



Institut für komplexe Materialien
Abteilung Mikro- und Nanostrukturen
Labor für Analytische TEM



Leibniz-Institut für
Festkörper- und
Werkstoffforschung
Dresden

Jürgen Thomas /
Thomas Gemming
15. Mai 2014

Praktikum „Statistische Fehler bei der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDXS)“

Kurzübersicht über die Thematik

1. Transmissionselektronenmikroskop (TEM)

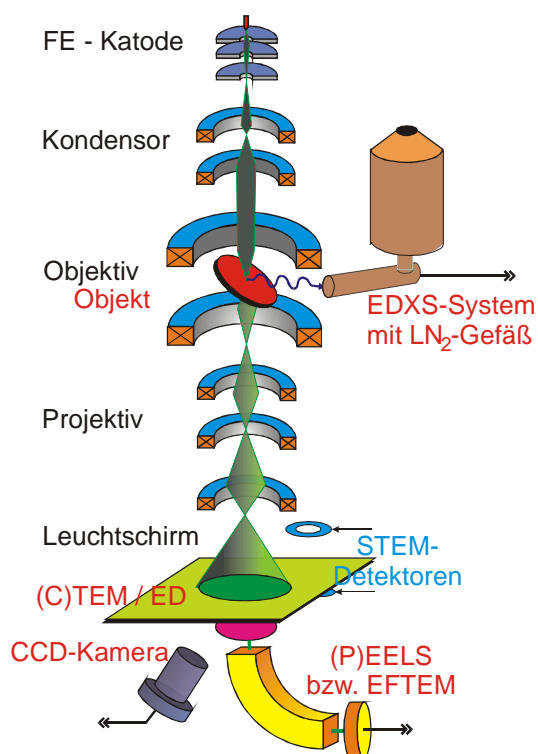


Bild 1: Schema eines analytischen Transmissionselektronenmikroskops

Das analytische Transmissionselektronenmikroskop kombiniert die konventionelle transmissionselektronenmikroskopische Abbildungstechnik einschließlich der Elektronenbeugung mit Möglichkeiten der Elementanalyse (vgl. Bild 1). Dazu ist das Mikroskop mit Detektoren ausgerüstet, die den Nachweis elementspezifischer Ergebnisse der Wechselwirkung zwischen den Strahlelektronen und dem Untersuchungsobjekt gestatten. Eingesetzt werden Spektrometer für die charakteristische Röntgenstrahlung (EDXS) aus dem Objekt und solche für die Energieverluste (EELS), die die Strahlelektronen beim Durchgang durch das Objekt erleiden.

Ziel des Versuchs ist es, den Praktikanten einen Eindruck von den Möglichkeiten und Problemen der Werkstoffcharakterisierung mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDXS) im Transmissionselektronenmikroskop zu vermitteln. Sowohl die Emission von Röntgenstrahlung als auch deren Nachweis sind statistische Prozesse; die Einschätzung der dabei auftretenden Messfehler ist zwingend notwendig und soll im

Praktikumsversuch am Beispiel veranschaulicht und geübt werden.

Im TEM werden dünne Proben (Dicke $< \text{ca. } 100 \text{ nm}$) von Elektronen durchstrahlt und nach gleichen optischen Gesetzmäßigkeiten wie beim (Durchstrahlungs-)Lichtmikroskop abgebildet. Als Elektronenlinsen fungieren rotationssymmetrische magnetische Felder. Ähnlich wie beim Lichtmikroskop wird die Bestrahlungsintensität (hier: die Elektronenstromdichte auf der Probe) durch unterschiedliche Strahlfokussierung mit Kondensorlinsen eingestellt. Diese Fokussierung ermöglicht die Analyse kleinster Probenbereiche. Als Probe benutzen wir im Praktikum eine dünne Cr-Si-Mischschicht. Das Elektronenmikroskop wird vom Praktikumsbetreuer vor Beginn des Praktikums auf den EDXS-Einsatz vorbereitet.

2. Energiedispersive Röntgenspektroskopie

Durch inelastische Wechselwirkung der Strahlelektronen mit den Elektronenhüllen der Atome innerhalb des elektronenmikroskopischen Objektes können u.a. Elektronen von inneren Schalen entfernt werden. Dieser Zustand ist nicht stabil und wird durch Übergang von Elektronen aus energetisch höheren Schalen verändert. Die dabei freiwerdende Energie wird zur Emission eines Röntgenquants oder eines AUGER-Elektrons benutzt, deren Energien wiederum charakteristisch für den energetischen Abstand der beteiligten Elektronenzustände und damit für das Element sind. Für die Röntgenspektroskopie sind die Quantenenergien maßgebend. Die Elektronenzustände werden durch vier Quantenzahlen beschrieben: die Hauptquantenzahl n kennzeichnet die Schale ($n = 1$: K-Schale, $n = 2$: L-Schale, $n = 3$: M-Schale usw.); die Nebenquantenzahl l kennzeichnet den Bahndrehimpuls ($l = 0, \dots, n-1$), die magnetische Quantenzahl m die z -Komponente des Drehimpulses ($m = -l \dots +l$) und die Spinquantenzahl s den Eigendrehimpuls des Elektrons ($s = \pm 1/2$). Die

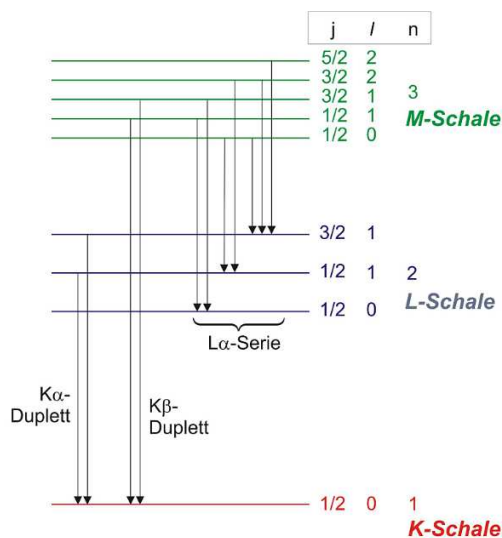


Bild 2: Termschema zur Erläuterung der Peakbezeichnung bei EDXS

Elektronen müssen sich in mindestens einer dieser Quantenzahlen unterscheiden (PAULI-Prinzip). Die Gesamtdrehimpuls-Quantenzahl ist $j = l + s$. Für Strahlung sind quantenmechanisch nur Übergänge erlaubt, für die gilt: $\Delta l = \pm 1$ und $\Delta j = 0, \pm 1$. Die möglichen Elektronenenergiezustände für die inneren drei Schalen und die zwischen ihnen erlaubten Übergänge sind schematisch in Bild 2 dargestellt.

Die Bezeichnung der charakteristischen Röntgenlinien („Peaks“) im Spektrum leitet sich aus dem Termschema (Bild 2) ab: Der Großbuchstabe (z.B. K) gibt die ionisierte Schale an, die durch einen Elektronenübergang aufgefüllt wird. Der griechische Buchstabe gibt an, aus welcher Schale das Auffüllelektron stammt.

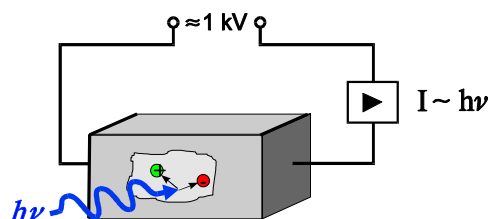


Bild 3: Schema des Röntgennachweises im Halbleiterdetektor

Bei der energiedispersiven Röntgenspektroskopie erfolgt der *energieselektive Nachweis der Röntgenstrahlung mit einem Halbleiterdetektor* (vgl. Bild 3). Das Röntgenquant dringt nach Passieren eines dünnen ($0,3 \mu\text{m}$ dicken) Kunststofffensters in einen Silizium- (oder Germanium-) Einkristall ein und erzeugt Elektron-Loch-Paare. Die Ladungsträger verursachen einen kurzzeitigen Strompuls I im äußeren Stromkreis. Die Energie des Röntgenquants bestimmt die Zahl der Elektron-Loch-Paare

und damit die Höhe des Strompulses. Die Zahl der emittierenden Atome in der Probe („Elementkonzentration“) bestimmt die Zahl der Röntgenquanten und damit die Zahl der Strompulse pro Zeiteinheit. Die Energie zur Erzeugung eines freien Ladungsträgers ist keine konstante Größe, so dass die Zahl der Ladungsträger pro Röntgenquant statistisch um einen Erwartungswert schwankt. Dies begrenzt die Energieauflösung des energiedispersiven Spektrometers auf etwa 100 eV . Zur Verminderung des Rauschens im Detektoreinkristall und dem unmittelbar dahinter befindlichen Vorverstärker werden beide mit flüssigem Stickstoff (-196°C) gekühlt.

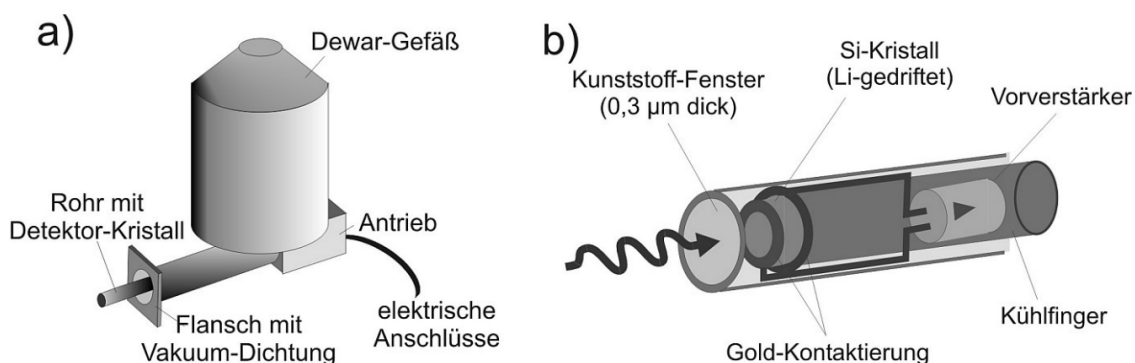


Bild 4: Aufbau eines EDX-Detektors mit Flüssig-Stickstoff-Kühlung. a) Außenansicht. B) Detail: Rohr mit Detektor-Kristall (Bild 9-7 aus [2])

Die Verarbeitung dieser Informationen erfolgt im Computer. Die Software beinhaltet u.a. auch die abgespeicherten charakteristischen Röntgenenergien und ermöglicht die schnelle Elementanalyse.

3. EDX-Spektren von Cr-Si und ihre Auswertung

Im EDX-Spektrum (Bild 5) sind drei Chrom-Peaks ($L\alpha$ bei $0,57 \text{ keV}$ mit $L\beta$ bei $0,58 \text{ keV}$, $K\alpha$ bei $5,41 \text{ keV}$ und $K\beta$ bei $5,95 \text{ keV}$) sowie ein Silizium-Peak ($K\alpha$ bei $1,74 \text{ keV}$) zu sehen. Cr- $L\alpha$ - und Cr- $L\beta$ -Peaks sind wegen der begrenzten Energieauflösung des Spektrometers nicht getrennt wahrnehmbar.

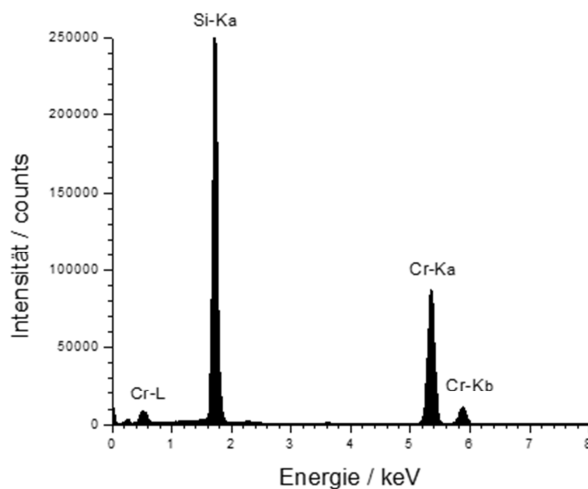


Bild 5: Typisches EDX-Spektrum von einer Cr-Si-Schicht

Für das Verhältnis der Konzentrationen c_A und c_B zweier Elemente A und B gilt nach CLIFF und LORIMER [3] die Beziehung

$$\frac{c_A}{c_B} = \frac{k_A}{k_B} \cdot \frac{I_A}{I_B} = k_{AB} \cdot \frac{I_A}{I_B}$$

mit I_A und I_B als Intensitäten der charakteristischen Röntgenpeaks (Peakflächen) der Elemente A und B (z.B. der $K\alpha$ -Peaks von Cr und Si in Bild 5) sowie k_A und k_B als zugehörige Empfindlichkeitsfaktoren. Die Empfindlichkeitsfaktoren berücksichtigen die energieabhängigen Wirkungsquerschnitte der Einzelschritte bei der Röntgenspektroskopie.

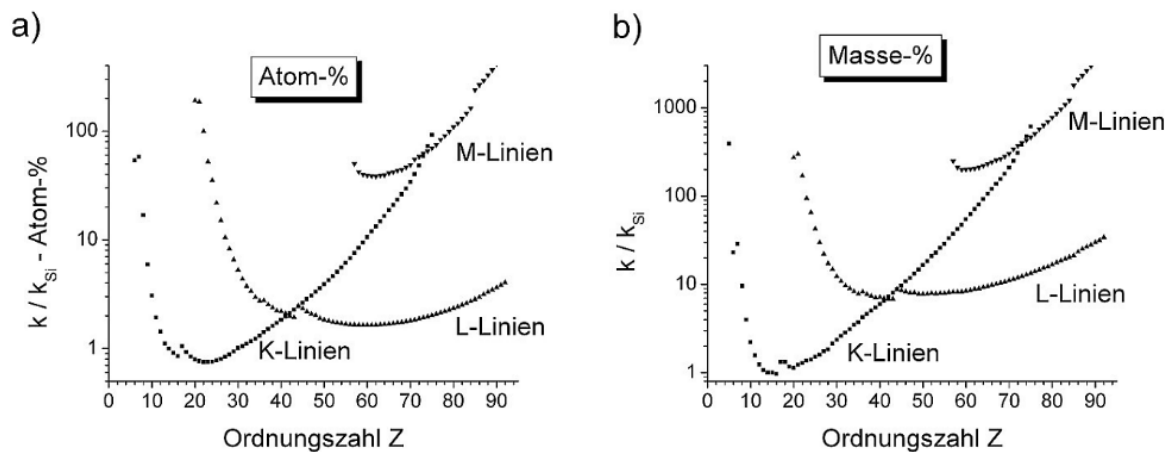


Bild 6: Berechnete, auf Si bezogene Cliff-Lorimer-k-Faktoren für Atomprozent (a) und Masseprozent (b) für 300 keV-Elektronen (Bild 10-56 aus [2])

Die quantitative Auswertung des Spektrums erfordert die Ermittlung der Peakintensitäten. Im einfachsten Fall werden dazu die Intensitäten in den einzelnen Kanälen eines Peaks summiert. Strenggenommen ist dabei die Berücksichtigung des Untergrundes notwendig, was aber in unserem Fall wegen dessen im Vergleich zu den Hauptpeaks geringer Höhe entfallen kann.

Ursache für den geringen Untergrund in den im TEM aufgenommenen Spektren ist der geringe Bremsstrahlungsanteil infolge der extrem kleinen Probendicke.

Dies sind die Wahrscheinlichkeit für die Ionisierung durch Entfernung eines Elektrons aus einer inneren Schale (Ionisationsquerschnitt), die Wahrscheinlichkeit für die Emission eines Röntgenquants (Fluoreszenzausbeute) und die Wahrscheinlichkeit, mit der das Röntgenquant im Spektrometer detektiert wird (Spektrometereffizienz). Die Empfindlichkeitsfaktoren k_{AB} können anhand von Modellen berechnet oder mit Hilfe von Standards gemessen werden. In der Regel sind sie auf Silizium bezogen (vgl. Bild 6).

Die berechneten Faktoren hängen von den benutzten Modellen zur Ermittlung der o.g. Wahrscheinlichkeiten ab und sind damit systematischen Fehlern unterworfen, deren relative Werte von ca. 5 % bei im Periodensystem nahe beieinander liegenden, mittelschweren Elementen und Nutzung der K-Peaks bis zu mehr als 50 % in anderen Fällen liegen können.

4. Fehlerbetrachtung

Wir unterscheiden systematische und zufällige Fehler. *Systematische Fehler* sind in Unzulänglichkeiten des Messinstrumentes, in statischen äußeren Einflüssen auf das Messergebnis oder in den Modellen, die der Auswertung der Ergebnisse zugrunde liegen, begründet. Systematische Fehler wirken „in eine Richtung“, d.h. sie verschieben das gemessene Ergebnis gegen den Erwartungswert. Wenn die Größen (und Ursachen) der systematischen Fehler bekannt sind, kann das Ergebnis korrigiert werden.

Zufällige Fehler entstehen durch Unzulänglichkeiten beim Messprozess und führen zur Streuung der Messwerte. Dies kann begründet sein in der zufälligen (statistischen) Auslösung der Ereignisse, die das Messresultat produzieren (Beispiele: radioaktiver Zerfall, Emission von Röntgenstrahlung), in Einflüssen von veränderlichen Randbedingungen, die unbekannt sind oder ungenügend erfasst werden können, oder auch in Nachlässigkeiten beim Messen.

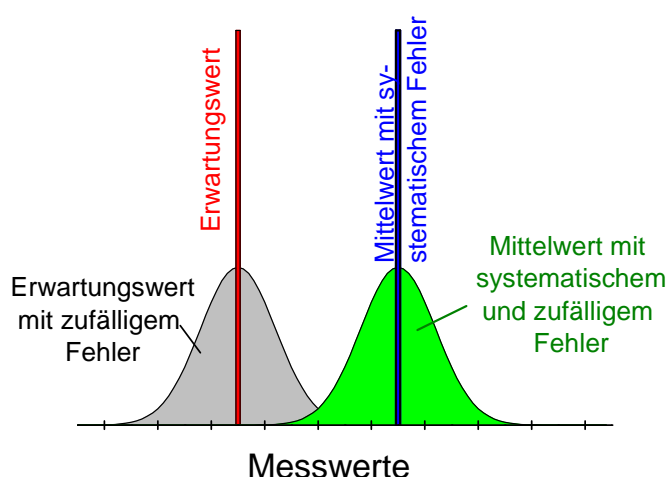


Bild 7: Einfluss von systematischem und zufälligem Fehler auf das Messergebnis

In Bild 7 sind die Auswirkungen von systematischem und zufälligem Fehler auf die gemessenen Werte veranschaulicht. Der Erwartungswert stellt das „richtige“ Ergebnis dar, ein systematischer Fehler beeinträchtigt die *Richtigkeit* des Messergebnisses. Der zufällige Fehler führt zur Streuung der Messwerte. Er beeinträchtigt die *Präzision* der Messung. Sehr kleine systematische und zufällige Fehler führen zu einer hohen *Genauigkeit*.

Wir wollen uns hier mit den zufälligen Fehlern genauer befassen. Ausgangspunkt ist die Annahme einer *Normalverteilung* der Messwerte, d.h. die fehlerbehafteten Messwerte unterliegen einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, die der Gauß-Funktion

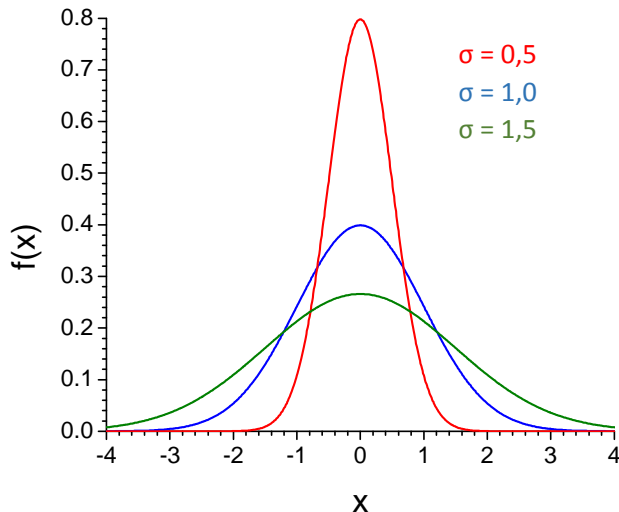


Bild 8: Wahrscheinlichkeitsverteilung nach Gleichung (1) für $x_0 = 0$ und verschiedene Werte von σ

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

folgt (grafische Darstellung s. Bild 8). Die Funktion ist normiert, d.h. es gilt

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) = 1, \quad (2)$$

weil sicher ist, dass überhaupt irgendein Wert gemessen wird.

Wir wollen uns nunmehr mit der Rolle von σ , was auch als Standardabweichung bezeichnet wird, befassen.

Aus Bild 8 geht hervor, dass σ die Breite der Gauß-Funktion bestimmt. Zur genaueren Diskussion differenzieren wir die Funktion (1) zweimal nach x und erhalten:

$$f'(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} \cdot \left(-\frac{2 \cdot (x-x_0)}{2\sigma^2} \right) = -\frac{(x-x_0)}{\sigma^3\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} f''(x) &= -\frac{1}{\sigma^3\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} - \frac{(x-x_0)}{\sigma^3\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} \cdot \left(-\frac{2 \cdot (x-x_0)}{2\sigma^2} \right) \\ &= -\frac{1}{\sigma^3\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} + \frac{(x-x_0)^2}{\sigma^5\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Am Wendepunkt einer Funktion ist die zweite Ableitung gleich Null, damit gilt dort:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sigma^3\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x_{WP}-x_0)^2}{2\sigma^2}} &= \frac{(x_{WP}-x_0)^2}{\sigma^5\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x_{WP}-x_0)^2}{2\sigma^2}} \\ (x_{WP}-x_0)^2 &= \sigma^2, \\ x_{WP} &= x_0 \pm \sigma \end{aligned} \quad (6)$$

d.h. σ ist der Abstand der Wendepunkte der Gauß-Funktion vom Zentrum bei x_0 .

Wir überlegen weiter, welcher Anteil der Messwerte innerhalb eines Intervalls liegt, welches durch Vielfache der Standardabweichung σ vorgegeben ist. Dazu muss die Funktion (1) in den durch das Vielfache n von σ gegebenen Grenzen integriert werden:

$$S(n) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-n\sigma}^{n\sigma} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (7)$$

Dieses Integral ist bekannt als Wahrscheinlichkeitsintegral und nicht elementar lösbar, wohl aber durch numerische Summation. Damit lassen sich beispielsweise folgende Werte berechnen:

n	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$S(n)$	38,3 %	68,3 %	86,6 %	95,4 %	98,8 %	99,7 %

Tabelle 1: Wahrscheinlichkeitsintegral für verschiedene statistische Sicherheiten

$S(n)$ wird üblicherweise als *statistische Sicherheit* bezeichnet. Im Bereich $x_0 \pm \sigma$ liegen die Messwerte demnach mit einer statistischen Sicherheit von 68,3 %, im Bereich $x_0 \pm 2\sigma$ mit einer solchen von 95,4 % usw.

Statistische Rechnungen erfordern eine große Anzahl von Messwerten. In der Praxis wird anstelle der Wahrscheinlichkeitsverteilung zunächst die Häufigkeitsverteilung der Messwerte ermittelt. Dazu wird der gesamte Messwertbereich in Intervalle unterteilt, deren Breite klein gegen den Messwertbereich ist. Nehmen wir als Beispiel die 100-malige Messung der Schwingungsdauer eines Pendels. Aufgrund zufälliger Messfehler schwankt das Resultat im Bereich zwischen 5,00 s und 6,00 s. Wir wählen als Intervallbreite 0,1 s und legen folgende Intervalle fest: 5,0 s (4,96 s ... 5,05 s), 5,1 s (5,06 s ... 5,15 s), ... 6,0 s (5,96 s ... 6,05 s).

In der folgenden Tabelle ist die Anzahl der Messwerte, die in die einzelnen Intervalle fallen, zusammengestellt.

Intervall	Anzahl
5 s	1
5,1 s	4
5,2 s	7
5,3 s	12
5,4 s	16
5,5 s	19
5,6 s	17
5,7 s	12
5,8 s	7
5,9 s	4
6 s	1

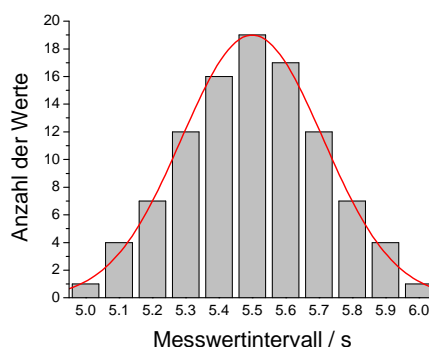


Bild 9: Häufigkeitsverteilung von Messwerten mit angepasster Gauß-Kurve (rot)

$$\left(H(x) = 19 \cdot e^{-\frac{(x-5,5 \text{ s})^2}{2 \cdot 0,212^2 \text{ s}^2}} \right)$$

Wir sehen, dass in diesem Fall die Häufigkeitsverteilung sehr gut durch die Gauß-Kurve angepasst werden kann. Die Messwerte unterliegen einer Normalverteilung. Diese Überprüfung kann in einfacher Weise grafisch durchgeführt werden. Dazu benutzen wir als Ausgangsfunktion eine Gauß-Funktion der Form

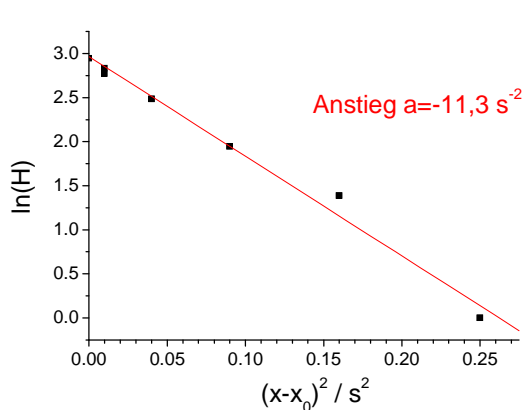


Bild 10: Logarithmische Darstellung mit Ausgleichsgerade zur Prüfung der Normalverteilung der Messwerte und zur grafischen Bestimmung der Standardabweichung

$$f(x_i) = y_i = A_0 \cdot e^{-\frac{(x_i-x_0)^2}{2\cdot\sigma^2}} \quad (8)$$

und erhalten nach Logarithmieren:

$$\ln y_i = \ln A_0 - \frac{(x_i - x_0)^2}{2 \cdot \sigma^2} \quad (9)$$

Dies entspricht einer Geradengleichung

$$y = b + a \cdot x \quad (10)$$

mit dem Achsenabschnitt b und dem Anstieg a . Der Vergleich der Gleichungen (9) und (10) liefert nach Auftrag von $\ln y_i$ über $(x_i - x_0)^2$ einen Anstieg

$$a = -\frac{1}{2 \cdot \sigma^2}, \quad \text{d.h.} \quad \sigma = \frac{1}{\sqrt{-2 \cdot a}} \quad (11)$$

Wir erhalten also aus dem Anstieg der angepassten Gerade („Ausgleichsgerade“) die Standardabweichung. Für unser Beispiel folgt aus dem Anstieg in Bild 10 $\sigma = 0,21 \text{ s}$ in Übereinstimmung mit der Angabe in Bild 9.

Bild 10 zeigt auch, dass die Einzelwerte nur wenig von der Ausgleichsgeraden abweichen, d.h. die Messwerte unterliegen tatsächlich der Gaußschen Normalverteilung.

Oft wird bei der statistischen Fehlerrechnung die Ermittlung der Häufigkeitsverteilung mit Anpassung einer Gauß-Funktion umgangen und die Standardabweichung nach der Formel

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (12)$$

mit dem arithmetischen Mittelwert (N : Zahl der Messwerte)

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (13)$$

und der Summe der quadratischen Abweichungen (auch als Varianz bezeichnet)

$$\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \quad (14)$$

abgeschätzt. Für unser obiges Beispiel erhalten wir mit Formel (12) $\sigma = 0,209$ s. Die mit den drei Methoden erhaltenen Standardabweichungen stimmen innerhalb von 1,5 % überein (0,209 s ... 0,212 s).

Die Standardabweichung und die vereinbarte statistische Sicherheit bestimmen den absoluten zufälligen Fehler Δy einer Messreihe. Er beträgt bei einer statistischen Sicherheit von 68,3 % $\Delta y = \sigma$, bei einer statistischen Sicherheit von 95,4 % $\Delta y = 2\sigma$ und bei einer solchen von 99,7 % $\Delta y = 3\sigma$ (vgl. Tabelle 1). Wird (wie üblich) als Resultat einer Messreihe der Mittelwert angegeben, beeinflusst auch die Zahl N der Einzelmessungen die Genauigkeit des Ergebnisses und muss demzufolge bei Angabe des Fehlers berücksichtigt werden. Für die Standardabweichung des Mittelwertes gilt

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} . \quad (15)$$

Der relative Fehler ist der Quotient aus absolutem Fehler und Mittelwert. Als Standard wird oft eine 95,4 %-ige statistische Sicherheit vorausgesetzt. Damit beträgt der relative Fehler des Mittelwertes

$$\frac{\Delta \bar{y}}{\bar{y}} = \frac{2 \cdot \sigma}{\bar{y} \sqrt{N}} . \quad (16)$$

Für die oben genannte Messreihe erhalten wir als Mittelwert für die Schwingungsdauer $\bar{T} = 5,501$ s und für die Standardabweichung des Mittelwertes $\bar{\sigma} = 0,21$ s / $\sqrt{100} = 0,021$ s. Der absolute zufällige Fehler des Mittelwertes beträgt also 0,04 s. Die Angabe der dritten Stelle nach dem Komma beim Mittelwert ist demzufolge unsicher und deshalb unsinnig. Das Ergebnis lautet

$$T = (5,50 \pm 0,04) \text{ s}, \quad \frac{\Delta T}{T} = 0,7\% .$$

Die Emission und der Nachweis von Röntgenstrahlung ist ein statistischer Effekt. Das Messergebnis ist eine Zählung von Einzelereignissen. In diesem Fall gilt bei k Ereignissen und Berücksichtigung allein der Emissions- und Nachweisstatistik für die Standardabweichung des Mittelwertes bei sehr großer Anzahl von Ereignissen

$$\bar{\sigma} = \sqrt{k} \quad (17)$$

und damit für den relativen Fehler bei 68,3 %-iger statistischer Sicherheit

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{1}{\sqrt{k}} . \quad (18)$$

5. Literaturhinweise

- [1] J. Thomas: Praktikumsanleitung zum Versuch „Hochauflösende Mikroskopie“ im IFW Dresden vom 01. 08. 2012 (Download von www.antem.de)

- [2] J. Thomas, T. Gemming: „Analytische Transmissionselektronenmikroskopie – Eine Einführung für den Praktiker“, Springer-Verlag Wien, 2013, ISBN 978-3-7091-1440-1
- [3] G. Cliff, G.W. Lorimer: „The quantitative Analysis of thin specimens“, J. Microsc. **103**, 203–207 (1975)

Aufgabenstellungen:

1. Kennenlernen der Funktionen des Transmissionselektronenmikroskops (TEM) Tecnai F30 mit EDX-Spektrometer sowie der EDX-Software soweit dies zur Aufnahme von EDX-Spektren notwendig ist.
2. Aufnahme und Speichern der Rohdaten von EDX-Spektren von einer dünnen CrSi-Schicht im Tecnai F30 (Primärelektronenenergie 300 keV), ausgerüstet mit einem EDX-Spektrometer (je 10 Spektren bei Aufnahmezeiten von 10 s, 20 s und 40 s).
3. Speichern der Rohdaten in Text-Dateien (wird von Praktikumsbetreuer vorgenommen).
4. Statistische Auswertung der Messergebnisse:
 - Importieren der Text-Daten in ein Tabellenkalkulationsprogramm,
 - Ermittlung der Peakintensitäten für die Si-K α -, Cr-K α , Cr-K β sowie Cr-L-Linien,
 - Berechnung der Intensitätsverhältnisse Cr-K α /Si-K α , Cr-K β /Si-K α und Cr-L/Si-K α
 - Berechnung der Standardabweichungen für Peakintensitäten und Intensitätsverhältnisse nach Formel (12), getrennt für die drei Messzeiten,
 - Ermittlung der Häufigkeitsverteilungen für die Intensitätsverhältnisse Cr-K α /Si-K α , getrennt nach Messzeiten,
 - Anpassen von Gauß-Kurven an die Häufigkeitsverteilungen,
 - Vergleich der Halbwertsbreiten der aus angepassten Gauß-Kurven folgenden Standardabweichungen mit den berechneten.
5. Ausarbeitung des Versuchsprotokolls mit Diskussion der Ergebnisse.
6. Konsultation zu den Ergebnissen.

Die Aufgaben 1 bis 3 sind während des Praktikums im IFW (1 DS) zu erledigen, die Auswertung 4 und die Diskussion 5 zu Hause. Das Protokoll ist bis zur Konsultation fertigzustellen. Sie sollte etwa 1 h dauern und ist gesondert mit dem Praktikumsbetreuer zu vereinbaren.

Um eine ausreichende Anzahl von Messungen zu bekommen, werden die aktuellen 10 Messungen der bereits von vorhergehenden Praktika vorhandenen Menge hinzugefügt.

Organisation des Praktikums:

Die Studenten sollten sich zu Gruppen von 4 bis 5 Personen zusammenfinden und mit dem Praktikumsbetreuer zunächst einen Termin (Länge: 1 DS) für die Messungen vereinbaren.

Praktikumsbetreuer: Dr. Jürgen Thomas, IFW Dresden, Raum A 1E 05. Tel. (0351) 4659250, E-Mail: j.thomas@ifw-dresden.de.