



V603

Röntgenemission und -absorption

Pelle Ofenbach
pelle.ofenbach@udo.edu

Robert Appel
robert.appel@udo.edu

Durchführung: 25.04.17

Abgabe: 02.05.17

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
2	Durchführung	3
3	Auswertung	4
3.1	Bragg-Bedingung	4
3.2	Emissionsspektrum	5
3.3	Absorbtionsspektrum	6
4	Diskussion	9
	Literatur	10

Zielsetzung In diesem Versuch soll das Emissionsspektrum einer Cu-Röntgenröhre und das Absorberspektrum verschiedener Absorbermaterialien gemessen und ausgewertet werden.

1 Theorie

Grundsätzlich werden bei diesem Versuch Elektronen beschleunigt und auf ein Anodenmaterial geschossen. Dabei können dann im Bereich der gegebenen Voraussetzungen zwei Effekte auftreten, wobei sich ein kontinuierliches Spektrum und ein charakteristisches messen lässt. Das kontinuierliche Bremsspektrum ist zu beobachten, wenn die Elektronen abgebremst werden und dabei ihre kinetische Energie als Lichtquant abgeben. Das charakteristische Spektrum lässt sich beobachten, wenn das Elektron ein Elektron aus einer Schale eines Atoms des Anodenmaterials schießt, dort eine Leerstelle hinterlässt und ein Elektron aus einer äußeren Schale nachrutscht und dabei ein Röntgenquant aussendet. Die Schalen werden dabei mit K, L, M , usw. bezeichnet. Sind diese mit einem Index mit griechischem Buchstaben versehen, so kann man daraus erkennen aus welcher Schale das Elektron nachgerückt ist. Die Energie des ausgesendeten Röntgenquants ist

$$h\nu = E_m - E_n \quad (1)$$

dabei bezeichnen E_m und E_n die Energie der Energieniveaus. Die Bindungsenergie E_n der Elektronen auf der n -ten Schale ist

$$E_n = -E_{\text{ryd}} z_{\text{eff}}^2 \cdot \frac{1}{n^2}, \quad (2)$$

dabei bezeichnet $E_{\text{ryd}} = 13,6 \text{ eV}$ die Rydbergenergie und $z_{\text{eff}} = Z - \sigma$ die effektive Kernladung mit der Abschirmkonstante σ . Diese ist von Nöten, da die Elektronen miteinander wechselwirken und so die Kernladung abschirmen. Der Comptoneffekt und der Photoeffekt sind die Effekte die bei der Messung von Absorption von Röntgenstrahlung unter 1 MeV am stärksten hervortreten. Ist die Photonenenergie gerade größer als die Bindungsenergie eines Elektrons so steigt der Absorptionskoeffizient, der sonst bei steigender Energie abfällt, stark an und es entsteht eine sogenannte Absorptionskante. Die Lage einer solchen Kante ist so gut wie identisch zu der Bindungsenergie eines Elektrons. Unter Zuhilfenahme der Braggschen Reflexion kann die Energie des einfallenden Röntgenlichts an Hand der Braggschen Bedingung

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (3)$$

bestimmt werden.

2 Durchführung

Versuchsaufbau Der Versuchsaufbau besteht eigentlich nur aus einer Kupfer-Röntgenröhre, einem LiF-Kristall (mit Gitterkonstante $d_{\text{LiF}} = 201,4 \text{ pm}$) und einem Geiger-Müllerzählrohr, die in einer festen Apparatur verbaut sind. Die Apparatur wird durch einen Computer gesteuert und die Messwerte werden direkt digitalisiert. So kann über den Computer die Messart, der Drehmodus, der Kristallwinkel und die Integrationszeit eingestellt werden. Bei allen Messungen wird die Röntgenröhre mit einer Beschleunigungsspannung von $U_B = 35 \text{ kV}$ und einem Emissionsstrom $I = 1 \text{ mA}$ betrieben.

Überprüfung der Bragg Bedingung Zur Überprüfung der Bragg Bedingung wird der Kristallwinkel $\theta = 14^\circ$ gesetzt und das Zählrohr fährt den Winkelbereich von 24° bis 30° ab. Dabei soll bei jedem Winkelunterschied von $0,1^\circ$ 20s gemessen werden.

Messung des Emissionsspektrums einer Kuper-Röntgenröhre Im Messprogramm des Computers soll nun der 2:1 Kopplungsmodus gewählt werden und der Kristall soll den Winkelbereich von 4° bis 26° abfahren, wobei dabei soll das Zählrohr in $0,2^\circ$ -Schritten fortläuft. In jedem Schritt wird 5s gemessen.

Messung des Absorptionsspektrum verschiedener Metalle Das Messprogramm ist in soweit gleich wie zuvor bis auf die Tatsache, dass der abgefahrte Kristallwinkel nun vom Erwartungswert abhängt und das Zählrohr in $0,1^\circ$ -Schritten messen soll in den 20s gemessen wird. Zudem wird vor das Zählrohr der Absorber geschraubt.

3 Auswertung

Die Umskalierung von Messwinkel auf die entsprechende Energie erfolgte über die Bragg-Bedingung $E = \frac{hc}{2d \sin(\theta)}$ via Python [1] [3] [2].

3.1 Bragg-Bedingung

Der Erwartungswert für das Intensitätsmaximum liegt bei $\gamma = 2 * \theta = 28^\circ$, in diesem Versuch wurde es jedoch bei 26° gemessen, wie sich Abb. 1 entnehmen lässt.

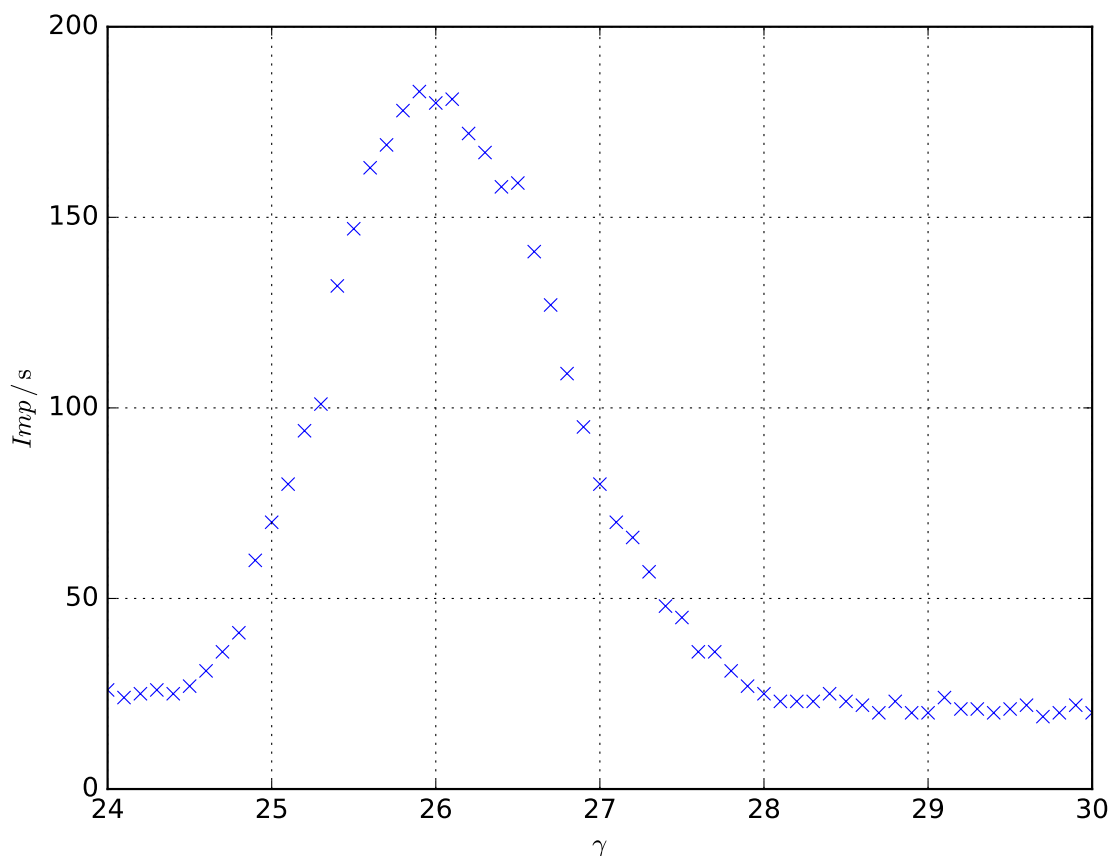


Abbildung 1: Zählrate aufgetragen gegen den Winkel γ (in Grad) zwischen Röntgenstrahl und Zählrohr bei einem Kristallwinkel von $\theta = 14^\circ$.

3.2 Emissionsspektrum

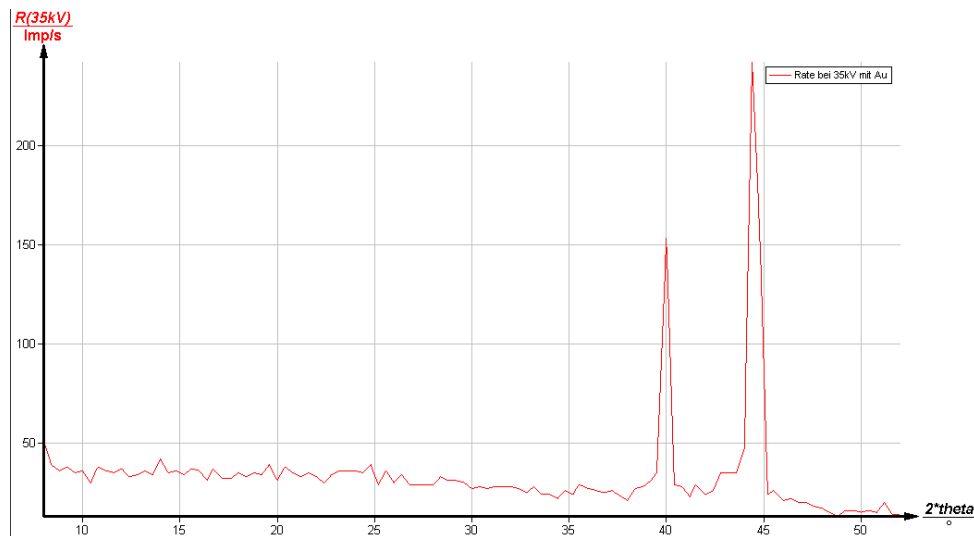


Abbildung 2: Gemessenes Röntgenspektrum der verwendeten Kupferröhre

Die maximale Energie der in der Apparatur auftretenden Röntgenquanten beträgt durch die verwendete Beschleunigungsspannung bedingt 35 keV. Es sollte somit im in Abb. 2 dargestellten Spektrum ein Bremsberg erkennbar sein, mit einer maximalen Energie von 35 keV. Diese Grenze lässt sich jedoch nicht nachweisen.

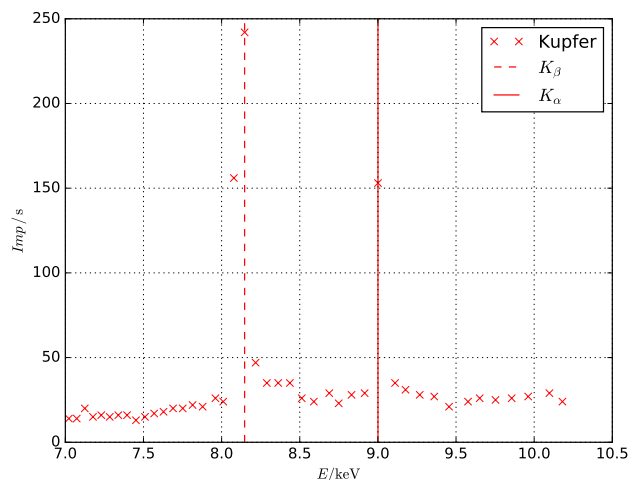


Abbildung 3: Spektrum der verwendeten Kupfer-Röntgenröhre, eingeschränkt auf 7 keV bis 10.5 keV.

Aus Abb. 3 lassen sich die Werte $K_\beta = 9 \text{ keV}$ und $K_\alpha = 8.15 \text{ keV}$ der klar erkennbaren K_α - bzw. K_β -Linie entnehmen. Die Halbwertsbreite der K_α -Linie beträgt $\Delta E_\alpha = 0.05 \text{ keV}$, die der K_β -Linie $\Delta E_\beta = 0.09 \text{ keV}$. Die Auflösung entspricht dann etwa $0.1 - 0.2 \text{ keV}$, da sich zwei Peaks, deren Halbwertsbreiten nicht überlappen zweifelsfrei unterscheiden lassen. Für die Absorptionszahl σ_2 erhält man näherungsweise:

$$\sigma_2 = Z - \sqrt{\frac{K_\beta}{E_{ryd}}} = 3.28$$

Mit diesem groben Näherungswert lässt sich nun σ_1 berechnen.

$$\sigma_1 = Z - \sqrt{\frac{K_\alpha}{E_{ryd}} + (Z_{\sigma_2})/4} = 1.35$$

3.3 Absorbtionsspektrum

Aus Abb. 5 lassen sich für die K-Kanten der verwendeten Elemente die in Tabelle 1 dargestellten Werte entnehmen. Zusätzlich wurden die Abschirmungskonstanten σ_K aus Formel (2) berechnet.

Tabelle 1: Aus der Messung des Beugungsspektrums gewonnene K-Kanten-Energien und Abschirmungskonstanten, mit Abweichungen zur Theorie. [4].

Element	E_K/keV	E_{theo}/keV	$\Delta E / \text{keV}$	σ_K	σ_{theo}	$\Delta\sigma$
Zn	9.5	9.65	0.2	3.57	3.36	0.21
Ge	11.0	11.1	0.1	3.56	3.42	0.13
Br	13.5	13.47	0.1	3.49	3.53	0.04
Sr	16.0	16.1	0.1	3.70	3.59	0.11
Zr	18.0	18.0	0.0	3.62	3.62	0.0

Mit diesen Werten lässt sich durch den in Abb. 4 dargestellten linearen Fit ($f = E_{ryd}Z^2 + b$) über das Moseley-Gesetz ($E = E_{ryd}Z_e f^2$) die Rydbergenergie zu

$$E_{ryd} = (12.08 \pm 0.11) \text{ eV}$$

bestimmen ($b = (-1.36 \pm 0.14) \text{ keV}$).

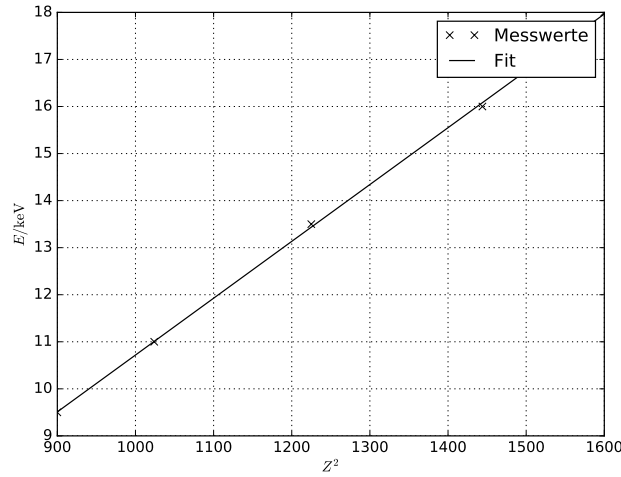


Abbildung 4: Bestimmung der Rydbergenergie durch linearen Ausgleich

Für Quecksilber liegt der Erwartungswert der L_2 -Kante bei 14.2keV, für die L_3 -Kante bei 12.3keV [5]. Die aus Abb. 10 abgelesenen Werte betragen $E_{L2} = 13.8\text{keV}$ und $E_{L3} = 12\text{keV}$ ($\Delta E_2 = 0.4\text{keV}$, $\Delta E_3 = 0.3\text{keV}$). Hieraus lässt sich σ_L über die Formel

$$\sigma_L = Z - \left(\frac{4}{\alpha} \sqrt{\frac{\Delta E_L}{E_{ryd}}} - \frac{5\Delta E_L}{E_{ryd}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 + \alpha^2 \frac{19\Delta E_L}{32E_{ryd}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

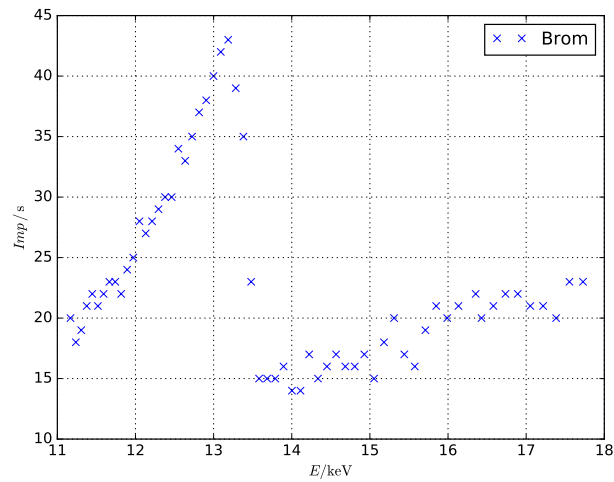


Abbildung 5: Messung der vom Kristall gebeugten Röntgenstrahlung unter Verwendung eines Brom-Absorbers.

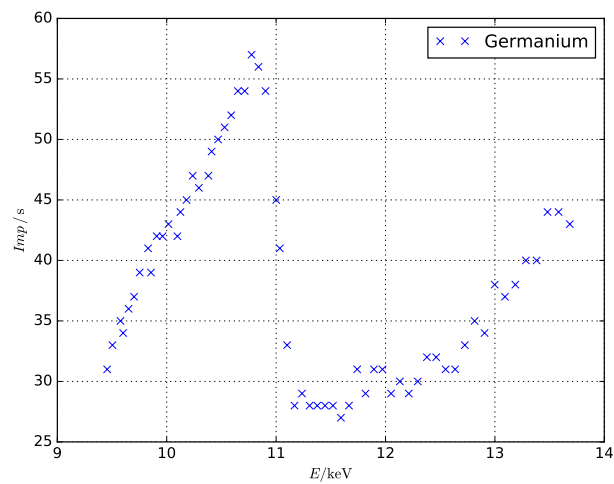


Abbildung 6: Messung der vom Kristall gebeugten Röntgenstrahlung unter Verwendung eines Germanium-Absorbers.

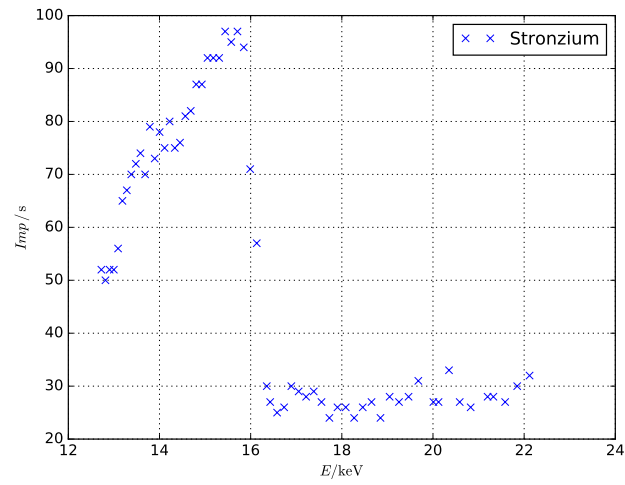


Abbildung 7: Messung der vom Kristall gebeugten Röntgenstrahlung unter Verwendung eines Strontium-Absorbers.

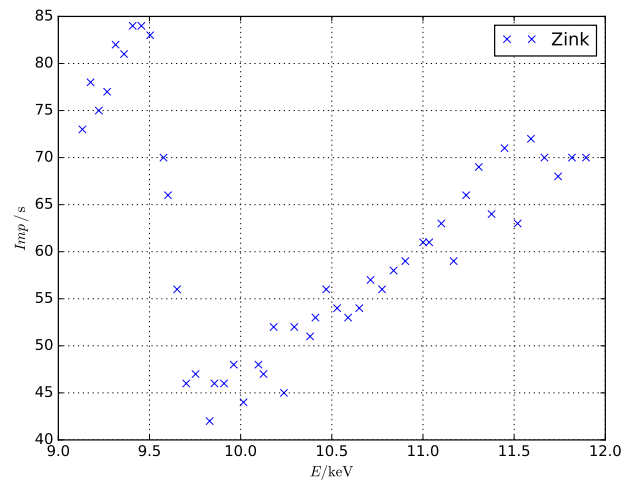


Abbildung 8: Messung der vom Kristall gebeugten Röntgenstrahlung unter Verwendung eines Zink-Absorbers.

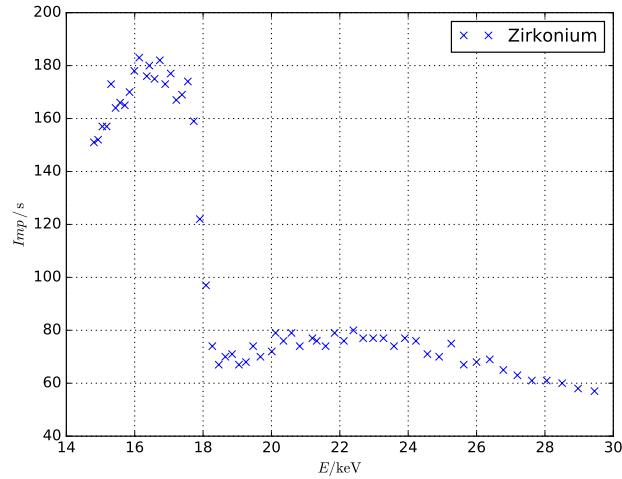


Abbildung 9: Messung der vom Kristall gebeugten Röntgenstrahlung unter Verwendung eines Zirkonium-Absorbers.

mit $\alpha = 7.3 \cdot 10^{-3}$ als der Sommerfeldschen Strukturkonstante und den Literaturwerten $E_K = 83.1\text{keV}$ [5] und $\sigma_K = 1.8$ berechnen zu $\sigma_L = 4.89$.

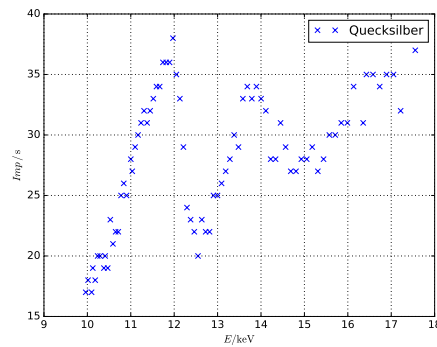


Abbildung 10: Messung der vom Kristall gebeugten Röntgenstrahlung unter Verwendung eines Quecksilber-Absorbers.

4 Diskussion

Bei der Kontrolle der Bragg-Bedingung liegt eine Abweichung von 2° vor, welche durch 2 Fehleinstellungen am Röntgengerät verursacht wird, welche in den nachfolgenden Messungen behoben sind. Der Kristall ist nicht exakt eingehängt worden, weshalb der fest eingestellte Winkel von 14° nicht dem tatsächlichen Winkel zwischen Kristall und Röntgenstrahl entspricht. Zudem wurde das Kabel des Geiger-Müller-Zählrohres so um den Aufbau geschlungen, dass es bei großen Winkeln verkeilt.

Die durch das Emissionsspektrum gewonnenen Daten liegen allesamt innerhalb der veranschlagten Auflösung der Apparatur und sind somit sehr exakt bestimmt, lediglich die L-Linien des Quecksilber weichen mit $\Delta E > 0.3\text{keV}$ etwas stärker ab. Die Abschirmkonstanten geben lediglich einen groben Richtwert, da sie ohnehin nur durch grobe Näherung bestimmt wurde, weshalb diese Werte nicht diskussionswürdig sind.

Die Messung der Rydbergenergie liefert einen um $(1.52 \pm 0.11)\text{eV}$ abweichenden Wert, was vor

allem darin begründet liegt, dass eine grobe Näherung vorgenommen wurde durch Vernachlässigung der Abschirmung.

Literatur

- [1] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [2] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [3] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [4] Princeton University. URL: <http://xray0.princeton.edu/~phil/Facility/fpk.lst>.
- [5] Washington University. URL: <http://skuld.bmsc.washington.edu/scatter/data/Hg.html>.