

ANFÄNGERPRAKTIKUM DER FAKULTÄT FÜR PHYSIK,
UNIVERSITÄT GÖTTINGEN

Versuch 23
Röntgenstrahlung

Praktikant: Felix Kurtz
Michael Lohmann
E-Mail: felix.kurtz@stud.uni-goettingen.de
m.lohmann@stud.uni-goettingen.de
Betreuer: Phillip Bastian
Versuchsdatum: 11.03.2015

Testat:

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Theorie	3
2.1	Röntgenröhre und Bragg-Reflexion	3
2.2	Geiger-Müller-Zählrohr	4
2.3	Bremsstrahlung	4
2.4	Charakteristische Röntgenstrahlung	5
3	Durchführung	5
4	Auswertung	6
4.1	Charakteristisches Spektrum von Eisen	6
4.1.1	Wellenlängen und Energien	6
4.1.2	Abhängigkeit von der Anodenspannung	7
4.1.3	Grenzwellenlänge der Bremsstrahlung und Plancksche Konstante .	7
4.2	Absorptionskanten und Rydberg-Konstante	10
4.3	Absorptionskoeffizienten verschiedener Metalle	10
5	Diskussion	10
6	Anhang	10
	Literatur	10

1 Einleitung

In diesem Versuch sollen mithilfe der Bragg-Reflexion die Eigenschaften von Röntgenstrahlung untersucht werden. Dabei kann zum einen die *Bremsstrahlung* als auch die für jedes Material *charakteristische Strahlung* beobachtet werden. Außerdem werden noch zwei Naturkonstanten der Atomphysik bestimmt: das *Plancksche Wirkungsquantum* und die *Rydberg-Frequenz*.

2 Theorie

2.1 Röntgenröhre und Bragg-Reflexion

In einer Röntgenröhre (vgl. Abb.1) werden Elektronen durch einen Glühdraht emittiert und anschließend auf eine Anode beschleunigt. Dort wechselwirken sie mit dem Anodenmaterial und es entsteht elektromagnetische Strahlung. Diese ist bei den typischen Beschleunigungsspannungen U_A , die sich bei mehreren Kilo-Volt bewegen, energiereicher als Licht. Man nennt sie im deutschen Sprachraum nach ihrem Entdecker WILHELM CONRAD RÖNTGEN *Röntgenstrahlung*.

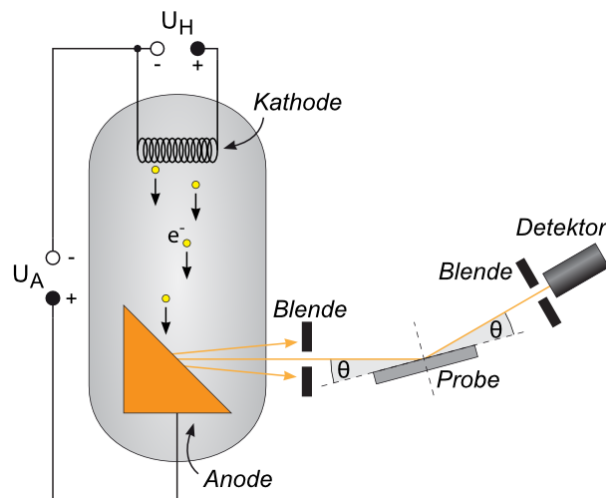


Abbildung 1: Aufbau einer Röntgenröhre mit Detektor. [LP2, Datum: 02.01.15]

Um die Strahlung zu charakterisieren, trifft sie auf ein Kristallgitter, dessen Atomabstand im Bereich der Wellenlänge liegt. Dort kommt es zur *Bragg-Reflexion*, welche in Abb.2 dargestellt wird. Die Strahlen werden an mehreren Kristallschichten reflektiert. Dabei kommt es zu Gangunterschieden, welche ein ganzzahliges Vielfaches n der Wellenlänge sein müssen, damit es zur konstruktiven Interferenz kommt und man am

Detektor ein Signal erkennt. So lässt sich also der Ablenkwinkel 2θ in eine bestimmte Wellenlänge λ umrechnen:

$$2d \sin \theta = n\lambda. \quad (1)$$

Dies nennt man die *Bragg-Bedingung*.

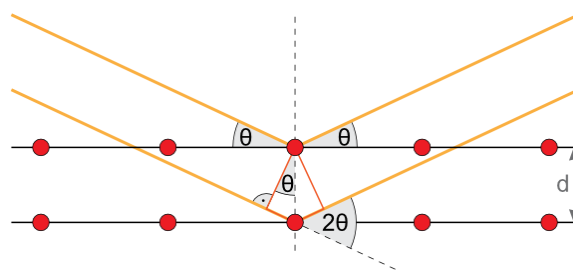


Abbildung 2: Bragg-Reflexion schematisch. [LP2, Datum: 02.01.15]

2.2 Geiger-Müller-Zählrohr

Die Röntgenstrahlung wird durch ein Geiger-Müller-Zählrohr detektiert. Dort ionisiert sie nämlich Atome und setzt somit Elektronen frei. Diese lösen eine Kaskade an weiteren Elektronen aus und ein Strom kann gemessen werden. Da das Zählrohr eine gewisse Zeit benötigt, bis es ein neues Ereignis detektieren kann, (*Totzeit*), müssen die Impulsraten N (Impulse/Sekunde) durch folgende Formel korrigiert werden:

$$N_{\text{korrigiert}} = \frac{N_{\text{gemessen}}}{1 - \tau \cdot N_{\text{gemessen}}}. \quad (2)$$

Dabei ist τ die Totzeit, die sich typischerweise im Bereich von $100 \mu\text{s}$ befindet. Man berechnet nämlich die Wahrscheinlichkeit mit ein, dass ein Ereignis stattgefunden hat, dieses aber nicht detektiert werden konnte.

2.3 Bremsstrahlung

Das Elektron überträgt Energie an das Photon, wenn es mit dem Anodenmaterial wechselwirkt. Läuft dieser Prozess ideal ab, gibt das Elektron seine gesamte Energie $E = e \cdot U_A$ an das Photon ab, dessen Energie $E = h \cdot \nu = \frac{hc}{\lambda}$ beträgt. Setzt man also beide Energien gleich, kann man die minimal erreichbare Wellenlänge λ_{gr} berechnen:

$$\lambda_{\text{gr}} = \frac{hc}{e \cdot U_A}. \quad (3)$$

Sie hängt nur von der Beschleunigungsspannung U_A ab, da die Elektronenladung e , die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit c sowie das Plancksche Wirkungsquantum h Naturkonstanten sind.

Da aber die wenigsten Photonen die gesamte Elektronenenergie erhalten, ergibt sich eine typische, kontinuierliche Intensitätsverteilung, deren Maximum sich bei einer etwas größeren Wellenlänge befindet. Man nennt dies *Bremsstrahlung*.

2.4 Charakteristische Röntgenstrahlung

Neben der Bremsstrahlung misst man auch noch die für das Anodenmaterial *charakteristische Strahlung*. Dabei entspricht die Photonen-Energie genau einer Differenz von zwei Energieniveaus: $E_{\text{ph}} = h\nu = E_s - E_f$. Ist das untere Niveau E_f die K-Schale, spricht man von K-Linien. Der Übergang von der L-Schale auf die K-Schale wird mit $K\alpha$ bezeichnet, der von M-Schale mit $K\beta$. Diese Energiedifferenzen der K-Linien kann man mithilfe des *Moseley-Gesetzes*

$$\nu_K = R_\nu(Z - 1)^2 \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_s^2} \right) \quad (4)$$

berechnen. Dabei ist ν_K die Frequenz des Photons, R_ν die *Rydberg-Frequenz*, Z die Kernladungszahl des Atoms und n_s bzw. n_f kennzeichnen das obere/untere Niveau. Für die K-Schale ist $n = 1$, für die L-Schale gilt $n = 2$, etc. Analog kann man auch die Energien für die anderen Linien berechnen. Dabei muss aber die Kernladungszahl um die für jede Schale typische Abschirmkonstante σ verringert werden. Anhand der obigen Formel (K-Schale) erkennt man: $\sigma_K = 1$.

Die Intensität I_K der charakteristischen Strahlung hängt über

$$I_K \sim I_A \cdot (U_A - U_K)^{3/2} \quad (5)$$

von dem Anodenstrom I_A sowie der Anodenspannung U_A und dem Ionisationspotential U_K ab.

3 Durchführung

Zuerst wird das Anodenmaterial notiert. Da wir mit der Eisen-Röhre gearbeitet haben, werden die einzustellenden Werte nur für diese angegeben.

Nach Anschalten der Röntgenröhre, des Computers und Starten des Messprogramms MEASURE wird zuerst die charakteristische Strahlung vermessen. Im Programm stellt man dazu folgende Werte ein: Anodenspannung $U = 25 \text{ kV}$, Anodenstrom $I = 1 \text{ mA}$, Winkelschritt $\Delta\theta = 0.1^\circ$ und Integrationszeit $\Delta t = 2 \text{ s}$ sowie den zu vermessenden Winkelbereich. Dieser ist für jedes Anodenmaterial unterschiedlich, für Eisen soll zwischen

$\theta_{\min} = 3^\circ$ und $\theta_{\max} = 80^\circ$ gemessen werden.

Danach vermisst man für die Spannungen $U = 23, 26, 29, 32$ und 35 kV die Grenzwellenlänge und die Intensität der charakteristischen Strahlung, also für Eisen den Winkelbereich zwischen 3° und 15° sowie zwischen 17° und 24° . Wieder ist $I = 1$ mA, $\Delta\theta = 0.1^\circ$ und $\Delta t = 2$ s.

Als nächstes werden die Absorptionskanten von Kupfer und Nickel vermessen. In der Ablage auf dem Gerät befindet sich ein Kästchen mit Absorptionsfolien. Man wählt die entsprechenden mit deiner Dicke von 0.025 mm. Die weiteren Werte betragen $U = 25$ kV, $I = 1$ mA, $\Delta\theta = 0.1^\circ$ und $\Delta t = 30$ s.

Als letztes wird in einem Bereich zwischen 8° und 16° mit $\Delta\theta = 1^\circ$ die Absorption verschiedener Materialien (verschiedene Kernladungszahlen) vermessen. Dazu wird als erstes ein Spektrum ohne Absorber aufgenommen, dann 0.08 mm dickes Aluminium sowie 0.025 mm dickes Zink und Zinn. Die weiteren Werte betragen $U = 25$ kV, $I = 1$ mA und $\Delta t = 30$ s.

4 Auswertung

Die verwendete Röntgenröhre hat eine Eisenanode und der Kristall besteht aus Lithiumfluorid mit einem Gitterabstand $d = 201$ pm. Außerdem wird für die Totzeit des Detektors $\tau = 100$ μ s angegeben. So müssen zuerst alle Messwerte mit der Formel (2) korrigiert werden.

4.1 Charakteristisches Spektrum von Eisen

4.1.1 Wellenlängen und Energien

In Abb.3 ist die Zählrate gegen den Kristallwinkel aufgetragen. Man sieht deutlich die Peaks der charakteristischen Strahlung von Eisen. Der Winkel θ kann mit (1) in eine Wellenlänge λ umgerechnet werden. Der sich ergebende Fehler σ_λ kann mit der Formel

$$\sigma_\lambda = \frac{2d}{n} \cos(\theta) \cdot \sigma_\theta \quad (6)$$

berechnet werden, welche der Fehlerfortpflanzung entstammt. Die Wellenlänge kann nun in eine Energie umgerechnet werden:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (7)$$

$$\sigma_E = \frac{hc}{\lambda^2} \cdot \sigma_\lambda \quad (8)$$

Dabei werden für die beiden Naturkonstanten folgende Werte verwendet: $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Js und $c = 2.998 \cdot 10^8$ m/s. Die sich so ergebenden Werte sind in Tabelle 1 dargestellt.

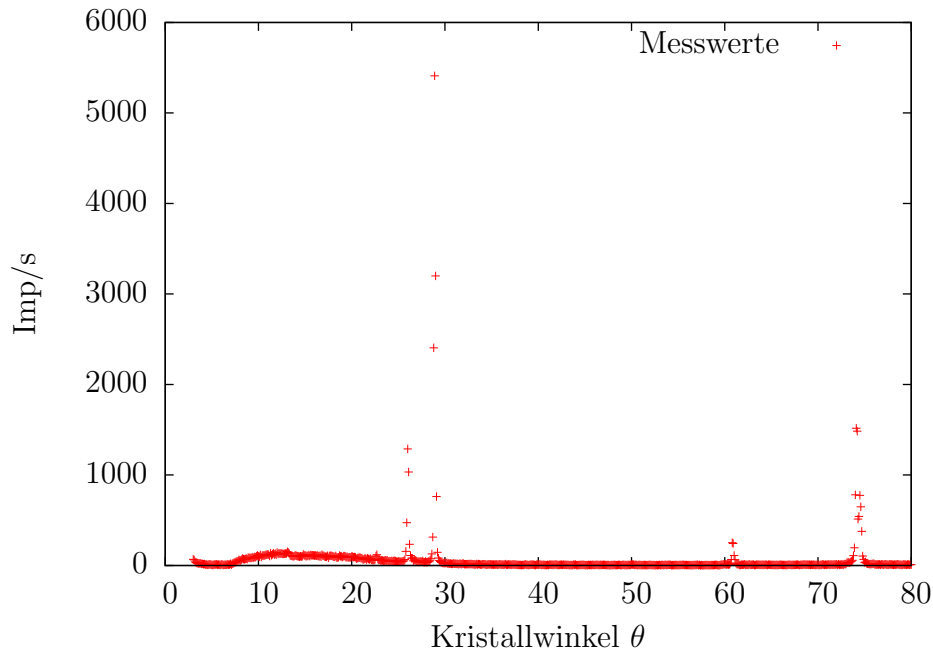


Abbildung 3: Spektrum aus der Messung der charakteristischen Fe-Strahlung

	n	Winkel θ	Wellenlänge λ [pm]	Energie E [eV]	
				Messwert	Lit. Wert
K_α	1	$28.9^\circ \pm 0.2^\circ$	194.3 ± 1.3	6380 ± 50	6391, 6404
	2	$74.1^\circ \pm 0.2^\circ$	193.3 ± 0.2	6414 ± 14	
K_β	1	$26.0^\circ \pm 0.2^\circ$	176.2 ± 1.3	7040 ± 60	7058
	2	$60.8^\circ \pm 0.2^\circ$	175.5 ± 0.4	7065 ± 17	

Tabelle 1: Wellenlängen und Energien der charakteristischen Fe-Strahlung

4.1.2 Abhängigkeit von der Anodenspannung

In Abb.4 ist die Zählrate für verschiedene Spannungen im Bereich der Charakteristischen Strahlung gegen den Winkel aufgetragen. Daraus kann man die Abhängigkeit aus (5) bestätigen. Trägt man nämlich die Impulsrate der beiden Peaks gegen $(U_A - U_K)^{1.5}$ auf, ergibt sich in beiden Fällen eine Gerade (vgl Abb.5). Für die Rate wurde ein prozentualer Fehler von 1% angenommen.

4.1.3 Grenzwellenlänge der Bremsstrahlung und Plancksche Konstante

Trägt man nun das Produkt aus Anodenspannung U_A und Grenzwellenlänge λ_{gr} mit dem sich aus der Fehlerfortpflanzung folgenden Fehler $\sigma = U_A \cdot \sigma_{\lambda_{gr}}$ gegen die Anodenspannung auf, sollte sich nach Umstellen von (3) die Konstante $\frac{hc}{e}$ ergeben.

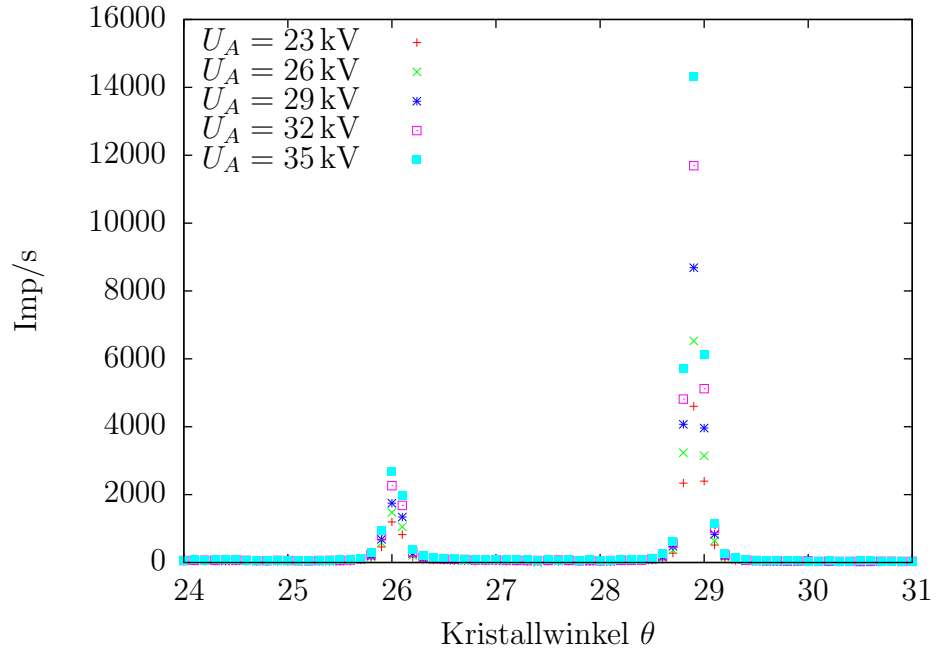


Abbildung 4: Messwerte im Bereich der charakteristischen Strahlung

	Winkel θ	Wellenlänge λ [pm]	Rydbergfrequenz R_ν
Kupfer	$20.2^\circ \pm 0.2^\circ$	138.8 ± 1.4	$(3.67 \pm 0.04) \cdot 10^{15} \text{ Hz}$
Nickel	$21.8^\circ \pm 0.2^\circ$	149.8 ± 1.4	$(3.67 \pm 0.04) \cdot 10^{15} \text{ Hz}$

Tabelle 2: Absorptionskanten von Kupfer und Nickel und die daraus berechnete Rydbergfrequenz

$$h = (6.57 \pm 0.06) 10^{-34} \text{ J s} \quad (9)$$

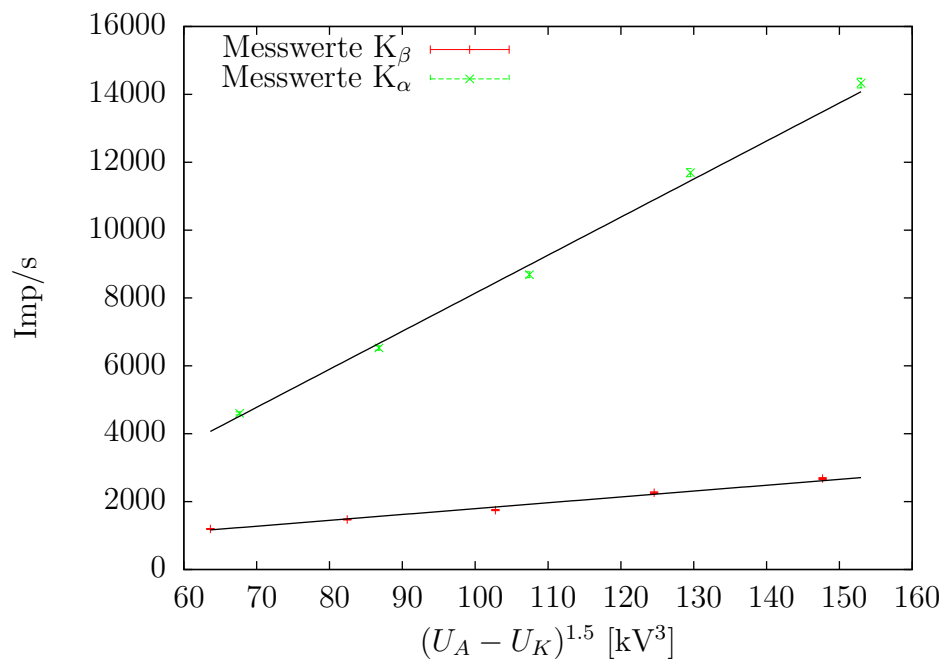


Abbildung 5: Charakteristische Strahlung: Intensität in Abhängigkeit der Anodenspannung

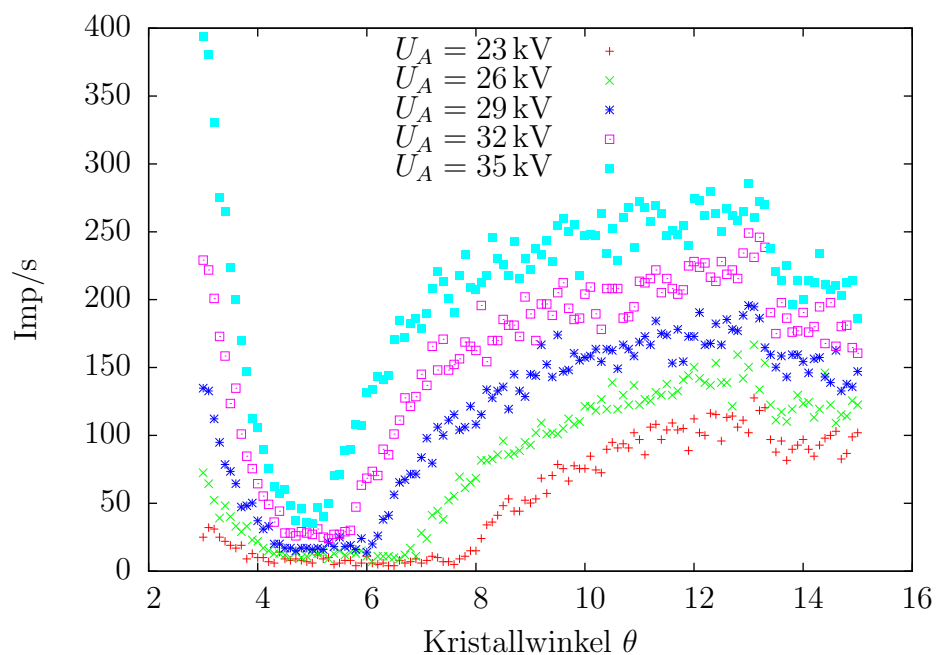


Abbildung 6: Messwerte im Bereich der Grenzwellenlänge

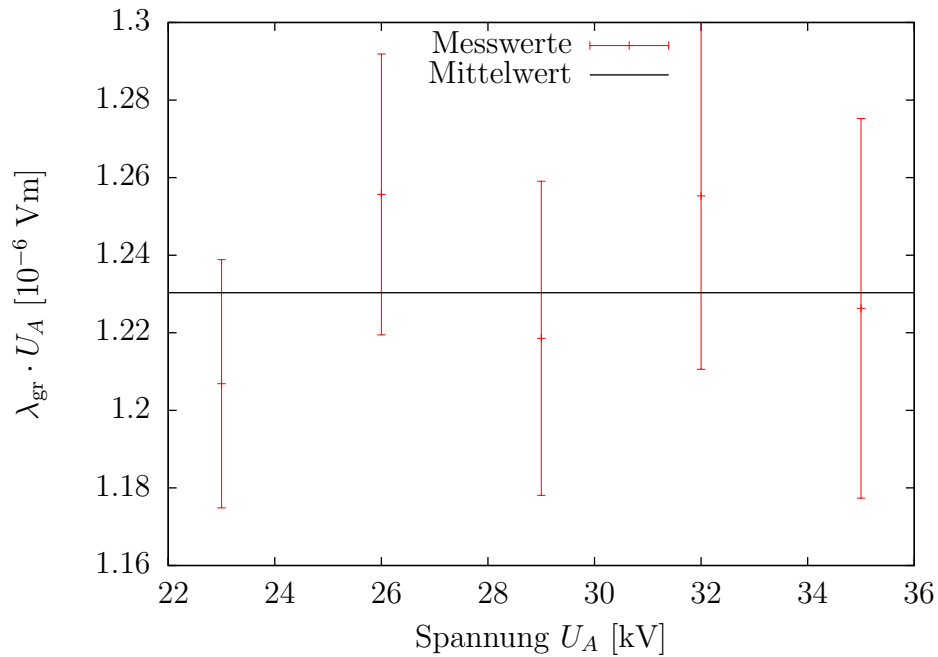


Abbildung 7: Produkt aus Beschleunigungsspannung und zugehöriger Grenzwellenlänge in Abhängigkeit der Spannung

4.2 Absorptionskanten und Rydberg-Konstante

4.3 Absorptionskoeffizienten verschiedener Metalle

5 Diskussion

6 Anhang

Literatur

[LP2] *Lehrportal der Universität Göttingen.*
[goettingen.de/get/text/4385](https://lp.uni-goettingen.de/get/text/4385).

[https://lp.uni-](https://lp.uni-goettingen.de/get/text/4385)

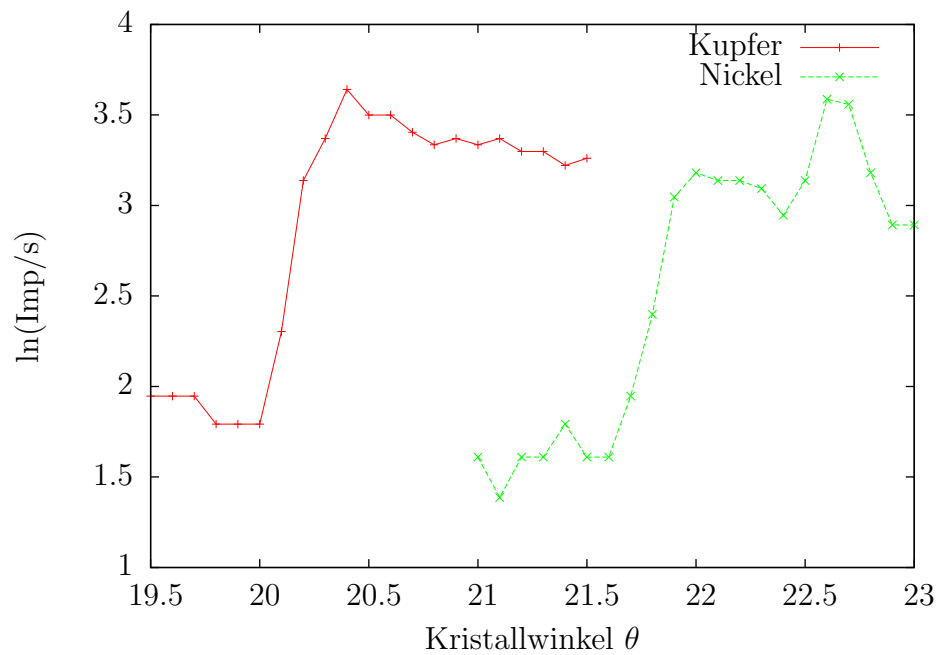


Abbildung 8: Absorptionskanten von Kupfer und Nickel: Intensität logarithmisch gegen Winkel aufgetragen

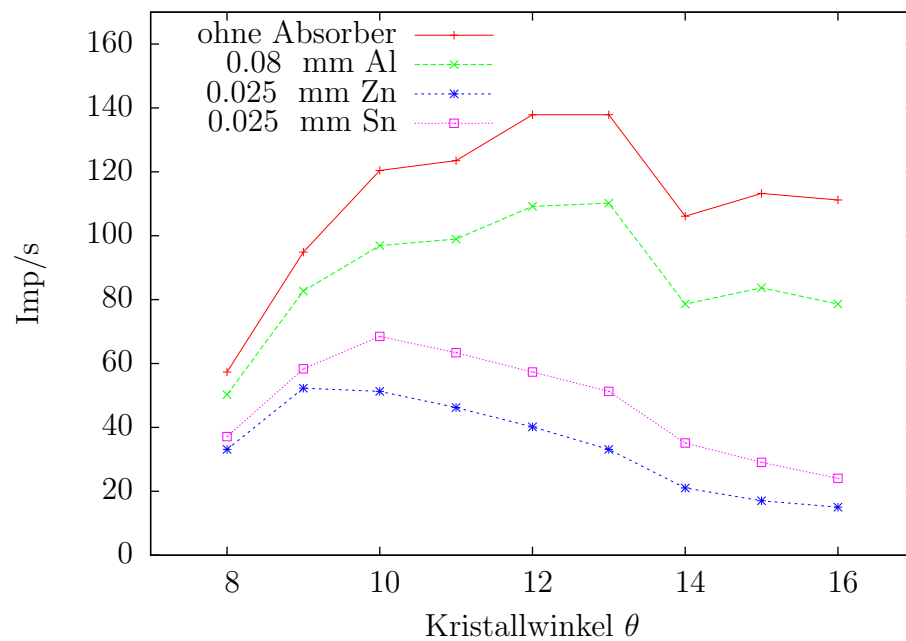


Abbildung 9: ...

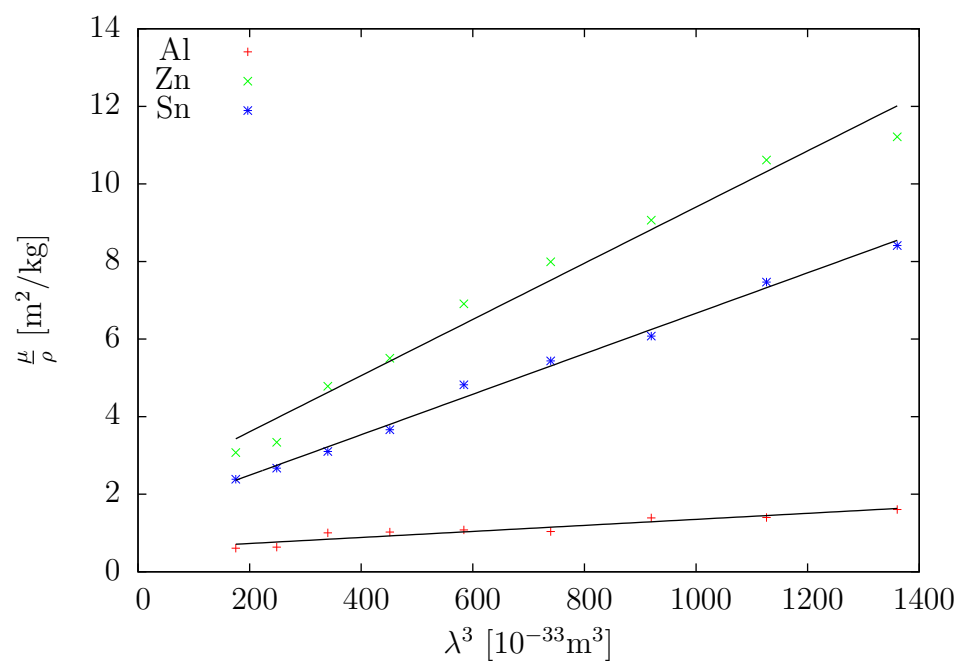


Abbildung 10: ...