

# Neutronenaktivierung (NAK)

## Fortgeschrittenen Praktikum, SS 2008

Alexander Seizinger, Michael Ziller, Philipp Buchegger, Tobias Müller  
Betreuer: Georg Meierhofer  
Tübingen, den 1. Juli 2008

## 1 Theorie

### 1.1 Zerfallsarten

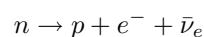
Nicht alle Atomkerne sind stabil, abhängig von der Anzahl an Protonen  $Z$  und Neutronen können sie sich durch Zerfallsprozesse in Atomkerne mit anderer Kernladungszahl  $Z$  umwandeln.

#### 1.1.1 $\alpha$ -Zerfall

Auf die im Kern gebundenen Protonen wirken zwei konkurrierende Kräfte, einerseits die auf kurzen Distanzen stärkere, anziehend wirkende **starke Kernkraft**, andererseits die längerreichweitige, abstoßende **elektromagnetische Kraft**. Durch den Tunneleffekt ist es möglich, dass  $\alpha$ -Teilchen, welche aus je zwei Protonen und Neutronen bestehen, den Kern verlassen. Beim Durchqueren von Materie verlieren  $\alpha$ -Teilchen durch Stöße mit anderen Atomen ihre Energie sehr rasch, ihre effektive Reichweite in Luft beträgt einige Zentimeter, schon eine dünne Papierfolie ist ausreichend, um  $\alpha$ -Strahlung effektiv abzuschirmen.

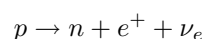
#### 1.1.2 $\beta$ -Zerfall

Unter dem Sammelbegriff  $\beta$ -Zerfall versteht man meist mehrere verschiedene Prozesse. Allen zugrunde liegt folgende durch die **schwache Kernkraft** bestimmte Umwandlung



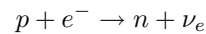
wobei  $\bar{\nu}_e$  das (Elektron-)Antineutrino bezeichnet. Diese Gleichung beschreibt den Zerfall eines Neutrons, der auch bei freien Neutronen stattfindet. Zerfällt ein Neutron wie oben angegeben so emittiert der Kern ein Elektron, man spricht vom  $\beta^-$ -Zerfall.

Analog kann in protonenreichen Kernen die Umwandlung



erfolgen, da der Kern in diesem Fall ein Positron abstrahlt spricht man vom  $\beta^+$ -Zerfall. Da die Masse des Neutrons geringfügig größer ist als die Masse eines Protons ist dieser Zerfall bei ungebundenen Protonen nicht zu beobachten.

In Konkurrenz zum  $\beta^+$ -Zerfall kann insbesondere bei neutronenarmen Kernen ein Elektron einer inneren Schale nach



mit einem Proton im Kern in ein Neutron umgewandelt werden, wobei ein Neutrino emittiert wird. Diesen Prozess bezeichnet man als **Elektroneneinfang**.

$\beta$ -Strahlung hat eine geringfügig höhere Reichweite als  $\alpha$ -Strahlung, durch Stöße mit anderen Elektronen und Bremsstrahlung verlieren die Elektronen des  $\beta^-$ -Zerfalls rasch ihre Energie. Zur Abschirmung genügt eine dünne Metallplatte, allerdings ist zu beachten, dass die entstehende Bremsstrahlung ebenfalls abgeschirmt werden muss. Die beim  $\beta^+$ -Zerfall emittierten Positronen werden sehr schnell mit Elektronen der umgebenden Materie zerstrahlen.

### 1.1.3 $\gamma$ -Strahlung

Befindet sich ein Atomkern in einem angeregten Zustand so kann er durch Abgabe eines Photons ( $\gamma$ -Quants) in einen energetisch niedrigeren Zustand zurückfallen. Dies wird häufig auch als  $\gamma$ -Zerfall bezeichnet, jedoch ist zu beachten, dass sich an der Anzahl von Protonen und Neutronen im Kern nichts ändert, lediglich der **Anregungszustand** des Kerns verringert sich. Da es sich bei  $\gamma$ -Strahlen also um hochenergetische elektromagnetische Strahlung handelt können sie in Materie um ein Vielfaches weiter eindringen als  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Strahlen. Zur effektiven Abschirmung sind dicke Bleiplatten nötig.

## 1.2 Mathematische Beschreibung von Zerfallsprozessen

Die im vorgehenden Abschnitt beschriebenen Zerfallsprozesse finden zufällig statt, es ist nicht möglich, den exakten Zerfallszeitpunkt eines bestimmten Atoms vorherzusagen. Es lässt sich jedoch die Wahrscheinlichkeit bestimmen, dass ein Zerfall innerhalb eines festgelegten Zeitraums stattfindet. Betrachten wir nun eine Menge von  $N$  gleichen Atomen. Als die Aktivität  $A$  definiert man die Anzahl der Zerfälle pro Zeiteinheit,

$$A := -\frac{d}{dt}N$$

### 1.2.1 Zerfall ohne Aktivierung

Da die Wahrscheinlichkeit des Zerfalls eines Einzelatoms unabhängig von der Gesamtzahl ist ergibt sich

$$\frac{d}{dt}N(t) = -\lambda N(t) \quad (1)$$

wobei der Proportionalitätsfaktor  $\lambda$  als Zerfallskonstante bezeichnet wird.

Als Lösung dieser Differentialgleichung erhalten wir

$$N(t) = N(t_0)e^{-\lambda t}$$

wobei  $N(t_0)$  der Anzahl von Atomen zu Beginn der Messung entspricht.

### 1.2.2 Zerfall mit Aktivierung

Zusätzlich zum Zerfall der Atome findet hierbei eine äußere Anregung (zum Beispiel durch Neutronenbeschuss) statt, wodurch  $P$  zusätzliche Atome des betrachteten Isotops erzeugt werden. Die Differentialgleichung (1) muss also wie folgt ergänzt werden

$$\frac{d}{dt}N(t) = -\lambda N(t) + P(t) \quad (2)$$

Unter der Annahme, dass  $P(t) = P_0$  zeitlich konstant ist, erhalten wir als Lösung dieser Differentialgleichung

$$N(t) = N_0(1 - e^{-\lambda t})$$

beziehungsweise für die Aktivität  $A$

$$A(t) = A_S(1 - e^{-\lambda t})$$

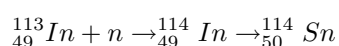
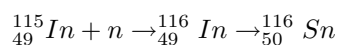
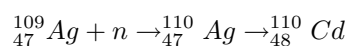
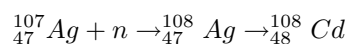
wobei  $A_S$  als Sättigungsaktivierung bezeichnet wird. Hierbei herrscht also ein Gleichgewicht zwischen Zerfällen und Aktivierungsvorgängen.

## 2 Fragen

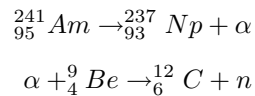
### 2.1 Isotopenzusammensetzung von natürlichem Silber und Indium

Natürliches Silber besteht zu 51.839% aus  $^{107}_{47}\text{Ag}$  und zu 48.161% aus  $^{109}_{47}\text{Ag}$ . Indium besteht zu 95.7% aus  $^{115}_{49}\text{In}$  und zu 4.3% aus  $^{113}_{49}\text{In}$ . Bei natürlichem Silber tragen, da die Isotope fast im selben Verhältnis sind, beide Isotope ähnlich zu der Zerfallskurve bei, wohingegen bei Indium die Zerfälle von  $^{115}_{49}\text{In}$  stark überwiegen.

### 2.2 Zerfälle aktivierter Silber- und Indiumproben



### 2.3 Aufbau einer AmBe(RaBe)-Quelle



Die so erzeugten Neutronen werden mittels Paraffinblöcken aus dem MeV-Bereich auf thermische Energien im eV-Bereich abgebremst. Die beste Moderation hat man mit Stoßpartnern gleicher Masse, deswegen nimmt man Paraffin mit seinen zahlreichen Wasserstoffkernen.

Die Pb-Abschirmung der Quelle ist nötig, um die  $\gamma$ -Strahlen abzuschirmen. Da wir eine AmBe-Quelle hatten und keine RaBe, muss die Abschirmung anstatt 10cm nur 1cm dick sein, weil nur niederenergetischere  $\gamma$ -Strahlung entsteht.

Die Energie, die in einem Zählrohr zur Erzeugung eines Elektron-Ionen-Paares benötigt wird ist typischerweise im Bereich von 30eV.

Die Zählrate um einen statistischen Fehler von 1% auszugleichen beträgt 10000. Diese Zählrate ist aber unpraktikabel, da das Messintervall so viel zu kurz wäre.

Die Untergrundstrahlung, die nicht aus Zerfällen von Ag oder In stammt, kommt von uranhaltigem Gestein, Radon in der Luft und von der kosmischen Strahlung.

### 2.4 Anregungsenergie des Compoundkerns ${}^{116}\text{In}$

Der Massendefekt, welcher durch die Bindung des Neutrons im Kern auftritt entspricht der Anregungsenergie, da wir von moderierten Neutronen ausgehen. [wik08], [nuk]

$$E = mc^2 = (m_{115\text{In}} + m_N - m_{116\text{In}}) \cdot c^2 = 6.7937\text{MeV}$$

### 2.5 Zerfälle von ${}^{60}\text{Co}$

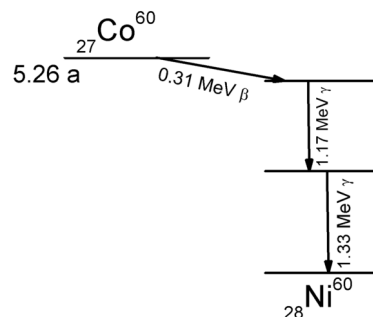


Abbildung 1: Zerfallsschema von  ${}^{60}\text{Co}$  [wik08]

${}^{60}\text{Co}$  ist ein starker  $\gamma$ -Strahler, seine Halbwertszeit beträgt 5.2714a

### 3 Versuch und Auswertung

#### 3.1 Versuchsaufbau

Es standen Silber- und Indiumproben in rechteckiger Plättchenform zur Verfügung. Ihre Aktivität ( $\gamma$ -Zerfälle) wurden mittels zweier Geiger-Müller-Zählrohre gemessen deren Daten direkt an einen angeschlossenen PC weitergeleitet werden. Zur Aktivierung der Proben stand eine AmBe-Neutronenquelle zur Verfügung.

#### 3.2 Bestimmung der Spannung an den Zählrohren (Kalibrierung)

Zur Bestimmung der idealen Spannung an den Zählrohren wurden mit Hilfe eine sehr schwachen  $^{60}\text{Co}$ -Probe die Empfindlichkeit bei verschiedenen Spannungen gemessen. Pro Spannungspunkt wurde je ein Rohr für 60 s bestrahlt und gemessen.

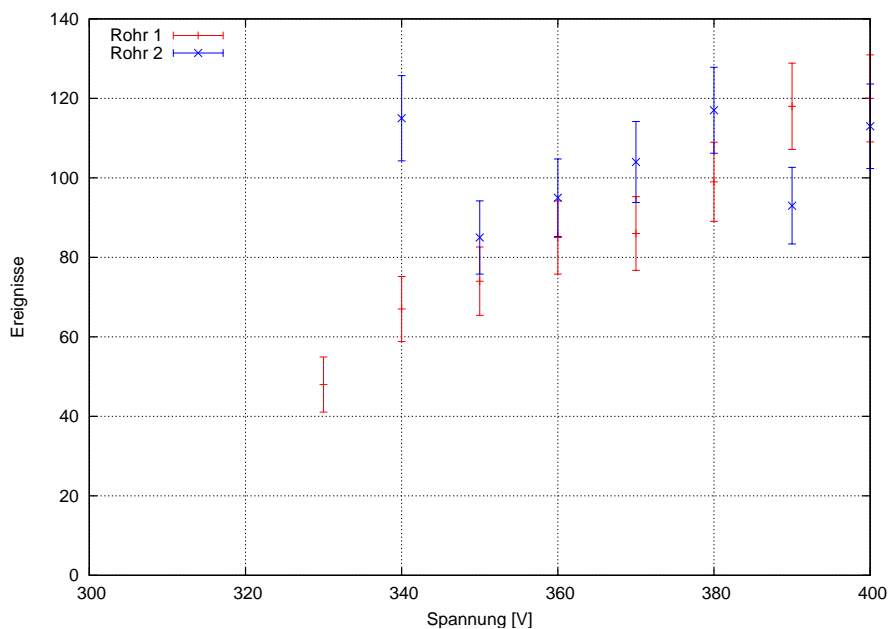


Abbildung 2: Aktivität in Abhängigkeit der Spannung am Zählrohr

Sobald das Zählrohr genug Spannung hat, sollte man etwa immer dieselbe Aktivität messen, die sich allerdings etwas statistisch um den eigentlich Aktivitäts-Mittelwert verteilt. Wir haben uns für einen Spannungswerte von 370 V für die folgenden Messungen entschieden.

#### 3.3 Untergrundmessung

Um nur die Zerfälle unserer Proben zu messen, wurde eine 60 min lange Untergrundmessung durchgeführt mit Messintervallen  $\Delta t = 60$  s.

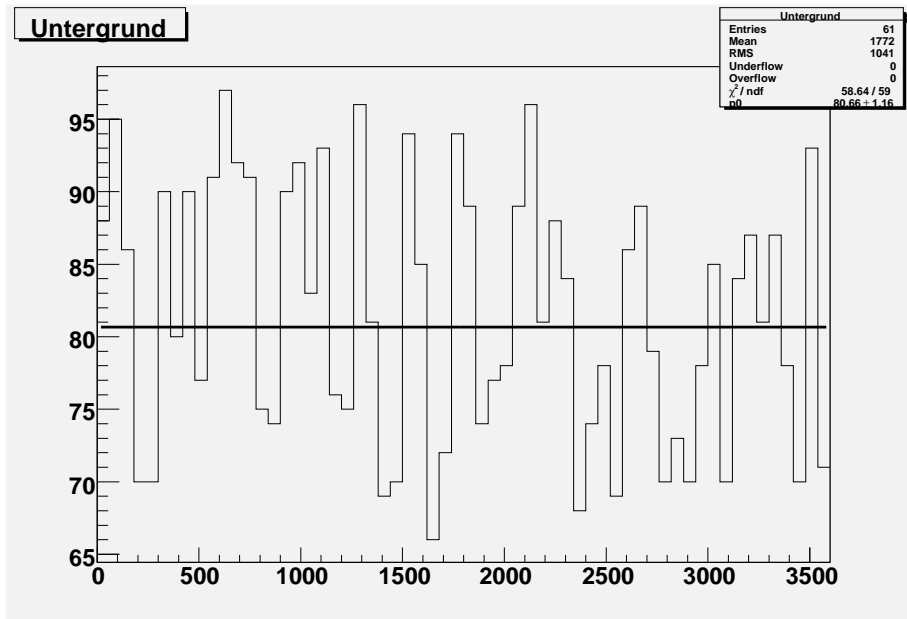


Abbildung 3: Untergrundmessung; x-Achse: Zeit [s]; y-Achse: Aktivität [Bq]

Mit Hilfe der Auswertesoftware wurde ein Mittelwert von

$$\bar{A} = \frac{80.66 \pm 1.16}{60s} = (1.344 \pm 0.01933) \text{ Bq}$$

bestimmt, der von den weiteren Messung dann abgezogen wurde.

### 3.4 Aktivierung von Silber

Die Silberprobe (bestehend aus ca. 51.8%  $^{107}\text{Ag}$  sowie 48.2%  $^{109}\text{Ag}$ ) wurde nacheinander über verschiedene Zeiträume mit Aktivierungszeit  $t_A = 5 \text{ s}, 10 \text{ s}, 20 \text{ s}, 30 \text{ s}, 45 \text{ s}, 60 \text{ s}, 90 \text{ s}, 120 \text{ s}, 300 \text{ s}, 600 \text{ s}, 900 \text{ s}$  in die Neutronen-Quelle aus AmBe eingeschoben und anschließend möglichst schnell (innerhalb von 4 – 6 s in die Messapparatur eingebracht und dort ihre Aktivität über eine Zeitraum von 400 s bestimmt.

In das Histogramm wurde dann ein Fit der Form

$$A(t) = p_0 \cdot e^{-p_1 t} + p_2 \cdot e^{-p_3 t} \tag{3}$$

gelegt, wobei  $p_2 = p_3 = 0$  für  $t_A \leq 30 \text{ s}$  gewählt wurde, da sich erst dann etwa der Zerfall des  $^{108}\text{Ag}$ -Isotops bemerkbar macht. Aus den Zerfallskonstanten  $p_1$  und  $p_3$  lassen sich dann die Halbwertszeiten  $T_{\frac{1}{2}}$  berechnen mit

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{p_{1,3}} \tag{4}$$

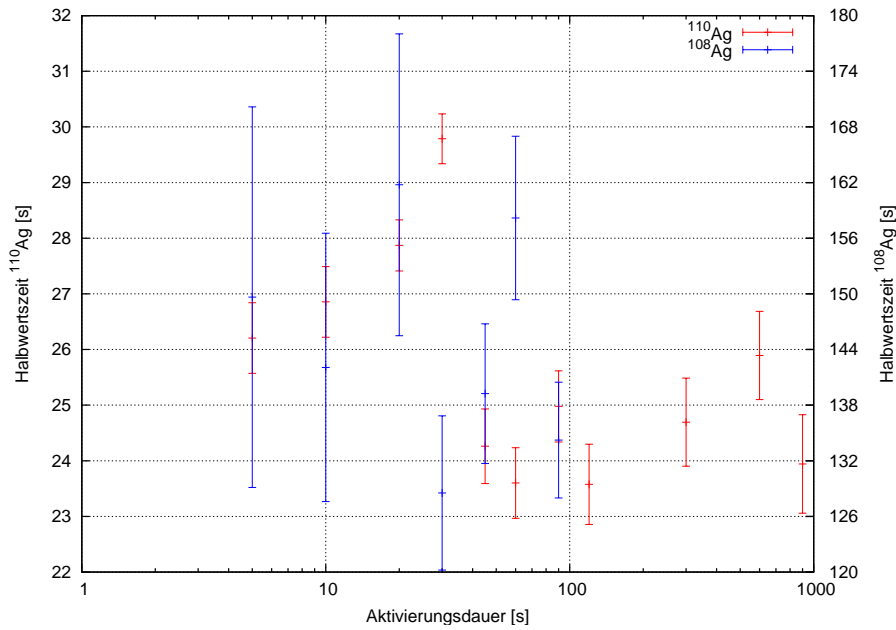


Abbildung 4: Halbwertszeiten in Abhängigkeit der Aktivierungsdauer

Aus unseren Messwerte erhalten wir damit durch ungewichtete Mittelung (Es wurden also alle Messwerte gleichstark berücksichtigt.) über alle Messungen:

$$T_{\frac{1}{2}}(^{110}\text{Ag}) = (25.48 \pm 0.213) \text{ s}$$

$$T_{\frac{1}{2}}(^{108}\text{Ag}) = (143.9 \pm 4.573) \text{ s}$$

Sie stimmen damit nicht ganz mit den Literaturwerten von 24.6 s und 157 s überein.

Alternativ läßt sich die Halbwertszeit auch aus der Sättigungskurve bestimmen. Für beide Silberisotope wurde diese Kurve aus den Messdaten mit Hilfe des Auswertungsprogramm erstellt.

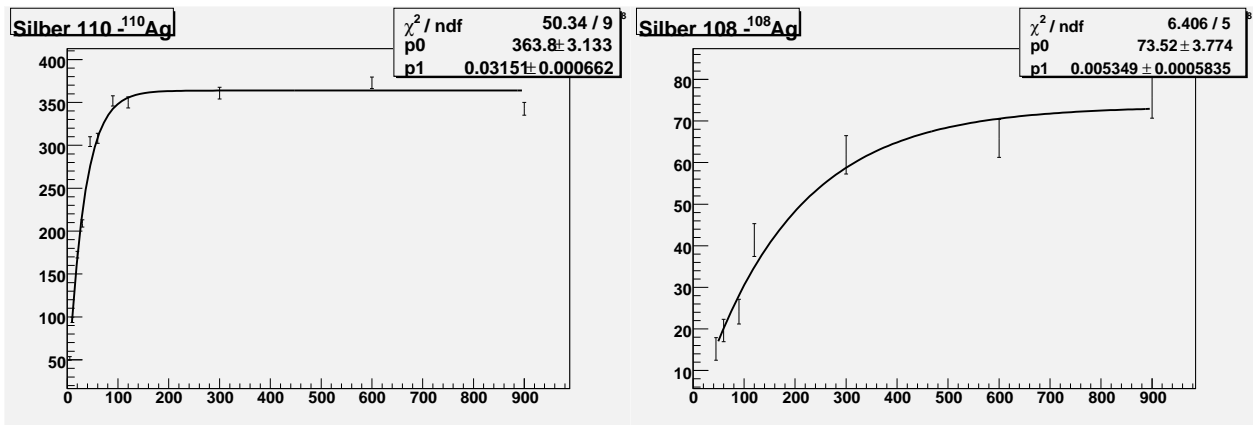


Abbildung 5: Anfangsaktivität in Abhängigkeit der Aktivierungsdauer

Aus dem Parameter  $p_1$  läßt sich nun wieder mit (4) die Halbwertszeit bestimmen:

$$T_{\frac{1}{2}}(^{110}\text{Ag}) = (22.00 \pm 0.434) \text{ s}$$

$$T_{\frac{1}{2}}(^{108}\text{Ag}) = (129.58 \pm 14.14) \text{ s}$$

Analog wurde mit dem Programm auch eine Aktivierungskurve für natürliches Silber erstellt:

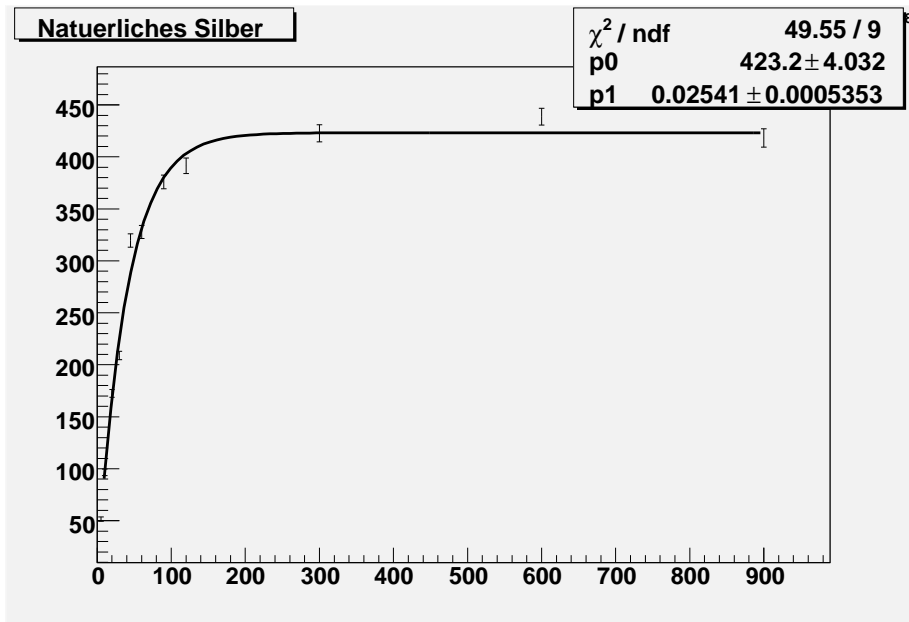


Abbildung 6: Anfangsaktivität in Abhängigkeit der Aktivierungsdauer

### 3.5 Zerfall von Indium

Zur Bestimmung der Halbwertszeit des Indium (bestehend aus ca. 95.7%  $^{115}\text{In}$  und 4.3%  $^{113}\text{In}$ ) wurde die Indiumprobe für 8400s aktiviert. Anschließend wurde analog zur Silber-Probe ein Histogramm gemessen und wieder eine Funktion der Form (3) angefitet.

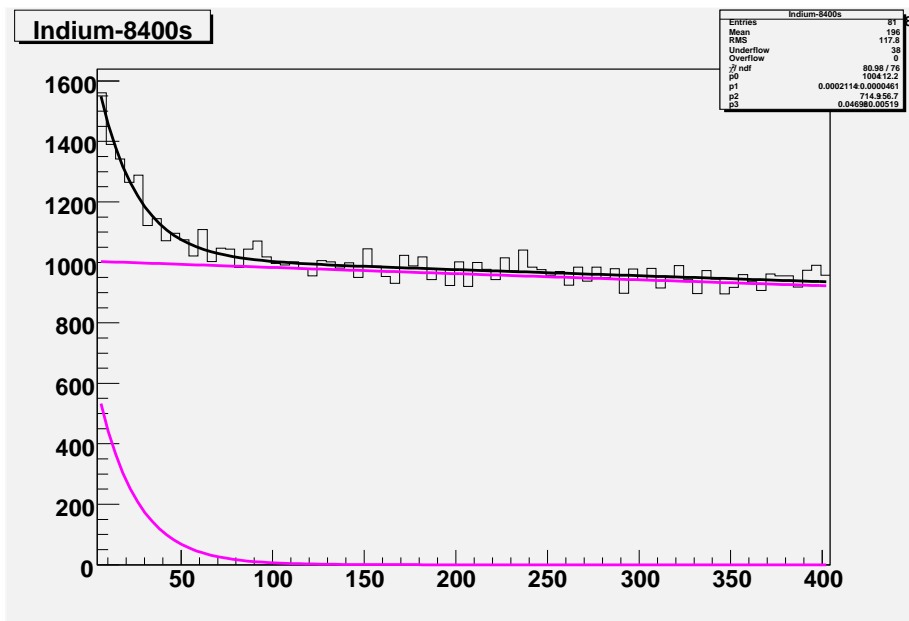


Abbildung 7: Histogramm von Indium; x-Achse: Zeit [s]; y-Achse: 5-fache Aktivität [Bq]

Im Diagramm sieht man den Fit (schwarz) sowie beide Einzelkurven der Isotope  $^{116}\text{In}$  (lila unten) und  $^{114}\text{In}$  (lila



oben). Aus den Parameter  $p_1$  und  $p_3$  lassen sich wieder mit (4) die Halbwertszeiten bestimmen:

$$T_{\frac{1}{2}}(^{116}\text{In}) = (14.75 \pm 1.630) \text{ s}$$

$$T_{\frac{1}{2}}(^{116}\text{In}^+) = (3285 \pm 717.7) \text{ s}$$

Der Literaturwerte für  $^{116}\text{In}$  liegt bei 14,10 s und stimmt somit sehr gut überein. Die zweite Zeit passt leider nicht zum seltenen Isotop  $^{114}\text{In}$  wo man 71.9 s erwarten würden, aber stimmt sehr gut mit der Halbwertszeit von 3257.4 s eines angeregten Zustandes von  $^{116}\text{In}$  überein.

### 3.6 Anhang: Histogramme von Silber bei verschiedenen Aktivierungszeiten

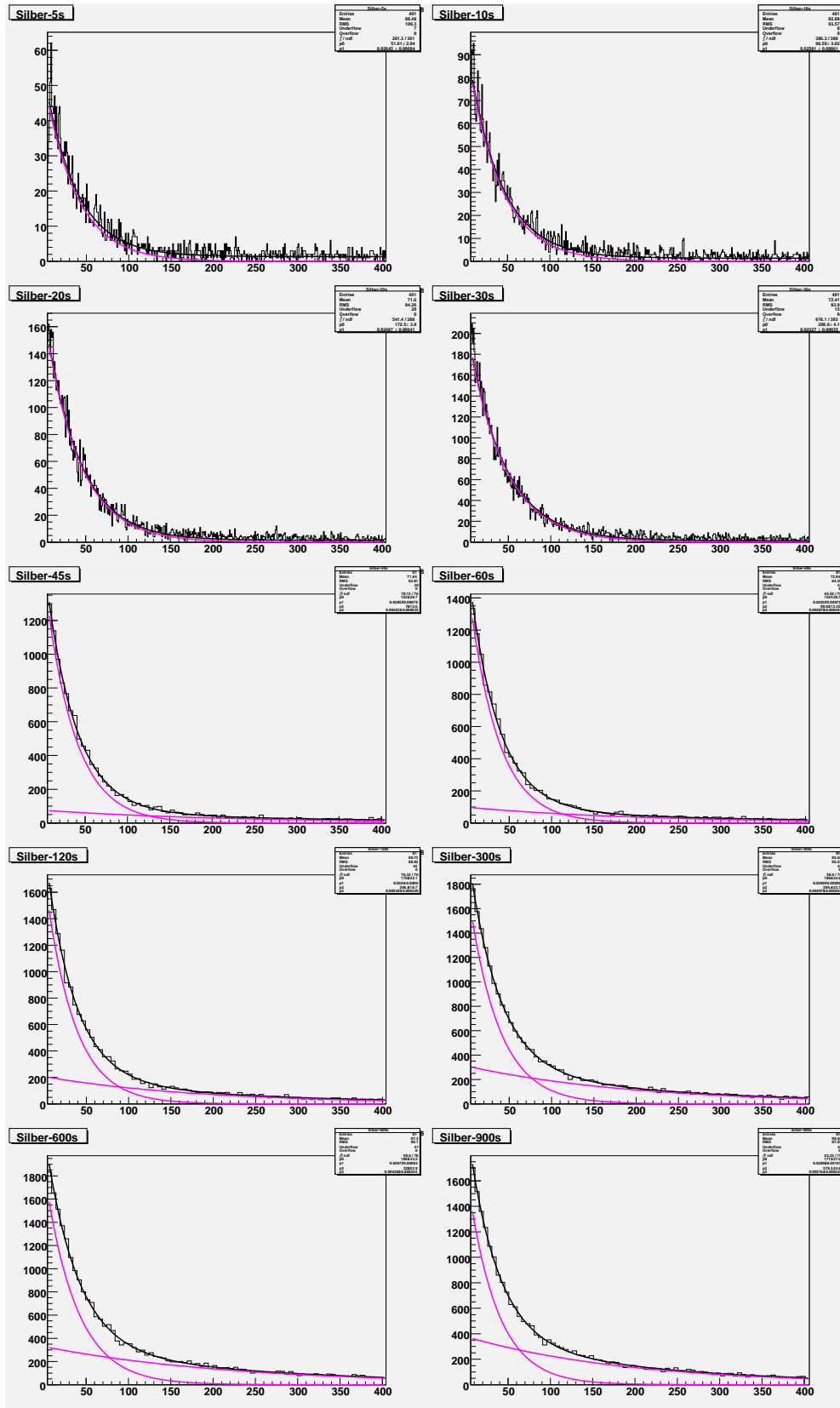


Abbildung 8: x-Achse: Zeit [s]; y-Achse: Aktivität [Bq] (ab  $t = 45$  s mit Faktor 5)

## Literatur

[nuk] *Karlsruher Nuklidkarte*. <http://atom.kaeri.re.kr>, 4

[wik08] *Wikipedia, die freie Enzyklopädie*. <http://de.wikipedia.org>, 2008 4