K125
Nukleare Elektronik und Lebensdauermessung

Jürgen Päpke Akın Wingerter

15. Dezember 1999

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

1 Ziel des Versuchs

In diesem Versuch soll der Umgang mit Elektronik geübt werden, die zur Messung und Analyse von kernphysikalischen Vorgängen benutzt wird. Kernstück des Versuchs ist ein Fast-Slow-Koinzidenzkreis, der die interessierenden Vorgänge auf ihren zeitlichen Ablauf hin untersucht. Konkret soll die Lebensdauer des $\frac{5}{2}^+$-Übergangs in ^{181}Hf bestimmt werden. Zur Eichung der Anlage wird ^{22}Na, ein β^+-Strahler, benutzt, bei dem man sich die Tatsache zunutze macht, daß die beiden 511-keV-γ-Quanten, die bei der Zerstrahlung des Positrons entstehen, gleichzeitig in dem Detektor eintreffen. Schritt für Schritt soll die Anlage aufgebaut und getestet werden, wobei immer wieder die Impulse zwischen den Komponenten auf dem Oszilloskop betrachtet und protokolliert werden.

2 Theorie

2.1 Szintillationsdetektoren

Bei dem im Versuch benutzten Szintillationszähler handelt es sich um einen NaJ(Tl)-Kristall, der an einen Photomultiplier gekoppelt ist. Das Jod steuert durch seine hohe Kernladungszahl Z einen großen Wirkungsquerschnitt beim Photo- und Comptoneffekt bei; die Dotierung mit Thallium sorgt für "Aktivatorniveaus": Über diese fallen die Elektronen bei der Rekombination stufenweise zurück und emittieren dabei Licht. Für das Licht dieser Wellenlängen ist der Kristall durchsichtig und der Lichtblitz kann ihn verlassen.
Der Szintillatorkristall ist über eine reflexionsarme Verbindung mit einem Sekundärelektronenvervielfacher (Photomultiplier) verbunden. Er besteht aus einer Kaskade von Dynoden, zwischen denen ein elektrisches Feld angelegt ist. Die an der ersten Dynode vom Lichtblitz des Szintillators erzeugten Photoelektronen werden zur zweiten Dynode beschleunigt, wo sie ihrerseits Elektronen freisetzen, etc. So entsteht eine Elektronen-Lawine, die am Ausgang einen meßbaren Spannungsstoß ergibt. Um eine möglichst gute Proportionalität zwischen einfallender γ-Energie und Spannungsstoß zu erhalten, greift man für den Slow-Koinzidenzkreis an einer der mittleren Dynoden ab. Die Anode geht in den Fast-Koinzidenzkreis, da es hier nicht auf eine Energiezuordnung, sondern nur auf die Gleichzeitigkeit ankommt.

2.2 Analysegeräte

2.2.1 Verstärker

Ein Verstärker dient zur Verstärkung des Eingangssignals und zur Verarbeitung der eingehenden Impulsform. Er soll erstens eine sehr kurze Ansprechzeit haben und zweitens streng proportional dem Eingangssignal verstärken. Hier sind oft Kompromisse gefordert. Da im Versuch aber symmetrische Zweige aufgebaut werden, kommt der Ansprechzeit eine geringere Bedeutung zu.

2.2.2 Diskriminator

Ein Diskriminator hat die Aufgabe, beim Überschreiten einer einstellbaren Schaltschwelle (treshold) durch das Eingangssignal ein davon unabhängiges Ausgangssignal zu produzieren. So können störendes Rauschen ausgefiltert und aus beliebig geformten Eingangssignalen zur Weiterverarbeitung geeignete Impulse hergestellt werden.

2.2.3 Einkanalanalysator (SCA)

Ein SCA ist im Prinzip ein Diskriminator, der auch noch eine obere Schaltschwelle hat. Nur wenn das eingehende Signal zwischen diesen beiden Schwellen liegt, stellt der SCA ein Ausgangssignal zur Verfügung. Abstand und Höhe der Schwellen sind einstellbar. Man unterscheidet drei Betriebsmodi:

- Normal Mode; die Höhe der Schwellen ist einzeln regelbar.
- Window Mode; man stellt nur Abstand der Schwellen und untere Grenze ein.
- Integral Mode; der SCA arbeitet wie ein Diskriminator mit einstellbarer unterer Schwelle.

2.2.4 Vielkanalanalysator (MCA)

Ein MCA sortiert die eingehenden Impulse nach ihrer Stärke. Er ist gewissermaßen ein hochauflösender AD-Wandler. Im jeweiligen Versuchsteil ist anhand bekannter Eigenschaften von Elementen bzw. der Versuchsanordnung (eingestellte Verzögerungzeiten) eine Eichung der Kanäle vorzunehmen.

2.2.5 Koinzidenzeinheit

Eine Koinzidenzeinheit stellt fest, ob zwei oder mehr logische Signale gleichzeitig auftreten (=bei ihr eintreffen). Dies kann z.B. dadurch geschehen, daß die eingehenden Signale addiert werden und dann ein Diskriminator entscheidet, ob die Summe groß genug ist. Offensichtlich müssen sich die Eingangssignale zu einem genügend großen Teil zeitlich überlappen, damit die Koinzidenzeinheit reagiert.

2.2.6 Zeit-Pulshöhen-Konverter (TAC)

Ein TAC wird durch ein Start- und ein Stop-Signal gesteuert und liefert kann einen Spannungsimpuls, der proportional der verstrichenen Zeit ist. Realisiert wird dies meist durch das Entladen eines Kondensators. Die Impulshöhe kann dann durch einen MCA analysiert werden, an dem eine geeignete Zeiteichung vorgenommen wurde.

2.3 Verfahren

2.3.1 Fast-Slow-Koinzidenzprinzip

Beim Fast-Slow-Koinzidenzprinzip wird das Signal der Detektoren geteilt und auf zweierlei Weise weiterverarbeitet: Zum einen wird entschieden, ob das beobachtete Ereignis in den Energiebereich fällt, an dem man interessiert ist (Slow-Kreis), zum anderen wird im Fast-Kreis die Koinzidenz bzw. die zeitliche Differenz der Signale geprüft. Dazu wird an einer der mittleren Dynoden des Photomultipliers ein Signal abgegriffen, jeweils durch einen SCA geleitet und dann in einer Koinzidenzeinheit zusammen gebracht. Dieser Schaltungsteil kann aber nur eine Zeitauflösung im μs-Bereich bieten. Der wesentlich schnellere Fast-Kreis hingegen kann auch im ns-Bereich arbeiten. Hier wird das Signal an der Anode des Photomultipliers abgegriffen und über einen Diskriminator auf einen (geeichten) TAC gegeben. Die Slow-Koinzidenz steuert dann das Gate eines MCA, der dann die Impulshöhe des TAC analysiert, also die zeitliche Differenz zweier Signale einordnet.

2.3.2 Die Promptkurve

Nach Abschnitt 2.3.1 sollten zwei koinzidente Ereignisse wie z.B. die 511-keV-Quanten aus der Zerstrahlung eines Positrons beim β^+-Zerfall demselben Kanal des MCA zugeordnet werden. Natürlich gibt es auch hier eine Streuung, hervorgerufen durch nahezu alle Teile des Versuchsaufbaus, so daß im MCA eine Kurve endlicher Halbwertsbreite τ_0 entsteht, die das Zeitauflösungsvermögen der Apparatur charakterisiert. Diese Kurve heißt die Promptkurve.

2.3.3 Zufällige Koinzidenzen

Abgesehen von den erwünschten Koinzidenzen treten aufgrund des statistischen Charakters der Zerfälle auch zufällige Koinzidenzen auf. Eine einfache Überlegung schätzt deren Zahl ab: Sei das Auflösungsvermögen der Apparatur τ_0 und die Ereignisse der Detektoren N_1 bzw. N_2. Während der Zeit T=$\tau_0 N_1$ ist die Koinzidenzeinheit offen für die Impulse aus 2, während derer im Mittel N_Z=$\tau_0 N_1 N_2$ zufällige Ereignisse auftreten. So entsteht auch bei beliebiger Verzögerung der Signale gegeneinander ein Offset im Spektrum, der dem Rauschen in anderen Messungen entspricht.

3 Versuchsaufbau

In Abbildung 1 ist schematisch der Versuchsaufbau dargestellt. Die einzelnen Komponenten und ihr Zusammenwirken werden in Abschnitt 4 näher erläutert.

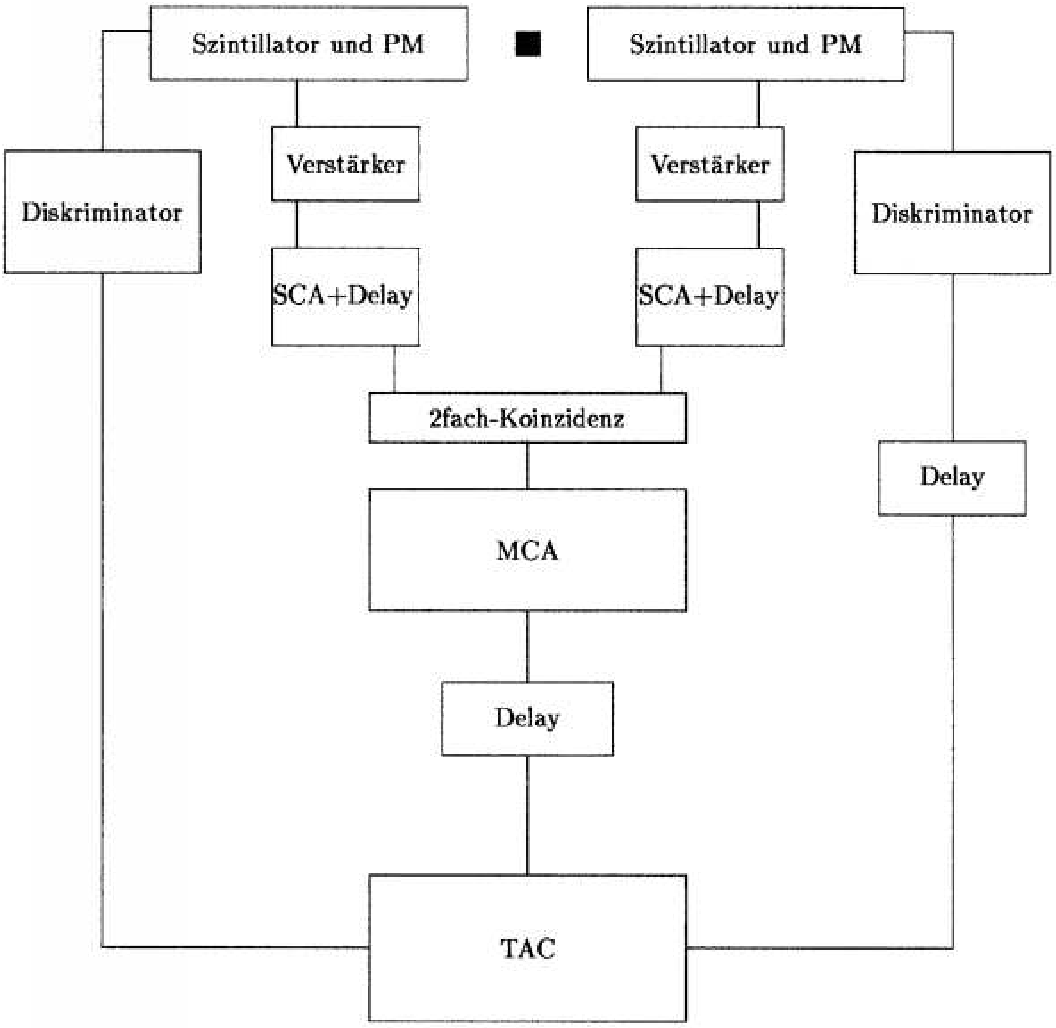

Abbildung 1: Schematischer Versuchsaufbau

4 Versuchsdurchführung und Auswertung

4.1 Slow-Koinzidenzkreis einstellen

Wir beginnen mit dem linken Detektor.

4.1.1 Slow-Pulse des Photomultipliers kontrollieren

Wir haben das Eingangssignal des Hauptverstärkers oszilloskopiert und aufgezeichnet, siehe Skizze 1. Wir haben das Ausgangssignal des Hauptverstärkers oszilloskopiert. Wir verstärken das Signal so lange, bis die 511-keV-Linie 4 V beträgt. Die Coarse-Gain-Einstellung ist 20 Skalenteile, und Fine-Gain ist 8.2 Skalenteile. Die 511-keV-Linie ist daran zu erkennen, daß sie die hellste unter den Linien ist. Das Oszilloskopbild ist in Skizze 2 wiedergegeben.

4.1.2 Triggerung mit dem SCA

Wir teilen das Hauptverstärkersignal mit einem T-Stück. Den ersten Zweig geben wir über den Delay-Amplifier auf Kanal 1 des Oszilloskops. Den zweiten Zweig geben wir über den SCA auf Kanal 2 des Oszilloskops und benutzen dieses Signal zum Triggern. Es ist ungünstig, auf externes Triggern zu schalten, also haben wir über Kanal 2 getriggert. Nun verzögern wir den ersten Zweig so lange mit Delays, bis er nach dem Signal aus dem SCA eintritt. Das Oszilloskopbild haben wir in Skizze 3 wiedergegeben. Wir benutzten einen Delay von 2.75 μs. Während der Durchführung ist die Hochspannung für den rechten Detektor ausgefallen, wir mußten einen Tutor aus dem ISKP bitten, die Hochspannung wieder einzuschalten.

4.1.3 Energiespektrum aufnehmen

Wir geben den Zweig des Hauptverstärkersignals, den wir im vorigen Versuchsteil über den Delay-Amplifier auf Kanal 1 des Oszilloskops gegeben hatten, jetzt auf den Direkteingang des MCA. Denjenigen Zweig, den wir im vorigen Versuchsteil über den SCA auf Kanal 2 des Oszilloskops zum Triggern gegeben hatten, geben wir jetzt als Gate auf den MCA. Wir überprüfen, ob der Wahlschalter auf der Rückseite des MCA auf 'coinc' steht. Dann haben wir das Spektrum von ^{22}Na aufgenommen. Als wir versuchten, die Daten auf den Rechner zu übertragen, klappte dies nicht auf Anhieb. Der Grund hierfür ist, daß der MCA nach dem Einschalten einmalig für die Datenübertragung initialisiert werden mußte; dies haben wir dann auch getan. Das Spektrum von ^{22}Na ist in Abbildung 5 auf Seite 12 wiedergegeben.

4.1.4 Einkanalfenster einstellen

Um das Einkanalfenster einzustellen, nehmen wir fortlaufend das Spektrum mit dem MCA auf und stellen die Schwelle des SCA (Potentiometer LLD) und die Fensterbreite (Potentiometer ULD/ΔE) so ein, daß nur noch die 511-keV-Linie auf dem Display wächst. Der Linienschwerpunkt hat sich gegenüber dem Schwerpunkt im Spektrum (vorige Messung) nicht verschoben. Die 511-keV-Linie ist in Abbildung 6 auf Seite 13 wiedergegeben. Die Schwelle des SCA war auf 250 Skalenteile eingestellt und Fensterbreite auf 96 Skalenteile. Wir oszilloskopieren noch einmal den Ausgang des Delay-Amplifiers gegen den SCA-Ausgang. Das Ergebnis ist in Skizze 4 wiedergegeben. Uns fällt auf, daß das Signal des Hauptverstärkers sich geringfügig nach links verschoben hat.

Nun wiederholen wir die Schritte von Abschnitt 4.1.1 auf der vorherigen Seite bis Abschnitt 4.1.4 für den rechten Detektor.

Slow-Pulse des Photomultipliers kontrollieren

Wir haben das Eingangssignal des Hauptverstärkers aufgezeichnet, siehe Skizze 5. Die Zeichnung für das Ausgangssignal des Hauptverstärkers ist in Skizze 6 zu finden. Wir verstärken das Signal wieder so lange, bis die 511-keV-Linie ungefähr bei 4 V liegt. Die Coarse-Gain-Einstellung ist 20 Skalenteile, und Fine-Gain ist 5.38 Skalenteile.

Triggerung mit dem SCA

Wir gehen genauso vor wie im Fall des linken Detektors. Unsere Skizze des Oszilloskopbildes ist in Skizze 7 zu finden. Für den Delay haben wir 3.75 μs gewählt.

Energiespektrum aufnehmen

Wir verfahren genauso wie mit dem linken Detektor. Das Spektrum von ^{22}Na ist in Abbildung 7 auf Seite 14 wiedergegeben.

Einkanalfenster einstellen

Das Oszilloskopbild ist in Skizze 8 wiedergegeben. Die 511-keV-Linie ist in Abbildung 8 auf Seite 15 dargestellt.

4.1.5 Slow-Koinzidenz herstellen

Wir haben die beiden SCA-Signale gegeneinander oszilloskopiert und haben das Signal vom rechten SCA verzögert, bis die beiden Signale sich optimal überlappten. Das Ergebnis ist in Skizze 9 zu sehen.

4.2 Fast-Koinzidenzkreis einstellen

4.2.1 Fast-Pulse des Photomultipliers kontrollieren

Wir geben den Fast-Puls auf Channel 1 des Oszilloskopen und den Slow-Puls auf Channel 2. Das Ergebnis ist in Skizze 10 dargestellt (linker Detektor).

4.2.2 Einstellen der Diskriminatorschwelle

Wir geben das Hauptverstärkersignal auf Channel 1 des Oszilloskops und triggern mit dem Diskriminatorsignal auf Channel 2. Wir erhöhen den Gain am Diskriminator so lange, bis wir das Rauschen (helle Grundlinie) sehen, und nehmen den Gain dann 1 Einheit zurück. Dies machen wir für beide Detektoren und finden Gain 2 sowohl für den linken als auch für den rechten Diskriminator.

4.2.3 Fast-Koinzidenz einstellen

Wir verzögern das Signal vom linken Diskriminator um 50 ns und geben es auf den TAC als Stopsignal. Der rechte Detektor gibt das Startsignal für den TAC. Wir haben das TAC-Signal am 1 Ω-Ausgang überprüft, es beträgt 4 V. Als Zeitbereich wählen wir 0.1 μs.

4.2.4 Zeitlicher Abgleich von Fast- und Slow-Koinzidenz

Wir geben den Ausgang der Slow-Koinzidenz auf Channel 1 des Oszilloskops und den Ausgang (den linken) des TAC auf Channel 2. Wir haben einen Delay von 3.25 μs gewählt. Das Bild ist in Skizze 11 gegeben.

4.3 Zeiteichung des TAC

Um die Zeiteichung des TAC durchzuführen, gehen wir folgendermaßen vor: Wir geben das TAC-Signal mit der Slow-Koinzidenz als Gate auf den MCA und nehmen es auf, bis wir im Maximum ca. 900 Ereignisse gezählt haben. Danach verzögern wir die beiden Fast-Zweige gegeneinander um -32 ns, -16 ns, +16 ns, +32 ns und nehmen das Signal mit dem MCA auf, ohne das Display zuvor gelöscht zu haben. Wir erhalten die Promptkurven in Abbildung 9 auf Seite 16.

Mit Gauß-Fits bestimmen wir die x-Koordinate der Maxima sowie deren Fehler. Für alle Fits und graphische Wiedergaben haben wir in diesem Protkoll das Programm PAW[1] benutzt. Zur Illustration haben wir in Abbildung 10 auf Seite 17 den Gauß-Fit an das erste Maximum exemplarisch durchgeführt. Unsere Ergebnisse:

	Verzögerung [ns]	Kanalnummer	Fehler	Standardabweichung
Gauß-Kurve Nr. 1	-32	95.925	0.11600	25.962
Gauß-Kurve Nr. 2	-16	248.73	0.12724	26.317
Gauß-Kurve Nr. 3	0	403.94	0.11622	26.494
Gauß-Kurve Nr. 4	+16	558.19	0.11535	26.505
Gauß-Kurve Nr. 5	+32	710.81	0.07965	26.056

Wir tragen die Verzögerungszeit gegen die x-Koordinaten der Maxima auf. Weil wir einen linearen Zusammenhang erwarten, führen wir eine lineare Regression durch. Das Ergebnis der Regression ist in Abbildung 2 auf der nächsten Seite dargestellt.

Als Gleichung für die Gerade erhalten wir

$$y = 0.10401 \cdot x - 41.965 \tag{1}$$

mit den Fehlern $\Delta m = 0.00020645$ für die Steigung und $\Delta b = 0.10730$ für den y-Achsenabschnitt.

Zwei Peaks können noch unterschieden werden, wenn sie mehr als ein FWHM (full width at half maximum) auseinanderliegen. Wir bilden den Mittelwert aus den Standardabweichungen in der o.a. Tabelle und erhalten $\sigma = 26.267$. Mit FWHM $= 2.35 \cdot \sigma$ ergibt sich für die Zeitauflösung des TAC 61.727 [Kanalnummer]. Mit der soeben bestimmten Zeiteichung rechnen wir die dazu äquivalente Zeit aus: $0.10401 \cdot 61.727 = 6.420$ ns.

[1]Physical Analysis Workstation, entwickelt vom CERN, siehe http://wwwinfo.cern.ch/asd/paw/index.html

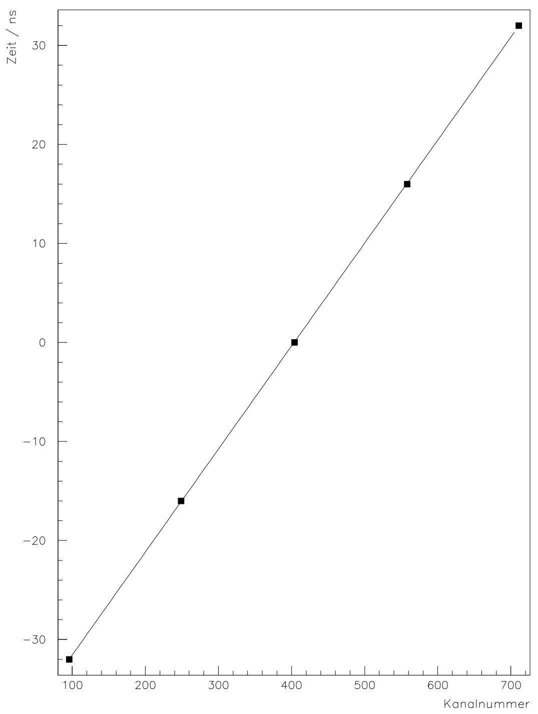

Abbildung 2: Zeiteichung

4.4 Messung der Lebensdauer

4.4.1 Einkanalfenster für die ^{181}Hf-Quelle einstellen

Wir haben die Natriumquelle gegen die Hafniumquelle ausgetauscht. Wir mußten in der Hafniumquelle einen Krümel nach vorne bringen und die größeren Teile nach hinten, weil sonst wegen der zu hohen Aktivität die Messung nicht möglich gewesen wäre. Nun wiederholen wir die Schritte von Abschnitt 4.1.1 auf Seite 4 bis Abschnitt 4.1.4 auf Seite 5. Wir beginnen mit dem linken Detektor.

Triggerung mit dem SCA

Koinzidenz mit Oszilloskop kontrolliert, für den Delay 4 μs gewählt.

Energiespektrum aufnehmen

Wir haben die Schwelle auf Null zurückgesetzt, das Fenster wieder ganz aufgedreht und das Spektrum aufgenommen. Das Ergebnis ist in Abbildung 11 auf Seite 18 dargestellt.

Einkanalfenster einstellen

Wir haben die Schwelle und das Fenster so eingestellt, daß nur noch die 133-keV-Linie wächst. Der Wert für die Schwelle war 0 Skalenteile und für das Fenster 96 Skalenteile. Das Ergebnis ist in Abbildung 12 auf Seite 19 dargestellt.

Jetzt wiederholen wir diese Schritte für den rechten Detektor.

Triggerung mit dem SCA

Koinzidenz mit Oszilloskop kontrolliert, für den Delay 4 μs gewählt.

Energiespektrum aufnehmen

Wir haben die Schwelle auf Null zurückgesetzt, das Fenster wieder ganz aufgedreht und das Spektrum aufgenommen. Das Ergebnis ist in Abbildung 13 auf Seite 20 dargestellt.

Einkanalfenster einstellen

Wir haben die Schwelle und das Fenster so eingestellt, daß nur noch die 482 keV Linie wächst. Der Wert für die Schwelle war 296 Skalenteile und für das Fenster 68 Skalenteile. Das Ergebnis ist in Abbildung 14 auf Seite 21 dargestellt.

4.4.2 Energieeichung und Energieauflösung

Um die Energieeichung durchzuführen, bestimmen wir mit Gauß-Fits die x-Koordinate der Peaks im Spektrum von ^{22}Na und ^{181}Hf, und zwar jeweils für den linken und rechten Detektor. Da wir die Energien, die diesen Peaks entsprechen, kennen, können wir diese Energien gegen deren x-Koordinate auftragen und erhalten so eine Energieeichung für den jeweiligen Detektor. Unsere Ergebnisse sind in der u.a. Tabelle aufgeführt.

	Energie [keV]	Kanalnummer	Fehler	Standardabweichung
^{22}Na, linker Detektor	511	284.17	0.22404	46.653
	1275	762.54	2.2985	113.64
^{22}Na, rechter Detektor	511	420.43	0.20211	45.402
	1275	-	-	-
^{181}Hf, linker Detektor	133	15	1.0	10.360
	343	167.41	0.31579	30.378
	482	264.78	0.45248	40.510
^{181}Hf, rechter Detektor	133	42.300	0.09792	17.625
	343	231.40	0.21743	31.759
	482	347.87	0.24190	32.572

Wir beginnen mit dem linken Detektor. Wir tragen die Energie gegen die x-Koordinate der Peaks auf und führen eine lineare Regression durch. Die Geradengleichung ist gegeben durch

$$y = 1.5423 \cdot x + 87.994$$

mit den Fehlern $\Delta m = 0.0017844$ für die Steigung und $\Delta b = 0.69610$ für den y-Achsenabschnitt. Die Gerade ist in Abbildung 3 wiedergegeben.

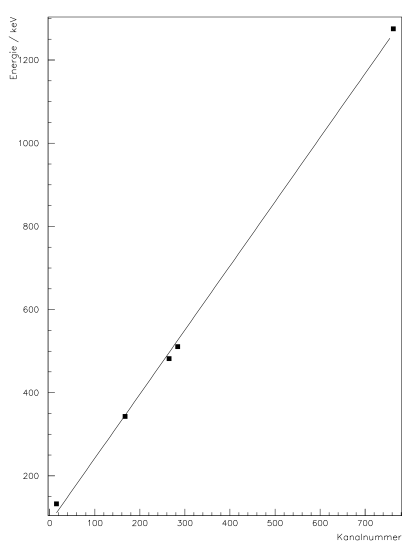

Abbildung 3: Energieeichung für den linken Detektor

Für den rechten Detektor ergibt sich die Geradengleichung

$$y = 1.0388 \cdot x + 96.653$$

mit den Fehlern $\Delta m = 0.0034992$ für die Steigung und $\Delta b = 1.0397$ für den y-Achsenabschnitt. Die Gerade ist in Abbildung 4 wiedergegeben.

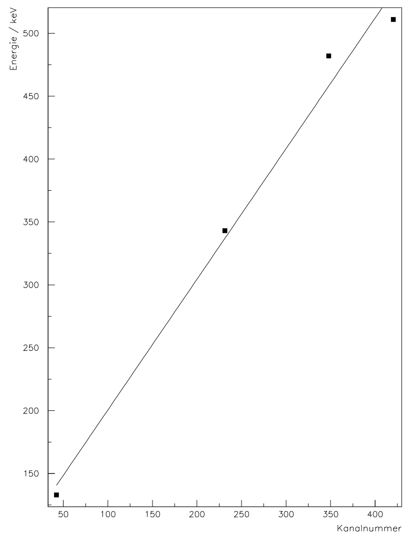

Abbildung 4: Energieeichung für den rechten Detektor

Um die Energieauflösung zu bestimmen, rechnen wir mit der soeben bestimmten Energieeichung die Standardabweichungen der Linien in keV um ($\rightarrow \Delta E$) und bilden den Quotienten $\Delta E/E$:

	Energie [keV]	σ [Kanal]	σ [keV]	$\Delta E/E$
^{22}Na, linker Detektor	511	46.653	71.953	0.141
	1275	113.64	175.267	0.137
^{22}Na, rechter Detektor	511	45.402	47.164	0.092
	1275	-	-	-
^{181}Hf, linker Detektor	133	10.360	15.978	0.120
	343	30.378	46.852	0.137
	482	40.510	62.479	0.129
^{181}Hf, rechter Detektor	133	17.625	18.309	0.138
	343	31.759	32.991	0.096
	482	32.572	33.836	0.070

Wir stellen fest, daß die Energieauflösung des rechten Detektors besser ist.

4.4.3 Messung der Lebensdauerkurve

Wir haben die Slowkoinzidenzen und die Fastkoinzidenzen überprüft und die Fastkoinzidenz neu eingestellt. Dann haben wir die Lebensdauerkurve ca. 30 Minuten lang aufgenommen. Das Ergebnis unserer Messung ist in Abbildung 15 auf Seite 22 dargestellt. Aus der Theorie wissen wir, daß der rechte Flügel der erwarteten Kurve exponentiell abfallen soll, wobei der Absolutbetrag der Abklingkonstante die inverse Lebensdauer des Niveaus ist. Wir stellen die Lebensdauerkurve halblogarithmisch dar (siehe Abbildung 16 auf Seite 23). In derselben Abbildung haben wir auch die Regressionsgerade eingezeichnet. Die Geradengleichung lautet

$$y = -0.0064526 \cdot x + 8.4177$$

mit den Fehlern $\Delta m = 0.46435 \cdot 10^{-4}$ für die Steigung und $\Delta b = 0.025677$ für den y-Achsenabschnitt. Wir haben die Regressionsgerade nochmal in Abbildung 17 auf Seite 24 wiedergegeben, um die gute Übereinstimmung sichtbar zu machen.

Zu beachten ist, daß die Meßpunkte mit einem Fehler $\sqrt{N}$ behaftet sind, in der logarithmischen Darstellung sind die Fehler $\Delta(\log N) = \frac{1}{N} \cdot \sqrt{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}$. In der Regression sind die Meßpunkte mit diesen Fehlern gewichtet. Man kann in Abbildung 16 auf Seite 23 unschwer erkennen, daß die Meßwerte zu kleineren N hin mehr streuen.

Für die Lebensdauer ergibt sich also $\tau = \frac{1}{0.0064526} = 154.976$. Um diese Größe in Nanosekunden umzurechnen, benutzen wir unsere Zeiteichung. Mit Gleichung 1 auf Seite 6 ergibt sich $\tau = 0.10402 \cdot 154.976 = 16.119$ ns. Die Steigung ist mit einem Fehler von $\Delta m = 0.46435 \cdot 10^{-4}$ behaftet. Für den Quotienten folgt der Fehler $\Delta\tau = \frac{\Delta m}{m^2} = 1.115 \equiv 0.116$ ns.

Wir haben also die Lebensdauer für den $\frac{5}{2}^+$-Übergang in ^{181}Ta bestimmt zu $\tau = 16.119 \pm 0.116$ ns. Dieses Ergebnis stimmt mit dem Literaturwert[2] von $\tau = 15.9$ ns sehr gut überein; der wahre Wert liegt innerhalb der 2σ-Fehlergrenze.

4.4.4 Promptkurve mit den Energiefenstern der Hf-Messung

In Abbildung 18 auf Seite 25 haben wir das ^{22}Na-Spektrum mit den Diskriminatorschwellen der ^{181}Hf-Messung aufgenommen. Die Kurve ist tendentiell unsymmetrisch. Der Grund hierfür ist, daß die einzelnen Impulse bei 133 keV eine größere Zeitunschärfe haben als bei 482 keV.

[2] Der Wert wurde in einem Versuchsprotokoll aus der Fachschaft als Literaturwert zitiert

Literatur

[Ba] R. J. Barlow *Statistics: A Guide to the Use if Statistical Methods in the Physical Sciences* Wiley, 1989

[Leo] W. R. Leo *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments* Springer, 1994

[Schm] H. U. Schmidt *Meßelektronik in der Kernphysik* Teubner, 1986

[Ab] K. Abend, E. Vogelgesang *Nukleare Elektronik* Verlag Karl Thiemig, München, 1973

[Rie] Riezler, Kopitzki *Kernphysikalisches Praktikum* Teubner, 1963

[Scha] G. Schatz, A. Weidinger *Nukleare Festkörperphysik* Teubner, 1985

[Sie] K. Siegbahn *Alpha-, Beta- and Gamma-Ray Spectroscopy, Volume I* North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1965

A GRAPHEN

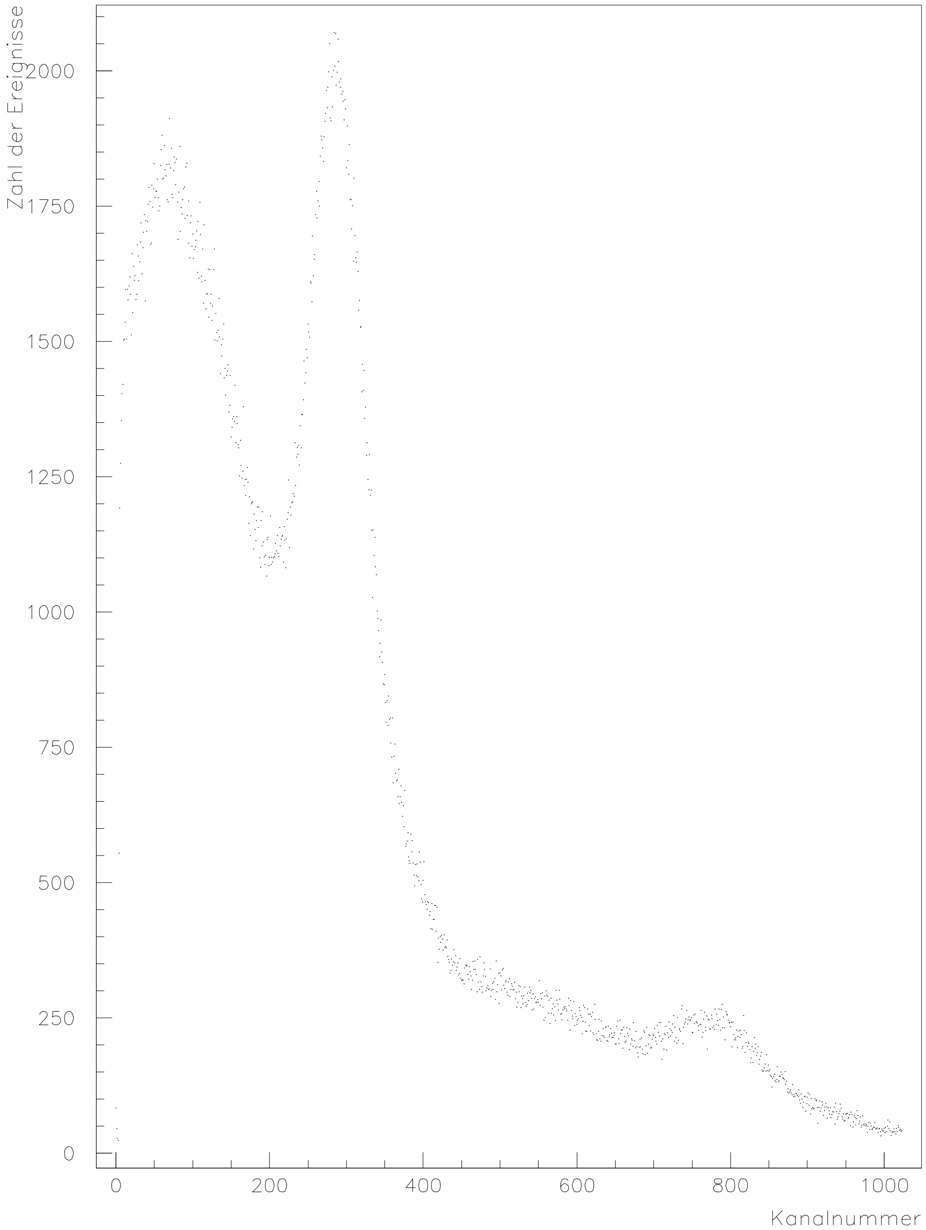

Abbildung 5: Spektrum von ^{22}Na, linker Detektor

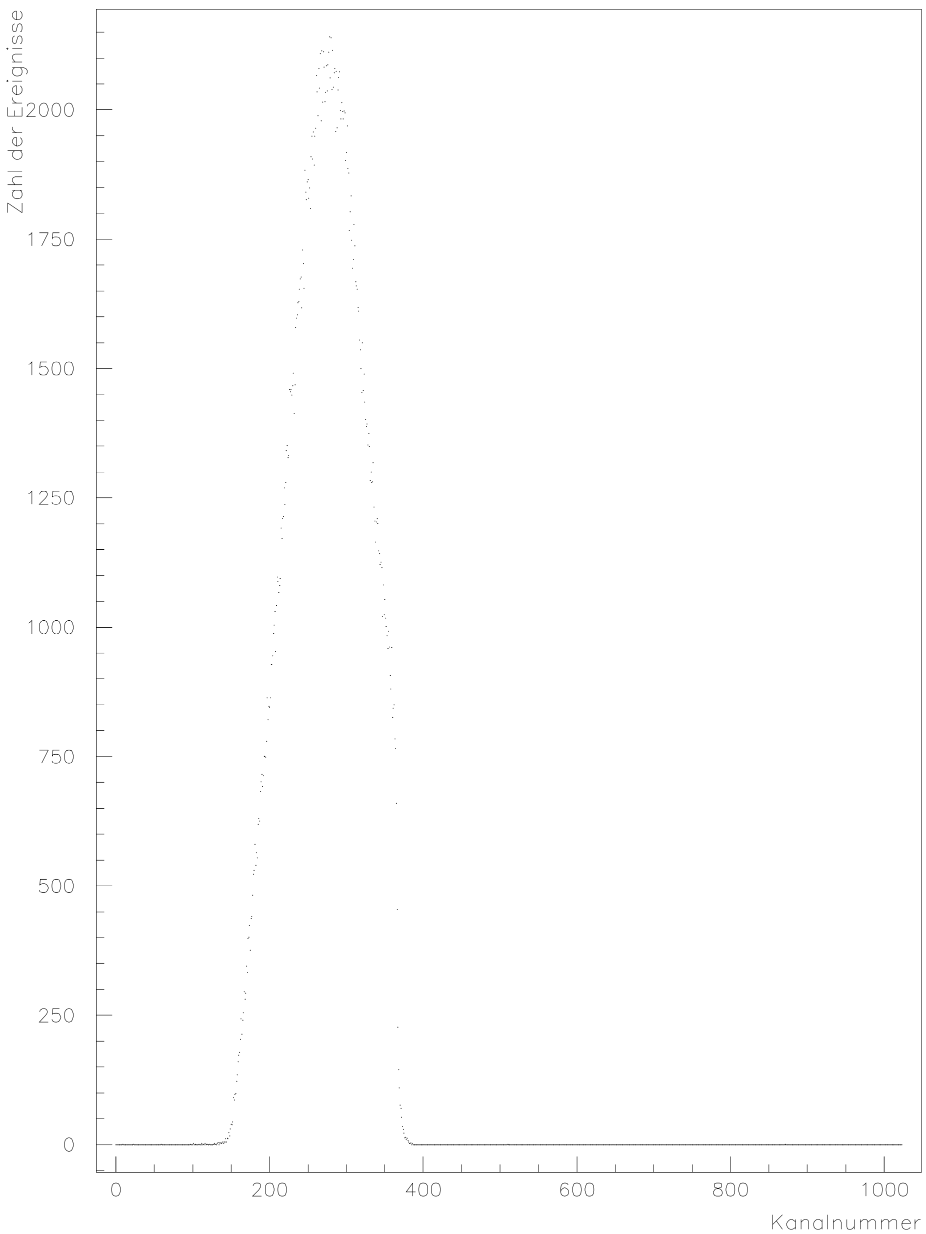

Abbildung 6: 511-keV-Linie von ^{22}Na, linker Detektor

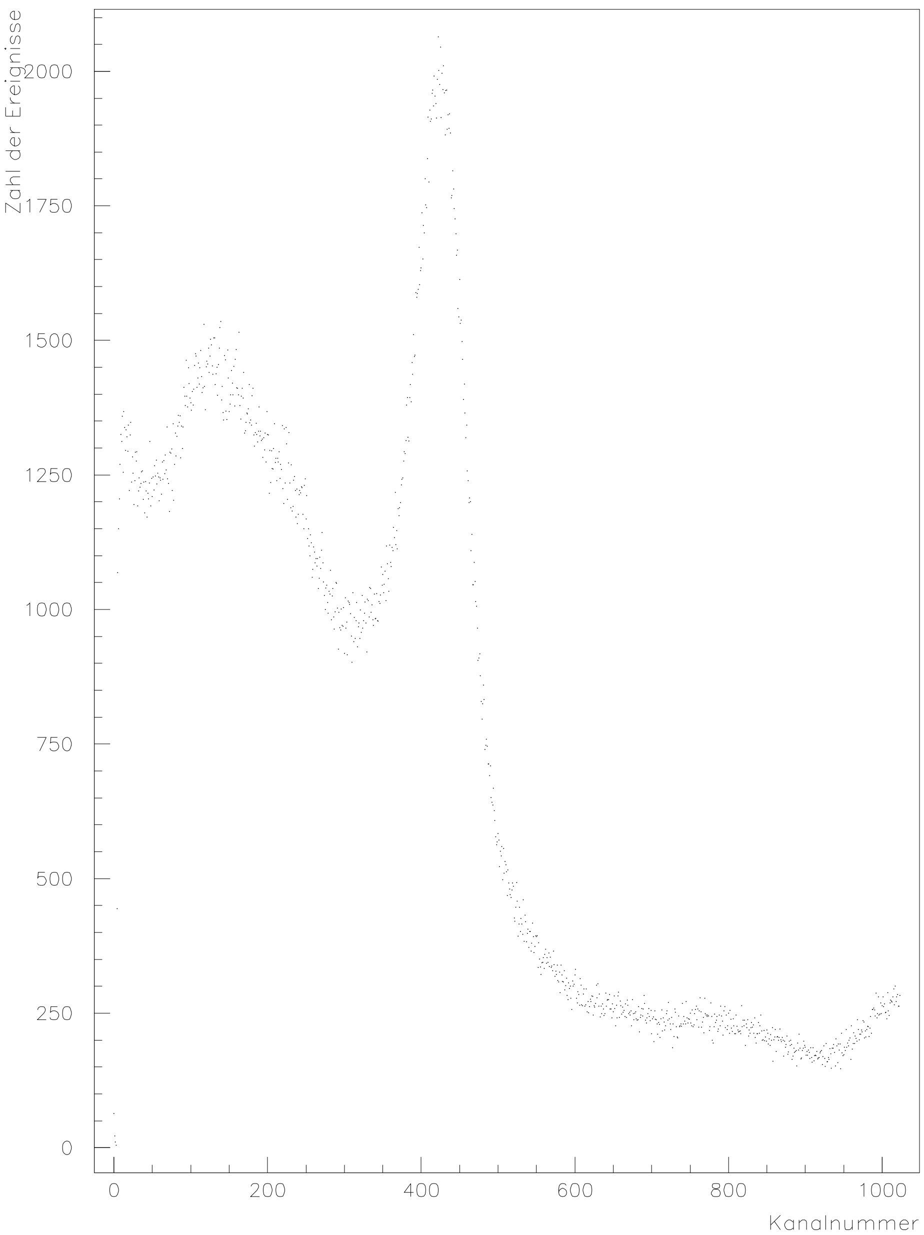

Abbildung 7: Spektrum von ^{22}Na, rechter Detektor

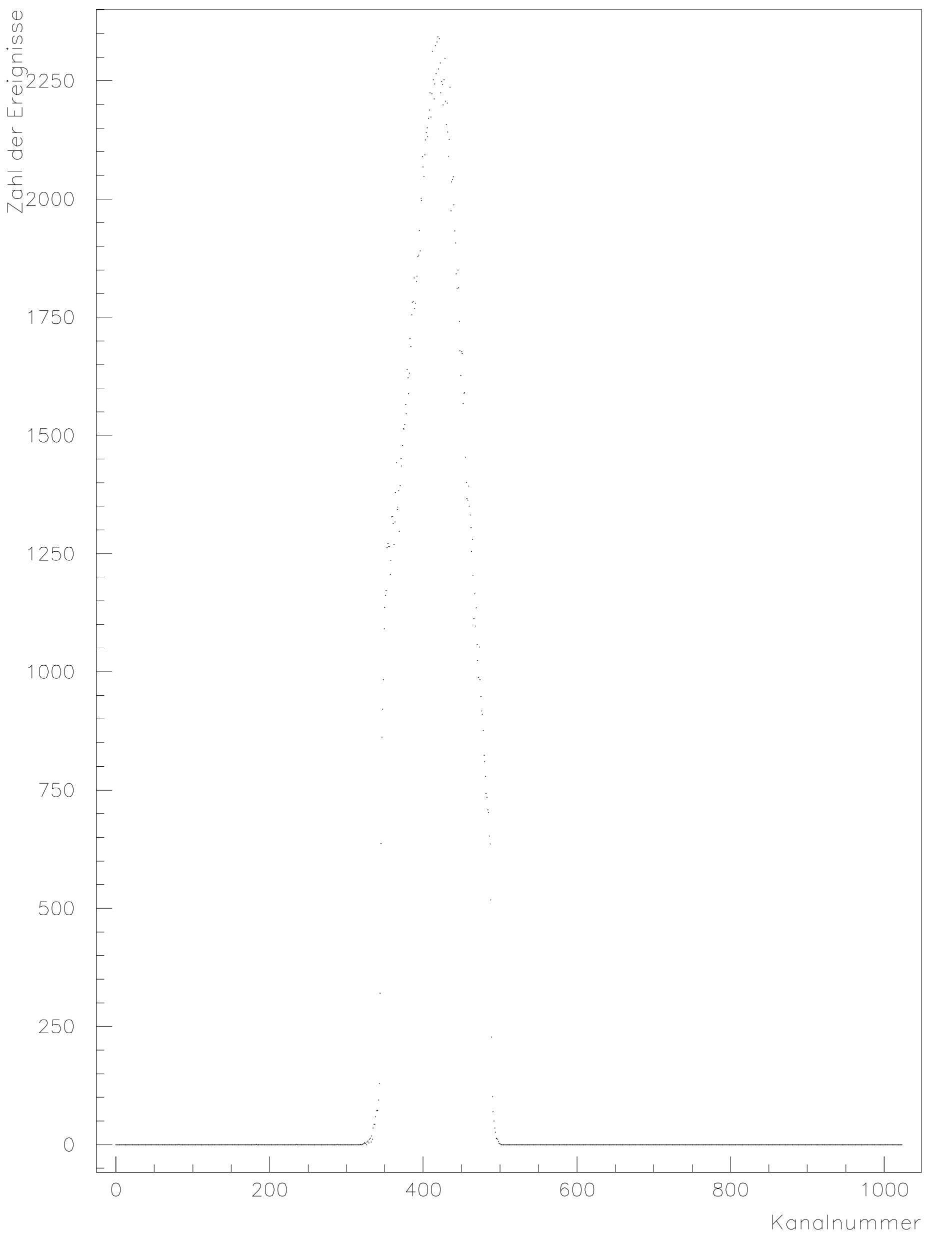

Abbildung 8: 511-keV-Linie von ^{22}Na, rechter Detektor

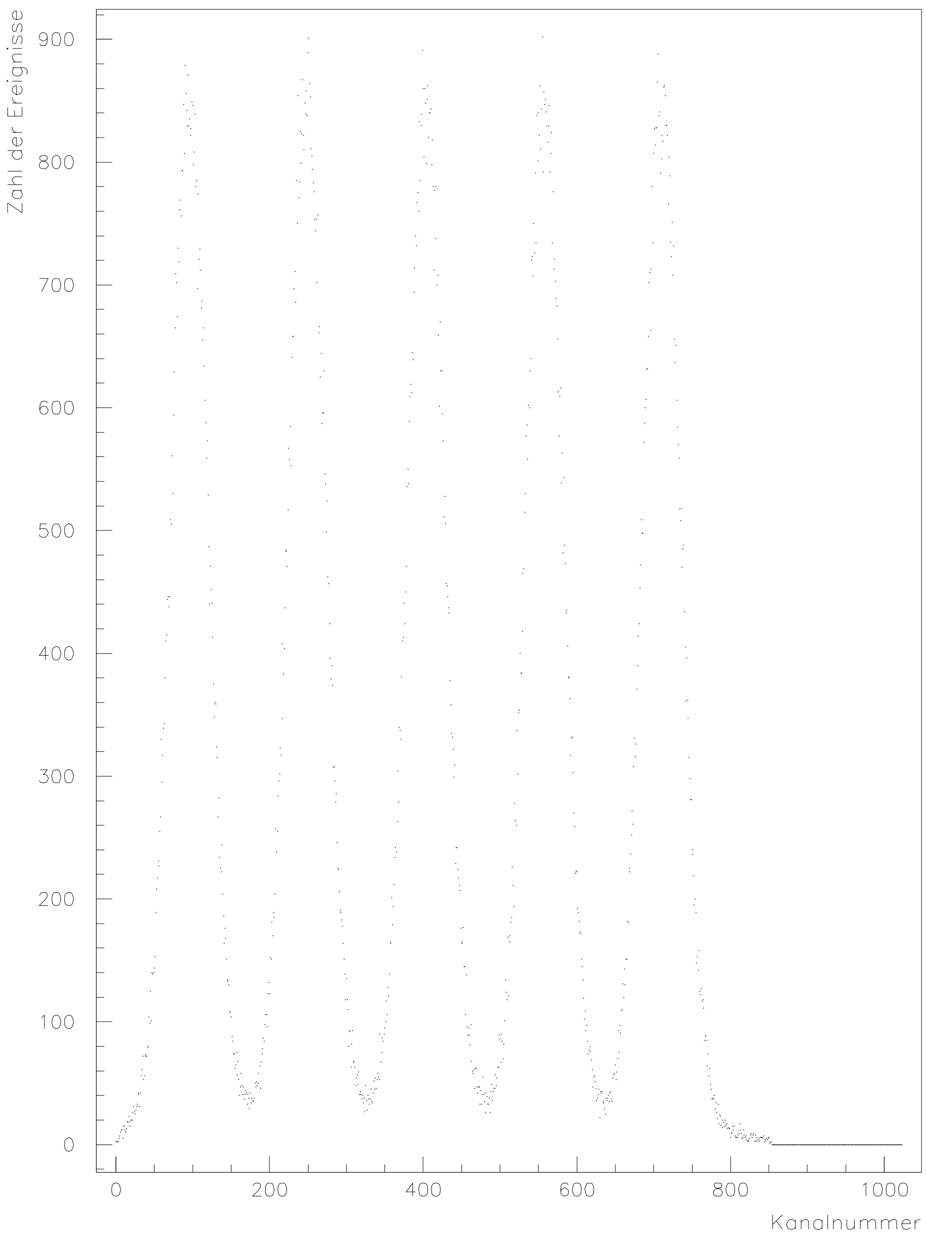

Abbildung 9: Promptkurve

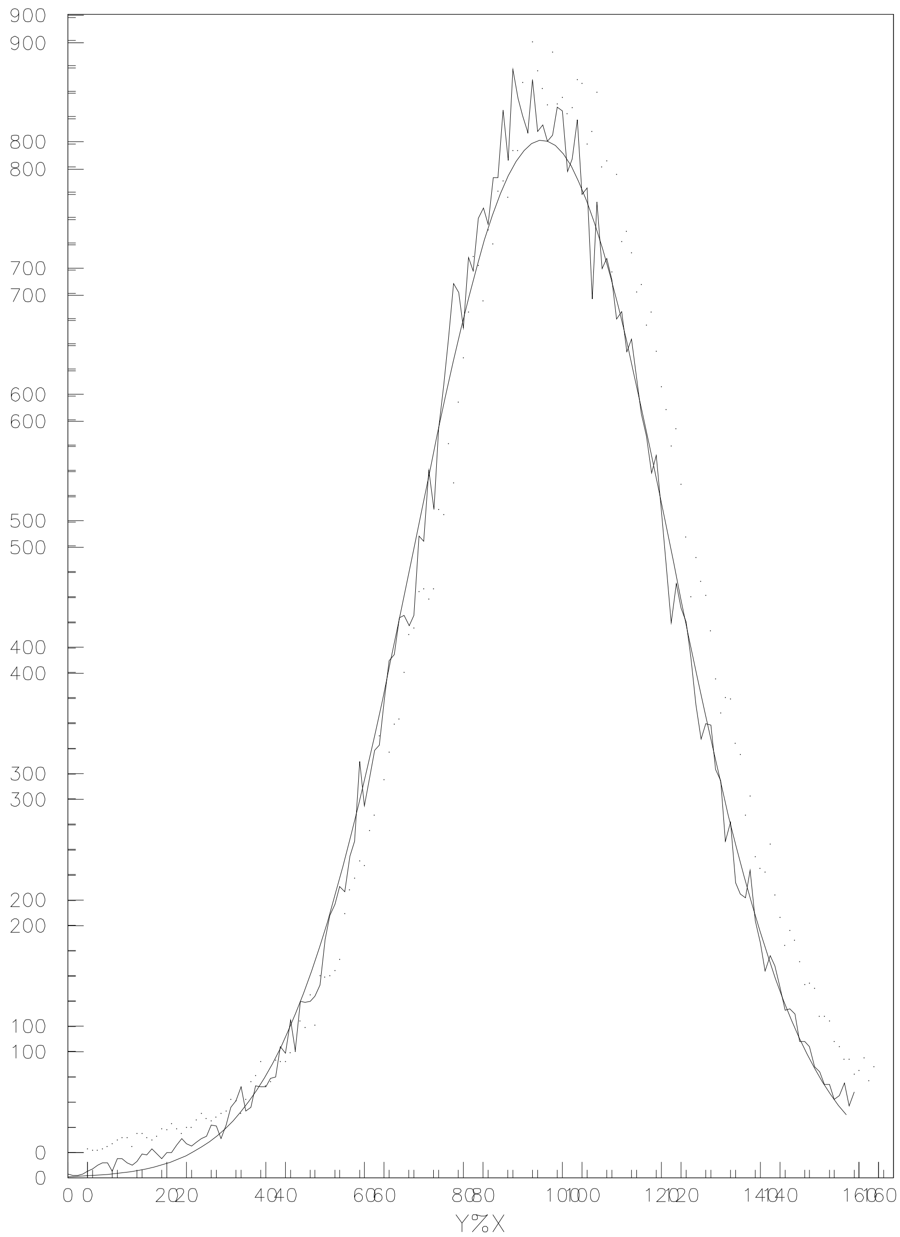

Abbildung 10: Exemplarischer Fit an das erste Maximum der Promptkurve

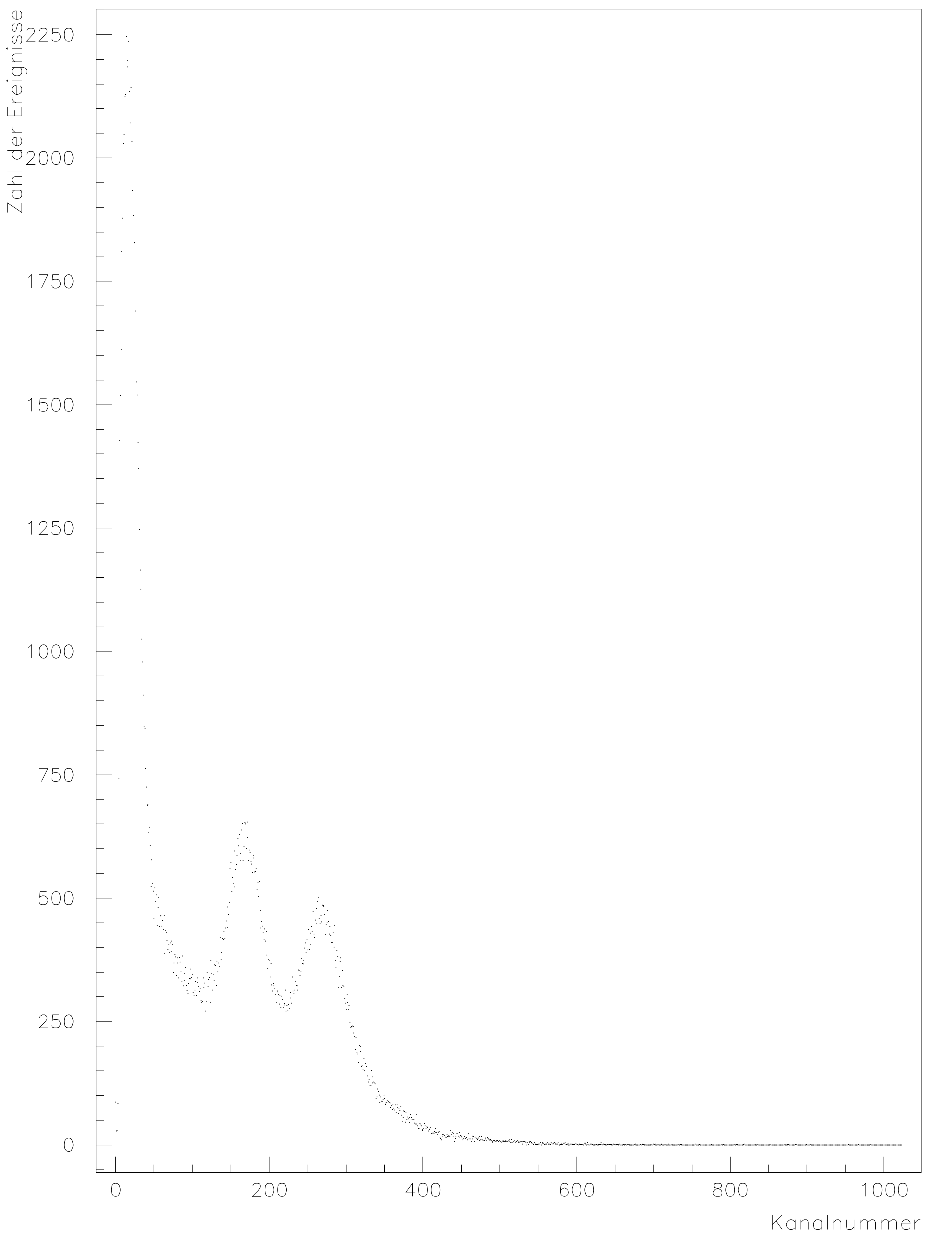

Abbildung 11: Spektrum von ^{181}Hf, linker Detektor

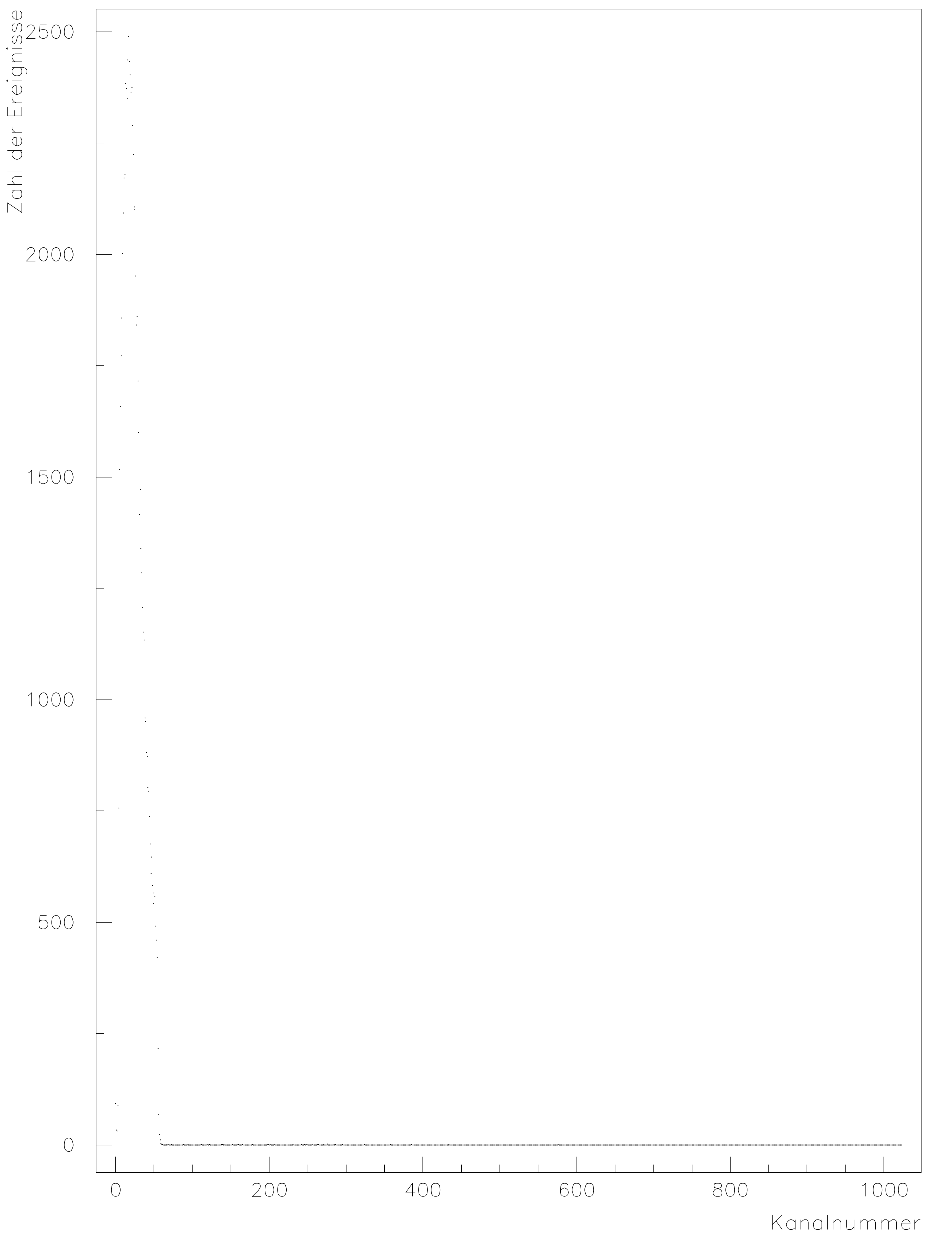

Abbildung 12: 133-keV-Linie von ^{181}Hf, linker Detektor

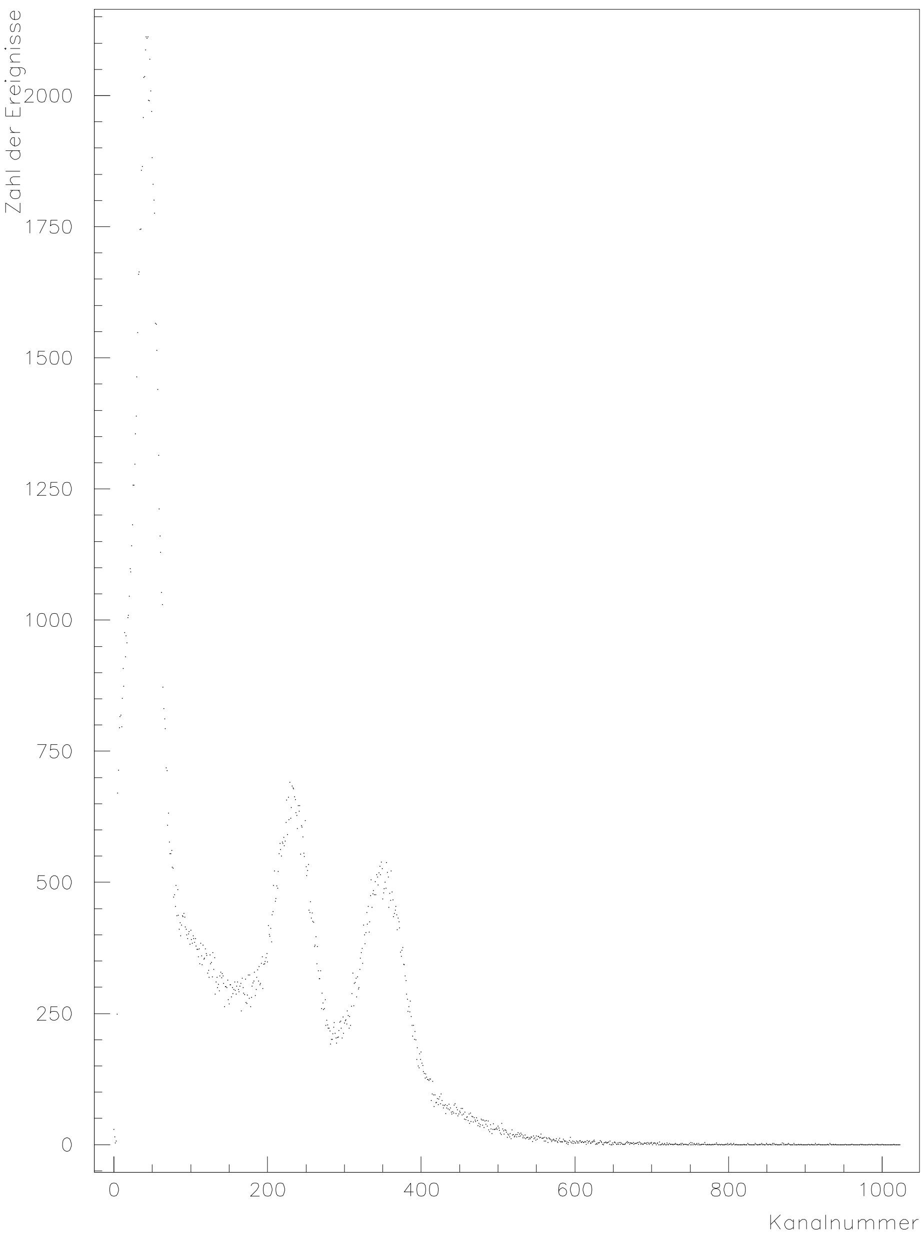

Abbildung 13: Spektrum von ^{181}Hf, rechter Detektor

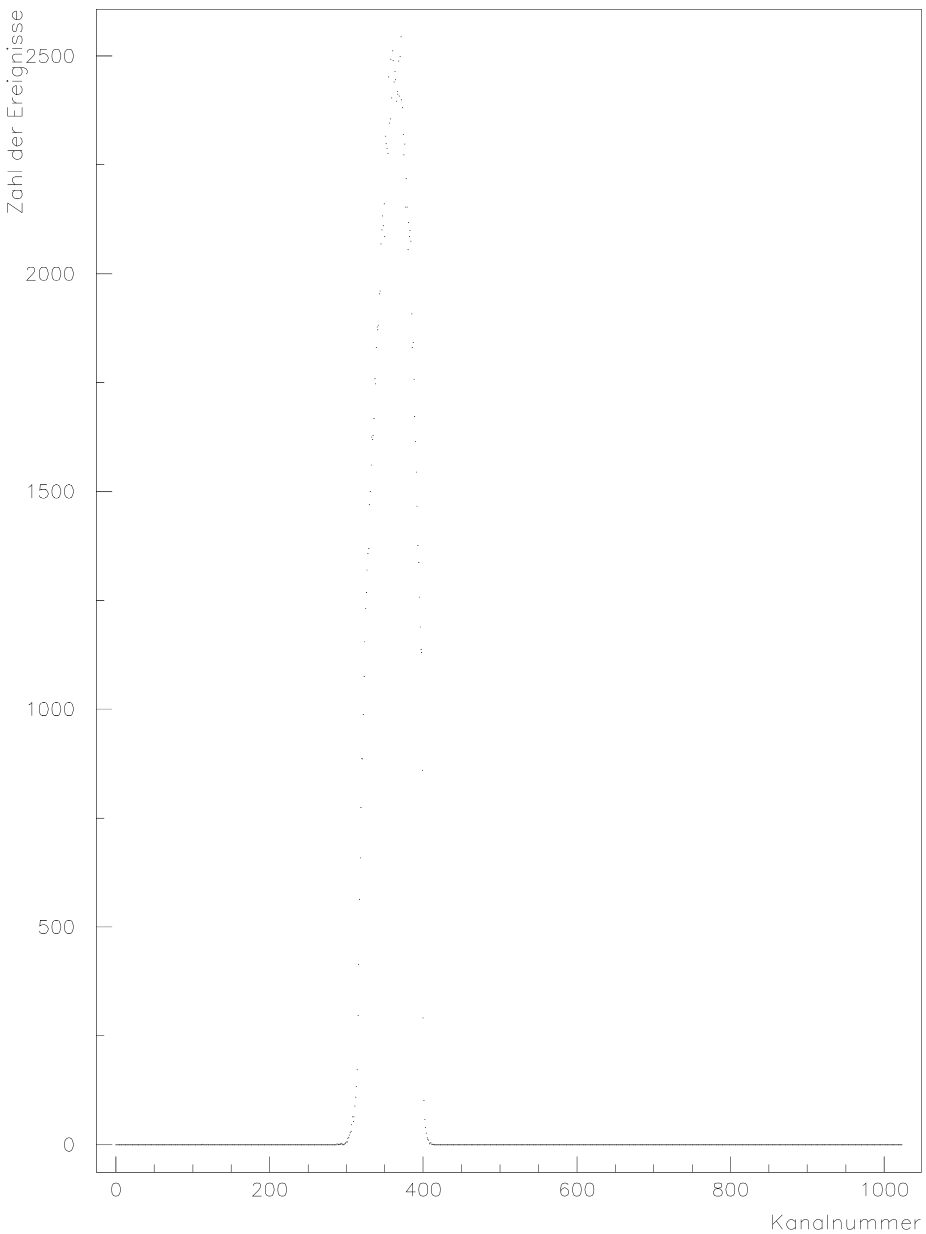

Abbildung 14: 482-keV-Linie von ^{181}Hf, rechter Detektor

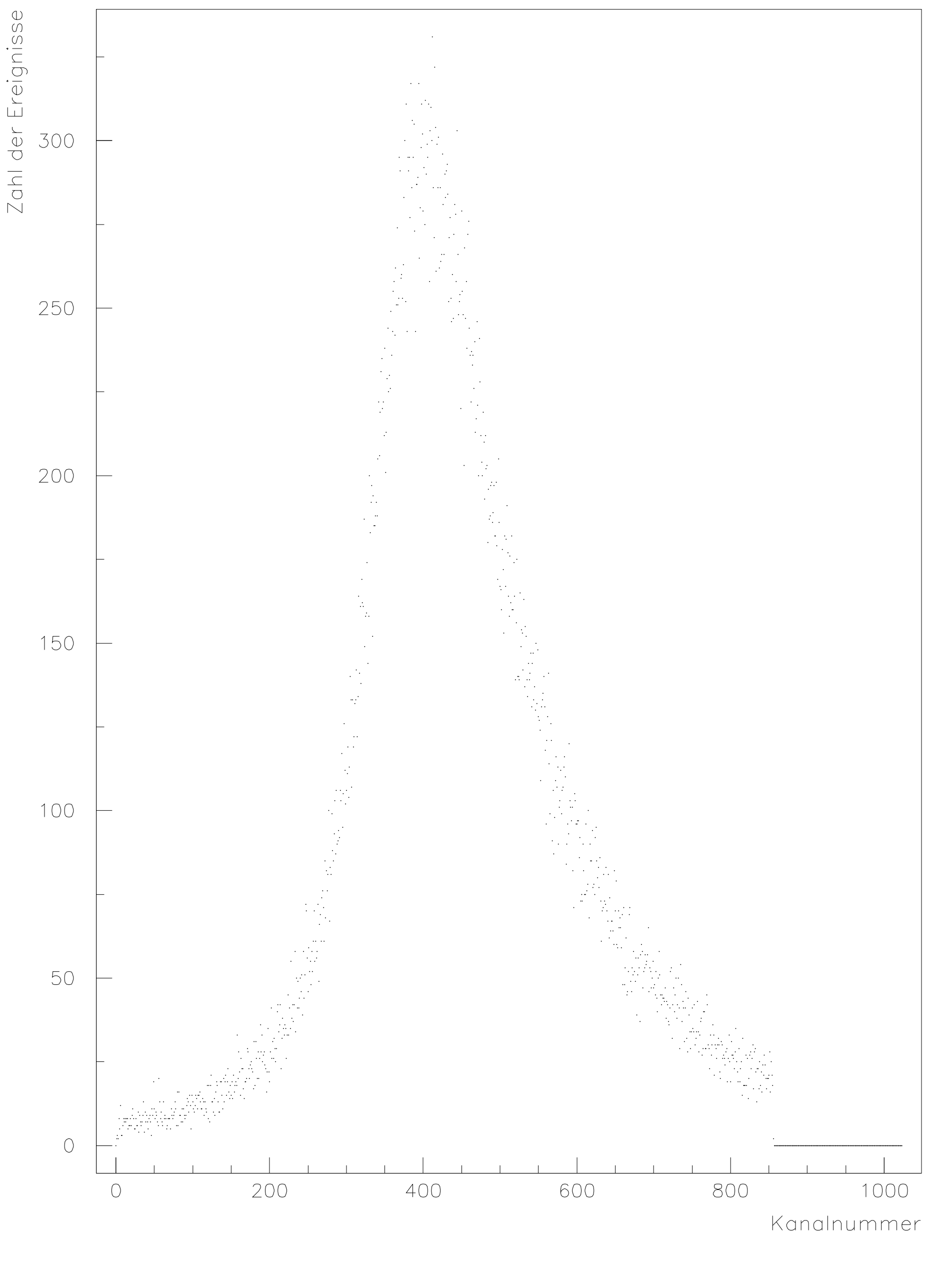

Abbildung 15: Lebensdauerkurve

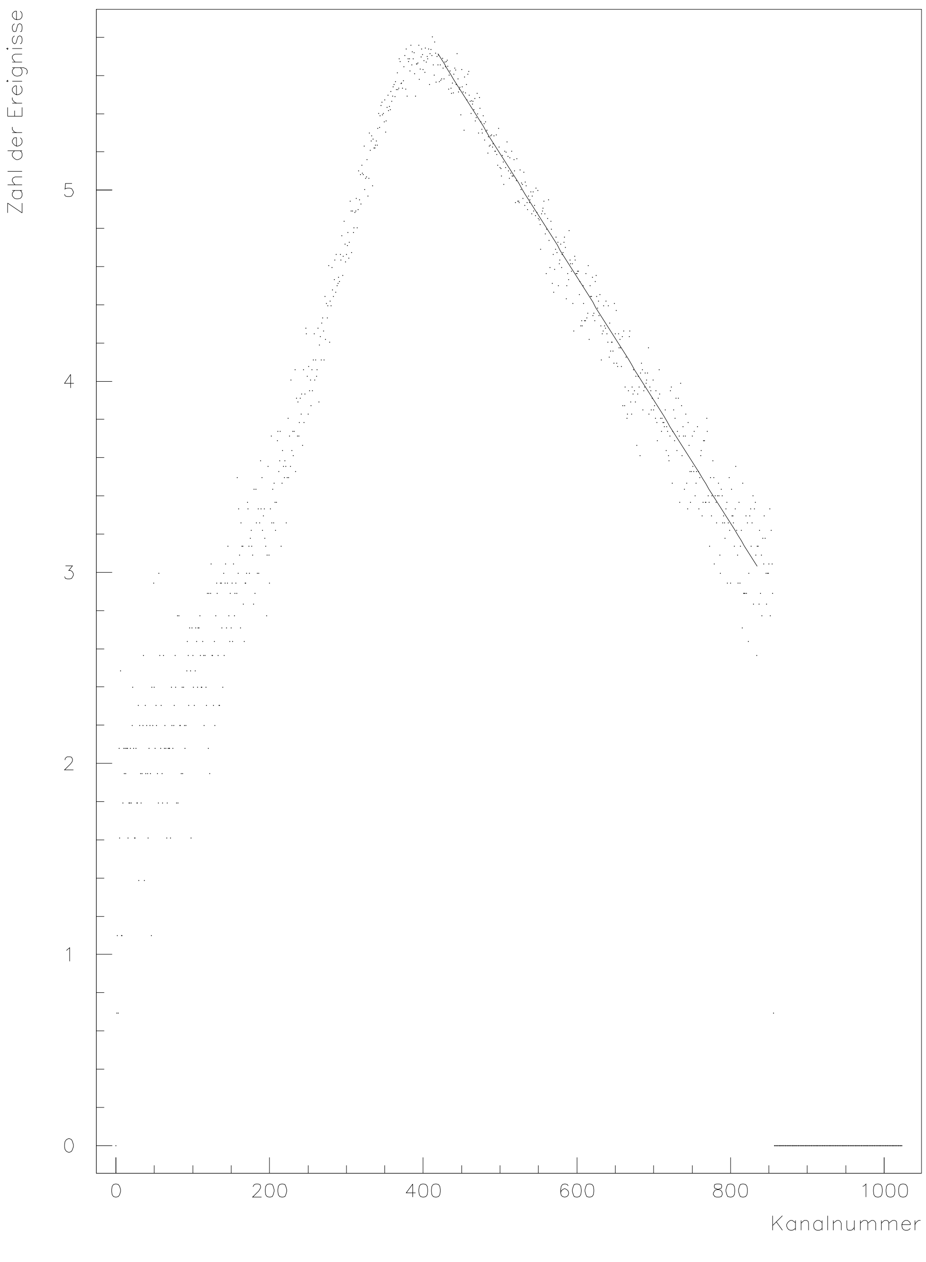

Abbildung 16: Lebensdauerkurve in halblogarithmischer Darstellung

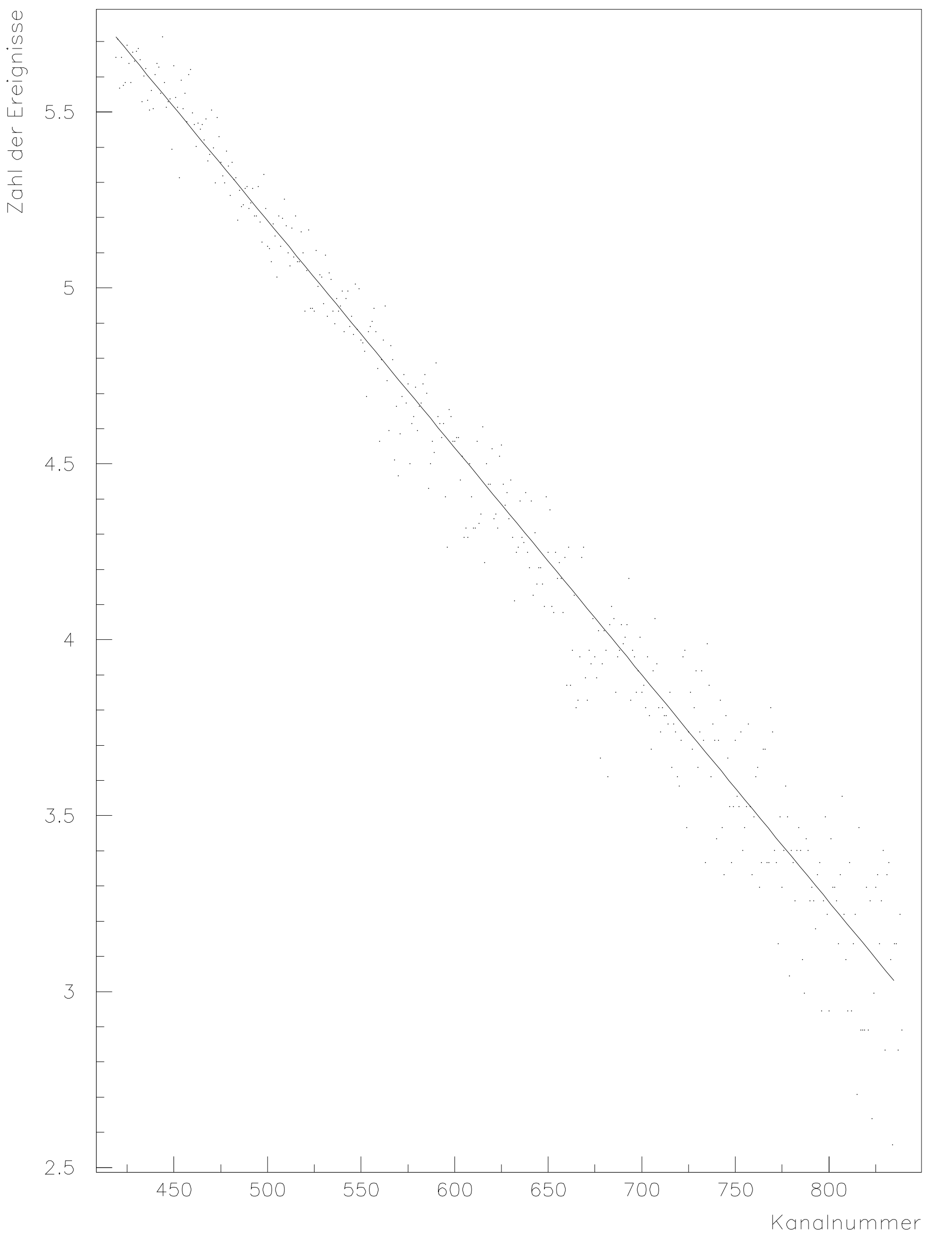

Abbildung 17: Regressionsgerade für die Lebensdauerkurve in halblogarithmischer Darstellung

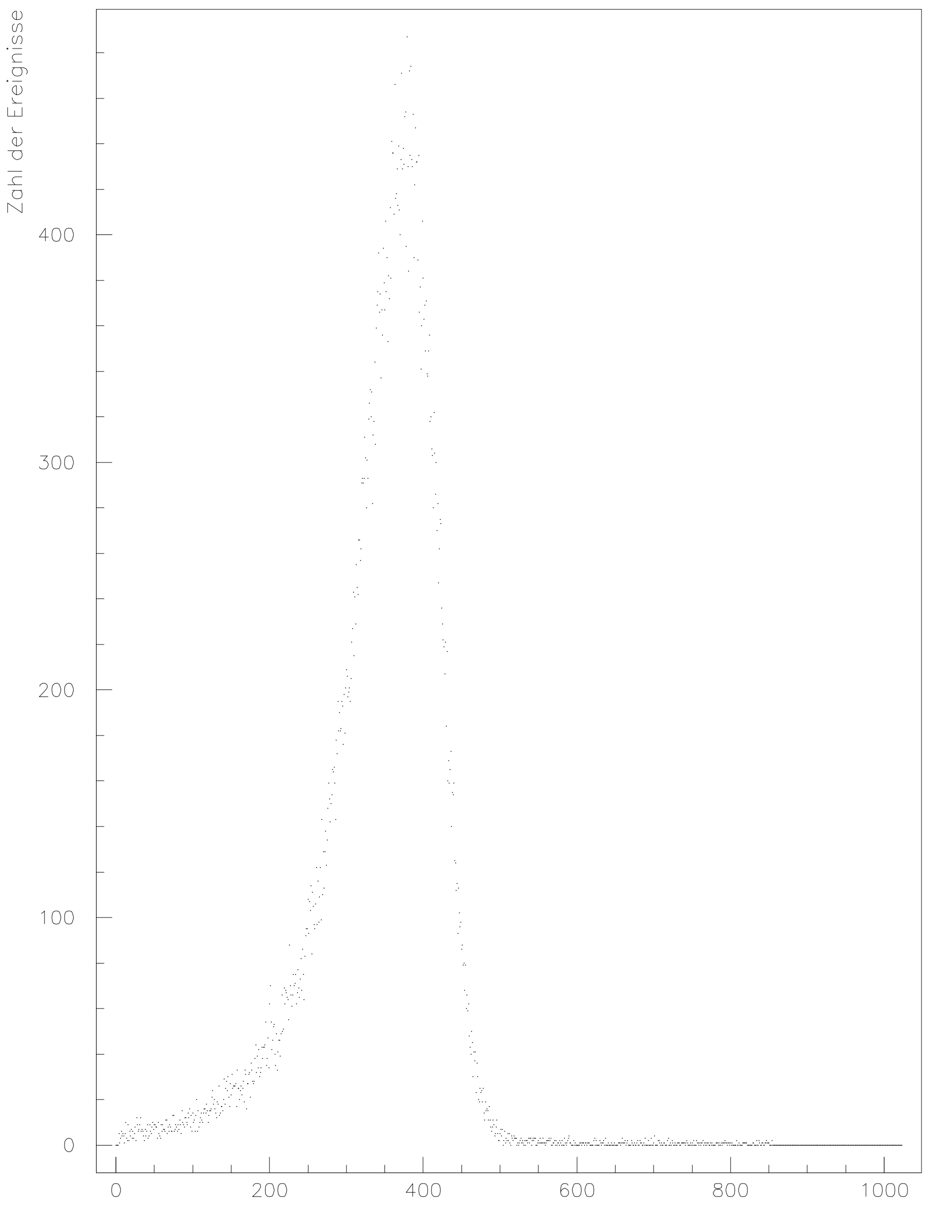

Abbildung 18: Promptkurve mit den Energiefenstern der Hf-Messung

B PAW MACROS

```
MACRO ALL

exec TAC
exec TACGAUSS1
exec TACGAUSS2
exec TACGAUSS3
exec TACGAUSS4
exec TACGAUSS5
exec ZEITEICHUNG
exec NAL
exec NAL_511
exec NAR
exec NAR_511
exec HFL
exec HFL_133
exec HFR
exec HFR_482
exec HF_LEB
exec HF_LOG
exec NA_FE_HF
RETURN



MACRO ALLDEF

Size 18 24
Next
Set * ; Option *
opt zfl1
Size 18 24
Histogram/Delete * ; Vector/Delete *
Title_global ' '
Title_global ' ' U
Option NBOX
Option NGRI
Set HWID 1
Set FWID 1
Set BWID 1
Set PWID 1
Set LWID 1
Set CSIZ 0.25
Set VSIZ 0.25
Set TSIZ 0.32
Set XMGL 1.2
Set XMGR 1.2
Set YMGU 0.5
Set YMGL 1.5
Set GSIZ 0.1
Set YHTI 0.7
Set KSIZ 0.15
Set MTYP 1
Zone 1 1
range
points
```

```
Next
RETURN


MACRO NAL

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect nal
ve/copy vect(1,1:1024) x
ve/copy vect(2,1:1024) y
opt utit
set mtyp 1
for/file 99 nal.eps
metafile 99 -113
ve/plo y%x
Set CLIP 0 ; ATITLE 'Kanalnummer' 'Zahl der Ereignisse'
close 99
RETURN


MACRO NAL_511

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect nal_511
ve/copy vect(1,1:1024) x
ve/copy vect(2,1:1024) y
opt utit
set mtyp 1
for/file 99 nal_511.eps
metafile 99 -113
ve/plo y%x
Set CLIP 0 ; ATITLE 'Kanalnummer' 'Zahl der Ereignisse'
close 99
RETURN


MACRO NAR

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect nar
ve/copy vect(1,1:1024) x
ve/copy vect(2,1:1024) y
opt utit
set mtyp 1
for/file 99 nar.eps
metafile 99 -113
ve/plo y%x
Set CLIP 0 ; ATITLE 'Kanalnummer' 'Zahl der Ereignisse'
close 99
RETURN
```

```
MACRO NAR_511

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect nar_511
ve/copy vect(1,1:1024) x
ve/copy vect(2,1:1024) y
opt utit
set mtyp 1
for/file 99 nar_511.eps
metafile 99 -113
ve/plo y%x
Set CLIP 0 ; ATITLE 'Kanalnummer' 'Zahl der Ereignisse'
close 99
RETURN
```

```
MACRO TAC

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect tac
ve/copy vect(1,1:1024) x
ve/copy vect(2,1:1024) y
sigma ey=sqrt(y)
opt utit
set mtyp 1
for/file 99 tac.eps
metafile 99 -113
ve/plo y%x
Set CLIP 0 ; ATITLE 'Kanalnummer' 'Zahl der Ereignisse'
close 99
RETURN
```

```
MACRO TACGAUSS1

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect tac
ve/copy vect(1,1:160) x
ve/copy vect(2,1:160) y
sigma ey=sqrt(y)
set mtyp 1
for/file 99 tacgauss1.eps
metafile 99 -113
ve/plo y%x
ve/fit x y ey g
close 99
RETURN
```

```
MACRO TACGAUSS2

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect tac
ve/copy vect(1,175:325) x
ve/copy vect(2,175:325) y
sigma ey=sqrt(y)
set mtyp 1
ve/plo y%x
ve/fit x y ey g
RETURN
```

```
MACRO TACGAUSS3

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect tac
ve/copy vect(1,325:480) x
ve/copy vect(2,325:480) y
sigma ey=sqrt(y)
set mtyp 1
ve/plo y%x
ve/fit x y ey g
RETURN
```

```
MACRO TACGAUSS4

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect tac
ve/copy vect(1,480:650) x
ve/copy vect(2,480:650) y
sigma ey=sqrt(y)
set mtyp 1
ve/plo y%x
ve/fit x y ey g
RETURN
```

```
MACRO TACGAUSS5

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect tac
ve/copy vect(1,650:800) x
ve/copy vect(2,650:800) y
sigma ey=sqrt(y)
set mtyp 1
ve/plo y%x
ve/fit x y ey g
RETURN
```

```
MACRO ZEITEICHUNG

exec ALLDEF
ve/cre vect(3,5) r -32 95.925 0.11600 -16 248.73 0.12724 0 403.94 0.11622 16 558.19 0.11535 32 710.81 0.07965
ve/copy vect(2,1:5) x
ve/copy vect(1,1:5) y
ve/copy vect(3,1:5) ey
opt utit
set mtype 21
for/file 99 zeiteichung.eps
metafile 99 -113
ve/plo y%x
ve/fit x y ey p1 S
Set CLIP 0 ; ATITLE 'Kanalnummer' 'Zeit / ns'
close 99
set mtyp 1
RETURN



MACRO HFL

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect hfl
ve/copy vect(1,1:1024) x
ve/copy vect(2,1:1024) y
opt utit
set mtyp 1
for/file 99 hfl.eps
metafile 99 -113
ve/plo y%x
Set CLIP 0 ; ATITLE 'Kanalnummer' 'Zahl der Ereignisse'
close 99
RETURN



MACRO HFL_133

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect hfl_133
ve/copy vect(1,1:1024) x
ve/copy vect(2,1:1024) y
opt utit
set mtyp 1
for/file 99 hfl_133.eps
metafile 99 -113
ve/plo y%x
Set CLIP 0 ; ATITLE 'Kanalnummer' 'Zahl der Ereignisse'
close 99
RETURN
```

```
MACRO HFR

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect hfr
ve/copy vect(1,1:1024) x
ve/copy vect(2,1:1024) y
opt utit
set mtyp 1
for/file 99 hfr.eps
metafile 99 -113
ve/plo y%x
Set CLIP 0 ; ATITLE 'Kanalnummer' 'Zahl der Ereignisse'
close 99
RETURN



MACRO HFR_482

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect hfr_482
ve/copy vect(1,1:1024) x
ve/copy vect(2,1:1024) y
opt utit
set mtyp 1
for/file 99 hfr_482.eps
metafile 99 -113
ve/plo y%x
Set CLIP 0 ; ATITLE 'Kanalnummer' 'Zahl der Ereignisse'
close 99
RETURN



MACRO GAUSS_NAL_511

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect nal
ve/copy vect(1,240:330) x
ve/copy vect(2,240:330) y
sigma ey=sqrt(y)
set mtyp 1
ve/plo y%x
ve/fit x y ey g
RETURN



MACRO GAUSS_NAL_1275

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
```

```
ve/re vect nal
ve/copy vect(1,690:820) x
ve/copy vect(2,690:820) y
sigma ey=sqrt(y)
set mtyp 1
ve/plo y%x
ve/fit x y ey g
RETURN



MACRO GAUSS_NAR_511

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect nar
ve/copy vect(1,370:467) x
ve/copy vect(2,370:467) y
sigma ey=sqrt(y)
set mtyp 1
ve/plo y%x
ve/fit x y ey g
RETURN



MACRO GAUSS_NAR_1275

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect nar
ve/copy vect(1,1:1024) x
ve/copy vect(2,1:1024) y
sigma ey=sqrt(y)
set mtyp 1
ve/plo y%x
ve/fit x y ey g
RETURN



MACRO GAUSS_HFL_133

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect hfl
ve/copy vect(1,3:50) x
ve/copy vect(2,3:50) y
sigma ey=sqrt(y)
set mtyp 1
ve/plo y%x
ve/fit x y ey g
RETURN


MACRO GAUSS_HFL_343
```

```
exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect hfl
ve/copy vect(1,140:200) x
ve/copy vect(2,140:200) y
sigma ey=sqrt(y)
set mtyp 1
ve/plo y%x
ve/fit x y ey g
RETURN



MACRO GAUSS_HFL_482

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect hfl
ve/copy vect(1,220:300) x
ve/copy vect(2,220:300) y
sigma ey=sqrt(y)
set mtyp 1
ve/plo y%x
ve/fit x y ey g
RETURN



MACRO GAUSS_HFR_133

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect hfr
ve/copy vect(1,20:65) x
ve/copy vect(2,20:65) y
sigma ey=sqrt(y)
set mtyp 1
ve/plo y%x
ve/fit x y ey g
RETURN



MACRO GAUSS_HFR_343

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect hfr
ve/copy vect(1,190:280) x
ve/copy vect(2,190:280) y
sigma ey=sqrt(y)
set mtyp 1
ve/plo y%x
ve/fit x y ey g
RETURN
```

```
MACRO GAUSS_HFR_482

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect hfr
ve/copy vect(1,305:400) x
ve/copy vect(2,305:400) y
sigma ey=sqrt(y)
set mtyp 1
ve/plo y%x
ve/fit x y ey g
RETURN



MACRO ENERGIEEICHUNG_LINKS

exec ALLDEF
ve/cre vect(3,5) r 133.0 15 1.0 343.0 167.41 0.31579 482.0 264.78 0.45248 511.0 284.17 0.22404 1275.0 762.54 2.2985
ve/copy vect(2,1:5) x
ve/copy vect(1,1:5) y
opt utit
set mtype 21
for/file 99 energieeichung_links.eps
metafile 99 -113
ve/plo y%x
ve/fit x y ! p1 S
Set CLIP 0 ; ATITLE 'Kanalnummer' 'Energie / keV'
close 99
set mtyp 1
RETURN



MACRO ENERGIEEICHUNG_RECHTS

exec ALLDEF
ve/cre vect(3,4) r 133.0 42.300 0.09792 343.0 231.40 0.21743 482.0 347.87 0.24190 511.0 420.43 0.20211
ve/copy vect(2,1:5) x
ve/copy vect(1,1:5) y
opt utit
set mtype 21
for/file 99 energieeichung_rechts.eps
metafile 99 -113
ve/plo y%x
ve/fit x y ! p1 S
Set CLIP 0 ; ATITLE 'Kanalnummer' 'Energie / keV'
close 99
set mtyp 1
RETURN



MACRO HF_LEB

exec ALLDEF
```

```
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect hf_leb
ve/copy vect(1,1:1024) x
ve/copy vect(2,1:1024) y
opt utit
set mtyp 1
for/file 99 hf_leb.eps
metafile 99 -113
ve/plo y%x
Set CLIP 0 ; ATITLE 'Kanalnummer' 'Zahl der Ereignisse'
close 99
RETURN



MACRO HF_LOG

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect hf_leb
ve/copy vect(1,1:1024) x
ve/copy vect(2,1:1024) y1
sigma y=log(y1)
sigma ey=1/sqrt(y1)
opt utit
set mtyp 1
for/file 99 hf_log.eps
metafile 99 -113
ve/plo y%x
ve/fit x(420:840) y(420:840) ey(420:840) p1 S
Set CLIP 0 ; ATITLE 'Kanalnummer' 'Zahl der Ereignisse'
close 99
RETURN



MACRO HF_LEB_REGRESSION

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect hf_leb
ve/copy vect(1,420:840) x
ve/copy vect(2,420:840) y1
sigma y=log(y1)
sigma ey=1/sqrt(y1)
opt utit
set mtyp 1
for/file 99 hf_leb_regression.eps
metafile 99 -113
ve/plo y%x
ve/fit x y ey p1 S
Set CLIP 0 ; ATITLE 'Kanalnummer' 'Zahl der Ereignisse'
close 99
RETURN
```

```
MACRO NA_FE_HF

exec ALLDEF
ve/cre vect(2,1024)
ve/re vect na_fe_hf
ve/copy vect(1,1:1024) x
ve/copy vect(2,1:1024) y
opt utit
set mtyp 1
for/file 99 na_fe_hf.eps
metafile 99 -113
ve/plo y%x
Set CLIP 0 ; ATITLE 'Kanalnummer' 'Zahl der Ereignisse'
close 99
RETURN
```