

## Inhaltsverzeichnis:

1.	Einführung .....	S. 3
2.	Aufbau eines Rasterelektronenmikroskops .....	S. 3
3.	Entstehung von Röntgenstrahlung .....	S. 6
3.1	Aufbau einer Röntgenröhre .....	S. 6
3.2	Röntgenbremsstrahlung .....	S. 7
3.3	Charakteristische Röntgenstrahlung .....	S. 10
4.	Entstehung eines Röntgenbildes .....	S. 12
4.1	Bildentstehung .....	S. 12
4.2	Bildgebung .....	S. 12
4.2.1	Kontrast.....	S. 12
4.2.2	Bildschärfe .....	S. 16
5.	Vorgehensweise für eine Aufnahme im REM .....	S. 17
6.	Auswertung der Röntgenaufnahmen .....	S. 18
6.1	Präparation .....	S. 18
6.2	Auswirkung der Aufnahme-Einstellungen auf das entstehende Röntgenbild.....	S. 19
6.2.1	Target-Objektstand.....	S. 19
6.2.2	Elektronenstrahldurchmesser.....	S. 20
6.2.3	Belichtungszeit.....	S. 20
6.2.4	Heizstrom.....	S. 21
6.2.5	Beschleunigungsspannung .....	S. 21
6.2.6	Target .....	S. 22
6.3	Biologische Präparate.....	S. 23
6.4	Technische Präparate .....	S. 24
7.	Ausblick .....	S. 26
	Anhang	
	Erklärung	

## 1. Einführung

„In der Wissenschaft gleichen wir alle nur den Kindern, die am Rande des Wissens hie und da einen Kiesel aufheben, während sich der weite Ozean des Unbekannten vor unseren Augen erstreckt.“<sup>1</sup>, erkannte schon vor vielen Jahren der englische Physiker, Mathematiker und Astronom, Sir Isaac Newton. Dieser Ozean erstreckt sich jedoch von den ganz großen und ins Auge fallenden Dingen der Welt bis hin zu denen, die für unser Auge nicht mehr zu erkennen sind. Das Bestreben auch winzige Teilchen sichtbar zu machen, führte schließlich im Laufe der Mikroskopgeschichte zur Entwicklung des Elektronenmikroskops, wohl eine der bedeutendsten Erfindungen des 20. Jahrhunderts. Mit Hilfe dieser Entwicklung war es nun möglich die Erforschung kleinster Partikel weiter voranzutreiben. Eine ebenso bahnbrechende Entdeckung war die der Röntgenstrahlen, einige Jahrzehnte zuvor. Durch sie entstand ebenfalls ein komplett neues Betrachtungsfeld und völlig neue Methoden der medizinischen Diagnostik entwickelten sich.

In dieser Facharbeit geht es schließlich um die Kombination dieser beiden Entwicklungen. Dabei soll das schuleigene Rasterelektronenmikroskop JEOL JSM - M 840 zur Erzeugung von Röntgenstrahlen für die Herstellung von Röntgenaufnahmen genutzt werden. Diese Technik soll es ermöglichen, kleine Teilchen sowohl vergrößert darzustellen, als auch röntgenologisch zu untersuchen. Die Kombination dieser beiden, für mich sehr aufregenden Entwicklungen und die hochinteressante Möglichkeit an einem Rasterelektronenmikroskop arbeiten zu können, war schließlich der Grund für mich dieses Facharbeitsthema zu wählen.

## 2. Aufbau eines Rasterelektronenmikroskops

Das Rasterelektronenmikroskop ist neben dem Transmissions - Elektronenmikroskop die modernste Entwicklung der Mikroskopfamilie. Statt wie früher, mit der Wellenlänge des Lichts, wird nun mit der viel kürzere “Wellenlänge” von beschleunigten Elektronen gearbeitet, um somit ein weitaus größeres Auflösungsvermögen zu erzielen.

Der erste Schritt um ein Bild im Elektronenmikroskop zu erhalten, ist also die Erzeugung eines Elektronenstrahls. Stellt man sich das ganze Gerät wie eine zylindrische Säule vor, dann befindet sich am Kopf dieser Säule die Elektronenkanone

---

<sup>1</sup> Siehe [Zit], Wissenschaft

(s. Abb.1). Sie befindet sich in der Kanonenkammer<sup>2</sup>. Die Elektronenquelle der Kanone ist die Kathode, laut Flegler, Heckman und Klomprens, meistens eine Wolframhaarnadelektrode<sup>2</sup>. Sie wird auf Grund der Aufheizung des Drahtes auch Glühkathode genannt. In manchen Fällen besteht die Elektronenquelle auch aus einer Lanthanhexaborid-Kristallelektrode<sup>2</sup>. Im

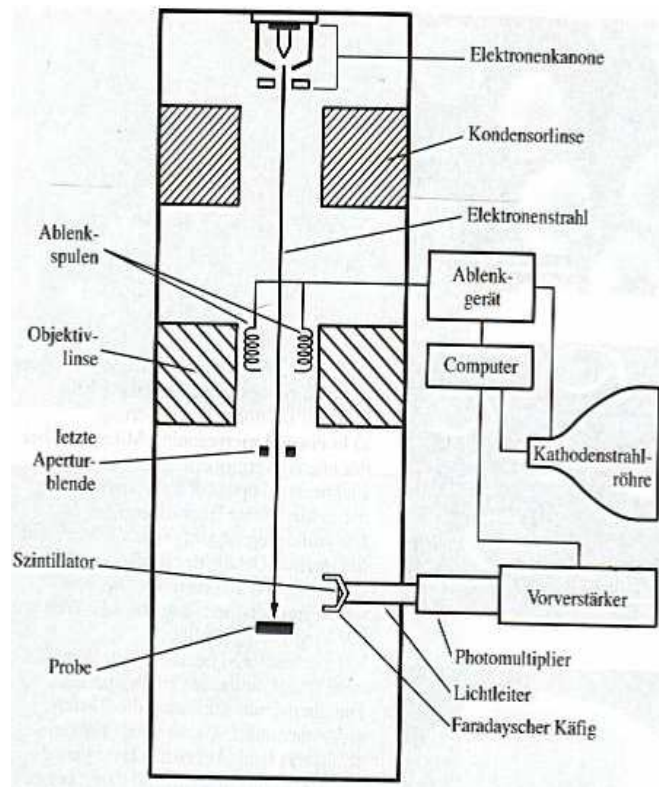


Abb. 1: Schematische Darstellung eines Rasterelektronenmikroskops

Beispiel der haarnadelförmig gebogenen Wolframdrahtschleife, die als Kathode dient, wird an den Draht ein kleiner Spannungsunterschied  $U_H$  angelegt, der auf Grund des elektrischen Widerstandes  $R$  eine Aufheizung des Drahtes bewirkt. Die Glühemission wird durch den Heizstrom  $I_H$ , dem Stromfluss durch den Draht, erzeugt. Es entsteht eine Elektronenwolke an der Spitze des Fadens. Durch die angelegte Beschleunigungsspannung  $U_B$  werden nun die emittierten Elektronen in Richtung der Anode beschleunigt. Ist diese bekannt, lässt sich die kinetische Energie  $E_{kin} = e \cdot U_R$  der Elektronen berechnen.

Der Wolframdraht ist von einer Metallkapsel, dem Wehneltzylinder, abgeschirmt<sup>2</sup>. Zwischen dem Wehneltzylinder, der auch Abschirmung genannt wird und der



Abb. 2: Fotografie des schuleigenen Rasterelektronenmikroskops JEOL JSM - M 840

<sup>2</sup> Vgl. [FHK], S.15-22

Kathode herrscht eine variierbare Spannungsdifferenz, die Vorspannung. Der Wehneltzylinder ist dabei "gegenüber der Kathode um ca. 100V negativ vorgespannt"<sup>3</sup> und wirkt somit auf die Elektronen abstoßend. Dadurch wirkt er einerseits als Sammellinse und steuert andererseits je nach Vorspannung die Stärke des Elektronenstrahls<sup>2</sup> (= die Emission der Kathode). Durch die Stärke des Strahls kann die Bildhelligkeit verändert werden: Je stärker der

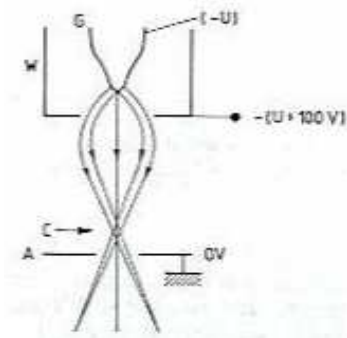


Abb. 3: Schematische Darstellung einer Elektronenkanone  
G: Glühfaden (Kathode), A: Anode, W: Wehneltzylinder, C: Crossover

Elektronenstrahl ist, umso heller wird das entstehende Bild. Allerdings kommt es dadurch auch zu einer höheren Belastung des Objekts<sup>4</sup>, die vor allem bei organischen Präparaten beachtet werden muss. Durch die fokussierende Wirkung der Abschirmung werden die Elektronen direkt auf den Strahlungskreuzpunkt, auch Crossover genannt, der vor der Anode liegt, gelenkt<sup>5</sup> (siehe Abb. 3). Folglich geht der Großteil der Elektronen durch die Anodenöffnung hindurch und bildet den sog. Elektronenstrahl. Nur wenige treffen die Anode und gehen somit für die Bildgewinnung verloren<sup>5</sup>. Dieser Strahl, auch als Primärelektronenstrahl bezeichnet, wird auf dem Weg zum Objektträgertisch „durch elektromagnetische Spulen - Kondensoren und Endlinse - fein gebündelt und trifft so fokussiert auf das Objekt auf“<sup>6</sup> (siehe Abb.1). An diese Spulen ist eine variierbare Spannung angelegt, durch die der Strahl auf dem Objekt „in einem kontrollierten Muster (Raster) hin- und zurück[ge]führt“<sup>7</sup> wird. Wichtig ist dabei, dass in der ganzen Säule ein Hochvakuum herrscht. Es ist, laut Flegler, Heckman und Klomprens, nicht möglich, einen Elektronenstrahl in einer Gasatmosphäre zu erzeugen, oder aufrechtzuerhalten<sup>8</sup>. Manche der mit vielen Kilovolt beschleunigten Elektronen würden sonst, in einer Atmosphäre mit vielen Gasmolekülen, ionisiert werden. Dies würde zu zufälligen Entladungen und somit zu einer Destabilisierung des Elektronenstrahls führen<sup>8</sup>. Des Weiteren würden die reaktiven Gase, wie z.B. der in Luft enthaltene Sauerstoff mit dem erhitzten Wolframfaden, der auch bei dem

<sup>3</sup> Siehe [Ale], S.66

<sup>4</sup> Vgl. [UU], Rasterelektronenmikroskopie

<sup>5</sup> Vgl. [FHK], S.16f

<sup>6</sup> Siehe [UU], Rasterelektronenmikroskop

<sup>7</sup> Siehe [FHK], S.83

<sup>8</sup> Vgl. [FHK], S.29

für diese Facharbeit relevanten Mikroskop eingesetzt wurde, reagieren, was zu einem Durchbrennen der Glühkathode führen würde.<sup>8</sup>

Letztendlich sind für die Bildentstehung die Detektoren verantwortlich. Sie fangen die nach dem Auftreffen auf das Objekt emittierten Elektronen, die nun sog. Sekundärelektronen auf, deren Signal nach mehreren Stationen auf den Monitor übertragen wird<sup>4</sup>. Die genauen Schritte der Bildentstehung nach dem Auftreffen des Primärelektronenstrahls auf das Objekt sind jedoch für den weiteren Verlauf dieser Facharbeit nicht von Belang.

### 3. Entstehung der Röntgenstrahlung

#### 3.1 Aufbau einer Röntgenröhre

Generell kann man sagen, dass für die Röntgenstrahlenerzeugung in einer Röntgenröhre nach wie vor das Prinzip verwendet wird, beschleunigte Elektronen auf feste Materie aufprallen zu lassen.<sup>9</sup>

Als Elektronenquelle dient dabei, genau wie bei den meisten Elektronenmikroskopen, ein Wolframdraht, die sog. Glühkathode. Der Draht wird mittels des Heizstromes  $I_H$  und der angelegten Spannung  $U_H$  von ungefähr 6-12V<sup>10</sup>, auf ca. 2.000°C bis 2.600°C erhitzt und setzt somit Elektronen frei<sup>11</sup>. Diese werden durch die angelegte Röhrenspannung  $U_R$  oder auch Beschleunigungsspannung genannt, in Richtung der Anode auf ca. 165.000km/s beschleunigt<sup>10</sup>. Je nach gewünschter Härte der Röntgenstrahlen beträgt diese Spannung 5 kV bis über 250 kV<sup>11</sup>. Es entsteht ein Elektronenstrom mit der kinetischen Energie  $E_{kin} = e \cdot U_R$  pro Elektron. Wie auch beim Elektronenmikroskop geschieht hier alles in einem Vakuum ( $10^{-6}$  bis  $10^{-7}$  mbar)<sup>11</sup>, um eine Wechselwirkung der Elektronen mit den sonst in der Röhre enthaltenen Gasmolekülen zu vermeiden.

Schließlich trifft der so entstandene Röhrenstrom auf der Anode auf. Der genaue Auftrittspunkt wird Fokus oder auch Brennfleck genannt. Er ist der Ort der Röntgenstrahlenentstehung<sup>10</sup>. An diesem Punkt entstehen

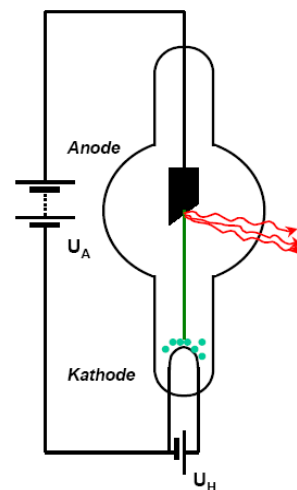


Abb. 4: Schematische Darstellung einer Röntgenröhre  
 $U_H$ : Heizspannung,  
 $U_A$ : Röhrenspannung

<sup>9</sup> Vgl. [BW], S.69

<sup>10</sup> Vgl. [TB], S.8f

<sup>11</sup> Vgl. [Her], S.21

Temperaturen von ungefähr 2000°C<sup>10</sup>. Deshalb sind nur solche Materialien als Anode geeignet, „die einen hohen Schmelzpunkt, gute Wärmeleitfähigkeit und einen kleinen Gasdruck besitzen“<sup>12</sup>, um eine Verdampfung des Materials zu verhindern. Nach Thurn und Bücheler wird meistens eine rheniumlegierte Wolframscheibe als Anode verwendet.<sup>10</sup> Hinter der Anode nimmt die „[Strahlen-] Intensität mit dem Quadrat der Fokuserfernung ab“<sup>13</sup>. Diese Gesetzmäßigkeit wird Abstandsquadratgesetz genannt. Vervierfacht man also z.B. den Abstand vom Fokus, so beträgt die Strahlenintensität nur noch ein Sechzehntel ihrer ursprünglichen Wertes. Des Weiteren ist zu beachten, dass der Anteil, der kinetischen Energie  $e \cdot U_R$  der Elektronen, der in Röntgenstrahlen umgesetzt wird, sehr gering ist. Diese Verhältnis wird durch den Wirkungsgrad  $\eta$  ausgedrückt. Er ist definiert

$$\text{als } \eta = \frac{\text{Nutzenergie}}{\text{aufgewendete Energie}}$$

Der Wirkungsgrad ist abhängig von der Röhrenspannung  $U_R$  und somit von der Eindringtiefe des Elektronenstrahls in das Anodenmaterial. Diese ist umso größer, desto höher die Spannung  $U_R$  ist<sup>14</sup>. Da außerdem auch noch die Ordnungszahl  $Z$  des Anodenmaterials von Bedeutung ist, entsteht folgende Beziehung<sup>15</sup>:

$$\eta = k \cdot U_R \cdot Z \quad , k = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ V}^{-1}$$

Somit ergibt sich zum Beispiel für Wolfram ( $Z = 74$ ), das meistens in Röntgenröhren verwendet wird, bei einer Röhrenspannung  $U_R = 100 \text{ kV}$  ein Wirkungsgrad von nur 0,814%. Die restlichen 99,186% der Elektronenstrahlenenergie werden in Wärme umgesetzt.

## 3.2 Röntgenbremsstrahlung

Doch was sind diese Röntgenstrahlen überhaupt?

Röntgenstrahlen sind sehr energiereiche elektromagnetische Strahlen. Als elektromagnetische Strahlung werden Wellen bezeichnet, die durch die Schwingung oder Beschleunigung von elektrischen Ladungen entstehen<sup>16</sup>. Folglich haben sie sowohl eine elektrische als auch eine magnetische Komponente.<sup>16</sup> Charakteristisch für diese Wellen ist, dass sie sich stets mit Lichtgeschwindigkeit  $c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

---

<sup>12</sup> Siehe [TB], S.9

<sup>13</sup> Siehe [TB], S.18

<sup>14</sup> Vgl. [TB], S.9

<sup>15</sup> Vgl. [Her], S.33

<sup>16</sup> Vgl. Microsoft Encarta 2007, Elektromagnetische Strahlung

ausbreiten<sup>17</sup>. Das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung entsteht zum einen durch die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde, der sog. Frequenz  $f$  und zum anderen durch die damit über die Formel  $c = \lambda f$  zusammenhängende Wellenlänge  $\lambda$ . Diese ist definiert als der „kürzeste Abstand zweier Punkte mit gleicher Schwingungsphase in Ausbreitungsrichtung“<sup>18</sup> der Welle. Über die Wellenlänge oder Frequenz der Strahlen kann ihre Energie mit der Formel  $E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$  berechnet werden. Beispiele für elektromagnetische Wellen sind die wohlbekannten Radio- oder Mikrowellen, aber auch die sichtbaren Lichtstrahlen. Die Wellenlänge der für uns relevanten Röntgenstrahlen reicht in etwa von  $10^{-7}$  bis  $10^{-14}$  Meter<sup>19</sup>.

Im Folgenden werden zur Vereinfachung die Elektronen des Elektronenstrahls als Elektronen<sub>E</sub> und die Elektronen in den Atomen des Anodenmaterials als Elektronen<sub>A</sub> bezeichnet.

Treffen die Elektronen (s.Abb. 5,2) nun auf die Anode auf, so gelangen einige von ihnen in die nähere Umgebung der positiv geladenen Atomkerne des Anodenmaterials (s.Abb.5,1a/1b). „Wegen der Anziehungskraft zwischen positiver und negativer elektrischer Ladung“<sup>20</sup> wird das Elektron<sub>E</sub> nun in Richtung des Atomkerns beschleunigt und somit abgelenkt<sup>21</sup>. Die Bahn des Elektrons<sub>E</sub> kann man nun als eine Hyperbelbahn, mit je nach Ablenkung stärkerer oder schwächerer Krümmung, beschreiben<sup>21</sup>. Bei diesem Vorgang wird das Elektron<sub>E</sub> abgebremst, wobei es zumindest teilweise seine kinetische Energie abgibt. Das Elektron<sub>E</sub> wird also beim Auftreffen auf das Anodenmaterial wiederholt durch die elektrischen Felder der Atomkerne des Anodenmaterials abgelenkt und abgebremst<sup>21</sup>, bis es im extremsten Fall zum Stillstand kommt. Nach dem Energieerhaltungssatz darf jedoch keine Energie verloren gehen. So gehen ca. 99% der kinetischen Energie des Elektronenstrahls in Wärmeenergie über, wohingegen nur ungefähr 1% der ab-

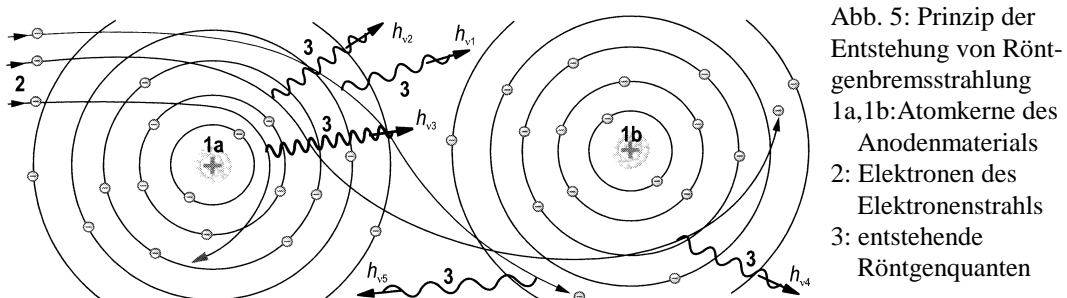


Abb. 5: Prinzip der Entstehung von Röntgenbremsstrahlung  
1a,1b: Atomkerne des Anodenmaterials  
2: Elektronen des Elektronenstrahls  
3: entstehende Röntgenquanten

<sup>17</sup> Vgl. [Her], S.29

<sup>18</sup> Siehe [MLDM], S.73

<sup>19</sup> Vgl. Microsoft Encarta 2007, Elektromagnetische Strahlung

<sup>20</sup> Siehe [Kul], S.14

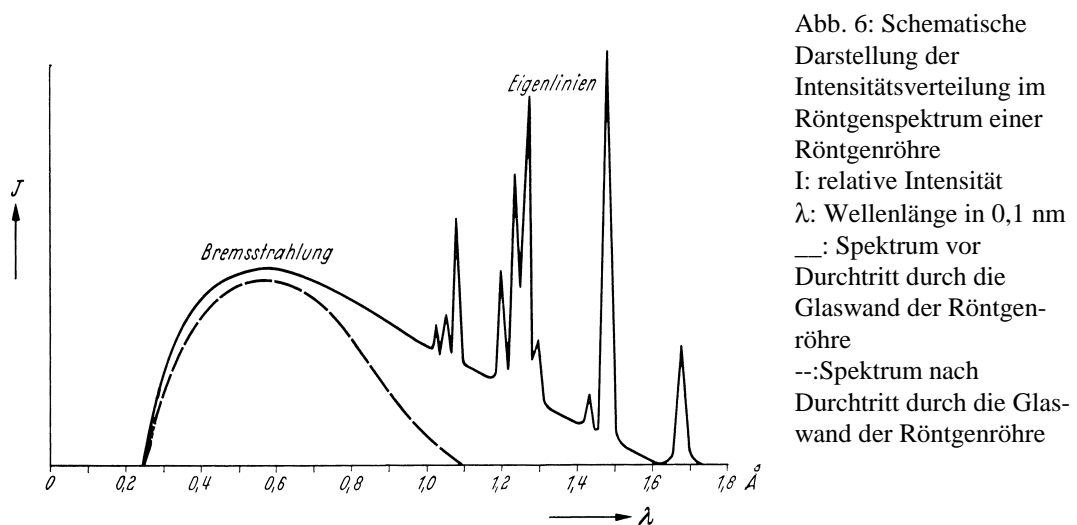
<sup>21</sup> Vgl. [Kul], S.14f

gegebenen kinetischen Energie in Röntgenquanten (s. Abb. 5,3) umgesetzt wird<sup>22</sup>. Dabei entstehen Röntgenphotonen mit unterschiedlichen Energien  $E_{\text{Photon}} = \Delta E$  ( $\Delta E =$  Energieabgabe des Elektrons<sub>E</sub>). Folglich bildet sich ein kontinuierliches Spektrum<sup>21</sup>, mit Röntgenstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge. Nur sehr selten verliert das Elektron<sub>E</sub> in einem einzigen Vorgang seine gesamte kinetische Energie. In diesem Fall kann die Frequenz der entstehenden Röntgenstrahlen mit der Formel  $E_{\text{Photon}} = hf$  eindeutig berechnet werden, da die Energie der Photonen gleich der kinetischen Energie  $E_{\text{kin}} = eU_R$  der Elektronen des Röhrenstroms ist.

Die so berechenbare Frequenz  $f$  wird Grenzfrequenz  $f_g = \frac{eU_R}{h}$

( $e =$  Elementarladung,  $h =$  Plancksches Wirkungsquantum) genannt<sup>23</sup>. Sie variiert je nach Röhrenspannung  $U_R$  und ist unabhängig vom Anodenmaterial<sup>27</sup>. Diese Strahlen sind die energiereichsten, die durch Elektronen<sub>E</sub> der kinetischen Energie  $e \cdot U_R$  entstehen. Folglich sind sie die Strahlen mit der kürzesten Wellenlänge des sog. Röntgenbremspektrums.

Bei den für die Röntgendiagnostik gewöhnlich verwendeten Röhrenspannungen von 70-150 kV macht die Röntgenbremsstrahlung jedoch nur 80-90 % der entstehenden Röntgenstrahlen aus. Die restlichen 10-20 % der Strahlung werden charakteristische Strahlung genannt<sup>24</sup>. Da bei dieser Facharbeit Spannungen zwischen 20 kV und 38 kV verwendet wurden, überwiegt die Röntgenbremsstrahlung etwas mehr. Auf Abb. 6 ist das resultierende Röntgenspektrum einer Röntgenröhre zu sehen.



<sup>22</sup> Vgl. [TB], S.9

<sup>23</sup> Vgl. [MLDM], S.112

<sup>24</sup> Vgl. [Hert], S.25



### 3.3 charakteristische Röntgenstrahlung

Um die Vorgänge bei der Entstehung der charakteristischer Röntgenstrahlung nachvollziehen zu können, werden im Folgenden die Ergebnisse des Bohrschen Atommodells erläutert.

Auf Abb. 7 ist der prinzipielle Aufbau eines Wolfram-Atoms zu sehen. In der Mitte des Bildes befindet sich der Atomkern (Abb. 7,1). In ihm ist fast die gesamte Masse des Atoms zentriert. Er „besteht aus Nukleonen, das ist die Summe aller positiv geladenen Protonen (...) und elektrisch neutralen Neutronen (...). Er hat eine Größe von etwa  $10^{-12}$  bis  $10^{-13}$  cm.“<sup>25</sup> Das gesamte Atom hingegen hat eine Größe von ca.  $10^{-8}$  cm. Die Zahl der Protonen wird durch die

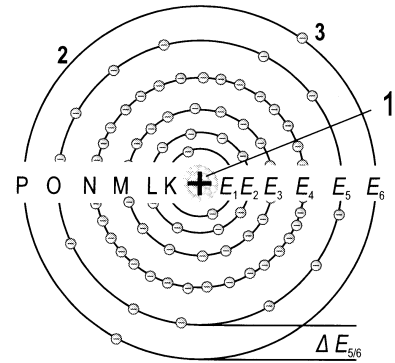


Abb. 7: Schematische Darstellung eines Atoms, am Beispiel Wolfram

Ordnungszahl im Periodensystem der Elemente angegeben. Bei nicht ionisierten Atomen ist die Anzahl der Protonen gleich der, der negativen Elektronen. Diese umkreisen den Kern auf energetisch genau festgelegten Bahnen, den sog. Schalen (Abb.7,2). Diese werden je nach Kernnähe mit den Buchstaben K, L, M, N, O, P, Q bezeichnet (siehe Abb. 7) und haben ein begrenztes, je nach Schale unterschiedliches Elektronenfassungsvermögen. Dabei ist die Bindungsenergie der Elektronen zum Atomkern von Schale zu Schale unterschiedlich und nimmt mit steigender Entfernung von diesem ab. Die Energie der Elektronen auf den Schalen nimmt hingegen zu. Da immer ein möglichst energiearmer Zustand angestrebt wird, versuchen die Elektronen eine möglichst kernnahe Schale zu belegen. Dies geht jedoch nur, wenn die Schale nicht vollständig besetzt ist. Geht ein Elektron von einer Schale auf die nächste über, so erfolgt dies nur sprunghaft<sup>26</sup>. Das heißt, um ein Elektron von der L-Schale auf die energetisch höhere M-Schale zu heben, ist ein ganz bestimmter Energiebetrag nötig, der der Differenz der Bindungsenergien der beiden Schalen entspricht. Springt jedoch ein Elektron von einer energiereicheren Schale auf eine energieniedrigere, so wird die Energiedifferenz in Form von elektromagnetischer Strahlung freigesetzt. Dies ist der einzige Vorgang, bei dem Energie abgegeben wird. Ansonsten bewegen sich die Elektronen auf

<sup>25</sup> Siehe [Her], S.22

<sup>26</sup> Vgl. Bohrsches Atommodell - Elektronen auf Planetenbahnen

ihren Schalen strahlungsfrei<sup>27</sup>.

Anders, als bei der Röntgenbremsstrahlung wird bei der charakteristischen Strahlung die abgegebene Energie des Elektrons<sub>E</sub> nicht sofort in Röntgenstrahlen umgesetzt, sondern in einem ersten Schritt an ein Elektron<sub>A</sub> abgegeben.

Trifft ein Elektron<sub>E</sub> auf ein Elektron<sub>A</sub> (s. Abb. 8) wird es von diesem abgestoßen<sup>28</sup>. Dabei erfährt das Elektron<sub>A</sub> „einen Rückstoß, und wenn dieser genügend stark ist, kann es aus dem Atom hinausgeworfen werden“<sup>29</sup>. Das Atom wird also ionisiert.

Nun nimmt jedoch ein Elektron<sub>A</sub> aus einer kernferneren Bahn den ehemaligen Platz des verdrängten Elektrons<sub>A</sub> ein<sup>30</sup>. Dabei entsteht ein Röntgenquant, dessen Energie der Differenz der Bindungsenergien der beiden Schalen entspricht. Am Beispiel von Wolfram beträgt die

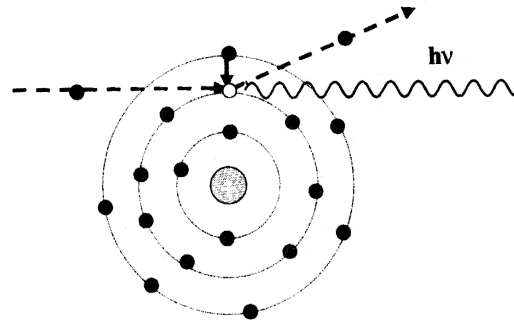


Abb. 8: Prinzip der Entstehung von charakteristischer Röntgenstrahlung

Energiedifferenz zwischen der L- Schale und der K- Schale 58,5 keV<sup>30</sup>:

$$\Delta E = \text{Energie}_{L\text{-Schale}} - \text{Energie}_{K\text{-Schale}} = 69,5 \text{ keV} - 11 \text{ keV} = 58,5 \text{ keV}$$

Mit  $\Delta E = hf = \frac{h \cdot c}{\lambda}$  kann damit die Wellenlänge der entstehenden Röntgen-

quanten berechnet werden:  $\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta E} = 0,0212 \text{ nm}$  ( $\Delta E =$  Energiedifferenz

zwischen den jeweiligen Schalen). Die bei diesem Sprung entstehende Wellenlänge wird  $K_{\alpha}$ -Linie genannt. Bei der Benennung dieser Linien geht man folgendermaßen vor: Der Großbuchstabe bezeichnet die Schale auf die das Elektron springt. Mit Hilfe der griechischen Buchstaben wird festgelegt, von welcher Schale das Elektron springt. So bezeichnet  $\alpha$  den Sprung von der nächst höheren Schale und  $\beta$  den von der darauffolgenden. So wird beispielsweise der Übergang von M auf L  $L_{\alpha}$  und der von M auf K  $K_{\beta}$  genannt.

<sup>27</sup> Vgl. [MLD], S.194

<sup>28</sup> Vgl. [Kul], S.19

<sup>29</sup> Siehe [Kul], S.19

<sup>30</sup> Siehe [Her], S.26

## 4. Entstehung eines Röntgenbildes

### 4.1 Bildentstehung

Einer der wichtigsten Effekte für die Bildentstehung an sich ist der fotografische Effekt der Röntgenstrahlen. Dieser Effekt ist mit der konventionellen Fotografie zu vergleichen<sup>31</sup>. So schwärzen neben Lichtstrahlen auch Röntgenstrahlen fotografische Emulsionen (Silberhalogenidemulsionen)<sup>32</sup>. Bei dieser Facharbeit wurde ein Film- Foliensystem verwendet, wie es auch in der Röntgendiagnostik eingesetzt wird (AGFA Curix HT1.000L Plus). Dieses System nutzt zusätzlich den Lumineszenzeffekt der Röntgenstrahlung, um die Schwärzung des Films zu verstärken. Auf dem eigentlichen Röntgenfilm befindet sich eine Fluoreszenzschicht, die sog. Verstärkungsfolie, die durch die Röntgenstrahlen zur Lichtemission angeregt wird<sup>31</sup>. Da Röntgenfilme von sichtbarem Licht mehr geschwärzt werden als von Röntgenstrahlen, macht dieser Effekt ca. 95% der Filmschwärzung aus, wohingegen der fotografische Effekt der Röntgenstrahlen nur 5% ausmacht<sup>32</sup>.

### 4.2 Bildgebung

Um die Phänomene bei der Bildgebung besser darstellen zu können, ist es einfacher, sich die Röntgenstrahlen als Elementarteilchen, sog. Quanten oder Photonen vorzustellen. Das heißt, man stellt sich diese elektromagnetischen Schwingungen als eine Vielzahl von Quanten unterschiedlicher Energie vor, die sich wellenförmig fortbewegen<sup>33</sup>.

#### 4.2.1 Kontrast

Der Kontrast des Bildes entsteht durch die unterschiedliche Schwächung der Röntgenstrahlen in dem zu röntgenden Objekt<sup>34</sup>. Dabei sind die Stellen, auf die die energiereichen, also kaum abgeschwächten Röntgenphotonen auftreffen später auf dem Film schwarz zu sehen. Stark abgeschwächte Photonen hingegen hinterlassen nur ganz helle Stellen auf dem Film. „Der Grad der Schwächung wird durch Absorptions- und Streuvorgänge an den Atomen des durchstrahlten Stoffes

---

<sup>31</sup> Vgl. [Her], S.34

<sup>32</sup> Vgl. [Hun], S.77f

<sup>33</sup> Vgl. [Her], S.31-36

<sup>34</sup> Vgl. [Hun], S.81

bestimmt.”<sup>35</sup>

Absorbiert wird ein Röntgenquant (Abb. 9), wenn es direkt auf ein Elektron des zu durchstrahlenden Objekts trifft und dabei seine gesamte Energie abgibt. Bei diesem Vorgang wird das Elektron aus dem Atom herausgelöst<sup>36</sup>. Deshalb muss die Energie des Quants größer sein, als die Bindungsenergie des Elektrons zum Atomkern, weil sonst das Röntgenphoton seine Energie nicht abgeben kann<sup>33</sup>. Der Grund dafür ist der Energieerhaltungssatz: Da sich ein Elektron nicht zwischen zwei Energieniveaus aufhalten kann, kann es Energien die kleiner sind als seine Bindungsenergie zum Kern nicht aufnehmen, was zu einem Energieverlust führen würde. Gibt ein solches Photon nun seine gesamte Energie ab, wird die restliche Energie, die nicht zum Herauslösen des Elektrons aus

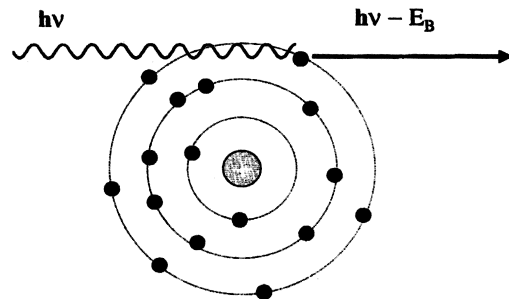


Abb. 9: Schematische Darstellung des Photoeffekts

dem Atom verwendet wurde, zu dessen Beschleunigung verwendet<sup>36</sup>. Da ein Röntgenquant keine Ruheenergie besitzt, hört es durch diesen Vorgang auf zu existieren. Das herausgelöste Elektron wird nun freies Photoelektron<sup>33</sup> genannt. Der gesamte Vorgang wird als Photoeffekt bezeichnet<sup>37</sup>. Die Wahrscheinlichkeit für sein Auftreten ist direkt proportional zur vierten Potenz der Ordnungszahl des durchstrahlten Objekts und indirekt proportional zur dritten Potenz der Photonenenergie<sup>36</sup>. Springt ein Elektron aus einer höhergelegenen Bahn auf den freigewordenen Platz des Photoelektrons, so entsteht auch hier charakteristische Röntgenstrahlung<sup>38</sup>.

Ein weiterer Effekt, der zur Schwächung der Röntgenstrahlung beiträgt, ist die sog. Streuung der Röntgenquanten.<sup>39</sup> Als Streuung bezeichnet man die Richtungswechslung der Röntgenstrahlung in Materie, die normalerweise mit „teilweiser Energieabgabe“<sup>40</sup> verbunden ist. In wenigen Fällen wechselt das Röntgenquant nur seine Richtung ohne dabei einen Teil seiner Energie abzugeben. Es tritt also in Wechselwirkung mit einem Elektron der Materie, behält dabei aber

---

<sup>35</sup> Siehe [TB], S.18f

<sup>36</sup> Vgl. [KK], S.15-17

<sup>37</sup> Vgl. [Hun], S. 11

<sup>38</sup> Vgl. [Her], S.36f

<sup>39</sup> Vgl. [Ewe], S. 12

<sup>40</sup> Siehe [TB], S.19

seine gesamte Energie. Diese Art von Streuung wird Rayleigh-Streuung oder auch kohärente Streuung (Abb. 10) genannt. Sie tritt jedoch nur bei Röntgenquanten mit niedriger Energie, also großer Wellenlängen  $\lambda$  auf<sup>38</sup>. Verliert das Photon jedoch Energie, so wird genau wie bei der Fotoabsorption immer ein Elektron aus dem Atomverbund herausgelös<sup>39</sup>. Im Gegensatz zur Absorption verschwindet das Quant jedoch nicht,

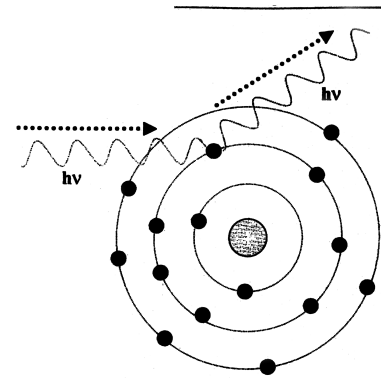


Abb. 10: Vereinfachte Darstellung der Rayleigh-Streuung

da es nur einen Teil und nicht seine gesamte Energie abgegeben hat. Es ändert seine Richtung (wird gestreut) und breitet sich anschließend zwar noch immer mit Lichtgeschwindigkeit, aber mit einer größeren Wellenlänge aus (s.Abb. 11). Dieser Vorgang wird auch inkohärente Streuung oder Compton- Effekt genannt<sup>38</sup>. Seine Auftretswahrscheinlichkeit ist direkt proportional zur Ordnungszahl des durchstrahlten Objekts und der Photonenenergie<sup>41</sup>. Da diese Quanten „u.U. den Detektor [hier: den Röntgenfilm] nicht mehr erreichen, ergibt sich eine scheinbare Absorption“<sup>42</sup>.

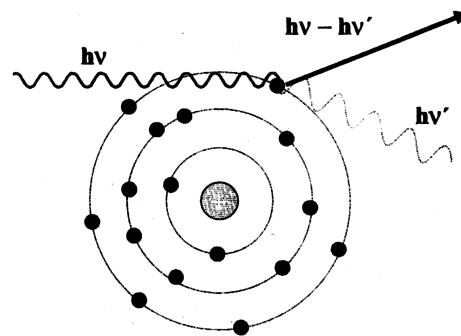


Abb. 11: Vereinfachte Darstellung des Compton - Effekts

Der Streueffekt überwiegt bei energiereicher (kurzwelliger) Strahlung, wohingegen bei weicher (langwelliger) die Absorption von größerer Bedeutung ist<sup>43</sup>. Die Schwächung der Strahlen hängt also von verschiedenen Größen ab: Zum Einen wird sie umso größer, je energieärmer (weicher) der Strahl ist. Des Weiteren nimmt die Schwächung mit steigender Dichte, Dicke und Ordnungszahl des Materials zu<sup>43</sup>, da in diesem Fall mehr Protonen sowie Elektronen vorhanden sind, an denen die Röntgenstrahlen absorbiert oder gestreut werden können. Somit ergibt sich für die Schwächung von monoenergetischer Röntgenstrahlung in Materie folgende Formel<sup>44</sup>:  $I = I_0 \cdot e^{-\mu d}$

I: Intensität nach Durchstrahlung der Materie  
 I<sub>0</sub>: Intensität vor der Materie  
 e: Basis des natürlichen Logarithmus

$\mu$ : linearer Schwächungskoeffizient  
 d: Dicke der zu durchdringenden Materie

<sup>41</sup> Vgl. [KK], S.17

<sup>42</sup> Siehe [KK], S.18

<sup>43</sup> Vgl. [TB], S.19

„Der lineare Schwächungskoeffizient  $\mu \left[ \frac{1}{\text{cm}} \right]$  ist ein quantitatives Maß für die Summe aller schwächenden Wechselwirkungen. Für die verschiedenen Prozesse aller Wechselwirkungen sind spezifische Koeffizienten definiert.“<sup>44</sup> Bei den in dieser Facharbeit verwendeten Beschleunigungsspannungen von 20-38 kV sind hier nur der Absorptionskoeffizient  $\tau$  und der Streukoeffizient  $\sigma$  von Bedeutung. Es gilt also näherungsweise:  $\mu = \tau + \sigma$ . Da diese Koeffizienten und der daraus resultierende lineare Schwächungskoeffizient proportional sind zur Dichte  $\rho$  des durchstrahlten Materials, führt man den Massenschwächungskoeffizienten  $\frac{\mu}{\rho} \left[ \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right]$  ein<sup>45</sup>. Die Abhängigkeit dieses Koeffizienten von der Energie des einfallenden Röntgenstrahls und der Ordnungszahl  $Z$  des zu durchstrahlenden Elements lässt sich innerhalb bestimmter Grenzen (außerhalb der Absorptionskanten, genaueres vgl. [Her], S. 44f) näherungsweise wie folgt darstellen<sup>46</sup>:  $\frac{\mu}{\rho} = \text{konst} \cdot \lambda^3 \cdot Z^3$  und damit:

$\mu = \text{konst} \cdot \rho \cdot \lambda^3 \cdot Z^3 = \text{konst} \cdot \rho \cdot \left( \frac{hc}{E} \right)^3 \cdot Z^3$ . Setzt man  $\mu$  in die Formel für die Intensität der Röntgenstrahlung nach dem Durchdringen der Probe ein, erhält man:

$$I = I_0 \cdot e^{-\text{konst} \cdot \rho \cdot \left( \frac{hc}{E} \right)^3 \cdot Z^3 \cdot d}$$

Diese Gleichung beweist die oben beschriebenen Zusammenhänge von Schwächung, Energie, Dichte, Dicke und Ordnungszahl.

Für monoenergetische Röntgenstrahlung der Energie 30 keV ergibt sich so beim Durchdringen einer 2 cm dicken Knochenschicht eine Restintensität von  $I = I_0 \cdot e^{-2,496 \text{cm}^{-1} \cdot 2 \text{cm}} = 0,006792 I_0$ . In Luft hingegen beträgt die Intensität

bei gleicher Strahlenenergie noch<sup>47</sup>  $I = I_0 \cdot e^{-0,00035 \text{cm}^{-1} \cdot 2 \text{cm}} = 0,9993 I_0$ .

Abb. 12 (s.S. 16) zeigt den Verlauf der Massenschwächungskoeffizienten von Knochen, Wasser und Fett, in Abhängigkeit zur Röhrenspannung und damit der Röntgenquantenenergie (s.Kap. 3). Wegen der hohen Wirksamkeit des Fotoeffekts bei niedrigen Quantenenergien, ist hier, wie auf dem Bild zu sehen, der Unterschied der Koeffizienten am höchsten.

<sup>44</sup> Siehe [Her], S.38

<sup>45</sup> Vgl. [Her], S.38

<sup>46</sup> Siehe [UG], Röntgenstrahlung

<sup>47</sup> Schwächungskoeffizienten  $\mu$  errechnet als  $(\mu/\rho)\rho$  aus [Her], S.40

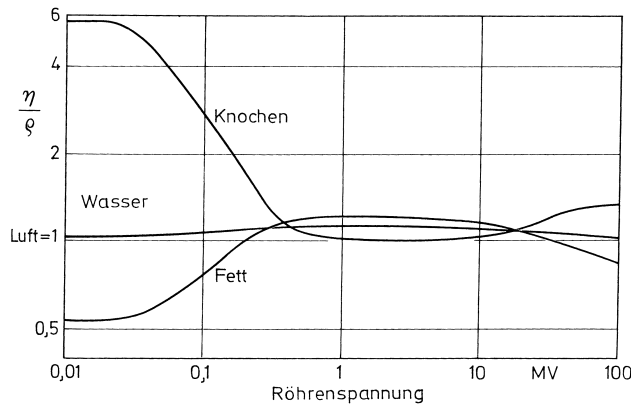


Abb. 12:  
Massenabsorptionskoeffizienten (hier  $\eta/\rho$  statt  $\mu/\rho$  genannt), in Abhängigkeit der Röhrenspannung für Knochen, Wasser und Fett

Auf Abb. 13 ist die Gesamtabsorption der Röntgenstrahlen in Abhängigkeit der Energie und den jeweils beteiligten Effekten zu sehen.

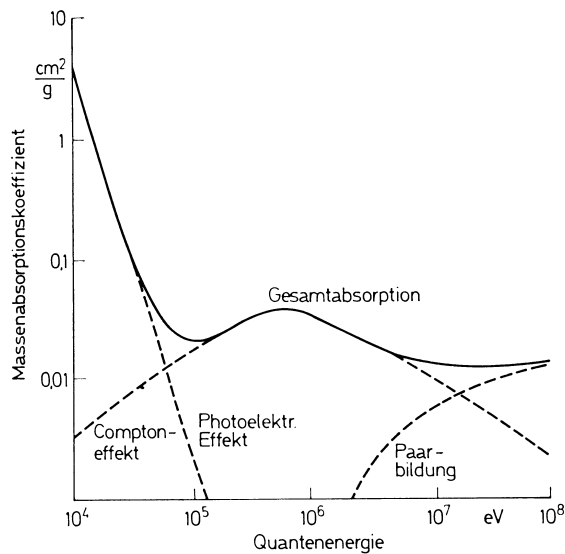


Abb. 13: Schematische Darstellung der Gesamtabsorption von Photonen in Materie, bezogen auf die jeweils beteiligten Effekte, in Abhängigkeit der Photonenenergie. Der ebenfalls abgebildete Paarbildungseffekt ist bei dieser Arbeit ohne Belang, da er erst ab Photonenenergien über 1,02 MeV auftritt und im praktischen Teil dieser Facharbeit die Photonen viel geringere Energien hatten.

#### 4.2.2 Bildschärfe

Eine Röntgenaufnahme, die ausschließlich durch die lokale Absorption der Röntgenquanten im Präparat entsteht ist sehr scharf. Die Bildschärfe nimmt jedoch in Abhängigkeit der zusätzlich auftretenden Streuung mancher Photonen ab. Dieser Effekt wirkt sich besonders bei langen Belichtungszeiten aus. Hinzu kommt die sog. geometrische Unschärfe, die durch die Größe des Fokus bedingt ist. Um diese möglichst gering zu halten sollte der Fokus und der Abstand zwischen dem Film und dem Objekt möglichst klein sein. Der Abstand zwischen Fokus und Objekt hingegen muss möglichst groß sein. Im Idealfall wird der Fokus als punktförmig angesehen<sup>48</sup>. Allerdings sollte man beachten, dass „ein kleiner Fokus weniger belastbar ist“<sup>49</sup>, da so die entstehende Hitze mehr auf einen Punkt konzentriert wird. Außerdem nimmt die Intensität der Röntgenstrahlen quadratisch zur Entfer-

<sup>48</sup> Vgl. [Ewe], S.49

<sup>49</sup> Siehe [Hun], S.81

nung der Röntgenquelle ab (s. Kap. 3.1). Dadurch ergeben sich bei zu großen Abständen ungünstig lange Belichtungszeiten, wodurch auf Grund des stets leicht instabilen Elektronenstrahls eine zusätzliche Unschärfe des Films entsteht.

## 5. Vorgehensweise für eine Aufnahme im REM

Grob vereinfacht kann man sich das REM folgendermaßen vorstellen:

Werden alle Elektronenlinsen, Spulen und Mittel der Bildgewinnung, wie z.B. die Detektoren, weggelassen, bleiben nur noch die Elektronenquelle und der Objektisch übrig. Ersetzt man nun den Objektträger, also die runde Platte, auf der sich das zu mikroskopierende Objekt gewöhnlich befindet, durch ein geeignetes Metall, erinnert das Elektronenmikroskop bereits stark an eine Röntgenröhre. Der einzige Unterschied ist nur noch, dass in der Röntgenröhre die Röntgenstrahlung direkt an der Anode, im sog. Brennfleck entsteht. Im Rasterelektronenmikroskop gibt es einen Zwischenschritt. Die Strahlung entsteht nicht an der Anode der Elektronenquelle, sondern erst auf der Metallfolie, die sich anstelle des Objektträgers befindet. Um diesen Effekt zu erzielen wird anstatt des Objektträgers ein kleines Kästchen aus Stahl (s. Abb. 15/16) in das Mikroskop eingesetzt. Auf der Oberseite dieses Kästchens befindet sich in der Mitte ein kleines Loch, in das die verschiedenen

Targets (Abb. 16,1), mit den jeweiligen Metallfolien eingesetzt werden. Direkt unter dieser Öffnung und somit unter den



Abb. 14: Fotografie des Präparathalters

jeweiligen Metallfolie befindet sich der

Präparathalter (Abb. 16,2), auf dem das zu röntgende Objekt befestigt wird. Somit ist sichergestellt, dass der entstehende Röntgenstrahl auch wirklich das Objekt trifft. Unter dem Präparathalter wiederum befindet sich eine Kassette (Abb. 16,3),



Abb. 15: Fotografie des Stahlkästchens

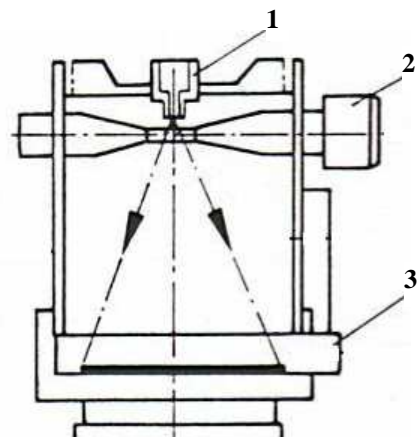


Abb. 16: Schematische Darstellung des Stahlkästchens



in die später der Röntgenfilm eingesetzt wird. Auf der Oberseite dieser Kassette ist eine schwarze, lichtundurchlässige Folie befestigt, die verhindert, dass der Röntgenfilm vor oder nach der Belichtung durch die Röntgenstrahlen, zusätzlich durch sichtbares Licht belichtet wird. Die Röntgenstrahlen hingegen können noch immer die Folie durchdringen und zum Film gelangen. Ist dieses Kästchen nun in das REM eingesetzt, wird zunächst die Oberseite der Metallfolie scharf gestellt. Somit ist sichergestellt, dass der Strahl nicht zu groß ist, wodurch ein unscharfes Röntgenbild entstehen würde (vgl. geometrische Unschärfe 4.2.2). Anschließend werden der Heizstrom der Glühkathode sowie die nötige Hochspannung ausgeschaltet. Daraufhin wird durch die Präparatschleuse die Kassette mit dem unbelichteten Röntgenfilm eingeführt. Ist sie richtig platziert und die Schleuse wieder geschlossen wird die Hochspannung und der Heizstrom wieder eingestellt. Die Einstellungen, die vorher zur Ausrichtung des Strahls benutzt wurden, bleiben dabei erhalten, da der Elektronenstrahl nur ausgeschaltet wurde. Das Einzige, das nun noch verändert werden muss, ist die punktförmige Einstellung des Strahls auf den Mittelpunkt der Metallfolie. Das heißt, der Elektronenstrahl läuft nun nicht mehr, wie für das Rasterelektronenmikroskop typisch, die gesamte Bildfläche ab, sondern bleibt auf einem Punkt stehen. Dadurch werden eine scharfe Aufnahme sowie die Bildentstehung an sich ermöglicht. Nach der gewünschten Belichtungszeit wird schließlich die Hochspannung wieder ausgestellt, der Film der Kassette entnommen und entwickelt.

## 6. Auswertung der Röntgenaufnahmen

Die Geräteeinstellungen, die für die Röntgenaufnahmen verwendet wurden, sowie die dazugehörigen Belichtungszeiten können dem Anhang entnommen werden. Des Weiteren sind dort im Text nicht angesprochene Aufnahmen zu sehen.

### 6.1 Präparation

Zum Überprüfen der Einstellungen des Geräts sowie der Ausstattung an sich wurden anfangs biologische Präparate verwendet, da sie auf Grund der geringeren Ordnungszahlen der enthaltenen Elemente leichter zu durchleuchten sind als technische (s. Kapitel 4.2.1). Ein Vorteil der Röntgenmikroskopie ist die relativ einfache Herstellung der Präparate. Sie müssen lediglich klein genug sein um in das Stahlkästchen hineinzupassen und biologische Präparate müssen zusätzlich

mindestens einen Tag luftgetrocknet werden<sup>50</sup>. Der Vergleich der Aufnahme 38, die ein nasses Sukkulentenblatt darstellt, mit Aufnahme 40, auf der das selbe Präparat in getrocknetem Zustand zu sehen ist, macht dies sehr deutlich. Es ist klar zu erkennen, dass die Aufnahme des nassen Präparats viel verschwommener ist, als die des trockenen Sukkulentenblattes und an den sehr wasserreichen Stellen kein Kontrast entsteht. So ist auf Bild 38 nur ein großer schwarzer Fleck zu erkennen, wo später (in Bild 40) klare Konturen sichtbar werden. Grund dafür sind die in dem Blatt enthaltenen und im Zellwasser gelösten Stoffe und Salze. Durch ihren gelösten Zustand ist der Dichteunterschied zwischen den einzelnen Stoffen nicht so hoch, wie der im getrockneten Zustand, weshalb der Kontrast bei dem nassen Präparat schlechter ist als bei dem



Bild 38

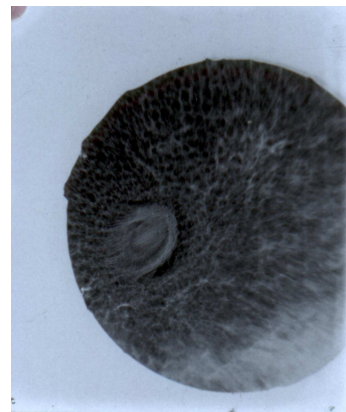


Bild 40

getrockneten. Die Unschärfe des Bilds 40 ist auf das sich verschlechternde Vakuum zurückzuführen. Durch die beim Röntgen entstehende Hitze und das Vakuum im Gerät verdampfte das Wasser im Präparat, weshalb der Druck innerhalb des REM von den gewöhnlichen  $1 \times 10^{-5}$  auf  $4 \times 10^{-4}$  mbar stieg. Dadurch wird der Elektronenstrahl und somit auch der Fokus instabil.

## 6.2 Auswirkung der Aufnahme-Einstellungen auf das entstehende Röntgenbild

### 6.2.1 Target-Objektabstand

Das Problem der Unschärfe ergibt sich ebenfalls bei einem zu kleinen Abstand zwischen dem Target und dem zu durchleuchtenden Objekt. Bild 58 zeigt eine stark vergrößerte Aufnahme eines Gitternetzchens, wie es in der Transmissionselektronenmikroskopie als Präparathalter eingesetzt wird. Der Abstand zwischen



Bild 58

---

<sup>50</sup> Vgl. [Thi], S.78

Röntgenquelle (Target) und Objekt betrug dabei nur 0,5 mm. Da die Maschenweite des Gitters 300 mesh (eine Masche nach ca. 0,08467 mm, mesh = Maschen pro 25,4 mm) betrug und drei Maschen auf zwei Zentimetern zu sehen sind wurde zwar eine ca.  $\frac{300 : 25,4}{3 : 20} \approx 80$  fache Vergrößerung erreicht, allerdings ist das Bild sehr unscharf. Schuld daran ist der stets leicht instabile Elektronenstrahl des Mikroskops. Dieser Effekt wirkt sich allerdings bei geringeren Vergrößerungen, also größerem Target-Objektstand weniger aus, wie bei dem Vergleich von Bild 6 und Bild 7, das eine geringere Vergrößerung hat als Bild 6, zu sehen ist. Bei den restlichen Bildern wurde eine ca. 10-30 fache Vergrößerung erzielt.

### 6.2.2 Elektronenstrahldurchmesser

Dasselbe Problem lässt sich bei einem zu großen Elektronenstrahldurchmesser und damit Röntgenstrahlenfokus feststellen, da in diesem Fall wie in Kapitel 4.2.2 erläutert die geometrische Unschärfe des Films zunimmt. Deshalb konnte



Bild 22

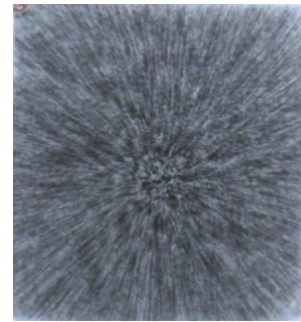


Bild 23

die starke Streuung von der ersten Aufnahme des 600er Schmirgelpapiers (Bild 22) bei der zweiten (Bild 23) durch eine Erhöhung der Kondensorraste und damit einer Verringerung des Fokusbereichs beseitigt werden.

### 6.2.3 Belichtungszeit

Ein ganz andere Effekt, der durch die verschiedenen Aufnahmeeinstellungen hervorgerufen wird, ist der der unterschiedlich starken Filmschwärzung. Die allereinfachste Methode ist die Belichtungszeit der Aufnahme zu erhöhen. Dadurch treffen insgesamt mehr Röntgenphotonen auf dem Röntgenfilm auf, wodurch eine erhöhte Schwärzung des Films erreicht wird. Nimmt man Bild 5 und Bild 6 zur Hand, so kann man gut erkennen, das Bild 5 bei einer



Bild 5



Bild 6

Belichtungszeit von 9 Minuten, bei sonst gleicher Einstellung des Geräts deutlich dunkler ist als Bild 6, das nur 6 Minuten lang belichtet wurde.

### 6.2.4 Heizstrom

Erhöht man den Heizstrom der Glühkathode wird ebenfalls die Intensität der Röntgenstrahlen erhöht. Aufgrund der so erhöhten Emission der Kathode sind mehr Elektronen vorhanden, die Röntgenstrahlen erzeugen. Das heißt, es

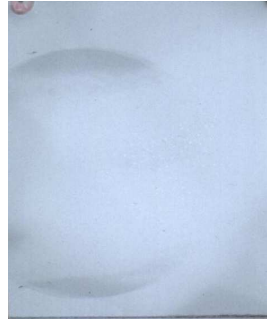


Bild 36



Bild 37

kommen mehr Quanten auf dem Film an, wodurch auf dem Film dunklere Stellen entstehen als bei einer geringeren Einstellung des Heizstroms. Film 36 ist bei einem Heizstrom von 120 µA kaum geschwärzt, wohingegen bei Film 37 aufgrund einer Erhöhung des Stroms auf 210 µA das Sukkulentenpräparat deutlich zu erkennen ist.

### 6.2.5 Beschleunigungsspannung

Das gleiche Ziel wird durch eine Erhöhung der Beschleunigungsspannung  $U_B$  des Elektronenstrahls erreicht. Dadurch entstehen Quanten mit höheren Energien, da die Eindringtiefe der Elektronen in das Target erhöht wird (vgl. auch



Bild 6

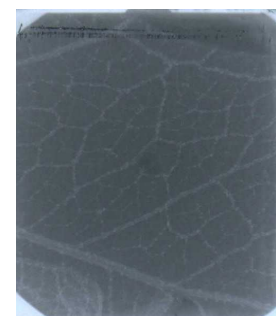


Bild 7

Kap. 3.1), wie auch anhand der unterschiedlichen Grenzwellenlängen der Quanten erkennbar ist. Eine Erhöhung der Spannung von 20kV auf 30kV bewirkt z.B., dass sich die Grenzwellenlänge von

$$\lambda_{20} = \frac{hc}{eU_B} = \frac{6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 20000 \text{ V}} = 6,1991 \cdot 10^{-2} \text{ nm}$$

$$\lambda_{30} = \frac{6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 30000 \text{ V}} = 4,1327 \cdot 10^{-2} \text{ nm}$$

verkürzt. Anhand von Bild 6 und 7 ist ein solcher Unterschied gut zu sehen, da Bild 6, das nur bei einer Spannung von 20 kV entstand viel heller ist als Bild 7, bei dem eine Spannung

von 30 kV angelegt war. Im Anhang können der Tabelle 1 weitere Grenzwellenlängen entnommen werden.

### 6.2.6 Target

Bei manchen Objekten genügt es jedoch nicht mehr, die obig genannten Einstellungen zu verändern, um eine ausreichende Schwärzung des Films zu erzielen. In diesen Fällen kann ein Wechsel des Targets von Nutzen sein. Durch die unterschiedlichen Metalle der Targets ergibt sich ein jeweils anderer Wirkungsgrad der Röntgenstrahlenerzeugung (s. Kap. 3.1):

Für die verwendeten Aluminium-, Titan- und Molybdäntargets ergeben sich somit mit der Formel in Abhängigkeit der angelegten Spannung folgende Wirkungsgrade:  $\eta = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ V}^{-1} \cdot U_R \cdot Z$

Aluminium:

$$\eta_{25} = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ V}^{-1} \cdot 25000 \text{ V} \cdot 13 = 3,6 \cdot 10^{-4}$$

$$\eta_{30} = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ V}^{-1} \cdot 30000 \text{ V} \cdot 13 = 4,3 \cdot 10^{-4}$$

$$\eta_{35} = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ V}^{-1} \cdot 35000 \text{ V} \cdot 13 = 5,0 \cdot 10^{-4}$$

Titan:

$$\eta_{25} = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ V}^{-1} \cdot 25000 \text{ V} \cdot 22 = 6,1 \cdot 10^{-4}$$

$$\eta_{30} = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ V}^{-1} \cdot 30000 \text{ V} \cdot 22 = 7,3 \cdot 10^{-4}$$

$$\eta_{35} = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ V}^{-1} \cdot 35000 \text{ V} \cdot 22 = 8,5 \cdot 10^{-4}$$

Molybdän:

$$\eta_{25} = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ V}^{-1} \cdot 25000 \text{ V} \cdot 42 = 1,2 \cdot 10^{-3}$$

$$\eta_{30} = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ V}^{-1} \cdot 30000 \text{ V} \cdot 42 = 1,4 \cdot 10^{-3}$$

$$\eta_{35} = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ V}^{-1} \cdot 35000 \text{ V} \cdot 42 = 1,6 \cdot 10^{-3}$$

	<b>Aluminium</b>	<b>Titan</b>	<b>Molybdän</b>
<b><math>\eta</math> bei <math>U_R = 25 \text{ kV}</math></b>	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
<b><math>\eta</math> bei <math>U_R = 30 \text{ kV}</math></b>	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
<b><math>\eta</math> bei <math>U_R = 35 \text{ kV}</math></b>	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$8,5 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 1: Auflistung der Wirkungsgrade der Röntgenstrahlenentstehung in Abhängigkeit der Spannung und des verwendeten Targets

In Abhängigkeit des eingesetzten Targets verändert sich jedoch nicht nur der Wirkungsgrad der Röntgenstrahlenerzeugung, sondern es entstehen auch unterschiedlich energiereiche charakteristische Röntgenstrahlen (s. Kap. 3.3). Für die

$K_{\alpha}$ -Linie von Molybdän ergibt sich beispielsweise eine Wellenlänge von ,

$$\lambda_{\text{Mo}} = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{17374,3\text{V} \cdot 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 0,071359\text{nm} \quad \text{wohingegen Titan}$$

eine Wellenlänge von  $\lambda_{\text{Ti}} = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{4504,86\text{V} \cdot 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 0,27522\text{nm}$

und Aluminium nur eine von

$$\lambda_{\text{Al}} = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1486,27\text{V} \cdot 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 0,83418\text{nm} \quad \text{hat.}^{51}$$

### 6.3 Biologische Präparate

Für die Aufnahmen der biologischen Präparate wurden das Aluminium- und das Titantarget verwendet. Vergleicht man jedoch die Aufnahmen, die mit den beiden Targets gemacht wurden, so lässt sich feststellen, dass die Schwärzung des Films, die durch das Aluminiumtarget erzeugt wurde geringer ist, als die des Titantargets. Außerdem ergaben sich bei dem Aluminiumtarget unpraktisch lange Belichtungszeiten, da die damit erzeugten Röntgenstrahlen die Plastikfolie auf der Oberseite der Filmkassette nur sehr schwer durchdringen können. Somit lässt sich feststellen, dass das Titantarget für biologische Präparate besser geeignet ist. Lediglich für die Aufnahme der Assel (Bild 54) wäre dieses Target nicht mehr geeignet gewesen. Wegen des dicken Chitinpanzers, der sich zusätzlich noch überlappt, ist trotz der Verwendung des Molybdäntargets und der für biologische Objekte langen Belichtungszeit von 8 Minuten die Schwärzung auf dem Bild noch nicht optimal. Ein zusätzliches Problem, das sich bei biologischen Präparaten ergibt, lässt sich anhand des Sukkulentenpräparates erkennen. Bereits nach drei Aufnahmen war das anfänglich nasse Blatt völlig durchgetrocknet und leicht bräunlich. Deshalb muss man beim Röntgen von biologischen Präparaten sehr vorsichtig sein, um zu verhindern, dass diese durch die entstehende Hitze (vgl. Kap. 3.1) verbrennen. Folglich muss bei empfindlichen Präparaten darauf geachtet werden, dass der Abstand zwischen dem Präparat und dem Target nicht zu gering und die Belichtungszeit, sowie die Energie der Röntgenstrahlen nicht zu hoch ist.

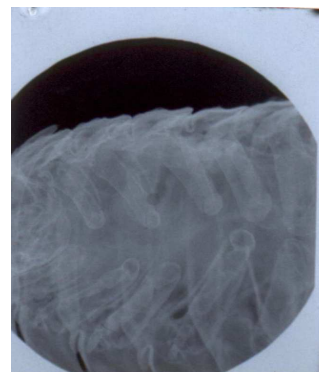


Bild 54

---

<sup>51</sup> Energiedifferenzen der Schalen aus [CRC], Seiten E-145 und E-147

## 6.4 Technische Präparate

Das Titantarget war sogar für einige technische Präparate gut einsetzbar. Für dieses Aufnahmen wurde lediglich die Beschleunigungsspannung der Elektronen erhöht. So ergab sich bei den recht dünnen Objekten wie dem Schmirgelpapier (Bild 26) und dem Kugellagerkäfig (Bild 24) auch hier eine gute Schwärzung des Films. Für dickere Objekte, wie den Chip Nr.1 (integrierte Schaltung) ist dieses Target jedoch nicht mehr geeignet, da bei diesen Aufnahmen keine Röntgenstrahlen mehr das Präparat durchdringen konnten (vgl. Bild 16). Hier ergab sich zusätzlich das Problem, dass der Chip Nr.1 Bauteile aus Elementen mit hoher und zusätzlich kaum unterschiedlicher Ordnungszahl enthält. Aus diesem Grund

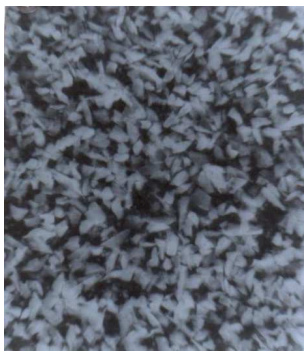


Bild 26

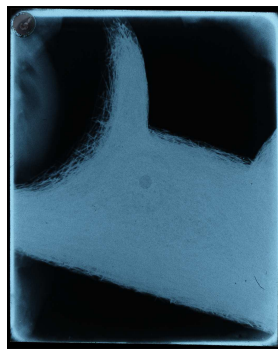


Bild 24



Bild 16



Bild 43



Bild 27

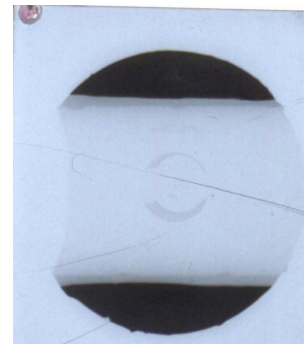


Bild 53

ist der Kontrast auf Bild 43 relativ schlecht und außerdem kaum eine Schwärzung vorhanden, obwohl der Film mit der harten Strahlung des Molybdäntargets 11 Minuten lang belichtet wurde. Dasselbe Problem war auch bei dem geröntgten Transistor (Bild 27) und dem Widerstand (Bild 53) festzustellen. Selbst wenn man hier ein Molybdäntarget bei einer längeren Belichtungszeit verwendet hätte, wäre auch hier kein guter Kontrast zu erwarten gewesen.

Die geringe Schwärzung kann dabei jedoch nicht an der Plastikhülle dieser Objekte liegen. Film 47 (s.S. 25) zeigt ein Stück eines Plastikhefters. Die Einstellungen, sowie Belichtungszeit waren dabei genauso lang, wie die bei Film 42, wobei die Aufnahme des geröntgten Plastikheftstreifens deutlich schwärzer ist. Die helleren Streifen links und rechts des Plastikstreifens rühren von der Klebmasse her, mit

der der Streifen auf dem Präparathalter befestigt wurde. Auf diesem Bild ist die Abhängigkeit der Röntgenstrahlenabsorption von der Dicke des durchstrahlten Materials gut zu sehen, da die leichte Struktur auf dem Film aus-

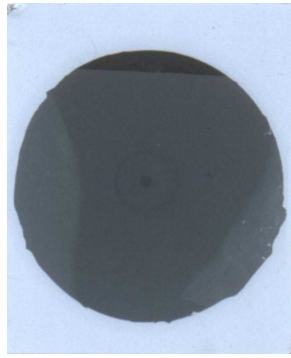


Bild 47



Bild 42

schließlich durch die unterschiedliche Dicke des Objekts entstand. Gleichzeitig kann man jedoch auch erkennen, dass bei homogenen Präparaten, die (fast) nur aus einem Stoff sind kein ausgeprägter Kontrast entsteht. Da die Röntgenstrahlen also durch den Plastikstreifen so gut durchkommen, kann die geringe Schwärzung bei den Aufnahmen 42 und 43 nicht an der Platikhülle des Chip Nr.1 liegen, sondern muss vor allem auf die enthaltenen schweren Elemente zurückzuführen sein. Erst bei einer Belichtungszeit von 10 Minuten und einer Erhöhung des Heizstroms entstand eine gute Aufnahme

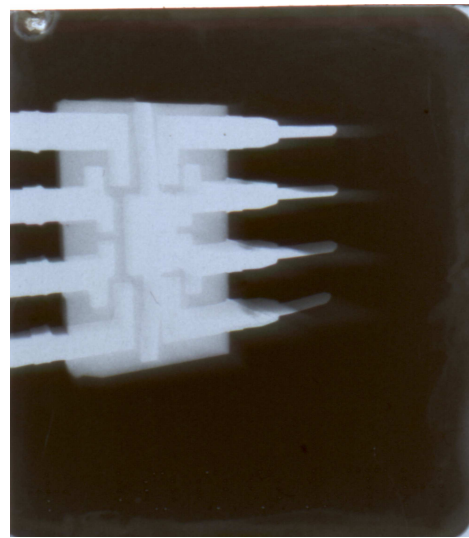


Bild 49

(Bild 49). Zusätzlich wurde bei diesem Bild der Abstand zum Target vergrößert und der Chip Nr.1 nicht auf dem Präparathalter, sondern an den Innenwänden des Stahlkästchens befestigt. Dadurch wurde vermieden, dass bei zu großer Vergrößerung zufällig nur ein homogenes Bauteil des Chips belichtet wurde und deshalb kein Kontrast entsteht. Allerdings sank das Präparat leider zu Beginn der Belichtungszeit auf der einen Seite nach unten. Deshalb sind leichte Schattenspurten auf der rechten Seite des Bildes zu sehen und das Objekt ist etwas schräg abgebildet. Aus diesem Grund wurde Chip Nr.2 (Bild 48, s.S. 25) direkt auf die Oberseite der Filmkassette gelegt. Dabei sind die

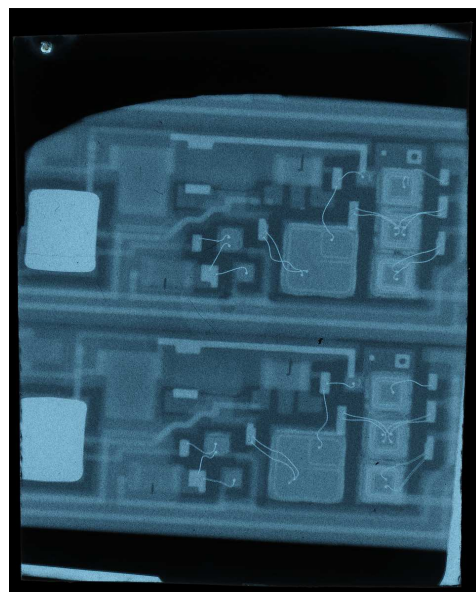


Bild 48



Drahtbahnen innerhalb des Plastiks sowie die Drahtverbindungen zwischen den einzelnen Elementen sehr schön zu sehen. Daraus lässt sich schließen, dass die einzelnen Elemente des Chip Nr.2 viel unterschiedlicher sind, als die des Chip Nr.1. Auf der linken Seite des Bildes ist jedoch dasselbe Problem festzustellen, da die zwei dickeren quadratischen Bauteile auf dem Film nur als gleichmäßig helle Stellen zu sehen sind.

## 7. Ausblick

Dieses Verfahren der kombinierten Röntgenmikroskopie und -fotografie wurde bereits vor 18 Jahren unter anderem bei Siemens erforscht. Da es jedoch sehr aufwendig ist, weil für ein Bild im Schnitt 30 Minuten gebraucht werden und außerdem die Technik des Elektronenmikroskops recht anfällig ist, wurde die Forschung an dieser Methode bald aufgegeben<sup>52</sup>. So konnten auch bei dieser Arbeit die letzten geplanten Aufnahmen, wie zum Beispiel die eines geröntgten Kristalls, wegen eines technischen Defektes nicht mehr durchgeführt werden. Heutzutage gibt es jedoch technisch verbesserte Geräte, die vor allem für die Materialanalyse sehr aufschlussreich sind. Die Röntgenmikroskopie ist auch aufgrund der einfachen Präparation sehr beliebt. Die Firma Gatan stellt heute Röntgenmikroskope her, die auf der Funktionsweise eines Rasterelektronenmikroskops beruhen. Diese sind mit einem digitalen Bildsystem versehen, das ein Ansehen des Bildes schon während der Aufnahme ermöglicht. Dadurch wird Zeit gespart und die Bildeinstellung kann auch während der Aufnahme noch verändert werden. Ein weiterer Vorteil dieses Mikroskops ist, dass sowohl eine zweidimensionale als auch eine dreidimensionale Ansicht der Präparate möglich ist.

Ein Vorschlag meinerseits, der es ermöglichen würde größere Objekte zu röntgen, wäre eine weitere Vorrichtung in der Wand des zur Röntgenfotografie benötigten Stahlkästchens, unterhalb des Präparathalters, einzurichten. Dadurch könnten außerdem Probleme, wie sie bei Chip Nr.1 auftraten, bei dem durch die zu starke Vergrößerung nur noch ein Bauteil zu sehen war, verhindert werden.

---

<sup>52</sup> Gespräch mit Herrn Thieringer

## Anhang

### Anhangsverzeichnis:

1.	Literaturverzeichnis .....	S. 28
1.1	Buchquellen .....	S. 28
1.2	Internetquellen .....	S. 29
2.	Bildquellen.....	S. 29
3.	Rechnung und Tabelle zu Kapitel 6.....	S. 30
4.	Weitere Röntgenaufnahmen .....	S. 31
5.	Aufnahmeeinstellungen für die Röntgenbilder.....	S. 32

## 1. Literaturverzeichnis

### 1.1 Buchquellen

- [Ale]: Alexander, Helmut: Physikalische Grundlagen der Elektronenmikroskopie. Stuttgart, Teubner Studienbücher, 1997
- [BW]: Brachner, Alto und Wolfschmidt, Gudrun: Röntgenstrahlen-Entdeckung, Wirkung, Anwendung. München, Dt. Museum Verlag, 1995
- [CRC]: Weast, Robert C.: CRC Handbook of Chemistry and Physics. A Ready-Reference Book of Chemical and Physical Data, Ohio, 1977<sup>58</sup>
- [Ewe]: Ewen, Klaus: Moderne Bildgebung- Physik, Gerätetechnik, Bildbearbeitung und -kommunikation, Strahlenschutz, Qualitätskontrolle. Stuttgart, Georg Thieme Verlag, 1998
- [FHK]: Flegler, Stanley und Heckmann John und Klomparens, Karen: Elektronenmikroskopie- Grundlagen - Methoden - Anwendungen. Heidelberg. Spektrum, Akad. Verlag, 1995
- [Her]: Hertrich, Peter: Röntgenaufnahme-technik- Grundlagen und Anwendungen. Erlangen, Publicis Corporate Publishing, 2004
- [Kul]: Kulenkampff, H.: Röntgenstrahlen- Zum fünfzigjährigen Jubiläum ihrer Entdeckung. München, Leibniz Verlag, 1948, 16. Jahrgang, Heft 1
- [Hun]: Hundeshagen, Heinz: Radiologie. Berlin/Heidelberg/New York, Springer Verlag, 1978
- [Hug]: Hug, O.: Medizinische Strahlenkunde- Biophysikalische Einführung für Studierende und Ärzte. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 1974
- [KK]: Kiefer, Jürgen und Kiefer, Ingmar: Allgemeine Radiologie- Strahlenanwendung - Strahlenwirkung - Strahlenschutz. Berlin/Wien, Blackwell Verlag, 2003
- [MLD]: Müller und Leitner und Dilg: Physik Leistungskurs 3. Semester Theorie der Wärme Atomphysik. München, Oldenbourg Schulbuchverlag, 1989<sup>7</sup>
- [MLDM]: Müller und Leitner und Dilg und Mráz: Physik Leistungskurs 2. Semester Elektromagnetische Schwingungen und Wellen, Wellenoptik Relativitätstheorie. München, Oldenbourg Schulbuchverlag, 1990<sup>8</sup>
- [TB]: Thurn, Peter und Bücheler, Egon: Einführung in die Röntgendiagnostik. Stuttgart/New York, Thieme Verlag, 1982<sup>7</sup>

[Thi]: Thieringer, Hans- Martin: Röntgen- Projektionsmikroskopie im Rasterelektronenmikroskop, In: Physik in unsere Zeit, Nr.2 März 1990, S. 74-80

## 1.2 Internetquellen

[UU]: <http://www.uni-ulm.de/elektronenmikroskopie/rem2000/rem.html>,  
gelesen am 10.09.2007

[UG]: <http://pcweb.physik.uni-giessen.de/schulpraktikum/R%C3%B6ntgenstrahlung%20Teil%202.PDF>,  
gelesen am 23.11.2007

[Zit]: <http://www.zitate.de/ergebnisse.php?sz=3&stichwort=&kategorie=Wissenschaft&autor=&linka=kategorie>, gelesen am 10.01.2008

## 2. Bildquellen

Abb. 1: siehe [FHK], S.84

Abb. 2: eigene Fotografie

Abb. 3: siehe [Ale], S.67

Abb. 4: siehe [www.uni-leipzig.de/~biophys/lehre/theo\\_prakt/theo\\_v07.pdf](http://www.uni-leipzig.de/~biophys/lehre/theo_prakt/theo_v07.pdf)

Abb. 5: siehe [Her], S.26

Abb. 6: verändertes Bild aus [TB], S.17

Abb. 7: siehe [Her], S.22

Abb. 8: siehe [KK], S.4

Abb. 9: siehe [KK], S.15

Abb. 10: siehe [KK], S.7

Abb. 11: siehe [KK], S.15

Abb. 12: siehe [Hun], S.13

Abb. 13: siehe [Hug], S.11

Abb. 14: eigene Fotografie

Abb. 15: eigene Fotografie

Abb. 16: verändertes Bild aus [Thi], S.76

### 3. Rechnung und Tabelle zu Kapitel 6

Berechnung der Grenzwellenlängen der entstehenden Röntgenspektren:

$$f_g = \frac{e \cdot U_R}{h} \Rightarrow \lambda_g = \frac{h \cdot c}{e \cdot U_R}$$

$$\lambda_{20} = \frac{6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 20000 \text{ V}} = 6,1991 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

$$\lambda_{25} = \frac{6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 25000 \text{ V}} = 4,9593 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

$$\lambda_{30} = \frac{6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 30000 \text{ V}} = 4,1327 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

$$\lambda_{33} = \frac{6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 33000 \text{ V}} = 3,7570 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

$$\lambda_{35} = \frac{6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 35000 \text{ V}} = 3,5423 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

$$\lambda_{36} = \frac{6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 36000 \text{ V}} = 3,4439 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

$$\lambda_{37} = \frac{6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 37000 \text{ V}} = 3,3509 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

$$\lambda_{38} = \frac{6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 38000 \text{ V}} = 3,2627 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

$U_R / \text{kV}$	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>33</b>	<b>35</b>	<b>36</b>	<b>37</b>	<b>38</b>
$\lambda_g / \text{nm}$	0,06	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
	1991	9593	1327	7570	5423	4439	3509	2627

Tabelle 2: Auflistung der Grenzwellenlängen des entstehenden Röntgenspektrums in Abhängigkeit der Beschleunigungsspannung  $U_R$

#### 4. Weitere Röntgenaufnahmen



Bild 15: Röntgenaufnahme einer Fliege



Bild 29: Röntgenaufnahme des Chip Nr. 1

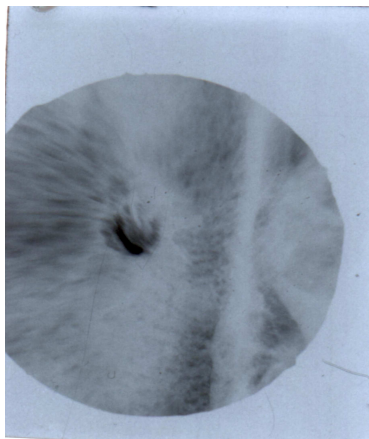


Bild 41: Röntgenaufnahme eines Sukkulenteblattes

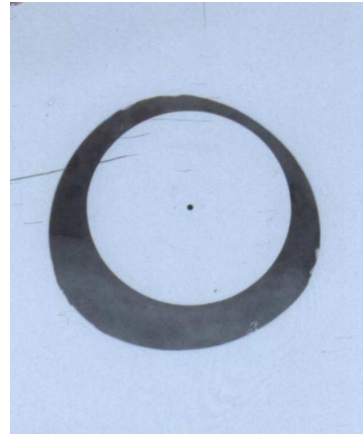


Bild 50: Röntgenaufnahme einer 70µm - Blende



Bild 52: Röntgenaufnahme einer Eierschale

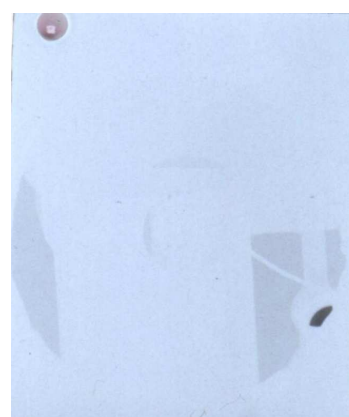


Bild 56: Röntgenaufnahme des Chip Nr. 3

## 5. Aufnahmeeinstellungen für die Röntgenbilder

Nr.	Objekt	Tar- get	$U_B$ / kV	Zeit / min	Kon- denso r-raste	Abstand Quelle- Präp. / mm	$I_H$ / $\mu$ A	Vaku- um / mbar
1	Blatt	Al	20	4`	1 /100	5	120	$1 \cdot 10^{-5}$
2	Blatt	Al	20	7`	1 /100	5	120	$1 \cdot 10^{-5}$
3	Blatt	Al	20	7`	3 /100	5	120	$1 \cdot 10^{-5}$
4	Blatt	Al	20	10`	5 /100	5	120	$1 \cdot 10^{-5}$
5	Blatt	Al	20	9`	2 /100	2	120	$1 \cdot 10^{-5}$
6	Blatt	Al	20	5`	2 /100	2	120	$1 \cdot 10^{-5}$
7	Blatt	Al	30	5`	2 /100	4	120	$1 \cdot 10^{-5}$
8	Blatt	Al	30	7`	1 /100	4	120	$1 \cdot 10^{-5}$
9	Blatt	Ti	25	7`	1 /100	4	120	$1 \cdot 10^{-5}$
10	Blatt	Ti	25	10`	2 /100	4	120	$1 \cdot 10^{-5}$
11	Blatt	Ti	25	5`	3 /100	4	120	$1 \cdot 10^{-5}$
12	Blatt	Ti	25	4,5`	4 /100	4	120	$1 \cdot 10^{-5}$
13	Fliege	Ti	25	6`	4 /100	4	120	$1 \cdot 10^{-5}$
14	Fliege	Ti	25	6`	5 /100	4	120	$1 \cdot 10^{-5}$
15	Fliege	Ti	25	7`	6 /100	4	120	$1 \cdot 10^{-5}$
16	Chip Nr.1	Ti	25	5`	4 /100	3	120	$1 \cdot 10^{-5}$
17	Chip Nr.1	Ti	25	10`	4 /100	3	120	$1 \cdot 10^{-5}$
18	Chip Nr.1	Ti	25	10`	1 /100	3	120	$1 \cdot 10^{-5}$
19	Zehnerdiod e	Ti	35	10`	1 /100	3	120	$1 \cdot 10^{-5}$
20	Zehnerdiod e	Ti	35	10`	1 /100	3	120	$1 \cdot 10^{-5}$
21	Zehnerdiod e	Ti	35	10`	1 /100	3	120	$1 \cdot 10^{-5}$
22	600er Schmirgel- papier	Ti	35	6`	1 /100	3	120	$1 \cdot 10^{-5}$
23	600er Schmirgel- papier	Ti	35	8`	3 /100	3	120	$1 \cdot 10^{-5}$
24	Kugellager- käfig aus Glasfaser	Ti	35	3`	3 /100	3	120	$1 \cdot 10^{-5}$

25	Kugellagerkufig aus Glasfaser	Ti	35	5`	4 /100	3	120	1·10 <sup>-5</sup>
26	240er Schmirgelpapier	Ti	35	5`	4 /100	3	120	1·10 <sup>-5</sup>
27	Transistor	Ti	35	5`	3 /100	3	120	1·10 <sup>-5</sup>
28	Chip Nr.1	Mo	38	6,5`	3 /100	3	120	1·10 <sup>-5</sup>
29	Chip Nr.1	Mo	38	4`	3 /100	3	120	1·10 <sup>-5</sup>
30	Chip Nr.1	Mo	34	5`	3 /100	3	120	1·10 <sup>-5</sup>
31	Chip Nr.1	Mo	34	15`	3 /100	3	120	1·10 <sup>-5</sup>
32	Sukkulente trocken (1)	Ti	35	5`	3 /100	4	120	1·10 <sup>-5</sup>
33	Sukkulente trocken (1)	Ti	35	8`	3 /100	4	120	1·10 <sup>-5</sup>
34	Sukkulente trocken (1)	Ti	35	5`	3 /100	4	120	1·10 <sup>-5</sup>
35	Sukkulente trocken (1)	Ti	35	5`	4 /100	5	120	1·10 <sup>-5</sup>
36	Sukkulente trocken (1)	Ti	35	5`	3 /100	5	120	1·10 <sup>-5</sup>
37	Sukkulente trocken (1)	Ti	35	5`	3 /100	5	210	1·10 <sup>-5</sup>
38	Sukkulente nass (2)	Ti	35	7`	3 /100	5	210	1·10 <sup>-4</sup>
39	Sukkulente nass (2)	Ti	35	5`	4 /100	5	210	5·10 <sup>-4</sup>
40	Sukkulente nass (2)	Ti	35	7`	5 /100	5	210	1·10 <sup>-5</sup>
41	Sukkulente feucht (3)	Ti	35	5`	3 /100	4	210	1·10 <sup>-4</sup>
42	Chip Nr.1	Mo	36	6`	3 /100	3	210	1·10 <sup>-5</sup>
43	Chip Nr.1	Mo	36	11`	3 /100	3	210	1·10 <sup>-5</sup>
44	Fett mit Nanopartikeln	Ti	33	3`	3 /100	4	120	1·10 <sup>-5</sup>
45	Fett mit Nanopartikeln	Ti	35	3`	3 /100	5	200	1·10 <sup>-5</sup>
46	Plastikheftstreifen	Mo	35	6`	3 /100	5	210	1·10 <sup>-5</sup>
47	Plastikheftstreifen	Mo	35	6`	3 /100	5	210	1·10 <sup>-5</sup>
48	Chip Nr.2 (direkt über Filmkassette)	Mo	35	10`	1 /100	35	210	1·10 <sup>-5</sup>



49	Chip Nr.1 (in der Mitte über Film- kassette)	Mo	35	10`	3 /100	20	210	1·10 <sup>-5</sup>
50	70 µm- Blende	Mo	35	5`	3 /100	6	210	1·10 <sup>-5</sup>
51	Eierschale	Mo	35	7`	3 /100	6	210	1·10 <sup>-5</sup>
52	Eierschale	Mo	35	8`	3 /100	2	210	1·10 <sup>-5</sup>
53	Widerstand	Mo	35	8`	3 /100	5	210	1·10 <sup>-5</sup>
54	Assel	Mo	35	8`	3 /100	5	210	1·10 <sup>-5</sup>
55	Zehnerdiod e	Mo	35	12`	3 /100	5	210	1·10 <sup>-5</sup>
56	Chip Nr.3	Mo	35	10`	3 /100	5	210	1·10 <sup>-5</sup>
57	Kupfernetz 300 mesh	Mo	35	6`	3 /100	5	210	1·10 <sup>-5</sup>
58	Kupfernetz 300 mesh	Mo	35	7`	3 /100	0,5	210	1·10 <sup>-5</sup>

## Erklärung

Ich erkläre, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.

..... , den .....

Ort

Datum

Unterschrift