

Verwandte Themen

Röntgenröhren, Bremsstrahlung, charakteristische Röntgenstrahlung, Energieniveaus, Kristallstrukturen, Gitterkonstante, Interferenz, Bragg-Gleichung.

Prinzip

Im Versuch wird die Grenzwellenlänge des Bremsspektrums der Kupferanode bestimmt, die mit zunehmender Anodenspannung abnimmt. Aus dem kurzwelligen Einsatz des Bremsspektrums lässt sich das Duane-Huntsche Verschiebungsgesetz verifizieren und das Plancksche Wirkungsquantum bestimmen.

Equipment

1 X-ray expert unit, Röntgengerät 35 kV	09057-99
1 X-ray Goniometer	09057-10
1 X-ray Einschub mit Kupfer-Röntgenröhre	09057-50
1 Zählrohr Typ B	09005-00
1 X-ray Lithiumfluorid (LiF)-Einkristall in Halter	09056-05
1 X-ray Blendentubes, d = 2 mm	09057-02
1 XR measure 4.0 software	14414-61
1 Datenkabel USB Steckertyp A/B	14608-00

Zusätzlich erforderlich

PC, Windows® XP oder höher

Dieser Versuch ist in den Erweiterungssets „XRP 4.0 X-ray Festkörper“, „XRS 4.0 X-ray Strukturanalyse“ und „XRC 4.0 X-ray Charakterisierung“ enthalten.

Optional kann der Versuch auch mit einer Wolfram-Röntgenröhre (09057-80) durchgeführt werden.



Abb. 1: P2540901

Aufgaben

1. Registrieren Sie das Röntgenspektrum mit verschiedenen Werten der Anodenspannung U_A als Funktion des Bragg-Winkels ϑ mit Hilfe des LiF-Einkristalls als Analysator.
2. Ermitteln Sie den kurzwelligen Einsatz (λ_{min}) der jeweiligen Bremsspektren.
3. Tragen Sie die Funktionen $\lambda_{min} = f(1/U_A)$ und $\sin \vartheta_{min} = f(1/U_A)$ grafisch auf. Berechnen Sie das Plancksche Wirkungsquantum.

Aufbau

Schließen Sie das Goniometer und das Geiger-Müller-Zählrohr an die entsprechenden Buchsen im Experimentierraum an (siehe Kennzeichnung in Abb. 2). Der Goniometerblock mit eingesetztem Analysatorkristall soll sich in der rechten Endposition befinden. Das Geiger-Müller-Zählrohr mit seiner Halterung wird am hinteren Anschlag der Führungsstangen arretiert. Vergessen Sie nicht, die Zählrohr-Blende vor dem Zählrohr zu montieren (Siehe Abb. 3). Der Blendentubus mit 2-mm-Durchmesser wird zur Kollimierung des Röntgenstrahls in den Strahlausgang des Röhreneinschubs eingesetzt (Abb. 3).

Um den Aufbau zu kalibrieren, stellen Sie zunächst sicher, dass der richtige Kristall in den Goniometer-Parametern eingegeben ist. Wählen Sie dann „Menü“, „Goniometer“, „Autokalibrierung“. Nun ermittelt das Gerät die optimale Stellung von Kristall und Goniometer zueinander und im Anschluss die Position des Peaks.

Hinweis

Details zur Bedienung des Röntgengeräts und des Goniometers sowie zum Umgang mit den Einkristallen entnehmen Sie bitte den entsprechenden Bedienungsanleitungen.



Abb. 2: Anschlüsse im Experimentierraum

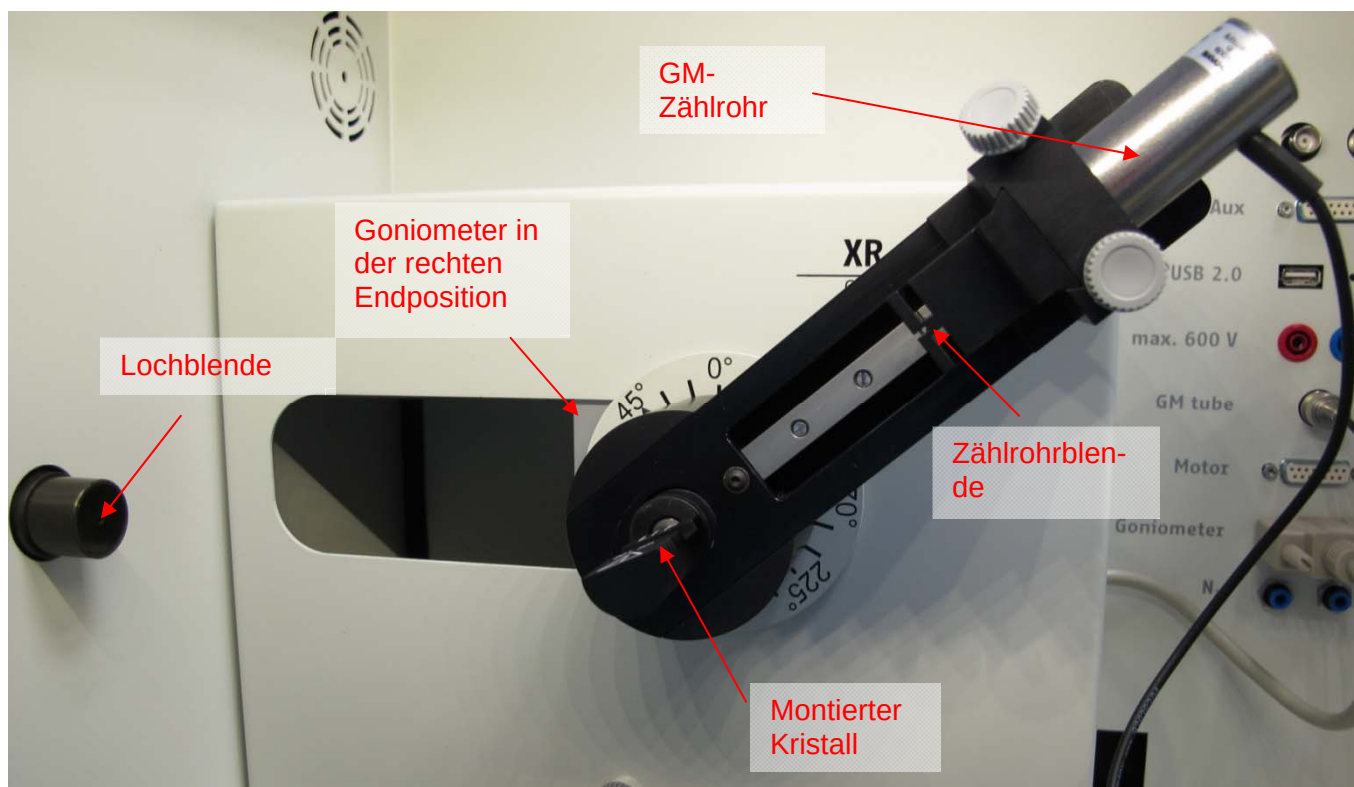


Abb. 3: Aufbau am Goniometer

Durchführung

- Der PC und das Röntgengerät werden mit Hilfe des Datenkabels über die USB Buchse verbunden (der entsprechende Anschluss am Röntgengerät ist in Abb. 4 gekennzeichnet).
- Starten Sie nun das „Measure“-Programm: das Röntgengerät erscheint auf dem Bildschirm.
- Indem Sie die verschiedenen Funktionen auf und unter dem abgebildeten Gerät anklicken, können Sie nun das Gerät vom Computer aus bedienen. Alternativ können die Parameter auch am Gerät geändert werden – das Programm übernimmt die entsprechenden Einstellungen automatisch.
- Wenn Sie auf den Experimentierraum klicken (siehe rote Kennzeichnung in Abb. 5) können Sie die Parameter für das Experiment (z. B. Goniometer) verändern.
- Wenn Sie auf die Röntgenröhre (siehe rote Kennzeichnung in Abb. 5) klicken, können Sie Spannung und Strom der Röntgenröhre ändern. Nehmen Sie zunächst ein komplettes Spektrum auf ($4-55^\circ$). Nehmen Sie dann Spektren bis zur K_β -Linie (Winkelbereich $4-22^\circ$) bei einem Anodenstrom von 1 mA und in einem Spannungsbereich von 13-33 kV in 2 kV-Schritten auf.
- Starten Sie das Experiment, indem Sie auf den

roten Kreis drücken

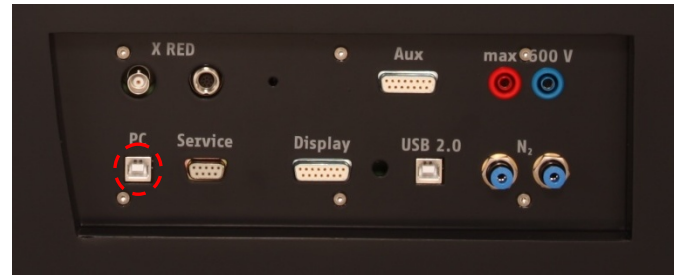
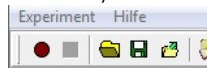


Abb. 4: Anschluss des Computers



Abb. 5: Teil der Bedienoberfläche in der Software

Hinweis: Eine Bestrahlung des Geiger-Müller-Zählrohrs durch den primären Röntgenstrahl sollte über einen längeren Zeitraum vermieden werden.

Übersicht Einstellungen am Goniometer und Röntgengerät:

- Auto- und 2:1-Kopplungsmodus
- Torzeit 2 s (Gate-Timer); Winkelschrittweite $0,1^\circ$

Registrierung des ganzen Spektrums:

- Winkelbereich: $3^\circ-55^\circ$
- Anodenspannung $U_A = 35$ kV; Anodenstrom $I_A = 1$ mA

Bremsspektren bis zur charakteristischen Cu- K_β -Linie ($n = 1$) als Funktion von U_A :

- Winkelbereich: $4^\circ-22^\circ$
- Anodenspannung 33 kV $> U_A > 13$ kV, $\Delta U_A = 2$ kV; Anodenstrom $I_A = 1$ mA

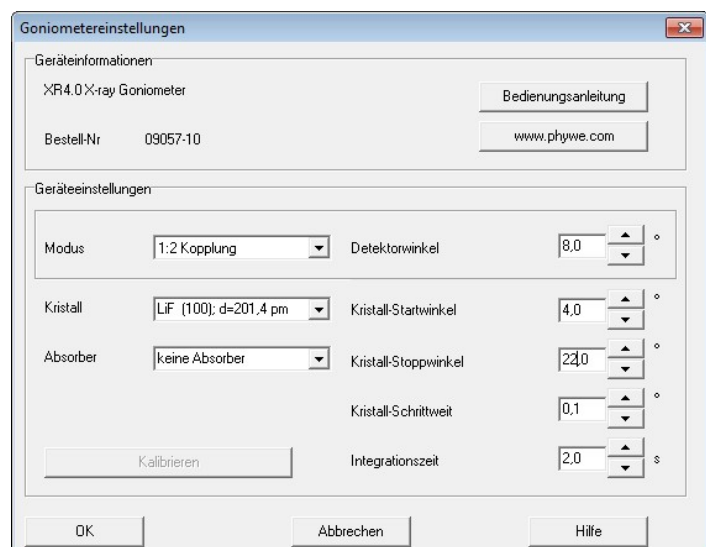


Abb 6: Einstellungen am Goniometer für die Aufnahme der Bremsspektren (Aufgabe 2)

Theorie

Durch die zwischen der Anode und Kathode liegende Spannung U_A werden die von der Kathode ausgehenden Elektronen zur Anode hin beschleunigt. An der Kathode haben dann die Elektronen die Energie:

$$E_{kin} = eU_A \text{ (wobei } e = \text{Elementarladung)} \quad (1)$$

Durch Wechselwirkung mit den Atomen des Anodenmaterials verlieren die Elektronen schrittweise ihre kinetische Energie, die in ein kontinuierliches Spektrum von Röntgenstrahlung (Bremspektrum) umgesetzt wird. Erfolgt der Verlust der kinetische Energie in einem Schritt, werden Röntgenstrahlen mit maximaler Energie (minimaler Wellenlänge λ_{min}) erzeugt. Duane und Hunt fanden 1915 empirisch, dass das Produkt aus Beschleunigungsspannung und minimaler Wellenlänge konstant ist:

$$U_A \cdot \lambda_{min} \propto 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{m} \quad (2)$$

Aus der Energiegleichung

$$E_{kin} = e \cdot U_A = h \cdot f_{max} = h \frac{c}{\lambda_{min}} \quad (3)$$

Planck-Konstante $h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

Lichtgeschwindigkeit $c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Elementarladung $e = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ As}$

folgt für die kürzeste Wellenlänge der Röntgenphotonen:

$$\lambda_{min} = 1,2398 \cdot 10^{-6} \frac{1}{U_A} \text{ V} \cdot \text{m}$$

Zur Wellenlängenanalyse der Röntgenstrahlen wird ein LiF-Einkristall benutzt. Treffen die Strahlen unter dem Glanzwinkel ϑ auf die Netzebenen des Kristalls, so interferieren die reflektierten Strahlen konstruktiv miteinander, wenn ihr Gangunterschied einem Ganzzahligen der Wellenlänge entspricht. In diesen Fällen gilt die Bragg-Gleichung:

$$2d \sin \vartheta = n\lambda \quad (4)$$

(LiF-(200)-Netzebenenabstand $d = 201,4 \text{ pm}$; $n = 1, 2, 3, \dots$)

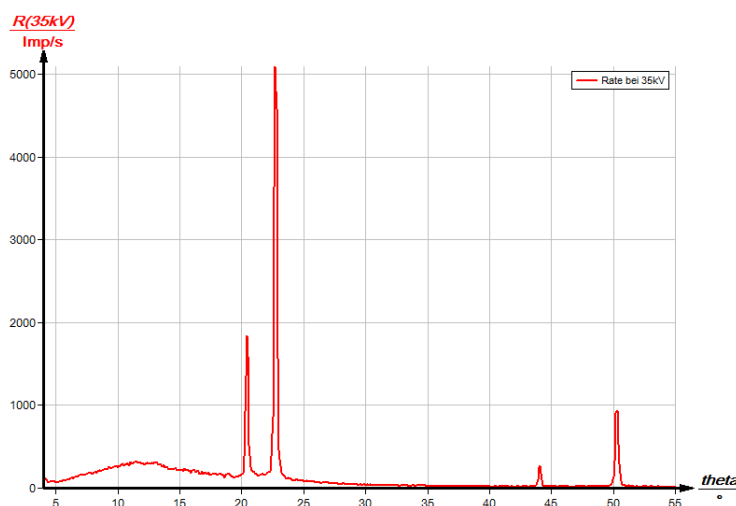


Abb. 7: Das Bremspektrum von Kupfer; LiF-Analysatorkristall

Auswertung

Aufgabe 1: Registrieren Sie das von der Kupferanode ausgehende Röntgenspektrum mit verschiedenen Werten der Anodenspannung U_A als Funktion des Bragg-Winkels ϑ mit Hilfe des LiF-Einkristalls als Analysator.

Abbildung 7 zeigt das ganze Bremsspektrum der Kupferanode. In Abbildung 8 ist nur der für die weitere Auswertung interessante Abschnitt für drei beispielhafte Anodenspannungen zu sehen. Der Einsatz des Bremsspektrums verschiebt sich bei Erhöhung der Anodenspannung zu kleineren Glanzwinkeln, also kleineren Wellenlängen.

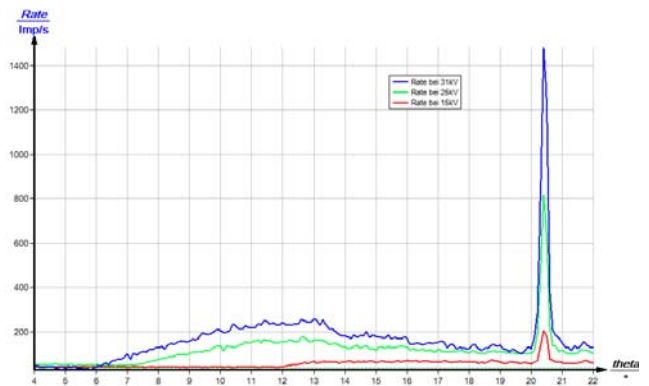


Abb. 8: Das Bremsspektrum von Kupfer für drei verschiedene Anodenspannungen U_A (15 kV, 25 kV, 31 kV), x-Achse: Glanzwinkel ϑ °

Aufgabe 2: Ermitteln Sie den kurzwelligen Einsatz ($\lambda_{\min}$) der jeweiligen Bremsspektren.

Die kurzwellige Grenze $\lambda_{\min}$ des Bremsspektrums ist durch den zugehörigen Glanzwinkel gegeben und kann mit Hilfe von (4) berechnet werden.

Aufgabe 3: Tragen Sie die Funktionen $\lambda_{\min} = f(1/U_A)$ und $\sin \vartheta_{\min} = f(1/U_A)$ grafisch auf. Berechnen Sie das Plancksche Wirkungsquantum.

Abb. 9 zeigt die aus den Bremsspektren bestimmten $\lambda_{\min}$ -Werte als Funktion von $1/U_A$.

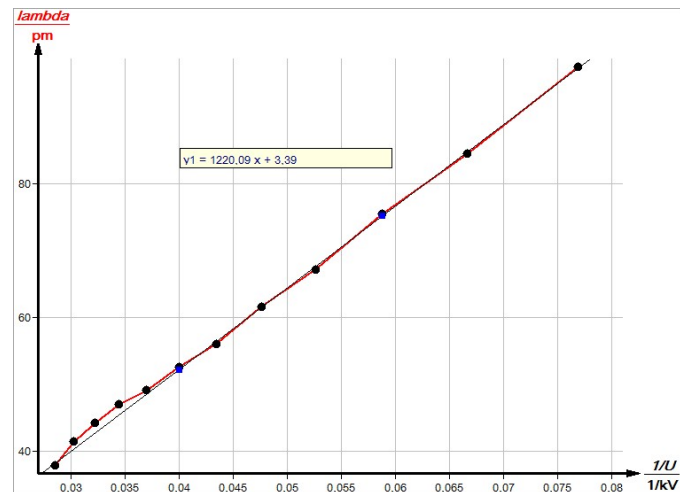


Abb. 9: Duane-Huntsches-Verschiebungsgesetz:
 $\lambda_{\min} = f(1/U_A)$

Der Wert für die Steigung m der resultierenden Geraden bestätigt die Beziehung nach dem Duane-Huntsches Verschiebungsgesetz, Formel (2):

$$m = \frac{\lambda_{\min}}{1/U_A} = (12,20 \pm 0,07) \cdot 10^{-5} \text{ V} \cdot \text{m}$$

Aus der Schar der Bremsspektren kann das Plancksche Wirkungsquantum h bestimmt werden. Aus (3) und (4) ergibt sich:

$$U_A = \frac{h \cdot c}{2e \cdot d \cdot \sin \vartheta} \quad (5)$$

Trägt man nun $\sin \vartheta_{\min}$ als Funktion von $1/U_A$ auf, erhält man wie in Abb 10 zu sehen eine Gerade, deren Steigung

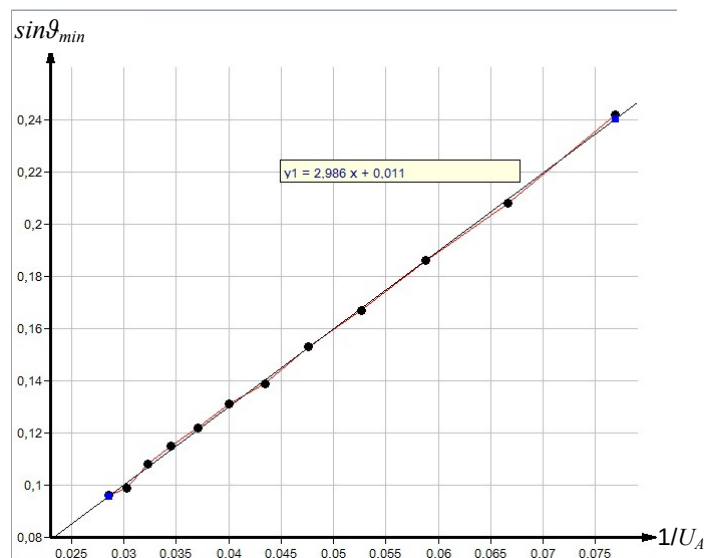


Abb. 10: Plancksches Wirkungsquantum:
 $\sin \vartheta_{\min} = f(1/U_A)$

$$m = \frac{h \cdot c}{2e \cdot d}$$

man aus Abb. 10 erhält. Mit einem experimentell ermittelten Wert von $m = (2,986) \cdot 10^3 \text{ pm} \cdot \text{V}$ erhält man für das Plancksche Wirkungsquantum also:

$$h = \frac{m \cdot 2 \cdot e \cdot d}{c} = 6,43 \cdot 10^{-34} \text{ Js}; \frac{\Delta h}{h} = \pm 3\%$$

Auswertung der Messungen mit Hilfe der Software „measure“

Zur Auswertung der Messungen mit Hilfe der Software „Röntgenspektroskopie“ sind zuerst in den Spektren die Glanzwinkel ϑ (Kristallwinkel = x-Achse) in die entsprechenden Werte für die Wellenlängen umzuwandeln. Dazu sind nacheinander folgende Funktionen anzuwählen:

1. „Messauswertung“ – „Röntgenspektroskopie“ – „x-Achse umrechnen“ – „Wellenlänge (berechne)“.
Aus den jetzt umgewandelten Spektren ($\text{Imp/s} = f(\lambda / \text{pm})$) erhält man die Duane-Hunt-Gerade mit folgenden Schritten:

2. Nacheinander „Messauswertung“ – „Röntgenspektroskopie“ – „Duane-Hunt-Gerade“ anklicken. Es erscheint das Zusatzfenster „Duane-Hunt-Gerade“.

Nun wird der Einsatzzpunkt des Bremspektrums schmalbandig mit Hilfe des Markers gekennzeichnet und danach „übernehmen“ angeklickt. Im Zusatzfenster erscheint nun das zugehörige Wertepaar für die Anodenspannung und die Wellenlänge. Das gleiche Verfahren ist für die übrigen Spektren mit den verschiedenen Anodenspannungen zu wiederholen.

Zur Anzeige der Geraden wird nun „Duane-Hunt-Gerade erstellen“ angeklickt.

Das Plancksche Wirkungsquantum erhält man abschließend durch Anklicken von „Messauswertung“ – „Röntgenspektroskopie“ – „Planck-Konstante bestimmen“ (siehe Abb. 11).

Mit „Darstellungsoptionen“ – „Messkanäle“ und „Symbole“ können bei Bedarf in die Duane-Hunt-Gerade die zugehörigen Messpunkte eingetragen werden.

Unter der Hilfe-Funktion der Software „Measure“ finden Sie weitere, detaillierte Erklärungen der vielen Funktionen des Programms.

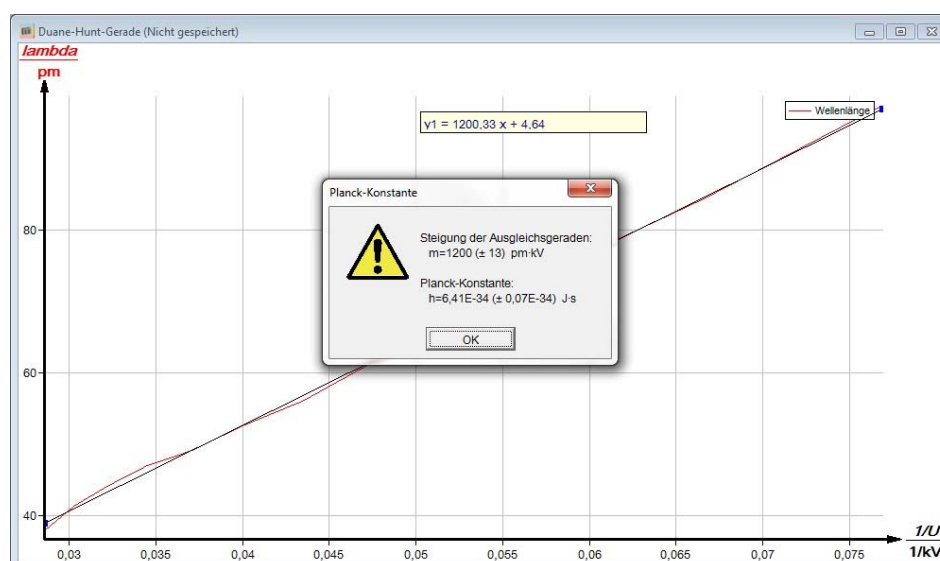


Abb. 11: Duane-Hunt-Gerade mit automatisch errechneter Planck-Konstante