeren Photoeffektes wieder freie Elektronen erzeugt. Im Folgenden werden diese zwischen mehreren Elektroden (Dynoden) durch die Multiplierspannung beschleunigt. Es kommt dabei jeweils beim Auftreffen von Elektronen auf die Dynoden zu Stoßionisation, folglich nimmt die Zahl der Elektronen mit jeder Dynode zu. Auf diese Weise entsteht ein mehrfach verstärktes Signal, welches danach gemessen und verarbeitet werden kann. Typischerweise erreicht der Photomultiplier einen Verstärkungsfaktor von rund 10^6 .

A3.2 Halbleiterdetektoren (Detektion der Rückstreuelektronen)

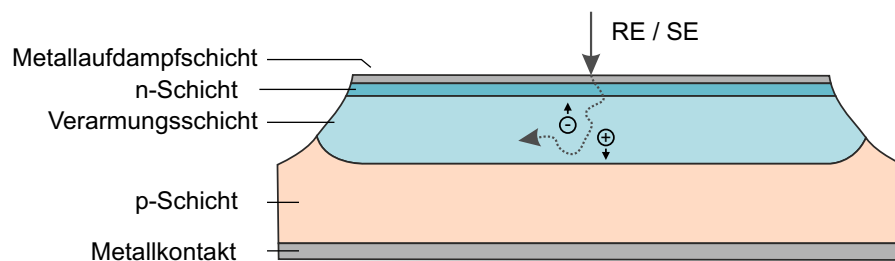


Abbildung A3.2: Schematischer Aufbau eines Halbleiterdetektors.

Da die Rückstreuelektronen nur schwer abzulenken sind, sind die RE-Detektoren kreisförmig um den Primärstrahl angeordnet. Sie detektieren daher die RE, welche senkrecht oder unter einem kleinen Winkel die Probenoberfläche verlassen. Zusätzlich handelt es sich um vier einzeln ansteuerbare Detektorsegmente, was eine richtungsabhängige Detektion der RE ermöglicht. Bei den genutzten Detektoren handelt es sich um PN-Halbleiterdioden. Durch Anlegen einer Spannung in Sperrrichtung vergrößert sich am PN-Übergang die Verarmungszone. Trifft nun ein Rückstreuelektron auf diese, erzeugt es entlang seiner Bahn mehrere tausend Elektron-Loch-Paare. Aufgrund des intrinsischen elektrischen Feldes in der Verarmungszone, werden die Elektron-Loch-Paare getrennt und lassen sich in Form eines Strompulses messen.

A3.3 PIN-Diode (energiedispersive Detektion von Röntgenstrahlung)

Prinzipiell wird zur Detektion der Röntgenstrahlung im REM eine Photodiode genutzt. Genauer handelt es sich um eine Silizium-PIN-Diode. Diese befindet sich ähnlich wie der SE-Detektor seitlich in der Nähe der Probe. Die Diode befindet sich hinter einem röntgentransparenten Beryllium-Fenster unter Stickstoffatmosphäre und wird bei ca. -25°C betrieben, um die Eigenleitung in der Verarmungszone der Diode zu minimieren. Analog zum RE-Detektor wird zur Vergrößerung dieser Verarmungszone eine Spannung angelegt. Durch die zusätzliche, undotierte (intrinsische) Si-Schicht zwischen P und N ist diese ohnehin deutlich ausgedehnter als in einer PN-Diode, teils sogar bis über die komplette Diode, sodass Rekombinations-Effekte unwahrscheinlich sind. Trifft nun ein Röntgenphoton auf die Diode, entsteht durch den Photoeffekt zunächst ein Photoelektron, dessen Energie proportional zur Energie des Photons ist. Anschließend gibt dieses seine gesamte kinetische Energie durch inelastische Stöße in der Verarmungszone ab. Dabei entsteht eine bestimmte Zahl von Elektron-Loch-Paaren, welche ebenfalls von der Energie der einfallenden Strahlung abhängt. Die Höhe des an der Diode messbaren Strompulses ist also ein Maß für die Energie des eingestrahnten Röntgenphotons. Werden diese Strompulse dann über eine gewisse Zeit gesammelt, können ihre Höhen gruppiert, die Pulse jeder Gruppe gezählt und ein Röntgenspektrum erzeugt werden.

A4 Simulation der Elektronenstreuung - CASINO

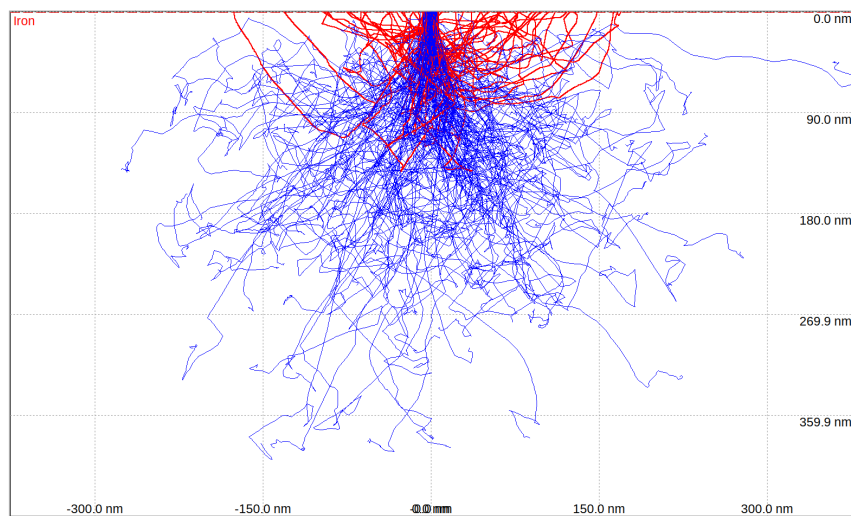


Abbildung A4.1: CASINO-Simulation des Eindringens eines 10 keV-Elektronenstrahls in Eisen.

Mithilfe der Software CASINO 2 lässt sich das Auftreffen eines Elektronenstrahls mit bestimmter Energie auf ein vordefiniertes Material simulieren. Hierbei werden die Bahnen einzelner Elektronen durch mehrere einprogrammierte physikalische Modelle berechnet. Es handelt es sich um eine stochastische Monte-Carlo-Simulation, die durch die Simulation sehr vieler Einzelelektronen Abschätzungen über die Streuung der Elektronen zulässt. Es lassen sich zum Beispiel Rückschlüsse auf die durchschnittliche Austrittstiefe von Rückstreuelektronen treffen. CASINO 2 ist erhältlich über <https://casino.espaceweb.usherbrooke.ca/>, Version 2 ist deutlich einfacher zu nutzen und daher die empfohlene Variante.

X-Ray Data Booklet Table 1-2. Photon energies, in electron volts, of principal K-, L-, and M-shell emission lines.

Element	K α_1	K α_2	K β_1	L α_1	L α_2	L β_1	L β_2	L γ_1	M α_1
3 Li	54.3								
4 Be	108.5								
5 B	183.3								
6 C	277								
7 N	392.4								
8 O	524.9								
9 F	676.8								
10 Ne	848.6	848.6							
11 Na	1,040.98	1,040.98	1,071.1						
12 Mg	1,253.60	1,253.60	1,302.2						
13 Al	1,486.70	1,486.27	1,557.45						
14 Si	1,739.98	1,739.38	1,835.94						
15 P	2,013.7	2,012.7	2,139.1						
16 S	2,307.84	2,306.64	2,464.04						
17 Cl	2,622.39	2,620.78	2,815.6						
18 Ar	2,957.70	2,955.63	3,190.5						
19 K	3,313.8	3,311.1	3,589.6						
20 Ca	3,691.68	3,688.09	4,012.7	341.3	341.3	344.9			
21 Sc	4,090.6	4,086.1	4,460.5	395.4	395.4	399.6			

Table 1-2. Energies of x-ray emission lines (continued).

Element	K α_1	K α_2	K β_1	L α_1	L α_2	L β_1	L β_2	L γ_1	M α_1
22 Ti	4,510.84	4,504.86	4,931.81	452.2	452.2	458.4			
23 V	4,952.20	4,944.64	5,427.29	511.3	511.3	519.2			
24 Cr	5,414.72	5,405.509	5,946.71	572.8	572.8	582.8			
25 Mn	5,898.75	5,887.65	6,490.45	637.4	637.4	648.8			
26 Fe	6,403.84	6,390.84	7,057.98	705.0	705.0	718.5			
27 Co	6,930.32	6,915.30	7,649.43	776.2	776.2	791.4			
28 Ni	7,478.15	7,460.89	8,264.66	851.5	851.5	868.8			
29 Cu	8,047.78	8,027.83	8,905.29	929.7	929.7	949.8			
30 Zn	8,638.86	8,615.78	9,572.0	1,011.7	1,011.7	1,034.7			
31 Ga	9,251.74	9,224.82	10,264.2	1,097.92	1,097.92	1,124.8			
32 Ge	9,886.42	9,855.32	10,982.1	1,188.00	1,188.00	1,218.5			
33 As	10,543.72	10,507.99	11,726.2	1,282.0	1,282.0	1,317.0			
34 Se	11,222.4	11,181.4	12,495.9	1,379.10	1,379.10	1,419.23			
35 Br	11,924.2	11,877.6	13,291.4	1,480.43	1,480.43	1,525.90			
36 Kr	12,649	12,598	14,112	1,586.0	1,586.0	1,636.6			
37 Rb	13,395.3	13,335.8	14,961.3	1,694.13	1,692.56	1,752.17			
38 Sr	14,165	14,097.9	15,835.7	1,806.56	1,804.74	1,871.72			
39 Y	14,958.4	14,882.9	16,737.8	1,922.56	1,920.47	1,995.84			
40 Zr	15,775.1	15,690.9	17,667.8	2,042.36	2,039.9	2,124.4	2,219.4	2,302.7	
41 Nb	16,615.1	16,521.0	18,622.5	2,165.89	2,163.0	2,257.4	2,367.0	2,461.8	
42 Mo	17,479.34	17,374.3	19,608.3	2,293.16	2,289.85	2,394.81	2,518.3	2,623.5	
43 Tc	18,367.1	18,250.8	20,619	2,424	2,420	2,538	2,674	2,792	
44 Ru	19,279.2	19,150.4	21,656.8	2,558.55	2,554.31	2,683.23	2,836.0	2,964.5	
45 Rh	20,216.1	20,073.7	22,723.6	2,696.74	2,692.05	2,834.41	3,001.3	3,143.8	
46 Pd	21,177.1	21,020.1	23,818.7	2,838.61	2,833.29	2,990.22	3,171.79	3,328.7	
47 Ag	22,162.92	21,990.3	24,942.4	2,984.31	2,978.21	3,150.94	3,347.81	3,519.59	
48 Cd	23,173.6	22,984.1	26,095.5	3,133.73	3,126.91	3,316.57	3,528.12	3,716.86	
49 In	24,209.7	24,002.0	27,275.9	3,286.94	3,279.29	3,487.21	3,713.81	3,920.81	
50 Sn	25,271.3	25,044.0	28,486.0	3,443.98	3,435.42	3,662.80	3,904.86	4,131.12	
51 Sb	26,359.1	26,110.8	29,725.6	3,604.72	3,595.32	3,843.57	4,100.78	4,347.79	
52 Te	27,472.3	27,201.7	30,995.7	3,769.33	3,758.8	4,029.58	4,301.7	4,570.9	
53 I	28,612.0	28,317.2	32,294.7	3,937.65	3,926.04	4,220.72	4,507.5	4,800.9	
54 Xe	29,779	29,458	33,624	4,109.9	—	—	—	—	
55 Cs	30,972.8	30,625.1	34,986.9	4,286.5	4,272.2	4,619.8	4,935.9	5,280.4	
56 Ba	32,193.6	31,817.1	36,378.2	4,466.26	4,450.90	4,827.53	5,156.5	5,531.1	
57 La	33,441.8	33,034.1	37,801.0	4,650.97	4,634.23	5,042.1	5,383.5	5,788.5	833
58 Ce	34,719.7	34,278.9	39,257.3	4,840.2	4,823.0	5,262.2	5,613.4	6,052	883
59 Pr	36,026.3	35,550.2	40,748.2	5,033.7	5,013.5	5,488.9	5,850	6,322.1	929
60 Nd	37,361.0	36,847.4	42,271.3	5,230.4	5,207.7	5,721.6	6,089.4	6,602.1	978
61 Pm	38,724.7	38,171.2	43,826	5,432.5	5,407.8	5,961	6,339	6,892	—
62 Sm	40,118.1	39,522.4	45,413	5,636.1	5,609.0	6,205.1	6,586	7,178	1,081

Table 1-2. Energies of x-ray emission lines (continued).

Element	K α_1	K α_2	K β_1	L α_1	L α_2	L β_1	L β_2	L γ	M α_1
63 Eu	41,542.2	40,901.9	47,037.9	5,845.7	5,816.6	6,456.4	6,843.2	7,480.3	1,131
64 Gd	42,996.2	42,308.9	48,697	6,057.2	6,025.0	6,713.2	7,102.8	7,785.8	1,185
65 Tb	44,481.6	43,744.1	50,382	6,272.8	6,238.0	6,978	7,366.7	8,102	1,240
66 Dy	45,998.4	45,207.8	52,119	6,495.2	6,457.7	7,247.7	7,635.7	8,418.8	1,293
67 Ho	47,546.7	46,699.7	53,877	6,719.8	6,679.5	7,525.3	7,911	8,747	1,348
68 Er	49,127.7	48,221.1	55,681	6,948.7	6,905.0	7,810.9	8,189.0	9,089	1,406
69 Tm	50,741.6	49,772.6	57,517	7,179.9	7,133.1	8,101	8,468	9,426	1,462
70 Yb	52,388.9	51,354.0	59,370	7,415.6	7,367.3	8,401.8	8,758.8	9,780.1	1,521.4
71 Lu	54,069.8	52,965.0	61,283	7,655.5	7,604.9	8,709.0	9,048.9	10,143.4	1,581.3
72 Hf	55,790.2	54,611.4	63,234	7,899.0	7,844.6	9,022.7	9,347.3	10,515.8	1,644.6
73 Ta	57,532	56,277	65,223	8,146.1	8,087.9	9,343.1	9,651.8	10,895.2	1,710
74 W	59,318.24	57,981.7	67,244.3	8,397.6	8,335.2	9,672.35	9,961.5	11,285.9	1,775.4
75 Re	61,140.3	59,717.9	69,310	8,652.5	8,586.2	10,010.0	10,275.2	11,685.4	1,842.5
76 Os	63,000.5	61,486.7	71,413	8,911.7	8,841.0	10,355.3	10,598.5	12,095.3	1,910.2
77 Ir	64,895.6	63,286.7	73,560.8	9,175.1	9,099.5	10,708.3	10,920.3	12,512.6	1,979.9
78 Pt	66,832	65,112	75,748	9,442.3	9,361.8	11,070.7	11,250.5	12,942.0	2,050.5
79 Au	68,063.7	66,989.5	77,984	9,713.3	9,628.0	11,442.3	11,584.7	13,381.7	2,122.9
80 Hg	70,819	68,895	80,253	9,988.8	9,897.6	11,822.6	11,924.1	13,830.1	2,195.3
81 Tl	72,871.5	70,831.9	82,576	10,268.5	10,172.8	12,213.3	12,271.5	14,291.5	2,270.6
82 Pb	74,969.4	72,804.2	84,936	10,551.5	10,449.5	12,613.7	12,622.6	14,764.4	2,345.5
83 Bi	77,107.9	74,814.8	87,343	10,838.8	10,730.91	13,023.5	12,979.9	15,247.7	2,422.6
84 Po	79,290	76,862	89,800	11,130.8	11,015.8	13,447	13,340.4	15,744	—
85 At	81,520	78,950	92,300	11,426.8	11,304.8	13,876	—	16,251	—
86 Rn	83,780	81,070	94,870	11,727.0	11,597.9	14,316	—	16,770	—
87 Fr	86,100	83,230	97,470	12,031.3	11,895.0	14,770	14,450	17,303	—
88 Ra	88,470	85,430	100,130	12,339.7	12,196.2	15,235.8	14,841.4	17,849	—
89 Ac	90,884	87,670	102,850	12,652.0	12,500.8	15,713	—	18,408	—
90 Th	93,350	89,953	105,609	12,968.7	12,809.6	16,202.2	15,623.7	18,982.5	2,996.1
91 Pa	95,868	92,287	108,427	13,290.7	13,122.2	16,702	16,024	19,568	3,082.3
92 U	98,439	94,665	111,300	13,614.7	13,438.8	17,220.0	16,428.3	20,167.1	3,170.8
93 Np	—	—	—	13,944.1	13,759.7	17,750.2	16,840.0	20,784.8	—
94 Pu	—	—	—	14,278.6	14,084.2	18,293.7	17,255.3	21,417.3	—
95 Am	—	—	—	14,617.2	14,411.9	18,852.0	17,676.5	22,065.2	—

X-Ray Data Booklet Table 1-3. Photon energies and relative intensities of K-, L-, and M-shell lines shown in Fig. 1-1, arranged by increasing energy. An intensity of 100 is assigned to the strongest line in each shell for each element.

Energy (eV)	Element	Line	Relative intensity								
54.3	3 Li	K $\alpha_{1,2}$	150	524.9	8 O	K $\alpha_{1,2}$	151	851.5	28 Ni	L $\alpha_{1,2}$	111
108.5	4 Be	K $\alpha_{1,2}$	150	556.3	25 Mn	L1	15	868.8	28 Ni	L β_1	68
183.3	5 B	K $\alpha_{1,2}$	151	572.8	24 Cr	L $\alpha_{1,2}$	111	883	58 Ce	M α_1	100
277	6 C	K $\alpha_{1,2}$	147	582.8	24 Cr	L β_1	79	884	30 Zn	L1	7
348.3	21 Sc	L1	21	615.2	26 Fe	L1	10	929.2	59 Pr	M α_1	100
392.4	7 N	K $\alpha_{1,2}$	150	637.4	25 Mn	L $\alpha_{1,2}$	111	929.7	29 Cu	L $\alpha_{1,2}$	111
395.3	22 Ti	L1	46	648.8	25 Mn	L β_1	77	949.8	29 Cu	L β_1	65
395.4	21 Sc	L $\alpha_{1,2}$	111	676.8	9 F	K $\alpha_{1,2}$	148	957.2	31 Ga	L1	7
399.6	21 Sc	L β_1	77	677.8	27 Co	L1	10	978	60 Nd	M α_1	100
446.5	23 V	L1	28	705.0	26 Fe	L $\alpha_{1,2}$	111	1,011.7	30 Zn	L $\alpha_{1,2}$	111
452.2	22 Ti	L $\alpha_{1,2}$	111	718.5	26 Fe	L β_1	66	1,034.7	30 Zn	L β_1	65
458.4	22 Ti	L β_1	79	742.7	28 Ni	L1	9	1,036.2	32 Ge	L1	6
500.3	24 Cr	L1	17	776.2	27 Co	L $\alpha_{1,2}$	111	1,041.0	11 Na	K $\alpha_{1,2}$	150
511.3	23 V	L $\alpha_{1,2}$	111	791.4	27 Co	L β_1	76	1,081	62 Sm	M α_1	100
519.2	23 V	L β_1	80	811.1	29 Cu	L1	8	1,097.9	31 Ga	L $\alpha_{1,2}$	111
				833	57 La	M α_1	100	1,120	33 As	L1	6
				848.6	10 Ne	K $\alpha_{1,2}$	150	1,124.8	31 Ga	L β_1	66

Table 1-3. Energies and intensities of x-ray emission lines (continued).

Energy (eV)	Element	Line	Relative intensity								
1,131	63 Eu	M α_1	100	1,462	69 Tm	M α_1	100	1,740.0	14 Si	K α_1	100
1,185	64 Gd	M α_1	100	1,480.4	35 Br	L $\alpha_{1,2}$	111	1,752.2	37 Rb	L β_1	58
1,188.0	32 Ge	L $\alpha_{1,2}$	111	1,482.4	37 Rb	L1	5	1,775.4	74 W	M α_1	100
1,204.4	34 Se	L1	6	1,486.3	13 Al	K α_2	50	1,792.0	40 Zr	L1	5
1,218.5	32 Ge	L β_1	60	1,486.7	13 Al	K α_1	100	1,804.7	38 Sr	L α_2	11
1,240	65 Tb	M α_1	100	1,521.4	70 Yb	M α_1	100	1,806.6	38 Sr	L α_1	100
1,253.6	12 Mg	K $\alpha_{1,2}$	150	1,525.9	35 Br	L β_1	59	1,835.9	14 Si	K β_1	2
1,282.0	33 As	L $\alpha_{1,2}$	111	1,557.4	13 Al	K β_1	1	1,842.5	75 Re	M α_1	100
1,293	66 Dy	M α_1	100	1,581.3	71 Lu	M α_1	100	1,871.7	38 Sr	L β_1	58
1,293.5	35 Br	L1	5	1,582.2	38 Sr	L1	5	1,902.2	41 Nb	L1	5
1,317.0	33 As	L β_1	60	1,586.0	36 Kr	L $\alpha_{1,2}$	111	1,910.2	76 Os	M α_1	100
1,348	67 Ho	M α_1	100	1,636.6	36 Kr	L β_1	57	1,920.5	39 Y	L α_2	11
1,379.1	34 Se	L $\alpha_{1,2}$	111	1,644.6	72 Hf	M α_1	100	1,922.6	39 Y	L α_1	100
1,386	36 Kr	L1	5	1,685.4	39 Y	L1	5	1,979.9	77 Ir	M α_1	100
1,406	68 Er	M α_1	100	1,692.6	37 Rb	L α_2	11	1,995.8	39 Y	L β_1	57
1,419.2	34 Se	L β_1	59	1,694.1	37 Rb	L α_1	100	2,012.7	15 P	K α_2	50
				1,709.6	73 Ta	M α_1	100	2,013.7	15 P	K α_1	100
				1,739.4	14 Si	K α_2	50	2,015.7	42 Mo	L1	5

2,039.9	40 Zr	L α_2	11	2,367.0	41 Nb	L $\beta_{2,15}$	3	2,696.7	45 Rh	L α_1	100
2,042.4	40 Zr	L α_1	100	2,376.5	45 Rh	L1	4	2,767.4	48 Cd	L1	4
2,050.5	78 Pt	M α_1	100	2,394.8	42 Mo	L β_1	53	2,792	43 Tc	L γ_1	3
2,122	43 Tc	L1	5	2,420	43 Tc	L α_2	11	2,815.6	17 Cl	K β_1	6
2,122.9	79 Au	M α_1	100	2,422.6	83 Bi	M α_1	100	2,833.3	46 Pd	L α_2	11
2,124.4	40 Zr	L β_1	54	2,424	43 Tc	L α_1	100	2,834.4	45 Rh	L β_1	52
2,139.1	15 P	K β_1	3	2,461.8	41 Nb	L γ_1	2	2,836.0	44 Ru	L $\beta_{2,15}$	10
2,163.0	41 Nb	L α_2	11	2,464.0	16 S	K β_1	5	2,838.6	46 Pd	L α_1	100
2,165.9	41 Nb	L α_1	100	2,503.4	46 Pd	L1	4	2,904.4	49 In	L1	4
2,195.3	80 Hg	M α_1	100	2,518.3	42 Mo	L $\beta_{2,15}$	5	2,955.6	18 Ar	K α_2	50
2,219.4	40 Zr	L $\beta_{2,15}$	1	2,538	43 Tc	L β_1	54	2,957.7	18 Ar	K α_1	100
2,252.8	44 Ru	L1	4	2,554.3	44 Ru	L α_2	11	2,964.5	44 Ru	L γ_1	4
2,257.4	41 Nb	L β_1	52	2,558.6	44 Ru	L α_1	100	2,978.2	47 Ag	L α_2	11
2,270.6	81 Tl	M α_1	100	2,620.8	17 Cl	K α_2	50	2,984.3	47 Ag	L α_1	100
2,289.8	42 Mo	L α_2	11	2,622.4	17 Cl	K α_1	100	2,990.2	46 Pd	L β_1	53
2,293.2	42 Mo	L α_1	100	2,623.5	42 Mo	L γ_1	3	2,996.1	90 Th	M α_1	100
2,302.7	40 Zr	L γ_1	2	2,633.7	47 Ag	L1	4	3,001.3	45 Rh	L $\beta_{2,15}$	10
2,306.6	16 S	K α_2	50	2,674	43 Tc	L $\beta_{2,15}$	7	3,045.0	50 Sn	L1	4
2,307.8	16 S	K α_1	100	2,683.2	44 Ru	L β_1	54	3,126.9	48 Cd	L α_2	11
2,345.5	82 Pb	M α_1	100	2,692.0	45 Rh	L α_2	11	3,133.7	48 Cd	L α_1	100

Table 1-3. Energies and intensities of x-ray emission lines (continued).

Energy (eV)	Element	Line	Relative intensity								
3,143.8	45 Rh	L γ_1	5	3,487.2	49 In	L β_1	58	3,937.6	53 I	L α_1	100
3,150.9	47 Ag	L β_1	56	3,519.6	47 Ag	L γ_1	6	3,954.1	56 Ba	Ll	4
3,170.8	92 U	M α_1	100	3,528.1	48 Cd	L $\beta_{2,15}$	15	4,012.7	20 Ca	K $\beta_{1,3}$	13
3,171.8	46 Pd	L $\beta_{2,15}$	12	3,589.6	19 K	K $\beta_{1,3}$	11	4,029.6	52 Te	L β_1	61
3,188.6	51 Sb	Ll	4	3,595.3	51 Sb	L α_2	11	4,086.1	21 Sc	K α_2	50
3,190.5	18 Ar	K $\beta_{1,3}$	10	3,604.7	51 Sb	L α_1	100	4,090.6	21 Sc	K α_1	100
3,279.3	49 In	L α_2	11	3,636	54 Xe	Ll	4	4,093	54 Xe	L α_2	11
3,286.9	49 In	L α_1	100	3,662.8	50 Sn	L β_1	60	4,100.8	51 Sb	L $\beta_{2,15}$	17
3,311.1	19 K	K α_2	50	3,688.1	20 Ca	K α_2	50	4,109.9	54 Xe	L α_1	100
3,313.8	19 K	K α_1	100	3,691.7	20 Ca	K α_1	100	4,124	57 La	Ll	4
3,316.6	48 Cd	L β_1	58	3,713.8	49 In	L $\beta_{2,15}$	15	4,131.1	50 Sn	L γ_1	7
3,328.7	46 Pd	L γ_1	6	3,716.9	48 Cd	L γ_1	6	4,220.7	53 I	L β_1	61
3,335.6	52 Te	Ll	4	3,758.8	52 Te	L α_2	11	4,272.2	55 Cs	L α_2	11
3,347.8	47 Ag	L $\beta_{2,15}$	13	3,769.3	52 Te	L α_1	100	4,286.5	55 Cs	L α_1	100
3,435.4	50 Sn	L α_2	11	3,795.0	55 Cs	Ll	4	4,287.5	58 Ce	Ll	4
3,444.0	50 Sn	L α_1	100	3,843.6	51 Sb	L β_1	61	4,301.7	52 Te	L $\beta_{2,15}$	18
3,485.0	53 I	Ll	4	3,904.9	50 Sn	L $\beta_{2,15}$	16	4,347.8	51 Sb	L γ_1	8
				3,920.8	49 In	L γ_1	6	4,414	54 Xe	L β_1	60
				3,926.0	53 I	L α_2	11	4,450.9	56 Ba	L α_2	11

4,453.2	59 Pr	Ll	4	4,952.2	23 V	K α_1	100	5,531.1	56 Ba	L γ_1	9
4,460.5	21 Sc	K $\beta_{1,3}$	15	4,994.5	62 Sm	Ll	4	5,546.7	65 Tb	Ll	4
4,466.3	56 Ba	L α_1	100	5,013.5	59 Pr	L α_2	11	5,609.0	62 Sm	L α_2	11
4,504.9	22 Ti	K α_2	50	5,033.7	59 Pr	L α_1	100	5,613.4	58 Ce	L $\beta_{2,15}$	21
4,507.5	53 I	L $\beta_{2,15}$	19	5,034	54 Xe	L γ_1	8	5,636.1	62 Sm	L α_1	100
4,510.8	22 Ti	K α_1	100	5,042.1	57 La	L β_1	60	5,721.6	60 Nd	L β_1	60
4,570.9	52 Te	L γ_1	8	5,156.5	56 Ba	L $\beta_{2,15}$	20	5,743.1	66 Dy	Ll	4
4,619.8	55 Cs	L β_1	61	5,177.2	63 Eu	Ll	4	5,788.5	57 La	L γ_1	9
4,633.0	60 Nd	Ll	4	5,207.7	60 Nd	L α_2	11	5,816.6	63 Eu	L α_2	11
4,634.2	57 La	L α_2	11	5,230.4	60 Nd	L α_1	100	5,845.7	63 Eu	L α_1	100
4,651.0	57 La	L α_1	100	5,262.2	58 Ce	L β_1	61	5,850	59 Pr	L $\beta_{2,15}$	21
4,714	54 Xe	L $\beta_{2,15}$	20	5,280.4	55 Cs	L γ_1	8	5,887.6	25 Mn	K α_2	50
4,800.9	53 I	L γ_1	8	5,362.1	64 Gd	Ll	4	5,898.8	25 Mn	K α_1	100
4,809	61 Pm	Ll	4	5,383.5	57 La	L $\beta_{2,15}$	21	5,943.4	67 Ho	Ll	4
4,823.0	58 Ce	L α_2	11	5,405.5	24 Cr	K α_2	50	5,946.7	24 Cr	K $\beta_{1,3}$	15
4,827.5	56 Ba	L β_1	60	5,408	61 Pm	L α_2	11	5,961	61 Pm	L β_1	61
4,840.2	58 Ce	L α_1	100	5,414.7	24 Cr	K α_1	100	6,025.0	64 Gd	L α_2	11
4,931.8	22 Ti	K $\beta_{1,3}$	15	5,427.3	23 V	K $\beta_{1,3}$	15	6,052	58 Ce	L γ_1	9
4,935.9	55 Cs	L $\beta_{2,15}$	20	5,432	61 Pm	L α_1	100	6,057.2	64 Gd	L α_1	100
4,944.6	23 V	K α_2	50	5,488.9	59 Pr	L β_1	61	6,089.4	60 Nd	L $\beta_{2,15}$	21

Table 1-3. Energies and intensities of x-ray emission lines (continued).

6,152	68 Er	Ll	4	6,713.2	64 Gd	L β_1	62	7,367.3	70 Yb	L α_2	11
6,205.1	62 Sm	L β_1	61	6,719.8	67 Ho	L α_1	100	7,387.8	74 W	Ll	5
6,238.0	65 Tb	L α_2	11	6,752.8	71 Lu	Ll	4	7,415.6	70 Yb	L α_1	100
6,272.8	65 Tb	L α_1	100	6,843.2	63 Eu	L $\beta_{2,15}$	21	7,460.9	28 Ni	K α_2	51
6,322.1	59 Pr	L γ_1	9	6,892	61 Pm	L γ_1	10	7,478.2	28 Ni	K α_1	100
6,339	61 Pm	L β_2	21	6,905.0	68 Er	L α_2	11	7,480.3	63 Eu	L γ_1	10
6,341.9	69 Tm	Ll	4	6,915.3	27 Co	K α_2	51	7,525.3	67 Ho	L β_1	64
6,390.8	26 Fe	K α_2	50	6,930.3	27 Co	K α_1	100	7,603.6	75 Re	Ll	5
6,403.8	26 Fe	K α_1	100	6,948.7	68 Er	L α_1	100	7,604.9	71 Lu	L α_2	11
6,456.4	63 Eu	L β_1	62	6,959.6	72 Hf	Ll	5	7,635.7	66 Dy	L β_2	20
6,457.7	66 Dy	L α_2	11	6,978	65 Tb	L β_1	61	7,649.4	27 Co	K $\beta_{1,3}$	17
6,490.4	25 Mn	K $\beta_{1,3}$	17	7,058.0	26 Fe	K $\beta_{1,3}$	17	7,655.5	71 Lu	L α_1	100
6,495.2	66 Dy	L α_1	100	7,102.8	64 Gd	L $\beta_{2,15}$	21	7,785.8	64 Gd	L γ_1	11
6,545.5	70 Yb	Ll	4	7,133.1	69 Tm	L α_2	11	7,810.9	68 Er	L β_1	64
6,587.0	62 Sm	L $\beta_{2,15}$	21	7,173.1	73 Ta	Ll	5	7,822.2	76 Os	Ll	5
6,602.1	60 Nd	L γ_1	10	7,178.0	62 Sm	L γ_1	10	7,844.6	72 Hf	L α_2	11
6,679.5	67 Ho	L α_2	11	7,179.9	69 Tm	L α_1	100	7,899.0	72 Hf	L α_1	100
				7,247.7	66 Dy	L β_1	62	7,911	67 Ho	L $\beta_{2,15}$	20
				7,366.7	65 Tb	L $\beta_{2,15}$	21	8,027.8	29 Cu	K α_2	51

8,045.8	77 Ir	L1	5	8,721.0	80 Hg	L1	5	9,442.3	78 Pt	L α_1	100
8,047.8	29 Cu	K α_1	100	8,747	67 Ho	L γ_1	11	9,572.0	30 Zn	K $\beta_{1,3}$	17
8,087.9	73 Ta	L α_2	11	8,758.8	70 Yb	L $\beta_{2,15}$	20	9,628.0	79 Au	L α_2	11
8,101	69 Tm	L β_1	64	8,841.0	76 Os	L α_2	11	9,651.8	73 Ta	L β_2	20
8,102	65 Tb	L γ_1	11	8,905.3	29 Cu	K $\beta_{1,3}$	17	9,672.4	74 W	L β_1	67
8,146.1	73 Ta	L α_1	100	8,911.7	76 Os	L α_1	100	9,713.3	79 Au	L α_1	100
8,189.0	68 Er	L $\beta_{2,15}$	20	8,953.2	81 Tl	L1	6	9,780.1	70 Yb	L γ_1	12
8,264.7	28 Ni	K $\beta_{1,3}$	17	9,022.7	72 Hf	L β_1	67	9,855.3	32 Ge	K α_2	51
8,268	78 Pt	L1	5	9,048.9	71 Lu	L β_2	19	9,886.4	32 Ge	K α_1	100
8,335.2	74 W	L α_2	11	9,089	68 Er	L γ_1	11	9,897.6	80 Hg	L α_2	11
8,397.6	74 W	L α_1	100	9,099.5	77 Ir	L α_2	11	9,961.5	74 W	L β_2	21
8,401.8	70 Yb	L β_1	65	9,175.1	77 Ir	L α_1	100	9,988.8	80 Hg	L α_1	100
8,418.8	66 Dy	L γ_1	11	9,184.5	82 Pb	L1	6	10,010.0	75 Re	L β_1	66
8,468	69 Tm	L $\beta_{2,15}$	20	9,224.8	31 Ga	K α_2	51	10,143.4	71 Lu	L γ_1	12
8,493.9	79 Au	L1	5	9,251.7	31 Ga	K α_1	100	10,172.8	81 Tl	L α_2	11
8,586.2	75 Re	L α_2	11	9,343.1	73 Ta	L β_1	67	10,260.3	31 Ga	K β_3	5
8,615.8	30 Zn	K α_2	51	9,347.3	72 Hf	L β_2	20	10,264.2	31 Ga	K β_1	66
8,638.9	30 Zn	K α_1	100	9,361.8	78 Pt	L α_2	11	10,268.5	81 Tl	L α_1	100
8,652.5	75 Re	L α_1	100	9,420.4	83 Bi	L1	6	10,275.2	75 Re	L β_2	22
8,709.0	71 Lu	L β_1	66	9,426	69 Tm	L γ_1	12	10,355.3	76 Os	L β_1	67

Table 1-3. Energies and intensities of x-ray emission lines (continued).

Energy (eV)	Element	Line	Relative intensity
10,449.5	82 Pb	L α_2	11
10,508.0	33 As	K α_2	51
10,515.8	72 Hf	L γ_1	12
10,543.7	33 As	K α_1	100
10,551.5	82 Pb	L α_1	100
10,598.5	76 Os	L β_2	22
10,708.3	77 Ir	L β_1	66
10,730.9	83 Bi	L α_2	11
10,838.8	83 Bi	L α_1	100
10,895.2	73 Ta	L γ_1	12
10,920.3	77 Ir	L β_2	22
10,978.0	32 Ge	K β_3	6
10,982.1	32 Ge	K β_1	60
11,070.7	78 Pt	L β_1	67
11,118.6	90 Th	L1	6
11,181.4	34 Se	K α_2	52
11,222.4	34 Se	K α_1	100
11,250.5	78 Pt	L β_2	23
11,285.9	74 W	L γ_1	13
11,442.3	79 Au	L β_1	67
11,584.7	79 Au	L β_2	23
11,618.3	92 U	L1	7
11,685.4	75 Re	L γ_1	13
11,720.3	33 As	K β_3	6
11,726.2	33 As	K β_1	13
11,822.6	80 Hg	L β_1	67
11,864	33 As	K β_2	1
11,877.6	35 Br	K α_2	52
11,924.1	80 Hg	L β_2	24
11,924.2	35 Br	K α_1	100
12,095.3	76 Os	L γ_1	13
12,213.3	81 Tl	L β_1	67
12,271.5	81 Tl	L β_2	25
12,489.6	34 Se	K β_3	6
12,495.9	34 Se	K β_1	13
12,512.6	77 Ir	L γ_1	13
12,598	36 Kr	K α_2	52
12,613.7	82 Pb	L β_1	66
12,622.6	82 Pb	L β_2	25
12,649	36 Kr	K α_1	100
12,652	34 Se	K β_2	1
12,809.6	90 Th	L α_2	11
12,942.0	78 Pt	L γ_1	13
12,968.7	90 Th	L α_1	100
12,979.9	83 Bi	L β_2	25
13,023.5	83 Bi	L β_1	67
13,284.5	35 Br	K β_3	7
13,291.4	35 Br	K β_1	14
13,335.8	37 Rb	K α_2	52
13,381.7	79 Au	L γ_1	13
13,395.3	37 Rb	K α_1	100
13,438.8	92 U	L α_2	11
13,469.5	35 Br	K β_2	1
13,614.7	92 U	L α_1	100
13,830.1	80 Hg	L γ_1	14
14,097.9	38 Sr	K α_2	52
14,104	36 Kr	K β_3	7
14,112	36 Kr	K β_1	14
14,165.0	38 Sr	K α_1	100
14,291.5	81 Tl	L γ_1	14
14,315	36 Kr	K β_2	2
14,764.4	82 Pb	L γ_1	14
14,882.9	39 Y	K α_2	52
14,951.7	37 Rb	K β_3	7
14,958.4	39 Y	K α_1	100
14,961.3	37 Rb	K β_1	14
15,185	37 Rb	K β_2	2
15,247.7	83 Bi	L γ_1	14
15,623.7	90 Th	L β_2	26
15,690.9	40 Zr	K α_2	52
15,775.1	40 Zr	K α_1	100
15,824.9	38 Sr	K β_3	7
15,835.7	38 Sr	K β_1	14
16,084.6	38 Sr	K β_2	3
16,202.2	90 Th	L β_1	69
16,428.3	92 U	L β_2	26
16,521.0	41 Nb	K α_2	52
16,615.1	41 Nb	K α_1	100
16,725.8	39 Y	K β_3	8
16,737.8	39 Y	K β_1	15
17,015.4	39 Y	K β_2	3
17,220.0	92 U	L β_1	61
17,374.3	42 Mo	K α_2	52
17,479.3	42 Mo	K α_1	100
17,654	40 Zr	K β_3	8
17,667.8	40 Zr	K β_1	15
17,970	40 Zr	K β_2	3
18,250.8	43 Tc	K α_2	53
18,367.1	43 Tc	K α_1	100
18,606.3	41 Nb	K β_3	8
18,622.5	41 Nb	K β_1	15
18,953	41 Nb	K β_2	3
18,982.5	90 Th	L γ_1	16
19,150.4	44 Ru	K α_2	53
19,279.2	44 Ru	K α_1	100
19,590.3	42 Mo	K β_3	8
19,608.3	42 Mo	K β_1	15
19,965.2	42 Mo	K β_2	3
20,073.7	45 Rh	K α_2	53
20,167.1	92 U	L γ_1	15
20,216.1	45 Rh	K α_1	100
20,599	43 Tc	K β_3	8
20,619	43 Tc	K β_1	16
21,005	43 Tc	K β_2	4
21,020.1	46 Pd	K α_2	53
21,177.1	46 Pd	K α_1	100
21,634.6	44 Ru	K β_3	8
21,656.8	44 Ru	K β_1	16
21,990.3	47 Ag	K α_2	53
22,074	44 Ru	K β_2	4
22,162.9	47 Ag	K α_1	100
22,698.9	45 Rh	K β_3	8

Table 1-3. Energies and intensities of x-ray emission lines (continued).

Energy (eV)	Element	Line	Relative intensity									
22,723.6	45 Rh	K β_1	16	26,359.1	51 Sb	K α_1	100	30,972.8	55 Cs	K α_1	100	
22,984.1	48 Cd	K α_2	53	26,643.8	48 Cd	K β_2	4	30,995.7	52 Te	K β_1	18	
23,172.8	45 Rh	K β_2	4	27,201.7	52 Te	K α_2	54	31,700.4	52 Te	K β_2	5	
23,173.6	48 Cd	K α_1	100	27,237.7	49 In	K β_3	9	31,817.1	56 Ba	K α_2	54	
23,791.1	46 Pd	K β_3	8	27,275.9	49 In	K β_1	17	32,193.6	56 Ba	K α_1	100	
23,818.7	46 Pd	K β_1	16	27,472.3	52 Te	K α_1	100	32,239.4	53 I	K β_3	9	
24,002.0	49 In	K α_2	53	27,860.8	49 In	K β_2	5	32,294.7	53 I	K β_1	18	
24,209.7	49 In	K α_1	100	28,317.2	53 I	K α_2	54	33,034.1	57 La	K α_2	54	
24,299.1	46 Pd	K β_2	4	28,444.0	50 Sn	K β_3	9	33,042	53 I	K β_2	5	
24,911.5	47 Ag	K β_3	9	28,486.0	50 Sn	K β_1	17	33,441.8	57 La	K α_1	100	
24,942.4	47 Ag	K β_1	16	28,612.0	53 I	K α_1	100	33,562	54 Xe	K β_3	9	
25,044.0	50 Sn	K α_2	53	29,109.3	50 Sn	K β_2	5	33,624	54 Xe	K β_1	18	
25,271.3	50 Sn	K α_1	100	29,458	54 Xe	K α_2	54	34,278.9	58 Ce	K α_2	55	
25,456.4	47 Ag	K β_2	4	29,679.2	51 Sb	K β_3	9	34,415	54 Xe	K β_2	5	
26,061.2	48 Cd	K β_3	9	29,725.6	51 Sb	K β_1	18	34,719.7	58 Ce	K α_1	100	
26,095.5	48 Cd	K β_1	17	29,779	54 Xe	K α_1	100	34,919.4	55 Cs	K β_3	9	
26,110.8	51 Sb	K α_2	54	30,389.5	51 Sb	K β_2	5	34,986.9	55 Cs	K β_1	18	
				30,625.1	55 Cs	K α_2	54	35,550.2	59 Pr	K α_2	55	
				30,944.3	52 Te	K β_3	9	35,822	55 Cs	K β_2	6	

36,026.3	59 Pr	K α_1	100	41,542.2	63 Eu	K α_1	100	47,037.9	63 Eu	K β_1	19	
36,304.0	56 Ba	K β_3	10	41,773	59 Pr	K β_2	6	47,546.7	67 Ho	K α_1	100	
36,378.2	56 Ba	K β_1	18	42,166.5	60 Nd	K β_3	10	48,221.1	68 Er	K α_2	56	
36,847.4	60 Nd	K α_2	55	42,271.3	60 Nd	K β_1	19	48,256	63 Eu	K β_2	6	
37,257	56 Ba	K β_2	6	42,308.9	64 Gd	K α_2	56	48,555	64 Gd	K β_3	10	
37,361.0	60 Nd	K α_1	100	42,996.2	64 Gd	K α_1	100	48,697	64 Gd	K β_1	20	
37,720.2	57 La	K β_3	10	43,335	60 Nd	K β_2	6	49,127.7	68 Er	K α_1	100	
37,801.0	57 La	K β_1	19	43,713	61 Pm	K β_3	10	49,772.6	69 Tm	K α_2	57	
38,171.2	61 Pm	K α_2	55	43,744.1	65 Tb	K α_2	56	49,959	64 Gd	K β_2	7	
38,724.7	61 Pm	K α_1	100	43,826	61 Pm	K β_1	19	50,229	65 Tb	K β_3	10	
38,729.9	57 La	K β_2	6	44,481.6	65 Tb	K α_1	100	50,382	65 Tb	K β_1	20	
39,170.1	58 Ce	K β_3	10	44,942	61 Pm	K β_2	6	50,741.6	69 Tm	K α_1	100	
39,257.3	58 Ce	K β_1	19	45,207.8	66 Dy	K α_2	56	51,354.0	70 Yb	K α_2	57	
39,522.4	62 Sm	K α_2	55	45,289	62 Sm	K β_3	10	51,698	65 Tb	K β_2	7	
40,118.1	62 Sm	K α_1	100	45,413	62 Sm	K β_1	19	51,957	66 Dy	K β_3	10	
40,233	58 Ce	K β_2	6	45,998.4	66 Dy	K α_1	100	52,119	66 Dy	K β_1	20	
40,652.9	59 Pr	K β_3	10	46,578	62 Sm	K β_2	6	52,388.9	70 Yb	K α_1	100	
40,748.2	59 Pr	K β_1	19	46,699.7	67 Ho	K α_2	56	52,965.0	71 Lu	K α_2	57	
40,901.9	63 Eu	K α_2	56	46,903.6	63 Eu	K β_3	10	53,476	66 Dy	K β_2	7	

Table 1-3. Energies and intensities of x-ray emission lines (continued).

53,711	67 Ho	K β_3	11	59,370	70 Yb	K β_1	21	66,989.5	79 Au	K α_2	59	
53,877	67 Ho	K β_1	20	59,717.9	75 Re	K α_2	58	66,990	73 Ta	K β_2	7	
54,069.8	71 Lu	K α_1	100	60,980	70 Yb	K β_2	7	67,244.3	74 W	K β_1	22	
54,611.4	72 Hf	K α_2	57	61,050	71 Lu	K β_3	11	68,803.7	79 Au	K α_1	100	
55,293	67 Ho	K β_2	7	61,140.3	75 Re	K α_1	100	68,895	80 Hg	K α_2	59	
55,494	68 Er	K β_3	11	61,283	71 Lu	K β_1	21	68,994	75 Re	K β_3	12	
55,681	68 Er	K β_1	21	61,486.7	76 Os	K α_2	58	69,067	74 W	K β_2	8	
55,790.2	72 Hf	K α_1	100	62,970	71 Lu	K β_2	7	69,310	75 Re	K β_1	22	
56,277	73 Ta	K α_2	57	62,980	72 Hf	K β_3	11	70,819	80 Hg	K α_1	100	
57,210	68 Er	K β_2	7	63,000.5	76 Os	K α_1	100	70,831.9	81 Tl	K α_2	60	
57,304	69 Tm	K β_3	11	63,234	72 Hf	K β_1	22	71,077	76 Os	K β_3	12	
57,517	69 Tm	K β_1	21	63,286.7	77 Ir	K α_2	58	71,232	75 Re	K β_2	8	
57,532	73 Ta	K α_1	100	64,895.6	77 Ir	K α_1	100	71,413	76 Os	K β_1	23	
57,981.7	74 W	K α_2	58	64,948.8	73 Ta	K β_3	11	72,804.2	82 Pb	K α_2	60	
59,090	69 Tm	K β_2	7	64,980	72 Hf	K β_2	7	72,871.5	81 Tl	K α_1	100	
59,140	70 Yb	K β_3	11	65,112	78 Pt	K α_2	58	73,202.7	77 Ir	K β_3	12	
59,318.2	74 W	K α_1	100	65,223	73 Ta	K β_1	22	73,363	76 Os	K β_2	8	
				66,832	78 Pt	K α_1	100	73,560.8	77 Ir	K β_1	23	
				66,951.4	74 W	K β_3	11	74,814.8	83 Bi	K α_2	60	

74,969.4	82 Pb	K α_1	100
75,368	78 Pt	K β_3	12
75,575	77 Ir	K β_2	8
75,748	78 Pt	K β_1	23
77,107.9	83 Bi	K α_1	100
77,580	79 Au	K β_3	12
77,850	78 Pt	K β_2	8
77,984	79 Au	K β_1	23
79,822	80 Hg	K β_3	12
80,150	79 Au	K β_2	8
80,253	80 Hg	K β_1	23

82,118	81 Tl	K β_3	12
82,515	80 Hg	K β_2	8
82,576	81 Tl	K β_1	23
84,450	82 Pb	K β_3	12
84,910	81 Tl	K β_2	8
84,936	82 Pb	K β_1	23
86,834	83 Bi	K β_3	12
87,320	82 Pb	K β_2	8
87,343	83 Bi	K β_1	23
89,830	83 Bi	K β_2	9

89,953	90 Th	K α_2	62
93,350	90 Th	K α_1	100
94,665	92 U	K α_2	62
98,439	92 U	K α_1	100
104,831	90 Th	K β_3	12
105,609	90 Th	K β_1	24
108,640	90 Th	K β_2	9
110,406	92 U	K β_3	13
111,300	92 U	K β_1	24
114,530	92 U	K β_2	9