



Technische Universität Wien  
Karlsplatz 13  
1040 Wien

Atominstitut  
Stadionallee 2  
1020 Wien

# DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

## Überprüfung mehrerer Upgrade-Möglichkeiten eines Gamma-Spektroskopiesystems für hohe Zählraten

Ausgeführt am

**Atominstitut**  
der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von

Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Sterba  
Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christina Strelj

durch

**Željko Ilić, B. Sc.**  
Mariengasse 21/18, 1170 Wien

Wien, im September 2016



# Inhaltsverzeichnis

Abstract . . . . .	1
Kurzfassung . . . . .	1
Danksagung . . . . .	2
Motivation . . . . .	4
<b>I. Theoretische Grundlagen</b>	<b>6</b>
1.1 Atomaufbau . . . . .	7
1.2 Radioaktivität . . . . .	9
1.2.1 Umwandlungsgesetz . . . . .	9
1.3 Ionisierende Strahlung . . . . .	11
1.3.1 Alphastrahlung . . . . .	11
1.3.2 Betastrahlung . . . . .	11
1.3.3 Gammastrahlung . . . . .	11
1.3.4 Neutronenstrahlung . . . . .	12
1.4 Wechselwirkung von ionisierender Strahlung mit Materie . . . . .	13
1.4.1 Wechselwirkung von Alphastrahlung mit Materie . . . . .	13
1.4.2 Wechselwirkung von Betastrahlung mit Materie . . . . .	13
1.4.3 Wechselwirkung von Gamma-Strahlung mit Materie . . . . .	14
1.4.3.1 Photoeffekt . . . . .	14
1.4.3.2 Comptoneffekt . . . . .	15
1.4.3.3 Paarbildung . . . . .	16
1.4.3.4 Wirkungsquerschnitt . . . . .	17
1.5 Messung von ionisierender Strahlung . . . . .	18
1.5.1 Gasionisationsdetektoren . . . . .	18
1.5.2 Halbleiterdetektoren . . . . .	19
1.5.3 Gamma-Spektroskopie . . . . .	20
1.5.3.1 Signalverarbeitung . . . . .	20
1.5.3.2 Totzeit . . . . .	21
1.5.3.3 Energiekalibrierung und Auswertung von Spektren . . . . .	21
1.5.3.4 Gamma-Spektrum . . . . .	22
<b>II. Upgrade-Versuch durch einen USB2ISA-Adapter</b>	<b>25</b>
2.1 ISA - Industry Standard Architecture . . . . .	26
2.2 ARS Technologies USB2ISA-Adapter . . . . .	26
2.2.1 ARS Technologies Enumerator . . . . .	28
2.2.2 Universal Software Layer (USL) . . . . .	29
2.3 Durchführung des Upgrade-Versuches . . . . .	30
2.3.1 Definieren des Detektors: USB2ISA . . . . .	30
2.3.2 Hardware - Canberra AccuSpec MCA . . . . .	31
2.3.3 Versuchsverlauf: USB2ISA . . . . .	34

---

2.4 Resümee des Upgrade-Versuches - USB2ISA-Adapter . . . . .	38
<b>III. Upgrade-Versuch durch DSA-1000 (Digital Spectrum Analyzer)</b>	<b>39</b>
3.1 Digital Spectrum Analyzer DSA-1000 . . . . .	40
3.1.1 Front Panel und Rear Panel des DSA-1000 . . . . .	41
3.2. Durchführung des Upgrade-Versuches: DSA-1000 . . . . .	43
3.2.1 Definieren des Detektors: DSA-1000 . . . . .	43
3.2.2 Digital Filter Shaping Parameter: Rise Time und Flat Top . . . . .	45
3.2.3 Versuchsverlauf: DSA-1000 . . . . .	47
3.3. Messungen, Ergebnisse und Diskussion - Auflösung und Zählverluste . . . . .	50
3.3.1 Kalibrieren und Auswerten eines Spektrums . . . . .	50
3.3.2 Ergebnisse und Diskussionen . . . . .	52
3.3.2.1 Auflösung und Zählverluste . . . . .	52
3.3.2.2 Vergleichskurven . . . . .	72
3.3.2.3 Serienmessungen mit <i>Rise Time = 1,0 μs</i> und <i>Flat Top = 0,4 μs</i> . . . . .	76
3.3.2.4 Abhängigkeit der Steigung (k) der Trendlinien der Serienmessungen von der Energie . . . . .	81
3.4. Resümee des Upgrade-Versuches: DSA-1000 . . . . .	83
<b>Zusammenfassung</b> . . . . .	<b>85</b>
Abbildungsverzeichnis . . . . .	v
Tabellenverzeichnis . . . . .	viii
Literaturverzeichnis . . . . .	xii

---

## Abstract

Two High-Count-Rate Gamma Spectroscopy Systems are located at the radiochemistry lab of the Atominstitut, Vienna. Those two systems have the following names: "Der dicke Fritz" and "Der Russe". Both gamma spectroscopy systems are made up of the following hardware components: HPGe detector, front-end-electronics, a personal computer and an AccuSpec board, which is the key element of the system. Both systems are operated within Loss-Free-Counting (LFC) mode, therefore no dead time occurs. The personal computers are equipped with an ISA slot mainboard and running Windows 98. All measurements are controlled via Genie 2000 Basic Spectroscopy Software and AccuSpec/B ISA card.

The aim of this master's thesis is the renewal of the electronics and modernization of the High-Count-Rate Gamma Spectroscopy System. During the thesis, two upgrade possibilities are tested by various measurements using the so-called two-source-method. The research is focused on resolution and count loss determination in high count rate radiation systems, so the new systems are compared to the old gamma spectroscopy system. First of all, the applicability of the ARSTech USB2ISA adapter is revised. This adapter is the last element of an analog measuring system. The attempt is to mount the AccuSpec/B board into the USB2ISA adapter and to link the adapter with a new personal computer running Windows 7. The second upgrade option is carried out using DSA-1000, where applicability of the DSA-1000 is revised by varying the parameters of shaping. The old electronics are replaced by the DSA-1000, therefore a digital measuring system is established.

## Kurzfassung

Im Radiochemie-Messraum des Atominstituts der Technischen Universität Wien sind zwei alte Gamma-Spektroskopiesysteme für hohe Zählraten beheimatet. Diese zwei Systeme tragen folgende Namen: "Der dicke Fritz" und "Der Russe". Die Gamma-Spektroskopiesysteme sind aus folgender Hardware zusammengesetzt: HPGe-Detektor, Front-End-Elektronik, PC und AccuSpec-ISA-Steckkarte, die das Herzstück beider Systeme bildet. Die beiden Systeme werden im Loss-Free-Counting (LFC) Modus betrieben, sodass während des Betriebs keine Totzeit auftritt. Die PCs verfügen über ein Mainboard mit ISA-Slot und laufen unter Microsoft Windows 98. Alle Messungen werden über die Genie-2000 Basic Spectroscopy Software und die AccuSpec/B-ISA-Steckkarte gesteuert.

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist die Erneuerung bzw. der Versuch der Erneuerung der Elektronik der Gamma-Spektroskopiesysteme für hohe Zählraten am Atominstitut. Im Laufe der Diplomarbeit werden zwei verschiedene Upgrade-Möglichkeiten durch verschiedene Messungen mittels der Zwei-Quellen-Methode auf ihre Vergleichbarkeit mit dem alten System überprüft, insbesondere auf Unterschiede in der Auflösung und der Korrektur bei hohen Zählraten. Zuerst wird die Anwendbarkeit des ARSTech USB2ISA-Adapters überprüft, welcher das letzte Glied eines analogen Messsystems ist. Der Versuch besteht darin, die AccuSpec/B-ISA-Steckkarte über den USB2ISA-Adapter auf einem neueren PC (Windows 7) zum Laufen zu bringen. Der zweite Upgrade-Versuch wird mithilfe des Canberra DSA-1000 durchgeführt, wo durch das Variieren des Shapings die Anwendbarkeit des DSA-1000 überprüft wird. Bei dem zweiten Upgrade-Versuch wird die Elektronik komplett durch den DSA-1000 ausgetauscht und damit ein digitales Messsystem gebildet.

---

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die mich während meiner Studienzzeit unterstützt, motiviert und bei der Verfassung meiner Diplomarbeit geholfen haben.

Mein besonderer Dank gilt:

Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Sterba, meinem Betreuer, der mir diese Diplomarbeit vorgeschlagen und ermöglicht hat. Vielen Dank für die umfassende Betreuung während der Diplomarbeit.

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christina Streli, die sich bereit erklärt hat, meine Arbeit zu begutachten.

BSc. Dieter Hainz und Ing. Manfred Fugger, die immer Zeit für eine Gespräch hatten und mir in technischen Angelegenheiten sehr geholfen haben.

Meinen Freunden, für die schöne gemeinsame Zeit und alles Erlebte. Sie haben viel Jubel, Trubel, Heiterkeit beigetragen.

Der Marienpfarre Hernals, die meinen Aufenthalt in Wien ermöglicht hat.

Nicht zuletzt meinen Eltern und meinen Schwestern, da sie mir immer während des Studiums mit Rat und Tat zur Seite standen. Ohne ihre soziale, emotionale und finanzielle Unterstützung wäre ich nicht der Mensch der ich heute bin. Sie gaben mir die Gelegenheit, mein Masterstudium in Wien aufzunehmen und meine Träume zu verfolgen.



---

## Motivation

Das Gamma-Spektroskopiesystems des Atominstitutes ist ein analoges, älteres Messsystem für hohe Zählraten. Während dieser Diplomarbeit werden 2 verschiedene Upgrade-Möglichkeiten überprüft, da das Ziel dieser Diplomarbeit die Modernisierung des Gamma-Messplatzes ist. Folgenden Tatsachen dienten als Motivation für diese Diplomarbeit:

- Mit dem jetzigen, analogen High-Count-Messsystem können Zählraten von über 100 000 cps (counts per second) erzielt werden. Die Messkette besteht aus einem Ge-Detektor, einer Front-End-Elektronik, einem PC und einen entsprechenden MCA-Board (in diesem Fall eine AccuSpec/B-ISA-Steckkarte). Zusätzlich wird die Gamma-Spektroskopie-Software Genie-2000 verwendet, da alle Einstellungen über die Software definiert und Messungen gesteuert werden. Die Elektronik ist mit einem alten PC mit ISA-Slots verbunden, der auf Windows 98 läuft. Da der PC nicht mit einer Netzwerkkarte ausgestattet ist, kann dieser mit keinem Netzwerk verbunden werden. Durch die Verwendung des USB2ISA-Adapters, erhofft man sich das bestehende Umfeld (bzw. die bestehende Elektronik) zu behalten und mit einem modernen PC (mit Netzwerkkarte und Windows 7) zu verbinden. Dies würde die Vernetzung des Systems und somit auch eine Steuerung des Messsystems über Internet ermöglichen.

- Zusätzlich wird die Anwendbarkeit des Canberra DSA-1000 überprüft. Das DSA-1000 Gerät wurde verwendet, da es schon am Atominstitut vorhanden war und sich somit eine kostengünstige Möglichkeit ergab, das analoge System durch ein digitales zu ersetzen und zu überprüfen, ob das so zusammengebaute digitale Messsystem die gleichen Eigenschaften wie das ältere, analoge Messsystem hat bzw. für High-Count-Messungen verwendet werden kann.

Da es in der Regel keine universelle Lösung für alle auftretenden Probleme gibt, werden die Auflösung, die Zählrate bzw. Zählverluste, die Totzeit und der Preis Trade-off genau überprüft. Versucht wird eine kostengünstige, an spezielle Anwendungsbereiche angepasste Lösung zu finden.



# I. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die für diese Diplomarbeit notwendigen physikalischen Grundlagen beschrieben. Es werden bestimmte Begriffe ausführlich erklärt, vom Atom und dessen Aufbau bis zu verschiedenen physikalischen Effekten und Methoden, die für das Registrieren von diversen Teilchen verwendet werden.

## 1.1 Atomaufbau

Atome (*ατομος*, unteilbar) sind kleine Bausteine, aus denen alle Stoffe die uns umgeben aufgebaut sind. Zum Zeitpunkt der Namensgebung dachte man, dass diese Teilchen die kleinsten möglichen wären (unteilbar), was sich aber, in weiter historischen Verlauf, als falsch erwies. In Laufe der Zeit wurden durch verschieden Experimente mehrere Modelle zum Atomaufbau vorgeschlagen, die immer wieder erweitert wurden. Im Jahr 1911 konnte E. Rutherford durch sein Streuexperiment (Streuung von  $\alpha$ -Teilchen beim Durchtritt einer Goldfolie) zeigen, dass eine bestimmte Ladungsverteilung innerhalb eines Atoms bestand. Einige Jahre danach (1913), schlug N. Bohr sein "Planetenmodell" des Atoms vor [1].

Laut klassischer Theorie nach Bohr, besteht ein Atom aus dem Atomkern und der Atomhülle. Bohr hat angenommen, dass sich die negativ geladenen Elektronen in definierten Kreisbahnen um den Kern bewegen und somit die Atomhülle bilden. Diese Bahnen (auch Schalen genannt) haben einen ganz bestimmten Energiewert und werden mit einem Buchstaben (oder ganze Zahl) bezeichnet. Die innerste Bahn wird K-Schale genannt, danach folgen die L-Schale, die M-Schale usw. Bohr hat außerdem angenommen, dass die Elektronen strahlungsfrei mit einer definierten konstanten Geschwindigkeit um den Atomkern kreisen und dass Energie nur bei einem Übergang von einem Energieniveau in ein anderes emittiert wird. Die Elektronen der Schale, die am weitesten vom Kern entfernt sind, werden Valenzelektronen genannt. Die Strahlung, die bei einem Elektronenübergang freigesetzt wird, charakterisiert ein Atom und wird daher charakteristische Strahlung genannt.

Der Atomkern besteht aus positiv geladenen Protonen und elektrisch neutralen Neutronen, die etwa gleich schwer und für den Großteil der Masse des Atoms verantwortlich sind. Protonen und Neutronen werden zusammen oft als Nukleonen bezeichnet. Die Summe aus der Anzahl der Protonen  $Z$  (Ordnungszahl) und der Anzahl der Neutronen  $N$  ergibt die Massenzahl  $A$ :

$$A = Z + N. \quad (1)$$

Die übliche Kennzeichnung der Nuklide bzw. Atomarten ist wie folgend definiert [7]:

$${}^A_Z X_N, \quad (2)$$

wobei  $X$  das chemische Symbol,  $Z$  die Ordnungszahl,  $N$  die Neutronenzahl und  $A$  die Massenzahl ist.

Nuklide können anhand ihrer Neutronen-, Ordnungs- bzw. Massenzahl in verschiedene Gruppen eingeordnet werden. Eine Gruppe sind die *Isotope*. Das sind Nuklide mit gleicher Ordnungszahl  $Z$ . Nuklide mit gleicher Massenzahl  $A$  werden *Isobare* genannt. Eine weitere Gruppe sind *Isotone*. Dies sind Nuklide mit gleicher Neutronenzahl  $N$ . Unter *Isodiapheren* versteht man Nuklide mit gleichem Neutronenüberschuss  $N-Z$ , während *Isomere* Vertreter des gleichen Nuklids, aber in unterschiedlichen Energiezuständen sind [11].

Kerne besitzen, wie Elektronenhüllen, diskrete Energieniveaus bzw. bestimmte Bahnen auf denen sich die Nukleonen bewegen (Schalenmodell). Der tiefste Energiezustand wird als Grundzustand bezeichnet. Durch Energiezufuhr können Kerne in höherenergetische Zustände angeregt werden. Durch Abregung dieser höherenergetische Zustände kommt es zur Emission charakteristischer Kernstrahlung, die in der Regel Gammastrahlung ist [7, 11].

Mithilfe der Streumessungen, konnten bereits Abschätzungen über die Größe und Ladung der Kerne gemacht werden. Die Ladung kann aus der Messung des differentiellen Wirkungsquerschnitts für elastische Streuung von Teilchen der Energie  $E_0$  bestimmt werden:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_\theta = \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot 4E_0}\right)^2 \frac{1}{\sin^4\theta/2}, \quad (3)$$

wobei  $Z_2 \cdot e$  die Ladung der Teilchen und  $Z_1 \cdot e$  die Ladung des Coulombfeldes des Kerns ist. Heutzutage wird der Kernradius über den Wirkungsbereich der sehr kurzreichweitigen Kernkräfte definiert. Der Radius  $R$  eines Atomkerns wird als "Halbwertsradius" (Abnahme der Kernkräfte auf die Hälfte) definiert und über folgende Relation bestimmt [3]:

$$R = R_0 A^{1/3}, \quad (4)$$

wobei  $R_0$  eine Konstante (1,4 fm) und  $A$  die Massenzahl ist.

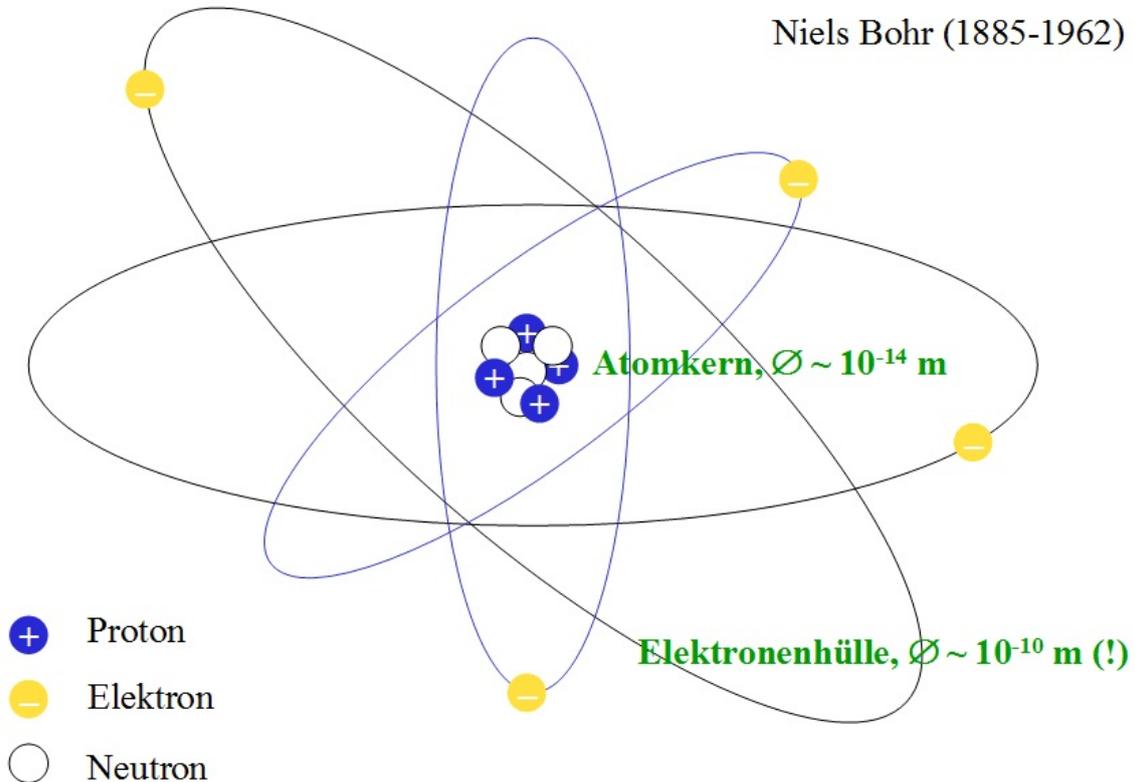


Abbildung 1: Bohr'sches Modell [4].

## 1.2 Radioaktivität [5]

Die Radioaktivität und die damit verbundenen Prozesse sind ein Bestandteil unserer Natur. Unter Radioaktivität versteht man die Umwandlung instabiler Atomkerne in eine stabilere Konfiguration oder Struktur unter Abgabe von Energie in Form ionisierender Strahlung. Der Prozess der Kernumwandlung wird als radioaktiver Zerfall bezeichnet. Die radioaktiven Atomkerne nennt man Radionuklide. Als Aktivität bezeichnet man die Anzahl der Atomkerne eines Nuklids, die sich in einem Zeitintervall  $dt$  umwandeln. Die zeitliche Abfolge dieser Umwandlungen ist statistischer Natur und ist daher für einen individuellen Atomkern nicht vorhersagbar.

### 1.2.1 Umwandlungsgesetz

Wie schon erwähnt ist der radioaktive Zerfall statistischer Natur, d.h. jeder radioaktive Kern zerfällt unabhängig von seinen Nachbarkernen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit. Diese wird durch die Zerfallskonstante  $\lambda$  ausgedrückt. Aus der konstanten Zerfallswahrscheinlichkeit und der Unabhängigkeit der einzelnen Zerfallsakte folgt [3]:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N, \quad (5)$$

d.h. die Aktivität  $A$  ist proportional der Anzahl  $N$  der zu diesem Zeitpunkt vorhandenen radioaktiven Kerne. Dies ist die differentielle Form des Zerfallsgesetzes. Durch Integration dieses Gesetzes, und unter der Bedingung das  $N_0$  die Anzahl der zur Zeit  $t = 0$  vorhandenen Kerne ist, erhält man das Zerfallsgesetz in der exponentiellen Form[7]:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad \text{bzw.} \quad A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}. \quad (6)$$

Die Aktivität  $A$  und die Anzahl der aktiven Kerne  $N$  zeigen also die gleiche zeitliche Abhängigkeit. Durch beidseitiges Logarithmieren der Gleichungen erhält man folgende linearisierte Darstellungen [7]:

$$\ln\left(\frac{N(t)}{N_0}\right) = -\lambda \cdot t \quad \text{bzw.} \quad \ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right) = -\lambda \cdot t \quad (7)$$

Aus der Zerfallskonstante  $\lambda$  errechnet sich die Halbwertszeit ( $T_{1/2}$ ). Man versteht darunter die Zeitspanne, in der sich die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Atomkerne umwandelt bzw. die Zeit in der die Aktivität auf die Hälfte der Anfangsaktivität abgenommen hat:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (8)$$

Die SI-Einheit der Aktivität ist das Becquerel [ $Bq$ ]. Von praktischer Bedeutung im Hinblick auf die Aktivitätsbestimmung an Proben sind noch die spezifische Aktivität  $a$  und die Aktivitätskonzentration  $c_A$  eines Radionuklids. Die spezifische Aktivität gibt die Anzahl der Zerfälle pro Sekunde in einer bestimmten Masse einer Substanz an [ $Bq/kg$ ]. Die Aktivitätskonzentration gibt an, wie viele Zerfälle pro Sekunde in einem bestimmten Volumen einer Substanz stattfinden [ $Bq/m^3$ ] [7].

$$a = \frac{A}{m} \quad [Bq/kg] \quad (9)$$

$$c_A = \frac{A}{V} \quad [Bq/m^3] \quad (10)$$

Ru 94 51,8 m	Ru 95 1,65 h	Ru 96 5,52	Ru 97 2,9 d	Ru 98 1,88	Ru 99 12,7	Ru 100 12,6	Ru 101 17,0	Ru 102 31,6	Ru 103 39,35 d
Tc 93 43,5 m	Tc 94 53 m	Tc 95 60 d	Tc 96 82 m	Tc 97 92,2 d	Tc 98 4,2 · 10 <sup>5</sup> a	Tc 99 6,0 h	Tc 100 15,8 s	Tc 101 14,2 m	Tc 102 4,3 m
Mo 92 14,84	Mo 93 6,3 h	Mo 94 9,25	Mo 95 15,92	Mo 96 16,68	Mo 97 9,55	Mo 98 24,13	Mo 99 66,0 h	Mo 100 9,63	Mo 101 14,6 m

Abbildung 2: Ausschnitt aus der Karlsruher Nuklidkarte. Die Ordnungszahl wird nach oben und die Neutronenzahl nach rechts gezählt. Die schwarzen Felder zeigen stabile, die roten  $\beta^-$ -aktive und die blauen die  $\beta^+$ -aktiven Radionuklide [3].

### 1.3 Ionisierende Strahlung [5]

Teilchen- oder elektromagnetische Wellen-Strahlung wird als ionisierende Strahlung bezeichnet, wenn sie in der Lage ist, Atome oder Moleküle zu ionisieren, d.h. Elektronen aus dem atomaren Verband zu entfernen. Die Energie, die für eine Ionisation notwendig ist, beträgt rund 12 eV. Strahlung mit einer Energie  $> 12$  eV bzw. einer korrespondierenden Wellenlänge  $< 100$  nm wird als ionisierende Strahlung bezeichnet [9]. Beispiele hierfür sind Alpha-, Beta- und Gammastrahlung, sowie Protonen- oder Neutronenstrahlung. Als Strahlenquellen kommen dabei radioaktive Stoffe, Röntgenröhren, Beschleuniger und unterschiedliche Neutronenquellen in Betracht. Grundsätzlich unterscheidet man zwei Arten von ionisierender Strahlung: direkt ionisierende und indirekt ionisierende Strahlung. Direkt ionisierende Strahlung ist jene Strahlung bei der es durch Einstrahlung von geladenen, beschleunigten Teilchen, wie z.B. Elektronen, Protonen oder Alphateilchen, zur direkten Ionisation kommt. Die elektrisch geladenen Teilchen geben beim Durchgang durch Materie Anregungs- und Ionisationsenergie an Atome ab. Zur indirekt ionisierender Strahlung gehören Photonenstrahlen ( $\gamma$ -Strahlung, Röntgenstrahlung) oder ungeladenen Teilchen (Neutronen). Da diese Strahlung keine elektrische Ladung besitzt, ionisiert sie die Atome und Moleküle über die Bildung eines geladenen Sekundärteilchens. Diese Strahlung wird von Atomen eingefangen, oder erzeugt beim Zusammenprall mit den Atomkernen elastische Stöße, wodurch geladene Teilchen entstehen, die Energie übertragen [7, 9].

#### 1.3.1 Alphastrahlung

Die  $\alpha$ -Strahlung ist eine Korpuskularstrahlung (corpusculum: lat. Körperchen) mit positiver Ladung, die aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht (siehe Abbildung 3, (a)). Ein Alphateilchen ist demnach ein Kern des Elements Helium. Aufgrund ihrer Ladung und relativ großen Masse haben  $\alpha$ -Teilchen eine sehr geringe Reichweite. Alphateilchen werden von Materie (z.B. Luft) sehr schnell absorbiert (wenige Zentimeter in Luft). Sie können bereits durch ein Blatt Papier vollständig abgeschirmt werden.

#### 1.3.2 Betastrahlung

Die Betastrahlung ist ebenfalls eine Korpuskularstrahlung. Sie entsteht, wenn radioaktive Atomkerne bei ihrem Zerfall Elektronen oder Positronen aussenden. Man unterscheidet also zwei Arten des  $\beta$ -Zerfalls:  $\beta^+$ - und  $\beta^-$ -Zerfall (siehe Abbildung 3, (b) und (c)). In beiden Fällen werden ein Lepton (Elektron bzw. Positron) und ein Antineutrino bzw. ein Neutrino emittiert. Betastrahlung wird von Materie weniger stark absorbiert als Alphastrahlung und hat daher eine größere Reichweite. Die Reichweite von Betateilchen beträgt in Luft einige Zentimeter bis Meter. Betastrahlung lässt sich relativ leicht abschirmen, zum Beispiel mit einem Aluminiumblech, das einige Millimeter dick ist.

#### 1.3.3 Gammastrahlung

Die Radioaktivität und die damit verbundenen Prozesse sind ein Bestandteil unserer Natur. In der Natur kommen viele verschiedene radioaktive Substanzen vor. Neben den in der Natur vorkommenden radioaktiven Substanzen findet man außer der  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung auch die  $\gamma$ -Strahlung. Sie tritt immer nur in Verbindung mit dem oben erwähnten Strahlungen auf (siehe Abbildung 1). Unter Gammastrahlung versteht man eine sehr kurzwellige elektromagnetische

Strahlung mit Photonenenergien im Bereich zwischen 10 keV und 10 MeV [8]. Aufgrund vieler experimenteller Ergebnisse wurde klar, dass  $\gamma$ -Strahlung entsteht, wenn ein Atomkern aus einem energetisch angeregten Zustand  $E_k$  in einen tieferen Zustand  $E_i$  übergeht (siehe Abbildung 3, (d)). Da sie Materie sehr leicht durchdringt, ist ihre Abschirmung aufwendig. Dafür werden Materialien wie beispielsweise Blei und Beton verwendet. Bei Gammastrahlung unterscheidet man, je nach Entstehung, zwischen natürlicher und künstlich erzeugter Gammastrahlung. Natürliche Gammastrahlung entsteht beim radioaktiven  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Zerfall instabiler Kerne. Künstlich erzeugte Gammastrahlung entsteht durch Beschuss stabiler Kerne mit genügend energiereichen  $\gamma$ -Quanten oder anderen Projektilen (Neutronen, Protonen, etc.).

### 1.3.4 Neutronenstrahlung

Neutronenstrahlung besteht aus ungeladenen Teilchen (den Neutronen). Neutronenstrahlung entsteht selten durch natürlichen Zerfall, wird aber bei der Kernspaltung, einer speziellen Form der Kernumwandlung, freigesetzt (siehe Abbildung 3, (e)). Die Kernspaltung ist nur für schwere Atomkerne charakteristisch (z.B. Uran). Neutronenstrahlung wird von Luft kaum absorbiert, ihre Abschirmung ist sehr aufwendig [12]. Materialien mit einem möglichst hohen Wasserstoffanteil (z.B. Paraffin oder Wasser) werden verwendet, um die Neutronen zunächst abzubremesen. Die abgebremsten (thermischen) Neutronen müssen durch einen Absorber (Bor oder Cadmium) eingefangen werden. Die gleichzeitig frei werdende Gammastrahlung muss mit Blei abgeschirmt werden.

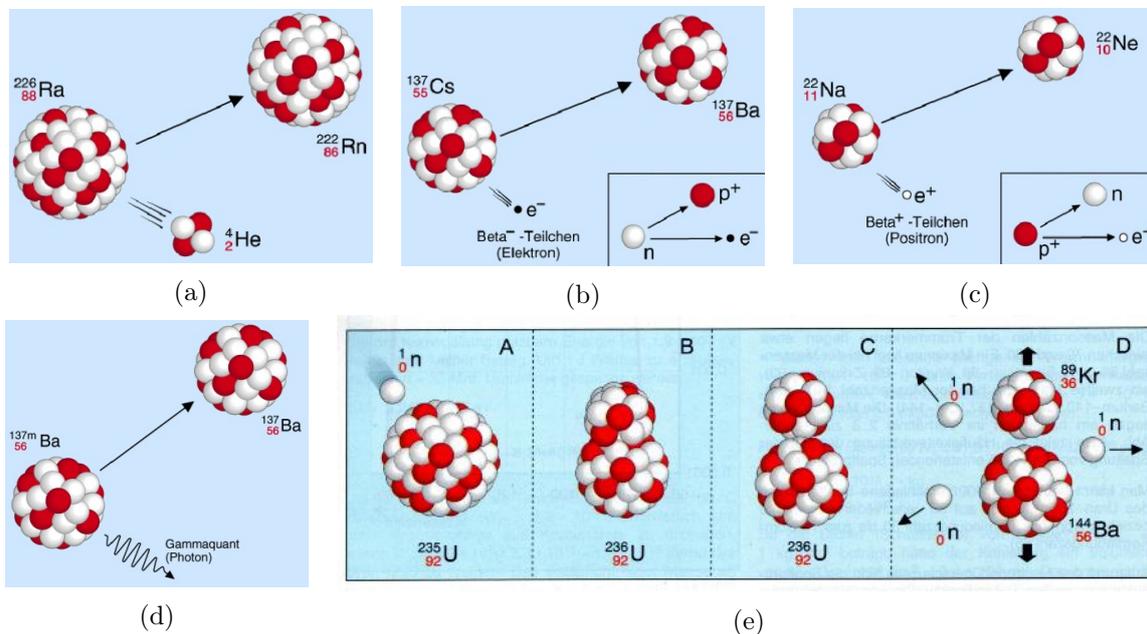


Abbildung 3: Arten der ionisierender Strahlung: a)  $\alpha$ -Strahlung; b)  $\beta^-$ -Strahlung; c)  $\beta^+$ -Strahlung; d) Gammastrahlung; e) Kernspaltung als Beispiel für Neutronenstrahlung. [2, 26]

## 1.4 Wechselwirkung von ionisierender Strahlung mit Materie

Wenn ionisierende Strahlung auf Materie trifft, so kommt es zu Veränderungen der Hüllen und Kerne der Atome. Oft werden auch die Strahlungsteilchen und Quanten durch die Wechselwirkung beeinflusst indem es zu Änderung der Bewegungsrichtung und Energie der Teilchen kommt. Im Folgenden werden verschiedene Arten von Wechselwirkungen beschrieben.

### 1.4.1 Wechselwirkung von Alphastrahlung mit Materie

Die korpuskulare  $\alpha$ -Strahlung ist eine direkt ionisierende Strahlung, die bei dem Durchqueren der Materie ihre Energie an Hüllenelektrone abgibt. Es kommt zur Ionisation oder Anregung der Atome der Materie. Die  $\alpha$ -Strahlung ist außerdem eine dicht ionisierende Strahlung, da sich die Ionisationsereignisse in kleinen Volumina um die Teilchenbahnspur befinden. Die Reichweite von  $\alpha$ -Strahlen ist wegen der großen Wechselwirkung sehr gering und beträgt in Luft einige cm, sodass zur Abschirmung grundsätzlich ein Blatt Papier genügt. Die Energieabgabe der  $\alpha$ -Teilchen ist längs ihrer Teilchenbahnen nicht gleichmäßig. D.h, die Anzahl der produzierten Ionenpaare pro Weglänge ist nicht auf der ganzen Teilchenbahn gleich, die Anzahl nimmt am Ende der Teilchenbahn, wenn das Alphateilchen schon einen Großteil seiner Energie verloren hat, zu. Die Ionisierungstiefenkurven werden Bragg-Kurven und das Maximum Bragg-Peak genannt (siehe Abbildung 4).

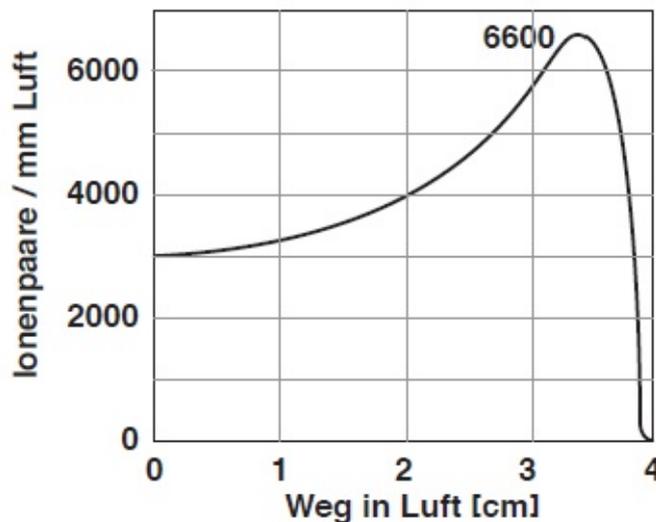


Abbildung 4: Beispiel einer Bragg-Kurve [3].

### 1.4.2 Wechselwirkung von Betastrahlung mit Materie

Wechselwirkt die korpuskulare Betastrahlung mit Materie, so können verschieden Effekte auftreten (Ionisation, Anregung, Streuung, Bremsstrahlung). Die Betastrahlung ist, im Gegensatz zu Alphastrahlung, locker ionisierende Strahlung, da die Ionisationen und die Wechselwirkungsergebnisse einigermaßen über das gesamte bestrahlte Volumen gleichmäßig verteilt sind. Auch

Betastrahlen können ionisierend wirken indem sie mit Elektronen der Hülle und dem Atomkern interagieren. Die Betastrahlen können durch Stöße mit Hüllenelektronen oder durch Coulombwechselwirkung Energie verlieren und abgebremst werden. Die maximale Reichweite von  $\beta$ -Teilchen ist energie- und materialabhängig (z.B Aluminiumblech, Plexiglas, Luft) und liegt in Luft zwischen einigen Zentimetern und einigen Metern. Während der Abbremsung wird kontinuierliche, elektromagnetische Strahlung (Bremsstrahlung) emittiert, deren Energie proportional zur Energie des  $\beta$ -Teilchens und zur Ordnungszahl des absorbierenden Materials ist [2, 7] Durch Annihilation können bestimmte Betastrahlen ( $\beta^+$ ) zwei  $\gamma$ -Quanten mit einer Energie von 0,511 MeV erzeugen. Ein weiterer Effekt der durch Wechselwirkung von Betastrahlung mit Materie hervorgerufen werden kann ist die Čerenkovstrahlung (siehe Abbildung 5). Die Čerenkovstrahlung entsteht bei dem Ausbreiten energiereicher Betastrahlung in einem durchsichtigen Medium (z.B. Wasser oder Plexiglas) mit einer Geschwindigkeit höher als die Lichtgeschwindigkeit im Medium. Ein weiterer Effekt der entstehen kann ist die Rückstreuung der  $\beta$ -Teilchen. Da  $\beta$ -Teilchen eine geringe Masse haben, kann bei der Wechselwirkung mit Materie bzw. mit zunehmender Ordnungszahl des Absorbers ein Anstieg der Streuung der Teilchen in einem Winkel von  $180^\circ$  beobachtet werden.

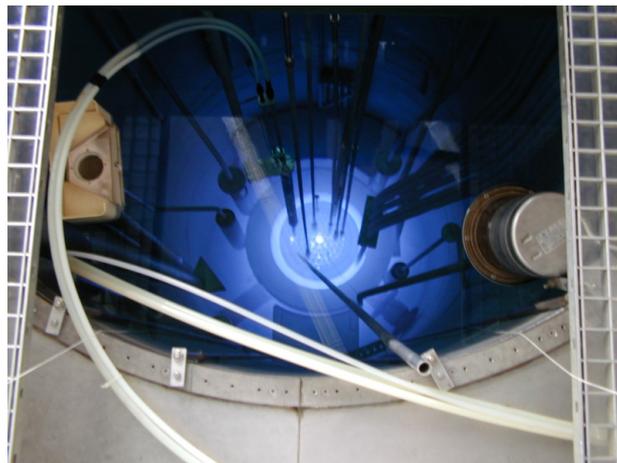


Abbildung 5: Beispiele für Wechselwirkung der Betastrahlen mit Materie: Čerenkovstrahlung [10]

### 1.4.3 Wechselwirkung von Gamma-Strahlung mit Materie [27]

Es gibt verschieden Effekte, die durch Wechselwirkung von Gammastrahlung mit Materie und in Abhängigkeit der  $\gamma$ -Quantenenergie auftreten können. Zu den wesentlichen und wichtigsten gehören der Photoeffekt, der Comptoneffekt und der Paarbildungseffekt. Diese werden im Folgenden genauer beschrieben.

#### 1.4.3.1 Photoeffekt

Der Photoeffekt ist im unteren Energiebereich  $< 30$  keV und bei der Wechselwirkung mit Atomen geringer Kernladungszahl, wie z.B. auch Körpergewebe, die dominante Wechselwirkungsart. Der Photoeffekt tritt auf, wenn ein energiereiches Photon mit einem gebundenen Elektron eines Atoms in Wechselwirkung tritt. Hierbei wird das Photon vollständig absorbiert. Die kinetische Energie des Elektrons ergibt sich aus der Differenz der Photonenenergie und der Bindungsenergie:

$$E_{kin} = E_{\gamma} - E_{Bind}. \quad (11)$$

Durch die übertragende Energie verlässt das Elektron die Hülle des Atoms, was zu einer Ionisierung des Atoms führt. Wegen der Erhaltung des Drehimpulses ist der Photoeffekt nur bei gebundenen Elektronen möglich. Desweiteren kann ein gebundenes Elektron höherer Energie unter Aussendung eines Fluoreszenzphotons die freigewordene Lücke auffüllen. Bei dem Fluoreszenzphoton handelt es sich um charakteristische Röntgenstrahlung, welche wiederum weitere Atome anregen oder ionisieren kann (siehe Abbildung 6). Durch den Photoeffekt entsteht im  $\gamma$ -Spektrum ein Photopeak.

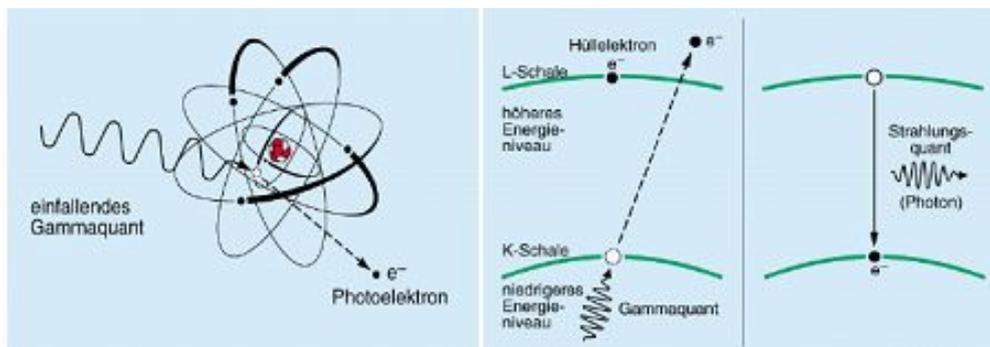


Abbildung 6: Veranschaulichte Darstellung des Photoeffekts (links) und der Entstehung von Röntgenfluoreszenzstrahlung (rechts) [2].

#### 1.4.3.2. Comptoneffekt

Photonen mittlerer Energie verursachen im Wechselwirkungsmaterial vorwiegend den Comptoneffekt. Die elastische Streuung eines Photons mit einem Elektron in der Außenhülle eines Atoms wird als Comptoneffekt bezeichnet. Hierbei wird nur ein Teil der Photonenenergie übertragen. Diese Energie ist eine Funktion des Ablenkwinkels des gestreuten Photons  $\gamma'$ . Die kinetische Energie des Elektrons beträgt:

$$E_e = E_{\gamma} \left[ 1 - \frac{mc^2}{mc^2 - E_{\gamma}(1 - \cos \theta)} \right]. \quad (12)$$

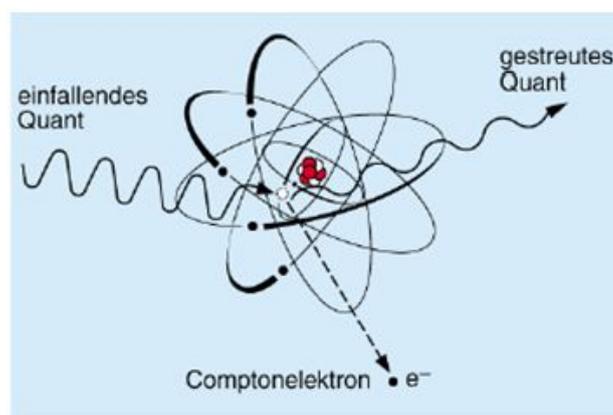


Abbildung 7: Darstellung des Comptoneffekts [2].

Im Gammaskpektrum ist der Comptoneffekt als Kontinuum zu erkennen, da die auf das Elektron übertragene Energie in Abhängigkeit zum Streuwinkel  $\theta$  kontinuierlich verläuft. Bei einem Streuwinkel von  $\theta = 180^\circ$  wird der größt mögliche Energiebetrag vom Photon an das Elektron übertragen. Im Spektrum ist hier die sogenannte Comptonkante zu erkennen, nach der die Counts mit steigender Energie abfallen bis dann bei der charakteristischen Energie des Eingangsphotons der Full-Energy-Peak auftritt, der die gesamte Energie des Photons beinhaltet (siehe Abbildung 8).

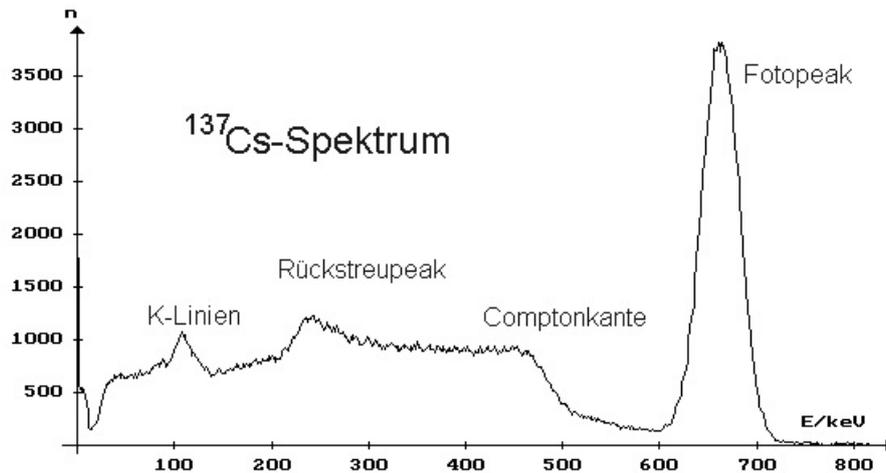


Abbildung 8: Gammaskpektrum mit Spektrallinie bei 662 keV [28].

#### 1.4.3.3 Paarbildung

Bei höheren Photonenenergien ( $> 1,022$  MeV) kann das Photon durch den Prozess der Paarbildung absorbiert werden. Tritt ein hochenergetisches Photon in Wechselwirkung mit dem Coulombfeld eines Atomkern, kann es sich in ein Elektron-Positron-Paar umwandeln (siehe Abbildung). Die charakteristische Grenzenergie entspricht der doppelten Ruhemasse eines Elektrons, bzw. eines Positrons ( $2 \cdot 511 \text{ keV} = 1,022$  MeV). Höhere Photonenenergie wird in kinetische Energie der entstandenen Teilchen umgewandelt.

Beide Teilchen verlieren beim Durchgang durch Materie kontinuierlich Energie, wobei das Positron, wenn die kinetische Energie hinreichend gering ist, beim Zusammentreffen zerstrahlt. Dabei werden zwei Gammaquanten mit Energien von je 511 keV (Annihilationsstrahlung) ausgesandt, die ihrerseits über den Photo- oder Comptoneffekt mit Materie in Wechselwirkung treten (siehe Abbildung 9).

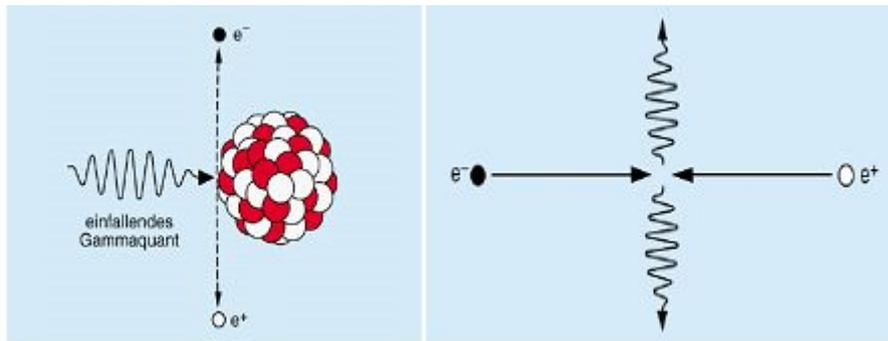


Abbildung 9: Materialisation eines Gammaquants in ein Elektron-Positron-Paar (links); Elektron und Positron vereinigen sich und zerstrahlen (rechts) [2].

#### 1.4.3.4 Wirkungsquerschnitt

Der Wirkungsquerschnitt  $\sigma$  ist eine Funktion der Energie der  $\gamma$ -Quanten und zudem von der Ordnungszahl  $Z$  des absorbierenden Materials abhängig. Die dominanten Bereiche der jeweiligen Effekte sind in Abbildung 10 dargestellt.

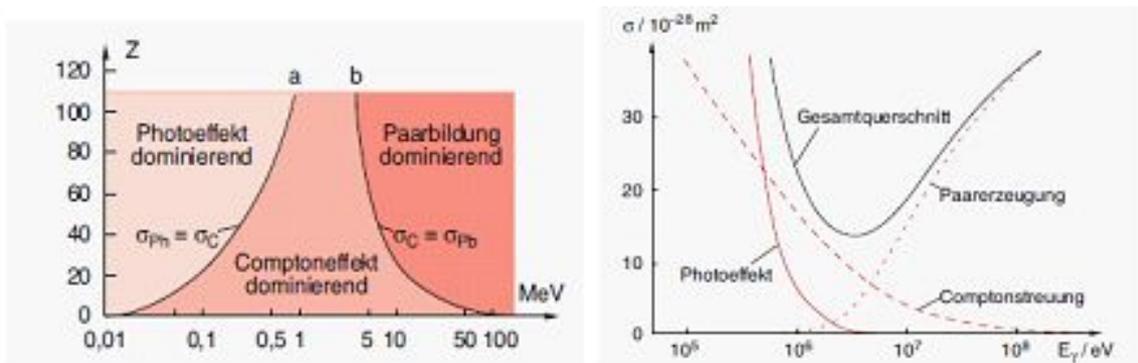


Abbildung 10: Die dominanten Bereiche für Photoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildung als Funktion der Ordnungszahl  $Z$  des Absorbers und der Energie  $E_\gamma$  der  $\gamma$ -Quanten (links); Wirkungsquerschnitt für Photoeffekt, Compton-Effekt und für Paarbildung für Blei als Funktion der  $\gamma$ -Energie (rechts) [8].

## 1.5 Messung von ionisierender Strahlung

Die Messung von ionisierender Strahlung ist durch die Wechselwirkung dieser Strahlung mit Materie möglich. Für die Messung von ionisierender Strahlung lässt sich jeder physikalische und chemische (oder auch biologische) Effekt ausnutzen, der durch die ionisierende Strahlung hervorgerufen wird. Je nach hervorgerufenem Effekt, lassen sich Detektoren in verschiedene Gruppen einordnen (siehe Abbildung 16). Im Folgenden wird grundsätzlich die Gruppe der Detektoren beschrieben, die zum Nachweis der Strahlung den Effekt der Ionisation nutzt, da solche im Rahmen dieser Diplomarbeit verwendet wurden.

### 1.5.1 Gasionisationsdetektoren

Gasionisationsdetektoren bestehen in der Regel aus einem gasgefüllten Volumen mit zwei Elektroden. Durch ionisierende Strahlung wird das Gas ionisiert bzw. die Hüllenelektronen werden freigesetzt. Durch die angelegte Spannung werden die freigesetzten Elektronen und die positiv geladenen Ionen zu der entsprechenden Elektrode hin beschleunigt. Auf diese Art und Weise entsteht ein messbarer Strom (siehe Abbildung 11). Die Anzahl der pro Ionisationsereignis freigesetzten Elektronen hängt von der Art und der Energie der absorbierten Strahlung, vom absorbierenden Gas, der Geometrie des Volumens und von der angelegten Spannung ab [7]. Es gibt drei Arten von Gasionisationsdetektoren, welche durch ihre Aufgabenstellung, Bauart und Betriebsweise charakterisiert werden. Bei der Ionisationskammer ist die angelegte Spannung so gering, dass durch Beschleunigung der erzeugten Elektronen und Ionen keine weiteren Gasmoleküle durch Zusammenstöße ionisiert werden. Es wird ein Strom gemessen der proportional zur absorbierten Dosis ist. Erhöht man die Spannung, so kommt es durch die Stöße der stärker beschleunigten Elektronen mit den Gasmolekülen zu weiteren Ionisationen (Sekundärionisation). Das Signal bleibt aber weiter proportional und die Gasdetektoren werden als Proportionalkammern bezeichnet. Weitere Erhöhung der anliegenden Spannung führt zu höherer Beschleunigung der Elektronen, Ionisationslawinen werden ausgelöst. Darüber hinaus führt die weitere Erhöhung der Spannung zu einem Bereich, in dem die Ionisation ein konstantes Maximum erreicht. Gasdetektoren, bei denen die primären Ladungen durch Gasverstärkung zu vollständigen Entladungen von Teilen des Füllgases führen, bezeichnet man als Geiger-Müller Zählrohre [7]. Die Proportionalität des Signales geht verloren.

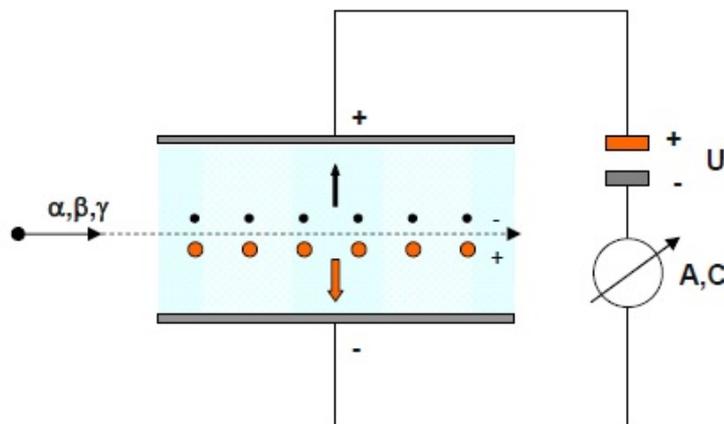


Abbildung 11: Aufbau der Messanordnung für die Messung von ionisierender Strahlung [7].

### 1.5.2 Halbleiterdetektoren

Halbleiterdetektoren nutzen, genau wie Gasionisationsdetektoren, den Effekt der Ionisation. Halbleiter sind Festkörpersubstanzen, die im Gegensatz zu Isolatoren eine relativ kleine Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband haben (z.B. Ge mit 0,7 eV). Dadurch kann passieren, dass bei Zimmertemperatur thermisch angeregte Elektronen in das Leitungsband wechseln und der Halbleiter schon bei Zimmertemperatur eine bestimmte Eigenleitfähigkeit besitzt. Um solche Störeffekte zu unterdrücken, werden die Halbleiterdetektoren meist mit flüssigen Stickstoff gekühlt. Als Halbleitermaterial werden in der Regel Silizium (Si) und Germanium (Ge) verwendet. Beide Elemente sind 4-wertig bzw. mit jeweils vier kovalenten Bindungen mit Nachbaratomen im Kristall gebunden. Silizium wird grundsätzlich für die Messung von Röntgenstrahlen verwendet, wobei Germanium wegen seines höheren Absorptionsgrades bei der Detektion von  $\gamma$ -Strahlung zum Einsatz kommt.

Durch das Dotieren der Halbleiterkristalle können zwei Arten von Kristallen entstehen. Fügt man ein 5-wertiges Atom (Donatoratom), wie z.B. Lithium, in den Kristall ein, so wird ein Elektron in das Leitungsband abgegeben, da es nicht zur Kristallbindung benötigt wird. Diese Kristalle werden n-leitend genannt (N-Typ). Durch Implantation 3-wertiger Atome (Akzeptoren), wie z.B. Bor, entsteht ein p-leitender Kristall (P-Typ). Da in diesem Fall ein Elektron für eine ausreichend abgesättigte Bindung fehlt, wird dieses dem Kristall entzogen. Die Löcher, die durch die fehlenden Elektronen entstehen, wirken wie positive Ladungen. Durch die Kombination von p- bzw. n-dotiertem Halbleitermaterial entsteht eine Diode. Verbindet man einen p-leitenden und einen n-leitenden Kristall miteinander, so entsteht eine ladungsfreie Zone dazwischen. Diese Zone wird als intrinsische Zone oder Verarmungszone bezeichnet und wird durch die angelegte Sperrspannung gesteuert [12].

Tritt nun ein  $\gamma$ -Photon mit den Atomen dieses ladungsfreien Volumens in Wechselwirkung, so werden Elektron-Lochpaare erzeugt. Die Anzahl der entstehenden Elektron-Loch-Paare ist proportional zu der absorbierten Energie des  $\gamma$ -Quants. Durch die angelegte Spannung werden Elektronen und Löcher zu den entsprechenden Elektroden hin bewegt (siehe Abbildung 12). Das so entstandene System hat eine gute Zeitaufösung, da Elektronen und Löcher etwa die gleiche Geschwindigkeit haben. Der dadurch fließende Strom wird desweiteren durch die an den Detektor angeschlossene Elektronik verarbeitet und liefert ein Signal. Bei Halbleiterdetektoren kann ein Empfindlichkeitsgewinn von mehr als 1:40000 für Germanium bzw. 1:20000 für Silizium im Vergleich zu gleich großen, mit Normaldruck gasgefüllten Ionisationskammern beobachtet werden [7].

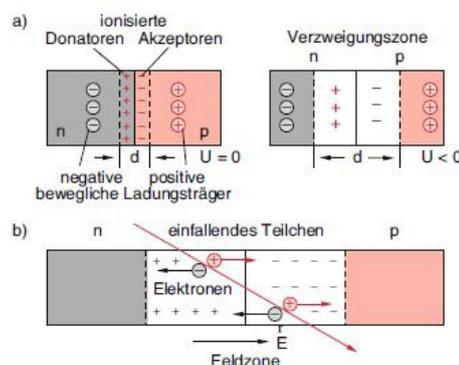


Abbildung 12: Halbleiterdetektor. (a) Verarmungszone ohne und mit äußerer Gegenspannung  $U$  ; (b) Erzeugung von Elektronen-Lochpaaren durch einfallendes Teilchen und ihre Drift im elektrischen Feld  $E$  der Grenzschicht [8].

### 1.5.3 Gamma-Spektroskopie

Die Gamma-Spektroskopie ist ein Messverfahren, das für die Messung von radioaktiven Stoffen verwendet wird und im Allgemeinen eine dominierende Rolle bei der Messung von Gammastrahlung spielt, da es heutzutage in vielen Bereichen der Wissenschaft, Technik und Medizin zum Einsatz kommt.

#### 1.5.3.1 Signalverarbeitung

Durch das Zusammenbringen eines Halbleiterdetektors mit einer entsprechenden Elektronik und einer Gamma-Spektroskopie Software, kann ein Gamma-Spektroskopiesystem aufgebaut werden. Wie schon in 1.5.2 erwähnt, kommt es durch das Auftreffen von ionisierender Strahlung auf die Verarmungszone des Halbleiters zur Produktion von Elektron-Loch-Paare, welche mithilfe der angelegten Hochspannung zu den Außenkontakten wandern und ein Signal (Impuls) erzeugen. Da dieses Signal noch zu gering und daher nicht direkt auswertbar ist, wird es zum Vorverstärker weitergeleitet. Nach der Vorverstärkung gelangt das Signal zum Hauptverstärker, der aus Differenzier- und Integriergliedern bzw. Hoch- und Tiefpassfiltern besteht. Dort wird das sägezahnförmige Signal des Vorverstärkers in ein gaußförmiges Signal umgeformt (Shaping). Anschließend gelangt das Signal zu einem Multi-Channel-Analyser(MCA)-Modul, welches aus einem Analog-Digital-Converter (ADC) und Vielkanalspeicher besteht [13]. Der ADC digitalisiert das gaußförmige Signal aus dem Verstärker und leitet es zu einem Vielkanal-Analysator, wo ein der Pulshöhe entsprechender Kanal um 1 erhöht wird. Der Vielkanalspeicher wird mit Hilfe der Software in den Arbeitsspeicher des PCs kopiert und als Spektrum auf dem Display angezeigt [13, 24].

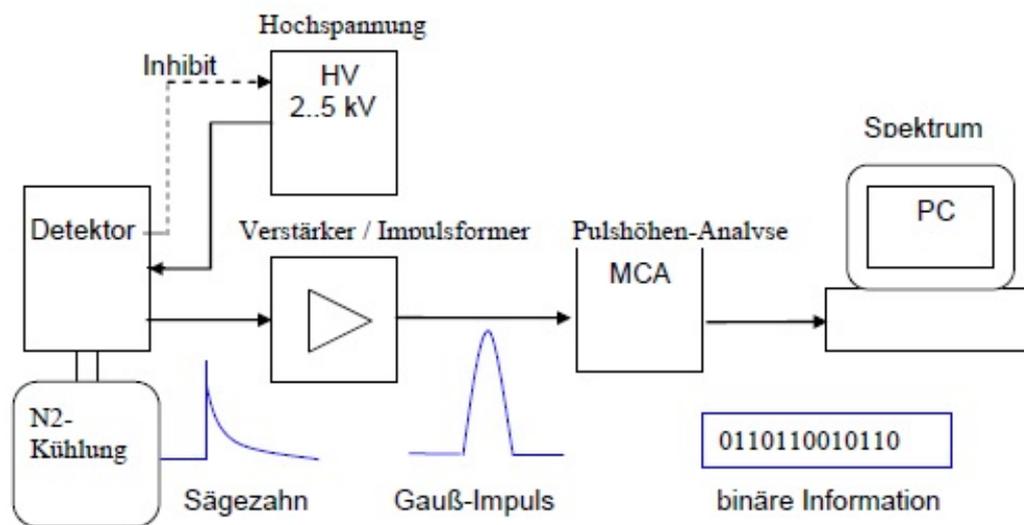


Abbildung 13: Schematischer Aufbau eines Gamma-Spektroskopiesystems [13].

### 1.5.3.2 Totzeit

Der Begriff der Totzeit ist mit dem ADC bzw. Vielkanalanalysator verbunden. Während ein Impuls (Signal) im Vielkanalanalysator (VKA) verarbeitet wird, können keine weiteren Impulse akzeptiert werden. Man sagt, dass das System nicht bereit bzw. "busy" ist. Erst nach durchgeführter Verarbeitung des Impulses kann ein weiterer Impuls dem VKA zugeführt werden. Die Zeit in der das System "busy" ist wird vom System zur sogenannten Totzeit aufsummiert [13]. Weitere Begriffe, die mit der Totzeit eng verbunden sind, sind Real Time und Live Time. Unter Real Time versteht man die konstant laufende Zeit während der Datenerfassung. Live Time die Zeit der Datenerfassung während der die Elektronik, beispielsweise ein Vielkanalanalysator (VKA), in der Lage ist die Impulse aus dem Detektor zu erfassen und zu verarbeiten [27]. Es sei erwähnt, dass die Totzeit für jedes System möglichst klein gehalten werden sollte, was durch diverse Totzeit-Korrekturen erreicht wird.

Unter Shaping-Zeit versteht man die Pulsverarbeitungszeit des Verstärkers. Wie schon in 1.5.3.1 erwähnt, extrahiert der Verstärker das Signal von dem Ausgang des Vorverstärkers. Dieses Signal wird dann gefiltert (Differenzier- und Integrierglied) und in eine Form umgewandelt, die vom ADC analysiert werden kann. Heutzutage erlauben moderne Verstärker das Einstellen verschiedener Zeitkonstanten von etwa  $0,25 \mu\text{s}$  bis  $10 \mu\text{s}$ , womit auch der Datendurchsatz und die Auflösung beeinflusst werden können [25]. In der Regel sollte immer ein Kompromiss zwischen akzeptabler Auflösung und bestmöglichem Durchsatz gefunden werden.

### 1.5.3.3 Energiekalibrierung und Auswertung von Spektren

Durch die Energiekalibrierung wird eine passende *Energie-Kanal, FWHM (Full Width Half Maximum)-Energie* und *Tailing* Kalibrierkurve ermittelt [20]. Die dabei entstandenen Kalibrierkurven könne Polynome des ersten, zweiten oder dritten Grades sein, je nachdem was für ein Zusammenhang ermittelt wird [14].

Unter der einfachen Energiekalibrierung versteht man die Verknüpfung der Kanäle des VKA mit entsprechenden Gamma-Energien, wobei mithilfe einer Funktion ein passender linearer Zusammenhang zwischen Kanälen und Energie ermittelt wird. Jedem Kanal wird ein passender Energiewert zugeteilt. Um eine lineare Energiekalibrierung festzulegen, müssen mindestens zwei Peaks verwendet werden, die möglichst weit von einander entfernt sind (jeweils ein Peak am unteren und oberen Ende des Spektrums) [13, 19]. So entsteht eine Kalibrierfunktion, die immer wieder abrufbar ist.

Nach der Kalibrierung folgt die Auswertung der Spektren. Mithilfe der entsprechenden Software werden alle Photopeaks detektiert und markiert. Diese markierten Bereiche werden *Region Of Interest (ROI)* genannt. Durch das Aufsummieren der Kanalinhalt innerhalb der markierten Bereiche wird eine Peakintegration vollzogen. Der Flächeninhalt des Peaks, der für die Auswertung übrig bleibt (Netto-Peakfläche), errechnet sich aus der Differenz der Gesamtfläche des Peaks und dem entsprechenden Hintergrund (siehe Abbildung 14). Aus dem Nettowert dividiert durch die Live Time ergibt sich die Zählrate in cps (counts per second) [13].

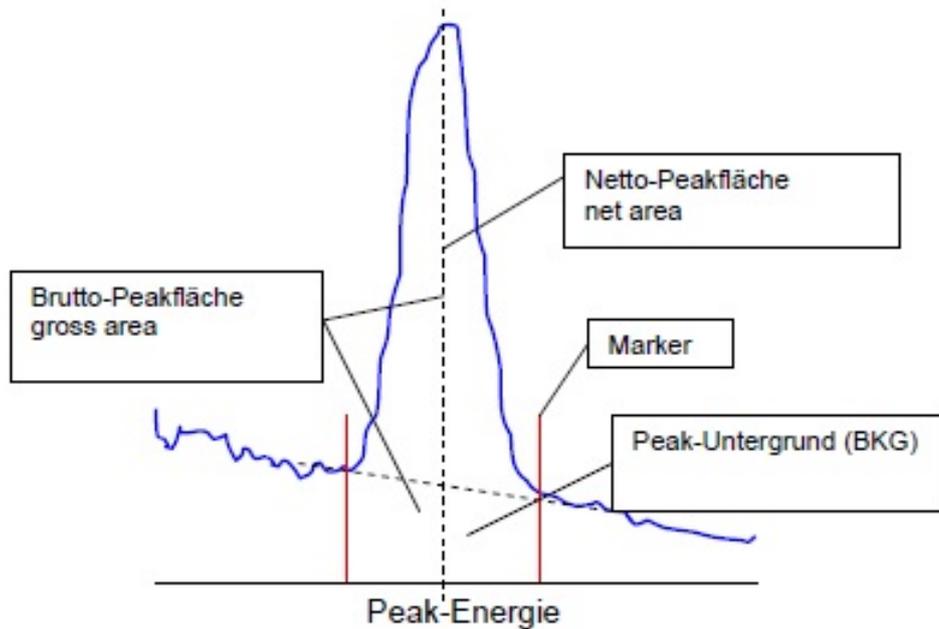


Abbildung 14: Peakflächenberechnung [13].

#### 1.5.3.4 Gamma-Spektrum

Die in 2.4.3 beschriebenen Wechselwirkungseffekte können in der Gamma-Spektroskopie bzw. im Gamma-Spektrum beobachtet werden. Der Photoeffekt ist für die Gamma-Spektroskopie der wichtigste Effekt. Wenn ein Gamma-Photon per Photoeffekt mit dem Detektor wechselwirkt und komplett absorbiert wird, entsteht im Spektrum ein entsprechender Photopeak (siehe Abbildung 15).

Wird das Photon an einem Elektron im Detektors gestreut und verliert einen Teil seiner Energie (Compton-Effekt), so kommt es im Spektrum zur Ausbildung des kontinuierlichen Compton-Hintergrundes. Man kann sehen, dass der Compton-Hintergrund kurz vor dem Photopeak stark abnimmt. Dieser Bereich wird als Compton-Kante bezeichnet (siehe Abbildung 15).

Kommt es im Detektor hingegen zu einer Paarbildung, so können sogenannten Escape Peaks beobachtet werden. Durch die Annihilation des Positron-Elektron-Paars, entstehen, wie schon in 1.4.3.3 erwähnt, zwei Gamma-Photonen mit jeweils 511 keV, die in entgegengesetzter Richtung emittiert werden. Entkommt eines der beiden Photonen aus dem Detektor (Single Escape), so fehlen im Spektrum 511 keV in Relation zum Photopeak. Entkommen beide Photonen (Double Escape), so fehlen 1022 keV (siehe Abbildung 15). Findet die Paarbildung außerhalb des Detektors statt, so kann ein Annihilationspeak bei 511 keV detektiert werden.

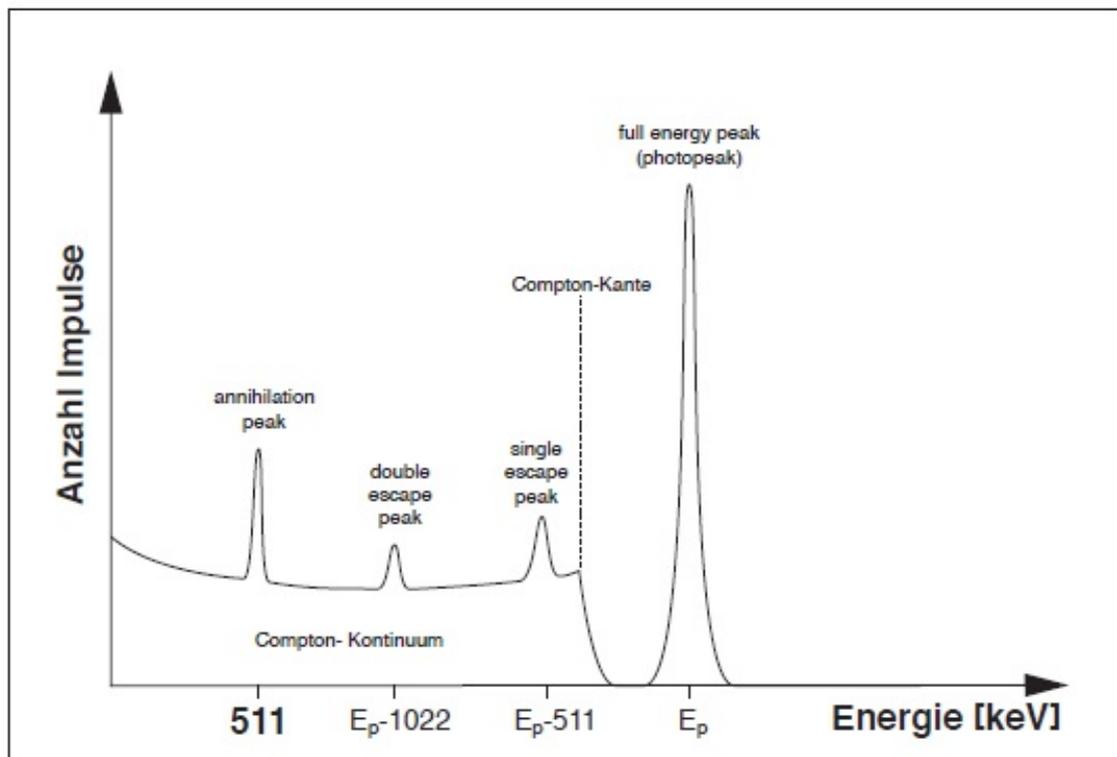


Abbildung 15: Auswirkung der Wechselwirkungseffekte auf ein Gamma-Spektrum [3].

Strahlungseffekte	Nachweisgrößen	Detektoren
Ionisation in Gasen oder Flüssigkeiten	elektrische Ladung, Strom	Elektrometer, Ionisationskammern, Proportionalzählrohr, Auslösezählrohr
Ionisation in Festkörpern	elektrische Ladung, Strom	Halbleiter, Leitfähigkeitsdetektor
Lumineszenz	spontane Lichtemission UV-Emission bei Lichtexposition Lichtemission beim Aufheizen (Thermolumineszenz) Lichtemission bei UV-Exposition (Radiophotolumineszenz) Lichtemission beim Auflösen in geeigneten Lösungsmitteln (Lyolumineszenz)	Szintillationsdetektor, Leuchtschirm, Verstärkungsfolie Speicherfolien Thermolumineszenzdosimeter (LiF, CaSO <sub>4</sub> , BeO, CaF <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ) Phosphatgläser organische Verbindungen, Alkali-halogenide
Chemische Reaktionen	Farbumschläge durch Oxidation, Bruch von Kettenmolekülen mit Farbänderung und Radikalbildung Polymerisation von organischen Molekülen Nachweis von chemischen Radikalen mittels Elektronenspinresonanz (ESR)	Eisensulfatdosimeter, Verfärbungs-dosimeter aus organischen Verbindungen Radiochromfilme mit quantitativer Einfärbung kristalline Substanzen (Alanin)
Fotografische Wirkung	Schwärzung (opt. Dichte), Spuren	Filmemulsionen
Exoelektronenemission	Oberflächenladungsemission nach thermischer oder optischer Anregung	Kristalline Substanzen z. B. BeO, LiF, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaSO <sub>4</sub>
Wärme	Temperaturdifferenz	Kalorimeter
Biologische Effekte	zelluläre Veränderungen, DNS-Veränderungen	dizentrische + ringförmige Chromosomen, Fluoreszenzanalyse DNS
Auffangen der Ladungen eines Strahlenbündels	gesammelte primäre elektrische Ladung	Faradaybecher (-cup)
Erzeugung von Spannungs- bzw. Stromimpulsen in elektrischen Leitern durch Induktion	elektrische Impulse, Ströme	Induktionsmonitore (Ferritkerne, Spulenwicklungen)

Abbildung 16: Eine Liste der Detektoren die für die Messung von ionisierender Strahlung verwendet werden können. Zu sehen sind auch die entsprechenden Strahlungseffekte und Nachweisgrößen [6].

## II. Upgrade-Versuch durch einen USB2ISA-Adapter

Der Schwerpunkt dieses Kapitels ist die Beschreibung eines Upgrade-Versuches durch einen USB2ISA-Adapter. Während des Upgrade-Versuchs wird der Adapter, als letztes Glied, in ein bestehendes, analoges Messsystem eingebunden. Die ISA Computerarchitektur (eng. *Industry Standard Architecture*), die verwendete Adapterkarte und das entsprechende Software-Paket werden kurz beschrieben. Beschrieben wird auch die Einstellung der Detektoren, die mithilfe der Genie-2000 Software, die außerdem für die Messung von Spektren verwendet wird, durchgeführt wird.

## 2.1 ISA - Industry Standard Architecture

Industry Standard Architecture (kurz: ISA) ist ein 8- oder 16-bit Computerbus der in den 1980er Jahren von IBM entwickelt wurde. Genauer gesagt wurde ISA 1981 im Rahmen des IBM PC Projektes von einem Team unter der Leitung von Mark Dean entwickelt [15]. Der 8-bit Systembus wird üblicherweise mit einem Bustakt von 4,77 MHz betrieben, während man bei einem 16-bit Systembus eine Bustakt von 6 oder 8 MHz finden kann [16]. Der Steckplatz des Buses ist ein zweiseitiger Slot mit mehreren Kontakten (siehe Abbildung 17). Bei ISA-Steckkarten unterscheidet man grundsätzlich zwei Arten: PnP- und Legacy-ISA-Karten. Während bei Legacy-ISA-Karten die Ressourcen der Karte dem Benutzer bekannt sein und von ihm eingestellt werden müssen, werden bei PnP-ISA-Karten die notwendigen Ressourcen über ein BIOS zugewiesen.

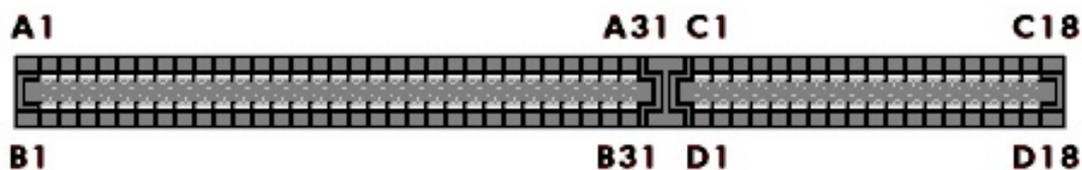


Abbildung 17: Schematische Darstellung eines ISA Slots [17].

## 2.2 ARS Technologies USB2ISA-Adapter

Die erste Upgrade-Möglichkeit des Gamma-Spektroskopiesystems, die betrachtet wurde, war die Verwendung einer USB2ISA-Adapter-Karte. Die Adapter-Karte, die verwendet wurde, ist ein Produkt der Firma ARS Technologies. Die USB2ISA-X3-Karte hat 3 separate ISA Slots und ermöglicht die Verwendung von bis zu 3 ISA-Steckkarten gleichzeitig (siehe Abbildung 2). Die montierten ISA-Steckkarten können auf 3 unterschiedliche Arten mit Strom versorgt werden [18]:

- per USB-Kabel, wenn die ISA-Steckkarte nur +5V benötigt und der Stromverbrauch einen Wert von 500 mA nicht überschreitet.
- per power supply module (isa-pwr), welches Spannungen von -12V, +12V und -5V zur Verfügung stellt, wenn der Strom einen Wert von 500 mA nicht überschreitet.
- per external power supply adapter (isa-pwr-xr), welcher Spannungen von +5V, +12V, -12V und -5V zur Verfügung stellt, wenn der Strom den Grenzwert des Adapters nicht überschreitet.

Auf der USB2ISA-Adapter-Karte befindet sich eine Lichtdiode, die bei korrekter Energieversorgung leuchtet. Die Diode dient als Indikator für die Überprüfung der Energieversorgung.

Neben der Leuchtdiode, befindet sich auf der USB2ISA-Adapter-Karte auch ein Jumper. Dieser kann in zwei Positionen eingestellt werden: Position 1-2 (default) und Position 3-4 [18]. In Position 1-2 wird die ISA-Steckkarte über das USB-Kabel mit Strom versorgt und diese Position wird eingestellt, falls isa-pwr verwendet wird. Position 3-4 wird bei externer Energieversorgung verwendet, d.h falls isa-pwr-xr verwendet wird [18].

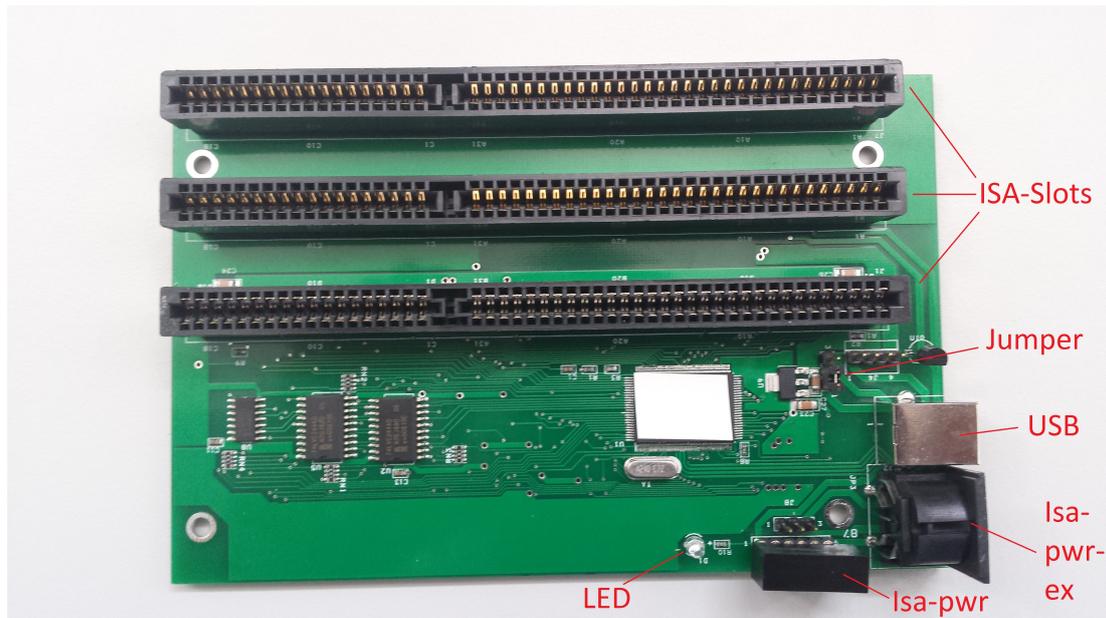


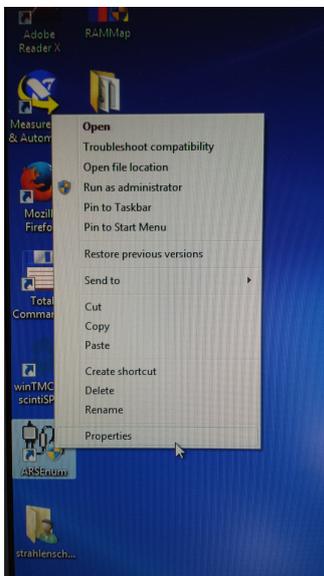
Abbildung 18: USB2ISA-Karte der Firma ARS Technologies

Die ARS Technologies Software wurde im Radiochemielabor auf einem DELL Optiplex 780 PC mit einem 32-bit Windows 7 Betriebssystem installiert. Die Software wurde vom folgenden Link heruntergeladen: [www.arstech.com/install2rel.zip](http://www.arstech.com/install2rel.zip). Im heruntergeladenen File befinden sich zwei Ordner, "install2rel" und "install2libs". Innerhalb dieser Ordner findet man mehrere Setup-Files für verschiedene Betriebssysteme, die folgende Programme und Files installieren [18]:

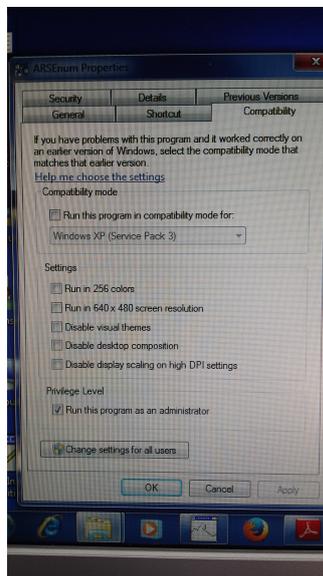
- ARSEnum- ARS Technologies Enumerator, der für das Erkennen und manuelle Einfügen von Ressourcen der ISA-Steckkarte zuständig ist.
- ARSGui- ARS Technologies Utility für manuelles schreiben/lesen von Speicheradresse und I/O-Adresse der ISA-Steckkarte.
- User's Guide- Manual für den USB2ISA-Adapter

### 2.2.1 ARS Technologies Enumerator

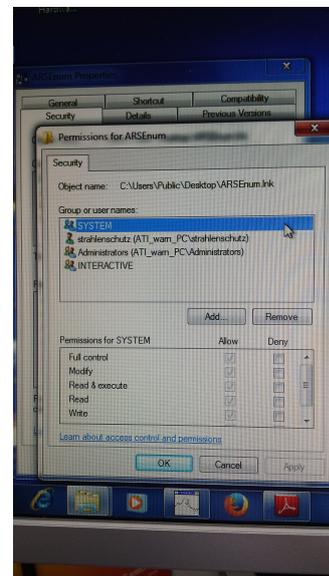
Wie schon erwähnt, ist der ARSTech Enumerator für das Erkennen und Einfügen von Ressourcen (I/O-Adresse, Speicheradresse, IRQ, DMA) der ISA-Steckkarte zuständig und somit der wichtigste Teil des Software-Paketes. Nach der Installation des ARSTech Enumerators müssen zusätzliche Einstellungen durchgeführt werden, da moderne Betriebssysteme wie Windows 7, strenge "security requirements" haben. Der Enumerator muss immer im Administrator-Modus gestartet werden, d.h man muss vor dem Starten der Software mit der rechten Maus-Taste auf "ARSEnum" und "Propertis" klicken. Es erscheint ein Fenster, wo man den Administrator-Modus einstellen kann: "Compatibility-> Privilege level-> Run the program as an administrator" (siehe Abbildung 19, (a) und (b) ). Danach müssen die Berechtigungen richtig eingestellt werden: "Security-> Edit-> Everyone-> Full Control-> Allow"(siehe Abbildung 19, (c) ).



(a) Schritt 1



(b) Schritt 2



(c) Schritt 3

Abbildung 19: Einstellungen des ARSTech Enumerators.

Nachdem der ARSTech Enumerator zum ersten mal gestartet wird, muss der entsprechende "USB host controller" definiert werden. Ein Fenster mit Auswahlmöglichkeiten kommt zum Vorschein. Bei dem PC im Radiochemielabor kann man zwischen zwei "host controller" mit sechs Ports wählen. Nachdem ein "USB host controller" gewählt wird, kommt wieder eine Fenster zum Vorschein, wo beschrieben wird, dass ein bestimmter "USB2.0 EHCI host controller" deaktiviert werden muss. Durch das Deaktivieren des "USB2.0 EHCI host controller", wird der ARSTech Enumerator normal gestartet und es erscheint das Hauptfenster des Enumerators.

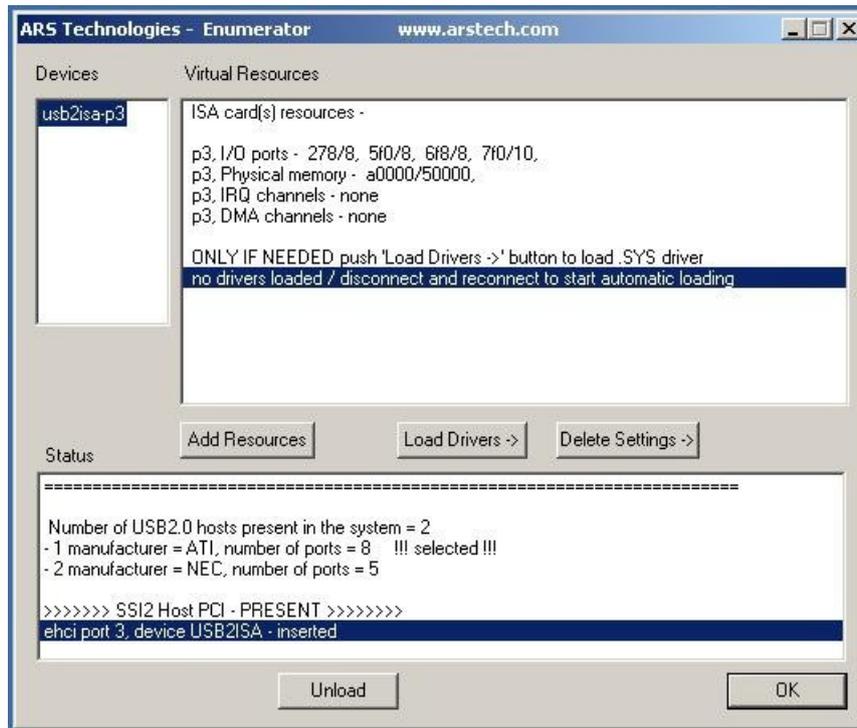


Abbildung 20: Hauptfenster des ARSTech Enumerators [18].

Wie man aus Abbildung 20 sehen kann, besteht das Hauptfenster des ARSTech Enumerators aus drei Bereichen: *Devices*, *Virtual Resources* und *Status* Bereich. Der *Device* Bereich zeigt das Gerät, das verwendet wird (z.B USB2ISA-p1). Im *Virtual Resources* Bereich findet man die entsprechenden Ressourcen der, in den USB2ISA-Adapter montierten, ISA-Steckkarte. Der *Status* Bereich zeigt die freien und verwendeten Hosts, sowie Fehlermeldungen, falls vorhanden. Erwähnen sollte man noch die Buttons *Add Resources*, *Load Drivers*, *Delete Settings*, *Unload* und *OK*. *Add Resources* dient der manuellen Einfügung der unerkannten Ressourcen der montierten ISA-Steckkarte. Mit *Load Drivers* können die Treiber der Steckkarte manuell geladen werden, falls die Treiber vom ARSTech Enumerator nicht automatisch erkannt werden. *Delete Settings* löscht alle Einstellungen, die definiert wurden und beim klicken auf *OK* wird das Hauptfenster des ARSTech Enumerators geschlossen, der Enumerator läuft im Hintergrund aber weiter. Drückt man auf den *Unload* Button, so schließt sich das Hauptfenster und der ARSTech Enumerator wird beendet.

### 2.2.2 Universal Software Layer (USL)

Universal Software Layer (USL) ist ein Teil des ARSTech Software-Paketes. USL erlaubt das Weiterleiten von Ressourcen durch USB. Die Ressourcen die weitergeleitet werden können sind: I/O Adresse, Speicheradresse, DMA (Direct Memory Access) und IRQ (Hardware Interrupt). USL ermöglicht dem Benutzer die Verwendung des USB2ISA-Adapters und der ISA-Steckkarte ohne weitere Programmierfähigkeiten oder Modifikationen [18].

Nachdem die ISA-Steckkarte in den USB2ISA-Adapter montiert wird, muss der ARSTech Enumerator gestartet werden um die notwendigen Ressourcen zu beanspruchen. Der Enumerator überprüft automatisch die Ressourcen der montierten ISA-Steckkarte und leitet diese per USB

weiter.

Alle Geräte, die durch USL gehandhabt werden, teilen I/O- und Speicherbereiche sowie IRQ Kanäle, mit allen anderen Geräten des Computersystems. Es sei erwähnt, dass die Geschwindigkeit der montierten ISA-Steckkarte nicht dieselbe ist wie bei einem Motherboard, da die Daten per USB weitergeleitet werden.

## 2.3 Durchführung des Upgrade-Versuches

### 2.3.1 Definieren des Detektors: USB2ISA

Der erste Upgrade-Versuch des Gamma-Spektroskopiesystems wurde mithilfe der USB2ISA-Adapterkarte der Firma ARS Technologies durchgeführt. Die Adapterkarte und das dazugehörige Software-Paket wurden in "2.2 ARS Technologies USB2ISA-Adapter" genauer beschrieben. Bevor man den Adapter und die entsprechende ISA-Steckkarte verwenden konnte, musste mithilfe der Software Genie-2000 der Detektor definiert werden. Das Definieren des Detektors wurde mit dem *MCA Input Definition Editor (MID Editor)* durchgeführt [22]. Startet man den MID Editor, so erscheint ein Fenster mit Auswahlmöglichkeiten. Unter *Edit* findet man zwei Möglichkeiten, *Add MCA* und *Delete MCA*, mit denen man eine bestimmte Hardware definieren oder löschen kann. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde eine AccuSpec/B MCA verwendet, da beide Detektoren des Gamma-Spektroskopiesystems des Atominstutts über diese MCA mit der Software Genie-2000 kommunizieren. Drückt man auf *Add MCA*, so erscheint ein Fenster wie in Abbildung 21.

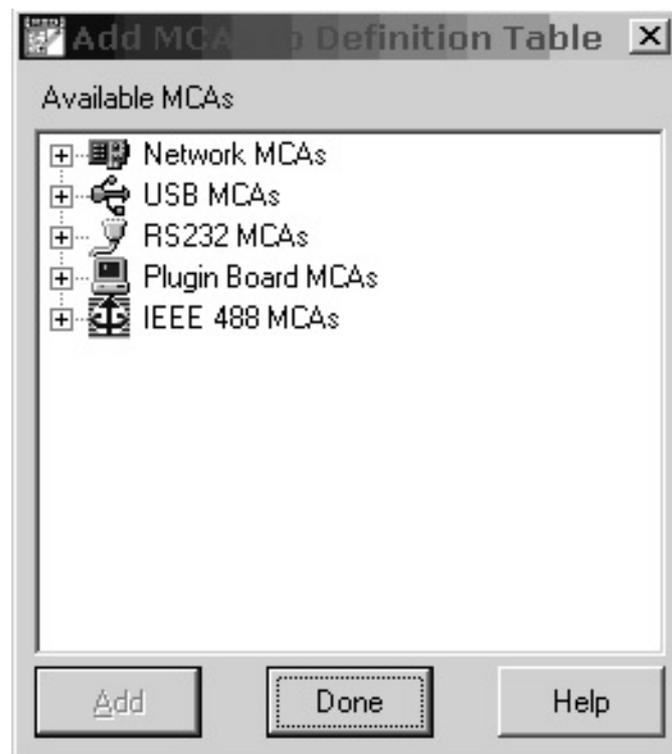


Abbildung 21: Add MCA [22].

Unter *Plugin Board MCAs* findet man die AccuSpec Serie der MCAs, darunter auch die AccuSpec/B. Nachdem AccuSpec/B ausgewählt wurde, konnten im Hauptfenster des MID Editors, unter *Devices*, die notwendigen Einstellungen definiert werden [22]. Bei der AccuSpec/B Karte ist es wichtig den *MCA Full Memory* Bereich, sowie *I/O-* und *Speicheradresse* richtig zu definieren. In unserem Fall wurde der MCA Full Memory Bereich auf 8k, die I/O-Adresse auf 310 (Hexadezimal) und die Speicheradresse auf D0000 (Hexadezimal) eingestellt (Default Einstellungen, können aber nach Bedarf auch anders definiert werden).

### 2.3.2 Hardware - Canberra AccuSpec MCA

Um die Genie-2000 Software benutzen und Messungen durchführen zu können, musste ein Detektor, ein Analog-Digital-Converter (ADC), ein entsprechender MCA und ein PC bereitgestellt werden. Die Gammaspektroskopieeinrichtung des Radiochemielabors des Atominstututs besteht aus zwei Detektoren. Beide Detektoren sind über eine bestimmte Elektronik mit zwei PCs verbunden. Das wesentliche, dass man hier erwähnen sollte, ist dass die Detektoren über eine ISA-Karte mit der Software Genie-2000 kommunizieren. Die ISA-Karten in den beiden PCs sind Steckkarten der Firma Canberra. Es handelt sich dabei um Steckkarten der AccuSpec Serie (AccuSpec/B) (siehe Abbildung 22).

Bevor die AccuSpec/B-Karte in den USB2ISA-Adapter montiert wird, muss sichergestellt werden, dass die I/O Adress Switches und die Jumper auf der AccuSpec/B-Karte richtig eingestellt sind. Die Hardware und die per MID Editor definierten Einstellungen müssen übereinstimmen. Mithilfe der Base I/O Adress Switches wird die entsprechende I/O-Adresse definiert. Die Switches können 2 Positionen einnehmen, OPEN oder CLOSED, sodass anhand einer bestimmten Kombination der Switches die I/O-Adressen definiert werden (siehe Tabelle 1). Es gibt vier mögliche Adressen (Hexadezimal), die verwendet werden können: 300, 310, 320 und 330 [22].

Die AccuSpec/B-Karte hat zehn Jumper die entsprechend eingestellt werden müssen. Die Jumper *RDY DEL* und *CLADC DEL* sind für die ADC Transfer-Zeit zuständig. Es gibt 5 mögliche Positionen, in denen diese zwei Jumper definiert werden können. Für das *Memory Window Mapping* sind folgende fünf Jumper zuständig: *AS*, *BS*, *CS*, *DS* und *MAP*. Diese Jumper sollten wie folgend definiert werden: *AS=32/64K*, *BS=32/64K*, *CS=64K*, *DS=1B* und *MAP=64K*. Mit dem *SPEC* Jumper wird die Anzahl der Kanäle definiert (8K oder 16K). Die *ND* and *ACQ* Jumper dienen zur Verwendung des Signales bzw. zur Verwendung eines Canberra ADC. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde ein Canberra ADC, Model 8713 verwendet. Details und genauere Beschreibung können aus der Literatur [20] entnommen werden.

Board No.	1	2	3	4
I/O Address Switch	300	310	320	330
A10	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED
A9	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN
A8	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN
A7	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED
A6	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED
A5	CLOSED	CLOSED	OPEN	OPEN
A4	CLOSED	OPEN	CLOSED	OPEN

Tabelle 1: Kombinationen der Address Switches der Canberra AccuSpec/B-Karte [22].

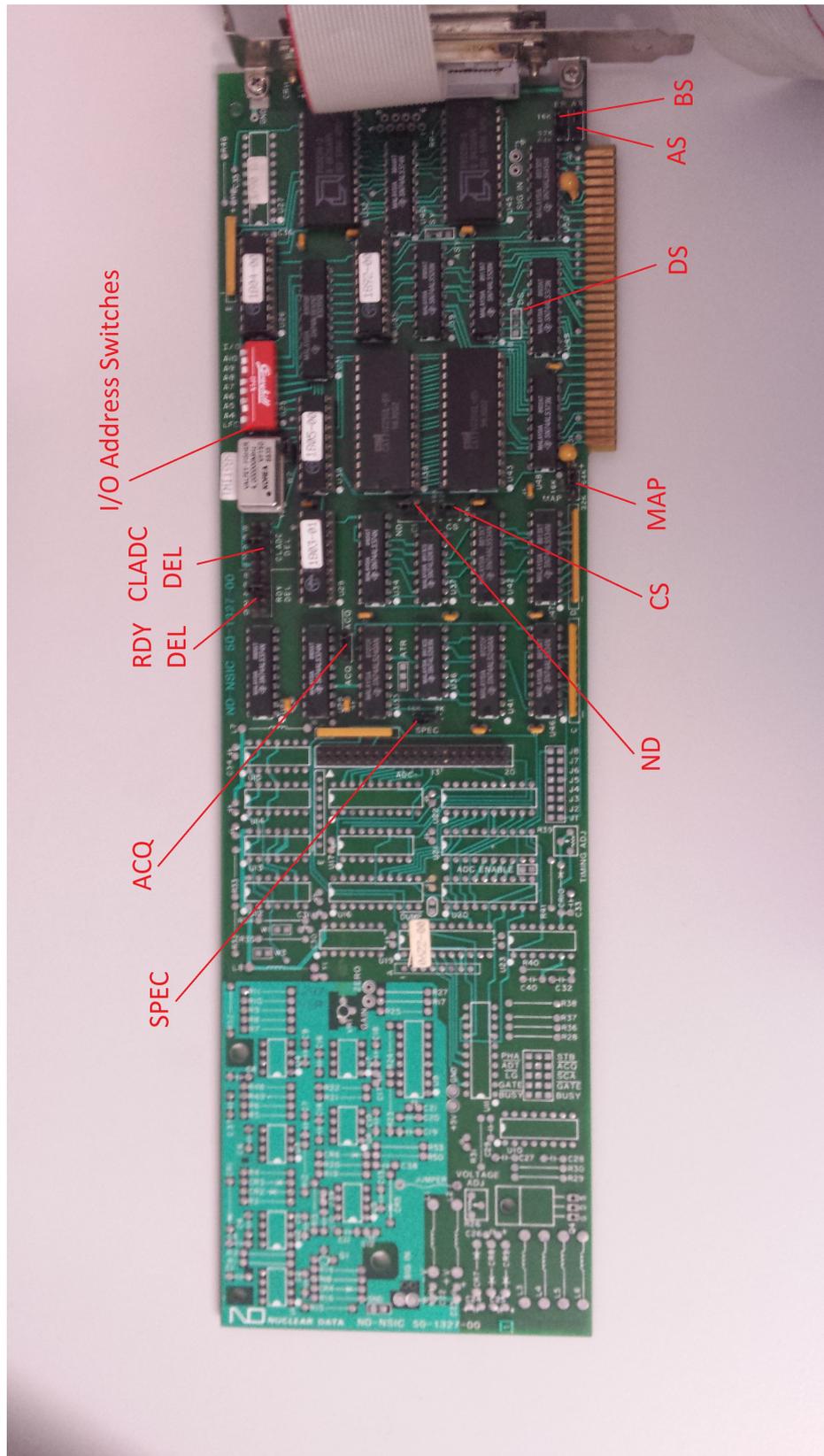


Abbildung 22: Canberra AccuSpec/B ISA-Steckkarte mit definierten Jumpern.

### 2.3.3 Versuchsverlauf: USB2ISA

Mithilfe der in diesem Kapitel beschriebenen Hardware wurde der erste Upgrade-Versuch des Gamma-Spektroskopiesystems durchgeführt. Nachdem der ARSTech Enumerator, wie in 2.2.1 beschrieben, installiert und die AccuSpec/B-ISA-Steckkarte in dem ARSTech USB2ISA-Adapter montiert wurde, konnte man mit dem Upgrade-Versuch beginnen.

Zuerst wurde überprüft, ob die entsprechenden per MID Editor definierten Einstellungen mit jenen der AccuSpec/B-ISA-Steckkarte übereinstimmen. D.h die im MID Editor definierte I/O Adresse muss der per Switches definierten I/O Adresse der AccuSpec/B-ISA-Steckkarte entsprechen. Für die I/O Adresse gibt es, wie schon erwähnt, vier Möglichkeiten. Alle vier wurden ausprobiert (siehe Tabelle 1). Die ersten Ressourcen die gewählt wurden waren folgende: I/O Adresse 310 und Speicheradresse D0000. Die Ressourcen *IRQ (Hardware Interrupt)* und *DMA (Direct Memory Access)* werden laut Manual [22] der AccuSpec/B nicht benötigt. Nachdem die AccuSpec/B-ISA-Steckkarte in den USB2ISA-Adapter montiert wurde, startete man den ARSTech Enumerator (siehe 2.2.1).

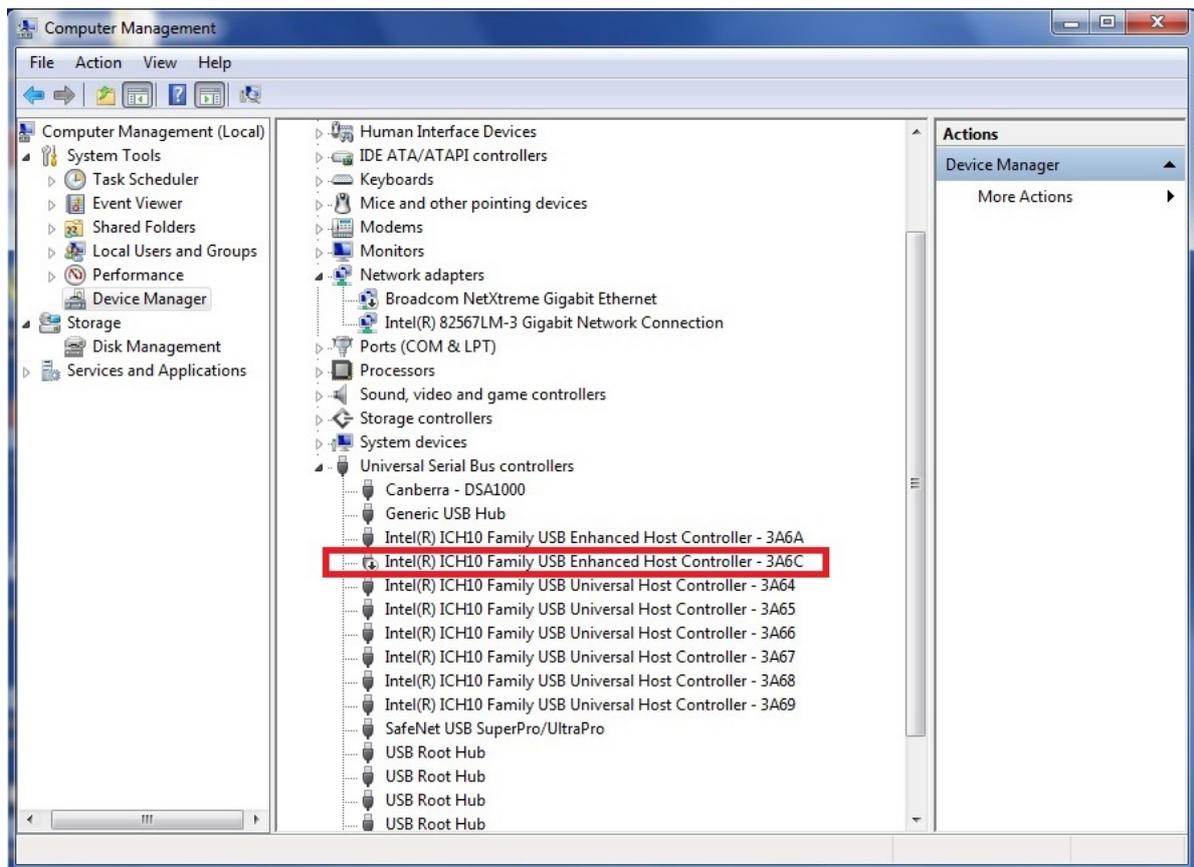


Abbildung 23: zeigt den Device Manager und den deaktivierten USB Host Controller.

Da die AccuSpec/B-ISA-Steckkarte zum ersten mal in den ARSTech USB2ISA-Adapter montiert wurde, musste der entsprechende Software-Typ der ISA-Steckkarte gewählt werden. Fünf mögliche Software-Typen standen zur Auswahl [18]:

- 16bit type driver and / or application
- 32bit application with direct I/O port access
- 32bit driver - no .inf file
- 32bit driver - with .inf file
- ARSTech application, or unknown

Da der genaue Software-Typ nicht bekannt war, wurde zunächst "ARSTech application, or unknown" ausgewählt. Laut User's Guide des USB2ISA-Adapters wird die ISA-Steckkarte dann über Universal Software Layer (USL) gesteuert bzw. alle Ressourcen (I/O Adresse, Speicheradresse, etc.) werden über USB weitergeleitet.

Nachdem der Software-Typ ausgewählt wurde, zeigte das Hauptfenster des ARSTech Enumerators die automatisch erkannten Ressourcen an. Zunächst konnte der per MID Editor definierte Speicherbereich (Physical Memory) nicht erkannt werden. Die Speicheradresse wurde dann manuell definiert.

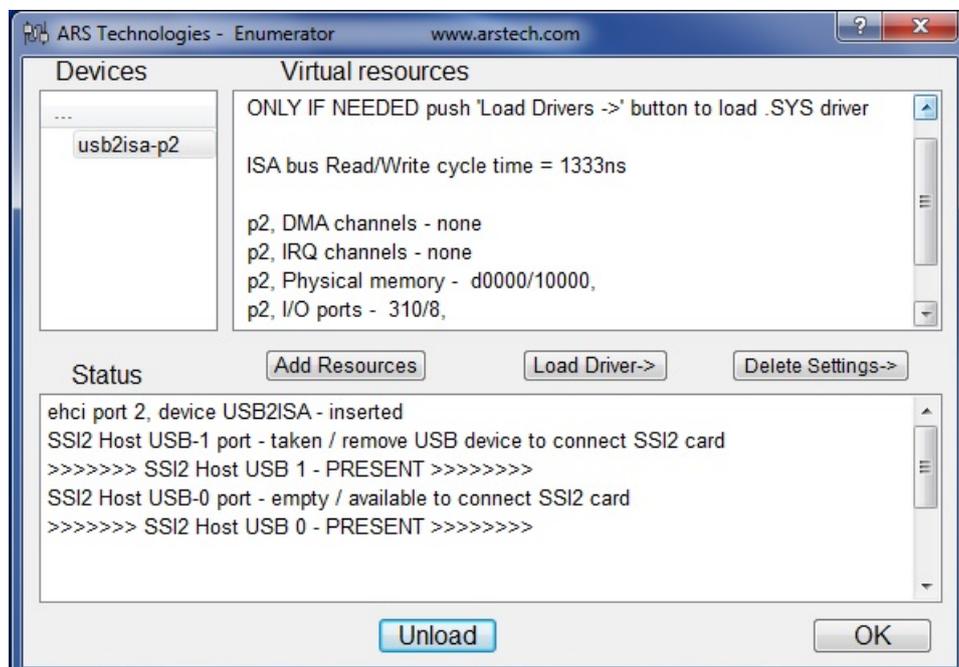


Abbildung 24: Hauptfenster des ARSTech Enumerators mit den definierten Ressourcen.

Durch das Drücken auf "Add Resources" erscheint das Dialogfenster für das manuelle Definieren von Ressourcen. Im Status-Bereich dieses Fensters konnte man zwischen I/O Adresse und Speicheradresse wählen. Zusätzlich konnten auch IRQ, DMA und read-write cycle time definiert

werden. Es sei erwähnt, dass die notwendigen Ressourcen nicht alle gleichzeitig definiert werden können. Nachdem ein Ressource definiert wurde, musste für das Definieren einer weiteren Ressource der Vorgang wiederholt werden.

Die Speicheradresse, die im Rahmen dieses Upgrade-Versuches gewählt wurde war D0000. Im Dialogfenster für das manuelle Definieren von Ressourcen wurde im Status-Bereich (Resource type) *Memory* ausgewählt und folgende Adressen angegeben: D0000 (*FirstAdd-Hex*) und DFFFF (*LastAdd-Hex*). Das Lesen und Schreiben der Daten von und auf den internen Speicher der AccuSpec/B-ISA-Steckkarte erfolgt über ein Fenster im Speicherbereich des Computers. Je nach Anzahl der gewünschten Kanäle, muss ein entsprechender Speicherbereich definiert werden. Außerdem muss darauf Acht genommen werden, dass es zu keinem Hardwarekonflikt kommt. Genauere Informationen zur Auswahl des Speicherbereichs können aus der Literatur [22], Seite 46, entnommen werden.

Die letzte Ressource, die definiert werden musste war der Lese-Schreib-Zyklus (read/write cycle). Nachdem die I/O-Adresse und der Speicherbereich definiert wurden, musste der Lese-Schreib-Zyklus von 250 ns auf mindestens 1333 ns erweitert werden (siehe Abbildung 24), da die Software Genie-2000 die montierte AccuSpec/B-ISA-Karte sonst nicht detektieren kann und eine Fehlermeldung anzeigt ("*Error: Required Hardware Unavailable*").

Bevor die Software Genie-2000 für die Messung von Spektren verwendet werden konnte, musste der per MID Editor definierte Detektor im *MCA Definition Table* geladen und geöffnet werden. Nachdem der Detektor geladen und geöffnet wurde, waren alle Vorbereitungen für das Messen von Spektren erledigt. Das Hauptfenster von Genie-2000 war zunächst mit gelben Punkten versehen, was den definierten Speicherbereich darstellt. Um die Messungen starten zu können, mussten zuerst die gelben Punkte des Hauptfensters der Software Genie-2000 durch die Clear-Taste gelöscht werden. Es entstand jedoch ein Problem (siehe Abbildung 25).

Durch das Drücken der Clear-Taste konnte der Preset zwar gelöscht werden, die gelben Punkte und die Anzahl der Counts jedoch nicht. Versucht man auf die Start-Taste zu drücken, so erscheint folgende Fehlermeldung: "*Error: 110016*". Um die entstandenen Probleme zu lösen, wurde der oben beschriebene Vorgang mit anderen Einstellungen wiederholt.

Zunächst wurde, bei selben Ressourcen, der Software-Typ von "*ARSTech application, or unknown*" auf "*32bit application with direct I/O port access*" geändert. Dies brachte aber nichts, da dieselbe Fehlermeldung angezeigt wurde. Danach wurden alle möglichen Software-Typen ausprobiert, der Erfolg blieb jedoch aus. Nachdem das Ändern des Software-Typs nichts gebracht hat, wurden die Einstellungen der Ressourcen geändert. Alle möglichen I/O- und Speicheradressen wurden in Kombination mit allen Software-Typen verwendet, der Fehler konnte aber trotz aller Bemühungen nicht behoben werden.

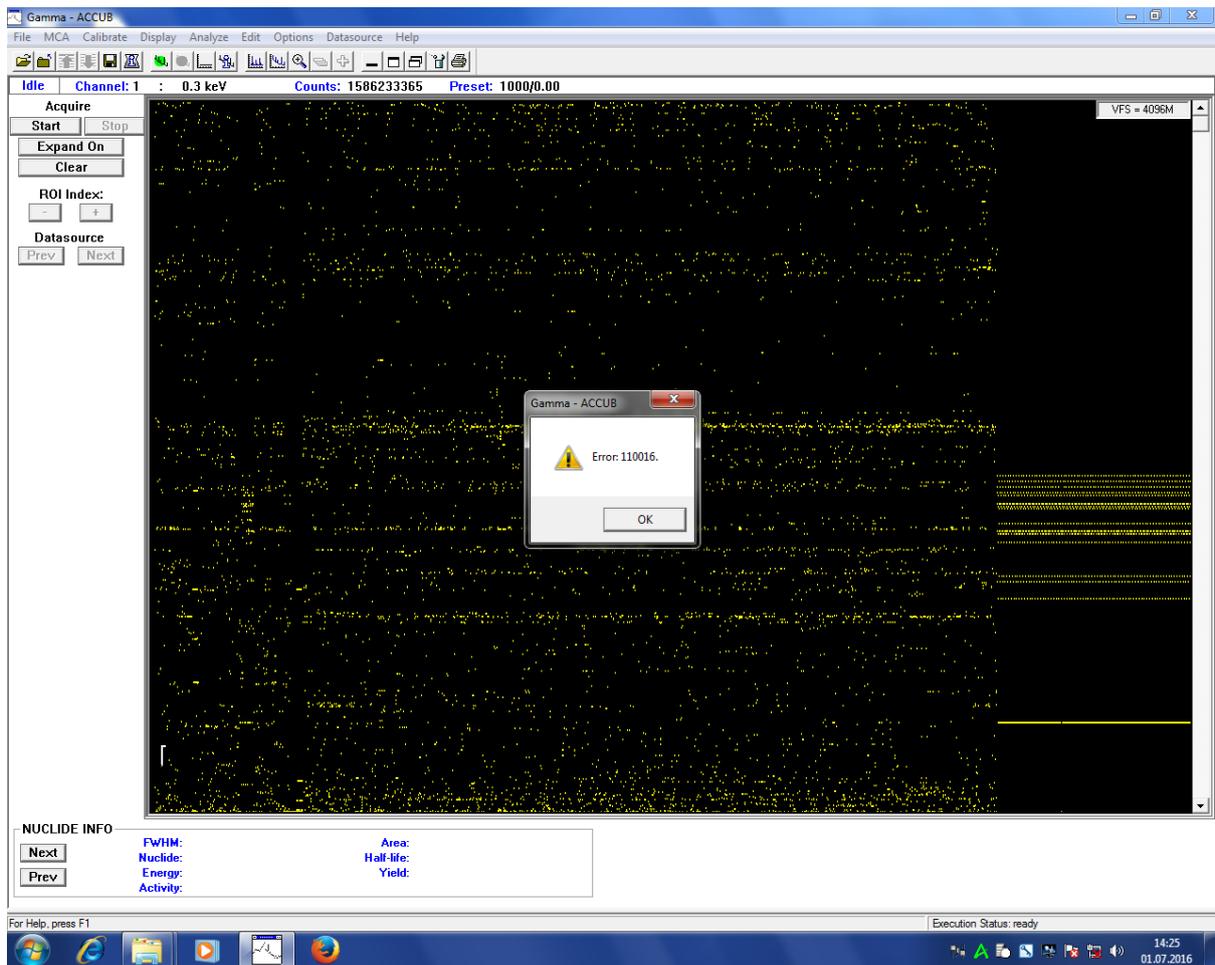


Abbildung 25: zeigt die im Versuchsverlauf beschriebene Fehlermeldung und das Hauptfenster der Software Genie-2000 nach dem Öffnen des Detektors.

## 2.4 Resümee des Upgrade-Versuches - USB2ISA-Adapter

Durch das Durchführen des Upgrade-Versuches wurden wichtige Kenntnisse über den USB2ISA-Adapter und die AccuSpec/B-ISA-Steckkarte gesammelt. Obwohl die Installation laut ARSTech Users Guide richtig durchgeführt wurde und alle Einstellungen der AccuSpec/B-ISA-Steckkarte richtig definiert wurden, kam es zu einer unerwarteten Fehlermeldung. Wie schon im Versuchsverlauf erwähnt, wurden alle möglichen Einstellungen ausprobiert, jedoch lieferten alle denselben Fehler. Die beschriebenen gelben Punkte (siehe Abbildung 25) konnten nicht mit der Clear-Taste der Software Genie-2000 gelöscht werden und die Start-Taste funktionierte auch nicht. **Die Kommunikation des USB2ISA-Adapters und der AccuSpec/B-ISA-Steckkarte mit der Software Genie-2000 funktionierte offensichtlich nur in eine Richtung, sprich die Software Genie-2000 erkannte zwar die ISA-Steckkarte, Daten konnten aber nicht auf diese geschrieben werden.**

Durch genaues Recherchieren wurde versucht, das Problem zu lösen. Da im *Operations* und *Customization Tools Manual* der Software Genie-2000 [20, 21] keine Informationen über die im Versuchsverlauf beschriebene Fehlerart gefunden werden konnte, wurde eine E-Mail an die Firmen *Canberra Packard Central Europe GmbH* und *Ars Technologies Inc* geschickt und um Stellungnahme gebeten.

Vonseiten der Firma *Canberra Packard Central Europe GmbH* wurde mitgeteilt, dass die MCA's der AccuSpec Serie bzw. deren Treiber nicht mehr für Kompatibilität mit Windows 7 aktualisiert wurden und dass die Funktionalität dieser MCA's nicht garantiert werden konnte. Der Upgrade-Versuch wurde dann auf einen PC mit Windows XP durchgeführt, die Fehlermeldung war aber wieder dieselbe. *Canberra Packard Central Europe GmbH* äußerte sich skeptisch gegenüber des Upgrade-Versuchs, da die AccuSpec/B-ISA-Steckkarte, deren Meinung nach, durch eine ISA Emulation (bzw. dessen Treibersoftware) wahrscheinlich nicht ansprechbar war. Betreffend der Fehlermeldung "Error: 110016" konnte leider auch keine Auskunft gegeben werden.

Die Funktionsweise des Universal Software Layers (USL) wurde vonseiten der Firma *Ars Technologies Inc* noch einmal erklärt. Es wurde darauf hingewiesen, dass der genaue Software-Typ oder der Quellcode (eng. source code) der entsprechenden Software bekannt sein muss. Da dies nicht der Fall war und da vonseiten *Canberras* keine weiteren Auskünfte über den Software-Typ gegeben werden konnten, wurde der Upgrade-Versuch des Gamma-Spektroskopiesystems durch einen USB2ISA-Adapter beendet und eine andere Upgrade-Möglichkeit untersucht.

### III. Upgrade-Versuch durch DSA-1000 (Digital Spectrum Analyzer)

In diesem Kapitel wird ein weiterer Upgrade-Versuch des Gamma-Spektroskopiesystems für hohe Zählraten beschrieben. Der Upgrade-Versuch wird mithilfe des DSA-1000 (Digital Spectrum Analyzer) Gerätes der Firma Canberra durchgeführt, wobei die Anwendbarkeit des DSA-1000 überprüft wird. Wie schon in der Motivation erwähnt, bietet das DSA-10000 Gerät eine kostengünstige Upgrade-Möglichkeit, das es schon am Atominstitut vorhanden war. In diesem Upgrade-Versuch wird, im Gegensatz zum vorherigen Versuch, die komplette Elektronik getauscht und somit ein digitales Messsystem gebildet. Es werden mehrere Messungen mittels der Zwei-Quellen-Methode realisiert und mit einem alten System verglichen. Überprüft wird der Unterschied in der Auflösung und der Korrektur bei hohen Zählraten.

### 3.1 Digital Spectrum Analyzer DSA-1000

Das DSA-1000 Gerät ist ein Vielkanalanalysator mit 16k Kanälen und einer digitalen Signalverarbeitung (digital signal processing (DSP)), das mit allen möglichen Detektor-Typen (HPGe, NaI, Si(Li), CdT, etc.) kompatibel ist [23]. Es wird in Kombination mit einem PC und der Genie-2000 Spektroskopie Software betrieben, sodass ein Gamma-Spektroskopiesystem gebildet wird.

Das *Digital Signal Processor Subsystem* ist der wichtigste Bestandteil des DSA-1000. Das Besondere am DSA-1000 ist, dass das Signal des Vorverstärkers gleich am Anfang des Prozesses digitalisiert wird und nicht am Ende des Prozesses, wie es bei anderen, älteren Systemen üblich ist. Diese Tatsache ermöglicht stabilere und genauere Messungen [23].

DSP ermöglicht grundsätzlich eine verbesserte Signalerfassung bzw. es ermöglicht Filterfunktionen und Puls-Formen, die mit analoger Signalverarbeitung nicht möglich wären. Dies führt zu einem effizienteren Trapez-Filter-Funktion, die eine kürzere Verarbeitungszeit und besserer Auflösung vorzuweisen hat [23]. Durch die Trapez-Funktion können die Pulse schneller und sorgfältiger verarbeitet werden, sodass die Auflösung, bei höheren Datendurchsatz, verbessert wird. Außerdem kann das DSA-1000 Gerät im *Pulse Height Analysis (PHA) Mode*, sowie im *Multichannel Scaling (MCS) Mode* betrieben werden.

DSA-1000 verfügt über zwei Arten von Schnittstellen für Host-Kommunikation, USB und RS-232. Universal Serial Bus (USB) Interface ermöglicht eine schnelle Host-Kommunikation (12 Mbits/second) und wurde in Rahmen dieser Diplomarbeit verwendet. Wie schon erwähnt, ist die zweite Schnittstellenart ein Standard RS-232-Anschluss. Aufgrund der Einschränkungen der Kommunikationsrate der seriellen Ports wurde die DSA-1000 für hoch komprimierte / optimierte Kommunikation entwickelt. In Laufe dieses Kapitels werden dann die einzelnen Einstellungen und Parameter des DSA-1000 Gerätes detaillierter beschrieben und erklärt.

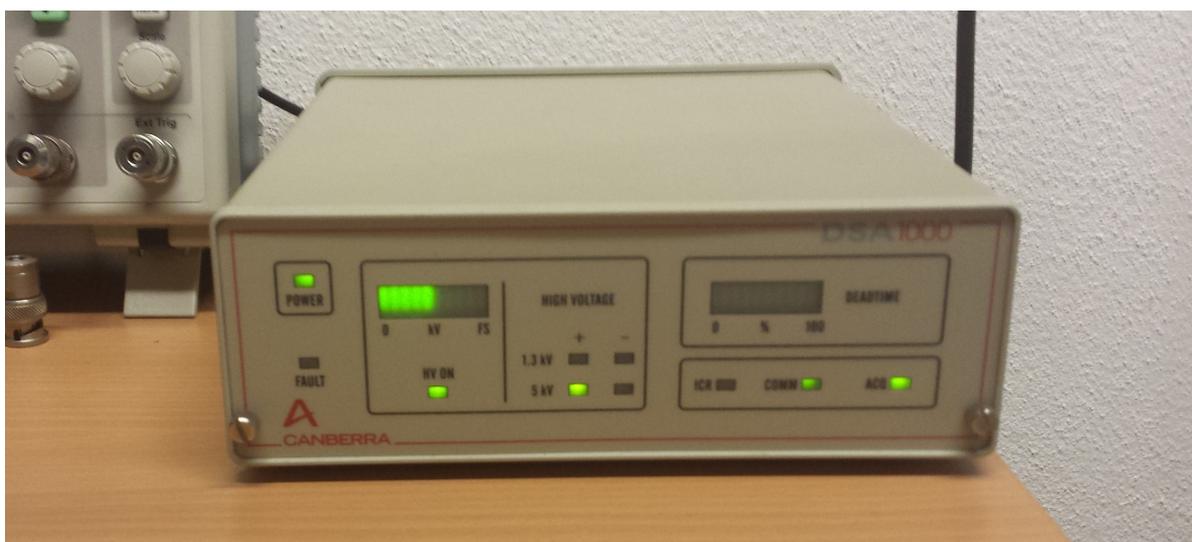


Abbildung 26: Digital Spectrum Analyzer DSA-1000.

### 3.1.1 Front Panel und Rear Panel des DSA-1000

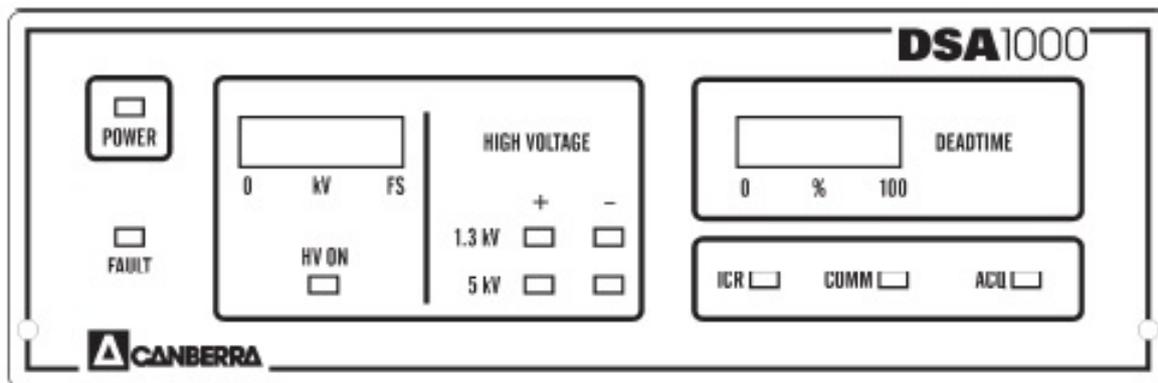


Abbildung 27: Front Panel des DSA-1000 Gerätes [23].

Wie man aus Abbildung 2 sehen kann, besteht das vordere Anzeigefeld des DSA-1000 aus mehreren LEDs. Es folgt eine kurze Beschreibung der einzelnen LEDs [23]:

- **FAULT** - gelbes blinken dieser LED bedeutet, dass entweder ein Hochspannungsfehler oder ein Power-On-Fehler vorhanden ist.
- **HV ON** - die grüne LED zeigt den Hochspannungsstatus. Ein konstantes Leuchten der LED weist auf eine korrekte Hochspannungsversorgung hin. Das Blinken der LED bedeutet, dass ein Fehler aufgetreten ist. Bei dem Fehler kann es sich um einen Hochspannungsüberlastung oder eine Sperre durch Warmup des Detektors handeln.
- **HV LEVEL** - zeigt die HV Einstellung. Eine Skala-Anzeige mit zehn Segmenten.
- **HIGH VOLTAGE Range and Polarity** - Vier grüne LEDs, welche den gewählten Hochspannungsbereich und die Polarität anzeigen.
- **DEAD TIME** - zeigt die Totzeit. Eine Skala-Anzeige mit zehn Segmenten.
- **ICR** - die grüne LED zeigt die Zählrate an. Die Anzahl der "Blinks" ist proportional zur Zählrate.
- **COMM** - das grüne Leuchten der LED zeigt den USB bzw. RS-232 Betrieb an.
- **ACQ** - die grüne LED zeigt die Datenerfassung an.

Auf der Rückseite des DSA-1000 Gerätes befinden sich unterschiedliche Anschlüsse (siehe Abbildung 3) durch die das DSA-1000 Gerät mit einem Detektor und einem Host-Computer verbunden wird. Es folgt eine kurze Beschreibung der Anschlüsse [23]:

- RESET - Anschluss für das *Reset Inhibit Input* Signal. Dieser Anschluss wird verwendet falls ein Vorverstärker (Preamp) des Typs *Reset* mit dem DSA-1000 verbunden wird. In Rahmen dieser Diplomarbeit wurde dieser Anschluss benutzt, da der Vorverstärker ein TRP Preamp Typ (Transistor Reset Preamp type) ist.
- MCS - MCS Anschluss für das externe TTL-Signal.
- AMP IN - Anschluss für das Kabel des Detektor-Signals.
- HV INH - Anschluss für Preamp High Voltage Inhibit Input.
- HV - Anschluss für das Hochspannungskabel.
- USB - USB Interface für das Verbinden mit einem Host-Computer. es handelt sich um einen USB Port des Typs B.
- RS232 - RS-232 Interface für das Verbinden mit einem Host-Computer. Es handelt sich um eine zweireihige 9-polige Buchse des Typs *female D*.
- DC PWR - DC Power Input. 2.5/5.5 mm Anschluss (7.5 V dc bei 0.75 amps).
- PREAMP - Anschluss für den Vorverstärker. Es handelt sich um eine zweireihige 9-polige Buchse des Typs *female D*.

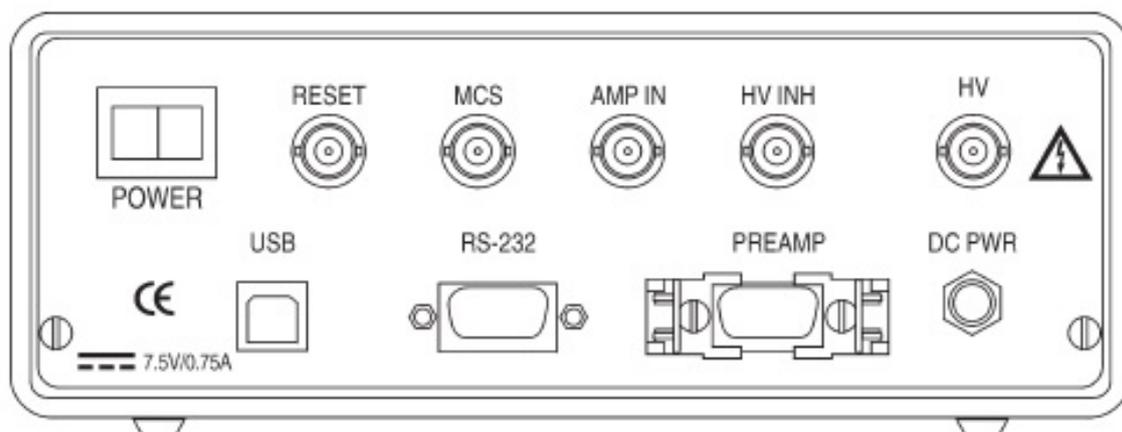


Abbildung 28: Rückseite des DSA-1000 Gerätes [23].

## 3.2. Durchführung des Upgrade-Versuches: DSA-1000

### 3.2.1 Definieren des Detektors: DSA-1000

Das DSA-1000 Gerät verfügt über zwei Interface-Systeme (USB und RS-232) die eine Verbindung mit einem Host-Computer ermöglichen. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde die USB-Verbindung verwendet, da USB grundsätzlich einen schnelleren Datentransfer, im Gegensatz zu RS-232, ermöglicht.

Nachdem der Detektor von der alten Elektronik entkoppelt und mit dem DSA-1000 Gerät verbunden wurde, konnten weitere Vorbereitungen für den Upgrade-Versuch getroffen werden. Der erste Schritt war, wie schon beim ersten Upgrade-Versuch, das Definieren des Detektors. Da das USB Interface-System verwendet wurde, musste zuerst ein entsprechender USB Treiber installiert werden. Nachdem der Host-Computer mit dem DSA-1000 Gerät verbunden und das Gerät eingeschaltet wurde, hat das Betriebssystem Windows nach der Treiber-Disk gefragt. Durch das Befolgen der Schritte des "Add New Hardware" Wizard bzw. durch das Drücken auf "Search for the best driver for your device" wurde nach dem entsprechenden Treiber gesucht. "Specify a location" ermöglicht das wählen des CDROM Drives und des CIUSB Verzeichnisses. Schlussendlich wurde dann der erforderliche Treiber installiert.

Nachdem der USB Treiber installiert wurde, konnte der Detektor per *MID (MCA Input Definition) Wizard* bzw. *MID (MCA Input Definition) Editor* definiert werden. Auch in diesem Upgrade-Versuch wurde die Software Genie-2000 verwendet. Durch das Starten des MID Editors erschien zuerst ein Fenster mit mehreren Auswahlmöglichkeiten. Da das USB Interface-System verwendet wurde, wählte man unter "USB MCAs" folgende MCA aus: "DSA1000 via D1K-USB". (siehe Abbildung 29).

Danach definierte man folgende Einstellungen: MCA Full Memory (8K), Device Serial Number (00000296) und Acquisition Mode (PHA). Es sei erwähnt, dass die Seriennummer auf der Unterseite des DSA-1000 Gerätes zu finden ist und dass der Memory Bereich in Abhängigkeit vom Acquisition Mode gewählt wird (*PHA Mode* funktioniert mit 8K und 16K, *MCS Mode* nur mit 8K).

Der nächste Schritt war das Definieren des Detektor-Typs und der Anzahl der Kanäle. Als Detektor-Typ wurde "Gamma or X Ray - Ge" ausgewählt, die Anzahl der Kanäle wurde auf 8192 gesetzt. Ein Input Name musste auch definiert werden. In unserem Fall wurde der Name "D.Fritz" gewählt. Am Ende des Vorganges kam noch das "Configure High Voltage Power Supply" Fenster zum Vorschein (siehe Abbildung 29). In diesem Fenster mussten "Range", "Voltage Limit" und "Voltage" entsprechend definiert werden. Man konnte zwischen vier möglichen Hochspannungsbereichen (eng. voltages ranges) wählen: + 5000 V dc, + 1300 V dc, - 5000 V dc und - 1300 V dc. Für den Detektor, der während dieser Diplomarbeit verwendet wurde, wurden folgende Einstellungen definiert: *Range* + 5000 V, *Voltage Limit* + 2500.6 V und *Voltage* + 2500.6 V. Falls die *MID Definition* und die *High Voltage Power Supply Configuration* nicht übereinstimmen, so wird die Software Genie-2000 beim Öffnen des Detektors einen "Hardware Verification Error" anzeigen. Bei "voltage range" und "polarity" muss aufgepasst werden, da falsch definierte Hochspannungsbereiche und Polaritäten den Detektor beschädigen können.

Um das Definieren des Detektors zu beenden, musste nur noch ein "Input Name" ausgewählt werden und auf "Finish" gedrückt werden. Das Input das definiert wurde wird dann schlussendlich als ".MID File" gespeichert und in die "MCA Runtime Configuration Database geladen".

### III. Upgrade-Versuch durch DSA-1000 (Digital Spectrum Analyzer)

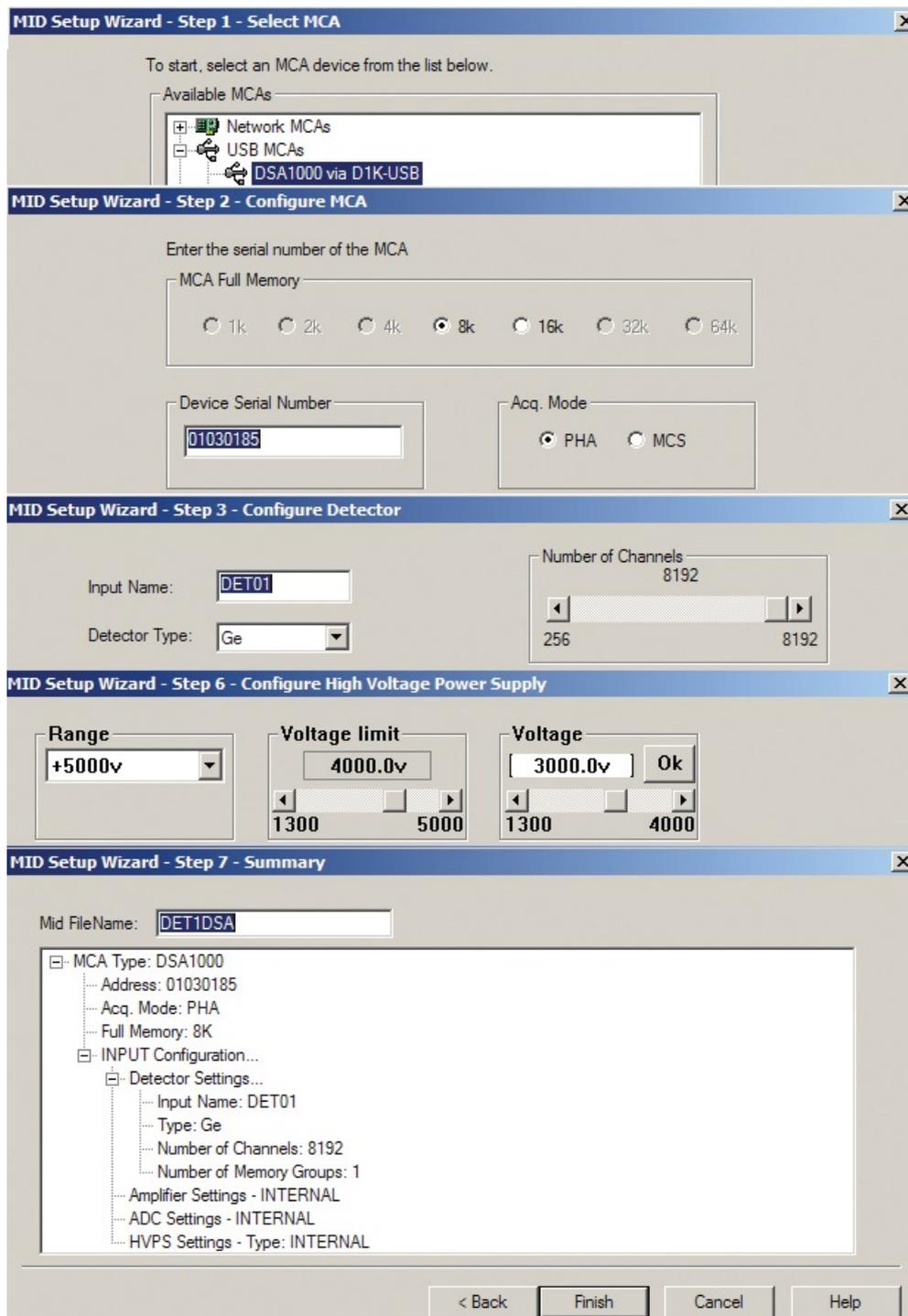


Abbildung 29: Beispiel für das Definieren des Detektors. Die Abbildung zeigt alle Schritte, die für das Definieren des Detektors notwendig sind [14].

### 3.2.2 Digital Filter Shaping Parameter: Rise Time und Flat Top

*Rise Time* und *Flat Top* sind zwei Parameter aus denen sich die *Shaping Time* zusammensetzt. Sie sind ein Teil der *DSP Filter Settings*, wie man aus Abbildung 5 sehen kann. Durch ein passendes Shaping bzw. durch eine passende Kombination von *Rise Time* and *Flat Top*, können Trapez-Signale gebildet werden und das Verhalten von Detektoren, Zählraten und Energien optimiert werden. Es kann ein Kompromiss zwischen Auflösung und Durchsatz erreicht werden [23].

Der *Rise Time* Parameter ist für das Definieren der "*Rise Time*" und "*Fall Time*" der Digitalen-Filter-Funktion (Trapez-Funktion) zuständig. Beide Zeiten, "*Rise Time*" und "*Fall Time*", sind symmetrisch bzw. von gleicher Dauer. Es stehen 40 "*Rise/Fall Times*" zur Auswahl (von 0.4 bis 38  $\mu\text{s}$ ). Neben den *DSP Filter Settings*, können "*Rise/Fall Times*" auch später in der *Acquisition and Analysis Application* der Software Genie-2000 definiert werden [23].

Der *Flat Top* Parameter stellt den flachen oberen Abschnitt der Digitalen-Filter-Funktion (Trapezfunktion) dar. Zur Auswahl stehen 21 mögliche Werte von Flat Top (von 0 bis 3  $\mu\text{s}$ ), die in Kombination mit *Rise Time* das *Shaping* bilden. Es sei erwähnt, dass *Flat Top* proportional zur *Charge Collecting Time* des Detektors ist. D.h, durch das Variieren des Flat Top können passende Shaping Funktionen für jede Art von Detektor gefunden werden. Passend zur Größe des Detektors bzw. zur *Charge Collecting Time* des Detektors können Shaping Funktionen gefunden werden, durch welche die Bearbeitungszeit (processing time) nicht wesentlich verlängert wird [23].

Die Einstellungen *Rise Time* = 5,6  $\mu\text{s}$  und Flat Top = 0,8  $\mu\text{s}$  bieten beispielsweise für kleine Ge-Detektoren eine optimale Auflösung für einen Breiten Zählraten-Bereich. Ein kürzeres Shaping (z.B Rise Time = 2,8  $\mu\text{s}$  und Flat Top = 0,6  $\mu\text{s}$ ) kann hingegen eine schlechtere Auflösung und Peakverschiebungen über einen Breiten Zählraten-Bereich verursachen, die Auflösung bei niedrigen Zählraten wird jedoch kaum beeinflusst [23].

Für einen hohen Datendurchsatz bzw. für hohe Zählraten, sollten Rise Time und Flat Top unter 1  $\mu\text{s}$  liegen, da die Shaping-Zeit einen erheblichen Einfluss auf den Datendurchsatz hat und so definiertem Shaping ein optimaler Kompromiss zwischen Auflösung und Zählrate gefunden werden kann [25]. Durch kurze Shaping-Zeiten wird der Durchsatz erhöht. Einerseits durch die offensichtlich kürzere Zeit, andererseits aber auch durch die deutliche Verringerung von Pile-Up Ereignissen (Pulsaufstockung) [30].

Schlussendlich sei erwähnt, dass die Erhöhung der Zählrate, eine Verschlechterung von Auflösung und Durchsatz zur Folge haben kann, da durch höhere Zählraten längere Bearbeitungszeiten auftreten [31]. Zusätzlich steigt die Wahrscheinlichkeit für Pulsaufstockung. Das optimale Shaping hängt von den Detektor Eigenschaften (wie Größe, Geräuschverhalten und Erhebungsmerkmale), Vorverstärker und eingehende Zählrate ab [23, 24, 25].

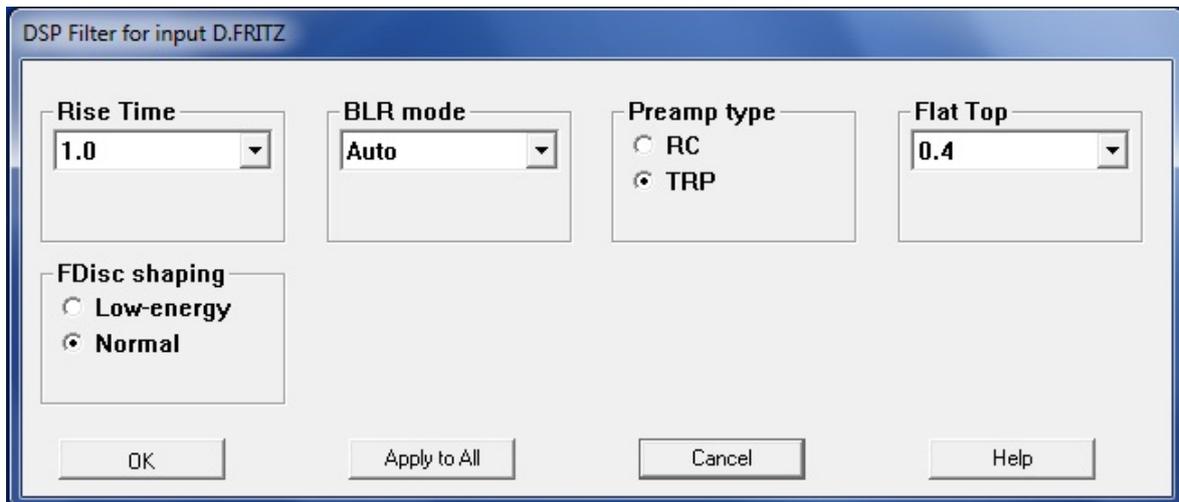


Abbildung 30: DSP Filter Settings. Neben Rise Time und Flat Top, können noch *Preamp type*, *BLR mode* und *FDisc shaping* definiert werden. Zu sehen ist welche Einstellungen in Rahmen dieser Arbeit definiert wurden.

### 3.2.3 Versuchsverlauf: DSA-1000

Der erste Schritt des Upgrade-Versuches bestand darin, den HPGe-Detektor von der alten Elektronik zu trennen und mit dem DSA-1000 Gerät zu verbinden. Nachdem dies getan wurde, konnte das DSA-1000 Gerät eingeschaltet werden. Durch das Einschalten des DSA-1000 wurde ein Self-Test Prozess gestartet. Während dieses Prozesses wurden alle definierten Einstellungen überprüft. Für eine kurze Zeit leuchteten auf der Vorderseite des DSA-1000 alle LEDs außer *ICR*, *COM* und *ACQ*. Nach durchgeführter Überprüfung leuchten nur die *POWER* LED und die entsprechende *High Voltage Polarity/Range* LED, falls alle Einstellungen korrekt definiert sind. Ein Fehler wird durch das Blinken der *FAULT* LED dargestellt. Da in unserem Fall alles korrekt definiert wurde, konnte mit dem Upgrade-Versuch fortgefahren werden.

Um Spektren messen zu können, musste zuerst der Detektor definiert werden. Die genaue Vorgangsweise wurde in 3.2. detailliert beschrieben. Nachdem der Detektor definiert wurde, konnte dieser aus dem *MCA Definition Table* geladen und geöffnet werden. Somit waren alle Vorbereitungen für das Messen von Spektren erledigt.

Der nächste Schritt war das grobe Kalibrieren des Detektors. Zwei kleinen Quellen,  $^{60}\text{Co}$  und  $^{137}\text{Cs}$ , wurden auf den Detektorkopf gestellt. Anschließend wurde die Software Genie-2000 gestartet und eine Messung durchgeführt. Mithilfe dieser zwei Quellen wurde die Messung bzw. dieses Spektrums kalibriert und für weitere Messungen vorbereitet.

Im Laufe dieses Upgrade-Versuches wurde die Anwendbarkeit des DSA-1000 Gerätes überprüft. Das Ziel dieses Upgrade-Versuches war zu überprüfen, ob mit dem DSA-1000 eine bessere oder gleiche Auflösung wie beim alten System erzielt werden konnte. Außerdem wurde der Unterschied zum alten System hinsichtlich der Korrektur bei hohen Zählraten überprüft. Der Upgrade-Versuch wurde mithilfe der Zwei-Quellen-Methode durchgeführt. Zunächst wurde eine  $^{226}\text{Ra}$ -Quelle auf den Detektorkopf gesetzt. Die  $^{226}\text{Ra}$ -Quelle wurde während der ganzen Messung im Detektor, bzw. zentriert auf dem Detektorkopf belassen. Die zweite Quelle die verwendet wurde war eine  $^{137}\text{Cs}$ -Quelle. Diese diente zur Steigerung der Zählrate, die durch Variation des Abstandes der  $^{137}\text{Cs}$ -Quelle vom Detektorkopf eingestellt wurde.

Um die Auflösung und die Korrektur bei hohen Zählraten zu untersuchen, wurde vor jeder Messung unter "*MCA -> Adjust -> Filter*" ein Wert für *Rise Time* und *Flat Top* gewählt und somit das *Shaping* bestimmt. Nachdem dies getan war, wurde zunächst eine Referenzmessung durchgeführt. Es wurden 9 Spektren mit einem Satz von *Rise Time* und *Flat Top* gemessen, dabei wurde nur die  $^{226}\text{Ra}$ -Quelle verwendet. Nachdem die 9 Messungen vollzogen wurden, folgte das Kalibrieren und die Auswertung der Spektren. Nach der Referenzmessung folgten mehrere Serienmessungen bei unterschiedlichen Zählraten. Zur Steigerung der Zählrate wurde, wie schon erwähnt, der Abstand der  $^{137}\text{Cs}$ -Quelle vom Detektorkopf variiert. Es wurden immer 9 Spektren bei einer Zählrate gemessen und später kalibriert und ausgewertet.

Nachdem alle Spektren gemessen wurden, konnten die ausgewerteten Daten in Excel eingetragen und die, für den Vergleich mit den alten System, notwendigen Größen berechnet werden. Zum Schluss wurden alle Ergebnisse diskutiert und entsprechende Schlussfolgerungen gezogen.



Abbildung 31: "Der dicke Fritz": der Detektor, der im Rahmen dieser Diplomarbeit verwendet wurde. "Der dicke Fritz" ist einer von zwei Detektor des Gamma-Spektroskopiesystems im Radiochemielabor des Atominstitutes.

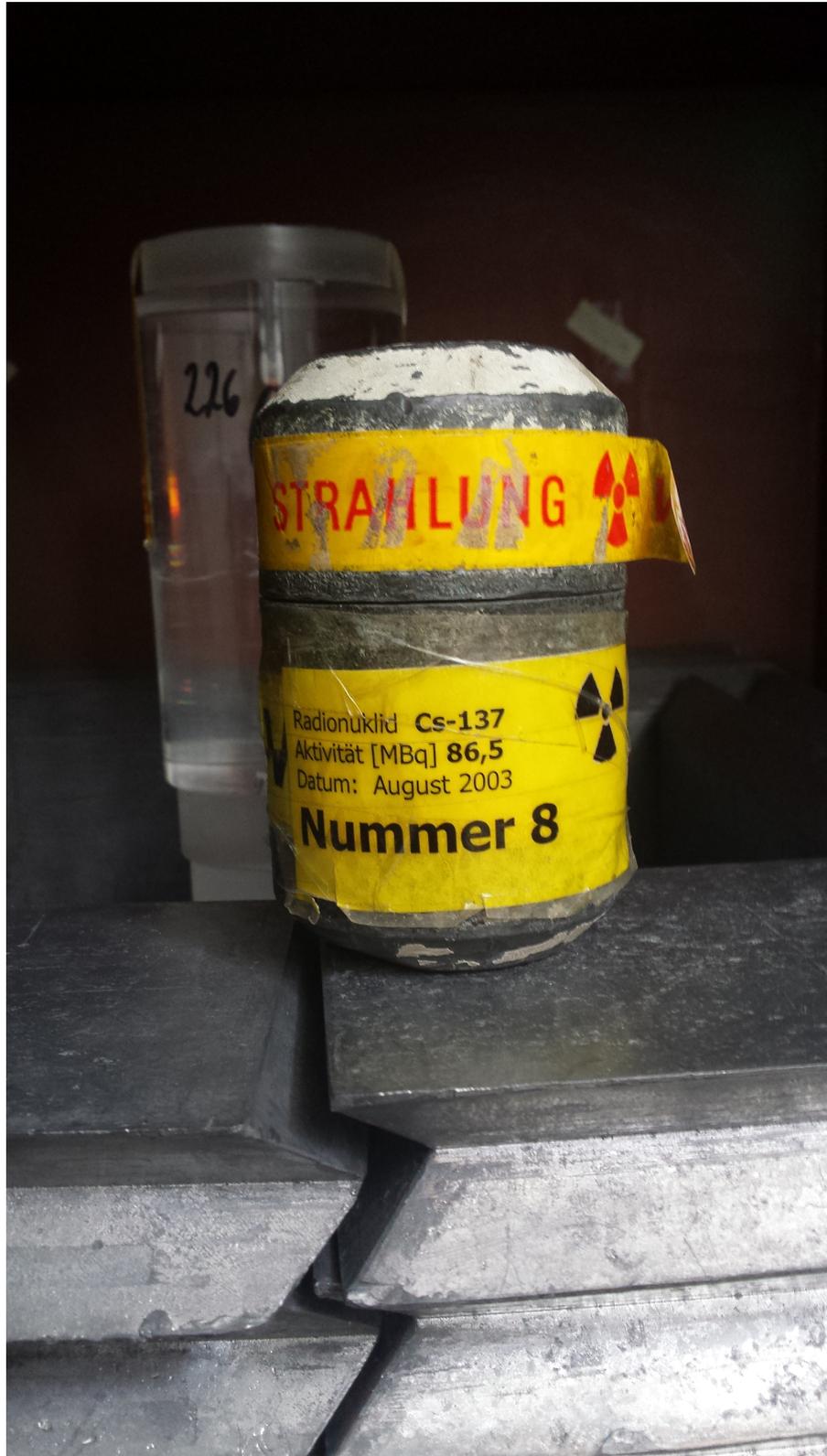


Abbildung 32:  $^{137}\text{Cs}$ - und  $^{226}\text{Ra}$ -Quelle.

### 3.3. Messungen, Ergebnisse und Diskussion - Auflösung und Zählverluste

Der Upgrade-Versuch wurde, wie schon im Versuchsverlauf erwähnt, mithilfe der Zwei-Quellen-Methode durchgeführt. Um die Auflösung und die Zählverluste bei hohen Zählraten zu untersuchen, wurde vor jeder Messung ein Satz von *Rise Time* und *Flat Top* gewählt und somit das *Shaping* bestimmt. Das Definieren des *Shapings* wurde mithilfe der GAA (Gamma Acquisition and Analysis) Application der Software Genie-2000 durchgeführt. In der GAA Application konnten durch Menu Bar unter "MCA -> Adjust -> Filter" die gewünschten Werte für *Rise Time* und *Flat Top* definiert werden (siehe Abbildung 33). Mit ein und denselben Satz von *Rise Time* und *Flat Top* wurden Referenz- und Serienmessungen bei unterschiedlichen Zählraten durchgeführt. Nachdem eine Reihe von Messungen mit unterschiedlichen Werten von *Rise Time* und *Flat Top* gemacht wurden, konnte anhand der Daten, der beste Satz von *Rise Time* und *Flat Top* mit dem besten Kompromiss zwischen Auflösung und Durchsatz gewählt werden. Es wurden dann 9 Spektren mit dem gewählten Satz gemessen, kalibriert und ausgewertet, um ein präziseres Ergebnis zu bekommen. Für die Überprüfung der Auflösung und der CPS (count per second) wurden fünf Linien des Spektrums verwendet (siehe Tabelle 2).

Nuklid	Energie der beobachteten $\gamma$ -Linie [keV]
Pb-214	295
Bi-214	609
Bi-214	1120
Bi-214	1764
Bi-214	2448

Tabelle 2: Fünf Linien, die im Rahmen der Diplomarbeit verwendet wurden.

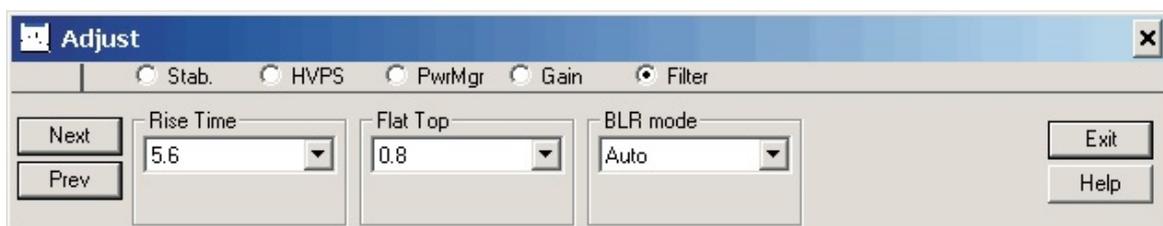


Abbildung 33: Definieren von *Rise Time* und *Flat Top*.

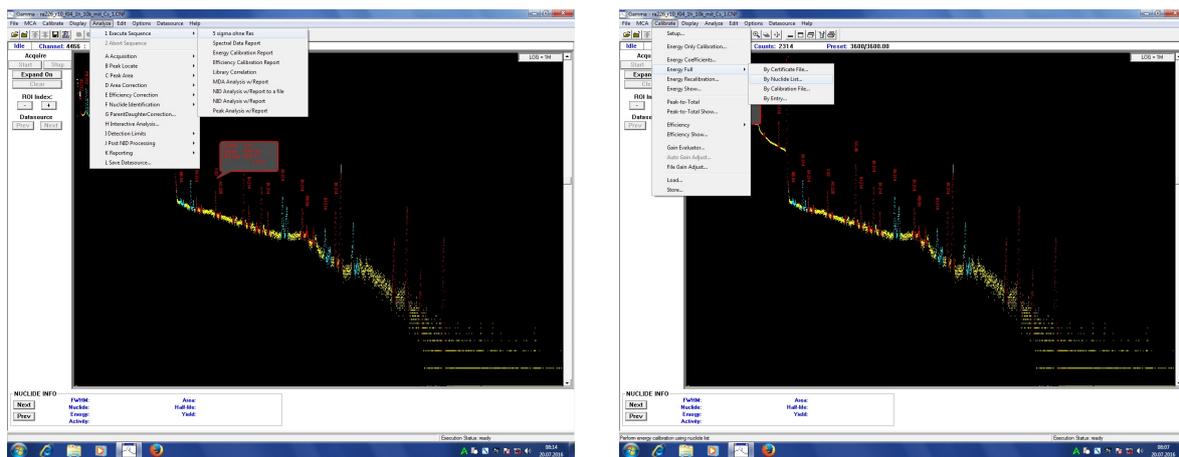
#### 3.3.1 Kalibrieren und Auswerten eines Spektrums

Das Kalibrieren und Auswerten eines Gamma-Spektrums ist im Allgemeinen in 1.3.1 beschrieben. Da während des Upgrade-Versuchs mehrere Spektren mit unterschiedlichen *Rise Time* und *Flat Top* Parametern gemessen wurden, musste das Spektrum nach jeder neuen Messung kalibriert werden. Auf diese Art und Weise wurden verschiedene Störeffekte (z.B. Energieverschiebung, Peaklagenverschiebung) und Datenverfälschungen verhindert. Genauere Details können aus der Literatur [21] entnommen werden.

Um ein Spektrum zu kalibrieren, musste zuerst auf der Menu Bar auf "Analyze -> Execute Sequence -> 5 sigma ohne Res" gedrückt werden (siehe Abbildung 34, (a)). Die einzelnen Peaks des Spektrums wurden dann markiert. Danach musste auf "Calibrate -> Energy Full -> Nuclide

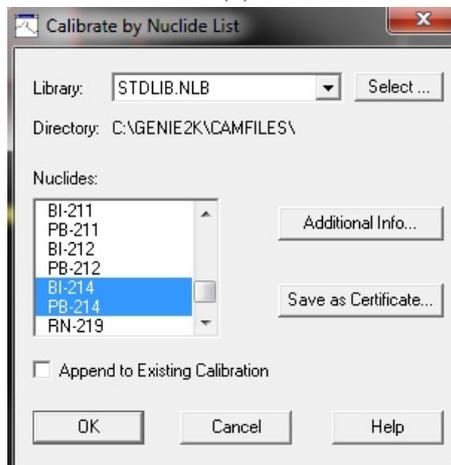
### III. Upgrade-Versuch durch DSA-1000 (Digital Spectrum Analyzer)

List" gedrückt werden (siehe Abbildung 34, (b)). Es erschien ein Fenster mit einer Liste von Nukliden. Dort wurden *Pb-214* und *Bi-214* gewählt (siehe Abbildung 34, (c)). Es öffnete sich ein Fenster mit definierten Energien die für das Kalibrieren benutzt wurden. (siehe Abbildung 34, (d)) Nachdem alle Energien den entsprechenden Peaks per Cursor zugeordnet wurden, konnte durch das Drücken auf "Show" die Kalibrierkurve sichtbar gemacht werden (siehe Abbildung 34, (e)). Drückt man im *Curve*-Bereich des Fensters auf *Shape*, so erscheint die Kurve der entsprechenden Halbwertsbreiten (FWHM) (siehe Abbildung 34, (f)). Mit "OK" wird der Vorgang beendet.

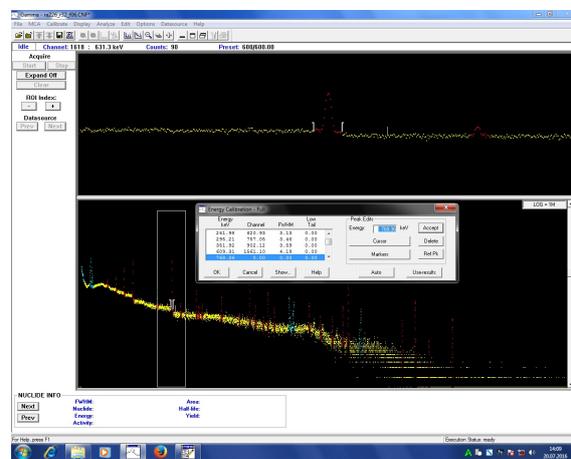


(a)

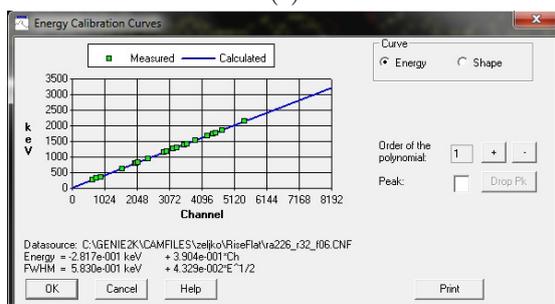
(b)



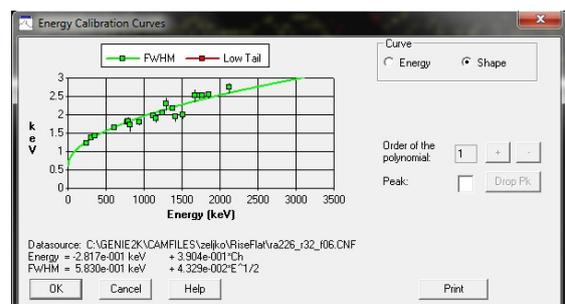
(c)



(d)



(e)



(f)

Abbildung 34: Das Kalibrieren von Spektren: Verlauf

Nachdem das Spektrum kalibriert wurde, konnte es ausgewertet werden. Durch das Variieren der Rise Time und Flat Top Parameter wurde das Signal des Detektors entsprechend verändert und somit auch die Peakflächen. Die Auswertung geschah indem auf "Analyze -> Execute Sequence -> 5 sigma ohne Res" gedrückt wurde. Danach konnten die durch Genie-2000 berechneten Werte durch das Drücken auf "Maximize the Report Window" sichtbar gemacht werden.

### 3.3.2 Ergebnisse und Diskussionen

Es folgt eine kurze Beschreibung der Ergebnisse der einzelnen Messungen mit bestimmten Rise Time und Flat Top Parametern. Die Auflösung und die Zählverluste wurden dabei überprüft.

#### 3.3.2.1 Auflösung und Zählverluste

- Rise Time: 5,6  $\mu$ s; Flat Top: 0,6  $\mu$ s.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	1,432	11,27	1,99	0
5000	1,466	10,36	6,09	-8,074534161
10000	1,572	9,365	10,95	-16,90328305
30000	1,867	5,654	29,33	-49,83141083

Tabelle 3: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 295 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	1,688	28,7	1,99	0
5000	1,735	26,58	6,09	-7,386759582
10000	1,802	24,14	10,95	-15,88850174
30000	2,044	15,01	29,33	-47,70034843

Tabelle 4: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 609 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	2,04	9,222	1,99	0
5000	2,084	8,591	6,09	-6,84233355
10000	2,153	7,825	10,95	-15,1485578
30000	2,423	4,926	29,33	-46,58425504

Tabelle 5: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1120 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	2,514	8,813	1,99	0
5000	2,554	8,199	6,09	-6,966980597
10000	2,59	7,437	10,95	-15,61329854
30000	2,885	4,714	29,33	-46,51083626

Tabelle 6: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1764 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	2,979	0,7878	1,99	0
5000	2,963	0,7211	6,09	-8,466615892
10000	3,09	0,6712	10,95	-14,80071084
30000	3,384	0,4217	29,33	-46,47118558

Tabelle 7: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 2448 keV.

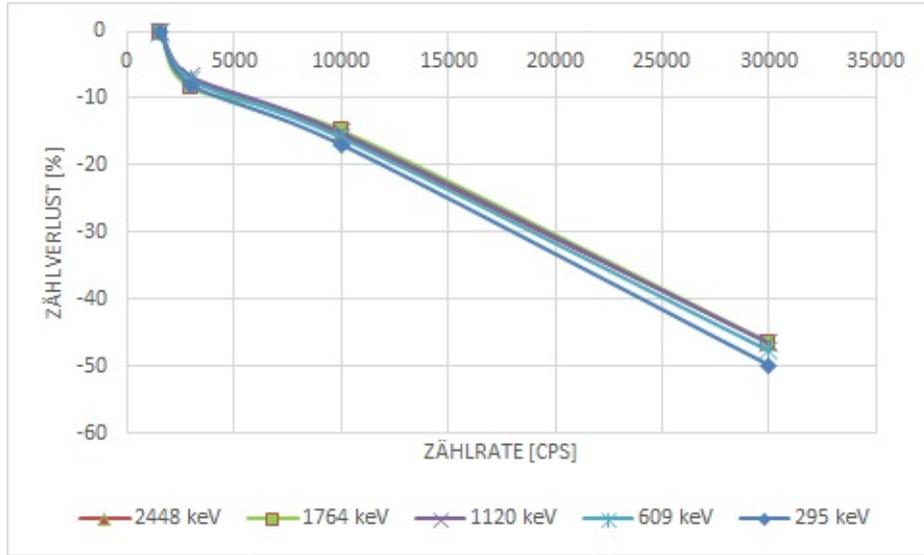


Abbildung 35: Vergleichskurven: Rise Time: 5,6  $\mu$ s und Flat Top: 0,6  $\mu$ s.

Es sei erwähnt, dass während dieser Messungen jeweils nur ein Spektrum bei einer Zählrate gemessen und ausgewertet wurde. Die Referenz wurde 4h gemessen, während die Messungen mit den anderen Zählraten jeweils 1h gemessen wurden. Die prozentuale Abweichung wurde immer in Bezug auf die Referenzmessung (1500 cps) bestimmt, sodass bei 1500 cps immer der Zählverlust 0 (null) steht. Auf diese Art und Weise wurde die Abweichung bei allen Spektren berechnet. Wie man den Tabellen entnehmen kann, wurde mit diesem bestimmten Satz von *Rise Time* und *Flat Top* grundsätzlich eine sehr gute Auflösung erreicht, die Zählverluste bei höheren Zählraten waren aber zu groß. Ein zufriedenstellender Kompromiss zwischen Auflösung und Durchsatz konnte nicht erreicht werden, was diesen Satz von Parametern für hohe Zählraten unbrauchbar macht.

- **Rise Time: 2,0  $\mu$ s; Flat Top: 0,6  $\mu$ s.**

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	2,5160	11,7000	0,87	0
3000	2,7820	11,63	1,78	-0,598290598
20000	2,5010	9,542	9,64	-18,444444444
30000	3,3290	8,945	14,02	-23,54700855

Tabelle 8: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 295 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	2,6080	29,5000	0,87	0
3000	2,7950	29,32	1,78	-0,610169492
20000	2,7250	25,28	9,64	-14,30508475
30000	3,4680	24,14	14,02	-18,16949153

Tabelle 9: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 609 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	2,9160	9,5960	0,87	0
3000	3,0710	9,502	1,78	-0,979574823
20000	2,9490	8,276	9,64	-13,75573155
30000	3,5740	7,709	14,02	-19,66444352

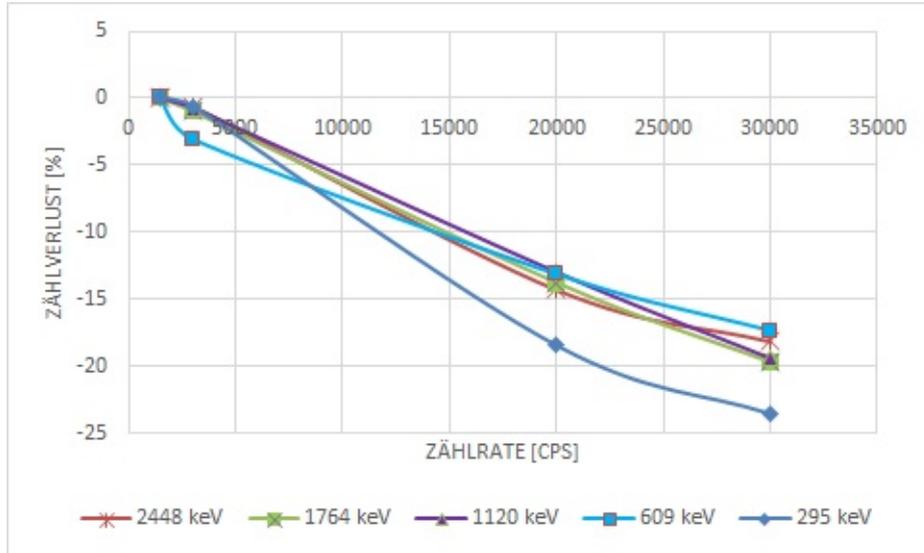
Tabelle 10: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1120 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	3,2980	9,0230	0,87	0
3000	3,4220	8,958	1,78	-0,720381248
20000	3,3620	7,852	9,64	-12,97794525
30000	3,9360	7,272	14,02	-19,40596254

Tabelle 11: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1764 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	3,7740	0,7926	0,87	0
3000	3,8910	0,7684	1,78	-3,053242493
20000	3,8460	0,6886	9,64	-13,1213727
30000	4,4070	0,6552	14,02	-17,33535201

Tabelle 12: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 2448 keV.


 Abbildung 36: Vergleichskurven: Rise Time:  $2,0 \mu\text{s}$  und Flat Top:  $0,6 \mu\text{s}$ .

Wie schon zuvor, wurde jede dieser Messungen bei einer Zählrate nur einmal gemessen und ausgewertet. Die Referenz wurde wieder 4h gemessen, während die Messungen mit den anderen Zählraten jeweils 1h gemessen wurden. Wie man den Tabellen entnehmen kann, wurde mit diesem bestimmten Satz von *Rise Time* und *Flat Top* eine etwas schlechtere Auflösung als zuvor erreicht, die Zählverluste bei höheren Zählraten waren aber deutlich besser. Ein zufriedenstellender Kompromiss zwischen Auflösung und Durchsatz war es jedoch nicht.

- **Rise Time:  $1,2 \mu\text{s}$ ; Flat Top:  $0,6 \mu\text{s}$ .**

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	3,540	12,02	0,61	0
3000	3,342	11,83	1,16	-1,580698835
10000	3,512	11,31	3,45	-5,906821963
20000	4,029	11,49	6,65	-4,409317804
30000	4,416	11,38	9,3	-5,324459235

Tabelle 13: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 295 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	3,516	29,90	0,61	0
3000	3,382	29,63	1,16	-0,903010033
10000	3,565	28,97	3,45	-3,110367893
20000	3,890	27,32	6,65	-8,628762542
30000	4,321	25,79	9,3	-13,7458194

Tabelle 14: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 609 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	3,749	9,65	0,61	0
3000	3,643	9,593	1,16	-0,580371023
10000	3,739	9,341	3,45	-3,192040626
20000	4,050	8,974	6,65	-6,99554358
30000	4,553	8,78	9,3	-9,016478392

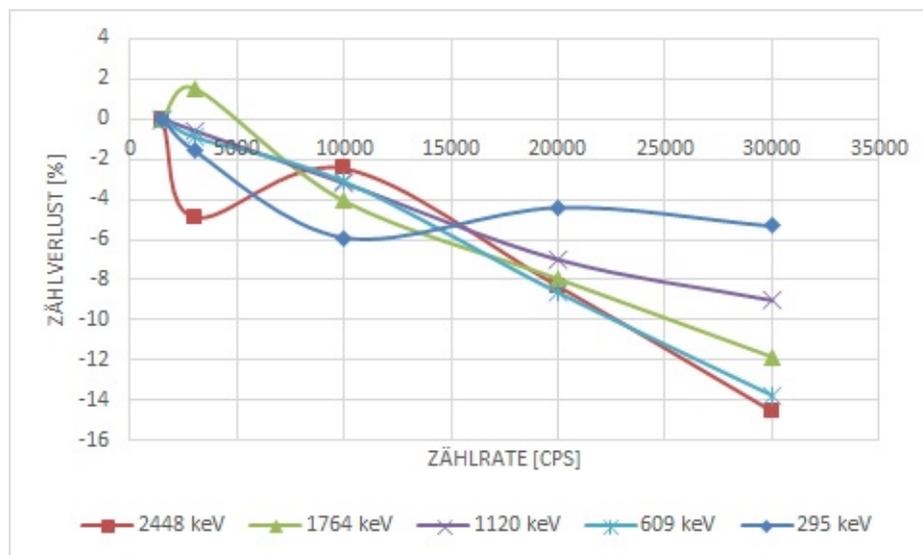
Tabelle 15: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1120 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	4,071	9,02	0,61	0
3000	3,949	9,154	1,16	1,530612245
10000	4,057	8,648	3,45	-4,081632653
20000	4,317	8,299	6,65	-7,952528838
30000	4,647	7,95	9,3	-11,83451642

Tabelle 16: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1764 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	4,465	0,7994	0,61	0
3000	4,298	0,7603	1,16	-4,891168376
10000	4,519	0,7797	3,45	-2,464348261
20000	4,764	0,7329	6,65	-8,318739054
30000	5,071	0,6832	10,22	-14,53590193

Tabelle 17: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 2448 keV.


 Abbildung 37: Vergleichskurven: Rise Time:  $1,2 \mu\text{s}$  und Flat Top:  $0,6 \mu\text{s}$ .

Dieser Satz von *Rise Time* und *Flat Top* zeigte einen durchaus guten Kompromiss zwischen Auflösung und Durchsatz, in Vergleich zu den vorigen Messungen. Wie schon zuvor, wurde jede dieser Messungen bei einer Zählrate nur einmal gemessen und ausgewertet. Die Referenz wurde wieder 4h, während die Messungen mit den anderen Zählraten jeweils 1h gemessen wurden.

- **Rise Time:  $1,0 \mu\text{s}$ ; Flat Top:  $0,6 \mu\text{s}$ .**

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	3,405	11,97	0,55	0
10000	3,368	11,23	3,03	-6,182121972
30000	3,782	11,03	8,6	-7,852965748

Tabelle 18: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 295 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	3,428	30,05	0,55	0
10000	3,524	29,34	3,03	-2,362728785
30000	3,696	25,86	8,6	-13,94342762

Tabelle 19: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 609 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	3,726	9,71	0,55	0
10000	3,727	9,432	3,03	-2,90302656
30000	3,971	8,70	8,6	-10,46942557

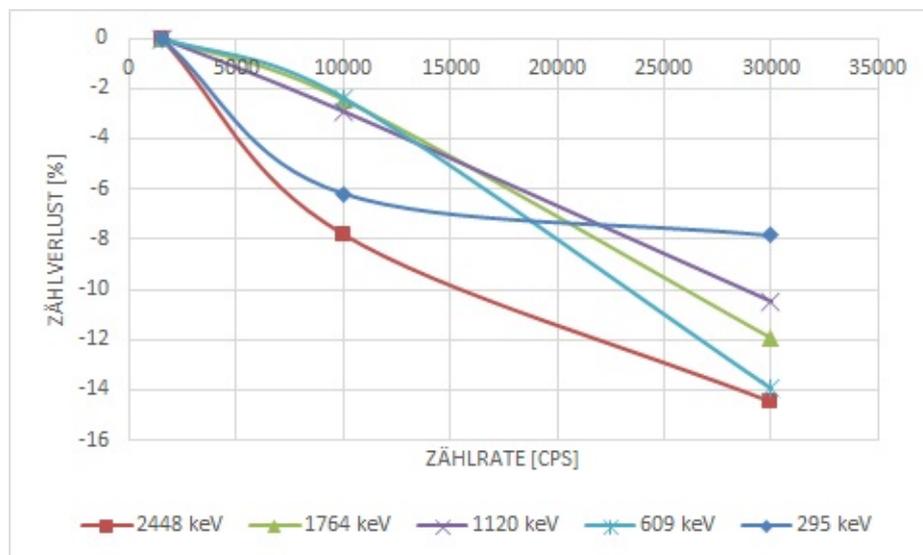
Tabelle 20: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1120 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	4,064	9,06	0,55	0
10000	4,092	8,838	3,03	-2,439562866
30000	4,241	7,98	8,6	-11,93288442

Tabelle 21: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1764 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	4,502	0,81	0,55	0
10000	4,589	0,7513	3,03	-7,804638606
30000	4,734	0,70	9,3	-14,48030433

Tabelle 22: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 2448 keV.


 Abbildung 38: Vergleichskurven: Rise Time:  $1,0 \mu\text{s}$  und Flat Top:  $0,6 \mu\text{s}$ .

Wie man aus allen Tabellen zuvor sehen kann, wurde zunächst der Einfluss des Parameters *Flat Top* überprüft. Es wurden Messungen mit demselben Wert für *Flat Top* durchgeführt, der *Rise Time* Parameter wurde variiert. Wie man den Tabellen entnehmen kann, bewirkt eine sinkende *Rise Time* Tendenz eine schlechtere Auflösung als zuvor, die Zählverluste bei höheren Zählraten werden aber geringer. Der Kompromiss zwischen Auflösung und Durchsatz wurde immer besser. Wie schon zuvor, wurde jede dieser Messungen bei einer Zählrate nur einmal gemessen und ausgewertet. Die Messdauer der Referenz betrug 4h, während die Messungen mit den anderen Zählraten jeweils 1h gemessen wurden.

- Rise Time:  $1,6 \mu\text{s}$ ; Flat Top:  $0,8 \mu\text{s}$ .

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	2,869	11,79	0,79	0
3000	3,042	11,7	1,46	-0,763358779
5000	3,096	11,75	2,48	-0,339270568
10000	3,091	11,22	4,52	-4,834605598
20000	3,058	10,15	8,88	-13,9100933
30000	3,178	9,64	13,06	-18,23579304

Tabelle 23: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 295 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	2,917	29,70	0,79	0
3000	3,019	29,22	1,46	-1,616161616
5000	3,091	29,14	2,48	-1,885521886
10000	3,175	28,61	4,52	-3,67003367
20000	3,164	26,05	8,88	-12,28956229
30000	3,291	24,12	13,06	-18,78787879

Tabelle 24: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 609 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	3,199	9,7290	0,79	0
3000	3,284	9,419	1,46	-3,186350087
5000	3,271	9,319	2,48	-4,214204954
10000	3,319	9,031	4,52	-7,174426971
20000	3,345	8,412	8,88	-13,5368486
30000	3,426	7,661	13,06	-21,25603865

Tabelle 25: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1120 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	3,515	9,1150	0,79	0
3000	3,583	8,943	1,46	-1,886999451
5000	3,588	8,834	2,48	-3,082830499
10000	3,688	8,551	4,52	-6,187602852
20000	3,701	7,903	8,88	-13,29676358
30000	3,882	7,403	13,06	-18,7822271

Tabelle 26: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1764 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	3.975	0,8381	0,79	0
3000	3,972	0,7823	1,46	-6,657916716
5000	3,882	0,7767	2,48	-7,326094738
10000	3,935	0,7768	4,52	-7,314162988
20000	4,075	0,6868	8,88	-18,05273834
30000	4,201	0,6424	13,06	-23,35043551

Tabelle 27: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 2448 keV.

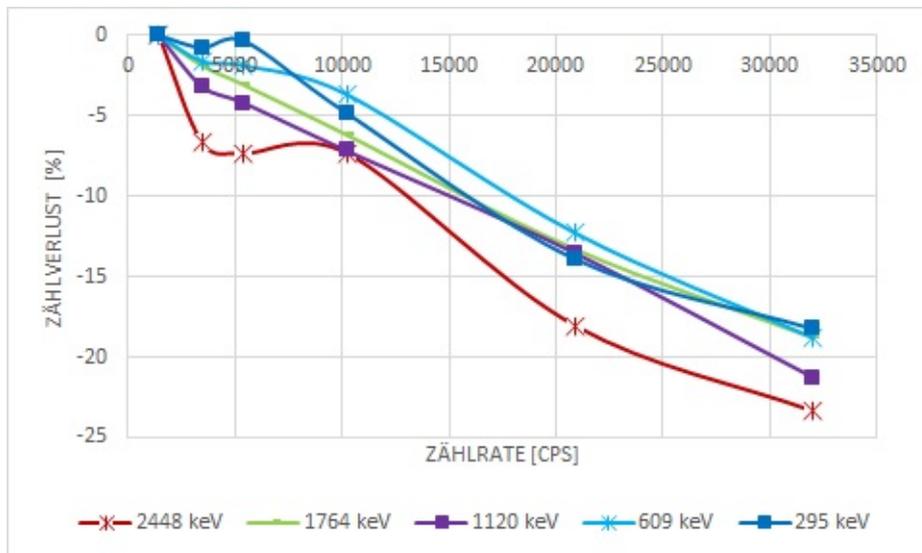


Abbildung 39: Vergleichskurven: Rise Time:  $1,6 \mu\text{s}$  und Flat Top:  $0,8 \mu\text{s}$ .

Nachdem der Einfluss des Parameters *Rise Time* überprüft wurde, konnte der Einfluss von *Flat Top* untersucht werden. Die Tabellen 23, 24, 25, 26 und 27 zeigen die ausgewerteten und berechneten Größen für den definierten Satz von *Rise Time* und *Flat Top*. Alle Messungen wurden einmal durchgeführt, wobei die Messdauer der Referenz 4h und die Messdauer der Messungen mit den anderen Zählraten jeweils 1h betrug.

- **Rise Time: 1,6  $\mu$ s; Flat Top: 0,4  $\mu$ s.**

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	3,595	11,71	0,67	0
3000	3,493	11,85	1,49	1,195559351
5000	3,285	11,75	2,00	0,341588386
10000	3,209	10,82	3,75	-7,600341588
20000	3,499	10,4	7,36	-11,18701964
30000	3,204	9,83	10,56	-16,07173356

Tabelle 28: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 295 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	3,664	29,82	0,67	0
3000	3,515	29,33	1,49	-1,643192488
5000	3,380	29,44	2,00	-1,274312542
10000	3,440	28,67	3,75	-3,856472166
20000	3,811	27,63	7,36	-7,344064386
30000	3,495	24,84	10,56	-16,70020121

Tabelle 29: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 609 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	4,196	9,6480	0,67	0
3000	4,003	9,546	1,49	-1,05721393
5000	3,866	9,396	2,00	-2,611940299
10000	3,975	9,341	3,75	-3,182006633
20000	4,141	8,701	7,36	-9,815505804
30000	4,049	8,232	10,56	-14,67661692

Tabelle 30: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1120 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	4,922	9,0270	0,67	0
3000	4,781	9,046	1,49	0,210479672
5000	4,729	8,942	2,00	-0,941619586
10000	4,749	8,753	3,75	-3,035338429
20000	4,956	8,296	7,36	-8,097928437
30000	4,906	7,721	10,56	-14,46770799

Tabelle 31: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1764 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	5,7660	0,7855	0,67	0
3000	5,7180	0,7857	1,49	0,025461489
5000	5,5710	0,7736	2,00	-1,514958625
10000	5,5770	0,7563	3,75	-3,717377467
20000	5,8850	0,717	7,36	-8,720560153
30000	5,6740	0,6967	10,56	-11,30490134

Tabelle 32: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 2448 keV.

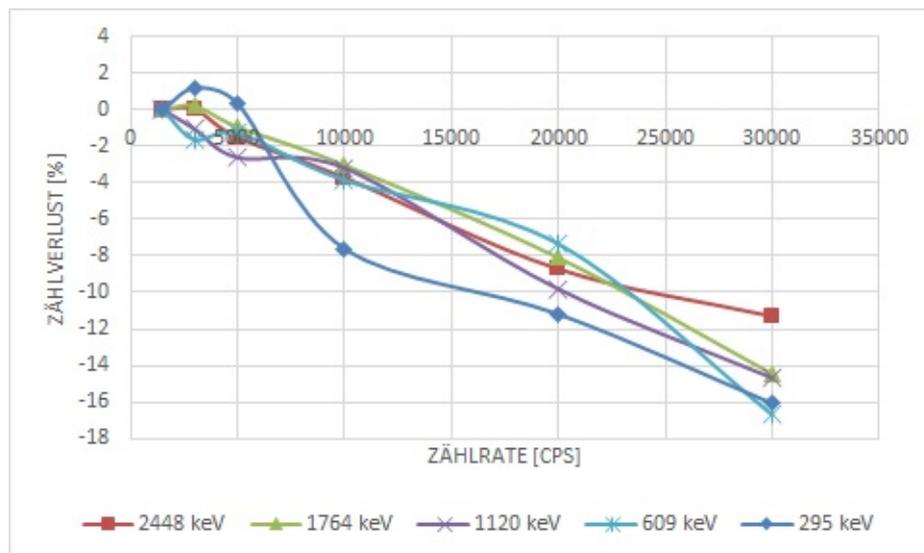


Abbildung 40: Vergleichskurven: Rise Time:  $1,6 \mu\text{s}$  und Flat Top:  $0,4 \mu\text{s}$ .

Vergleicht man diesen Satz von *Rise Time* und *Flat Top* mit dem vorigen Satz, so sieht man, dass kleinere Werte von *Flat Top* eine schlechtere Auflösung bewirken. Die Zählverluste bei

hohen Zählraten werden aber geringer, genau wie die Totzeit (dead time). Auch hier wurden alle Messungen einmal durchgeführt, wobei die Messdauer der Referenz 4h und die Messdauer der Messungen mit den anderen Zählraten jeweils 1h betrug.

- **Rise Time: 1,0  $\mu$ s; Flat Top: 0,4  $\mu$ s.**

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	3,531	11,83	0,48	0
3000	3,625	11,91	0,9	0,67624683
10000	3,912	11,61	2,56	-1,859678783
20000	3,827	11,11	5,18	-6,086221471
30000	4,413	10,68	7,29	-9,721048183

Tabelle 33: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 295 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	3,796	30,04	0,48	0
3000	3,847	29,93	0,9	-0,366178429
10000	4,146	29,14	2,56	-2,996005326
20000	3,972	27,57	5,18	-8,222370173
30000	4,541	27,26	7,29	-9,254327563

Tabelle 34: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 609 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	4,575	9,5360	0,48	0
3000	4,611	9,583	0,9	0,492869128
10000	4,781	9,303	2,56	-2,443372483
20000	4,683	8,95	5,18	-6,145134228
30000	5,146	8,745	7,29	-8,29488255

Tabelle 35: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1120 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	5,634	8,7930	0,48	0
3000	5,598	8,744	0,9	-0,557261458
10000	5,902	8,694	2,56	-1,125895599
20000	5,842	8,229	5,18	-6,414193108
30000	6,178	7,985	7,29	-9,189127715

Tabelle 36: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1764 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	6,6130	0,7000	0,48	0
3000	6,4300	0,7025	0,9	0,357142857
10000	6,8070	0,7353	2,56	5,042857143
20000	6,6990	0,7093	5,18	1,328571429
30000	7,2060	0,6722	7,29	-3,971428571

Tabelle 37: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 2448 keV.

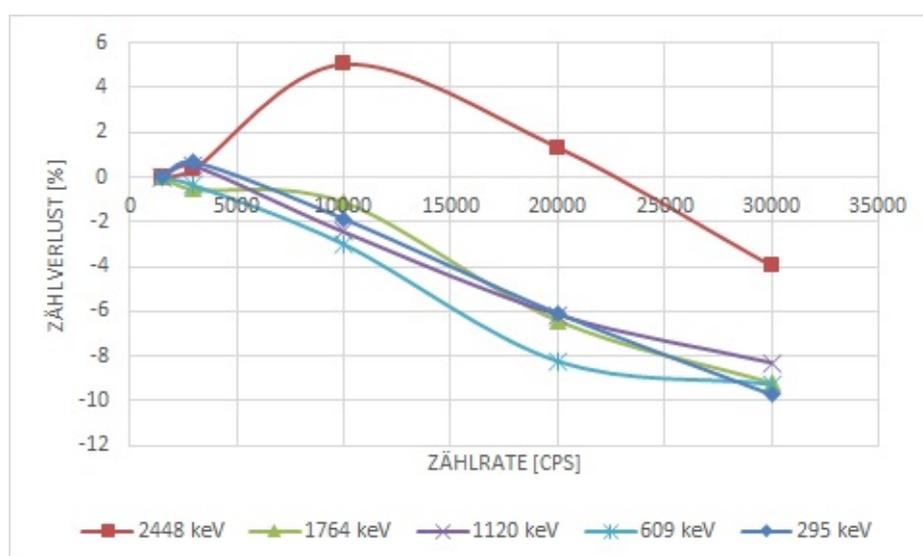


Abbildung 41: Vergleichskurven: Rise Time:  $1,0 \mu\text{s}$  und Flat Top:  $0,4 \mu\text{s}$ .

Wie man sehen kann, werden die Zählverluste und die Totzeit immer geringer, während die Halbwertsbreite der Peaks bzw. die Auflösung immer schlechter wird. Wenn man sich die Größen genauer anschaut, so kann man sagen, dass bei diesem Satz von *Rise Time* und *Flat Top* der bisher beste Kompromiss zwischen den Größen erreicht wurde. Die Messungen wurden einmal

durchgeführt, die Referenzmessung dauerte 4h und die Messungen mit den anderen Zählraten jeweils 1h.

- **Rise Time: 0,8  $\mu$ s; Flat Top: 0,4  $\mu$ s.**

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	3,6690	11,7800	0,4	0
3000	3,9150	11,72	0,72	-0,509337861
10000	3,6860	11,22	2,18	-4,753820034
30000	3,7860	10,74	5,99	-8,82852292

Tabelle 38: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 295 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	4,1170	29,8000	0,4	0
3000	4,3030	29,49	0,72	-1,040268456
10000	4,1820	29,5	2,18	-1,006711409
30000	4,2860	27,05	5,99	-9,228187919

Tabelle 39: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 609 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	5,1400	9,5640	0,4	0
3000	5,3080	9,552	0,72	-0,125470514
10000	5,0920	9,304	2,18	-2,718527813
30000	5,2160	8,673	5,99	-9,316185696

Tabelle 40: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1120 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	6,4250	8,6610	0,4	0
3000	6,5670	8,639	0,72	-0,254012239
10000	6,4030	8,475	2,18	-2,147558019
30000	6,5520	7,933	5,99	-8,405495901

Tabelle 41: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1764 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	7,6210	0,7267	0,4	0
3000	7,5090	0,7148	0,72	-1,637539562
10000	7,5110	0,7061	2,18	-2,834732352
30000	7,3240	0,6615	5,99	-8,972065502

Tabelle 42: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 2448 keV.

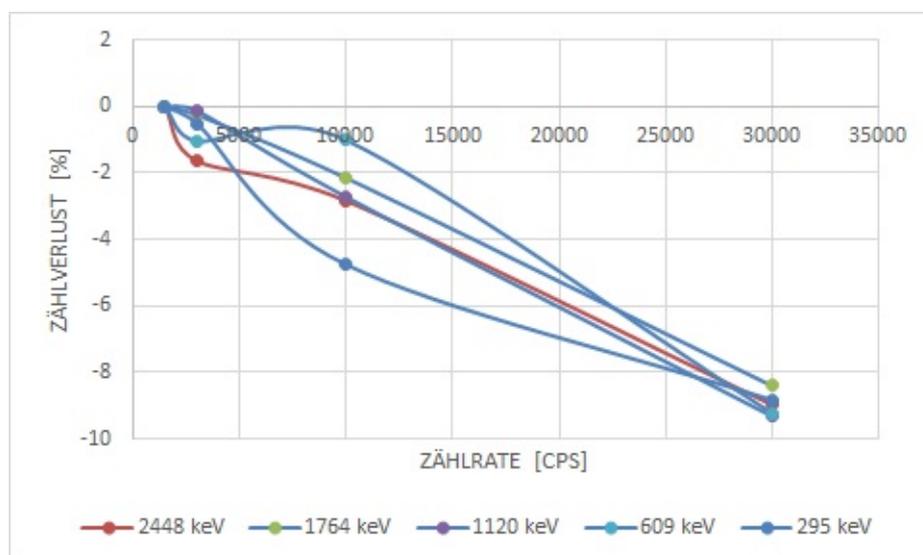


Abbildung 42: Vergleichskurven: Rise Time:  $0,8 \mu\text{s}$  und Flat Top:  $0,4 \mu\text{s}$ .

Dieser Satz von *Rise Time* und *Flat Top* bietet relativ geringe Zählverluste bei hohen Zählraten, die Auflösung ist aber nicht sehr gut bzw. die Peaks im Spektrum sind relativ breit. Ein guter Kompromiss zwischen den Größen ist jedoch nicht vorhanden. Alle Messungen wurden einmal durchgeführt, die Referenzmessung dauerte 4h und die Messungen mit den anderen Zählraten jeweils 1h.

- **Rise Time: 2,0  $\mu$ s; Flat Top: 1,0  $\mu$ s.**

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	2,0660	11,6500	0,99	0
3000	2,0920	11,35	2,1	-2,575107296
10000	2,2610	10,89	5,88	-6,52360515
20000	2,0890	9,11	10,93	-21,80257511
30000	2,2780	8,165	15,82	-29,91416309

Tabelle 43: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 295 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	2,2390	29,3700	0,99	0
3000	2,2400	28,72	2,1	-2,213142663
10000	2,3820	27,11	5,88	-7,694926796
20000	2,3480	24,51	10,93	-16,54749745
30000	2,5490	22,44	15,82	-23,59550562

Tabelle 44: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 609 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	2,5510	9,5520	0,99	0
3000	2,5480	9,351	2,1	-2,104271357
10000	2,6910	8,848	5,88	-7,370184255
20000	2,6690	7,941	10,93	-16,86557789
30000	2,7750	7,023	15,82	-26,47613065

Tabelle 45: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1120 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	2,9210	9,0070	0,99	0
3000	2,9460	8,85	2,1	-1,743088709
10000	3,0320	8,271	5,88	-8,171422227
20000	3,0630	7,638	10,93	-15,19928944
30000	3,1930	6,76	15,82	-24,94726324

Tabelle 46: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1764 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	3,3100	0,7903	0,99	0
3000	3,4860	0,7829	2,1	-0,936353284
10000	3,4380	0,7433	5,88	-5,947108693
20000	3,4640	0,6557	10,93	-17,03150702
30000	3,6100	0,601	15,82	-23,95292927

Tabelle 47: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 2448 keV.

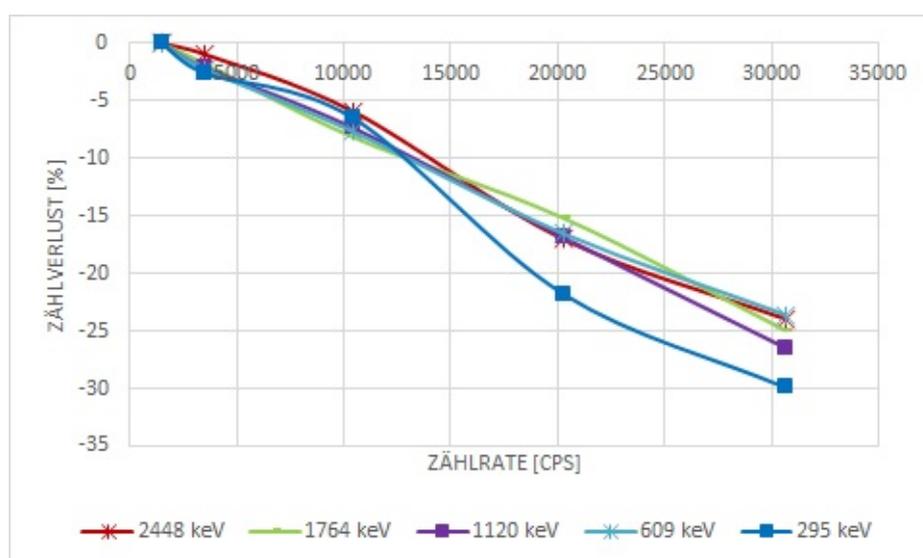


Abbildung 43: Vergleichskurven: Rise Time: 2,0  $\mu$ s und Flat Top: 1,0  $\mu$ s.

Die Zählverluste bei hohen Zählraten sind bei diesem Satz von *Rise Time* und *Flat Top* relativ hoch, was diesen Satz unbrauchbar macht, obwohl eine gute Auflösung bemerkbar ist. Auch hier wurden alle Messungen einmal durchgeführt. Die Messdauer der Referenzmessung betrug 4h und die der Messungen mit den anderen Zählraten jeweils 1h.

- **Rise Time: 2,4  $\mu$ s; Flat Top: 0,8  $\mu$ s.**

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	1,7160	11,4300	1,06	0
3000	1,7410	11,35	2,27	-0,699912511
20000	1,8600	9,342	11,59	-18,26771654
30000	1,9190	8,083	16,85	-29,28258968

Tabelle 48: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 295 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	1,9720	29,4500	1,06	0
3000	1,9500	28,55	2,27	-3,056027165
20000	2,0480	23,87	11,59	-18,94736842
30000	2,0930	20,78	16,85	-29,43972835

Tabelle 49: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 609 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	2,2810	9,4770	1,06	0
3000	2,3190	9,269	2,27	-2,19478738
20000	2,3820	7,718	11,59	-18,56072597
30000	2,4660	6,794	16,85	-28,31064683

Tabelle 50: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1120 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	2,7340	8,9110	1,06	0
3000	2,7170	8,816	2,27	-1,066098081
20000	2,8420	7,365	11,59	-17,34934351
30000	2,9570	6,521	16,85	-26,8207833

Tabelle 51: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1764 keV.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	CPS [cps]	Dead Time [%]	Zählverluste [%]
1500*	3,2270	0,7934	1,06	0
3000	3,1740	0,7913	2,27	-0,26468364
20000	3,3390	0,6459	11,59	-18,59087472
30000	3,6070	0,5897	16,85	-25,67431308

Tabelle 52: Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 2448 keV.

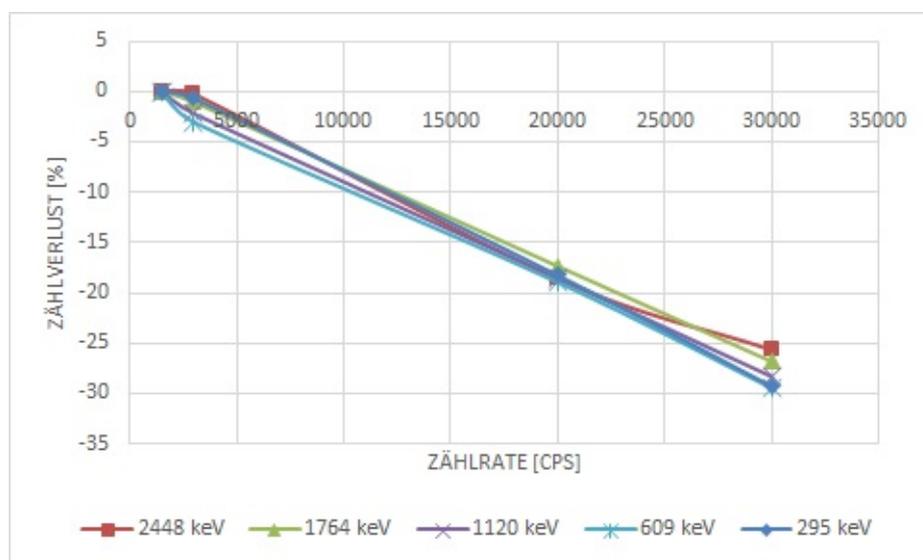


Abbildung 44: Vergleichskurven: Rise Time: 2,4  $\mu$ s und Flat Top: 0,8  $\mu$ s.

Wie schon bei einigen Messungen zuvor, sieht man auch hier, dass mit dem DSA-1000 Gerät grundsätzlich eine sehr gute Auflösung erreicht werden kann. Das Problem, das bei diesem Satz von *Rise Time* und *Flat Top* auftritt sind die hohen Zählverluste bei hohen Zählraten. Ein zufriedenstellender Kompromiss zwischen Auflösung und Durchsatz wurde bei diesem Satz von Parametern nicht gefunden. Wie schon zuvor, wurden alle Messungen einmal durchgeführt, die Referenzmessung dauerte 4h und die Messungen mit den anderen Zählraten jeweils 1h.

### 3.3.2.2 Vergleichskurven

Nachdem alle Messungen durchgeführt und alle Spektren ausgewertet wurden, konnten alle Daten miteinander verglichen werden. Abbildungen 45- 49 zeigen vier Sätze von *Rise Time* und *Flat Top* bei unterschiedlichen Energien, die den besten Kompromiss zwischen Auflösung und Durchsatz bieten. Anhand der Tabellen aus 3.3.2.1 bzw. anhand der Werte für *FWHM*, *CPS* (*Count per second*), *Dead Time* und *Zählverluste* wurde entschieden, dass der Satz mit *Rise Time* = 1,0  $\mu$ s und *Flat Top* = 0,4  $\mu$ s den besten Kompromiss aller Größen bietet. Es wurden wieder mehrere Spektren mit dem gewählten Satz gemessen, kalibriert und ausgewertet, um ein statistisch präziseres Ergebnis zu bekommen.

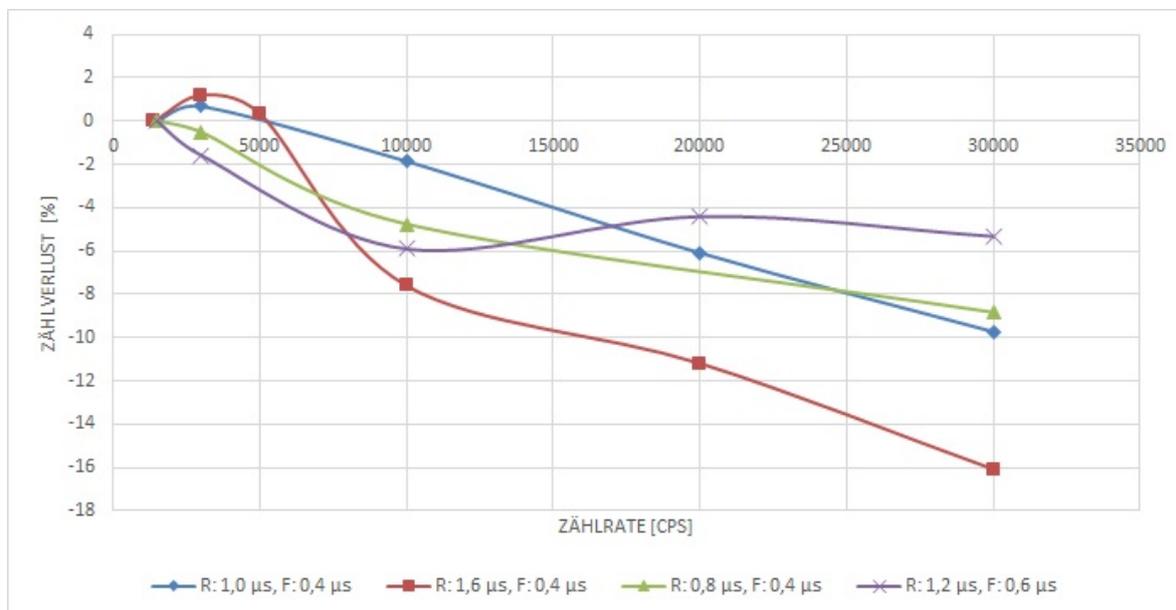


Abbildung 45: Vergleichskurven bei einer Energie von 295 keV.

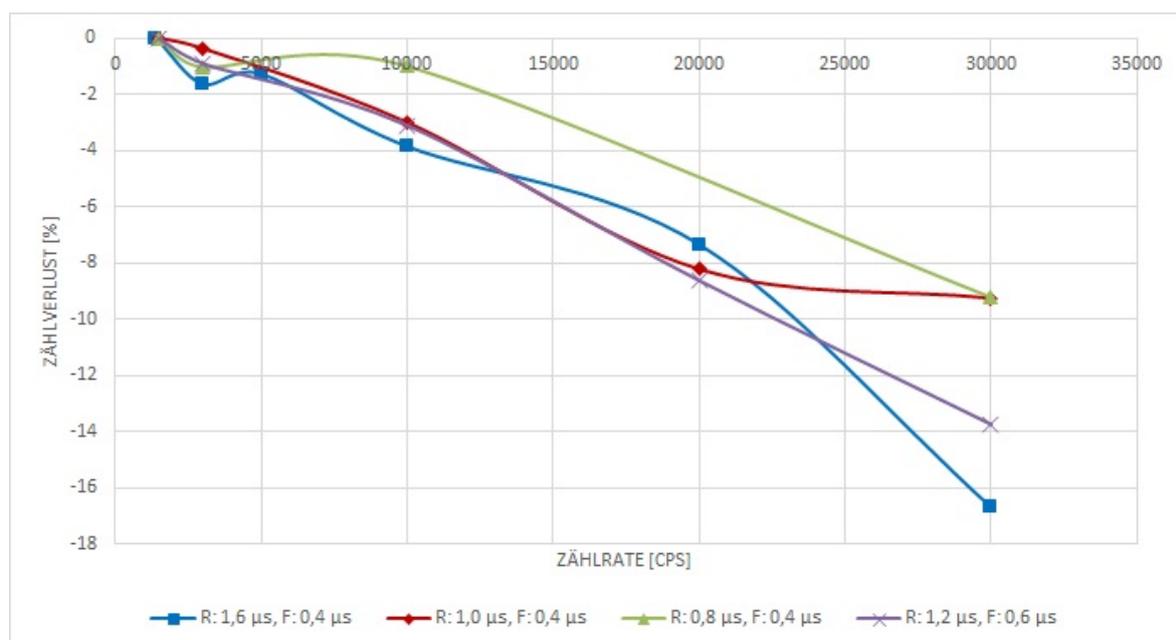


Abbildung 46: Vergleichskurven bei einer Energie von 609 keV.

### III. Upgrade-Versuch durch DSA-1000 (Digital Spectrum Analyzer)

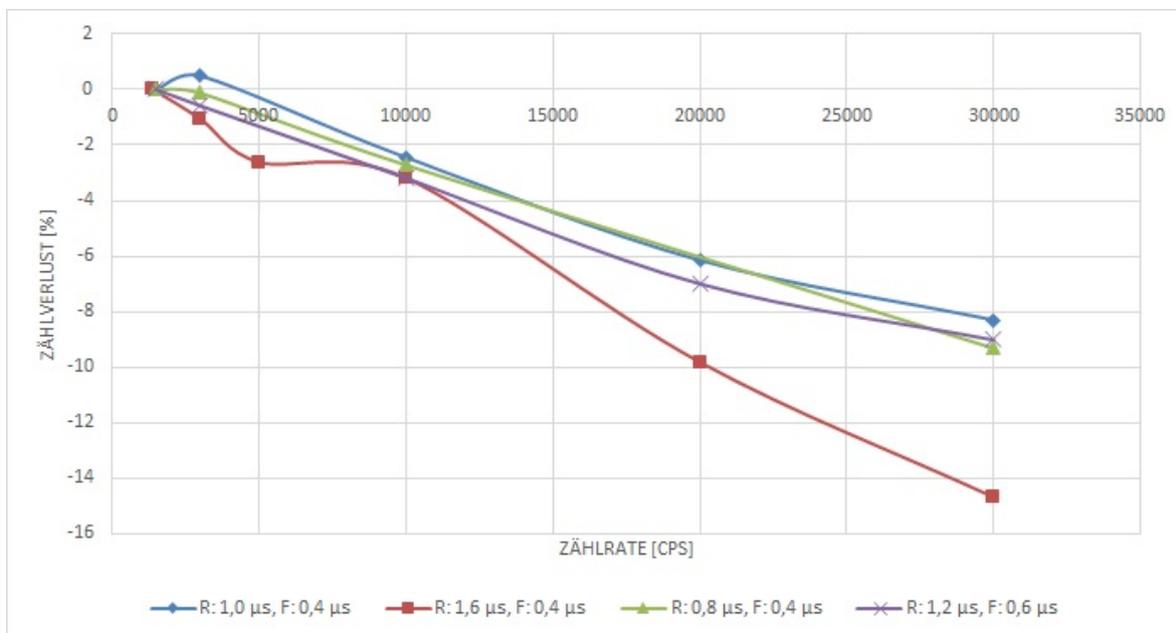


Abbildung 47: Vergleichskurven bei einer Energie von 1120 keV.

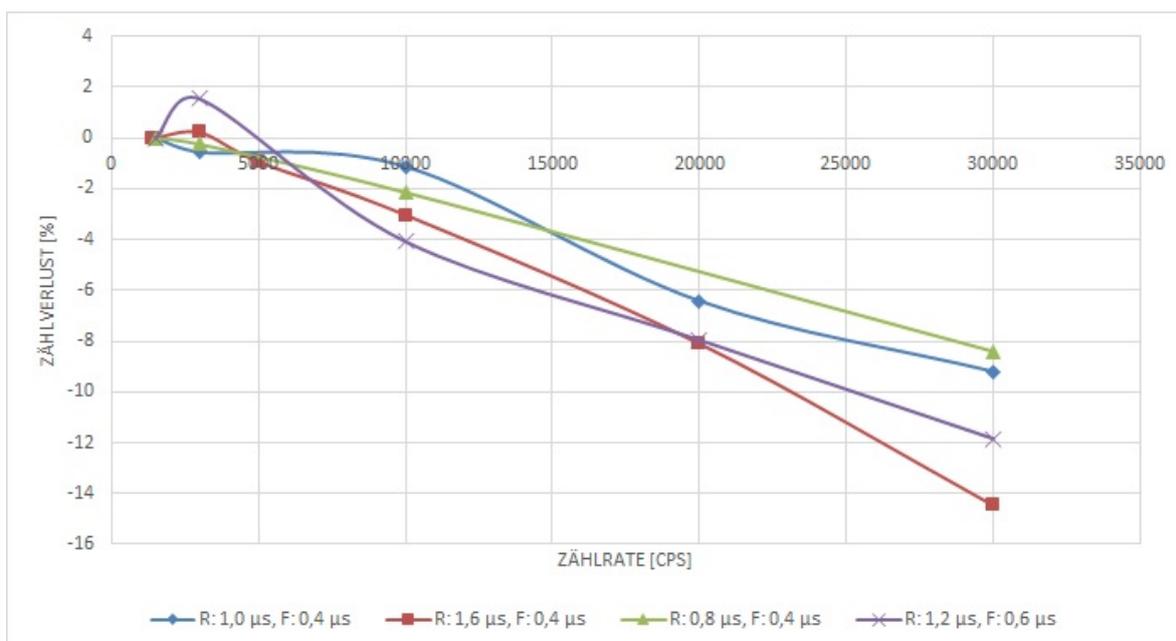


Abbildung 48: Vergleichskurven bei einer Energie von 1764 keV.

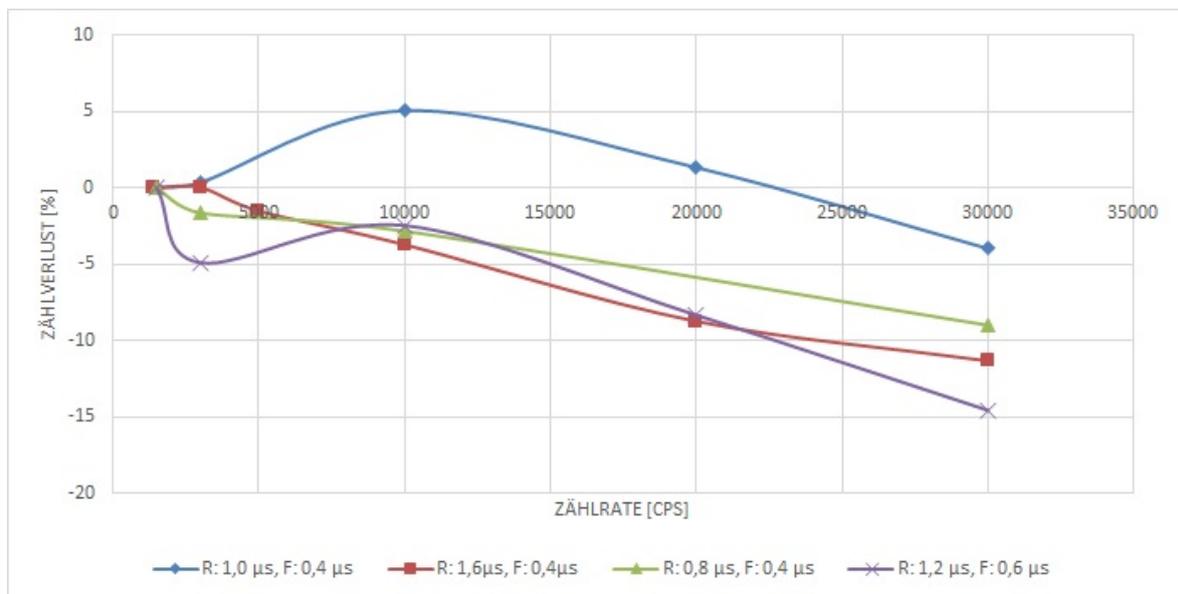


Abbildung 49: Vergleichskurven bei einer Energie von 2448 keV.

### 3.3.2.3 Serienmessungen mit $Rise\ Time = 1,0\ \mu s$ und $Flat\ Top = 0,4\ \mu s$

Wie schon erwähnt, wurden, um ein statistisch präziseres Ergebnis zu bekommen, mehrere Messungen mit  $Rise\ Time = 1,0\ \mu s$  und  $Flat\ Top = 0,4\ \mu s$  durchgeführt. Bei der Referenzmessung wurden 9 Spektren jeweils 1h gemessen und anschließend kalibriert und ausgewertet. Es wurde ein Mittelwert dieser Messungen gebildet. Derselbe Vorgang wurde auch bei den Messungen mit unterschiedlichen Zählraten durchgeführt. Im Rahmen dieser Serienmessungen wurden folgende Zählraten verwendet: 1500 cps (Referenz), 3000 cps, 10000 cps und 30000 cps.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	SD(FWHM)	CPS [cps]	SD(CPS) [cps]	Zählverluste [%]
1500*	2,93733	0,09002	11,79444	0,13473	0
3000	3,57756	0,11420	11,82125	0,13643	0,227272727
10000	3,17567	0,05798	11,24778	0,31348	-4,634950542
30000	3,31867	0,14714	10,45544	0,64884	-11,35280264

Tabelle 53: Mittelwerte und Standardabweichungen (SD) der Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 295 keV.

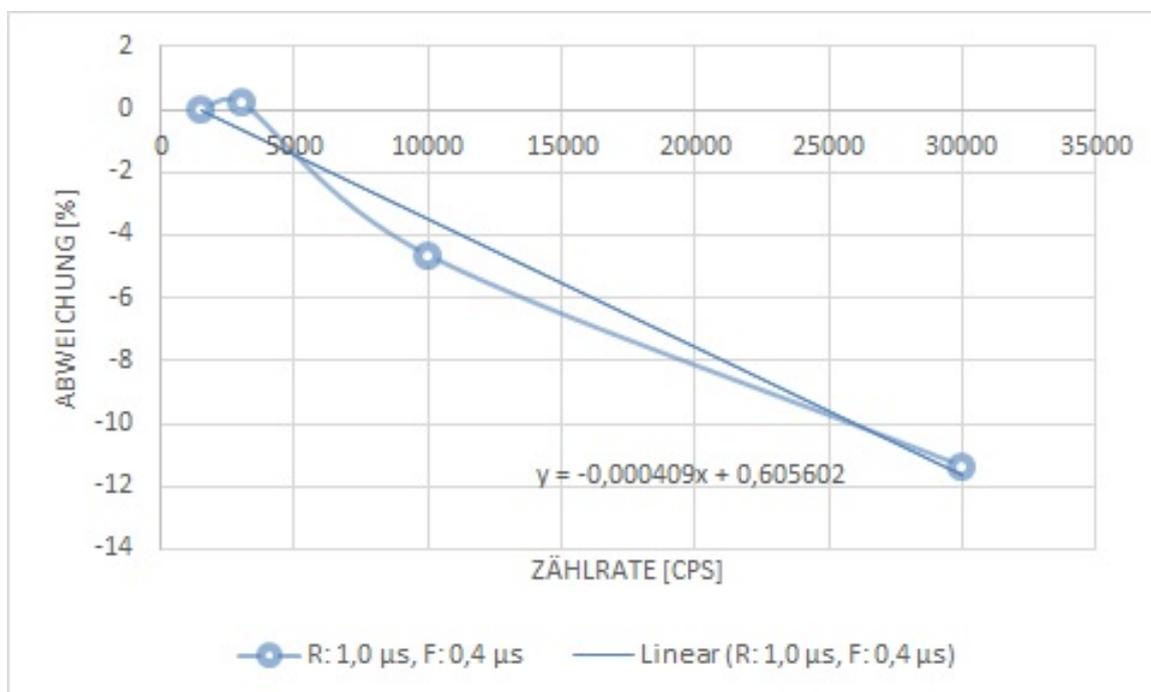


Abbildung 50: Abweichung der Zählraten vom 15k Wert bei einer Energie von 295 keV. Zu sehen ist auch eine entsprechende lineare Trendlinie mit der dazugehörenden Gleichung.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	SD(FWHM)	CPS [cps]	SD(CPS) [cps]	Zählverluste [%]
1500*	3,338333333	0,071676356	29,81111111	0,164198389	0
3000	3,830555556	0,094745859	29,77111111	0,139323764	-0,134178159
10000	3,554555556	0,036400931	29,09	0,317332633	-2,418934029
30000	3,641777778	0,060186746	26,61	0,303644529	-10,73797987

Tabelle 54: Mittelwerte und Standardabweichungen (SD) der Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 609 keV.

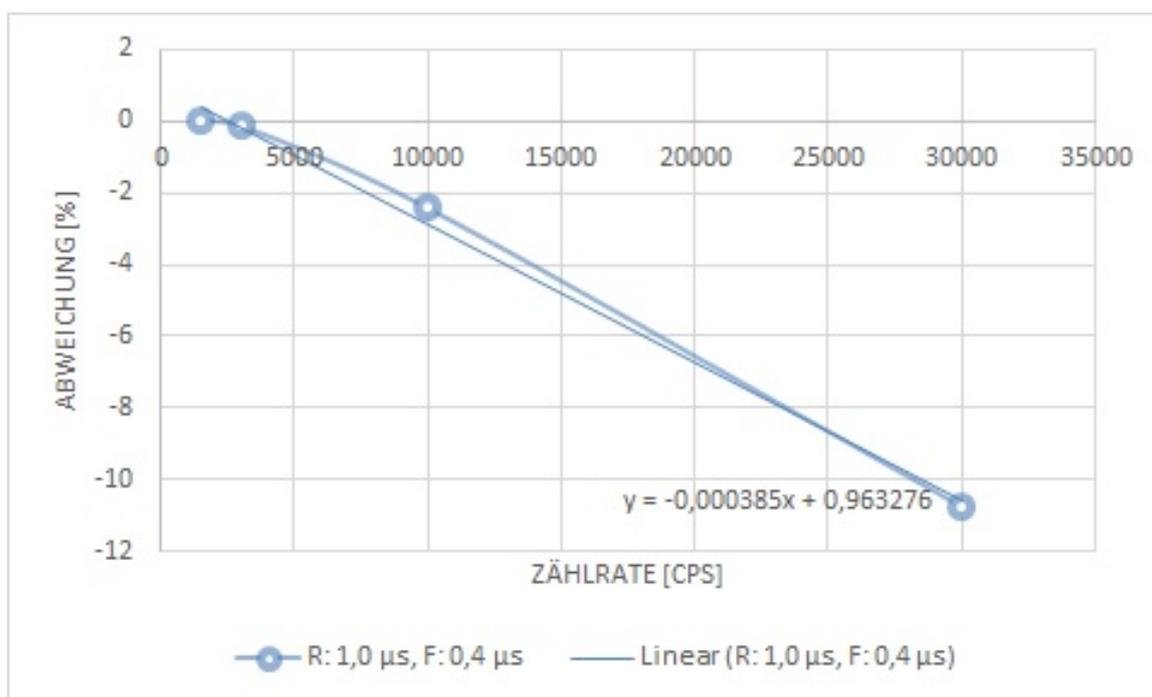


Abbildung 51: Abweichung der Zählraten vom 15k Wert bei einer Energie von 609 keV. Zu sehen ist auch eine entsprechende lineare Trendlinie mit der dazugehörigen Gleichung.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	SD(FWHM)	CPS [cps]	SD(CPS) [cps]	Zählverluste [%]
1500*	4,228888889	0,042609988	9,563111111	0,03455953	0
3000	4,625222222	0,091592546	9,524	0,096224997	-0,408978947
10000	4,371666667	0,018761663	9,288888889	0,064675042	-2,867500116
30000	4,465555556	0,03807923	8,574444444	0,123684186	-10,33833713

Tabelle 55: Mittelwerte und Standardabweichungen (SD) der Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1120 keV.

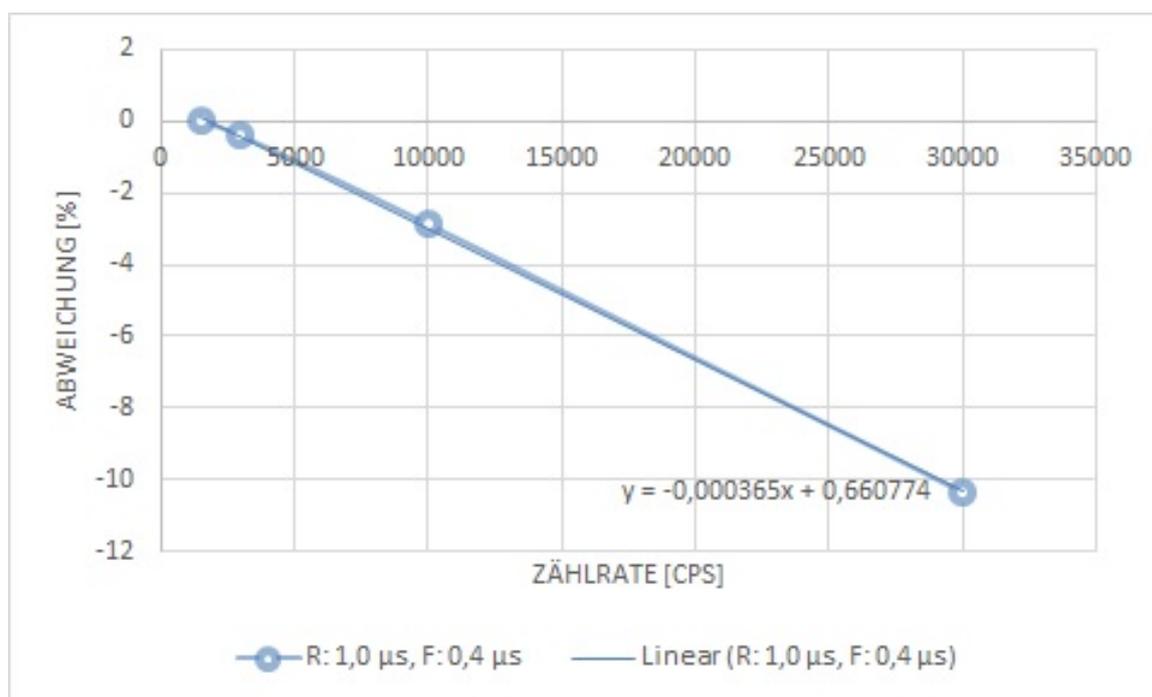


Abbildung 52: Abweichung der Zählraten vom 15k Wert bei einer Energie von 1120 keV. Zu sehen ist auch eine entsprechende lineare Trendlinie mit der dazugehörigen Gleichung.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	SD(FWHM)	CPS [cps]	SD(CPS) [cps]	Zählverluste [%]
1500*	5,357333333	0,075695112	8,657888889	0,06094966	0
3000	5,703	0,053570048	8,788111111	0,069957924	1,504087473
10000	5,507222222	0,047103019	8,568111111	0,058727005	-1,036947678
30000	5,646666667	0,049234135	7,935	0,070547856	-8,349482168

Tabelle 56: Mittelwerte und Standardabweichungen (SD) der Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1764 keV.

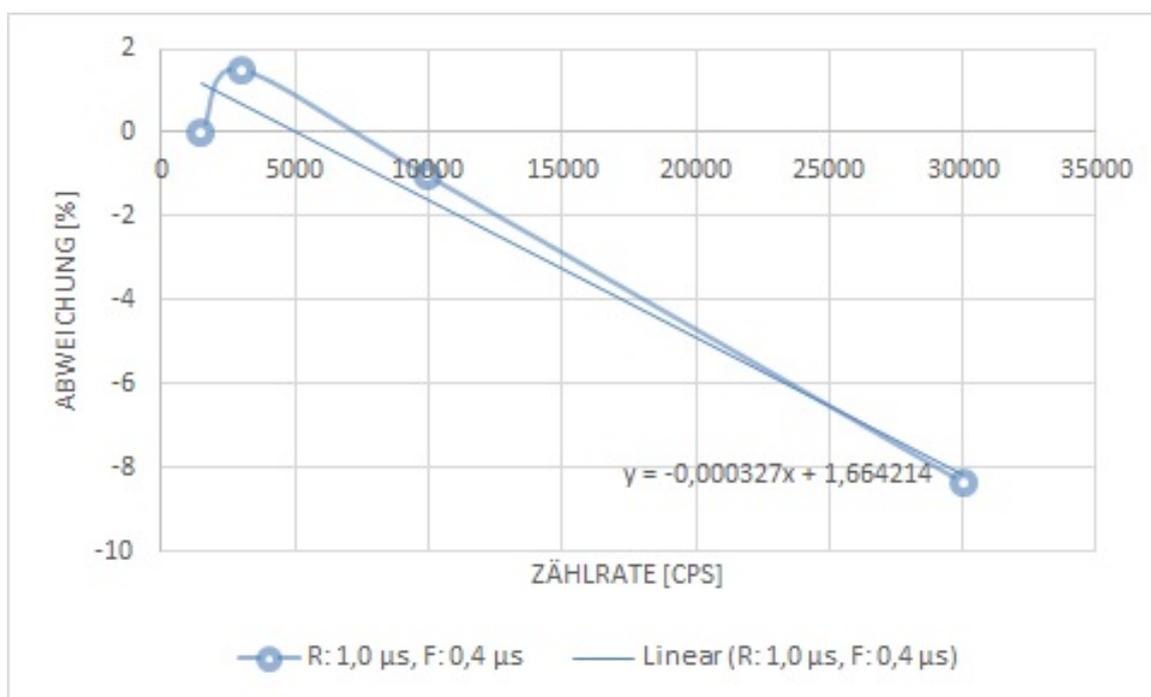


Abbildung 53: Abweichung der Zählraten vom 15k Wert bei einer Energie von 1764 keV. Zu sehen ist auch eine entsprechende lineare Trendlinie mit der dazugehörigen Gleichung.

Zählrate [cps]	FWHM [keV]	SD(FWHM)	CPS [cps]	SD(CPS) [cps]	Zählverluste [%]
1500*	6,290555556	0,219832386	0,7253625	0,009320935	0
3000	6,572333333	0,099473615	0,734677778	0,014824286	1,284223788
10000	6,402777778	0,137929128	0,712377778	0,01131744	-1,790101118
30000	6,663888889	0,183112974	0,664588889	0,015801143	-8,378377861

Tabelle 57: Mittelwerte und Standardabweichungen (SD) der Referenz\*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 2248 keV.

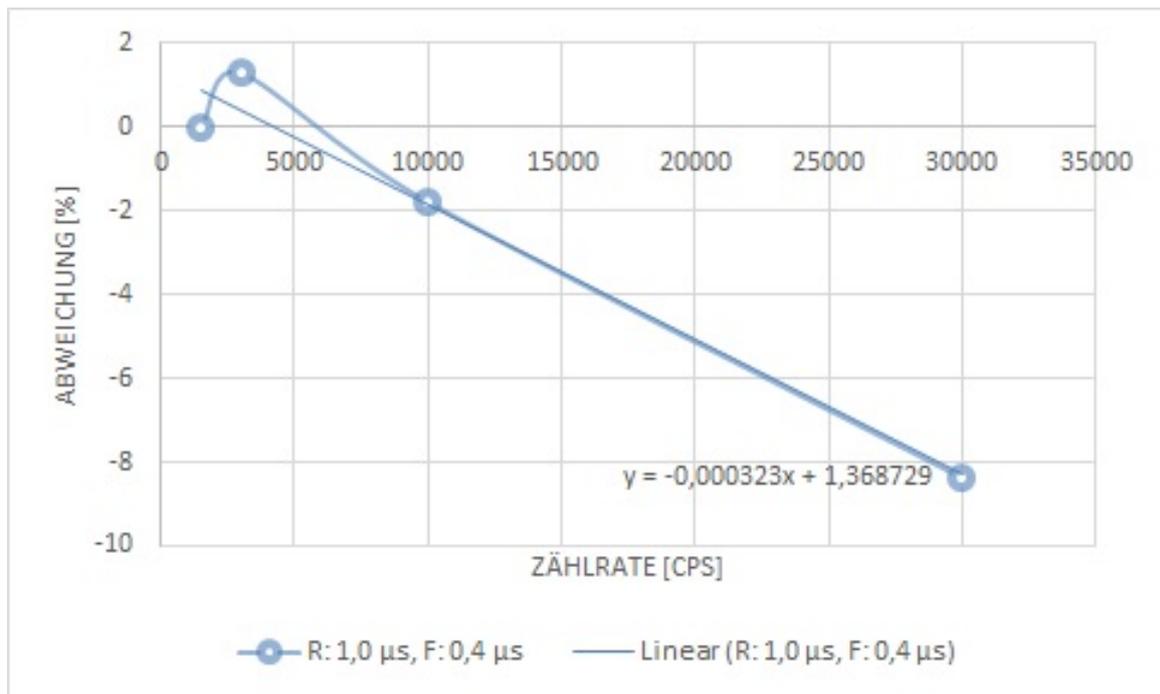


Abbildung 54: Abweichung der Zählraten vom 15k Wert bei einer Energie von 2448 keV. Zu sehen ist auch eine entsprechende lineare Trendlinie mit der dazugehörigen Gleichung.

### 3.3.2.4 Abhängigkeit der Steigung (k) der Trendlinien der Serienmessungen von der Energie

Neben der Auflösung und den Zählverlusten bei hohen Zählraten, wurde auch die Abhängigkeit der Steigung der Trendlinien von der Energie bestimmt. Die Idee bestand darin, den berechneten k-Werten der Trendlinien eine Gerade anzupassen. Mithilfe der so entstandenen Gerade, kann dann für jeden Energiewert eine passende Steigung bestimmt werden. Zunächst wurden die Gleichungen der berechneten Trendlinien mithilfe von MS Excel so bearbeitet, dass der y-Achsenabschnitt alle Gleichungen (y-Intercept) auf 0 gesetzt wurde. Die so entstandenen, neuen k-Werte wurden dann für die Bestimmung der Abhängigkeit der Steigung (k) von der Energie verwendet (siehe Abbildung 55). Die einzelnen Steigungen der entsprechenden Energien sind in Tabelle 58 zu sehen.

Energie [keV]	Mit Intercept $d \neq 0$		Mit Intercept $d = 0$	
	k	d	k	d
295	-0,000409	0,605602	-0,000382	0
609	-0,000385	0,963276	-0,000343	0
1120	-0,000365	0,660774	-0,000336	0
1764	-0,000327	1,664214	-0,000253	0
2448	-0,000323	1,368729	-0,000262	0

Tabelle 58: Steigungen der Trendlinien bei unterschiedlichen Energien.

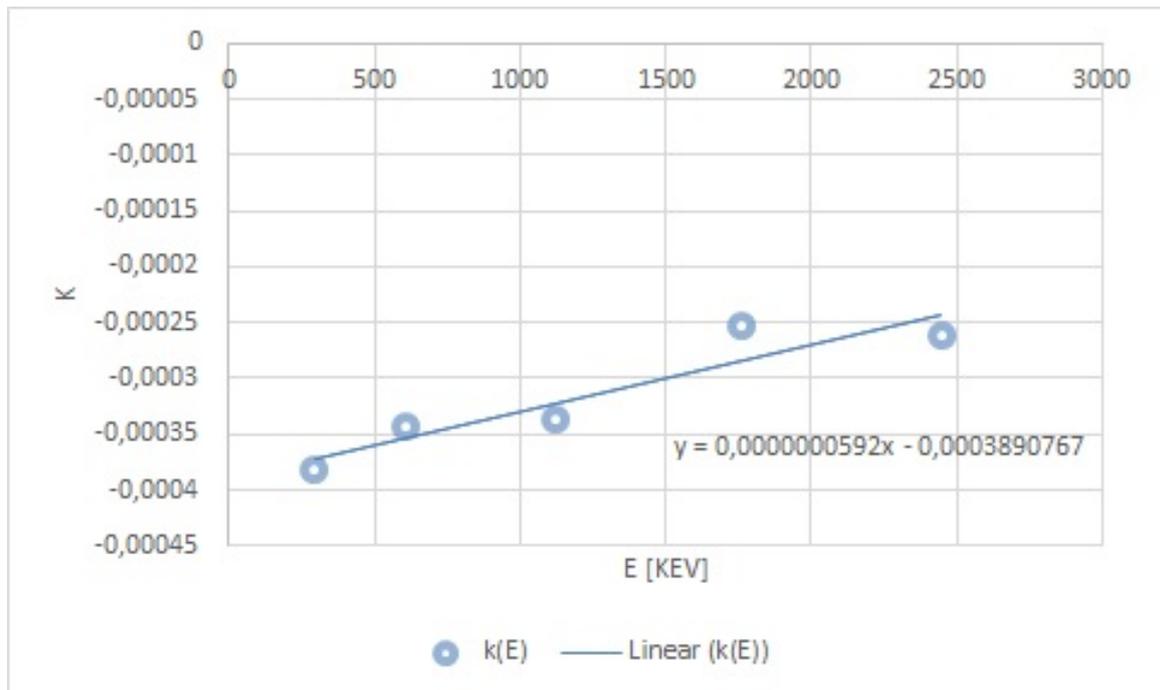


Abbildung 55: Abhängigkeit der Steigung (k) der Trendlinien der Serienmessungen von der Energie. Zu sehen ist auch eine angepasste, lineare Trendlinie mit der dazugehörigen Gleichung.

Mithilfe der in 3.3.2.3 erwähnten Trendlinien, konnte berechnet werden bei welcher Zählrate die Zählverluste unter 5 % liegen (siehe Tabelle 59). Dazu wurden die einzelnen Gleichungen der Trendlinien bzw. Geraden verwendet. Alle Gleichungen wurden nach  $x$  (was in diesem Fall der Zählrate entspricht) aufgelöst, wobei der  $y$ -Wert für jede Gleichung auf 5 gesetzt wurde.

Energie [keV]	Gleichung der linearen Trendlinien	Grenzzählrate (Zählverlust von 5 %) [cps]
295	$y = -0,000409x + 0,605602$	13705,60
609	$y = -0,000385x + 0,963276$	15489,03
1120	$y = -0,000365x + 0,660774$	15508,97
1764	$y = -0,000327x + 1,664214$	20379,86
2448	$y = -0,000323x + 1,368729$	19717,43

Tabelle 59: Berechnete Grenzzählraten.

### 3.4. Resümee des Upgrade-Versuches: DSA-1000

Im Laufe dieses Upgrade-Versuches wurden wichtige Informationen über die Anwendbarkeit des DSA-1000 Gerätes gesammelt. Ziel war es zu überprüfen, ob über das DSA-1000 eine zufriedenstellende Auflösung der Peaks der Gamma-Spektren und möglichst geringe Zählverluste bei hohen Zählraten gewährleistet werden können.

Alle Messungen wurden mithilfe der Zwei-Quellen-Methode durchgeführt. Das DSA-1000 wurde per USB mit einem PC verbunden und somit ein neues Gamma-Spektroskopiesystem gebildet. Wie man aus den Tabellen und Abbildungen in 3.3.2 sehen kann, wurde der beste Kompromiss bei einem Satz von  $Rise\ Time = 1,0\ \mu s$  und  $Flat\ Top = 0,4\ \mu s$  erzielt. Außerdem konnten den Tabellen entnommen werden, dass mit dem DSA-1000 grundsätzlich eine sehr gute Auflösung der Spektren erreicht werden konnte, die Zählverluste bei hohen Zählraten waren jedoch ein Problem. Es konnte gezeigt werden, dass der gewünschte Grenzwert von 5 % für Zählverluste bei hohen Zählraten nicht erreicht werden konnte. Der "Bestwert" der Auflösung (FWHM) lag für die unterschiedlichen Energien zwischen 2.9 keV und 6.6 keV, die Zählverluste bei hohen Zählraten lagen zwischen 8,3 % und 11,3 %. Neben der Auflösung und der Korrektur bei hohen Zählraten, wurde auch die Abhängigkeit der Steigung der Trendlinien von der Energie überprüft. Ziel war es den Messwerten eine Funktion anzupassen mithilfe welcher die Steigung (k) für alle Werte von Energien geschätzt werden konnte.

Schlussendlich sollte erwähnt werden, dass mithilfe der Informationen, die gesammelt wurden, folgende Schlussfolgerung gezogen werden konnte: *Das neue, in diesem Upgrade-Versuch verwendete Gamma-Spektroskopiesystem konnte zwar eine sehr gute Auflösung gewährleisten, die Zählverluste aber machten das System praktisch unbrauchbar bei Messungen mit hohen Zählraten. Das DSA-1000 Gerät kann für Messungen mit Zählraten bis 20 000 cps zwar verwendet werden, bei Messungen mit höheren Zählraten erwies sich dieses System allerdings als unbrauchbar.*



## Zusammenfassung

Wie schon in der Motivation erwähnt, war das Ziel dieser Diplomarbeit die Erneuerung der Elektronik eines alten Gamma-Spektroskopiesystems für hohe Zählraten, wobei zwei Upgrade-Möglichkeiten auf ihre Anwendbarkeit überprüft wurden.

Die beim ersten Upgrade-Versuch verwendete USB2ISA-Adapter-Karte der Firma ARS Technologies Inc. konnte leider nicht das gewünschte Ergebnis liefern. Die wichtigste Erkenntnis, die durch diesen Upgrade-Versuch gewonnen wurde, und hier betont werden muss ist die Tatsache, dass die Kommunikation zwischen USB2ISA-Adapter und Genie-2000 nicht einwandfrei verlief. Wie schon in 2.4 beschrieben, funktionierte die Kommunikation nur in eine Richtung, wobei die Software Genie-2000 die ISA-Steckkarte erkannte, Daten aber nicht auf diese schreiben konnte. Durch genaueres Recherchieren konnte gefunden werden, dass ähnliche Probleme auch andere Benutzer des USB2ISA-Adapters hatten [29]. Ohne die Modifikation des Quellcodes der Software Genie-2000 und das Schreiben eines passenden Treibers wird die USB2ISA-Adapter-Karte wohl auch in Zukunft keine Option sein. Bislang ist noch kein universeller Adapter auf dem Markt vertreten.

Der zweite Upgrade-Versuch, der aus Kostengründen mithilfe des DSA-1000 durchgeführt wurde, hat gezeigt, dass das Canberra DSA-1000 Gerät nur ein teilweise zufriedenstellendes Ergebnis liefert. Wie in 3.4 erwähnt, kann mit dem so zusammengebauten digitalen Meßsystem eine gute Auflösung der Spektren erreicht werden, die dabei auftretenden Zählverluste bei hohen Zählraten sind aber enorm. Der gefundene Zusammenhang zwischen Rise Time/Flat Top und Zählrate lieferte bei niedrigen und mittleren Zählraten ein relativ zufriedenstellendes und gutes Resultat für Zählverluste ( $\leq 5\%$ ), für hohe Zählraten ist der DSA-1000 aber nicht zu gebrauchen. Die Diplomarbeit hat gezeigt, dass das alte, mit ISA-Steckkarten ausgestattete und auf Windows 98 laufende, Gamma-Spektroskopiesystem mit den oben genannte Geräten nicht wirklich modernisiert werden kann. Um einen modernen Gamma-Messplatz einzurichten, können fertige, moderne High-Count-Rate-Systeme (z.B Systeme der Firma *ORTEC*) verwendet werden. Da diese aber äußerst kostspielig sind, und da es von Anfang an der Wunsch war, das alte Umfeld zu behalten, sollte in Zukunft nach einer kostengünstigeren Möglichkeit gesucht werden, die das Behalten des Umfeldes ermöglicht.



# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Bohr'sches Modell [4]. . . . .	8
Abb. 2	Ausschnitt aus der Karlsruher Nuklidkarte. Die Ordnungszahl wird nach oben und die Neutronenzahl nach rechts gezählt. Die schwarzen Felder zeigen stabile, die roten $\beta^-$ -aktive und die blauen die $\beta^+$ -aktiven Radionuklide [3].	10
Abb. 3	Arten der ionisierender Strahlung: a) $\alpha$ -Strahlung; b) $\beta^-$ -Strahlung; c) $\beta^+$ -Strahlung; d) Gammastrahlung; e) Kernspaltung als Beispiel für Neutronenstrahlung. [2, 26] . . . . .	12
Abb. 4	Beispiel einer Bragg-Kurve [3]. . . . .	13
Abb. 5	Beispiele für Wechselwirkung der Betastrahlen mit Materie: Čerenkovstrahlung [10] . . . . .	14
Abb. 6	Veranschaulichte Darstellung des Photoeffekts (links) und der Entstehung von Röntgenfluoreszenzstrahlung (rechts) [2]. . . . .	15
Abb. 7	Darstellung des Comptoneffekts [2]. . . . .	15
Abb. 8	Gammapektrum mit Spektrallinie bei 662 keV [28]. . . . .	16
Abb. 9	Materialisation eines Gammaquants in ein Elektron-Positron-Paar (links); Elektron und Positron vereinigen sich und zerstrahlen (rechts) [2]. . . . .	17
Abb. 10	Die dominanten Bereiche für Photoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildung als Funktion der Ordnungszahl $Z$ des Absorbers und der Energie $E_\gamma$ der $\gamma$ -Quanten (links); Wirkungsquerschnitt für Photoeffekt, Compton-Effekt und für Paarbildung für Blei als Funktion der $\gamma$ -Energie (rechts) [8]. . . . .	17
Abb. 11	Aufbau der Messanordnung für die Messung von ionisierender Strahlung [7].	18
Abb. 12	Halbleiterdetektor. (a) Verarmungszone ohne und mit äußerer Gegenspannung $U$ ; (b) Erzeugung von Elektronen-Lochpaaren durch einfallendes Teilchen und ihre Drift im elektrischen Feld $E$ der Grenzschicht [8]. . . . .	19
Abb. 13	Schematischer Aufbau eines Gamma-Spektroskopiesystems [13]. . . . .	20
Abb. 14	Peakflächenberechnung [13]. . . . .	22
Abb. 15	Auswirkung der Wechselwirkungseffekte auf ein Gamma-Spektrum [3]. . . . .	23
Abb. 16	Eine Liste der Detektoren die für die Messung von ionisierender Strahlung verwendet werden können. Zu sehen sind auch die entsprechenden Strahlungseffekte und Nachweissgrößen [6]. . . . .	24
Abb. 17	Schematische Darstellung eines ISA Slots [17]. . . . .	26
Abb. 18	USB2ISA-Karte der Firma ARS Technologies . . . . .	27
Abb. 19	Einstellungen des ARSTech Enumerators. . . . .	28
Abb. 20	Hauptfenster des ARSTech Enumerators [18]. . . . .	29
Abb. 21	Add MCA [22]. . . . .	30
Abb. 22	Canberra AccuSpec/B ISA-Steckkarte mit definierten Jumpfern. . . . .	33
Abb. 23	zeigt den Device Manager und den deaktivierten USB Host Controller. . . . .	34
Abb. 24	Hauptfenster des ARSTech Enumerators mit den definierten Ressourcen. . . . .	35

---

Abb. 25	zeigt die im Versuchsverlauf beschriebene Fehlermeldung und das Hauptfenster der Software Genie-2000 nach dem Öffnen des Detektors. . . . .	37
Abb. 26	Digital Spectrum Analyzer DSA-1000. . . . .	40
Abb. 27	Front Panel des DSA-1000 Gerätes [23]. . . . .	41
Abb. 28	Rückseite des DSA-1000 Gerätes [23]. . . . .	42
Abb. 29	Beispiel für das Definieren des Detektors. Die Abbildung zeigt alle Schritte, die für das Definieren des Detektors notwendig sind [14]. . . . .	44
Abb. 30	DSP Filter Settings. Neben Rise Time und Flat Top, können noch <i>Preamp type</i> , <i>BLR mode</i> und <i>FDisc shaping</i> definiert werden. Zu sehen ist welche Einstellungen in Rahmen dieser Arbeit definiert wurden. . . . .	46
Abb. 31	"Der dicke Fritz": der Detektor, der im Rahmen dieser Diplomarbeit verwendet wurde. "Der dicke Fritz" ist einer von zwei Detektor des Gamma-Spektroskopiesystems im Radiochemielabor des Atominstiutes. . . . .	48
Abb. 32	<sup>137</sup> Cs- und <sup>226</sup> Ra-Quelle. . . . .	49
Abb. 33	Definieren von <i>Rise Time</i> und <i>Flat Top</i> . . . . .	50
Abb. 34	Das Kalibrieren von Spektren: Verlauf . . . . .	51
Abb. 35	Vergleichskurven: Rise Time: 5,6 $\mu$ s und Flat Top: 0,6 $\mu$ s. . . . .	54
Abb. 36	Vergleichskurven: Rise Time: 2,0 $\mu$ s und Flat Top: 0,6 $\mu$ s. . . . .	56
Abb. 37	Vergleichskurven: Rise Time: 1,2 $\mu$ s und Flat Top: 0,6 $\mu$ s. . . . .	58
Abb. 38	Vergleichskurven: Rise Time: 1,0 $\mu$ s und Flat Top: 0,6 $\mu$ s. . . . .	60
Abb. 39	Vergleichskurven: Rise Time: 1,6 $\mu$ s und Flat Top: 0,8 $\mu$ s. . . . .	62
Abb. 40	Vergleichskurven: Rise Time: 1,6 $\mu$ s und Flat Top: 0,4 $\mu$ s. . . . .	64
Abb. 41	Vergleichskurven: Rise Time: 1,0 $\mu$ s und Flat Top: 0,4 $\mu$ s. . . . .	66
Abb. 42	Vergleichskurven: Rise Time: 0,8 $\mu$ s und Flat Top: 0,4 $\mu$ s. . . . .	68
Abb. 43	Vergleichskurven: Rise Time: 2,0 $\mu$ s und Flat Top: 1,0 $\mu$ s. . . . .	70
Abb. 44	Vergleichskurven: Rise Time: 2,4 $\mu$ s und Flat Top: 0,8 $\mu$ s. . . . .	72
Abb. 45	Vergleichskurven bei einer Energie von 295 keV. . . . .	73
Abb. 46	Vergleichskurven bei einer Energie von 609 keV. . . . .	73
Abb. 47	Vergleichskurven bei einer Energie von 1120 keV. . . . .	74
Abb. 48	Vergleichskurven bei einer Energie von 1764 keV. . . . .	74
Abb. 49	Vergleichskurven bei einer Energie von 2448 keV. . . . .	75
Abb. 50	Abweichung der Zählraten vom 15k Wert bei einer Energie von 295 keV. Zu sehen ist auch eine entsprechende lineare Trendlinie mit der dazugehörigen Gleichung. . . . .	76
Abb. 51	Abweichung der Zählraten vom 15k Wert bei einer Energie von 609 keV. Zu sehen ist auch eine entsprechende lineare Trendlinie mit der dazugehörigen Gleichung. . . . .	77
Abb. 52	Abweichung der Zählraten vom 15k Wert bei einer Energie von 1120 keV. Zu sehen ist auch eine entsprechende lineare Trendlinie mit der dazugehörigen Gleichung. . . . .	78
Abb. 53	Abweichung der Zählraten vom 15k Wert bei einer Energie von 1764 keV. Zu sehen ist auch eine entsprechende lineare Trendlinie mit der dazugehörigen Gleichung. . . . .	79
Abb. 54	Abweichung der Zählraten vom 15k Wert bei einer Energie von 2448 keV. Zu sehen ist auch eine entsprechende lineare Trendlinie mit der dazugehörigen Gleichung. . . . .	80
Abb. 55	Abhängigkeit der Steigung (k) der Trendlinien der Serienmessungen von der Energie. Zu sehen ist auch eine angepasste, lineare Trendlinie mit der dazugehörigen Gleichung. . . . .	81

---



# Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Kombinationen der Address Switches der Canberra AccuSpec/B-Karte [22].	32
Tab. 2	Fünf Linien, die im Rahmen der Diplomarbeit verwendet wurden. . . . .	50
Tab. 3	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 295 keV. . . . .	52
Tab. 4	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 609 keV. . . . .	52
Tab. 5	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1120 keV. . . . .	53
Tab. 6	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1764 keV. . . . .	53
Tab. 7	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 2448 keV. . . . .	53
Tab. 8	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 295 keV. . . . .	54
Tab. 9	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 609 keV. . . . .	55
Tab. 10	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1120 keV. . . . .	55
Tab. 11	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1764 keV. . . . .	55
Tab. 12	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 2448 keV. . . . .	55
Tab. 13	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 295 keV. . . . .	56
Tab. 14	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 609 keV. . . . .	57
Tab. 15	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1120 keV. . . . .	57
Tab. 16	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1764 keV. . . . .	57
Tab. 17	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 2448 keV. . . . .	57
Tab. 18	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 295 keV. . . . .	58
Tab. 19	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 609 keV. . . . .	58
Tab. 20	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1120 keV. . . . .	59

---

Tab. 21	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1764 keV. . . . .	59
Tab. 22	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 2448 keV. . . . .	59
Tab. 23	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 295 keV. . . . .	60
Tab. 24	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 609 keV. . . . .	61
Tab. 25	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1120 keV. . . . .	61
Tab. 26	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1764 keV. . . . .	61
Tab. 27	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 2448 keV. . . . .	62
Tab. 28	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 295 keV. . . . .	63
Tab. 29	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 609 keV. . . . .	63
Tab. 30	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1120 keV. . . . .	63
Tab. 31	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1764 keV. . . . .	64
Tab. 32	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 2448 keV. . . . .	64
Tab. 33	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 295 keV. . . . .	65
Tab. 34	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 609 keV. . . . .	65
Tab. 35	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1120 keV. . . . .	65
Tab. 36	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1764 keV. . . . .	66
Tab. 37	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 2448 keV. . . . .	66
Tab. 38	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 295 keV. . . . .	67
Tab. 39	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 609 keV. . . . .	67
Tab. 40	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1120 keV. . . . .	67
Tab. 41	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1764 keV. . . . .	68
Tab. 42	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 2448 keV. . . . .	68
Tab. 43	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 295 keV. . . . .	69
Tab. 44	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 609 keV. . . . .	69

---

---

Tab. 45	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1120 keV. . . . .	69
Tab. 46	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1764 keV. . . . .	70
Tab. 47	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 2448 keV. . . . .	70
Tab. 48	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 295 keV. . . . .	71
Tab. 49	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 609 keV. . . . .	71
Tab. 50	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1120 keV. . . . .	71
Tab. 51	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1764 keV. . . . .	71
Tab. 52	Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 2448 keV. . . . .	72
Tab. 53	Mittelwerte und Standardabweichungen (SD) der Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 295 keV. . . .	76
Tab. 54	Mittelwerte und Standardabweichungen (SD) der Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 609 keV. . . .	77
Tab. 55	Mittelwerte und Standardabweichungen (SD) der Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1120 keV. . . .	78
Tab. 56	Mittelwerte und Standardabweichungen (SD) der Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 1764 keV. . . .	79
Tab. 57	Mittelwerte und Standardabweichungen (SD) der Referenz*- und Serienmessungen mit unterschiedlichen Zählraten bei einer Energie von 2248 keV. . . .	80
Tab. 58	Steigungen der Trendlinien bei unterschiedlichen Energien. . . . .	81
Tab. 59	Berechnete Grenzzählraten. . . . .	82



# Literaturverzeichnis

- [1] Schumm, T. *Skriptum zur Vorlesung Atom- und Molekülphysik – Quantenmetrologie*, TU Wien, SS2014.
- [2] Volkmer, M. und Koelzer, W. *Radioaktivität und Strahlenschutz.*, Informationskreis Kernenergie, 2002, Bonn.
- [3] Bichler, M. *Skriptum zur Vorlesung Radiochemie*, Technische Universität Wien, 6. Auflage 2009.
- [4] Universität Stuttgart: [http://www.iris.uni-stuttgart.de/lehre/eggenberger/eti/07\\_Spannung/BohrModell.htm](http://www.iris.uni-stuttgart.de/lehre/eggenberger/eti/07_Spannung/BohrModell.htm)
- [5] Ilić, Ž. *Analysen zur Thermolumineszenz-(TL)-Ausbeute und der TL-Glowkurvenstruktur in Abhängigkeit von der Messelektronik und der Aufheiztechnik*, Protokoll zur Projektarbeit aus Strahlenschutz und Dosimetrie, ATI Wien, 2015.
- [6] Krieger, H. *Strahlungsmessung und Dosimetrie*, Springer Spektrum, Auflage: 2., überarb. u. erw. Aufl. 2013 (20. November 2012).
- [7] Krieger, H. *Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutze*, Vieweg+Teubner Verlag; Auflage: 3., überarb. u. erw. Aufl. 2009 (24. September 2009)
- [8] Demtröder, W. *Experimentalphysik 4 – Kern, Teilchen- und Astrophysik*, Springer Spektrum, 4. Auflage 2014 (22. Oktober 2013), Berlin.
- [9] Vana, N. *Strahlenschutz und Dosimetrie*, Vorlesungsunterlagen, Technische Universität Wien, WS2014.
- [10] <http://ati.tuwien.ac.at/reaktor/fotos>
- [11] ETH Zürich: <http://www.analytik.ethz.ch/vorlesungen/radiochemie/Nukleonik.pdf>

- 
- [12] Strelj, C. und Poljanc, K. *Strahlenphysik*, Vorlesungsunterlagen, TU Wien, SS2015.
- [13] Leibniz-Universität-Hannover: [http://www.irs.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/praktikum/gamma\\_spek.pdf](http://www.irs.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/praktikum/gamma_spek.pdf)
- [14] [http://www.canberra.com/products/radiochemistry\\_lab/pdf/G2K-BasicSpect-SS-C40220.pdf](http://www.canberra.com/products/radiochemistry_lab/pdf/G2K-BasicSpect-SS-C40220.pdf)
- [15] <http://www.biography.com/people/mark-dean-604036>
- [16] <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/com/0310071.htm>
- [17] <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/industry-standard-architecture-ISA-ISA-Bus.html>
- [18] *ARS Technologies 'USB2', 'SSI2', and 'XPRS' families of products User's Guide*, ARS Technologies, USA, 2011.
- [19] *Genie 2000 Tutorials*, Canberra Industries, USA, 2004 (Manual).
- [20] *Genie 2000 Operations*, Canberra Industries, USA, 2001 (Manual).
- [21] *Genie 2000 Customization Tools*, Canberra Industries, USA, 2006 (Manual).
- [22] *Historical Canberra MCAs*, Canberra Industries, USA, 2002 (Manual).
- [23] *DSA-1000 Digital Spectrum Analyzer*, Canberra Industries, USA, 2002 (Manual).
- [24] *High-Count-Rate Spectroscopy with Ge Detectors: Quantitative Evaluation of the Performance of High-Rate Systems* (Paper).  
<http://www.ortec-online.com/Service-Support/Library/Technical-Papers.aspx#Digital>

- 
- [25] *Ortec News; Wat is'n High-Count-Rate-System?; ORTEC Wissen: Analoge Meßkette und Ultrahohe Zählraten* (German Newsletter).  
[www.ortec-online.com/download/german-newsletter-december-2011.pdf](http://www.ortec-online.com/download/german-newsletter-december-2011.pdf)
- [26] <http://www.chemryb.at/chemie1/radioaktivitaet/kernkraftwerk/kernreak.htm>
- [27] Ilić, Ž. *Überprüfung des Loss-free Gamma-Spektrometers auf Zählverluste bei mittleren bis hohen Zählraten*, Protokoll zur Projektarbeit aus Radiochemie, ATI Wien, 2015.
- [28] <http://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/radioaktivitaet-fortfuehrung/versuche/gammaspektrum-von-cs-137>
- [29] <http://disbauxes.upc.es/code/applied-physics-department/dealing-with-the-ars-usb2isa-hardware-emulator-1/>
- [30] *A Practical Guide to High Count Rate Germanium Gamma Spectroscopy* (Application note).  
[http://www.uio.no/studier/emner/matnat/fys/FYS4510/h05/High\\_count\\_rate\\_systems.pdf](http://www.uio.no/studier/emner/matnat/fys/FYS4510/h05/High_count_rate_systems.pdf)
- [31] Gerardi, G. und Abbene, L. *A digital approach for real time high-rate high-resolution radiation measurements*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 768, Pages 46–54, Italy, 21 December 2014.