

**Entwicklung und Implementation
von Monte-Carlo-Simulationen
zur Auswertung von Messungen
mit dem Kölner Ganzkörperzähler**

Inaugural - Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Universität zu Köln

vorgelegt von

Bastian Breustedt

aus Koblenz

copy team cologne, Köln

Berichterstatter: Prof. Dr. J. Jolie
Prof. Dr. H. Schicha
Tag der mündlichen Prüfung: 31. Januar 2005

Zusammenfassung

Mit Ganzkörperzählern können radioaktive Stoffe im menschlichen Körper gammaspektrometrisch identifiziert und quantifiziert werden. Durch Messungen mit Phantomen, die das Schwächungsverhalten des menschlichen Körpers für Strahlung nachbilden, werden die zur Berechnung der inkorporierten Aktivität benötigten Effizienzfaktoren für ausgewählte Nuklide gewonnen.

Für den Kölner Ganzkörperzähler wurde die Spektrometrie in Monte-Carlo-Rechnungen mit dem EGSnrc System simuliert. Die mit Flaschenphantomen gemessenen Spektren konnten qualitativ und quantitativ durch die Simulationen nachvollzogen werden. Für verschiedene Nuklide können Nachweiswahrscheinlichkeiten durch die Simulation ihrer Zerfalleigenschaften gewonnen werden. Alternativ können die Nachweiswahrscheinlichkeiten durch eine gewichtete Summation von Effizienzen, die sich aus der Simulation fiktiver monoenergetischer Nuklide ergeben, berechnet werden (Kombinationsmethode). Durch die Simulationen können nun auch Nuklide quantifiziert werden, für die keine Phantommessungen möglich sind. Zur Bearbeitung der durch Simulationen und Messungen gewonnenen Spektren wurde eine C++-Klasse **Spektrum** entwickelt. Basierend auf dieser Klasse und der Grafikbibliothek Qt3 wurde das **BCMC-System** zur Berechnung der Effizienzfaktoren und zur Auswertung gemessener Spektren entwickelt und implementiert. Das System konnte z.B. in der Auswertung der Ringvergleiche des BfS erfolgreich angewendet werden.

Durch die Möglichkeit, in den Simulationen beliebige Nuklide und Geometrien zu verwenden, können mit dem **BCMC-System** verschiedene Kalibrationen für den Ganzkörperzähler erstellt und verwendet werden. Der Ganzkörperzähler wird damit zu einem universellen "low-level-Aktivimeter" mit höchster Nachweisempfindlichkeit.

Abstract

Radioactive substances in the human body can be identified and quantified by gamma spectroscopy using whole body counters. Counting efficiencies needed for calculation of incorporated activities are generally determined from measurements of phantoms simulating shape and density of a human and filled with known activity concentrations.

The Cologne whole body counter setup was simulated using the EGSnrc Monte Carlo code system. The simulations did reproduce the spectra and efficiencies from phantom measurements. The efficiencies can be deduced by simulating the nuclides directly or by weighted summation of efficiencies generated from simulation of fictitious monoenergetic gamma emitters (combination method). Nuclides which are inaccessible to phantom measurements can thus be quantified. Methods for manipulating measured and simulated spectra were implemented in a C++-class **Spektrum**. The **BCMC-System** for determining efficiencies and calculating activities from measured spectra was developed using this class and the graphics toolkit Qt3 . The system was successfully used , e.g. in the interpretation of the measurements for the BfS intercomparison exercise.

The Monte Carlo Simulations provide the opportunity to use any nuclide and variable source geometries for the calibration. Calibrations for many kinds of measurement with the cologne whole body counter setup can be deduced and applied using the new **BCMC-System**. The whole body counter can be used to detect and quantify lowest level activities in almost any kind of sample.

Inhaltsverzeichnis

1	Ganzkörperzähler	1
1.1	In-Vivo-Messung von Radioaktivität - Inkorporationsmessungen	1
1.1.1	Ganzkörperzähler	3
1.1.2	Auswertung der in-Vivo Messungen	6
1.1.3	Empfindlichkeit der in-Vivo Messungen	9
1.2	Der Kölner Ganzkörperzähler	13
1.2.1	Aufbau	13
1.2.2	Untergrund	15
1.2.3	Auswertung der Inkorporationsmessungen	18
1.2.4	Kalibration	20
2	Monte-Carlo-Methoden	23
2.1	Simulationen und die Monte-Carlo-Methode	23
2.2	Simulation eines Strahlungsfeldes	24
2.2.1	Photonen	24
2.2.2	Elektronen	27
2.2.3	Transportalgorithmus für Photonen	28
2.2.4	Transportalgorithmen für Elektronen	29
2.3	Monte-Carlo-Systeme zur Simulation eines Strahlungsfeldes	32
2.3.1	Das EGSNrc-System	33
2.3.2	Das MCNP-System	35
3	Kalibration des Kölner Ganzkörperzählers	39
3.1	Effizienzkalibration durch Phantommessungen	39
3.1.1	Zur Energieeichung des GKZ	41
3.2	Simulation des Kölner Ganzkörperzählers	43
3.2.1	Vergleich der MC-Systeme EGSNrc und MCNP für die Simulation eines Ganzkörperzählers	45
3.2.2	Der EGSNrc-usercode Flaschenphantom	49
3.2.3	Simulationen in der Flaschenphantomgeometrie	58
3.2.4	Die Kombinationsmethode	65
3.3	Zur Auswertung der Spektren	71
3.3.1	Die C++-Klassen Spektrum, Effmatrix und Nuklidvektor	71
3.3.2	Eine Alternative zur Auswertung durch eine Effizienzmatrix	78

3.4	Beispiel: Die Ringversuche 2001 und 2003	82
3.5	511keV-Zerfallsereignisse im Bodycounter	84
4	Diskussion und Ausblick	91
	Literaturverzeichnis	95
A	Das BCMC-Soft-System	105
A.1	Allgemeines und Systemvoraussetzungen	105
A.1.1	Installation	105
A.1.2	Dateiformate	105
A.1.3	Gemeinsame Dialoge	108
A.2	Programm: Effizienzberechner	113
A.2.1	Berechnungsschritte	115
A.3	Programm: Auswertetool	116
A.4	Programm: Kombinationsmethodentool	121
A.4.1	Berechnungsschritte	122
A.5	Programm: Annihilationstool	123
A.6	Programm: qktool	125
B	Beispiele für Kalibrierfunktionen	127
B.1	Kalibrierkurven für die Auswertung der Ringversuche	127
B.2	Nuklide aus der Nuklearmedizin	131

Abbildungsverzeichnis

1.1	Messgeometrien in Ganzkörperzählern.	5
1.2	Zur Auswertung von Gammaspektren.	7
1.3	Zur Definition der charakteristischen Grenzen.	10
1.4	Aufbau des Kölner Ganzkörperzählers.	14
1.5	Untergrundspektrum des Kölner Ganzkörperzählers.	16
1.6	Zählraten in den Untergrundspektren aus den Jahren 2002 und 2003. . .	16
1.7	Spektrum der Radonfolgeprodukte.	17
1.8	Zählrate in in der 609keV-ROI während der Abschaltung der Klimaanlage. 18	
1.9	Typisches Gammaspektrum einer Personenmessung.	19
1.10	Flaschenphantom.	20
1.11	Ziegelphantom "Igor".	21
2.1	Relative Bedeutung der Wechselwirkungsprozesse von Photonen.	25
2.2	Massenschwächungskoeffizienten von Wasser.	27
2.3	Flussdiagramm zur vereinfachten Photonentransportlogik.	29
2.4	Flussdiagramm zur vereinfachten Elektronentransportlogik.	31
2.5	Die Struktur des EGSNrc-Systems.	34
2.6	Die grafische Oberfläche des <code>mcnpvised</code>	36
2.7	MCNP-Plot des 70kg-Flaschenphantoms.	37
2.8	^{40}K -Spektrum des 70kg-Flaschenphantoms aus der MCNP-Simulation. . .	37
3.1	Durch Messungen mit dem Flaschenphantom bestimmte Effizienz- Massenkurve für $^{40}\text{K} \leftarrow ^{40}\text{K}$	40
3.2	Relative Zählraten der QK-Messungen aus dem Jahr 2003.	41
3.3	Abweichung der angezeigten Energie von der tatsächlichen.	43
3.4	Verschiedene Energieeichungen für ein Spektrum der ^{22}Na -Quelle.	44
3.5	Vergleich des gemessenen mit den simulierten ^{40}K -Spektren im 30kg- Flaschenphantom.	46
3.6	Auszug aus der MCNP-INP Datei für die Simulation des Kölner Ganzkörperzählers.	48
3.7	Blockdiagramm für den usercode <code>Flaschenphantom</code>	50
3.8	Steuerdatei zur Simulation des 10kg-Phantoms (Nuklid ^{131}I).	51
3.9	Auszug aus der Nukliddatei für das Nuklid ^{131}I	53
3.10	Das Modell der Messkammer.	54
3.11	Das Modell der Detektoren.	58

3.12	Vergleich des simulierten mit zwei gemessenen ^{131}I -Spektren im 70kg-Flaschenphantom.	59
3.13	Phasenraumdarstellung der simulierten Flaschenphantome.	60
3.14	Kalibrierkurve für den Nachweis von ^{131}I	61
3.15	Vergleich des gemessenen ^{40}K -Spektrums im 70kg-Flaschenphantom.	62
3.16	Zum Bremsstrahlungsanteil des ^{40}K -Spektrums.	63
3.17	Zum Anteil der Streuung im Phantom.	64
3.18	Vergleich von Messung und Simulation einer ^{22}Na -Quelle.	65
3.19	Energieabhängigkeit der Effizienz, bestimmt aus Messungen und Simulationen im 70kg-Flaschenphantom.	66
3.20	Energie-Effizienz-Kurven für die Bestimmung der Effizienzen $^{131}\text{I} \leftarrow ^{131}\text{I}$ und $^{99m}\text{Tc} \rightarrow ^{131}\text{I}$	68
3.21	Effizienz-”Gebirge” für das 70kg-Flaschenphantom.	70
3.22	kombitool: Programm zur Berechnung von Effizienzen mit der Kombinationsmethode.	71
3.23	Auszug aus der Headerdatei <code>spektum.h</code> für die C++-Klasse <code>Spektrum</code>	74
3.24	effizienzberechner: Programm zur Berechnung von Kalibrierkurven aus gemessenen oder simulierten Spektren.	76
3.25	auswertetool: Programm zur Auswertung von Messungen mit dem Kölner Ganzkörperzähler.	77
3.26	Verhältnis der mit den beiden Auswerteprogrammen ermittelten ^{40}K -Aktivitäten.	77
3.27	Das Programm <code>peakbg</code> zur Berechnung eines Peakuntergrundes.	79
3.28	Trennung des ^{40}K Peaks von den beiden ^{60}Co Peaks durch Gaußkurven.	81
3.29	Ringversuch 2003: Spektrum des Phantoms ”Igor” und Simulation dazu.	83
3.30	Spektren des 511keV-Anteils einer Messung und Simulationen dazu.	85
3.31	Zählratenverlauf in der 511keV-ROI am 10.05.2004.	86
3.32	Vergleich des Spektrums der 511keV-Messung am 10.05.2004 mit dem Untergrundspektrum vom Vorwochenende.	87
3.33	Zur Modellierung des Zählratenverlaufs im Kompartimentformalismus.	88
3.34	Zählratenverlauf in der 511keV-ROI am 26.05.2004.	89
3.35	Zur Auswirkung der 511keV-Ereignisse auf die Auswertung einer Messung.	90
A.1	Die Datei ” <code>Beispiel.rois</code> ”.	107
A.2	Die Datei ” <code>Beispiel.rois.eff</code> ”.	107
A.3	Auszug aus einer Personendatenbank.	108
A.4	Der Dialog ”Bildanzeige”.	109
A.5	Der Dialog ”ROI-Übersicht”.	110
A.6	Der Dialog ”ROI-Datenbank bearbeiten”.	111
A.7	Der Dialog ”Personendatenbank bearbeiten”.	112
A.8	Das Hauptfenster des Effizienzberechners.	113
A.9	Das Hauptfenster des Auswertetools.	116
A.10	Das Matrix-Fenster.	118
A.11	Das Anzeigefenster für die HTML-Hilfe.	119

A.12	Eintrag in die Datei "Auswertung.log".	119
A.13	Das <code>kombitool</code> zur Berechnung von Effizienzen mit der Kombinations- methode.	121
A.14	Initialisierungsdatei für das <code>kombitool</code>	122
A.15	Das Annihilationstool.	123
A.16	Das <code>qktool</code>	125
A.17	Beispieldatei einer Sollmessung für das <code>qktool</code>	126
B.1	^{40}K -Spektrum im 70kg-Flaschenphantom.	131
B.2	^{131}I -Spektrum im 70kg-Flaschenphantom.	132
B.3	^{99m}Tc -Spektrum im 70kg-Flaschenphantom.	133
B.4	^{18}F -Spektrum im 70kg-Flaschenphantom.	134

Tabellenverzeichnis

1.1	Messgeometrien in Ganzkörperzählern.	6
1.2	Parameter zur routinemäßigen Inkorporationsüberwachung durch in- Vivo-Messung.	12
1.3	Typische Werte für die Komponenten der Messunsicherheiten.	12
1.4	Auswertung des Personenspektrums.	20
1.5	Erkennungs- und Nachweisgrenzen des Kölner GKZ.	22
2.1	Monte-Carlo-Systeme.	32
3.1	Energie-Kanal-Zuordnung durch die Messsoftware.	42
3.2	Vergleich der Zählraten in den simulierten ^{40}K -Spektren.	47
3.3	Effizienzen für das 70kg-Phantom.	59
3.4	Vergleich der Zählraten in den ^{40}K -Spektren (im 70kg-Phantom).	62
3.5	Zur Berechnung der Effizienz $^{131}\text{I} \rightarrow ^{131}\text{I}$	69
3.6	Zur Berechnung der Effizienz $^{131}\text{I} \rightarrow ^{99m}\text{Tc}$	69
3.7	Vergleich der berechneten Effizienzwerte.	69
3.8	Zur Auswertung der Ringversuche 2001 und 2003.	84
A.1	Zuordnung der Funktionstypen für die Kalibrierfunktionen.	106
A.2	Zuordnung der Integrationsmethoden.	106
A.3	Angaben in der Personendatenbank.	108
A.4	Die Menüstruktur des Auswertetools.	120

1 Ganzkörperzähler

Die Verwendung radioaktiver Stoffe und sonstiger Quellen ionisierender Strahlung in Medizin, Forschung und weiteren Gebieten birgt das Risiko einer Strahlenexposition für die dort beschäftigten Personen. Um dieses Risiko zu verringern und Folgeschäden zu vermeiden ist aus Strahlenschutzgründen neben geeigneten Schutzmaßnahmen am Arbeitsplatz eine Dosisüberwachung exponierter Personen notwendig. Geregelt wird das jeweils gültige Vorgehen in Deutschland durch die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) [Bun02a] und ihr angegliederte Richtlinien [Bun94, Bun96, Bun97, Bun02b].

Beim Umgang mit Anlagen, die ionisierende Strahlung erzeugen (z.B. Teilchenbeschleuniger), ist es in den meisten Fällen ausreichend die externe Strahlenexposition zu überwachen (z.B. durch Filmplaketten). Wird an den Arbeitsplätzen mit offenen radioaktiven Stoffen umgegangen (z.B. in nuklearmedizinischen Praxen und Kliniken), besteht die Gefahr, dass die Radionuklide auch in die Körper der dort arbeitenden Personen gelangen. Dies erfordert zusätzliche Überwachungsmaßnahmen z. B. durch die direkte Messung der Körperaktivität. Ziele einer solchen Inkorporationsmessung sind der Nachweis und die Quantifizierung von Radionukliden im menschlichen Körper. Aus den im Körper gemessenen Aktivitäten können Dosiswerte für betroffene Organe abgeschätzt werden. Voraussetzung für den Nachweis einer Inkorporation ist die Retention des entsprechenden Elementes im Körper, d. h. es müssen Stoffwechselfade vorliegen, über die das Nuklid in den Körper aufgenommen und gegebenenfalls wieder ausgeschieden wird.

1.1 In-Vivo-Messung von Radioaktivität - Inkorporationsmessungen

Der Nachweis und die Quantifizierung inkorporierter Radioaktivität kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen. Bei *in-Vitro-Messungen* wird eine Probe (z.B. Gewebe oder Exkrete) in einem Bohrlochmessplatz vermessen. Die Bestimmung der Probenaktivität kann mit hoher Genauigkeit erfolgen, da die Probe vor der Messung bearbeitet (gelöst, homogenisiert, ...) werden kann. Aus der Probenaktivität kann mit geeigneten Modellen für den Metabolismus des zu untersuchenden Nuklids auf die inkorporierte Aktivität geschlossen werden. Die Berechnung der tatsächlich inkorporierten Aktivität aus dem Probenmesswert ist jedoch stark fehleranfällig und modellabhängig, da hier Annahmen über Aufnahme, Speicherung und Ausscheidung des Stoffes im Körper zu Grunde gelegt werden müssen. Diese Methode ist für alle Strahlenarten möglich, jedoch können nur

Nuklide bestimmt werden, die auch ausgeschieden werden bzw. entnommen werden können. Stoffe, die im Körper verbleiben, sind auf diese Weise nicht nachgewiesbar.

Die Alternative ist die direkte gammaspektrometrische Bestimmung der Körperaktivität *in-Vivo*. Es wird Strahlung nachgewiesen, die den Körper verlässt. In Ganzkörpermessungen können demnach nur Nuklide, die γ -Quanten mit ausreichend hoher Energie ($E_\gamma \geq 60\text{keV}$) emittieren, nachgewiesen werden. Zum Nachweis von Nukliden, welche niederenergetische Photonen emittieren, kommen Teilkörperzähler (z.B. Lungenzähler) mit optimierten Detektoren (Phoswich) zum Einsatz. In allen Fällen ist die Veränderung des Strahlenfeldes durch Absorptions- und Streuprozesse im Gewebe zu berücksichtigen.

Die ersten *in-Vivo* Messungen radioaktiver Stoffe im menschlichen Körper erfolgten bereits in den 20er Jahren des vorigen Jahrhunderts. Schlundt und Partner verwendeten Ionisationskammern um Radium (^{226}Ra im Gleichgewicht mit den Tochternukliden) nachzuweisen. Sie konnten so mit Messdauern von zwei Stunden und länger Aktivitäten oberhalb von ca. 200000Bq nachweisen. Durch die Bogentechnik von Evans konnte 1930 die Nachweisgrenze (NWG) auf 3700kBq gesenkt werden [Pou81]. In Deutschland wurden die ersten dokumentierten *in-Vivo* Messungen 1927 von Blumgart und Wiese mit Ionisationskammern durchgeführt. Sie untersuchten bei einer Nachweisgrenze (NWG) von 200000Bq bis 3700000Bq die Durchblutung des Körpers mit Radium als Tracersubstanz. Die erste deutsche Inkorporationsmessstelle ("Untersuchungsstelle für die physikalische Diagnostik der Radiumvergiftungen") wurde bereits 1938 am Kaiser-Wilhelm-Institut für Biophysik in Frankfurt gegründet [Doe04]. 1948 konnte Sievert in Stockholm durch die Verwendung einer zylinderförmigen Anordnung von zehn Ionisationskammern die Nachweisgrenze bei einer Messdauer von drei bis vier Stunden nochmals um den Faktor 100 reduzieren. Der ganze Aufbau befand sich zur besseren Abschirmung des Strahlungsuntergrundes 50m unter der Erdoberfläche in einem Granitfelsen [Doe04]. Diese Technik wurde von vielen Autoren (z.B. Spiers, Burch und Rundo) in den 50er Jahren kopiert [IAEA64]. Eine Trennung der inkorporierten Radionuklide war in diesen Messungen allerdings nicht möglich, da keine Energiespektren der emittierten Strahlung gewonnen wurden. Dies wurde erstmals in den 50er Jahren möglich durch den Einsatz von Flüssigszintillatormaterialien (1956 Anderson in Los Alamos) und Plastikszintillatoren (1958 Bird und Burch) [Pou81]. Diese Materialien besitzen ein sehr schlechtes Energieauflösungsvermögen und eine nichtlineare Energieabhängigkeit, die bei der Kalibrierung berücksichtigt werden muss. Ein echter nuklidspezifischer Nachweis konnte erst durch die Verwendung von NaI(Tl) Kristallen als Szintillationszähler (1955 Marinelli) erreicht werden [Pou81]. Durch Antikoinzidenztechniken (1968 Laurer: Phoswichdetektor) konnten mit solchen Kristallen in Teilkörperzählern erstmals auch niederenergetische Strahler (z.B. ^{241}Am $E_\gamma = 59\text{keV}$) nachgewiesen werden [Doe04]. Die Verwendung von Halbleiterzählern mit besserem Energieauflösungsvermögen (1970 Anderson: GeLi-Kristalle) ermöglichte auch die Trennung energetisch dicht beieinander liegender Nuklide (z.B. ^{131}I mit $E_\gamma = 364\text{keV}$ und ^{133}Ba mit $E_\gamma = 356\text{keV}$). Erst die Kristalldetektoren (NaI(Tl), Ge)

ermöglichten die Entwicklung der Ganzkörperzählermessung zum Standardverfahren in der Inkorporationsüberwachung. In Deutschland gibt es heute ca. 40 Ganzkörperzähler (22 davon in amtlich bestellten in-Vivo Inkorporationsmessstellen), die mit solchen Detektoren ausgestattet sind [Doe04].

Erst am Ende der 50er Jahre wurden Nachweisgrenzen erreicht, die den Nachweis und die Quantifizierung natürlicher Aktivitäten im menschlichen Körper ermöglichen. Im menschlichen Körper befindet sich eine nicht vernachlässigbare Menge an natürlicher Radioaktivität. Für eine 70kg schwere Person beträgt die Aktivität durch natürliche radioaktive Stoffe ca. 9000Bq, wovon etwa die Hälfte auf das Nuklid ^{40}K entfällt. Unvoreilhafterweise hat gerade dieses Nuklid mit 1460keV eine relativ hohe Gammaenergie und erzeugt ein ausgedehntes Comptonkontinuum im Spektrum. Zählereignisse einer eventuellen Inkorporation fallen meistens in diesen Spektrenbereich ($\approx 200 - 1200\text{keV}$). Zur Quantifizierung der Inkorporation müssen diese von den Untergrundereignissen getrennt werden. Dadurch wird die Detektionsempfindlichkeit limitiert.

Bereits 1956 fand in Leeds das erste, von der International Atomic Energy Agency (IAEA) organisierte, Symposium über in-Vivo Methoden zum Nachweis radioaktiver Stoffe im menschlichen Körper statt. 1964 wurde das erste "IAEA Directory of whole body radioactivity monitors (Low Activity Levels)" [IAEA64] herausgegeben, eine Übersicht über bestehende Messeinrichtungen mit Datenblättern zu den einzelnen Einrichtungen. In diesem Band wird bereits auf die Pläne zur Errichtung des Kölner Ganzkörperzählers hingewiesen. Die IAEA und die ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurement) geben auch heute noch regelmäßig Publikationen zum Stand der Technik für in-Vivo Messungen heraus [IAEA96, ICRU03]. Die europäische Kommission veröffentlichte im Jahr 1994 einen Leitfaden für die Kalibration der in-Vivo Messgeräte und zur Bewertung der Messergebnisse [EUR94]. Die nordamerikanische Health Physics Society erarbeitete 1996 gemeinsam mit dem American National Standards Institute einen Kriterienkatalog für die Messung radioaktiver Stoffe im menschlichen Körper [HPS96]. Die Anforderungen an die Genauigkeit der Messergebnisse aus amtlich anerkannten Messstellen in Deutschland wird durch die Strahlenschutzverordnung und die nachgeordneten Richtlinien gesetzlich geregelt [Bun94, Bun96, Bun97, Bun02a, Bun02b]. Nach der Novellierung der Strahlenschutzverordnung 2002 steht die Überarbeitung der Richtlinien teilweise noch aus.

1.1.1 Ganzkörperzähler

"Ein Ganzkörperzähler (GKZ, engl. whole body counter) ist eine Meßeinrichtung, mit der man die gesamte, im Organismus vorhandene Aktivität eines oder mehrerer gammastrahlender Radionuklide auch bei geringer Aktivität bestimmen kann" [Obe80, Seite 218]. Ganzkörperzähler bestehen aus drei Komponenten: Abschirmung, Messplatz und Auswertungssystem.

Abschirmung Problematisch bei der in-Vivo Messung ist der natürliche Strahlungsuntergrund. Dieser stammt einerseits aus der Messumgebung (kosmische Strahlung und Radionuklide in der Messumgebung und den Detektoren) und kann durch Abschirmung verringert werden. Andererseits befindet sich im Messobjekt, dem menschlichen Körper, eine nicht unwesentliche Menge an natürlicher Radioaktivität. Ohne zusätzliche Abschirmung sinkt allerdings die Zählrate im Messgerät bei Annäherung der zu messenden Person. Die Abschirmwirkung gegenüber der Höhenstrahlung und der Umgebungsgammastrahlung ist also größer als der Messbeitrag der von ihm ausgehenden Gammastrahlen. Eine Reduzierung des Nulleffektes um einen Faktor zehn bis hundert ist notwendig [Obe80]. Zur Untergrundreduktion wird der Messplatz durch Wassertanks oder eine Stahlkammer abgeschirmt. Oft wird der Messplatz zusätzlich mit gefilterter Luft versorgt, um einen Eintrag von Aktivität (z. B. Radon) aus der Umgebungsluft zu vermeiden. Der Strahlungsuntergrund besitzt drei Komponenten:

1. Kosmische Höhenstrahlung,
2. Radionuklide in der Raumluft (Radon) und der Messumgebung (Verunreinigungen im Kammermaterial, ...),
3. Natürliche Radionuklide im Körper.

Die Höhenstrahlungs- und die Radonkomponente sind zeitlich veränderlich. Letztere ist abhängig von der Luftwechselrate in der Kammer und dem verwendeten Filtersystem (vgl. Kapitel 1.2.2). Der Untergrundanteil aus der Messumgebung kann durch die Verwendung von Materialien mit möglichst niedriger Eigenaktivität gering gehalten werden. Die Glashülle der Photomultiplier für Szintillationskristalle enthält auch das in der Person messbare ^{40}K . Blei kann durch natürliche radioaktive Elemente (z.B. ^{210}Pb) verunreinigt sein. Verwendet wird heute bevorzugt Stahl aus alten (d.h. vor den Kernwaffentests in der Atmosphäre gebauten) Schiffen oder aus abgeschliffenen Eisenbahnschienen. Neuere Stähle enthalten geringe, die Messung bereits störende Mengen an Radionukliden. Diese stammen aus dem Fallout der Atomwaffentestphase bzw. dem Reaktorunglück von Tschernobyl oder aus modernen Verhüttungsverfahren¹. Die aus diesen Aktivitäten resultierenden Strahlendosen liegen auch im ungünstigsten Expositionsfall weit unterhalb der Grenzwerte der StrlSchV, jedoch würde der zusätzliche Strahlungsuntergrund zu einer Verschlechterung der Nachweiswahrscheinlichkeit in der hochempfindlichen Gammamessung führen. Bis zu einer Abschirmungsdicke von 10cm (Stahl) beobachtet man eine große Verringerung des Untergrundes, darüber hinaus nur noch geringe Änderungen. Die Erhöhung der Wanddicke auf 20cm ist nur notwendig für die Bestimmung des ^{40}K -Gehalts mit großer Genauigkeit [Obe80]. Die Innenwände der Messkammern werden zusätzlich mit Blei ausgekleidet. Alternative Schirmungsmodelle sind: aktivitätsarmes Kalkgestein mit Bleiauskleidung, Quarzsand und Wassertanks. Wichtig ist in allen Fällen eine ausreichende Masse und eine niedrige Eigenaktivität des Schirmungsaterials.

¹Die Hochofenwanddicke wird heute oft durch eine radioaktive Markierung (meistens ^{60}Co) der Wand überwacht. Teile dieser Markierung gelangen durch Abbrand in den Stahl.

Messplatz Der eigentliche Messplatz besteht aus einem oder mehreren Detektoren, die um den Körper der zu messenden Person angeordnet sind. Die Verwendung von Kristalldetektoren ermöglicht durch die leichte Handhabbarkeit eine größere Freiheit in der Wahl der Messgeometrie. Abbildung 1.1 und Tabelle 1.1 geben einen Überblick über die heute üblichen Aufbauten in Ganzkörperzählern und ihre Besonderheiten. In der *Liegegeometrie* liegt die Person auf einem Bett, um das herum die Detektoren zum Beispiel in der *"Stretcher"-Anordnung* positioniert sind. Alternativ wird ein großer Detektor oder ein Array aus mehreren kleinen Detektoren (berichtet wird von bis zu 54 Detektoren im GKZ des Brookhaven National Laboratory) verwendet, der sich während der Messung über die Person hinweg bewegt (*scanning-bed Geometrie*). In der *Stuhlgeometrie* sitzt die Person auf einem Stuhl, die Detektoren sind vor und/oder hinter dem Brustkorb/Rumpf platziert. Dieser Aufbau wird mit veränderter Detektorposition auch für Teilkörpermessungen (Lunge) verwendet. Manchmal wird als Abwandlung der Stuhlgeometrie eine gebeugte Sitzhaltung eingenommen. Der Detektor wird dann vom Körper umgeben. In der *"Shadow Shield"-Technik* wird ein kollimierter Detektor verwendet. Die Abschirmung des Detektors und von Teilen des Messplatzes sorgen dafür, dass der Detektor nur von Strahlung aus dem Körper getroffen werden kann. Alle anderen Strahlungsquellen liegen im Sichtschatten des Detektors. Dieser Aufbau wird auch in vielen Funktionsmessplätzen in der Nuklearmedizin (z.B. Schilddrüsenmessplatz) verwendet. Für Ganzkörpermessungen muss der Detektor über den Körper bewegt werden.

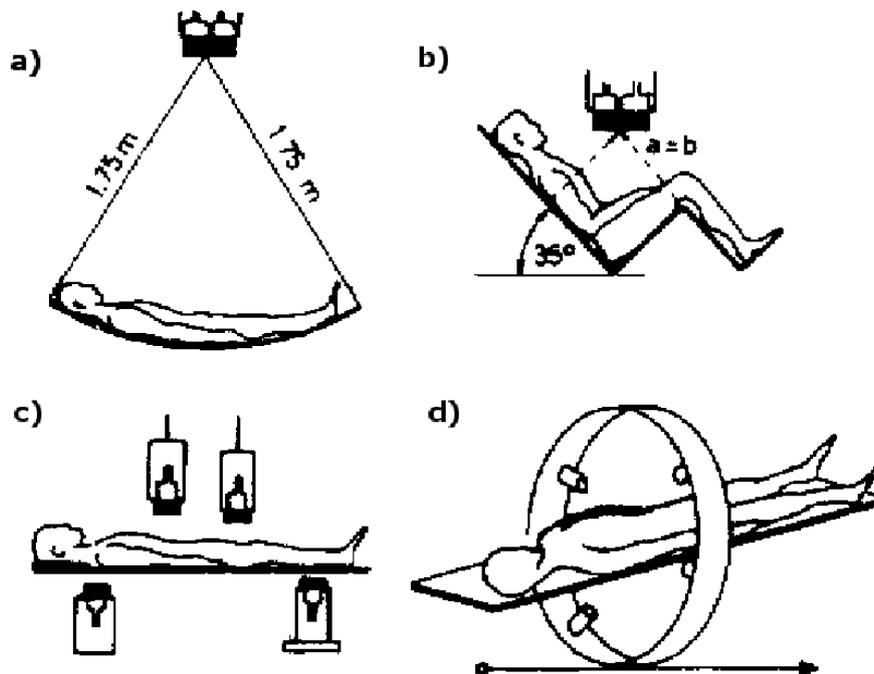


Abbildung 1.1: Messgeometrien in Ganzkörperzählern (aus [Obe80]).

- a) Bogentechnik b) Tilting Chair
c) "Stretcher"-Anordnung d) Scanning Bed

Geometrie	Autor (Jahr)	Besonderheiten
Bogentechnik	Evans (1937)	Die Ausbeute ist unabhängig von der Längsverteilung.
Tilting Chair	Miller/Marinelli (1956)	Mit einem kleinen Detektorvolumen ist eine hohe Ausbeute beim Nachweis hochenergetischer Gammastrahlung möglich.
”Stretcher”-Anordnung	Rundo (1958)	Die Ausbeute ist unabhängig von der Längsverteilung, aber höher als bei der Bogentechnik.
Scanning Bed	Linden/Mc Gall (1964)	Die Längsverteilung der Aktivität kann beobachtet werden.
Shadow-Shield	Palmer/Roesch (1965)	Nur der Detektor und Teile seiner Umgebung müssen abgeschirmt werden.

Tabelle 1.1: Messgeometrien in Ganzkörperzählern.

Auswertungssystem Die Datenanalyse und Auswertung der Spektren erfolgt nach der Messung mit Spektroskopieprogrammen auf einem PC. Mit diesen werden zunächst die inkorporierten Nuklide durch die Peaklage identifiziert und über die Peakfläche quantifiziert. Aus den ermittelten Aktivitäten können durch geeignete Modelle Dosiswerte für einzelne Organe oder den Ganzkörper berechnet werden. Die Auswertung kann quasi online durchgeführt werden, so dass bereits unmittelbar nach der Messung erste Ergebnisse zur Verfügung stehen. Die in-Vivo Methode eignet sich daher besonders in akuten Fällen (z.B. im Notfallszenario) zur Bestimmung inkorporierter Aktivitäten.

1.1.2 Auswertung der in-Vivo Messungen

In einem Gammaspektrum können die Nuklide anhand ihrer charakteristischen Gammaemissionen identifiziert werden. Dies setzt eine ”funktionierende” Energiekalibrierung des Messgerätes voraus. Im Spektrum findet man auf Grund des endlichen Auflösungsvermögens der Detektoren keine scharfen Linien, sondern ”breite” Peaks an den entsprechenden Energien. Die Fläche der Peaks ist proportional zu der im Körper enthaltenen Aktivität. Die Proportionalitätsfaktoren $\tilde{\epsilon}$ (Effizienzen) ordnen den Zählraten im Spektrum Aktivitäten im gemessenen Körper zu. Zwei Verfahren kommen zur Bestimmung der Zählraten im gemessenen Spektrum zum Einsatz (vgl. Abbildung 1.2):

- *Peak-Technik*: Durch einen geeigneten Untergrundabzug wird die Netto-Peakfläche bestimmt. Diese Methode wird vor allem bei Halbleiterspektren verwendet, da der Untergrund unter den ”schmalen” Peaks durch eine Gerade sehr gut angenähert werden kann. Die Peakfläche kann entweder analytisch nach Anpassung

einer Gaussfunktion oder durch Auszählen der korrigierten Kanalinhalte bestimmt werden.

- *ROI-Technik*: Für jeden Peak werden geeignete Regions of Interest (ROI) definiert. Typischerweise wird der ROI-Bereich so gewählt, dass er 2,5 Halbwertsbreiten des Peaks umfasst. Zur Auswertung werden in diesem Fall alle Ereignisse, die in diesen Spektrenbereich fallen, verwendet. Die Einstreuung anderer Nuklide in diese ROI muss aber durch geeignete Effizienzfaktoren berücksichtigt werden. Diese Methode wird hauptsächlich bei Szintillatorzählern eingesetzt, da unter die "breiten" Peaks nur schwer ein passender Untergrund gelegt werden kann. Die mit diesem Verfahren bestimmten Aktivitäten sind voneinander abhängig, da durch eine "falsch" bestimmte Aktivität eines Nuklides auch die Streuanteile in den ROIs der restlichen Nuklide "falsch" bewertet werden.

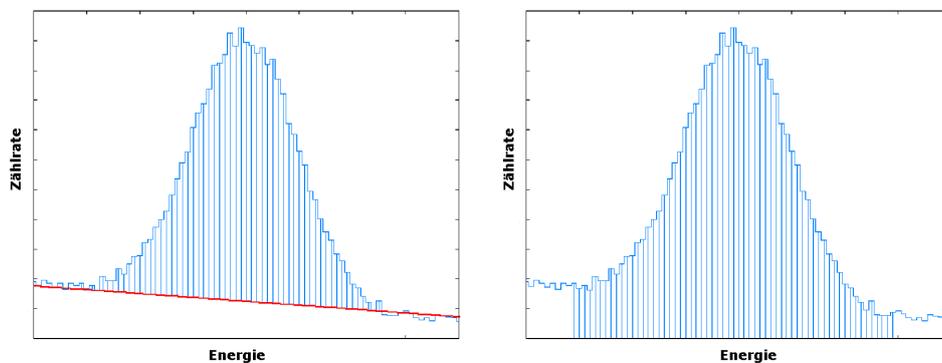


Abbildung 1.2: Zur Auswertung von Gammaspektren.

- a) Peakfläche
- b) Fläche in der Region of Interest

Alternativ kann das gemessene Spektrum auch durch sukzessive Addition von "Standardspektren" einzelner Nuklide ausgewertet werden. Dazu wird mit der höchsten Peakenergie begonnen. Das passende Standardspektrum wird so skaliert, dass es die gleiche Peakfläche wie das gemessene Spektrum besitzt, und von diesem abgezogen. Dieses Verfahren wird so lange mit dem Restspektrum wiederholt, bis alle Peaks abgearbeitet sind. Die jeweiligen Skalierungsfaktoren geben dann die gesuchten Aktivitäten an. Dieses Verfahren ist fehleranfällig, da die Spektrenform von der Geometrie (Schwächungseigenschaften) der gemessenen Person abhängig ist. Eine exakte Wiedergabe durch die Standardspektren ist nicht zu erwarten.

Durch eine Effizienzkalibration werden die Kalibrierfaktoren $\tilde{\epsilon}$ bestimmt. Die Effizienzen $\tilde{\epsilon}$ sind abhängig von:

- der *Energie* E_γ der beim Zerfall emittierten Photonen,
- der *Übergangswahrscheinlichkeit* P_γ für die beobachtete Spektrallinie,

- der *Messgeometrie* (Als Messgeometrie werden Form, Zusammensetzung und Größe des Körpers sowie dessen Lage zu den Detektoren zusammengefasst.),
- den *Eigenschaften der Detektoren* (z.B. intrinsische Effizienz und Auflösungsvermögen),
- der *Peakbreite* bzw. der *gewählten ROI*.

Die Kalibration kann auf drei Arten erfolgen: *Punktquellenmessung*, *Phantommessung* oder *Simulationen*.

Punktquellenmessung Durch Messung einer Punktquelle werden Effizienzfaktoren für die jeweiligen Nuklide bestimmt. Die Schwächungsverhältnisse im Körper werden durch geeignete Korrekturfaktoren berücksichtigt. Diese können durch Simulationen oder geometrische Berechnungen ermittelt werden. Eine Beschreibung der Methode geben zum Beispiel [Ven01, EUR94].

Phantommessung Bekannte Aktivitätsmengen werden in geeigneten anthropometrischen oder anthropomorphen Phantomen verteilt und gemessen. Als gewebeäquivalentes Material wird häufig Wasser verwendet. Der erste bekannte Kalibrierstandard dieser Art (umschlossene Radonquellen in einem Phantom) wurde 1931 durch Schlundt geschaffen [Doe04]. Heute existiert eine große Anzahl von Phantomen für die Effizienzkalibrierung von Ganz- und Teilkörperzählern. Eine Übersicht gibt der 1992 von der ICRU veröffentlichte Report *Phantoms and Computational Models in Therapy, Diagnosis and Protection* [ICRU92]. Abbildungen der in dieser Arbeit verwendeten Flaschen- und Ziegelphantome befinden sich auf den Seiten 20 und 21 (Abbildungen 1.10 und 1.11).

Simulationen Die Vorgänge während der Messung werden durch Simulationen nachgebildet. Hier hat sich die Monte-Carlo Methode durchgesetzt. Die Geometrie des menschlichen Körpers wird durch geeignete Modelle² beschrieben. Es können mathematische oder Voxelmodelle verwendet werden. Simulationen wurde durch die Hardwareentwicklung im Computerbereich möglich und werden erst seit wenigen Jahren angewendet [Hic97, Hun00, Ish96, Ish97a, Ish97b, Kin00a, Kin00b, Kra02, Mal95].

Kritisch für die Effizienzkalibration ist die Nachbildung der gemessenen Person durch die verwendeten Phantome oder Modelle. Phantome sind in den meisten Fällen nur in einer einzigen (reference man) oder einer kleinen Auswahl an Größen verfügbar. Für Personen anderer Größen und Proportionen müssen die Effizienzfaktoren korrigiert werden. Im Idealfall müsste bei der Kalibration die zu messende Person als Phantom verwendet werden. Diese (heute verbotenen) "in-Vivo"-Kalibrationen wurden bis in die 70er Jahre durchgeführt (z.B. mit ^{42}K zur Bestimmung des Körperkaliums). Zukünftig könnte es möglich sein, für Personen die häufiger gemessen werden, eine individuelle

²Die ICRU unterscheidet begrifflich zwischen (echten) Phantomen und Computermodellen des menschlichen Körpers

Kalibration basierend auf einem Modell aus MRT-Daten³ durch Simulationen zu erstellen.

1.1.3 Empfindlichkeit der in-Vivo Messungen

Durch den bei der Messung zwangsläufig vorhandenen Strahlungsuntergrund ist das Nachweisvermögen nach unten hin begrenzt. Gemessene Ereignisse können nicht mit 100-prozentiger Sicherheit der "Probe" zugeordnet werden. Mit statistischen Methoden (Konzept der charakteristischen Grenzen) kann dieses berücksichtigt werden. Um verlässliche Aussagen über die inkorporierte Aktivitätsmenge machen zu können, stellen sich bei der Auswertung des gemessenen Ganzkörperspektrums daher drei Grundfragen:

- Sind unter den gemessenen Ereignissen im Peakfenster Ereignisse der beobachteten Gammalinie?
- Wie groß ist die kleinste Aktivitätsmenge, die noch zuverlässig nachgewiesen werden kann?
- Wie groß ist der Wertebereich, der mit großer Sicherheit den wahren Aktivitätswert der Probe enthält?

Diese drei Fragen führen zu drei charakteristischen Grenzwerten

1. Die *Erkennungsgrenze* gibt an, ob Ereignisse im Peakfenster auf die beobachtete Linie zurückzuführen sind.
2. Die *Nachweisgrenze* gibt den kleinsten Aktivitätswert an, der sicher nachgewiesen werden kann.
3. Die *Vertrauensgrenzen* begrenzen den Wertebereich, in dem mit vorgegebener Wahrscheinlichkeit der wahre Aktivitätswert enthalten ist.

Diese drei Grenzen können auf Grundlage statistischer Hypothesentests (vgl. z.B. [Sac99]) über die Gleichheit der Verteilungen von Probenmesswerten⁴ ρ_n und Untergrundmesswerten ρ_0 definiert werden.

Die Erkennungsgrenze R_n^* wird als kritischer Wert eines statistischen Tests der Nullhypothese ($\rho_n = 0$) gegen die Alternativhypothese $\rho_n > 0$ definiert. Der kritische Wert eines Tests bei gegebener Irrtumswahrscheinlichkeit α ist dabei definiert durch $P(R_n > R_n^*) = \alpha$, d. h. für einen Messwert $\rho_n > R_n^*$ ist die Wahrscheinlichkeit, einen Fehler erster Art⁵ zu machen, gleich α .

³Die Verwendung von Röntgen-CT-Daten anstelle der Kernspindaten wäre mit einer nicht erwünschten (und genehmigbaren) Strahlenexposition verbunden.

⁴Für Ganzkörpermessungen sind dies die Nettozählraten im Peakfenster

⁵Die Hypothese wird verworfen, obwohl sie richtig ist.

Die Nachweisgrenze ρ_n^* wird definiert durch einen Fehler zweiter Art⁶. Bei gegebener Erkennungsgrenze R_n^* gibt die Nachweisgrenze den kleinsten wahren Wert ρ_n^* an, für den die Wahrscheinlichkeit für einen Fehler zweiter Art $P(R_n < R_n^*)$ gleich der gewählten Irrtumswahrscheinlichkeit β ist. Ist in einer Messung $R_n > \rho_n$, dann ist die Wahrscheinlichkeit einen vorhandenen Probenbeitrag abzulehnen β , bzw. mit der Wahrscheinlichkeit $1 - \beta$ liegt ein Probenbeitrag vor.

Die Vertrauensgrenzen ρ_u, ρ_o werden so definiert, dass sie bei gegebener Vertrauenswahrscheinlichkeit γ gleichmäßig den Bereich einschließen, der den wahren Wert R_n der Messgröße mit der Wahrscheinlichkeit $1 - \gamma$ enthält. Es gilt folgende Bedingung:

$$P(\rho_u \leq \rho_n \leq \rho_o) = 1 - \gamma \quad \text{und} \quad P(\rho_o > \rho_n) = P(\rho_u < \rho_n) = \gamma/2$$

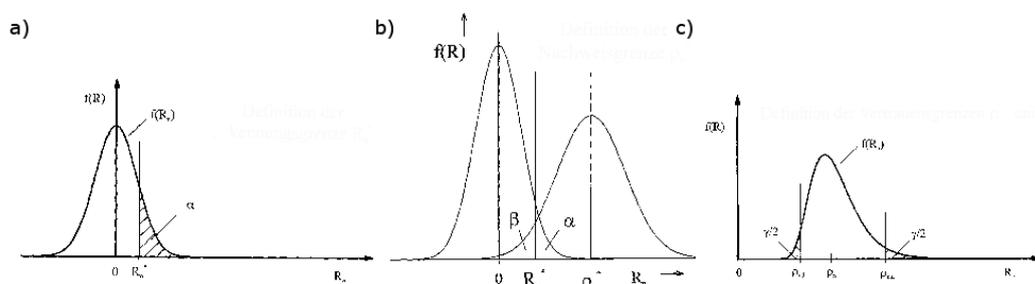


Abbildung 1.3: Zur Definition der charakteristischen Grenzen (aus [Mic98].)

- Definition der Erkennungsgrenze R_n^*
- Definition der Nachweisgrenze ρ_n^*
- Definition der Vertrauensgrenzen ρ_u und ρ_o

Abbildung 1.3 illustriert diese Definitionen. Die minimale nachweisbare Aktivität (MDA)⁷ ist definiert durch $\alpha = \beta = 5\%$. Sie gibt die Menge an Aktivität eines Nuklids an, die in 95 von 100 Fällen nachgewiesen werden kann und höchstens 5 von 100 mal bei einer unkontaminierten Person gemessen wird [Too00]. Die MDA wird bestimmt von folgenden Faktoren:

- der Untergrundzählrate im Peakfenster (bei Ganzkörpermessungen vor allem bestimmt durch den Gehalt an ^{40}K),
- der Detektorgröße und dem Auflösungsvermögen der Detektoren,
- der Messgeometrie,
- der Messzeit,
- der Photonenenergie E_γ und der Absorptionswahrscheinlichkeit im Körper,

⁶Die Hypothese wird akzeptiert, obwohl sie falsch ist.

⁷Minimum Detectable Activity

- der Übergangswahrscheinlichkeit P_γ für die zum Nachweis verwendete Gammalinie.

Für die Definitionen der charakteristischen Grenzen bei Kernstrahlungsmessungen gibt es in Deutschland die nationalen Normen DIN25482 (Teil 1-11) sowie die internationalen Normen ISO 11929 (part 1-8). In diesen Regelwerken werden auch Formeln für die Berechnung dieser Grenzen in verschiedenen Messsituationen hergeleitet.

Für Ganzkörperzähler können dabei folgende Formeln (vgl. [Mic98]) verwendet werden:

$$R_n^* = \frac{1}{2t_0} k_{1-\alpha}^2 \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4R_0 t_0}{k_{1-\alpha}^2} \left(1 + \frac{t_0}{t_b} \right)} \right)$$

$$\rho_n^* = (k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \sqrt{\rho_0 \left(\frac{1}{t_0} + \frac{1}{t_b} \right) + \frac{1}{4} (k_{1-\alpha} + k_{1-\beta})^2 \left(\frac{1}{t_0} + \frac{1}{t_b} \right)}$$

$$\rho_u = R_n - k_{1-\gamma/2} \sqrt{\frac{R_0}{t_0} + \frac{R_b}{t_b}}$$

$$\rho_o = R_n + k_{1-\gamma/2} \sqrt{\frac{R_0}{t_0} + \frac{R_b}{t_b}}$$

Hierbei sind $k_{1-\alpha}, k_{1-\beta}, k_{1-\gamma/2}$ die Quantile der standardisierten Normalverteilung für die Wahrscheinlichkeiten $\alpha, \beta, 1 - \gamma$, R_0 und R_b die Zählraten im Peakfenster bei Untergrund- bzw. Probenmessung mit den Messdauern t_0 bzw. t_b .

Aus der Effizienz $eff(\text{ROI} \leftarrow \text{Nuklid})$ und der Standardabweichung einer Leermessung σ_B und kann die MDA für ein Nuklid auch mit der Näherungsformel [Too00]

$$MDA = 4.65 \cdot \sigma_B \cdot eff^{-1}$$

berechnet werden.

Diese charakteristischen Grenzen können zur Beurteilung der Ergebnisse einer Ganzkörpermessung verwendet werden. Da Ganzkörperzähler nicht bildgebend arbeiten, ist eine Trennung von tatsächlich inkorporierter und am Körper (z.B. an der Kleidung) getragener Kontamination in der Regel nicht möglich. Die zu messenden Personen sollten daher vor der Messung frische Kleidung anziehen. Für Messungen in der Routineüberwachung ist es empfehlenswert, die Personen morgens vor Beginn der Arbeiten im Kontrollbereich zu messen.

Im Rahmen einer Routineüberwachung sollte die Empfindlichkeit so groß sein, dass eine resultierende Dosis⁸ von $1mSv$ oder 10% der Organdosisgrenzwerte zuverlässig erkannt werden kann [Doe04]. Für die Messung der meisten Spalt- oder Aktivierungsprodukte stellen diese Anforderungen jedoch kein Problem dar. In Tabelle 1.2 sind die Grenzwerte für einige Nuklide angegeben.

⁸Zur Berechnung der Folgedosis aus einer gemessenen Aktivität siehe z.B. [Fue86, Loe88]

Nuklid	Hauptlinie (E_γ)	nachzuweisende Zufuhr in Bq für eine Folgedosis von $1mSv$ nach In- halation	erforderliche NWG in Bq	erreichbare NWG in Bq
^{60}Co	1173keV	$1,4 \cdot 10^5$	1000	25
^{131}I	364keV	$9,1 \cdot 10^4$	100	10
^{137}Cs	662keV	$1,5 \cdot 10^5$	10000	30
^{214}Bi	609keV	$4,5 \cdot 10^2$	4	30

Tabelle 1.2: Parameter zur routinemäßigen Inkorporationsüberwachung durch in-Vivo-Messung am Beispiel einiger ausgewählter Radionuklide (aus [Doe04]).

Unsicherheitskomponente (Kategorie)	Streufaktor
Zählstatistik (A)	1,10
Messposition (B)	1,05
Hintergrundstrahlung(B)	1,05
Körperproportionen (B)	1,10
Gewebekomposition (B)	1,05
Aktivitätsverteilung (B)	1,05
Aktivitätsstandard der Kalibrierung (B)	1,05
Spektrumsauswertung (B)	1,05
Gesamt	1,19

Tabelle 1.3: Typische Werte für die Komponenten der Messunsicherheiten für den in-Vivo-Nachweis von Radionukliden ($E_\gamma > 100keV$) als Streufaktoren einer log-normal-Verteilung angeben (aus [Doe04]).

Der Gesetzgeber fordert für die Genauigkeit bei Inkorporationsmessungen eine Unterbewertung von höchstens 25% und eine Überbewertung von höchstens 50%. Die Komponenten der Messunsicherheit können in zwei Kategorien eingeteilt werden.

Kategorie A Unsicherheiten sind durch Poisson-Verteilungen beschreibbar (zählstatistische Schwankungen der Personen-, Kalibrier- und Untergrundmessungen).

Kategorie B Keine Beschreibung durch Poisson-Verteilung möglich (zeitliche Schwankung des Untergrundes, individuelle Abweichungen von der Messposition, der Körperproportion und der Aktivitätsverteilung).

Typische Werte für diese Komponenten sind in Tabelle 1.3 als Streufaktoren⁹ angegeben.

⁹Angenommen wird eine log-normal-Verteilung.

Die Ausscheidungsanalyse ist prinzipiell empfindlicher (vor allem für Actiniden), ihre Ergebnisse sind aber nicht sofort verfügbar. Daher bleibt die In-Vivo-Messung unverzichtbar. Das Verbesserungspotential der In-Vivo-Messungen durch neue Detektormaterialien und stärkere Untergrundreduktion scheint heute so gut wie ausgeschöpft. Der gemessene Untergrund stammt fast ausschließlich von der gemessenen Person selbst (^{40}K -Streustrahlung). Nur durch eine genauere Kalibrierung kann die Empfindlichkeit der Messungen noch verbessert werden. Die Übereinstimmung von Mess- und Kalibrierungssituation kann zum Beispiel durch mathematische Kalibrierung erhöht werden [Doe04].

1.2 Der Kölner Ganzkörperzähler

Die Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin der Kliniken der Universität zu Köln besitzt seit 1965 einen Ganzkörperzähler. Mit diesem werden neben Messungen für die Strahlenschutzüberwachung von Mitarbeitern der Klinik sowie nuklearmedizinischer Praxen auch Studien zum Strahlenschutz und Resorptionsmessungen zur Diagnostik (z. B. des Vitamin B12-Stoffwechsels) durchgeführt. Die Universität zu Köln wurde amtlich bestellt als Inkorporationsmessstelle zur Ermittlung der Aktivitätszufuhr und der Berechnung der daraus resultierenden Teilkörper- und effektiven Dosen im Rahmen der physikalischen Strahlenschutzkontrolle nach §41 StrlSchV.

1.2.1 Aufbau

Zur Abschirmung des natürlichen Strahlungsuntergrundes befindet sich der Messplatz des Kölner Ganzkörperzählers in einer begehbaren Stahlkammer. Diese besteht aus jeweils 16cm dicken Stahlwänden, welche zum Innenraum hin mit einer 3mm dicken Bleischicht verkleidet sind. Der Eingang ist labyrinthartig angelegt, um eine direkte Einstreuung von Gammaquanten aus der Umgebung in die Detektoren sowie ein ungehindertes Einströmen von Aktivität mit der Umgebungsluft zu verhindern. Die Belüftung der Kammer erfolgt aus demselben Grund durch ein Lüftungssystem mit speziellem Filter. Um den Strahlungsuntergrund möglichst niedrig zu halten, ist der zum Bau der Kammer verwendete Stahl aus einem kurz nach dem zweiten Weltkrieg abgewrackten Kriegsschiff¹⁰ entnommen und daher besonders aktivitätsarm. Die dünne Bleischicht erhöht nochmals das "Absorptionsvermögen" der Wände und unterdrückt die Rückstreuung von Photonen aus der Kammer. Um einen Aktivitätseintrag in die Kammer durch Kontamination zu vermeiden, dürfen die zu messenden Personen diese nur mit Überschuhen betreten.

Der Messplatz des Kölner Ganzkörperzählers ist ein Multidetektorsystem bestehend aus vier zylinderförmigen NaI(Tl)-Detektoren ($\varnothing = 12,7\text{cm}$, $l = 10,2\text{cm}$) und einem Halbleiterdetektor (HPGe-Bauart), die in einer Stahlkammer um eine Liege angeordnet sind. Alle Detektoren sind direkt mit Vielkanalanalysatoren versehen (nanoSPEC bzw. iSPEC, Fa. Target). Die Versorgung der Detektoren mit Hochspannung (NaI(Tl) 600V,

¹⁰Der Legende nach handelte es sich um das englische Schiff MSS Vanguard.

HPGe 1960V) wird von der an den Messrechner (Intel-PC mit Software winTMCA, Fa. Target) angeschlossenen Multiplexer-Karte übernommen. Die Detektoren sind in

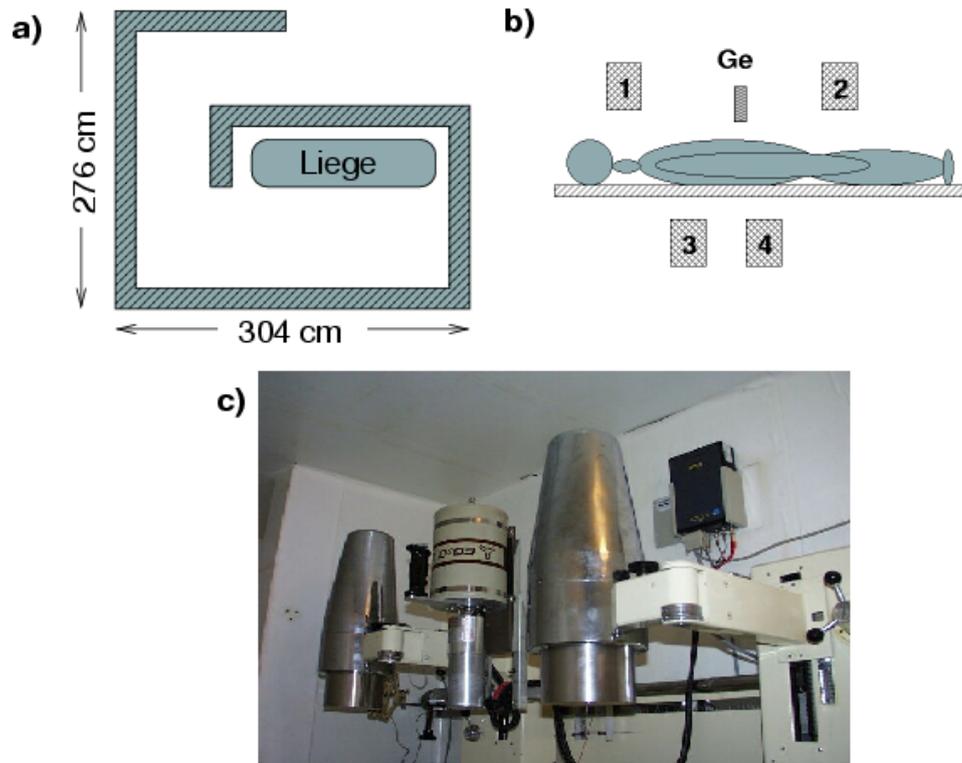


Abbildung 1.4: Aufbau des Kölner Ganzkörperzählers.

- a) Grundriss der Messkammer b) Positionen der Detektoren c) Photo der Detektoren über der Liege

der sogenannten "Stretcher"-Geometrie positioniert: Oberhalb und unterhalb der Liege befinden sich jeweils zwei Detektoren. Diese sind an einem Schienensystem, welches in der Seitenwand befestigt ist, fixiert. Der ganze zu messende Körper liegt im Blickfeld der Detektoren (vgl. Abbildung 1.4b). In der gewählten Geometrie deckt jeder Detektor eine für die interne Dosimetrie relevante Körperregion ab (Schilddrüse (D1), Knie/Beine (Extremitäten) (D4), Lunge (D2) und Verdauungstrakt(D3)). Aus den jeweiligen Einzelspektren könnte bei geeigneter Kalibrierung eine "direkte" Dosimetrie¹¹ erfolgen. Um hier belastbare Werte zu ermitteln, müssten die Detektoren jedoch zusätzlich kollimiert werden. Eine derartige Verwendung des Gerätes als Teilkörperzähler ist momentan nicht vorgesehen.

Der Germaniumzähler befindet sich in etwa über dem Körperschwerpunkt der zu messenden Person. Dieser Detektor wird wegen seines hohen Energieauflösungsvermögens zur besseren Identifikation unbekannter Nuklide verwendet. Eine Quantifizierung mit diesem Detektor ist nicht sinnvoll, da die Effizienz zu gering ist. Die Kühlung des

¹¹Aus den Peakflächen werden dann nicht die Aktivitäten berechnet, sondern direkt die jeweiligen Organdosen.

Kristalls erfolgt mit flüssigem Stickstoff, der sich in einem Dewar-Gefäß oberhalb des Detektors befindet. Dieses hat eine Kapazität von 24h-N₂ und muss einmal täglich neu befüllt werden. Eine Elektronikschaltung überwacht die Kristalltemperatur und verhindert das Anlegen der Hochspannung bei "warmem" Detektor.

Für den Nachweis niederenergetischer Gammastrahlen gibt es einen mit einem dünnen Berylliumeintrittsfenster versehenen NaI(Tl)-Detektor. Mit diesem können auch die γ -Quanten des ¹²⁵I ($E_\gamma = 35,5\text{keV}$) nachgewiesen werden. Der Detektor ist an einem Arm beweglich montiert und wird zu Schilddrüsenmessungen oberhalb des Halses positioniert. Für Wundkontaminationsmessungen kann dieser direkt über der Wunde positioniert werden.

Der Messrechner befindet sich außerhalb der Kammer und übernimmt die akquirierten Spektren¹² aus den nanoSpec bzw. iSpec MCAs. Zusätzlich erzeugt er ein Summenspektrum der 4 großen NaI(Tl)-Detektoren, welches zur Berechnung der inkorporierten Aktivitäten verwendet wird. Die Messdauer für eine Ganzkörpermessung im Rahmen der Inkorporationsüberwachung beträgt 450s. In anderen Untersuchungen kann die Messdauer auf 900 bzw. 1800s erhöht werden.

1.2.2 Untergrund

An jedem Wochenende wird jeweils ein Untergrundspektrum (Messzeit ca. $\approx 250.000\text{s}$) akquiriert, welches zeitskaliert von den gemessenen Spektren subtrahiert wird. Dadurch sollen Ereignisse, welche aus dem Strahlungsuntergrund in der Kammer stammen, berücksichtigt werden. Dieser Untergrund stammt von natürlich vorkommenden Radionukliden¹³. Abbildung 1.5 zeigt ein solches Untergrundspektrum.

Zur Klassifizierung der Untergrundeigenschaften von Ganzkörperzählern schlägt die IAEA den Nulleffektindex NI vor [IAEA70]. Dieser ist definiert als die Zählrate (in Impulsen pro Minute) pro cm³ Kristallvolumen im Spektrenbereich von 0,1 bis 2MeV. Je niedriger dieser Wert ist, desto besser wird die Umgebungsstrahlung abgeschirmt. Ein Nulleffektindex von 0,2 entspricht einer Reduktion des Nulleffekts um den Faktor 100 [Obe80]. Aus typischen Untergrundspektren des Kölner Ganzkörperzählers erhält man einen NI von 0,28. Typische Werte anderer Anlagen vergleichbaren Typs¹⁴ liegen bei 0,13 (Forschungszentrum Karlsruhe), 0,34 (FU Berlin) bzw. 0,48 (University of California). Die Kölner Messkammer führt zu einer vergleichsweise guten Untergrundreduktion. Da die Untergrundzählrate ein entscheidender Faktor für die Nachweisgrenzen der Nuklide ist, wurden auch für die Innenausstattung (Bodenbelag, Wandverkleidung, Liege, Messaufbau, ...) der Kammer möglichst eigenstrahlungsarme Materialien verwendet. Die besonderen Eigenstrahlungseigenschaften der verwendeten Materialien waren der Grund dafür, dass im Jahre 2001 die komplette alte Kammer

¹²12Bit, 1024 Kanäle im Bereich von 0 – 2000keV

¹³hauptsächlich aus der Thorium-Zerfallsreihe

¹⁴Alle NI -Angaben wurden mit Werten aus [IAEA64] berechnet.

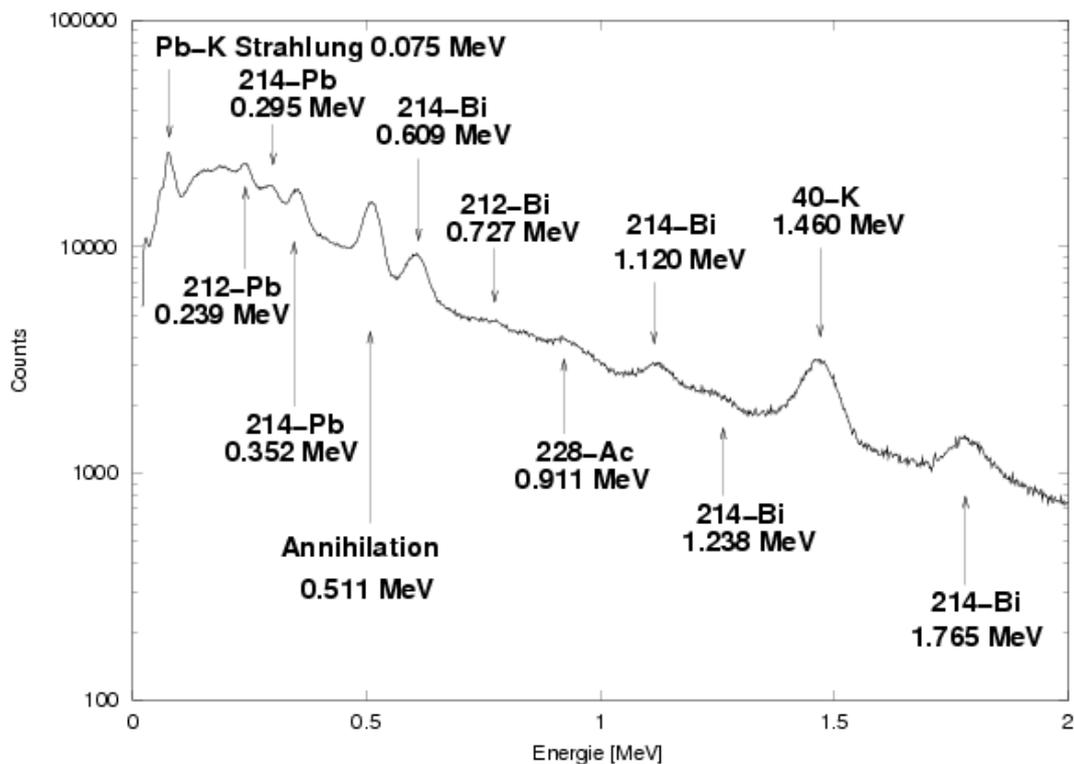


Abbildung 1.5: Untergrundspektrum des Kölner Ganzkörperzählers.

(das Gesamtgewicht der Kammer beträgt 54t) auch in den Neubau der Klinik für Nuklearmedizin übernommen wurde.

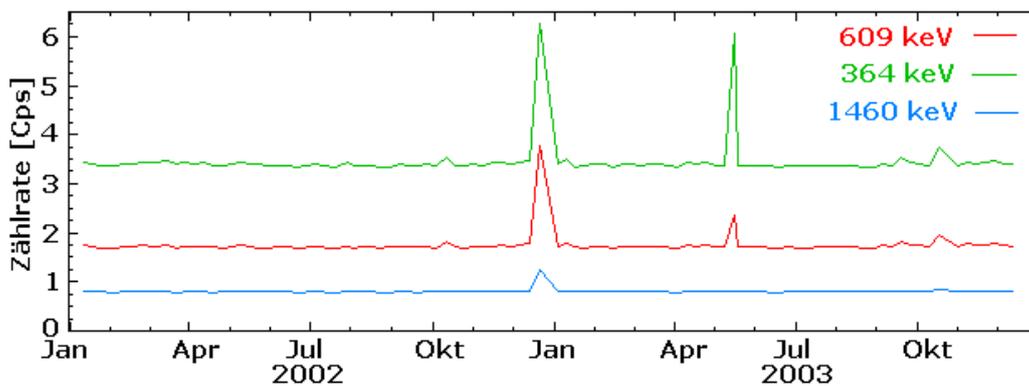


Abbildung 1.6: Zählraten in den Untergrundspektren aus den Jahren 2002 und 2003.

Die Zählraten in den einzelnen ROIs sind, wie in Abbildung 1.6 gezeigt, über lange Zeiträume konstant. Dargestellt sind dort die Zählraten in den ROIs um 609keV (^{214}Bi ein prominentes Radonfolgeprodukt), um 364keV (^{131}I) und um 1460keV (^{40}K , natürliche Restaktivität aus den Detektormaterialien). Deutlich zu erkennen sind zwei "Peaks" am 22.12.2002 und am 23.05.2003. Der letztgenannte tritt nur in den ROIs unterhalb von 700keV auf. Es handelt sich hierbei um eine Kontamination der

Kammer mit ^{131}I . Das zeigt auch das (hier nicht abgebildete) Differenz-Spektrum zur Untergrundmessung der Vorwoche. Eine der in dieser Woche gemessenen Personen war an der Hand kontaminiert. Diese Kontamination war allerdings so gering, dass der Hand-Fuß-Kontaminationsmonitor nichts anzeigte. Durch das Berühren der Liege wurde ein Teil dieser Kontamination in die Kammer gebracht. Dieser Fall zeigt die besonders hohe Empfindlichkeit des Ganzkörperzählers.

Für die niedrigen Zählraten in den ROIs der Radonfolgeprodukte ist der ständige Luftumsatz durch die Klimaanlage besonders wichtig. Dieses zeigt das über Weihnachten/Neujahr 2002/2003 aufgenommene Untergrundspektrum. In diesem Zeitraum ohne Patientenbetrieb wurde die Klimaanlage zu Wartungszwecken abgestellt. Hier kommt es durch Ausgasen aus den Betonwänden zu einer Anreicherung der Radonfolgeprodukte in der Raumluft. Den zusätzlich zum normalen Untergrundspektrum gemessenen Anteil an Untergrundstrahlung zeigt die folgende Abbildung 1.7. Alle Gammalinien der Thorium-Reihe mit Übergangswahrscheinlichkeiten größer 1% können in diesem Spektrum identifiziert werden. Die Zählrate im Fenster der 609keV-Linie wurde während eines Tages, an dem Wartungsarbeiten an der Klimaanlage durchgeführt wurden, beobachtet¹⁵. Man erkennt nach dem Herunterfahren der Klimaanlage am 29.10. um 21:00h einen Anstieg der Zählrate von 1,80 auf 2,15 Ereignisse pro Sekunde. Nach dem Wiederanfahren der Klimaanlage am 30.10. um 21:00h fällt die Zählrate schnell wieder auf den Ausgangswert zurück.

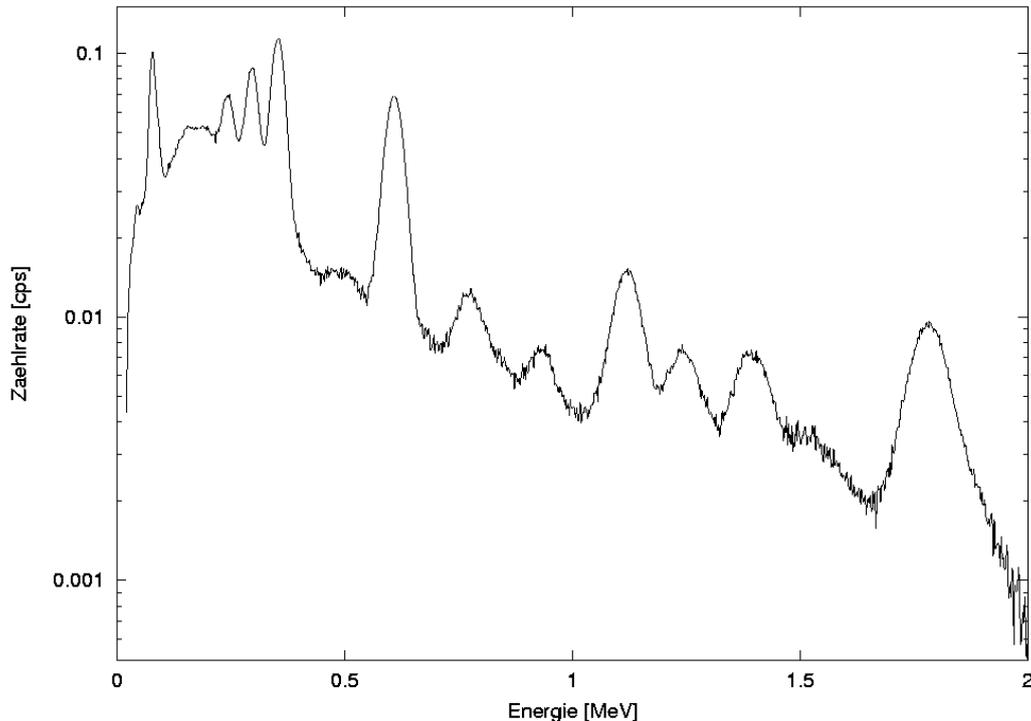


Abbildung 1.7: Spektrum der Radonfolgeprodukte.

¹⁵Verwendet wurde hierzu die Methode zur Untersuchung der 511keV-Ereignisse (vgl. Kapitel 3.5).

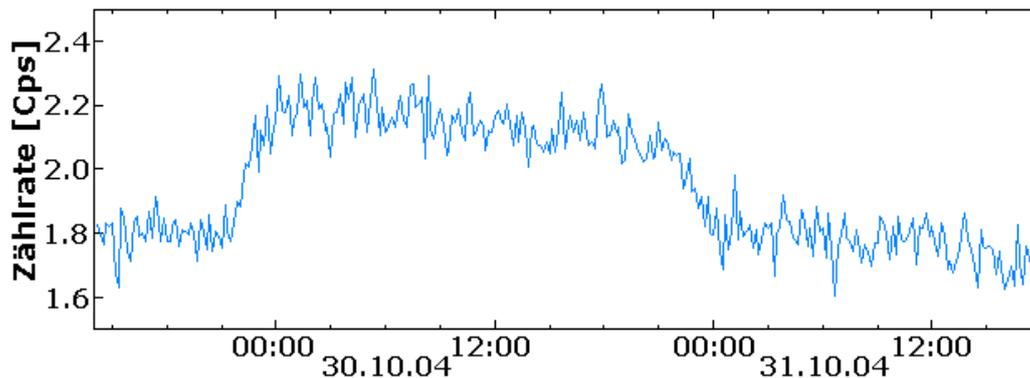


Abbildung 1.8: Zählrate in in der 609keV-ROI während der Abschaltung der Klimaanlage.

1.2.3 Auswertung der Inkorporationsmessungen

Zur Auswertung des Spektrums werden um die Peaks im Spektrum Fenster, die *Regions of Interest* (ROIs), gelegt. Die Breite der ROI wird so gewählt, dass sie 2,5 Halbwertsbreiten des beobachteten Peaks entspricht. Es werden so mehr als 99% der Ereignisse im Peak erfasst. Mit dieser Fensterbreite wird auch in der *Richtlinie Berechnungsgrundlage* gearbeitet. Andere Fensterbreiten können bei einem Überlappen der ROIs angewendet werden.

Zur Berechnung der inkorporierten Aktivität aus den Zählraten in den ROIs werden Effizienzfaktoren \tilde{e} benötigt. Diese ordnen den Zählraten r_i in den ROIs die Aktivitäten A_i der Nuklide zu. Die Effizienzen \tilde{e} sind abhängig von:

- der Energie E der Photonen,
- der Übergangswahrscheinlichkeit für die beobachtete Spektrallinie,
- der Messgeometrie (s.u.),
- den Eigenschaften der Detektoren¹⁶,
- der gewählten ROI.

Als Messgeometrie werden hierbei Form, Zusammensetzung und Größe des Körpers sowie dessen Lage zu den Detektoren zusammengefasst. In der Kölner Messstelle wird die Geometrie durch die Masse m des Körpers parametrisiert¹⁷. Es gilt dann:

$$A_i = \tilde{e}^{-1}(m) \cdot r_i$$

Im Spektrum werden nicht nur Vollenergieereignisse, sondern auch Streuereignisse mit Energien, die niedriger sind als die vom Nuklid emittierte, registriert. Daher ist eine

¹⁶z.B. intrinsische Effizienz und Auflösungsvermögen

¹⁷Die Positionen der Detektoren und des Körpers sind in jeder Messung identisch.

eindeutige Zuordnung der Ereignisse in einer ROI zu einem Nuklid nicht möglich. Der Anteil von Ereignissen in der ROI, der auf ein anderes Nuklid zurückzuführen ist, muss durch einen eigenen Effizienzfaktor $\tilde{e}_{ij}(m)$ berücksichtigt werden. Die Zählrate r_i in der ROI i setzt sich dann zusammen aus den Anteilen der einstreudenden Nuklide j und des beobachteten Nuklids i :

$$r = \tilde{e}_i(m) \cdot A_i + \sum_j \tilde{e}_{ij}(m) \cdot A_j$$

Man erhält für die Aktivitätsberechnung ein lineares Gleichungssystem. Die Elemente $e_{ij} = \text{eff}(\text{ROI}_i \leftarrow \text{Nuklid}_j)$ der Effizienzmatrix geben dabei die Wahrscheinlichkeit an, nach einem Zerfall des Nuklids i ein Ereignis in der ROI des Nuklids j zu beobachten.

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{e}_{11} & \cdots & \tilde{e}_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ \tilde{e}_{n1} & \cdots & \tilde{e}_{nn} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \end{pmatrix}$$

Abbildung 1.9 zeigt ein typisches Spektrum einer Personenmessung nach Abzug des Kammeruntergrundes.

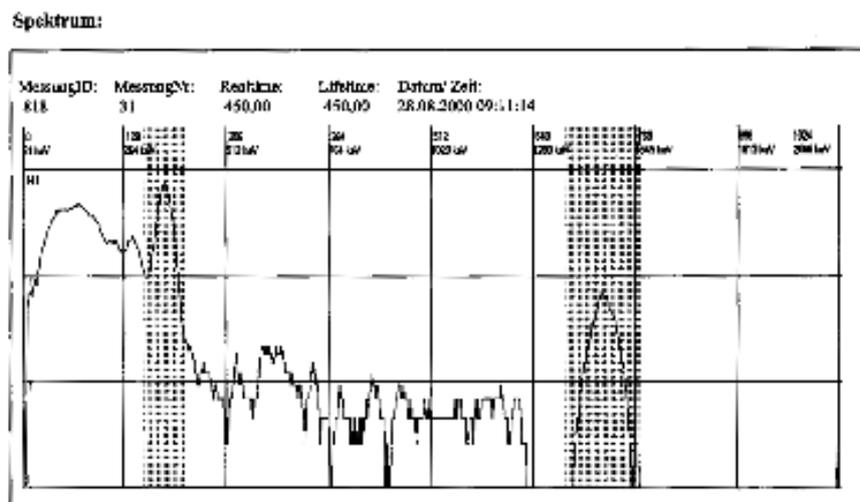


Abbildung 1.9: Typisches Gammaspektrum einer Personenmessung.

Bei Personenmessungen ist eines der "beteiligten" Nuklide immer das natürliche ^{40}K . Dieses emittiert beim Zerfall ein Photon der Energie 1460keV ($P_\gamma = 0.1067$). Leider erzeugt dieses ein ausgedehntes Streuspektrum im Bereich von 100-1200keV. Dieses muss durch passende Matrixelemente berücksichtigt werden. Die restlichen beteiligten Nuklide können dabei anhand ihrer Peaks im Spektrum identifiziert werden. Im abgebildeten Spektrum sind zwei ROIs (^{131}I und ^{40}K) markiert. Die Tabelle zeigt die Zählraten in den Peakfenstern, die Kalibrierfaktoren (Personengewicht: 68 kg) und die daraus ermittelten Aktivitäten.

ROI	Counts	Effizienzen [Ereignisse pro Sekunde/Bq]	Aktivität
1: ^{40}K	792	$e(1 \leftarrow 1) = 0,00051$ $e(1 \leftarrow 2) = 0,00000$	3462Bq
2: ^{131}I	2887	$e(2 \leftarrow 1) = 0,00022$ $e(2 \leftarrow 2) = 0,00801$	706Bq

Tabelle 1.4: Auswertung des Personenspektrums.

Das hier beschriebene Auswerteverfahren wurde 1999 in eine selbstentwickelte Software ("BCSoft") implementiert. Vor der Messung werden vom Benutzer aus einer Datenbank die Daten der Person und die Nuklide, auf deren Vorhandensein geprüft werden soll, gewählt. Nach der Messung werden automatisch die Aktivitäten berechnet und dosimetrisch bewertet. Das Ergebnis wird in einem Report ausgegeben und in der Datenbank gespeichert. Die Daten der Datenbank können mit einem eigenen Programm abgefragt und INK-FORM-kompatibel [INK97] an das Stahlschutzregister übermittelt werden.

1.2.4 Kalibration



Abbildung 1.10: Flaschenphantom - hier mit zusätzlichem Halsphantom.

Die zur spektrometrischen Auswertung der Messungen benötigten Effizienzfaktoren werden in Köln bislang durch Messungen bekannter Aktivitäten in Flaschenphantomen ermittelt. Diese bestehen aus einem Satz zylinderförmiger 2l- und 1l-Cautex Flaschen ($r = 6\text{cm}$ bzw. 5cm , $h = 17,8\text{cm}$ bzw. $12,4\text{cm}$), die mit in entsalztem Wasser gelöster Aktivität befüllt werden. Die Handhabung dieses Phantoms ist relativ einfach. Die Flaschen können in verschiedenen Geometrien auf der Liege aufgebaut und gemessen

werden. Es können auf diese Weise für Massen von 10 bis 100kg Effizienzen ermittelt werden. Abbildung 1.10 zeigt eine Messung des 70kg-Phantoms. Im dargestellten Aufbau wird zusätzlich ein Halsphantom verwendet. Dieses wird in den anderen Messungen durch eine 1l-Flasche ersetzt.

Die Form des menschlichen Körpers wird von den Phantomen nur sehr grob nachgebildet. Die heterogene Zusammensetzung des Körpers (Knochen, Fettgewebe, Muskeln) wird gar nicht berücksichtigt. Eine ungleichförmige Verteilung des Nuklids im Körper kann nur approximativ (durch selektive Befüllung einzelner Flaschen) simuliert werden. Eine Gleichverteilung der Nuklide im Körper kann z. B. für ^{40}K und ^{137}Cs angenommen werden, da diese Nuklide sich im Muskelgewebe anreichern. Andere Nuklide reichern sich in einem oder mehreren Speicherorganen (z. B. Schilddrüse für Iod) an. Leider kann nicht jedes Nuklid problemlos¹⁸ im Flaschenphantom verwendet werden.



Abbildung 1.11: Ziegelphantom "Igor".

Zusätzlich zu den Flaschenphantomen wird ein Ziegelphantom – Typ "SET UPH-02T" entworfen vom Institute for Industrial and Sea Medicine St. Petersburg [RTC97] – verwendet (Abbildung 1.11). Es besteht aus quaderförmigen Polyethylenziegeln, in die Stabquellen eingebracht werden können. Diese können in sechs verschiedenen Größen zusammengesetzt werden. Dieses Phantom muss beim Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) entliehen werden und ist daher nicht permanent verfügbar. Es wird auch in den Ringvergleichen des BfS zur Qualitätssicherung verwendet [Koe97, Koe04]. Auch für das Ziegelphantom gibt es ebenfalls nur eine eingeschränkte Nuklidwahl.

¹⁸Nach den Kalibrationsmessungen fallen 100l kontaminiertes Wasser zur Entsorgung an

Für den Kölner Ganzkörperzähler sind für eine 70kg schwere Person die charakteristischen Grenzen (vgl. Kapitel 1.1.3) für die Nuklide ^{99m}Tc , ^{131}I und ^{137}Cs in Tabelle 1.5 angegeben. Durch Messungen¹⁹ mit dem Kölner Ganzkörperzähler können also sehr geringe Aktivitäten ab 40Bq nachgewiesen werden. Dieser Wert liegt um sieben Größenordnungen unterhalb der in der nuklearmedizinischen Diagnostik (ca. 370MBq) und Therapie (bis zu 4GBq) verabreichten Aktivitäten. Dieser Vergleich zeigt nochmals die besondere Empfindlichkeit des Kölner Ganzkörperzählers für den Nachweis radioaktiver Stoffe im menschlichen Körper.

Nuklid	Erkennungsgrenze [Bq]	Nachweisgrenze [Bq]
^{99m}Tc	19,90	40,43
^{131}I	19,62	39,97
^{137}Cs	22,66	46,15

Tabelle 1.5: Erkennungs- und Nachweisgrenzen des Kölner Ganzkörperzählers (mit den Wahrscheinlichkeiten $\alpha = \beta = 5\%$).

¹⁹Mit einer Messdauer von 450s

2 Monte-Carlo-Methoden

”Wahrscheinlich ist höchstwahrscheinlich genauso unwahrscheinlich wie wahrscheinlich.”

Wolfgang J. Reus

2.1 Simulationen und die Monte-Carlo-Methode

Simulationen sind in vielen Disziplinen ein etabliertes Werkzeug. Die Grundidee liegt darin, das zu untersuchende System (im Rechner) nachzubilden, um dieses im Modell studieren zu können. Auch in industriellen Prozessen sind Simulationen ein häufig angewendetes Instrument. So werden z.B. durch die Simulation von Crashtests im Computer große Teile der Entwicklungskosten in der Automobilindustrie gespart. Simulationen sind jedoch nicht in der Lage, das Studium des Systems vollständig zu ersetzen. Sie können lediglich Ideen zu dessen Untersuchung liefern und zur Optimierung von Experimenten eingesetzt werden. In der Hoch- und Mittelenergiephysik werden Simulationen zur Analyse durchgeführter und zur Planung zukünftiger Experimente verwendet. Simulationen sind aber mehr als ein Werkzeug, sie gestatten auch die virtuelle Durchführung vieler Experimente, die im Labor nicht oder nur schwer durchführbar sind. Basis für alle Simulationen ist ein Modell, welches die relevanten Eigenschaften des Systems adäquat beschreibt.

Eine heute sehr beliebte Simulationstechnik ist die Monte-Carlo-Methode, welche das System durch ein stochastisches Modell beschreibt. Ihren Namen¹ verdankt sie der Tatsache, dass Entscheidungen über den Verlauf der Simulation anhand von Zufallszahlen getroffen werden. Simuliert werden können demnach nur Phänomene, die eine stochastische Natur besitzen oder durch stochastische Modelle adäquat beschrieben werden. Beispiele hierfür sind [Blo00, Bru00, Hee86, Jae02, Lan00, Nag03, Sta99, Hel03]:

- Spinstellungen (Magnetismus in Festkörpern),
- Börsenkurse (Börsenentwicklung),
- Verkehrsteilnehmer (Straßenverkehr),
- Gasmoleküle (Gase),
- Wechselwirkungen von Elementarteilchen (Strahlungsfeld).

¹Als Paten werden in der Literatur J. von Neumann und S. Ulam genannt. Die Grundidee eines Zufallsexperiments wurde aber schon viel früher verwendet (z. B. Buffon’sche Nadel, 1777).

Informationen über das Verhalten des Gesamtsystems werden durch Mittelwertbildung über viele simulierte "Teilchen"-Schicksale gewonnen. In diesem Sinne ist die Monte-Carlo-Methode "eine Lösung für ein makroskopisches System durch Simulation seiner mikroskopischen Wechselwirkungen" [Bie00, Seite 1]. Zur Simulation des Strahlungstransportes wurde diese Methode erstmals während des Manhattan-Projekts in den 40er Jahren des vorigen Jahrhunderts angewandt. Durch die immer weiter fortschreitende Entwicklung der Computerhardware ("Laptop-Supercomputer") erfährt die Monte-Carlo-Methode insbesondere in der medizinischen Strahlenphysik immer größere Verbreitung. Auch komplizierte Rechnungen können in akzeptabler Zeit zu geringen Kosten durchgeführt werden. Die Rechnungen dieser Arbeit wurden teilweise auf einem Standard PC (800MHz) durchgeführt und benötigten dort ca. acht bis zwölf Stunden Rechnerzeit. Dieses wäre vor 20 Jahren undenkbar gewesen. Die Beliebtheit der Methode zeigt auch die steigende Anzahl der Publikationen² zu diesem Thema.

Ein wichtiger Aspekt für die Monte-Carlo-Methode ist die Qualität der verwendeten Zufallszahlen. Diese werden heute üblicherweise durch Algorithmen (Zufallszahlengeneratoren) während der Rechnungen generiert. Einen Überblick über aktuelle Generatoren und Aspekte für deren Auswahl gibt zum Beispiel der Artikel von Hellekalek [Hel98]. Der im für diese Arbeit verwendeten EGSNrc-System implementierte RANLUX-Generator wird in [Jam94] beschrieben. Um aus den üblicherweise gleichverteilten Zufallszahlen die Verteilungen entsprechend der Funktionen des Modells zu erzeugen, sind verschiedene Samplingtechniken (direktes sampling, inverses sampling, ...) entwickelt worden. Einen Überblick über die im Strahlungstransport verwendeten Methoden gibt z.B. Bielajew in [Bie00].

2.2 Simulation eines Strahlungsfeldes

Ein Strahlungsfeld stellt ein ideales System für die Monte-Carlo-Methode dar, da die Beschreibung der Prozesse und ihrer Wechselwirkungsquerschnitte durch stochastische Modelle leicht möglich ist. Das Strahlungsfeld kann als die Überlagerung der Pfade der einzelnen "Strahlungsteilchen" betrachtet und simuliert werden. Die im betrachteten Energiebereich relevanten Prozesse und die zugehörigen Simulationstechniken für Photonen und Elektronen werden in diesem Kapitel kurz vorgestellt. Detaillierte Beschreibungen der Prozesse und der Methoden finden sich in der Literatur [Eva55, Jen88, Mor88, Bie94a, Bie94c, Bie00, Kaw00].

2.2.1 Photonen

Wechselwirkungen

Im hier betrachteten Energiebereich von $10\text{keV} - 2\text{MeV}$ sind für Photonen drei Wechselwirkungsprozesse von Bedeutung:

²In den medizinischen Fachzeitschriften zeigt sich seit ca. 10 Jahren eine nahezu exponentielle Zunahme der Artikel mit dem Schlagwort "Monte-Carlo-Methode"

- Photoeffekt,
- Paarbildung,
- (inkohärente) Comptonstreuung.

In diesen Prozessen werden Sekundärelektronen erzeugt, die Energie auf das Medium übertragen. Die ebenfalls mögliche (kohärente) Rayleighstreuung führt nur zur geringfügigen Richtungsänderungen des Photons, jedoch nicht zu einer Energiedeposition. In den meisten Simulationen kann dieser Prozess zugunsten der Rechenzeit vernachlässigt werden. Die relativen Bedeutungen für diese Prozesse hängen von der Photonenenergie E_γ und der Ladungszahl Z des Mediums, in dem die Wechselwirkung stattfindet, ab. Abbildung 2.1 zeigt die Regionen, in denen die einzelnen Wechselwirkungen dominieren.

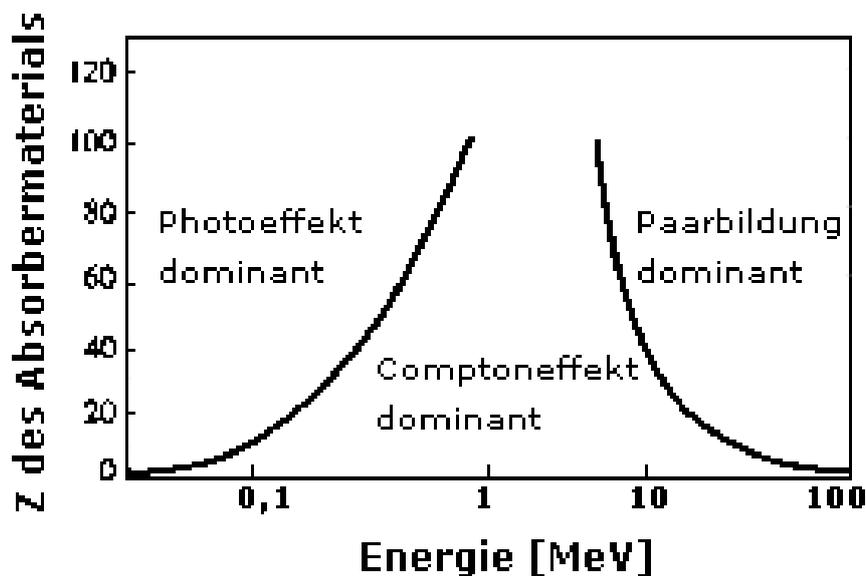


Abbildung 2.1: Relative Bedeutung der Wechselwirkungsprozesse von Photonen[HAR98].

Für niedrige Photonenenergien und schwere Absorbermaterialien ist der Photoeffekt, bei mittleren Energien und leichten Materialien hingegen ist die Comptonstreuung dominant. Für höhere Energien ist die Paarbildung die bedeutende Wechselwirkung. Da der menschliche Körper überwiegend aus leichten Elementen (C, H, O, N) aufgebaut ist, ist der Comptoneffekt hier von besonderer Bedeutung.

Comptonstreuung Unter Comptonstreuung versteht man die Streuung eines Photons an einem schwach gebundenen Elektron der äußeren Schalen im Atom. Für einen Photonenstreuwinkel θ erhält man aus Impuls und Energieerhaltungssatz für die Energie des

gestreuten Gammaquants γ' :

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \left(\frac{E_{\gamma}}{m_0c^2}\right) (1 - \cos \theta)}$$

Klein und Nishina berechneten 1928 mit Diracs relativistischer Theorie des Elektrons Wirkungsquerschnitte für die Comptonstreuung. Trotz der Annahme ungebundener Elektronen stimmten ihre Rechnungen mit den experimentell ermittelten Werten hervorragend überein und waren somit eine der ersten erfolgreichen Anwendungen der Diracschen Theorie. Der totale Wirkungsquerschnitt pro Elektron ergibt sich mit $\alpha = E/m_0c^2$ zu:

$$e\sigma = 2\pi r_0^2 \left\{ \frac{1 + \alpha}{\alpha^2} \left[\frac{2(1 + \alpha)}{1 + 2\alpha} - \frac{\ln(1 + 2\alpha)}{\alpha} \right] + \frac{\ln(1 + 2\alpha)}{2\alpha} - \frac{1 + 3\alpha}{(1 + 2\alpha)^2} \right\}$$

Die Annahme eines freien Elektrons ist für Materialien mit kleinen Z und für hohe Photonenenergien ($E_{\gamma} \geq 1MeV$) eine gute Näherung. Die Bindung des Elektrons kann aber durch Einführung einer inkohärenten Streufunktion $S(k, \cos \theta, Z)$ in der Klein-Nishina-Formel berücksichtigt werden.

Photoeffekt Im Photoeffekt wird das Photon von einem Elektron der inneren Schalen absorbiert. Das Elektron erhält die gesamte Energie des Photons und verlässt das Atom mit der kinetischen Energie $E_{kin} = E_{\gamma} - E_{Bindung}$. Die dadurch entstehende Lücke im angeregten Atom wird unter Emission charakteristischer Röntgenstrahlung oder von Augerelektronen aufgefüllt. Aus Impulserhaltungsgründen kann dieser Prozess nur an gebundenen Elektronen stattfinden. Die Wirkungsquerschnitte für den Photoeffekt können nicht, wie die der Comptonstreuung, mit einer einheitlichen Formel berechnet werden. Es existieren jedoch semiempirische Kompilationen experimenteller Daten, die durch Interpolationen ergänzt wurden. Spezifische Näherungsmethoden werden dazu in verschiedenen Energiebereichen verwendet. Eine häufig verwendete Fitfunktion ist:

$$\sigma_{Photo}(E_{\gamma}) \propto \frac{Z^m}{E_{\gamma}^n}$$

Die Koeffizienten variieren zwischen $m = 4, n = 3$ für niedrige Energien ($E_{\gamma} \leq 100keV$) und $m = 4.6, n = 1$ bei hohen Energien ($E_{\gamma} \geq 500keV$).

Paarbildung Bei der Paarbildung wird das Photon unter Erzeugung eines Elektron-Positron-Paares im Coulombfeld absorbiert. Aus Impulserhaltungsgründen ist ein dritter Partner (meistens der Atomkern, in seltenen Fällen ein Elektron der Atomhülle³) notwendig. Ein Teil der Energie ($E_{Erzeugung} = 2m_e c^2$) des Photons wird zur Erzeugung des e^-e^+ -Paares verwendet, der Rest wird als kinetische Energie auf Elektron und Positron übertragen. Das Positron annihiliert mit einem Elektron der Umgebung unter Aussendung zweier Photonen der Energie $E_{annihil} = m_e c^2 \approx 511keV$ unter einem Winkel von annähernd 180° . Die Paarproduktion kann als inverser Prozess zur Bremsstrahlung

³Man spricht dann auch von Triplett-Produktion.

verstanden werden.⁴ Die Wirkungsquerschnitte für die Paarproduktion können daher aus den bekannten Bremsstrahlungswirkungsquerschnitten (z.B. nach Bethe-Heitler) berechnet werden.

Der Gesamtwirkungsquerschnitt Σ für Photonen in einem Medium ist dann die Summe der Wirkungsquerschnitte der einzelnen Prozesse:

$$\Sigma = \sigma_{Compton} + \sigma_{Photo} + \sigma_{Paar} + \sigma_{Rayleigh}$$

Für die Intensität eines Photonenstrahles gilt das bekannte Schwächungsgesetz:

$$I(s) = I_0 \cdot e^{-\mu s}$$

mit dem Schwächungskoeffizienten $\mu = n \cdot \Sigma = \frac{\rho}{A} N_A \cdot \Sigma = \frac{d\rho}{dz}$. Dieser gibt die differentielle Wahrscheinlichkeit $d\rho$ für eine Wechselwirkung mit einem Partner innerhalb der Weglänge dz an.

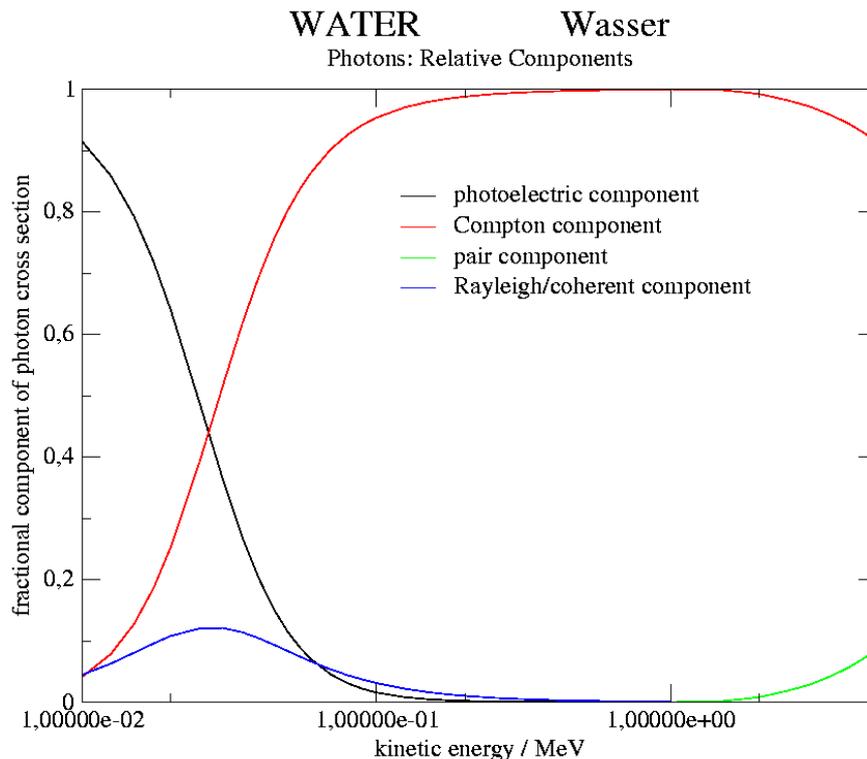


Abbildung 2.2: Relative Anteile des Massenschwächungskoeffizienten von Wasser.
Daten aus EGSnrc-Mediendatei

2.2.2 Elektronen

Die Wechselwirkungen von Elektronen und Positronen werden in vielen Monte-Carlo-Programmen zusammengefasst und die Unterschiede durch Korrekturfaktoren berücksichtigt.

⁴Man betrachte eine Streuung eines Elektrons negativer Energie in einen Zustand positiver Energie (Positron) unter Emission eines Photons.

Wechselwirkungen

Monte-Carlo-Algorithmen für den Elektronentransport sind aufwendiger, da das Coulombfeld geladener Teilchen mit nahezu allen Atomen ihrer Umgebung wechselwirkt. Die Elektronen geben dabei nur einige eV an die Atome ab, welche zur Anregung oder Ionisierung der Valenzelektronen führt. Diese als "soft collisions" bezeichneten Wechselwirkungen führen zu einem reibungsähnlichen kontinuierlichen Energieverlust auf der Flugbahn. Beschrieben werden kann dieses in der *Continuous Slowing Down Approximation* (CSDA).

Zusätzlich gibt es die als "catastrophic events" bezeichneten harten Wechselwirkungen, die zu großen Energie- und Richtungsänderungen des geladenen Teilchens führen. Dazu zählen:

- Wechselwirkungen mit den Elektronen der Atomhülle
 - Møller-Streuung: $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$
 - Bhabha-Streuung: $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$
- Wechselwirkungen mit dem Feld des Atomkerns
 - harte Bremsstrahlungsemission: $e^\pm N \rightarrow e^\pm \gamma N$
 - Positronen-Annihilation (im Flug und in Ruhe): $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$

Die durch diese Prozesse zusätzlich freigesetzten Elektronen werden auch als δ -Strahlen bezeichnet. Der gesamte Energieverlust der Elektronen im Medium kann durch das Massenbremsvermögen $S = -\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dX}$ beschrieben werden.

2.2.3 Transportalgorithmus für Photonen

In Monte-Carlo-Simulationen zum Photonentransport müssen der Ort und die Wechselwirkungen einzelner Photonen bestimmt werden. Die entstehenden Sekundärteilchen müssen im nächsten Schritt ebenfalls weitertransportiert werden. Während des ganzen Transportprozesses muss dabei ständig auf die aktuellen Parameter (Ort, Flugrichtung, Energie) des Photons zugegriffen werden. Die "Phasenräume" der beteiligten Teilchen werden dazu in einem Feld **STACK** gespeichert. Zusätzlich muss noch eine Grenzenergie E_{cut} definiert werden. Photonen mit einer kleineren Energie werden verworfen und nicht weiter verfolgt. Diese Energie sollte so gewählt werden, dass nur Photonen verworfen werden, die keinen Beitrag zur in der Simulation betrachteten Größe liefern. Ein unnötiger Transport von Teilchen sollte zur Verkürzung der Rechenzeit vermieden werden. Die Grenzenergie sollte daher nicht zu niedrig gewählt werden. Das in Abbildung 2.3 gezeigte Flussdiagramm stellt eine vereinfachte Programmlogik für den reinen Photonentransport dar.

Zum Start einer Teilchengeschichte werden die Eigenschaften des Primärphotons im **STACK** abgelegt. Ist die Energie größer als die Grenzenergie, wird mit dem Schwächungsgesetz und den aktuellen Parametern die Distanz bis zur nächsten Wechselwirkung be-

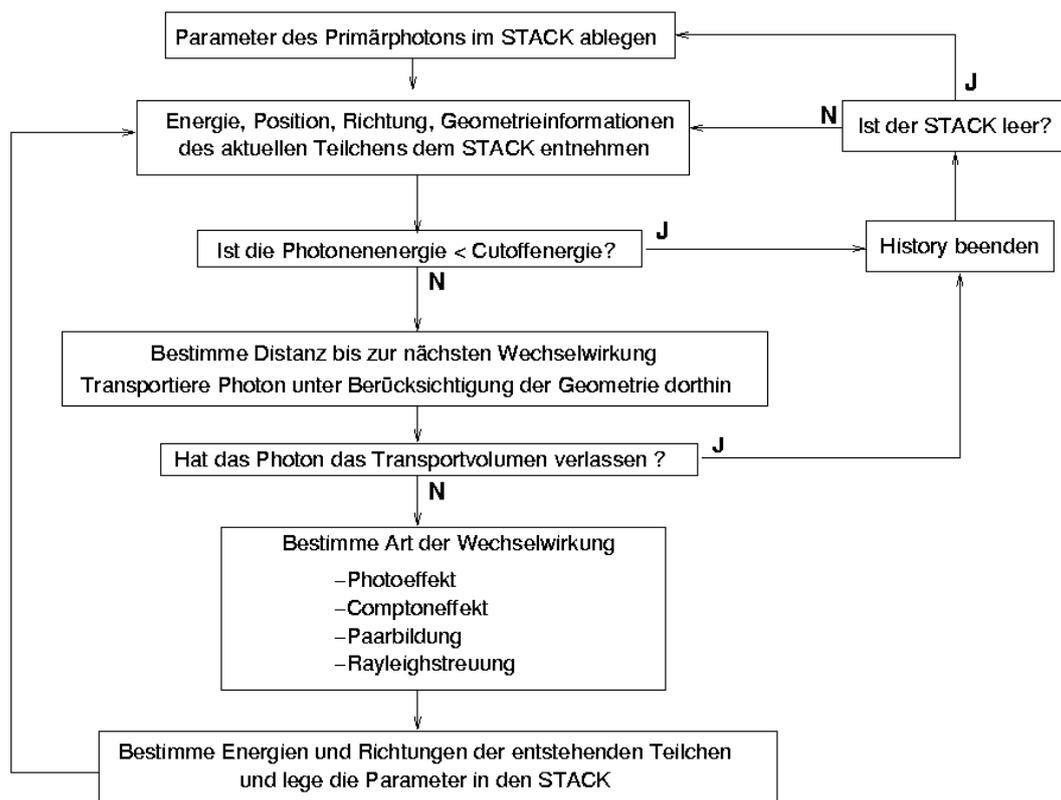


Abbildung 2.3: Flussdiagramm zur vereinfachten Photonentransportlogik (nach [Bie00]).

stimmt. Das Photon wird dann (unter Berücksichtigung der Geometrie) zum Wechselwirkungsort gebracht. Liegt dieser Ort außerhalb der betrachteten Geometrie wird das Photon verworfen, ansonsten wird, gemäß den relativen Anteilen der einzelnen Wechselwirkungen, die Wechselwirkungsart ausgewürfelt. Das Ergebnis der Wechselwirkung wird bestimmt, und die neuen Parameter werden zurück in den STACK gelegt. Die Parameter der erzeugten Sekundärteilchen werden dabei in ein neues Feldelement abgelegt. Anschließend wird das nächste Element des STACK genommen und auf die gleiche Weise transportiert. Dieses Vorgehen wird wiederholt bis alle Feldelemente geleert sind. Danach kann mit einem neuen Primärphoton gestartet werden.

2.2.4 Transportalgorithmen für Elektronen

Ein zum Photonentransport analoges Vorgehen ist praktisch unmöglich, da die Anzahl der zu simulierenden Einzelwechselwirkungen zu groß wird. Ein 1MeV Elektron wird durch $\approx 10^4 - 10^5$ einzelne Kollisionen abgebremst. Deshalb fasst man hier mehrere einzelne Wechselwirkungen zu einem Schritt ("Condensed History"⁵) zusammen. Die vorhandenen Theorien und Modelle zur Beschreibung für solche Mehrfachstreuereignisse unterscheiden sich und können nur unter den jeweils gültigen Voraussetzungen angewendet werden. Verwendet werden z. B. die Molière-Verteilung (in EGS-Codes) oder die Goudsmit-Saunderson-Verteilung (in ETRAN-Codes) [Jen88]. Die Erzeugung

⁵Diese Methode wurde (mit der Einteilung in Klassen) von Berger bereits 1963 eingeführt.

von Sekundärteilchen erfolgt am Ende eines solchen Mehrfachschrilles. Es gibt dabei zwei Klassen von Algorithmen. Die einen produzieren die Sekundärteilchen unabhängig vom Primärelektron durch passende Verteilungen (Class I). Die Schrittlänge der Mehrfachschrille wird festgesetzt. Die anderen (Class II) simulieren am Ende des Mehrfachschrilles direkt die Wechselwirkung zur Erzeugung des Sekundärteilchens. Sie arbeiten sich von direkter zu direkter Wechselwirkung vor. Die Distanz zwischen zwei Wechselwirkungen wird geeigneten Verteilungen (ähnlich dem Schwächungsgesetz für Photonen) entnommen. Bei Class II-Algorithmen wird bei diskreten Wechselwirkungen auch das Primärelektron nochmals betroffen.

Die Condensed History-Methode bringt aber auch einige Probleme mit sich. Es müssen neue (unphysikalische) Parameter in die Rechnungen eingeführt werden [Jen88, Bie00].

Mehrfachstreuungs-Theorie: Die Winkel- und Energieverteilung nach Mehrfachstreuungen sind nur unter bestimmten Annahmen berechenbar.

Schritt-Länge: Das Elektron bewegt sich in der Mehrfachstreuung auf einer geraden Bahn. Die reale Bahn ist jedoch gekrümmt und dadurch länger. Die Schrittlänge muss angepasst werden.

Laterale Verschiebung: Der Endpunkt der realen Bahn ist gegenüber dem der Mehrfachstreubahn verschoben.

Grenzflächenartefakte: Durch Einschränkungen in den zugrundeliegenden Mehrfachstreuungstheorien kommt es zu Problemen nahe an Grenzflächen zwischen zwei Medien. Die gekrümmten Bahnen können das Medium verlassen, auch wenn die gerade Streubahn dies nicht tut. Dies kann zu systematischen Fehlern führen.

Abstand zwischen harten Kollisionen: Die Ergebnisse zeigen Abhängigkeiten von der Anzahl der zusammengefassten Schritte (also der Schrittlänge) zwischen zwei harten Kollisionen.

Durch geeignete Algorithmen z.B. PRESTA [Bie00] kann hier teilweise Abhilfe geschaffen werden. Eine Neuentwicklung ist der Hybrid-Code, welcher in EGSnrc [Kaw00] verwendet wird. Dieser schaltet in Bereichen, in denen die zugrundeliegende Mehrfachstreuungstheorie versagt (u. a. in der Nähe von Grenzflächen), auf Einfachstreuung um und vermeidet so einen Teil dieser Artefakte.

Abbildung 2.4 auf Seite 31 zeigt eine stark vereinfachte Programmlogik für den Elektronentransport. Das Vorgehen ist dem beim Photonentransport sehr ähnlich.

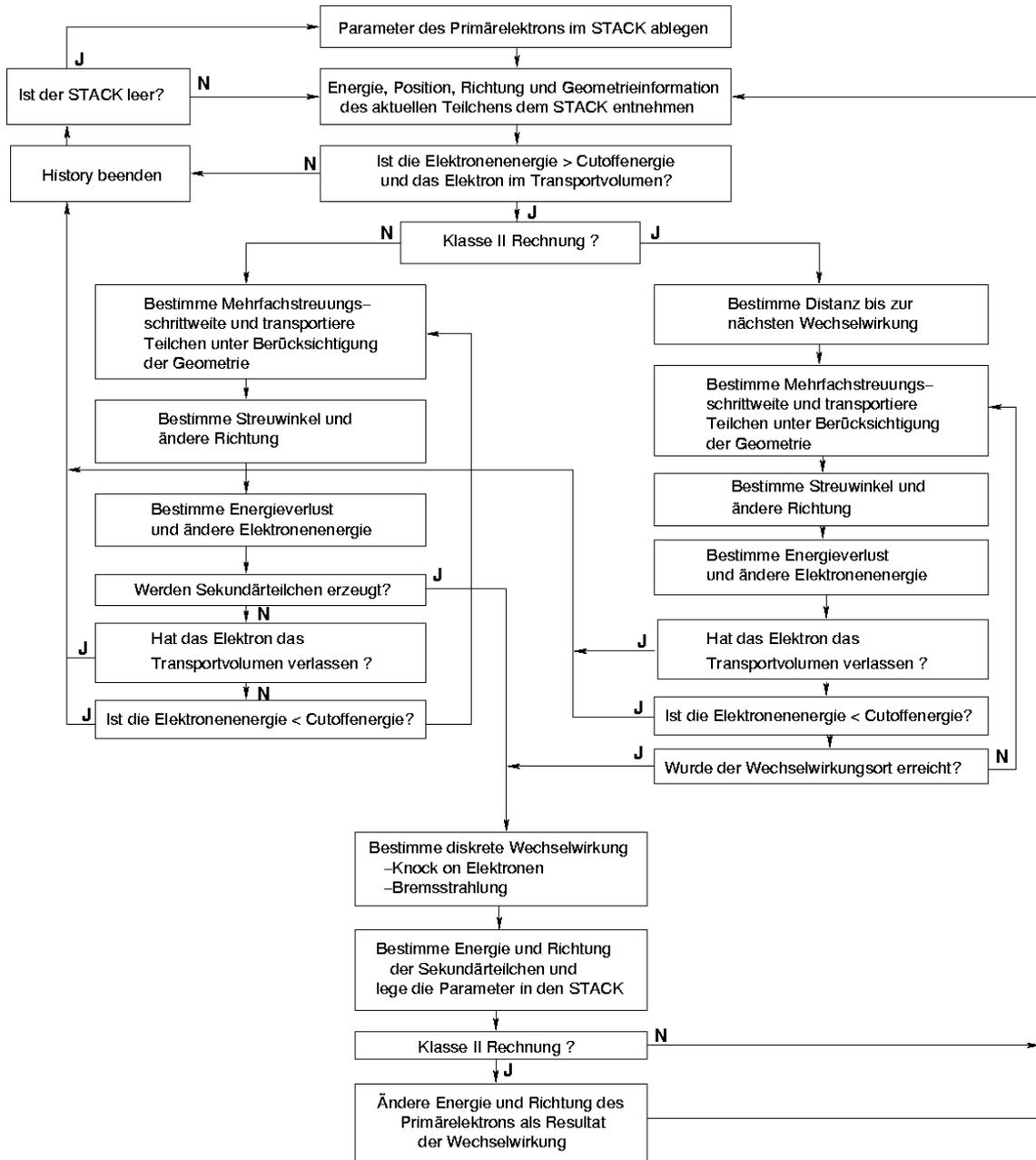


Abbildung 2.4: Flussdiagramm zur vereinfachten Elektronentransportlogik (nach [Bie00]).

2.3 Monte-Carlo-Systeme zur Simulation eines Strahlungsfeldes

Für die Simulation des Strahlungstransportes mit der Monte-Carlo-Methode existieren einige weit entwickelte Systeme. Diese unterscheiden sich im Wesentlichen durch die zugrundeliegenden Wechselwirkungsdaten⁶, die Algorithmen, mit denen der Elektrontransport gehandhabt wird, und in der Beschreibung der Simulationsgeometrie. Für die Geometriebehandlung gibt es zwei Ansätze: "oberflächenbasiert" und "kombinatorisch". Im ersten Ansatz müssen vom Benutzer die Grenzflächen der Region angegeben, bzw. die Abstände der Teilchen dazu berechnet werden. Im zweiten Fall werden die Geometrien aus Oberflächen und einfachen Volumina (sog. "Primitive") durch Kombination zusammengesetzt. Eine Zelle dieser Geometrie wird durch ihre Beziehung zu den "Primitiven" beschrieben. Einige der Codes erfordern einen (nicht unerheblichen) Programmieraufwand vom Benutzer.

Viele der Simulationscodes sind (für Wissenschaftler) frei erhältlich. Ihre Ergebnisse wurden für viele Fragestellungen an Experimenten überprüft. Eine Zusammenstellung wichtiger Codesysteme zeigt Tabelle 2.1.

Code	Kurze Beschreibung
EGS4	Transport von Photonen/Elektronen in beliebigen Medien durch benutzedefinierte Geometrien
ITS	Transport von Photonen/Elektronen in beliebigen Medien durch Schieben, Zylinder oder kombinatorische Geometrien
MCNP	Transport von Neutronen/Photonen/Elektronen (mit MCNPX auch Schwerionen) in beliebigen Medien durch benutzergeneralisierte Geometrien
GEANT	Transport von Hadronen/Photonen/Elektronen in beliebigen Medien durch kombinatorische Geometrien
ETRAN	Transport von Photonen/Elektronen in planparallelen Scheiben endlicher Dicke (unendliche Ausdehnung in den anderen Dimensionen)
XVMC	Transport von Photonen/Elektronen (PXVMC auch Protonen) in Voxelgeometrien

Tabelle 2.1: Monte-Carlo-Systeme, nach Zaidi [Zai04, Kapitel 6].

Zusätzlich existiert eine Reihe von, teilweise auf den oben genannten Systemen basierenden, Codes für spezifische Anwendungen. Ein Vertreter dieser Codes ist das auf dem EGS-System basierende Programm BEAM [Rog95] zur Simulation von medizinischen Linearbeschleunigern. Einige Systeme zur Bestrahlungsplanung in der Strahlentherapie berechnen die resultierenden Dosisverteilungen mit Monte-Carlo-Methoden. Auch zur

⁶Diese geben auch den möglichen Energiebereich der Simulationen vor.

Simulation der bildgebenden Verfahren in der Nuklearmedizin (SPECT, PET) existieren einige fertige Programme [Lju98].

Informationen über die in dieser Arbeit verwendeten Monte-Carlo-Systeme sind im Internet erhältlich unter⁷:

EGSnrc: <http://www.irs.inms.nrc.ca/inms/irs/EGSnrc/EGSnrc.html>

EGS-System: <http://www.slac.stanford.edu/egs4>

MCNP: <http://laws.lanl.gov/x5/MCNP/index.html>

2.3.1 Das EGSNrc-System

In dieser Arbeit wurden die Simulationen mit den Algorithmen des EGS-Systems (*Electron-Gamma-Shower*) [Kaw00] durchgeführt. Das EGS-Programmpaket ist vielfach getestet und erfolgreich mit experimentellen Ergebnissen verglichen worden. In der medizinischen Physik ist dieses System sehr weit verbreitet und gilt als "gold-standard" für die Dosisberechnung mit MC-Methoden. Es basiert auf den Arbeiten von Nagel in Bonn (1960er Jahre) und wurde in Stanford und Tokyo weiterentwickelt. EGS kann Photonen, Elektronen und Positronen im Energiebereich von wenigen *keV* bis zu einigen *TeV* in beliebigen Medien und Geometrien transportieren. Die aktuelle Version des ursprünglichen Programmpaketes ist die in *Mortran/Fortran* implementierte Version EGS4 (seit 1985). Am National Research Council of Canada in Ottawa wurden seit 1999 von Kawrakow und Rogers einige bis dahin von verschiedenen Autoren entwickelte Erweiterungen in das bestehende EGS4-System integriert und als Paket EGSnrc (mittlerweile Version 4) veröffentlicht. Mit dem aktuellen Programmpaket wurde erstmals eine einheitliche Umgebung (EGSnrcMP) geschaffen, um auf mehreren Betriebssystemplattformen mit den selben Codes zu arbeiten. Vorher mussten die Codes für Betriebssysteme außerhalb der Unix-Welt umständlich angepasst werden. Zusätzlich wird in dieser Version erstmals ein EGS-Interface in der Programmiersprache C angeboten.

Details zu einzelnen Aspekten des EGS-Systems finden sich im Handbuch zu EGSnrc [Kaw00] oder in [Jen88, Kapitel 12,13]. Das EGS-System ist in *Mortran* (einem Präprozessor für FORTRAN) geschrieben und besteht aus zwei Teilen, einem Programm zur Aufbereitung der Materialeigenschaften und Wechselwirkungsdaten (PEGS4: Preprocessor for EGS) und den eigentlichen Simulationsroutinen. Mit PEGS4 wird für jedes Material anhand der elementaren Zusammensetzung aus theoretischen und semiempirischen Formeln für die Wirkungsquerschnitte ein Mediendatensatz erzeugt. Mehrere solcher Datensätze werden in einer Mediendatei zusammengefasst und vom eigentlichen System während der Simulation verwendet. Eine solche Mediendatei muss nur einmal erzeugt werden und kann für jede Simulation, in der Materialien aus der

⁷Stand November 2004

Datei vorkommen, verwendet werden.

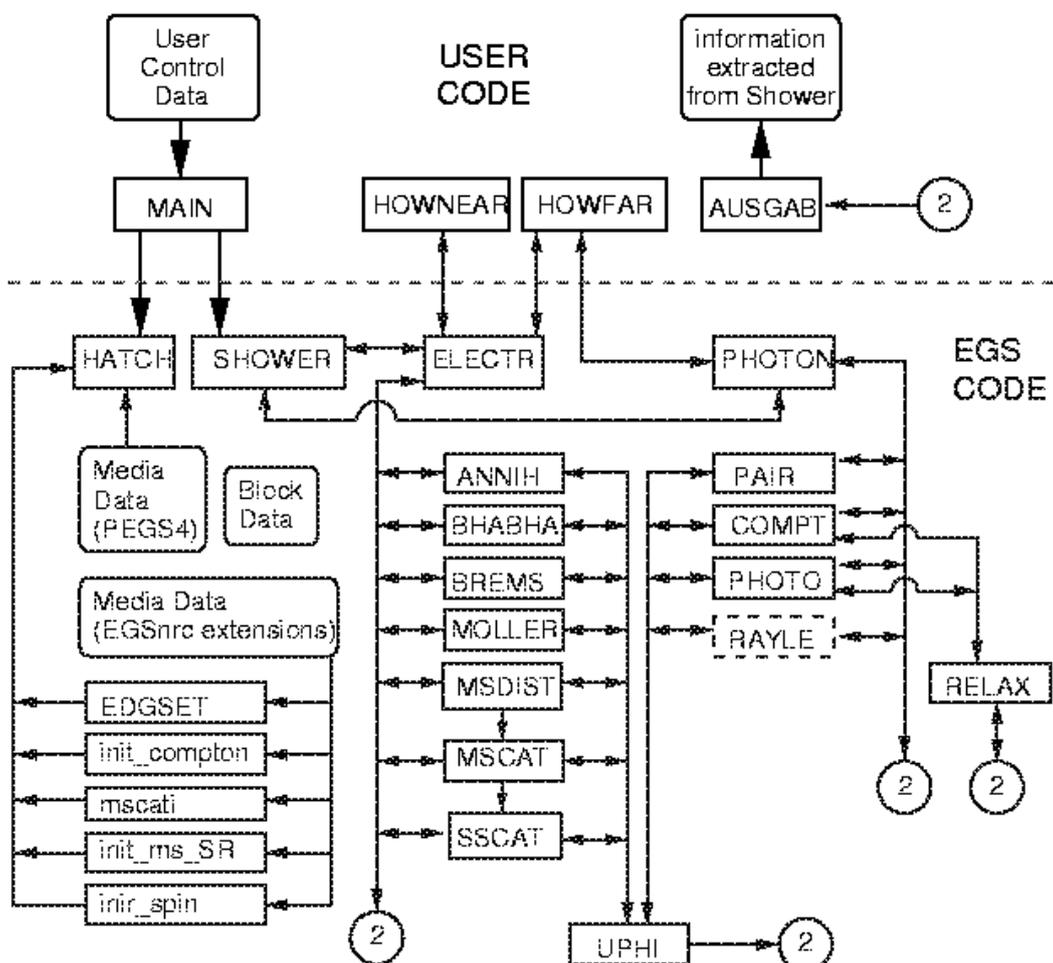


Abbildung 2.5: Die Struktur des EGSNrc-Systems.

Die eigentlichen Simulationsroutinen (vgl. Abbildung 2.5) sind eingeteilt in `usercode` und `egscode`. Der `egscode` leistet die eigentlichen Transport- und Wechselwirkungsschritte. Über eine definierte Schnittstelle kann der Benutzer mit dem System kommunizieren. Diese besteht aus den drei Subroutinen `HOWFAR`, `HOWNEAR` und `AUSGAB` und Variablen, die in den fortrantypischen `COMMON BLOCKS` abgelegt sind. Auch das Hauptprogramm für die Simulation muss der Benutzer liefern. Die mit `PEGS4` erzeugten Mediendaten werden durch die Subroutine `HATCH` eingelesen. Eine Teilchengeschichte ("History") wird durch den Aufruf der Subroutine `SHOWER` gestartet. Das System fragt vor jedem Transportschritt den kürzesten Abstand zur nächsten Grenzfläche in Flugrichtung (`HOWFAR`) und in beliebiger Richtung (`HOWNEAR`)⁸ ab. Dem Benutzer stehen in diesen Routinen die Informationen (Ort, Flugrichtung, Energie, Ladung,

⁸Dieser wird während des Elektronentransportes zur Korrektur der Bahnlänge, bzw. dem Umschalten auf Einzelschritt-Simulation (Presta-II) benötigt.

geplante Schrittweite) über das zu transportierende Teilchen durch die Variablen im Common-Block `STACK` zur Verfügung. Wird eine Grenzfläche getroffen, muss in `HOWFAR` der Transportabstand neu gesetzt werden. In diesem Fall muss auch die Nummer der Region hinter der Grenzfläche angegeben werden. Während des Transports wird immer wieder die Routine `AUSGAB` aufgerufen. Dort können mit Hilfe der Variablen aus den Common-Blocks die benötigten Informationen aus der Simulation extrahiert werden. Einzelne Teilchen können hier auch mit einem Flag markiert werden, um zum Beispiel die Zahl der Compton-Interaktionen zu zählen. Durch die Subroutine `IWATCH` ist es möglich im Verlauf der Simulation Daten für die Darstellung der Teilchenspuren erzeugt werden. Für deren Visualisierung kann ein separat erhältliches Programm `EGS_WINDOWS` [Tre99] verwendet werden.

Leider besitzt das EGS-System keine eigene grafische Oberfläche zur Erstellung der usercodes. Ein Simulationsprogramm muss noch von Hand erstellt werden. Es existieren aber einige Hilfsroutinen zur Geometrieprogrammierung, die im EGS-System enthalten sind. Trotzdem ist gerade bei komplexen Geometrien die Erstellung eines usercodes aufwendig. Zur Lösung des Abstandsproblems zu beliebigen Grenzflächen finden sich viele Informationen in [Bie00]. Für einfache Geometrien existieren bereits fertige usercodes, die durch einfache Eingabedateien gesteuert werden können [Rog00] (z.B. `DOSRZ` zur Berechnung der Dosisverteilung in einer zylindrischen Geometrie).

2.3.2 Das MCNP-System

Das MCNP-Programm (Monte Carlo N Particle) [Bri00] wird am Los Alamos National Laboratory in den USA entwickelt und gepflegt. Es ist zur Zeit in der Version 4C2 verfügbar. Der Code muss jedoch in Europa über die NEA (National Energy Agency) in Frankreich bezogen werden, ist aber für Lehre und Forschung frei erhältlich. Der MCNP-Code ist in der Lage, neben dem Photonen- und Elektronentransport (im Energiebereich von 1keV bis 1GeV) auch Neutronentransportrechnungen durchzuführen. Für Rechnungen mit schweren geladenen Teilchen existiert eine Erweiterung `MCNPX`. Das MCNP-System benötigt keine Programmierung auf der Benutzerseite, lediglich zur Installation wird ein `FORTRAN`- und ein `C`-Compiler benötigt. Die Simulationen werden durch Eingabedateien (`INP-FILES`) gesteuert. Dort können dem System die Simulationsparameter und die Simulationsgeometrie durch "kombinatorische Geometrie" mitgeteilt werden. Die einzelnen Regionen (Zellen) der Geometrie werden definiert durch die Kombination von Oberflächen ersten und zweiten Grades, oder durch Kombination geometrischer Primitive (Quader, Zylinder, Torus, ...). Diesen Zellen werden Medien zugeordnet, die im `INP-FILE` durch Angabe der Dichte und der elementaren Zusammensetzung definiert werden. Der Benutzer kann zwischen sieben möglichen Ergebnissen (`Tallies`) auswählen (z.B. Teilchenfluss durch eine Oberfläche oder das Spektrum der in einer Zelle deponierten Energie). In dieser Arbeit wurden `Tallies` des Typs `F8:P,E`, die das Energiespektrum in der spezifizierten Zelle (normiert auf die simulierte Teilchenanzahl) ausgeben, verwendet. Die Parameter der Quelle

können vom Benutzer im INP-FILE unter Verwendung einer vordefinierten allgemeinen Quellroutine, oder durch eine selbstgeschriebene Subroutine bestimmt werden. Für die komfortable Erstellung der INP-FILES gibt es grafische Tools, die ebenfalls über die NEA bezogen werden können. Zur Erstellung der Simulationsgeometrie des Kölner Ganzkörperzählers wurde das Programm `mcnpvised` [Car02] (Abbildung 2.6) verwendet.

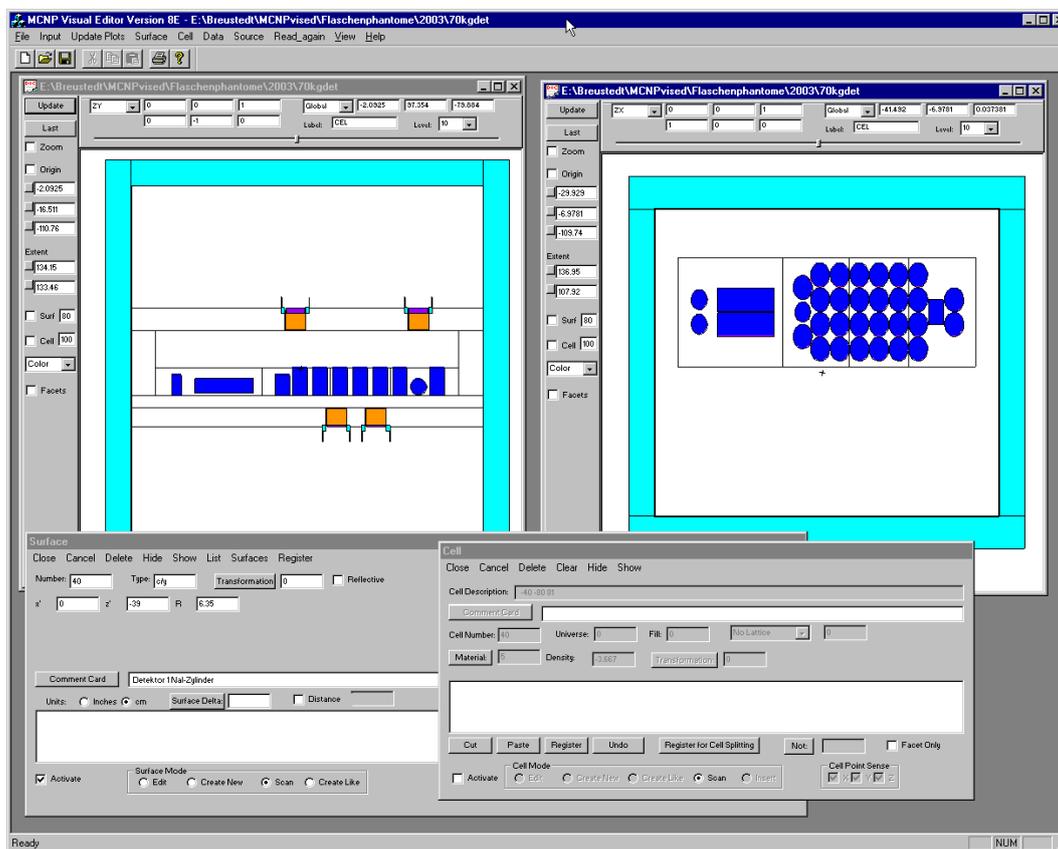


Abbildung 2.6: Die grafische Oberfläche des `mcnpvised`.

Das MCNP-Programm besitzt einen eigenen Plotter, der zur zweidimensionalen Darstellung der Simulationsgeometrie benutzt werden kann. So kann durch Anzeigen geeigneter Schnitte eine einfache Überprüfung der Simulationsgeometrie erfolgen. Das Plotprogramm ist auch in der Lage, die Wirkungsquerschnitte der verwendeten Medien und die Ergebnisse der Simulationen (Tallies) darzustellen. Die Abbildungen 2.7 und 2.8 zeigen Plots der Geometrie und des Spektrums der Simulation eines 70kg-Flaschenphantoms mit dem MCNP System.

Im MCNP-System ist eine Fehlerbehandlung in der "history-by-history"-Variante realisiert. Während der Simulation kann nach jeder gerechneten Teilchengeschichte der statistische Fehler der Tallies beobachtet werden. Nach der Rechnung werden vom Programm zehn statistische Tests mit den Tallies durchgeführt, um die Verlässlichkeit der Ergebnisse beurteilen zu können. Informationen über diese Tests und andere Eigenschaften des MCNP-Systems finden sich in [Bri00].

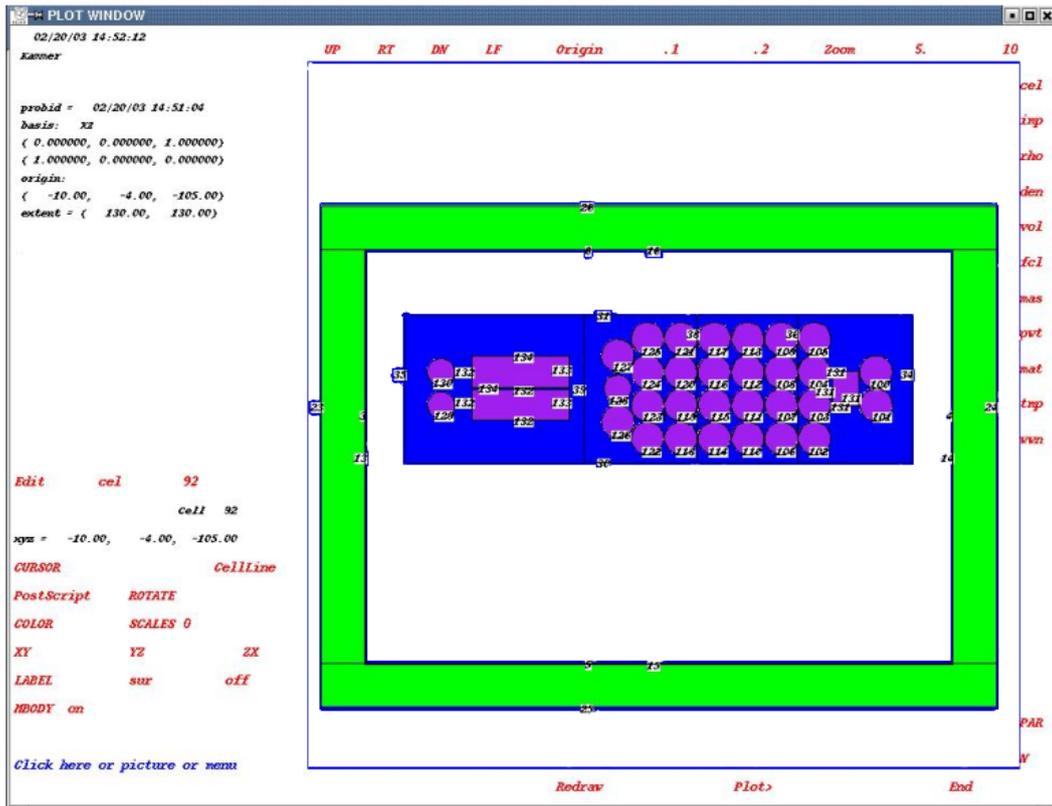


Abbildung 2.7: MCNP-Plot des 70kg-Flaschenphantoms.

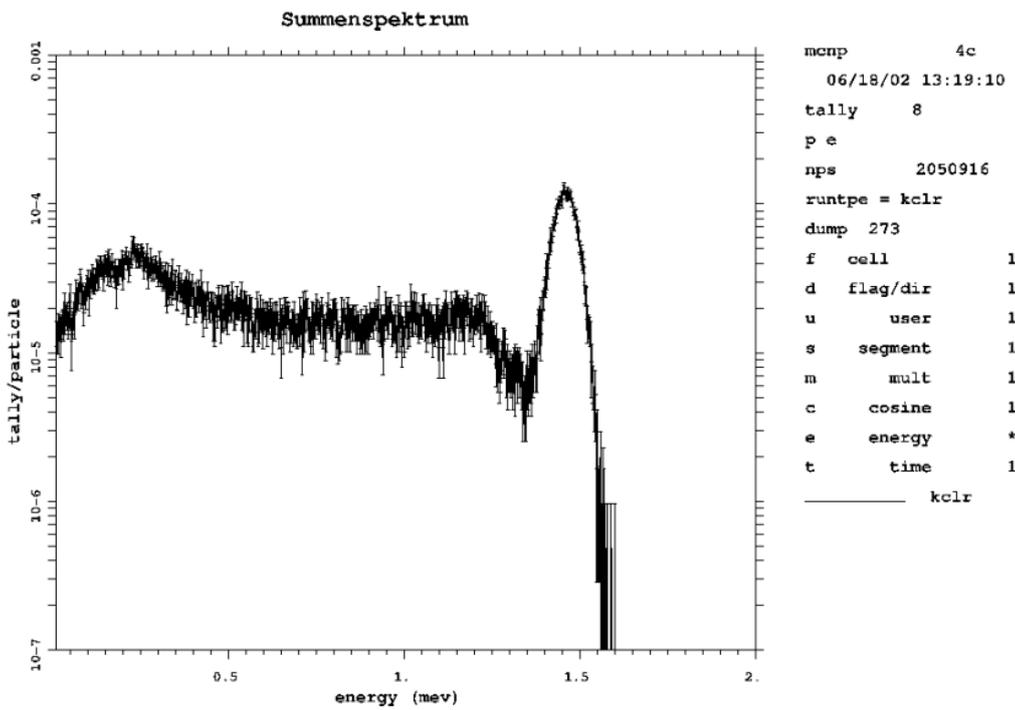


Abbildung 2.8: ⁴⁰K-Spektrum des 70kg-Flaschenphantoms aus der MCNP-Simulation.

3 Kalibration des Kölner Ganzkörperzählers

In diesem Kapitel wird die Kalibrierung des Kölner Ganzkörperzählers durch Phantommessungen und Simulationen beschrieben und das zur Bearbeitung der gewonnenen Spektren implementierte Softwaresystem `BCMC-Soft` vorgestellt. Beispielhafte Anwendungen des neuen Systems schließen das Kapitel ab.

3.1 Klassische Effizienzkalibration des Kölner GKZ durch Phantommessungen

In den Jahren 1998/1999 und 2002 wurden mit den Flaschenphantomen für die Nuklide ^{201}Tl , ^{57}Co , ^{99m}Tc , ^{111}In , ^{131}I , ^{18}F , ^{58}Co und ^{40}K durch Messungen in Geometrien von 10 bis 100kg Effizienzkalibrierungen vorgenommen. Für die Nuklide ^{133}Ba , ^{137}Cs und ^{60}Co konnte das Ziegelphantom "Igor" [RTC97] des BfS mit vier Massen (43kg bis 96kg) verwendet werden. Die Messdauer betrug jeweils 450s. Für ^{40}K wurde die Messdauer wegen der niedrigen Emissionswahrscheinlichkeit der nachzuweisenden 1460keV-Photonen auf 1800s erhöht. Die Flaschen der Phantome wurden mit entsalztem Wasser befüllt, bis die Flaschen ein Gesamtgewicht von 2kg bzw. 1kg hatten. Für jedes Nuklid wurde aus einer kalibrierten Standardlösung eine Verdünnungsreihe hergestellt, um die Aktivitäten auf die Flaschen zu verteilen. Bei der Präparation der Aktivitäten für die Phantome müssen zwei eigentlich widersprüchliche Vorgaben befolgt werden. Zum einen sollen die Effizienzfaktoren mit möglichst hoher statistischer Genauigkeit ermittelt werden. Daher sollten möglichst hohe Aktivitäten verwendet werden. Im amerikanischen Standard [HPS96] werden für die Kalibrierung Mindestaktivitäten angegeben. Zum anderen dürfen keine Totzeiteffekte während der Kalibrationsmessungen auftreten. Die Aktivitäten dürfen deshalb auch nicht zu groß sein. Für ^{40}K wurde mit KCl eine Stammlösung angesetzt und auf die Flaschen verteilt, so dass eine Konzentration von 2g Kalium pro kg vorlag. Dieser Massenanteil entspricht in etwa dem im menschlichen Muskelgewebe vorliegenden [ICRU92]. Problematisch ist es, die erforderliche Konzentration der Stammlösung zu erreichen, hier gelangt man in die Nähe der maximalen Löslichkeit. Die Stammlösung wurde daher vor ihrer Verwendung ständig mit einem Magnetührer durchmischt. Das ^{40}K -Phantom wurde in einem eigenen Flaschensatz angesetzt und steht dauerhaft für Messungen zur Verfügung ($T_{1/2}(^{40}\text{K}) = 1,3 \cdot 10^9 \text{a}$). Für die Phantome mit den anderen Nukliden wurde ein anderer Flaschensatz verwendet. Der Aufbau der Phantome erfolgte nach den vorhandenen Plänen des Bundesgesundheitsamtes. Die "Menschenform" des 70kg-Aufbaus zeigt Abbildung 1.10 auf Seite 20. Es wurde darauf geachtet, für jedes

Nuklid die gleichen Phantompositionen einzuhalten. Die Auswirkungen von Verschiebungen der Phantome längs der Liege auf die Effizienz konnten bereits in [Bre02] gezeigt werden. Diese kann zum Beispiel durch die Position des Phantomschwerpunktes (längs der Liege) charakterisiert werden. Für das 40kg-Phantom ist der Schwerpunkt im verwendeten Aufbau in Richtung Kopfende verschoben. Dieses erklärt auch den Ausreißerpunkt in der in Abbildung 3.1 gezeigten Effizienz-Massenkurve für $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{K}$.

Vorgehen bei der Berechnung der Effizienzen: Die gemessenen Spektren wurden für jedes Nuklid in eine Excel-Arbeitsmappe importiert und dort untergrundkorrigiert. Aus den Aktivitäten zum Messzeitpunkt (in Bq) und den Zählraten in den jeweiligen ROIs (in Cps) wurden die benötigten Effizienzfaktoren (in Cps/Bq) berechnet. Anpassungen verschiedener empirischer Kurventypen an die gewonnenen Daten ergeben die Parameter der verwendeten Kalibrierkurven. Als Kurventyp am besten geeignet erwies sich eine "inverse"-Funktion des Typs:

$$eff(m) = a \cdot m + b/m + c$$

Die Parameter a , b und c dieser Funktionen wurden in einer Datenbank hinterlegt, auf welche die vorhandene Auswertesoftware BC-Soft zur Berechnung der Elemente der Effizienzmatrix zugreift.

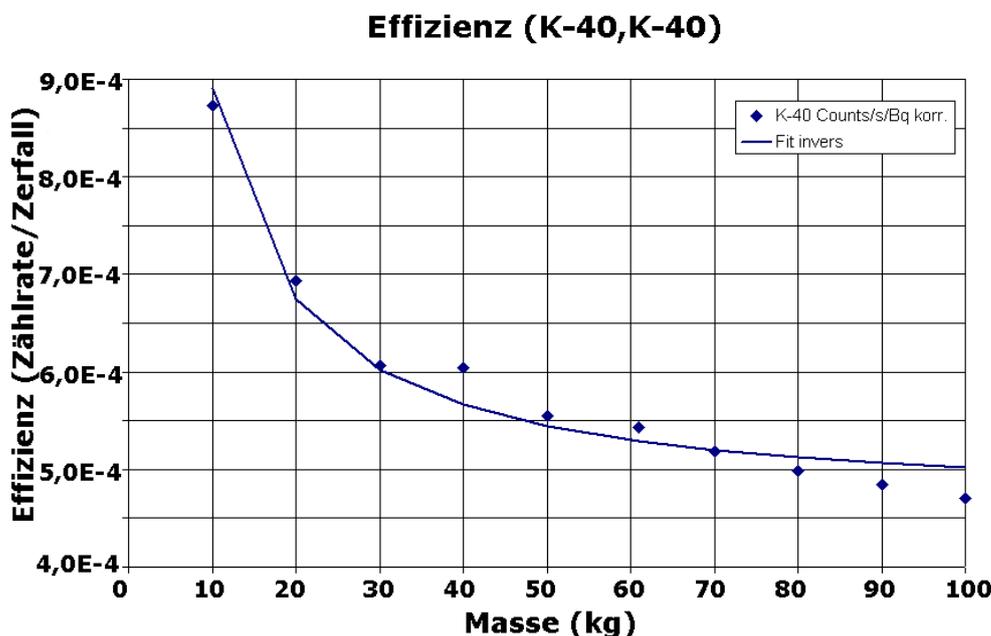


Abbildung 3.1: Durch Messungen mit dem Flaschenphantom bestimmte Effizienz-Massenkurve für $^{40}\text{K} \leftarrow ^{40}\text{K}$.

Das "Fehlerpotential" dieser Kalibrierung liegt in der Aktivitätsbestimmung. Die Unsicherheit der kalibrierten Standardaktivität wurde vom Hersteller mit $\pm 3\%$ angegeben. Die anschließende Verdünnung führt zu einer weiteren Ungenauigkeit in den für die Berechnungen zugrunde gelegten Aktivitäten. Die geometrische Modellierung des Körpers

durch die verwendeten Phantome ist eine weitere Fehlerquelle. Hierzu existieren jedoch keine Alternativen. Die gleichmäßige Verteilung der Nuklide auf die Flaschen bzw. Ziegel der Phantome gibt zudem nicht die reale Aktivitätsverteilung wieder. Die aus den Kalibrationsmessungen bestimmten Effizienzen sind daher mit systematischen ("geometrischen") Fehlern behaftet.

3.1.1 Zur Energieeichung des GKZ

Die Energieeichung des Ganzkörperzählers wird arbeitstäglich überprüft. Dazu wird eine Testquelle (bestehend aus einer "Tablette" mit ^{22}Na und einem Plättchen mit ^{133}Ba) für 120 Sekunden gemessen. Im Summenspektrum werden Lage und Breite der Peaks bei 511keV (Annihilationsphotonen) und 1274keV von der Messsoftware ermittelt und ausgegeben. Weichen die gemessenen Werte zu stark von den Sollwerten ab, muss (mit derselben Quelle) eine neue Energieeichung erfolgen. Die Testquelle wird für die Messungen näherungsweise im Schwerpunkt der vier NaI(Tl)-Detektoren positioniert.

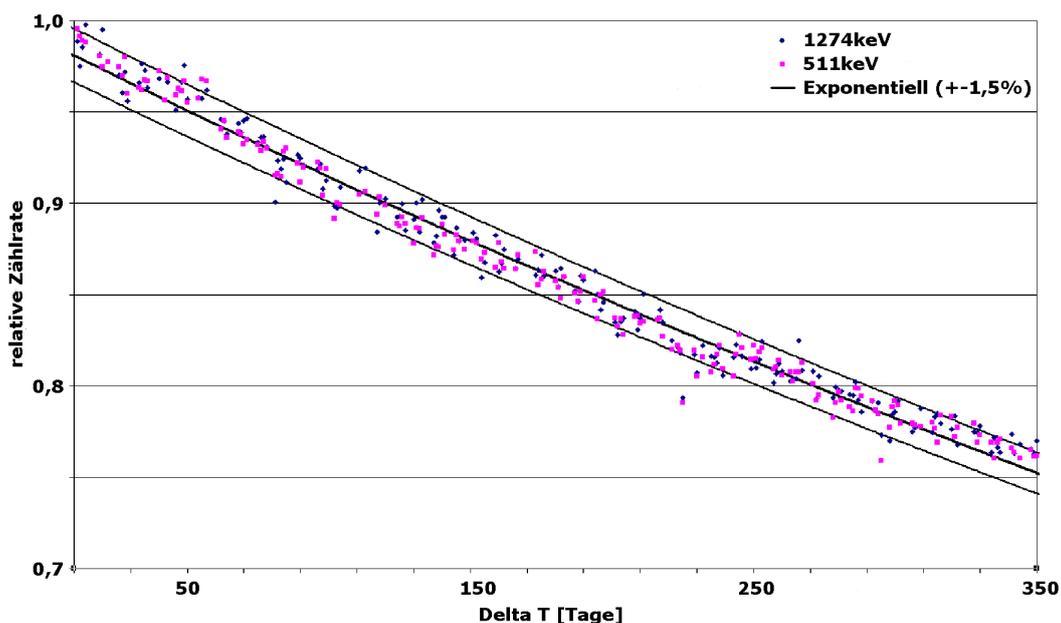


Abbildung 3.2: Relative Zählraten der QK-Messungen aus dem Jahr 2003.

Das Ansprechvermögen der Detektoren kann mit dieser Qualitätskontroll-Messung (QK-Messung) ebenfalls überprüft werden. Dazu müssen zusätzlich die Peakinhalte ermittelt und mit einem Sollwert verglichen werden. Dieser Sollwert wird für jeden Tag aus der Halbwertszeit der Quellen errechnet. Der Startwert (für Tag 0) kann entweder einer Messung oder einer Simulation entnommen werden. Die genaue Reproduktion der Quellenposition in jeder Messung ist besonders wichtig. Durch eine Serie von

Simulationen mit verschiedenen Quellenpositionen konnte gezeigt werden, dass schon 5cm Abweichung von der Sollposition Änderungen des Peakinhaltes von bis zu 7% bewirken. Die tatsächlich erreichte Positionierungsgenauigkeit der Quelle in den Messungen ist jedoch höher, wie die Auftragung der QK-Messungen aus dem Jahr 2003 (Abbildung 3.2) zeigt. Die Schwankung der Zählraten um den Sollwert liegt bis auf Ausnahmen bei weniger als 1,5%. Trotzdem soll ein an der Detektorhalterung fest verankerter Quellenhalter installiert werden, um eine noch größere Reproduzierbarkeit der Quellenposition zu erreichen. Die oben beschriebene Methode wurde bereits in einem kleinen Qt-Programm `qktool` (vgl. Anhang A.6) implementiert. Dieses liest die gemessenen Peakparameter (Zentrum, Breite, Fläche) aus einer, von der Messsoftware an definierter Stelle abgelegten, Datei ein und zeigt diese Werte in einem Fenster an. Liegen die Werte außerhalb einer vorgegebenen Toleranz, werden diese farbig hinterlegt. Die gemessenen Werte und der Name der Spektrendatei werden in einer Textdatei gespeichert.

Interessant sind die in diesem Fall beobachteten Eigenschaften der Energieeichung durch die Messsoftware. Die Energie-Kanal-Zuordnung wird von der Messsoftware durch ein quadratisches Polynom beschrieben. Dieses wird durch drei in Tabelle 3.1 angegebene festgelegte Energie-Kanal-Paare definiert.

Energie [keV]	Kanalnummer
81	32
511	255
1274	636

Tabelle 3.1: Energie-Kanal-Zuordnung durch die Messsoftware.

Bei der Energieeichung wird das Spektrum der ^{22}Na -Quelle mit der Standardeinstellung der Messelektronik aufgenommen. In den Spektren der Einzeldetektoren werden die Positionen der Peaks (in Kanälen) bestimmt. Durch einen aus den bestimmten Peaklagen berechneten Skalierungsfaktor werden die gemessenen Peakzentren elektronisch auf die Sollkanäle gezogen. In den Messungen der ^{22}Na -Quelle aus dem Jahr 2000 war die Aktivität der Quelle noch so hoch, dass es zu Pileup-Effekten kam. Daher ist in den Spektren des HPGe-Detektors ein Summenpeak bei 1785keV zu beobachten. Dieser erscheint im NaI(Tl)-Summenspektrum aber bei 1840keV (d.h. um 3% nach oben verschoben). Die Energie-Kanal-Zuordnung wird in diesem Bereich durch das verwendete quadratische Polynom nur ungenau beschrieben. Besser geeignet ist hier ein kubisches Polynom. Die Koeffizienten für höhere Grade sind vernachlässigbar, der für Grad drei hingegen nicht. Eine solche "richtige" Energieeichung wurde aus den gemessenen Peaklagen (Kanal) verschiedener Nuklide berechnet. Die Abweichung der von der Messsoftware angezeigten Energie zur "realen" Energie zeigt Abbildung 3.3. Man sieht hier, dass der für die Inkorporationsmessungen wichtige Bereich zwischen 80keV und 1460keV mit einem Fehler von weniger als 1% "geeicht" wird. Oberhalb

von 1500keV und unterhalb von 80keV treten jedoch größere Abweichungen (bis zu 5%) auf. Bei der Summenenergie im ^{22}Na -Spektrum (1785keV) bewirkt dies die in Abbildung 3.4 gezeigte Verschiebung des Peaks um 55keV . Eine Nuklididentifizierung ist in diesem Energiebereich daher nicht möglich. Hierzu muss der HPGe-Detektor verwendet werden. Auch beim Vergleich gemessener und simulierter Spektren müssen die Abweichungen in diesen Energiebereichen beachtet werden. Für die Energien von 80keV bis 1500keV ist eine "Korrektur" der Energieachse der simulierten Spektren nicht notwendig.

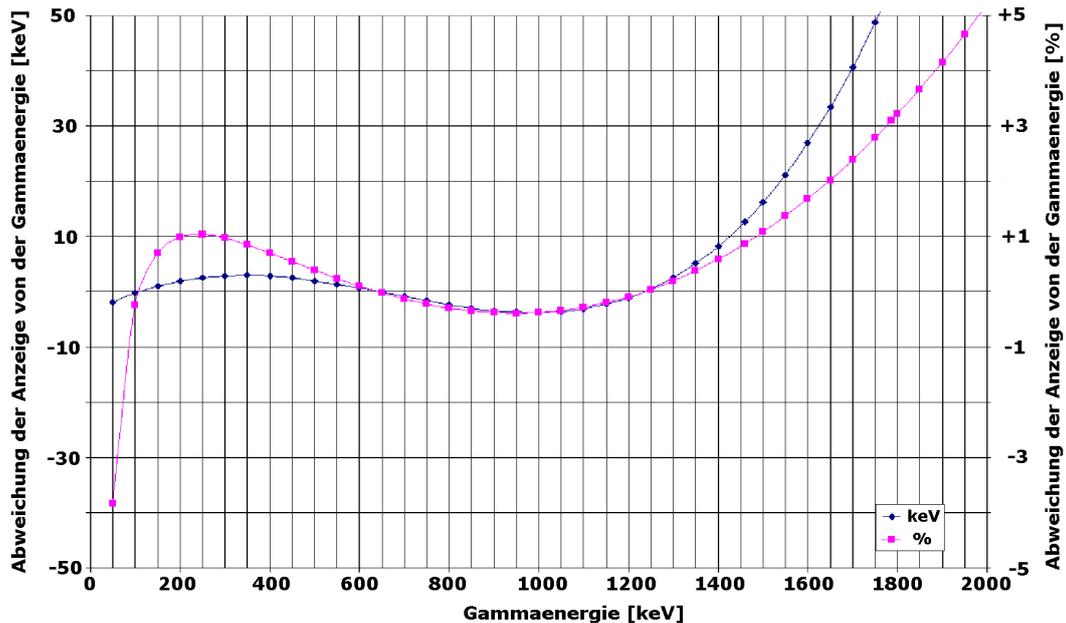


Abbildung 3.3: Abweichung der angezeigten Energie von der tatsächlichen.

3.2 Simulation des Kölner Ganzkörperzählers

Die Kalibration des Ganzkörperzählers durch Phantommessungen ist beschränkt auf wenige Nuklide. Es können nur die vorher in den Phantomen gemessenen Nuklide quantifiziert werden. Wird ein anderes Nuklid in einer Inkorporationsmessung identifiziert, kann nur aus Interpolation zwischen bekannten Effizienzen eine geeignete Nachweiswahrscheinlichkeit zur Berechnung der inkorporierten Aktivität gewonnen werden. In [Bre02] wurde bereits gezeigt, dass es möglich ist, die Spektren der Flaschenphantommessungen auf dem Computer nachzuvollziehen. In den Simulationen können beliebige (auch fiktive) Nuklide als Strahlenquelle verwendet werden. Durch diese Möglichkeit der Simulation beliebiger Messungen im Kölner Ganzkörperzähler kann eine umfassendere Effizienzkalibration erfolgen.

Die "Idealvorstellung" für die numerische Kalibration wäre eine auf Voxelphantomen

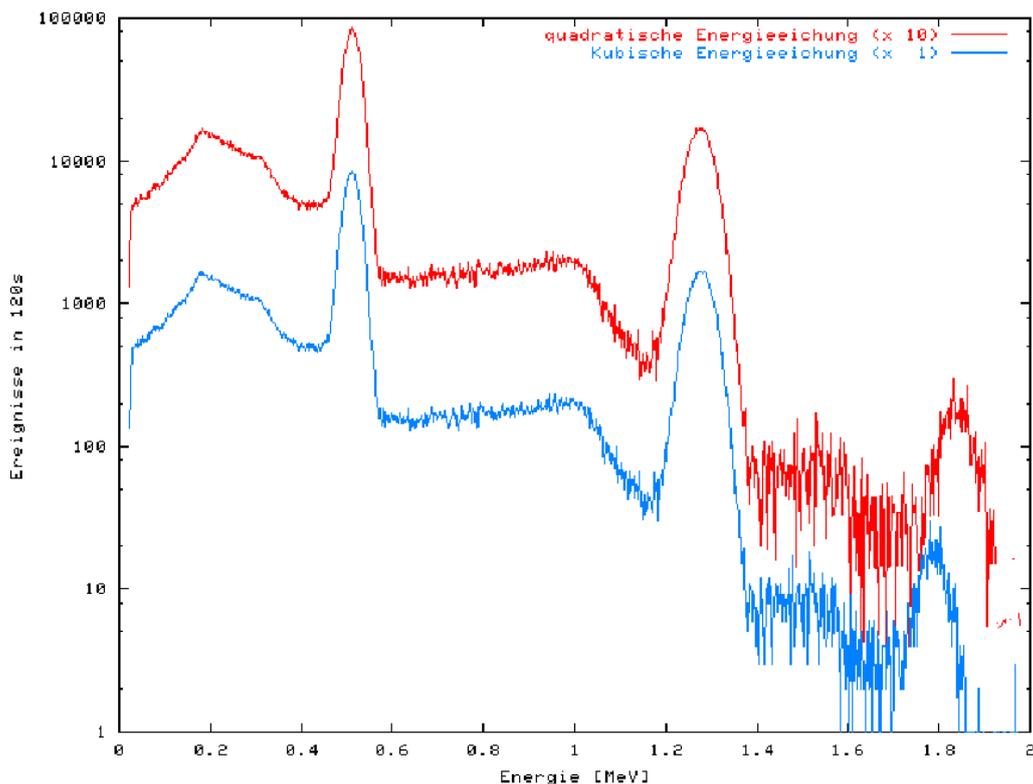


Abbildung 3.4: Verschiedene Energiegleichungen für ein Spektrum der ^{22}Na -Quelle. Zur besseren Übersicht sind die beiden Spektren eine Dekade versetzt.

basierende Kalibrierung. Diese können aus CT- bzw. NMR-Aufnahmen des Körpers konstruiert werden. Von den bislang bekannten Voxelpantomen (beispielsweise [Xu00, Wis94, ICRU92]) wird immer nur jeweils eine "Geometrie" repräsentiert. Durch Simulationen mit diesen Phantomen könnten aber keine Effizienzfunktionen gewonnen werden. Die Kalibrierung müsste auf mehrere solcher (im allgemeinen nicht frei erhältlicher) Phantome gestützt werden. Die Implementation solcher Phantome in bekannte Monte-Carlo-Systeme ist schwierig, da es sich um sehr große Datenstrukturen handelt. Ein Voxelpantom mit einer "geringen" Schichtauflösung von $128 \cdot 128 \text{ Pixeln}^1$ und einer Schichtdicke von $0,5 \text{ cm}$ besteht für eine 170 cm große Person bereits aus 5,57 Millionen Voxeln. Im EGS-System müssen für jedes Voxel mehrere Informationen (z.B. eine Mediennummer) gespeichert werden. Die Verwaltung der so entstehenden Datenmenge stellt für die Simulation auf einem Desktop-PC ein Problem dar. Eine Reduktion der Datenmenge kann z.B. durch eine Kopplung benachbarter Voxel mit gleichem Medium erfolgen [Zai04]. Angesichts der geforderten Genauigkeit für die Strahlenschutzmessungen kann auf ein Voxelpantom und den damit verbundenen Aufwand in diesem Fall verzichtet werden. Für Messungen mit klinischen Fragestellungen (beispielsweise die Bestimmung des Körperfettanteils mit der ^{40}K -Methode) ist es jedoch notwendig, in der Kalibrierung die Messsituation möglichst genau abzubilden.

¹Üblich sind Auflösungen von $256 \cdot 256$ oder $512 \cdot 512$ Pixeln.

Im nächsten Abschnitt werden Tests beschreiben, mit denen die Eignung und Handhabung der beiden Monte-Carlo-Systeme EGSNrc und MCNP für die numerische Kalibration eines Ganzkörperzählers überprüft wurde. Im darauf folgenden Kapitel wird das entwickelte Modell zur Simulation der Spektrometrie im Kölner Ganzkörperzähler mit dem EGSNrc-System beschrieben. Mit dem System wurde die Effizienzkalibration des Gerätes in der Flaschenphantomgeometrie nachvollzogen und auf zusätzliche Nuklide erweitert. Im Anschluss an die Beschreibung dieser Simulationen wird die Kombinationsmethode zur Berechnung der Nachweiswahrscheinlichkeiten aus der Energieabhängigkeit der Effizienzen vorgestellt.

3.2.1 Vergleich der MC-Systeme EGSNrc und MCNP für die Simulation eines Ganzkörperzählers

Zunächst sollte geklärt werden, welches der beiden Monte-Carlo-Systeme für die Simulation der "Spektrometrie in einem Ganzkörperzähler" besser geeignet ist. Für andere, insbesondere dosimetrische Fragestellungen, gibt es eine große Zahl von Publikationen, in denen die Detailunterschiede zwischen den beiden Systemen beleuchtet werden (z.B. [Chi02, Lju98, Zai04]). Die Unterschiede in den Simulationsergebnissen treten insbesondere in der Nähe von Grenzflächen auf, da dort die Annahmen der Mehrfachstreuungstheorien für den Elektronentransport verletzt sein können. Auch durch die unterschiedliche Behandlung der deponierten Energien kommt es zu Unterschieden in den Simulationsergebnissen. Dosimetrische Fragestellungen unterscheiden sich von spektrometrischen Fragestellungen, da die Information über die spektrale Verteilung der Energie nicht benötigt wird. Beide Programmpakete werden von verschiedenen Autoren auch zur Simulation spektroskopischer Fragestellungen mit Erfolg verwendet [Kli01, Zai04].

Durch die Simulation zweier Flaschenphantomgeometrien (30kg und 70kg) wurde die Eignung und Handhabung der Systeme für die Simulation einer in-Vivo-Messung von Radioaktivität überprüft. Für die Rechnungen mit dem EGSNrc-System wurde der `usercode` `Flaschenphantom` (vgl. Kap 3.2.2) verwendet. Mit dem Editor `mcnpvised` wurde diese Geometrie im MCNP-System nachmodelliert. Hierbei wurde genau darauf geachtet, gleiche Abstände und Größen im Modell zu verwenden. Auch die Parameter der Simulationen (Grenzenergien, Materialdefinitionen) wurden in beiden Systemen identisch gewählt. Die Definition der Simulationsgeometrie im MCNP-System erfolgte durch kombinatorische Geometrie, d.h. die Zellen des Modells werden durch die Kombinationen aus Oberflächen und Basisfiguren (Quader, Kugel, Säulen, ...) erzeugt. Diese Kombinationen werden in "kryptischer" Form in der `INP-Datei` angegeben. Einen Auszug aus der MCNP-Definition des Kölner Ganzkörperzählers zeigt Abbildung 3.6.

Für die Nuklide ^{131}I und ^{40}K wurden mit beiden Programmen die Spektren in den modellierten Phantomgeometrien berechnet. Die Erzeugung des Spektrums im EGS-System erfolgt in der Subroutine `AUSGAB`. Dort wird die, während einer Teilchengeschichte von

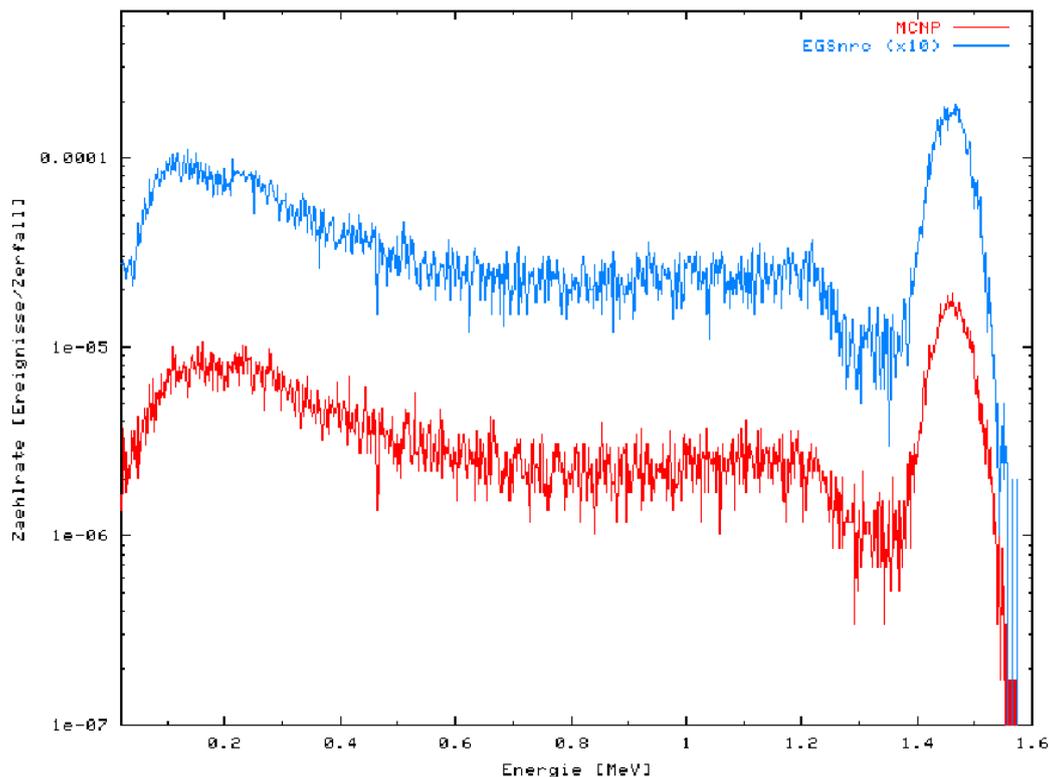


Abbildung 3.5: Vergleich des gemessenen mit den simulierten ^{40}K -Spektren im 30kg-Flaschenphantom. Zur besseren Übersicht ist das EGSnrc-Spektrum eine Dekade nach oben versetzt dargestellt.

den Elektronen im Kristall deponierte Energie in einer Variable aufsummiert. Am Ende der Teilchengeschichte wird dieser Wert dann in ein Histogramm, welches das Spektrum repräsentiert, eingetragen. MCNP verfolgt ein anderes Konzept zur Erzeugung eines Gammaspektrums: Für jede Zelle wird die Energie der eintretenden und der austretenden Teilchen aufsummiert. Die Differenz entspricht der dort deponierten Energie, welche am Ende einer Teilchengeschichte in das Spektrum eingetragen wird. Einem Teilchen, das die Zelle ohne Energieverlust kreuzt, wird jedoch zur programminternen Verwaltung ein kleiner (10^{-12}eV) Energieverlust zugeordnet, welcher zu Einträgen im ersten Kanal des Spektrums führt. Durch die (nichtanaloge) Behandlung der freigesetzten Elektronen kann es außerdem zu kleinen negativen Werten für die deponierte Energie kommen. Um diese beiden "Fehler" auszufiltern, werden der erste und zweite Kanal (Nullbin und ϵ -bin von $0 - 0.01\text{keV}$) des Spektrums genutzt. Die "Fehlerereignisse" landen in diesen Kanälen, die in der weiteren Spektrenauswertung nicht mehr berücksichtigt werden. In Abbildung 3.5 sind diese häufig auftretenden "Rechenfehler" bereits abgeschnitten. Die Detektorauflösung wird in der MCNP-Rechnung bereits während der Simulation durch eine Gaußsche Verbreiterungsfunktion des Typs

$$f(E) = C \cdot \exp\left(-\left(\frac{2\sqrt{\ln 2}(E - E_0)}{FWHM}\right)^2\right) \text{ mit } FWHM = a + b \cdot \sqrt{E} + cE^2$$

berücksichtigt [Bri00]. Hierbei sind E die Energie im Spektrum, E_0 die in der Zelle

Spektrenbereich	Beschreibung	EGSNrc	MCNP
0,02-0,50 MeV	Rückstrebereich	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$1,42 \cdot 10^{-3}$
0,50-1,15 MeV	Comptonstrebereich	$7,78 \cdot 10^{-4}$	$8,05 \cdot 10^{-4}$
1,15-1,30 MeV	Comptonkante	$1,52 \cdot 10^{-4}$	$1,47 \cdot 10^{-4}$
1,36-1,56 MeV	Photopeak	$7,06 \cdot 10^{-4}$	$6,91 \cdot 10^{-4}$
0,02-1,60 MeV	Gesamt	$2,90 \cdot 10^{-3}$	$3,09 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 3.2: Vergleich der Zählraten in den simulierten ^{40}K -Spektren.

deponierte Energie, $FWHM$ die Halbwertsbreite der Gaußfunktion und C eine Normierungskonstante. Als Parameter a, b und c der $FWHM$ -Funktion wurden experimentell ermittelte Werte verwendet. Diese wurden auch für die Faltung der Spektren aus den EGSnrc Simulationen verwendet (vgl. Kapitel 3.2.2). Abbildung 3.5 zeigt einen Vergleich des gemessenen Spektrums mit den beiden simulierten Spektren des 30kg-Flaschenphantoms für das Nuklid ^{40}K . Diese zeigen eine gute Übereinstimmung miteinander. Tabelle 3.2 zeigt einen Vergleich der Zählraten in verschiedenen Bereichen der Spektren. Die Spektrformen der simulierten Spektren sind ebenfalls nahezu identisch. Lediglich in Kanälen unterhalb von 300keV werden in den mit beiden Systemen simulierten Spektren ca. 20% weniger Ereignisse registriert als im gemessenen. In einer zweiten EGSnrc-Simulation wurde das Spektrum nicht durch Summation der deponierten Energien, sondern analog zu MCNP durch die Differenz zwischen der in den Kristall hinein- und heraustransportierten Energie gebildet. Hierbei ergeben sich von Rundungsfehlern abgesehen keine Abweichungen in den Spektren. Die geringfügigen Unterschiede zwischen den Spektren der beiden Systeme EGSnrc und MCNP sind also nicht auf die Art der Spektrenerzeugung zurückzuführen.

Für das 70-kg-Phantom ergibt sich das gleiche Bild. Die Spektren und die daraus ermittelten Effizienzen für die simulierten Nuklide zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung. Beide Monte-Carlo-Codes sind demnach geeignet, die Spektrometrie in einem Ganzkörperzähler zu simulieren und liefern übereinstimmende Resultate. Die Rechnungen mit dem MCNP System brauchen jedoch wesentlich mehr Rechenzeit. Für eine Million Teilchengeschichten des ^{40}K Phantoms wurde ca. die fünffache Prozessorzeit benötigt². Daher wurde entschieden, mit dem bereits in [Bre02] verwendeten EGSnrc-System weiterzuarbeiten. Ein weiterer Grund für diese Entscheidung sind die flexibleren Möglichkeiten, Informationen aus der EGSnrc-Simulation zu gewinnen. Der Benutzer hat nach jedem Transportschritt vollen Zugriff auf die Teilcheneigenschaften und kann in Subroutine `AUSGAB` die gewünschte Information aus der Simulation entnehmen. Dafür wird der erhöhte Programmieraufwand für die Umsetzung der Problemgeometrie in Kauf genommen.

²Durch geschickteren Einsatz der Optimierungsmöglichkeiten des MCNP-Systems könnte hier noch eine geringfügige Verbesserung der MCNP-Rechenzeit erreicht werden. Dieses hätte aber eine zeitintensive tiefere Einarbeitung in das System erzwungen.

```

K.GKZ
  c Definition der Zellen: Nr Mediennummer Dichte Geometrie
1 2 -0.001205 21 :-22 :-23 :24 :-25 :26
2 3 -8.06 (-21 22 23 -24 25 -26 )(11 :-12 :-13 :14 :-15 :16 )
3 4 -11.3 (-11 12 13 -14 15 -16 )(1 :-2 :-3 :4 :-5 :6 )
4 2 -0.001205 -1 3 -4 7 5 -6
5 2 -0.001205 -4 2 3 -10 5 -6
:
31 2 -0.001205 (9 -4 -8 3 -6 5 ) # 30 # 29
  c Defintion der Oberflächen: Nr Typ Koordinate
1 py 86
11 py 86.3
21 py 102
:
30 c/y 0 -39 6.8
31 c/y 0 -114 6.8
32 c/y 0 -65 6.8
33 c/y 0 -89 6.8
:
mode p e
  c Definition der Medien: mNr Element Häufigkeit
m1 1000. 2 $ Wasser
  8000. 1
m2 8000. -0.2314 $ Luft
  7000. -0.7557
  18000. -0.01282
  c xxx
imp:p 0 1 28r $ 1, 31
imp:e 1 29r $ 1, 31
  c Defintion der Quelle (zum testen Punktquelle)
sdef SUR=0 CEL=8 ERG=1.46 PAR=2 POS=0 -6 -76 WGT=1
  c Spektrum in Zellen 7-10 (Kristalle) erzeugen (Tally F8)
  c Gaussverbreiterung (GEB)
  c 1000 Kanäle a 2keV, epsilon-Bin bis 1e-5
f8:p,e (7 8 9 10)
fc8 Summenspektrum
ft8 GEB 0.0017717 0.06022 0
e0 0 1E-5 0.002 1000I 2.002
  c Parameter für Transport phys:p 100 0 0
phys:e 5 0 0 0 j j j 1 j
  c Anzahl der Histories
nps 10000

```

Abbildung 3.6: Auszug aus der MCNP-INP Datei für die Simulation des Kölner Ganzkörperzählers.

Auch im Rahmen der Teilnahme an der QUADOS-Studie (Quality Assurance of Computational Tools for Dosimetry 2002/3) [Sie02] wurden mit beiden Systemen Simulationen durchgeführt. Ziel dieser von der europäischen Kommission durchgeführten Studie war es, einen Überblick über die derzeit verwendeten Codes zu gewinnen sowie den Benutzern die Möglichkeit zu bieten, eine Qualitätssicherung ihrer Simulationen durchzuführen und ihre Erfahrungen auszutauschen. Dazu wurden acht Problemstellungen präsentiert, die von den Benutzern bearbeitet werden sollten. Eine der Aufgaben war die Effizienzkalibration eines Germaniumzählers im Energiebereich 20-2000keV. Diese wurde mit den beiden Monte-Carlo-Systemen bearbeitet. Die berechneten Spektren lieferten Effizienzwerte, die nur durch die Simulationsstatistik bedingt voneinander abwichen. Auch im Vergleich mit anderen Teilnehmern wurden mit beiden Systemen übereinstimmende Ergebnisse erzielt [NEA03].

3.2.2 Der EGSNrc-usercode Flaschenphantom

Zur Simulation der Flaschenphantomgeometrien wurde der usercode `Flaschenphantom` verwendet. Das bereits in [Bre02] entwickelte Modell der Kammer und der Detektoren wurde weiterentwickelt und um eine "teilkombinatorische" Möglichkeit ergänzt, die Flaschen zu definieren. Es ist möglich, mit diesem einen usercode sämtliche Flaschenphantome zu simulieren. Auch andere aus Zylindern aufgebaute Phantomgeometrien können mit diesem usercode simuliert werden. Der Aufbau der Phantome wird in der Steuerdatei (mit der Endung `.egsinp`) beschrieben. Auch die Maße der Kammer und der Detektoren werden dort definiert. Abbildung 3.8 zeigt als Beispiel die Datei zur Simulation des 10kg-Flaschenphantoms mit ^{131}I als Nuklid. Neben der Geometriedefinition befinden sich in dieser Datei auch Angaben über die zu verwendenden Medien, das Nuklid und die zu rechnende Zahl an Zerfällen, Grenzenergien für den Transport und Einstellungen für den Zufallszahlengenerator. Nach der Simulation werden die fünf normierten Spektren (vier Einzeldetektorspektren und ein Summenspektrum) mit Fehlerangaben für die einzelnen Kanäle in Dateien mit den Endungen `.na1.dat` bis `.nas.dat` gespeichert. Zusätzlich wird eine Datei mit der Endung `.geometrie.info`, in der die simulierte Geometrie ausgegeben wird, angelegt. Stammname aller erzeugten Dateien ist der Name der Steuerdatei. Optional wird eine Log-Datei (`.howfar.log`) mit Informationen über den Simulationsverlauf angelegt. Auch eine "Phasenraum"-Datei (`.phasenraum.dat`), in der die Teilchenorte, -flugrichtungen und -energien während der Transportschritte notiert werden, kann angelegt werden. Diese zwei Dateien wurden primär zur Kontrolle der Transportalgorithmen verwendet (vgl. [Bre02]). Während der Simulation wird nach jeweils 5% gerechneter Zerfälle eine Information auf dem Bildschirm ausgegeben und die Spektren zwischengespeichert. Die Anzahl der bis dahin gerechneten Zerfälle wird in diese Spektrendateien als Kommentar eingetragen. Die Zwischenspeicherung verhindert, dass durch einen Abbruch bei längeren Rechnungen die bislang gewonnenen Ergebnisse verloren gehen. Ein Blockdiagramm für den Ablauf des usercodes zeigt Abbildung 3.7. Eine Beschreibung der einzelnen Aspekte dieses Programms wird in diesem Kapitel gegeben. Ergebnisse der Rechnungen mit diesem usercode werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

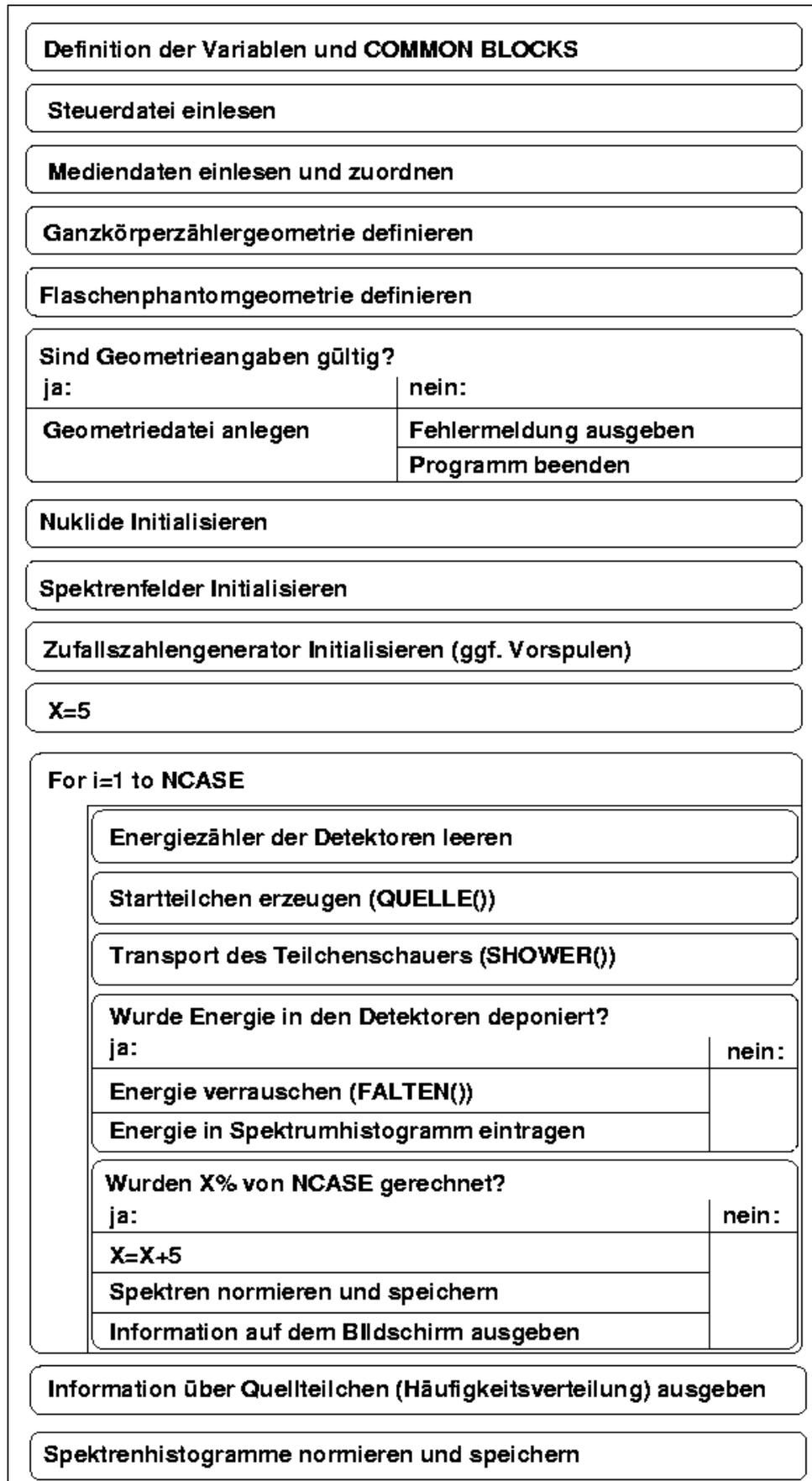


Abbildung 3.7: Blockdiagramm für den usercode Flaschenphantom.

```

10000000          ,NCASE (Anzahl der Zerfälle)
I131-----      ,Nuklidname
:
: (Einstellungen zu den Log-files)
0,0              ,luxury_level, iseed (Initialisierung des Zufallszahlengenerators)
1000            ,RNGFWD (Vorspulen des Zufallszahlengenerators)
0.521          ,CE (Cutoff-Energie für Elektronen (gesamt Energie))
0.01           ,CP (Cutoff-Energie für Photonen)
8              ,Anzahl der Medien

AIR
MILDSTEEL
STEEL
AL203
NAI
QUARZ
BLEI
WATER
:
: (Einstellungen zum Transportalgorithmus)
-027.500 0027.500          , Liege xmin, xmax
-202.500 -019.500         , Liege zmin, zmax
0000.100                  , Liege dicke
0006.350                  , Kristallradius
0010.200                  , Kristalldicke
0000.300 0000.300        , Dicke Reflschicht Mantel,Boden
0000.080 0000.080        , Dicke Stahlkappe Mantel,Boden
0001.270                  , Dicke Quarz
0002.500 0002.000        , Dicke Haltreringring Mantel, Boden
0040.000 0009.500        , Abstaende von Liege oben,unten
0000.000 -039.500        , D1 Position Achse x,z
0000.000 -114.300        , D2 Position Achse x,z
0000.000 -065.500        , D3 Position Achse x,z
0000.000 -088.500        , D4 Position Achse x,z
5                          , Anzahl der Flaschen
3 006.000 016.284         , Achsenrichtung Radius Höhe
0000.000 -006.200 -057.600 , Position der Achse
1 006.000 016.284
-008.142 -006.200 -063.800
1 006.000 016.284
-008.142 -006.200 -076.000
1 006.000 016.284
-008.142 -006.200 -088.200
3 006.000 016.284
0000.000 -006.200 -110.600

```

Abbildung 3.8: Steuerdatei zur Simulation des 10kg-Phantoms (Nuklid ^{131}I).

Für die in den Simulationen benötigten Materialien wurde mit dem `pegs4`-Programm eine Mediendatei erzeugt. Dort enthalten sind die Wechselwirkungsdaten für Photonen und Elektronen im Energiebereich von 10keV bis 5MeV . Diese wird nach dem Programmstart eingelesen und stellt die Medien für die Geometriedefinition und die Transportschritte zur Verfügung.

Simulation von Zerfallsereignissen

Die für die Auswertung der Spektren benötigten Effizienzfaktoren ordnen den gemessenen Zählraten im Peakfenster die Aktivitäten der zugehörigen Nuklide zu. Sie werden als Zählraten pro Aktivität in $\frac{\text{Ereignisse pro Sekunde}}{\text{Becquerel}}$ angegeben. In der Monte-Carlo-Simulation wird die Zeitdimension nicht betrachtet. Daher können die Effizienzen nicht direkt in dieser Einheit gewonnen werden. Die äquivalente Einheit $\frac{\text{Ereignisse}}{\text{Zerfall}}$ erhält man durch Kürzen der Zeitdimension in obiger Einheit. In der Simulation muss daher ein Zerfallsereignis definiert werden. Während des Zerfalls des Radionuklids werden mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten verschiedene Teilchen (Elektronen, Positronen, Photonen, α -Teilchen) emittiert. In der Monte-Carlo-Simulation hingegen muss für jede Teilchengeschichte ein einziges Startteilchen angegeben werden. Um den Zerfall eines Kerns zu simulieren, müssen daher mehrere Teilchengeschichten gerechnet werden. Die Energien und Emissionswahrscheinlichkeiten für die beim Zerfall emittierten Photonen bzw. β -Teilchen³ wurden für die in dieser Arbeit betrachteten Nuklide aus der "Table of Isotopes" [TOI01] entnommen. Es wurden nur Emissionen mit Energien $\geq 80\text{keV}$ und Wahrscheinlichkeiten $\geq 0,1\%$ berücksichtigt. Die Daten wurden für jedes Nuklid in einer eigenen "Nukliddatei" mit der Endung `.nuklid.dat` abgelegt⁴. Am Anfang dieser Dateien werden jeweils in einer Zeile die Anzahl emittierter Photonen und die Anzahl der emittierten β -Teilchen angegeben. Danach werden zeilenweise die Energie (E_γ in MeV) und die Emissionswahrscheinlichkeiten P_γ der emittierten Photonen angegeben. In der darauf folgenden Zeile stehen die Ladung der β -Teilchen (-1 für Elektronen, $+1$ für Positronen) und die Emissionswahrscheinlichkeit P_β . Im Anschluss wird das Betaspektrum (mit 1000 Kanälen) als integrierte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion eingetragen. Diese wurde aus den Daten in [TOI01] berechnet. Als Energie E_β muss die Gesamtenergie der Teilchen verwendet werden. Abbildung 3.9 zeigt als Beispiel die Nukliddatei für das Nuklid ^{131}I .

In der Steuerdatei für die Simulation (vgl. Beispiel in Abbildung 3.8) wird der Name der Nukliddatei eingetragen. Die Datei wird am Programmstart durch die Subroutine `NUKLIDINIT()` eingelesen. Die Übergangswahrscheinlichkeiten der Photonen werden normiert und in die Form einer integrierten Wahrscheinlichkeitsdichte gebracht. Aus dem Normierungsfaktor und der Anzahl der Zerfallsereignisse wird die Anzahl der zu rechnenden Teilchengeschichten `NCASE` berechnet. Die Energien, die Emissionswahrscheinlichkeiten und die Betaspektren werden in Feldvariablen zur weiteren Bearbeitung gespeichert.

³ α -Teilchen werden in dieser Arbeit nicht betrachtet, da diese im Ganzkörperzähler nicht nachgewiesen werden können.

⁴Der Dateiname muss zwingend acht Zeichen lang sein.

6		Anzahl Photonen
1		Anzahl Betas
0.080	0.0262	Egamma Pgamma
0.284	0.0614	
0.325	0.0029	
0.364	0.8186	
0.636	0.0717	
0.723	0.0177	
-1	1.000	Ladung Pbeta
0.513	6.97E-03	Ebeta Pbeta (integriert)
0.515	1.39E-02	
:		
2.503	1.00E+00	
2.505	1.00E+00	
2.507	1.00E+00	
2.509	1.00E+00	
2.511	1.00E+00	

Abbildung 3.9: Auszug aus der Nukliddatensatz für das Nuklid ^{131}I .

Vor dem Start eines "Teilchenschicksales" wird die Subroutine `NUKLID()` aufgerufen. Diese liefert als Startparameter für die Teilchengeschichte eine dem Zerfallsschema des Nuklids entsprechend verteilte Energie (und Ladung). Durch dieses Vorgehen kann am Anfang der Simulation direkt die Anzahl der zu simulierenden Zerfälle angegeben werden.

Das Modell des Kölner Ganzkörperzählers und der Flaschenphantome

Im EGSNrc-System wird die Simulationsgeometrie durch die Subroutinen `HOWFAR` und `HOWNEAR` definiert. Regionen mit verschiedenen Medien werden durch Oberflächen voneinander abgegrenzt. Im Modell des Kölner Ganzkörperzählers werden Ebenen und Zylinder als Grenzflächen verwendet. Die relativen Positionen der Ebenen für die Modellierung der Kammer zeigt Abbildung 3.10. Die angegebenen Nummern bezeichnen die Regionen, D1 bis D4 die Detektoren (vgl. Seite 57). Den Regionen des Modells sind feste Mediennummern zugeordnet. Die in der Simulation zu verwendenden Medien werden der Steuerdatei entnommen und über die Nummern den Regionen zugeordnet. Im Bereich oberhalb der Liege (Quellregion) werden die Phantome platziert. Die Definition der Ebenen erfolgt durch einen Aufpunkt und einen Normalenvektor, die der Zylinder durch ihren Radius, den Achsenvektor und einen Punkt auf der Achse. Die Werte für diese Vektoren werden in den dafür vorgesehenen Variablen gespeichert. Für die Berechnung der benötigten Abstände in Teilchenflugrichtung (`HOWFAR`) zu den Ebenen wird die im EGSNrc-System mitgelieferte Subroutine `PLANE()` verwendet. Dort wird die Gleichung gelöst, die man erhält, wenn eine Geradengleichung (definiert durch Ort und Flugrichtung des Teilchens) in die Hessesche Normalenform der Ebene eingesetzt wird.

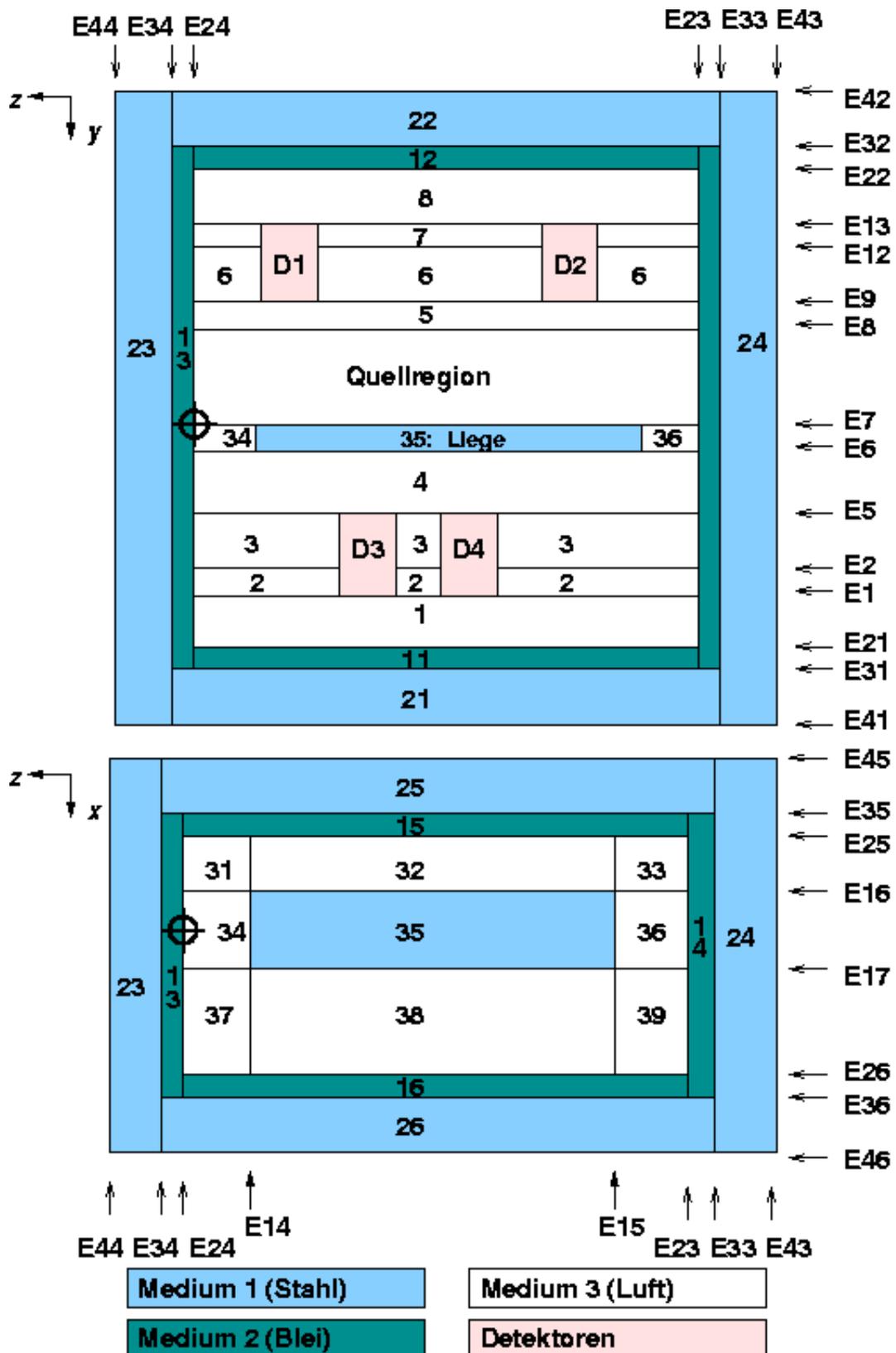


Abbildung 3.10: Das Modell der Messkammer.

Für die Abstandsberechnung zu den Zylindern kann die im EGSNRc-System enthaltene Subroutine `CYLINDER()` nicht verwendet werden, da diese nur für Zylinder gültig ist, deren Achse die z-Achse ist. Daher wird die von Bielajew [Bie00] beschriebene Methode zur Abstandsbestimmung zu beliebigen Quadriken verwendet. Dazu wurden die Subroutinen `QUADRIK()` und `ZYLINDER()` implementiert. Letztere berechnet die Koeffizienten einer quadratischen Gleichung, die durch das Einsetzen der Teilchenbahn in die Zylinderdefinition entsteht. Eine in diesem usercode nicht verwendete Subroutine `KUGEL()` berechnet die Koeffizienten für beliebige Kugeln. `QUADRIK()` löst die Gleichung unter Berücksichtigung der Lagebeziehung von Teilchenort und Quadrik. Da im Modell nur Ebenen, die senkrecht zu den Achsen sind, verwendet werden, vereinfacht sich die Abstandsberechnung für beliebige Richtungen (`HOWNEAR`). Für die Ebenen wird dieser durch die Differenz der Ebenenkoordinate und der Teilchenkoordinate angegeben. Für Zylinder muss die Entfernung des Teilchenortes von der Zylinderachse berechnet werden. Den gesuchten Abstand liefert die Differenz dieser Entfernung vom Zylinderradius.

Simulationen in [Bre02] haben gezeigt, dass auf die Modellierung des Labyrintheingangs verzichtet werden kann. Statt dessen kann im Modell eine durchgehende Wand die Kammer an der Kopfseite der Liege begrenzen. Dort befindet sich auch mittig in der Liegenbreite auf Höhe der Liegenoberseite der Ursprung des Koordinatensystems (vgl. Abbildung 3.10). Die z-Achse verläuft längs der Liege. Für ein auf der Liege liegendes Menschenmodell entspricht diese Orientierung der in den bekannten Menschenmodellen (vgl. [ICRU92]) verwendeten. Dort bezeichnet die z-Achse immer die Körperachse. Die x-Achse wird dementsprechend quer zur Liege gelegt. Um ein rechtshändiges Koordinatensystem zu erhalten, muss die Richtung der y-Achse zum Raumboden hin gewählt werden. Die Wände werden jeweils durch drei Ebenen modelliert. Zwischen der ersten Ebene (20er Nummer) und der mittleren Ebene (30er-Nummer) liegt die Bleibesichtung der Kammer. Hinter der mittleren Ebene liegt die eigentliche Stahlwand. In den Wänden und in der Liege müssen die Elektronen transportiert werden, da ein durch sie entstehender Bremsstrahlungsanteil in den Spektren beobachtet werden kann. Diese Schritte benötigen viel Rechenzeit. In den Regionen des Modells, die Luft enthalten, kann hingegen auf den Elektronentransport verzichtet werden. Die Luft in der Kammer wird nicht durch eine Region beschrieben, sondern durch Ebenen in die Regionen eins bis acht unterteilt. Dadurch vereinfacht sich die Abstandsberechnung in Subroutine `HOWFAR`. Lediglich beim Verlassen der Bleischicht muss aus der y-Koordinate die entsprechende Regionsnummer bestimmt werden. Insgesamt überwiegt aber der Geschwindigkeitsvorteil durch die schnellere Abstandsberechnung in der Kammer.

Das Modell der Kammer und der Detektoren (vgl. Seite 57) belegt die Ebenennummern 1-56, die Zylinder 1-12 und die Regionen 1-85. Für die Definition der Quellregion stehen die jeweils folgenden Nummern zur Verfügung. Zum Transport innerhalb der Quellregion wird von `HOWFAR()` und `HOWNEAR()` die Subroutine `QUELLREGION()` aufgerufen. In dieser werden die gesuchten Abstände innerhalb der Quellregion berechnet. Beim Übergang von der Kammer in die Quellregion wird Subroutine `QUELLENEINTRITT()` aufgerufen. Diese liefert die Regionsnummer in der Quellregion zurück. Eine andere Quellengeo-

metrie (z.B. eine Voxelstruktur) kann implementiert werden durch Austausch dieser Subroutinen und der Subroutine `QUELLE()`, die einen Startort und eine Startregion für das zu transportierende Teilchen liefert.

Die Definition der Bodycounter- und der Phantomgeometrie ist nicht fest im Code hinterlegt, sondern wird dem usercode `Flaschenphantom` über die Steuerdatei (vgl. Beispiel in Abbildung 3.8) mitgeteilt. Diese enthält die Informationen über die Dimensionen des Ganzkörperzählers, die Positionen der Detektorachsen und die Dicke der Liege. In Subroutine `mach_bodycounter()` werden die Ebenen- und Zylinderkoordinaten sowie deren Orientierungen (Normalenvektoren, bzw. Achsenrichtung) auf die in der Datei angegebenen Werte gesetzt. Eine zusätzliche Subroutine `check_bodycounter` überprüft, ob es zu einer Kollision der definierten Wände und Detektoren kommt und bricht ggf. die Simulation mit einer Fehlerinformation ab. Durch die Verwendung einer Definitionsdatei für den Bodycounter ist es möglich, verschiedene Kammergrößen und Detektorpositionen⁵ einfach in der Simulation zu berücksichtigen. Die einzelnen Flaschen des Flaschenphantoms werden durch einen Zylinder und zwei Ebenen begrenzt. Diese werden innerhalb der Quellregionsbox mit absoluten Koordinatenangaben positioniert. Durch die Subroutine `mach_flaschenphantom()` werden die Werte für die verwendeten Ebenen und Zylinder aus der Steuerdatei eingelesen. Für jede Flasche müssen die Achsenrichtung und ihre Position sowie der Zylinderradius angegeben werden. Zusätzlich werden die Position von "Deckel-" und "Boden"-Ebene abgefragt. Jede Flasche erhält eine eigene Regionsnummer (aufsteigend ab Nummer 100). Bislang ist die Definition von bis zu 100 Flaschen vorgesehen. Für jede der definierten Flaschen wird das Volumen berechnet und in einem Feld hinterlegt. Dieses Feld wird anschließend in die Form einer kumulierten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (CPDF) gebracht. Diese wird von der Quellroutine `QUELLE()` verwendet, um durch inverses sampling die Nummer des Zylinders zu bestimmen aus dem das neue Teilchen startet. Die Koordinaten des Startpunktes werden danach durch sampling eines Zylinders mit den Maßen und der Position des ausgewählten Zylinders bestimmt. Dabei wird eine Gleichverteilung der Aktivität auf alle Flaschen angenommen. Die Subroutine `check_flaschenphantom()` prüft, ob eine der Säulen aus der Begrenzungsbox ragt und ob sich die definierten Säulen überschneiden. Das Programm wird in diesem Fall mit einer Fehlerinformation abgebrochen. Subroutine `Geometrie_Ausgeben()` gibt im Erfolgsfall die gesamte für die Simulation erzeugte Geometrie (d.h. die Koordinaten der Ebenen und Zylinder und die Zuordnung von Regionen und Medien) in einer Datei mit der Endung `.geometrie.info` aus. Verschiedene Situationen mit fehlerhafter Geometriedefinition wurden getestet und vom Programm mit richtiger Fehlerangabe (für den ersten in der Definitionsdatei auftretenden Fehler) erkannt.

Für den Transport innerhalb der Flaschen und der restlichen Quellregion wurden eigene Subroutinen geschrieben. Subroutine `Flasche_Howfar(Lage,Nr)` liefert die Distanz bis zum Treffer der Flaschenbegrenzung. Durch den Parameter `Lage` wird ange-

⁵Die Detektoren oberhalb bzw. unterhalb teilen sich jeweils einen Ebenensatz und müssen daher in der selben Höhe (y-Koordinate) "befestigt" werden

geben, ob sich das Teilchen innerhalb oder außerhalb der Flasche befindet. Die Flaschennummer wird durch den Parameter `Nr` übergeben. Diese Subroutine wird von Subroutine `QUELLREGION()` aufgerufen. Befindet sich das Teilchen in der Flasche wird `Flasche_Howfar()` einmal für diese Flasche mit Lage "innerhalb" (1) aufgerufen. Befindet sich das Teilchen außerhalb aller definierten Flaschen (Region Nr. 85) wird für jede der definierten Flaschen `Flasche_Howfar()` mit Lage "außerhalb" (0) aufgerufen. Die Flasche, die den kürzesten Distanzwert liefert, gilt als getroffen. Zusätzlich werden die Begrenzungsebenen der Begrenzungsbox auf Treffer geprüft. Wird hier eine noch kürzere Distanz ermittelt, wird die Quellregion verlassen und die angrenzende Region betreten. Die für den Elektronentransport notwendige Funktionalität wurde in diesem Fall direkt in die Subroutine `QUELLREGION()` implementiert. Das Vorgehen dabei ist im Prinzip analog. Es wird aber nicht der kürzeste Abstand in Flugrichtung, sondern in beliebiger Richtung gesucht. Auf eine eigene Subroutine für die Flaschen wurde verzichtet, da diese Abstandsbestimmung auf die Berechnung des Radius und der Höhe innerhalb der Flasche reduziert werden. Dieses konnte einfach durch eine Schleife in `HOWNEAR()` gelöst werden. Der erforderliche Rechenzeit- und Speicheraufwand (Programmoverhead) beim Sprung in eine zusätzliche Subroutine kann an dieser Stelle vermieden werden.

Die Detektoren - Modell und Spektrenerzeugung

Die Detektoren wurden nach einer Bauskizze der Herstellerfirma Scionix Ltd. modelliert. Es wurden lediglich der Kristall (mit Hülle) und das Quarzfenster der Photomultiplier berücksichtigt. Simulationen mit MCNP zeigten, dass auf die Modellierung der Multiplier selbst verzichtet werden kann. Auch die Halterungsarme zeigen in diesen Simulationen keinen spürbaren Einfluss auf die Spektren. Daher wurde aus Rechenzeitgründen auf deren Modellierung verzichtet. Die durch Ebenen und konzentrische Zylinder begrenzten Detektoren "schweben" in der Kammer. Jeder Detektor ist, wie in Abbildung 3.11 gezeigt, aus acht Regionen zusammengesetzt. Es wurden die Ebenen, welche auch den Raum unterteilen, verwendet. Deshalb können die Detektoren oberhalb bzw. unterhalb der Liege nur gemeinsam in der Höhe verstellt werden. Für den Transport innerhalb der Detektoren werden von `HOWFAR()` die Subroutinen `Detektor_1()` bis `Detektor_4()` aufgerufen. Der Elektronentransport innerhalb der Detektoren ist aus Rechenzeitgründen direkt in `HOWNEAR()` implementiert.

Die Spektren der Detektoren werden in Subroutine `AUSGAB()` erzeugt. Diese Subroutine wird während des Transportes immer wieder aufgerufen. Durch den Parameter `IARG` wird dem Benutzer das aktuelle Ereignis (z.B. Transportschritt oder Wechselwirkungsart) mitgeteilt. Wird `AUSGAB()` nach einer Energiedeposition im Kristall aufgerufen, wird die deponierte Energie in der Energievariable für den Detektor `ENA1` bis `ENA4` gespeichert. Das eigentliche Spektrum wird im Hauptprogramm für jeden Detektor als Histogramm mit $2keV$ -Kanalbreite in einem Zählerfeld gebildet. Am Ende einer Teilchengeschichte wird durch den ganzzahligen Anteil von

$$\text{Kanal} = \frac{\text{deponierte Energie}}{\text{Energie pro Kanal}}$$

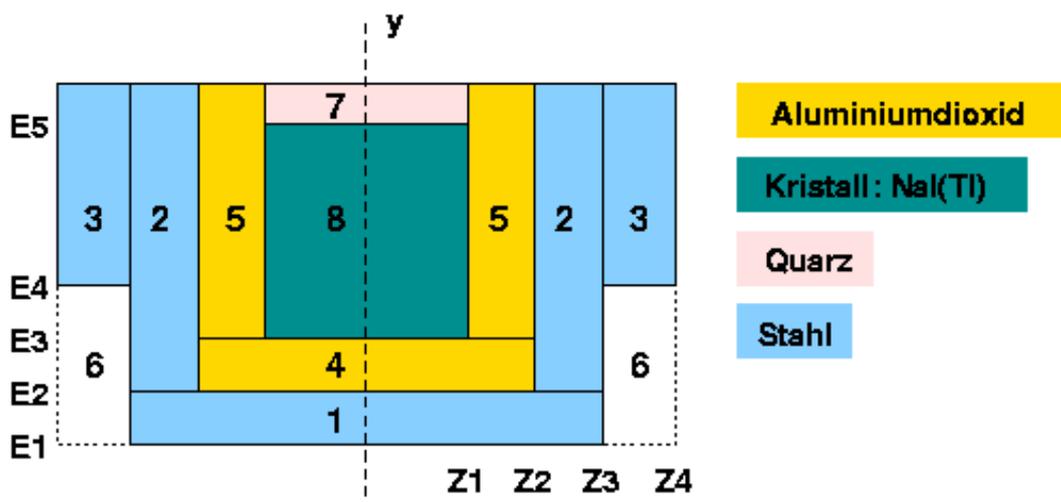


Abbildung 3.11: Das Modell der Detektoren.

der Kanal im Zählerfeld berechnet und um eins erhöht.

Da der Szintillationsdetektor eine begrenzte Auflösung besitzt⁶, bildet sich statt einer scharfen Linie im Kanal der emittierten Photonenenergie ein annähernd gaußförmiger Peak mit einer energieabhängigen Breite. Das Auflösungsvermögen eines Szintillationsdetektors folgt einem $\sqrt{E_\gamma}$ -Gesetz. Zur Bestimmung des Zusammenhangs für die verwendeten Detektoren wurden aus Phantommessungen und Messungen mit Kalibrierquellen für mehrere Gammaenergien die Halbwertsbreiten der Vollenergiepeaks bestimmt und gegen $\sqrt{E_\gamma}$ aufgetragen. Eine lineare Anpassung liefert die Abhängigkeit der Peakbreite von der Energie:

$$\text{FWHM}(keV) = 1,90 \cdot \sqrt{E_\gamma} + 1,77(keV)$$

Das in den Simulationen erzeugte Spektrum gibt die spektrale Verteilung der Energie-deposition im Kristall wieder. Durch eine "Faltung" mit einer Gaußfunktion als Faltungskern wird die Detektorauflösung in der Simulation berücksichtigt. Dazu wird vor dem Eintragen der Energie in das Histogramm die deponierte Energie in der Subroutine `Falten()` "verrauscht". Dort wird eine mit passender Breite gaußverteilte Zufallszahl erzeugt und die deponierte Energie entsprechend erhöht oder verringert. Durch diese "Monte-Carlo-Faltung" [Bre02] werden die Vorgänge in der Messung nachgebildet. Man erhält ein Spektrum, welches direkt mit den gemessenen Spektren verglichen werden kann.

3.2.3 Simulationen in der Flaschenphantomgeometrie

Für die Flaschenphantome der Massen von $10kg$ bis $100kg$ wurden in den Standardpositionen Definitionsdateien erstellt. Das $40kg$ -Phantom wurde etwas nach unten verschoben, um die in den Messungen beobachteten Ausreißerpunkte (vgl. Seite 40) zu

⁶Diese wird u.a. durch statistische Schwankungen in der Elektronenvervielfachung im Photomultiplier hervorgerufen.

vermeiden. Aus diesen Phantomdefinitionen wurden mit der Beschreibung der Kammer- und Detektorgeometrie Steuerdateien für den usercode `Flaschenphantom` erstellt. Eine Darstellung der Phasenraumdateien für die Phantome, die während der Geometrietests erstellt wurden, zeigt Abbildung 3.13 auf Seite 60. Gezeigt sind dort Aufsichten auf die Liege, in die aus einer Simulation die Teilchenorte eingezeichnet sind, die sich in einer Flasche des Modells befinden. Zur besseren Orientierung sind zusätzlich die Umrisse der Liege und der Detektoren eingezeichnet.

Für die in der klassischen Kalibration gemessenen Nuklide wurden mit diesen Standardgeometrien Kalibrierspektren gewonnen. Zur Auswertung der Messungen wird immer das Summenspektrum der vier NaI(Tl)-Detektoren verwendet. Einen Vergleich der ^{131}I -Summenspektren für das 70kg -Phantom zeigt Abbildung 3.12. Die Form der gemessenen Spektren (Einzel- und Summenspektren) wird von den Simulationen sehr gut wiedergegeben. Die aus den Inhalten der für die Kalibration verwendeten ROI (316keV bis 413keV) bestimmten Effizienzen zeigt Tabelle 3.3.

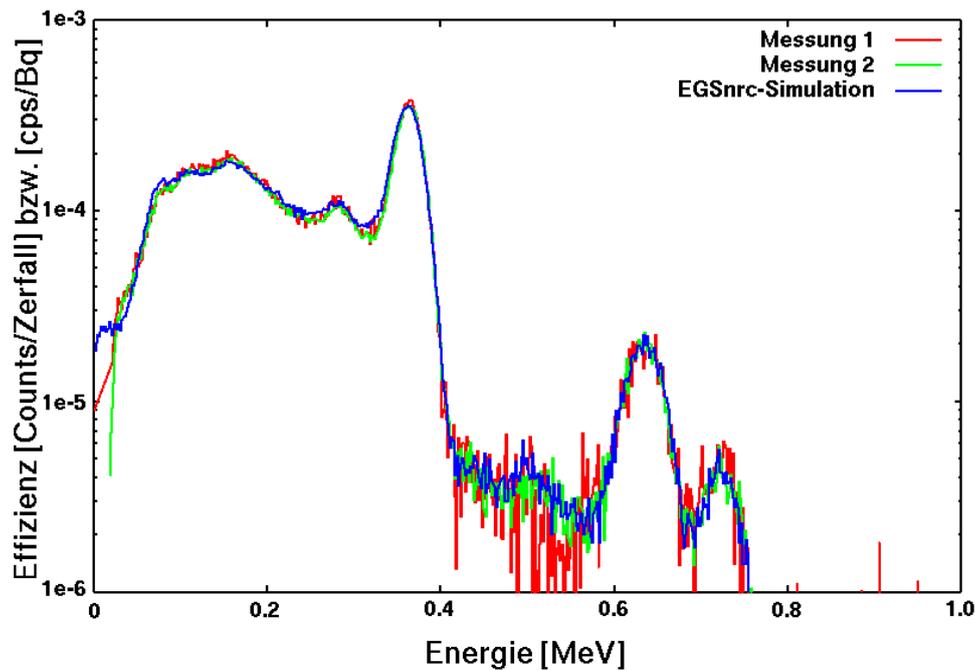


Abbildung 3.12: Vergleich des simulierten mit zwei gemessenen ^{131}I -Spektren im 70kg -Flaschenphantom.

Spektrum	Effizienz (Ereignisse/Zerfall)
Messung 1 (1998)	$7.91 \cdot 10^{-5}$
Messung 2 (2002)	$8.14 \cdot 10^{-5}$
Simulation	$7.85 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 3.3: Effizienzen für das 70kg -Phantom.

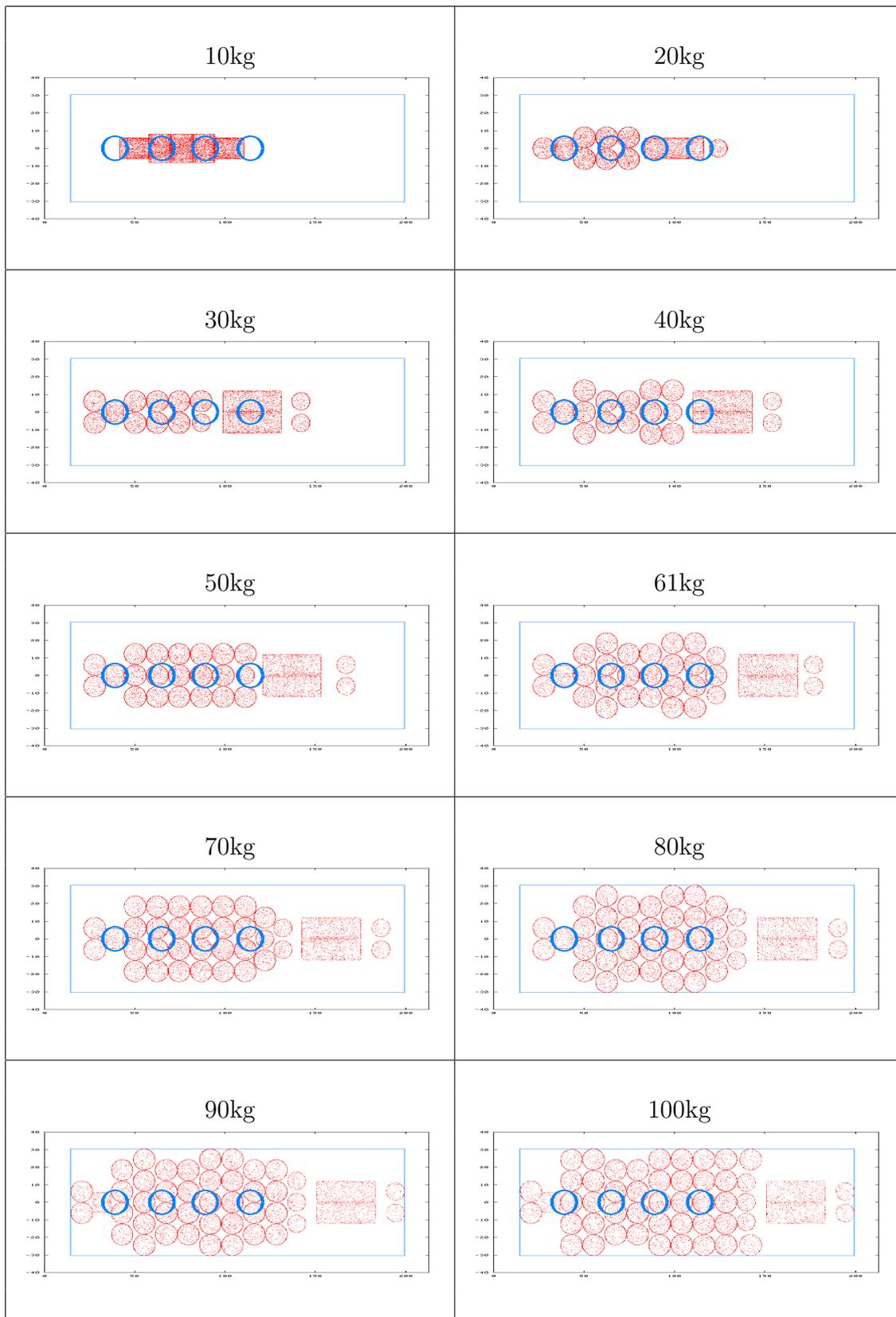


Abbildung 3.13: Phasenraumdarstellung der simulierten Flaschenphantome.

Die Abweichung der simulierten Effizienz von der 2002 gemessenen liegt mit 3,5% im Bereich der statistischen und systematischen Fehler der Messung. Selbst die beiden Messungen liegen um 2,9% auseinander. Abbildung 3.14 zeigt einen Vergleich der aus den Simulationen gewonnenen Kalibrierkurven für $^{131}\text{I} \leftarrow ^{131}\text{I}$ mit der gemessenen. Die durchgezogene Linie ist die an die simulierten Effizienzen angepasste Kalibrierfunktion des Typs $eff(m) = a \cdot m + b/m + c$. Als Fehlerangabe für die Effizienzen aus den Messungen wurde $\pm 5\%$ eingezeichnet. Für die Simulationen wurde ein Maximalfehler aus den statistischen Fehlern der integrierten Kanalhalte berechnet.

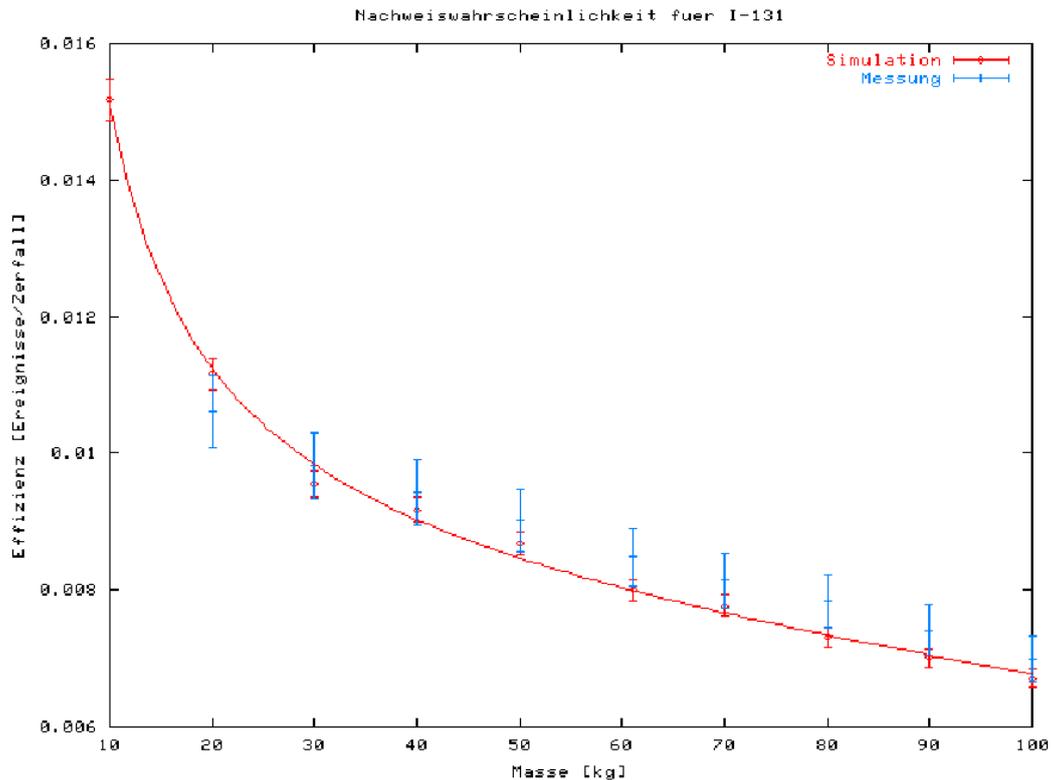


Abbildung 3.14: Kalibrierkurve für den Nachweis von ^{131}I .

Die Spektren für das Nuklid ^{40}K (Abbildung 3.15) konnten in den Simulationen nicht vollständig reproduziert werden. Der Photopeak und die Comptonbereiche stimmen sehr gut überein, im Bereich unterhalb von 300keV wird allerdings etwa ein Drittel weniger an Ereignissen "registriert". Das bedeutet, dass für ROIs, die unterhalb von 300keV liegen, die Einstreuung durch ^{40}K von den Simulationen erheblich unterschätzt wird (z.B. die Effizienzfaktoren für $^{99m}\text{Tc} \leftarrow ^{40}\text{K}$). Auch in den Simulationen mit dem MCNP-System war dieser Effekt zu beobachten.

Eine Comptonstreuung der emittierten Photonen ($E_\gamma = 1460\text{keV}$) an den nicht modellierten Teilen der Detektorhalterung erscheint unwahrscheinlich, da der Streuanteil dann auch in den Spektren der anderen Nuklide unterschätzt werden müsste. Der Streuanteil in den Simulationen der ^{22}Na -Quelle ($E_\gamma = 1274\text{keV}$) für die Qua-

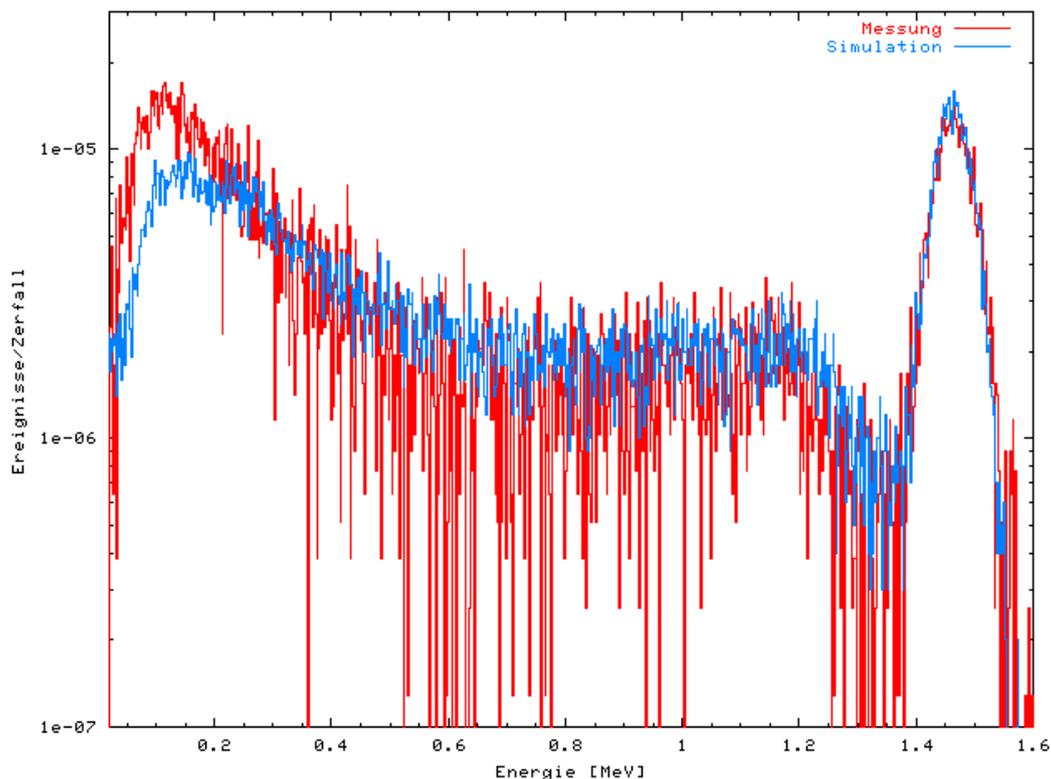


Abbildung 3.15: Vergleich des gemessenen ^{40}K -Spektrums im 70kg -Flaschenphantom.

litätskontrolle wurde richtig wiedergegeben (vgl. Kapitel 3.1.1 und Abbildung 3.18 in diesem Kapitel). Eine Serie von Simulationen mit dem MCNP-System, in denen die Halterung im Modell stückweise ergänzt wurde, bestätigt diese Vermutung. Es werden dort keine signifikanten Veränderungen in den Spektren beobachtet. Lediglich die für die Simulationen benötigten Rechenzeiten stiegen an. Auf die Modellierung der Halterung kann zu Gunsten der Rechenzeit verzichtet werden. Simuliert man nur die beim Zerfall des ^{40}K emittierten β -Teilchen, erhält man ein Spektrum, welches die Form des im Gesamtspektrum fehlenden Anteils hat. Die Zahl der Ereignisse im reinen β -Spektrum ist allerdings zu niedrig. Um das fehlende Restspektrum nachbilden zu können, müsste die fünffache Menge an β -Teilchen simuliert werden. Abbildung 3.16 zeigt einen Vergleich des Restspektrums mit der Simulation des β -Anteils. Scheinbar

Spektrenbereich	Beschreibung	EGSNrc	Messung
20-300 keV	Rückstrebereich	$0,90 \cdot 10^{-3}$	$1,42 \cdot 10^{-3}$
300-1150 keV	Comptonstrebereich	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \cdot 10^{-3}$
1150-1300 keV	Comptonkante	$1,33 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$
1350-1560 keV	Photopeak	$5,59 \cdot 10^{-4}$	$5,54 \cdot 10^{-4}$
20-1560 keV	Gesamt	$2,66 \cdot 10^{-3}$	$3,11 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 3.4: Vergleich der Zählraten in den ^{40}K -Spektren (im 70kg -Phantom).

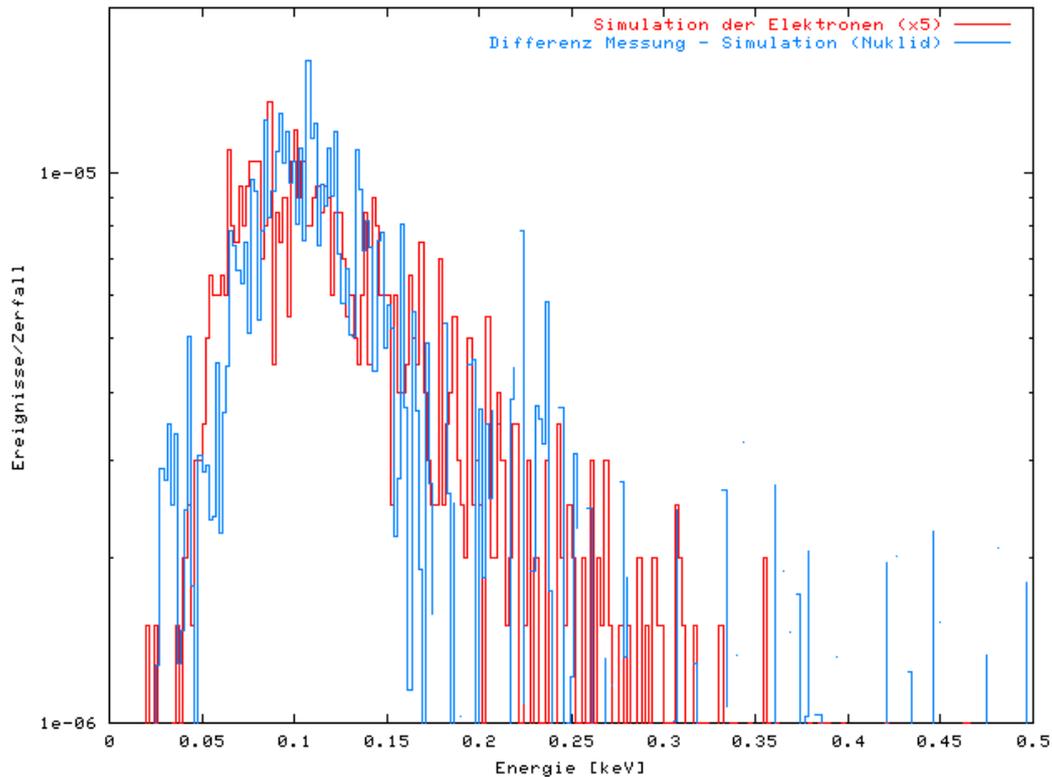


Abbildung 3.16: Zum Bremsstrahlungsanteil des ^{40}K -Spektrums. Gezeigt ist die Differenz von Messung und Simulation des ^{40}K -Zerfalls (für das 70kg-Phantom) und die Simulation des reinen β -Anteils (verfünffacht).

werden Wirkungsquerschnitte für die Bremsstrahlungsproduktion im verwendeten Mediendatensatz unterschätzt.

Auch für Nuklide, die bislang nicht in den Flaschenphantomen gemessen wurden, konnten Kalibrationskurven gewonnen werden. Für ^{137}Cs , ^{133}Ba und ^{60}Co wurden erstmals vollständige Kalibrationskurven berechnet. Die Messungen mit dem Ziegelphantom konnten jeweils nur vier Punkte dieser Kurve liefern. Diese liegen auch auf den Kurven, die aus den Simulationen gewonnen wurden. Einige der simulierten und gemessenen Kurven sind in Anhang B gezeigt.

In den Simulationen kann einfach das Medium des Phantoms ausgetauscht werden. Um den Anteil der Streueignisse, die auf Wechselwirkungen innerhalb des Phantoms zurückzuführen sind, separat zu betrachten wurden für ^{40}K und ^{131}I auch Simulationen mit luftgefüllten Flaschen durchgeführt. Abbildung 3.17 zeigt einen Vergleich der beiden Spektren für ^{131}I im 70kg-Phantom. Die Effizienz sinkt durch Absorption bzw. Streuung im Körper von $1,37 \cdot 10^{-2}$ auf $0,79 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Ereignisse}}{\text{Zerfall}}$ ab. Das Spektrum im wassergefüllten Phantom hat in den Hauptpeaks $E_\gamma = 364\text{keV}$, $E_\gamma = 636\text{keV}$ und $E_\gamma = 723\text{keV}$ weniger Ereignisse, aber ein erhöhtes Comptonkontinuum unterhalb von 300keV . In diesem Kontinuum geht auch die durch Röntgenfluoreszenz angeregte

Blei-K-Strahlung unter, die im Spektrum der luftgefüllten Flaschen bei ca. 80keV deutlich zu erkennen ist. Das Ersetzen des Wassers in den Flaschen durch "Gewebe"⁷ zeigt keine Effekte im Spektrum. Die Verwendung von Wasser als gewebeäquivalentes Material ist gerechtfertigt. Entscheidend ist bei leichten Materialien vor allem die Dichte des Streumediums. Daher wurde in den weiteren Simulationen Wasser als Streumedium verwendet.

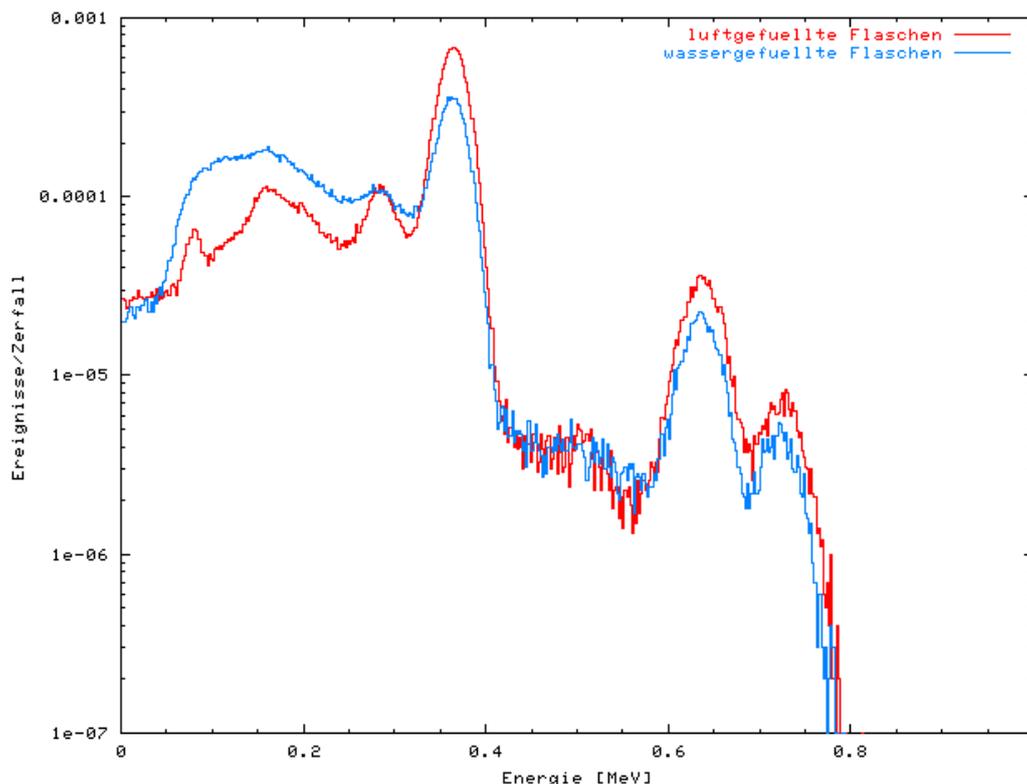


Abbildung 3.17: Zum Anteil der Streuung im Phantom.

Auch die Simulationen für die ^{22}Na -Tablette zur Energieeichung (vgl. Kap. 3.1.1) wurden als "Flaschenphantom" mit diesem usercode gerechnet. Modelliert wurde die Tablette durch einen luftgefüllten Zylinder (Radius $0,2\text{cm}$, Höhe $0,2\text{cm}$), der am entsprechenden Ort in der Quellregion positioniert wurde. Abbildung 3.18 zeigt einen Vergleich der Messung am 16.03.2000 und der zugehörigen Simulation. Die beiden Peaks bei 511keV und 1274keV werden in Form und Inhalt richtig wiedergegeben. Die Comptonkante um 1100keV ist in der Simulation geringfügig zu höheren Energien verschoben, für die Kante bei 511keV ist dieser Effekt nicht zu beobachten. Im Bereich von 200keV bis 300keV sind in der Simulation weniger Ereignisse registriert. Dieses ist auf die fehlende Modellierung des kleinen Schaumstoffkissens, in das die Tablette eingebettet ist, zurückzuführen. Da dieser Spektrenbereich für die geplante Anwendung nicht betrachtet wird, ist eine detailliertere Simulation an dieser Stelle nicht notwendig.

⁷Verwendet wurde die Materialdefinition der ICRU für weiches Gewebe [ICRU92].

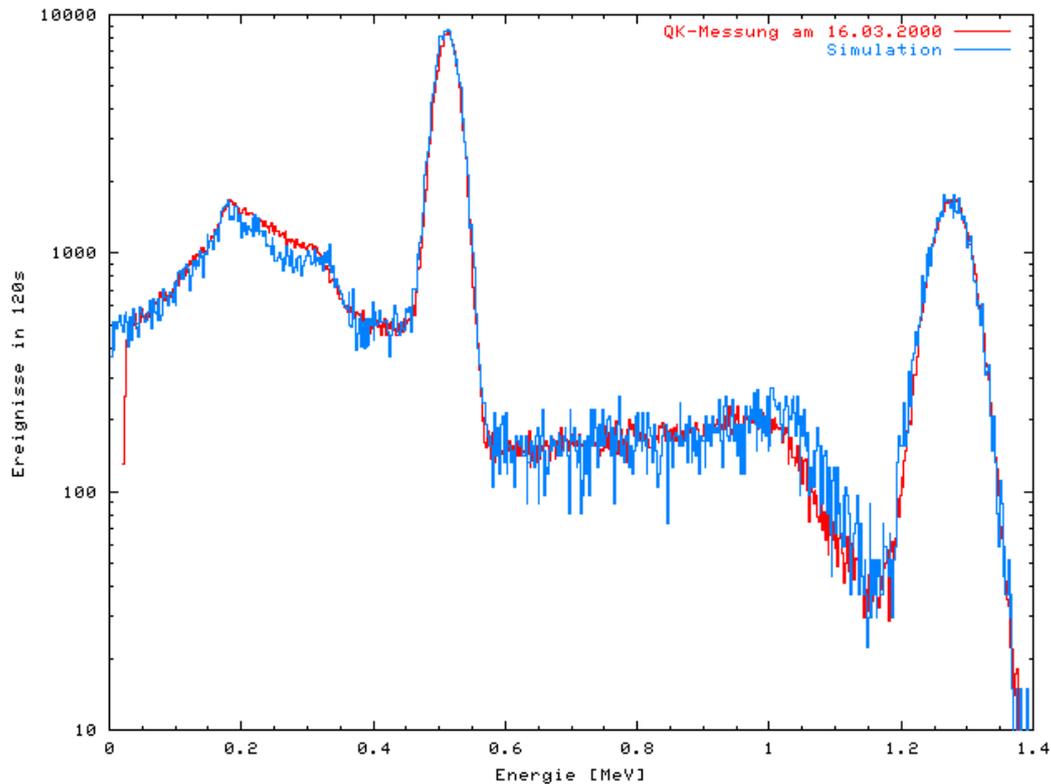


Abbildung 3.18: Vergleich von Messung und Simulation einer ^{22}Na -Quelle.

3.2.4 Die Kombinationsmethode

Durch die Simulationen ist es nun möglich, die Energieabhängigkeit der Effizienz zu untersuchen und für die Kalibration auszunutzen. Durch Messungen kann die reine Energieabhängigkeit der Effizienz nur ungenau bestimmt werden, weil die Photonenenergien, für die eine Effizienz bestimmt werden kann, durch die im Phantom messbaren Nuklide limitiert ist. Eine Kurve, welche die Energieabhängigkeit wiedergibt, erhält man durch Auftragen der aus den Messungen gewonnenen Effizienzfaktoren⁸ gegen die Hauptenergie des gemessenen Nuklids. Aber es muss berücksichtigt werden, dass die Effizienzfaktoren auch Bremsstrahlungsanteile und Einstreuungen von höherenergetischen Gammaemissionen des gleichen Nuklides beinhalten. Der Effizienzwert für die Energie $E_\gamma = 364\text{keV}$ wird durch die Messung mit dem Nuklid ^{131}I gewonnen und beinhaltet somit auch Einstreuungen der Emissionen bei 636keV und 723keV . Auch der Messwert bei 811keV (Nuklid ^{58}Co) enthält die Einstreuung der höherliegenden ^{58}Co -Linien.

In den Simulationen können auch fiktive monoenergetische Nuklide als Quelle verwendet werden. Dazu wird eine Nukliddatensatz mit einer Photonenemission pro Zerfall definiert. Solche "Nuklide" wurden für die im Ganzkörperzähler betrachteten Energien von 20keV bis 2000keV in 20keV -Abständen definiert. Eine Simulation mit diesen Nukliden als Quellteilchen liefert direkt die Detektorantworten auf die emittierten Energien. Für die

⁸Hierbei muss eine Normierung mit der Emissionswahrscheinlichkeit erfolgen.

”Antwortfunktionen” der Kristalle könnten theoretisch auch Werte für Punktquellen aus Tabellenwerken [Hea64, Hea67] verwendet werden. Die Veränderung des Strahlenfeldes im Phantom müsste in diesem Fall vor der Integration geeignet (z.B. durch Faltung) berücksichtigt werden. Die simulierten Spektren hingegen können in der ROI, die sich aus der 2,5-fachen Halbwertbreite für die simulierte Energie ergibt, integriert werden, um direkt die gesuchten Effizienzen zu erhalten.

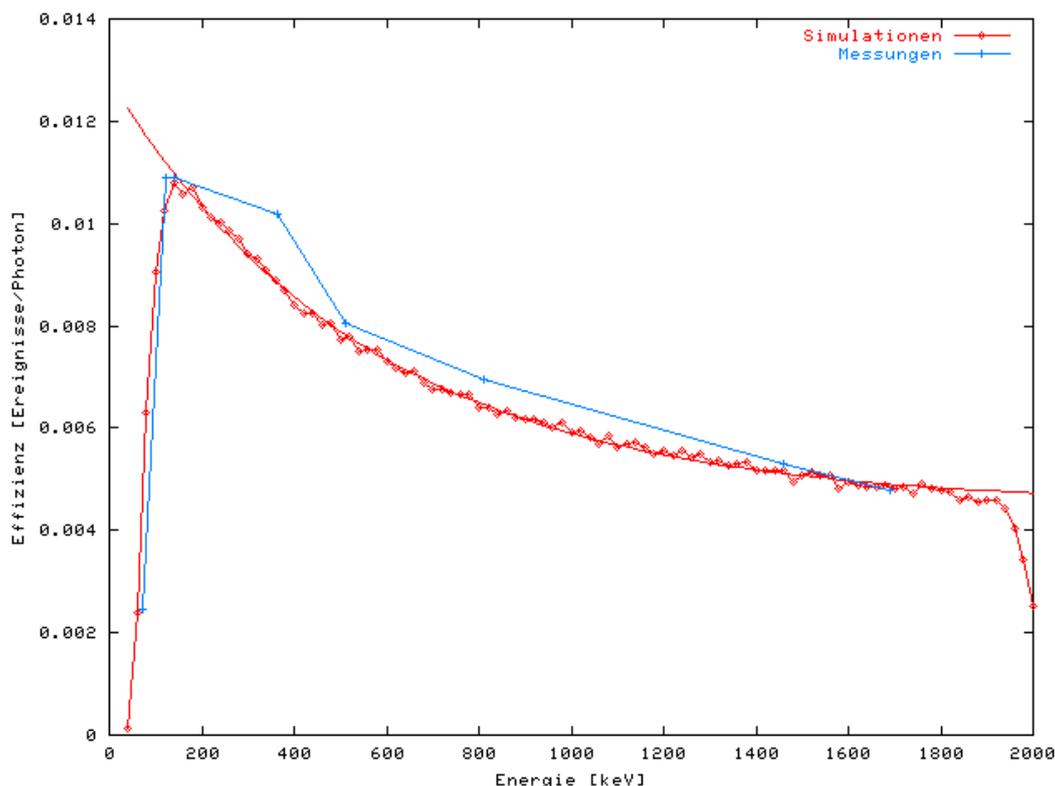


Abbildung 3.19: Energieabhängigkeit der Effizienz, bestimmt aus Messungen und Simulationen im 70kg-Flaschenphantom.

Für das 70kg-Phantom ist der Vergleich der aus den Messungen gewonnenen mit der aus Simulationen berechneten Kurve in Abbildung 3.19 gezeigt. Beide Kurven zeigen einen ähnlichen Verlauf. Nach einem Maximum bei ca. 200keV fällt die Effizienz exponentiell ab. Die simulierte Kurve knickt oberhalb von 1850keV nach unten ab, da hier Teile der integrierten ROI bereits außerhalb des Spektrum liegen. Die eingezeichnete Kurve ist eine Anpassung einer Funktion des Typs

$$eff(E_\gamma) = a \cdot b^{E_\gamma} + c$$

an die simulierten Daten zwischen 200keV und 1900keV . Da jeweils nur eine Million Photonenemissionen simuliert wurden, sind statistische Schwankungen in der gewonnenen Kurve deutlich zu erkennen. Aus dieser Kurve können nur Effizienzfaktoren zur Quantifizierung eines einzigen Nuklids im Spektrum gewonnen werden. Die zur Berechnung der Kurve verwendete ROI wandert mit durch das Spektrum.

Eine Einstreuung anderer Emissionen des selben Nuklids oder eines zweiten Nuklids in die betrachtete ROI kann anhand der Kurve nicht berücksichtigt werden. Da in den Ganzkörpermessungen immer das natürliche ^{40}K beobachtet wird, scheidet diese Methode für die Effizienzkalibrierung aus.

Um die Energieabhängigkeit der Effizienz dennoch für die Kalibration des Ganzkörperzählers ausnutzen zu können, benötigt man Spektren, die nach der Emission einer einzelnen Photonenenergie im Phantom beobachtet werden. Diese können nur durch die Simulationen gewonnen werden. Die Spektren werden nicht in der zur simulierten Photonenenergie gehörigen ROI, sondern für alle simulierten Energien in einer gemeinsamen ROI integriert. Die resultierende Energie-Effizienzkurve gibt die Wahrscheinlichkeit an, nach der Emission eines Photons der Energie E_γ ein Ereignis in der gewählten ROI zu erhalten. Durch geeignete Kombination, der aus dieser Kurve gewonnenen Effizienzwerte $\text{eff}(\text{ROI} \leftarrow E_\gamma)$, können die Effizienzfaktoren $\text{eff}(\text{ROI} \leftarrow \text{Nuklid})$ für den Nachweis eines Nuklides gewonnen werden. Für das Nuklid muss zunächst eine ROI, in der die Energie-Effizienzkurve bestimmt wird, definiert werden. Die ROI wird dabei sinnvollerweise um die Linie mit der größten Emissionswahrscheinlichkeit gelegt. Die Breite der ROI kann aus der Energie-Halbwertsbreiten-Beziehung berechnet werden. Für jede der beim Zerfall des Nuklids emittierte Photonenenergie wird aus der Kurve eine Effizienz $\text{eff}(\text{ROI} \leftarrow E_\gamma)$ abgelesen. Die mit der Emissionswahrscheinlichkeit gewichtete Summe dieser Werte liefert die gesuchte Nachweiswahrscheinlichkeit $\text{eff}(\text{ROI} \leftarrow \text{Nuklid})$. Die Matrixelemente für die Einstreuung des Nuklids in fremde ROIs können durch analoges Vorgehen gewonnen werden. Es muss lediglich die Energie-Effizienz-Kurve der jeweiligen ROI in den Rechnungen zu Grunde gelegt werden. Als Beispiel wird hier die Berechnung der Effizienzfaktoren für $^{131}\text{I} \rightarrow ^{131}\text{I}$ und $^{131}\text{I} \rightarrow ^{99m}\text{Tc}$ (Masse 70kg) demonstriert. Die beiden Energie-Effizienzkurven sind in Abbildung 3.20 gezeigt. Man findet in diesen Kurven erwartungsgemäß ein Maximum bei den Energien, die im Bereich der ROI (^{131}I : $316 - 413\text{keV}$, ^{99m}Tc : $112 - 169\text{keV}$) liegen. Für Energien unterhalb der ROI ist die Effizienz Null, für Energien oberhalb ist ein exponentieller Abfall zu erkennen. Dieser ist allerdings nicht so stark wie der in Abbildung 3.19 gezeigte, da die ROI nicht mit über das Spektrum gezogen wird, sondern die Einstreuung in die festgehaltene ROI betrachtet wird. Zwischen den jeweils 20keV voneinander entfernten Stützpunkten kann die Kurve stückweise linear beschrieben werden. Aus diesen Geradenstücken wurden die in den Tabellen 3.5 und 3.6 gezeigten Effizienzwerte für die beim Zerfall von ^{131}I emittierten Photonen berechnet.

Die auf diese Weise ermittelten Effizienzwerte für $^{131}\text{I} \leftarrow ^{131}\text{I}$ und $^{99m}\text{Tc} \leftarrow ^{131}\text{I}$ weichen nur weniger als 3% von den aus einer direkten Simulation des Iodzerfalls bestimmten Werten ab (vgl. Tabelle 3.7). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Werte der Kombinationsmethode auf der Simulation von nur einer Million Photonen pro Energie beruhen und daher statistisch nicht so valide sind, wie die aus der direkten Simulation von 10 Millionen Zerfällen bestimmten. Dennoch ist die Übereinstimmung erwartungsgemäß gut. Mit der oben vorgestellten Methode können auch ohne die Simulation

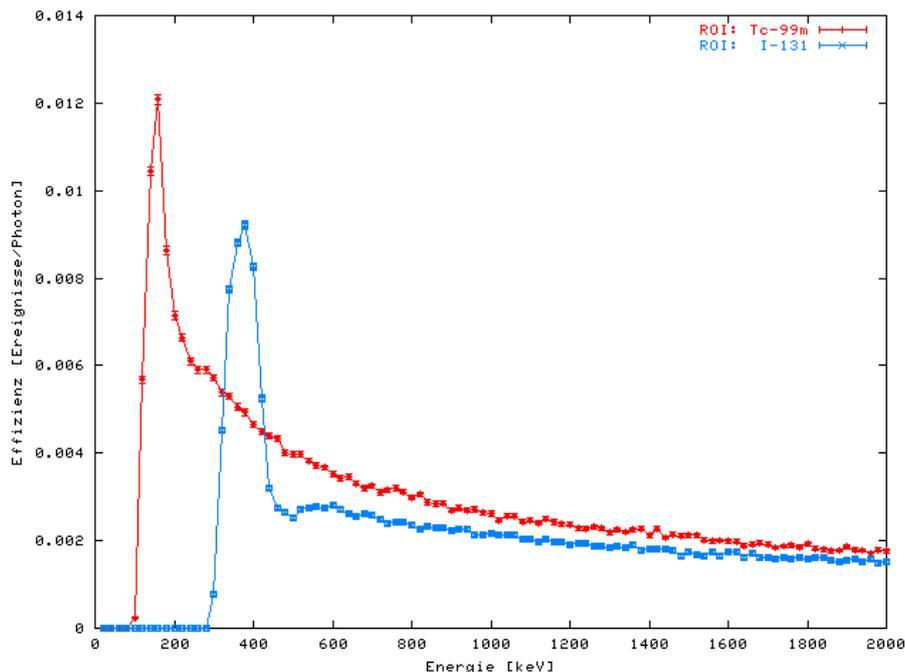


Abbildung 3.20: Energie-Effizienz-Kurven für die Bestimmung der Effizienzen $^{131}\text{I} \leftarrow ^{131}\text{I}$ und $^{99\text{m}}\text{Tc} \rightarrow ^{131}\text{I}$.

von Zerfallsereignissen (vgl. Kapitel 3.2.2) Effizienzen für die Nuklidquantifizierung im Ganzkörperzähler gewonnen werden. Hierbei ist aber zu beachten, dass nur die Ereignisse, die auf die Emission der berücksichtigten Photonen zurückzuführen sind, zur Effizienz beitragen. Ereignisse, die auf die Bremsstrahlung der beim Zerfall emittierten Elektronen zurückzuführen sind, werden von der Kombinationsmethode nicht berücksichtigt. Hier müssen zur Bestimmung der Energie-Effizienz-Kurven Spektren verwendet werden, in denen nur die beim Zerfall emittierten Elektronen simuliert werden. Da die Elektronen nicht wie Photonen mit einer festen Energie emittiert werden, muss zur Berechnung der Kurve als Emissionsenergie entweder die mittlere Energie oder die Maximalenergie des Emissionsspektrums verwendet werden. Für die meisten im Ganzkörperzähler nachweisbaren Nuklide sind die Anteile der Bremsstrahlung an den Effizienzfaktoren sehr gering. Sie treten vor allem bei Energien unterhalb von 200keV auf. Die Spektren, die aus Simulationen der Elektronenemission berechnet werden, haben so geringe Zählraten, dass hohe Zerfallszahlen simuliert werden müssten, um statistisch valide Energie-Effizienz-Kurven für die Bremsstrahlungsanteile zu erhalten. Dieser Aufwand (es müssten zunächst Standardbetaspektren verschiedener Energien definiert werden und anschließend in den zehn Geometrien simuliert) scheint nicht angebracht. Es reicht aus, die benötigten β -Spektren im Bedarfsfall zu simulieren. Hierbei kann dann auch anstelle eines Standardspektrums direkt das in der Table of Isotopes [TOI01] angegebene β -Spektrum für dieses Nuklid verwendet werden.

E_γ [MeV]	P_γ [%]	$\text{eff}({}^{131}\text{I} \leftarrow E_\gamma)$ [Ereignisse/Photon]	Beitrag
0.177	00.27	$0.00 \cdot 10^{-3}$	$0.0000 \cdot 10^{-3}$
0.284	06.14	$0.14 \cdot 10^{-3}$	$0.0086 \cdot 10^{-3}$
0.318	00.08	$4.37 \cdot 10^{-3}$	$0.0035 \cdot 10^{-3}$
0.325	00.29	$5.61 \cdot 10^{-3}$	$0.0163 \cdot 10^{-3}$
0.358	00.20	$8.70 \cdot 10^{-3}$	$0.0174 \cdot 10^{-3}$
0.364	81.81	$9.36 \cdot 10^{-3}$	$7.6455 \cdot 10^{-3}$
0.405	00.05	$7.60 \cdot 10^{-3}$	$0.0038 \cdot 10^{-3}$
0.503	00.36	$2.75 \cdot 10^{-3}$	$0.0099 \cdot 10^{-3}$
0.636	07.17	$2.64 \cdot 10^{-3}$	$0.1894 \cdot 10^{-3}$
0.642	00.22	$2.63 \cdot 10^{-3}$	$0.0058 \cdot 10^{-3}$
0.723	01.77	$2.57 \cdot 10^{-3}$	$0.0455 \cdot 10^{-3}$
			$\Sigma = 7.946 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 3.5: Zur Berechnung der Effizienz ${}^{131}\text{I} \rightarrow {}^{131}\text{I}$.

E_γ [MeV]	P_γ [%]	$\text{eff}({}^{99m}\text{Tc} \leftarrow E_\gamma)$ [Ereignisse/Photon]	Beitrag
0.177	00.27	$9.15 \cdot 10^{-3}$	$0.0247 \cdot 10^{-3}$
0.284	06.14	$5.87 \cdot 10^{-3}$	$0.3604 \cdot 10^{-3}$
0.318	00.08	$5.42 \cdot 10^{-3}$	$0.0043 \cdot 10^{-3}$
0.325	00.29	$5.37 \cdot 10^{-3}$	$0.0156 \cdot 10^{-3}$
0.358	00.02	$5.08 \cdot 10^{-3}$	$0.0102 \cdot 10^{-3}$
0.364	81.81	$5.03 \cdot 10^{-3}$	$4.1095 \cdot 10^{-3}$
0.405	00.05	$4.61 \cdot 10^{-3}$	$0.0023 \cdot 10^{-3}$
0.503	00.36	$3.99 \cdot 10^{-3}$	$0.0144 \cdot 10^{-3}$
0.636	07.17	$3.45 \cdot 10^{-3}$	$0.2474 \cdot 10^{-3}$
0.642	00.22	$3.44 \cdot 10^{-3}$	$0.0076 \cdot 10^{-3}$
0.723	01.77	$3.11 \cdot 10^{-3}$	$0.0550 \cdot 10^{-3}$
			$\Sigma = 4.851 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 3.6: Zur Berechnung der Effizienz ${}^{131}\text{I} \rightarrow {}^{99m}\text{Tc}$.

Methode	$\text{eff}({}^{131}\text{I} \leftarrow {}^{131}\text{I})$	$\text{eff}({}^{99m}\text{Tc} \leftarrow {}^{131}\text{I})$
	in [Ereignissen/Zerfall]	
Messung	$8,14 \cdot 10^{-3}$	$5,08 \cdot 10^{-3}$
direkte Simulation	$7,85 \cdot 10^{-3}$	$4,98 \cdot 10^{-3}$
Kombinationsmethode	$7,95 \cdot 10^{-3}$	$4,85 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 3.7: Vergleich der berechneten Effizienzwerte.

Für die Anwendung der Kombinationsmethode zur Kalibration des Ganzkörperzählers wurde ein Spektrendatensatz aus 5000 Spektren erstellt. Dieser beinhaltet für jede der zehn Geometrien Spektren mit Emissionsenergien von 20keV bis 2000keV . Für Testzwecke wurde jede der Simulationen mit einer Million emittierter Photonen gerechnet. Ein Datensatz mit besserer Statistik (geplant sind einhundert Millionen emittierte Photonen pro Rechnung) soll auf dem Linux-Cluster im Institut für Kernphysik berechnet werden. Eine Darstellung des Testdatensatzes in Form einer Effizienzfläche für das 70kg-Phantom zeigt Abbildung 3.21. Aus der für den Ganzkörperzähler bekannten Energieabhängigkeit der Halbwertsbreite wurde zu jeder Energie eine "gleitende ROI" definiert. Die Basisenergie der ROI wurde auf der x-Achse (im Bildhintergrund von rechts nach links) aufgetragen, auf der y-Achse die Energie der emittierten Photonen und auf der z-Achse (nach oben) die Effizienzen. Schnitte senkrecht zur x-Achse liefern die Energie-Effizienz-Kurven.

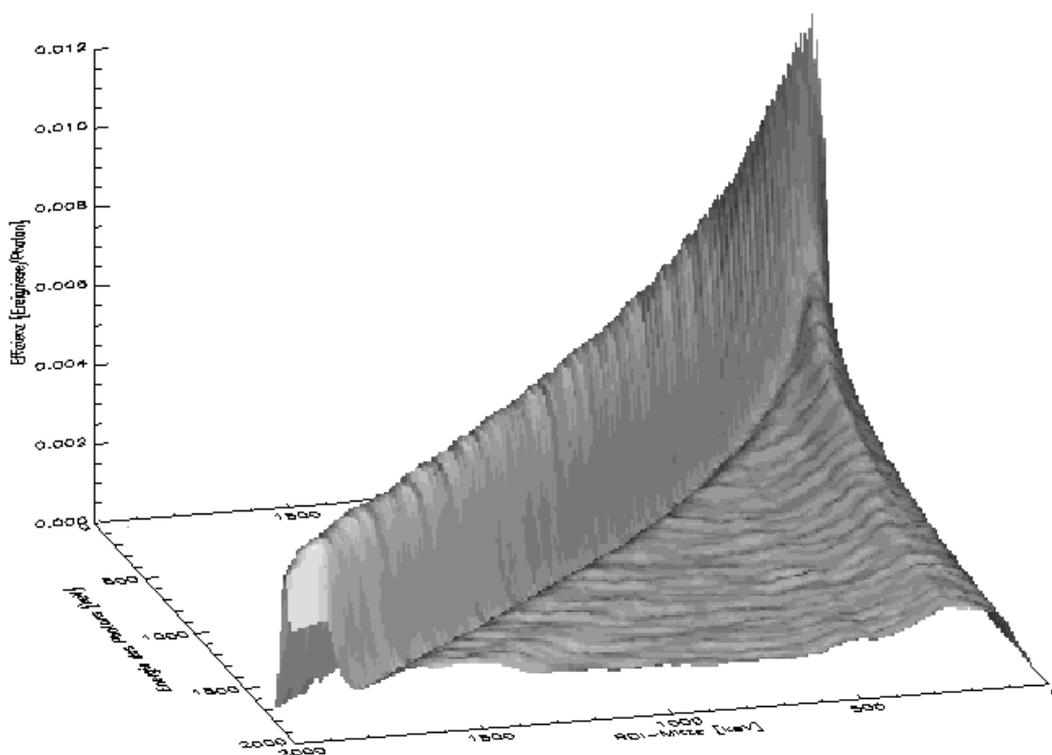


Abbildung 3.21: Effizienz-„Gebirge“ für das 70kg-Flaschenphantom.

Ein auf der C++-Klasse `spektrum` (vgl. Kapitel 3.3.1) und der Grafikbibliothek Qt [Bla04] basierendes Programm `kombitool` (Abbildung 3.22) automatisiert die Berechnungsschritte. Der Benutzer kann die Zerfallseigenschaften des generierenden Nuklids und die für die Berechnung zu verwendende ROI angeben. Die Nuklideigenschaften werden in dem Format angegeben, das auch die Simulationen verwenden (vgl. Seite 53). Es können daher auch die Nukliddateien aus den Simulationen verwendet werden. Das Programm greift auf den Spektrendatensatz zu und erzeugt für die gewählte Masse eine

Energie-Effizienz-Kurve und stellt diese dar. Im Anschluss wird die Effizienz für das definierte Nuklid berechnet und angezeigt. Eine Fehlerangabe für die Effizienz wird über eine Fehlerfortpflanzung berechnet. Die verwendeten Spektren enthalten bereits die dazu notwendigen Informationen über den statistischen Fehler der einzelnen Kanäle. Optional wird eine massenabhängige Kalibrierkurve für das Nuklid erstellt. Alle Berechnungen des Programms können sowohl für das Summenspektrum der Detektoren als auch für jeden Detektor einzeln durchgeführt werden. Im Programm vorgesehen ist die Verwendung verschiedener Spektrensätze (Geometrien). Informationen über die vorhandenen Geometrien werden dem Programm über eine Initialisierungsdatei beim Aufruf übergeben. Der Benutzer kann die zu verwendende Geometrie aus einer Liste auswählen. Hierdurch ist es möglich für den Ganzkörperzähler verschiedene Kalibrationen zu erstellen (z.B. zur Messung von großen Materialproben) oder für andere Spektrometer Effizienzen zu berechnen. Es muss nur ein geeigneter Spektrensatz für die Berechnungen erzeugt werden. Eine Anleitung zu diesem Programm befindet sich in Anhang A.4. Durch dieses Programm können, ohne weitere Simulationen, für beliebige Nuklide Effizienzwerte gewonnen werden.

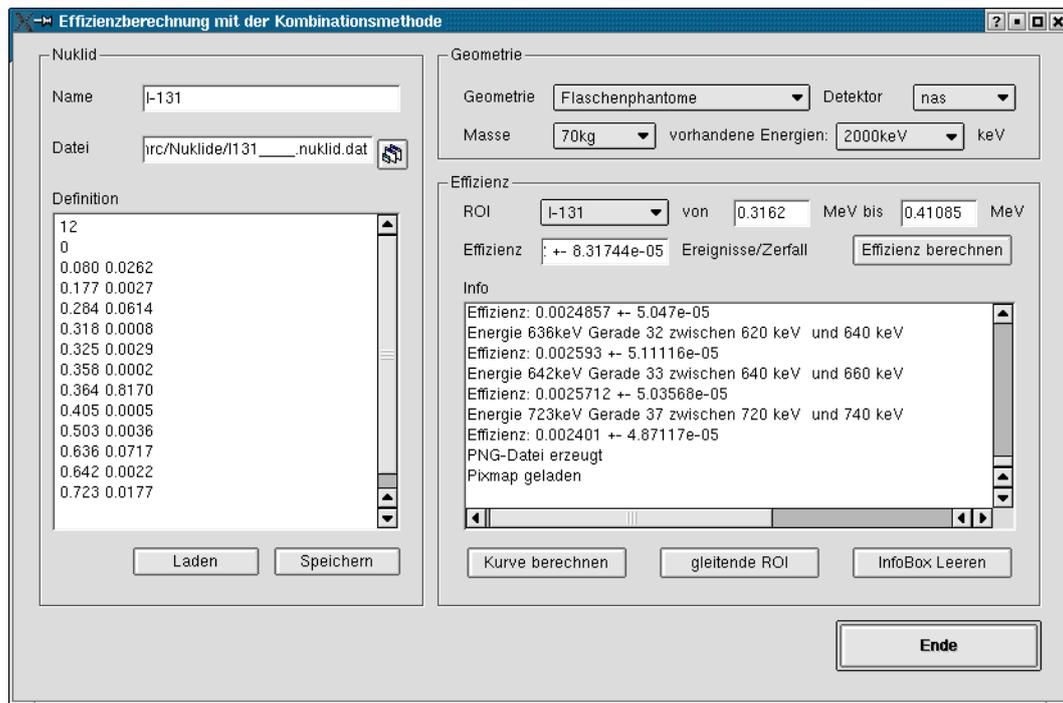


Abbildung 3.22: kombitool: Programm zur Berechnung von Effizienzen mit der Kombinationsmethode.

3.3 Zur Auswertung der Spektren

3.3.1 Die C++-Klassen Spektrum, Effmatrix und Nuklidvektor

Die aus den Messungen und den Simulationen gewonnenen Spektren müssen zur Kalibration oder zur Auswertung bearbeitet werden. Die einzelnen Rechenschritte

hierbei sind z.B. die Subtraktion eines Untergrundspektrums oder die Skalierung eines Spektrums mit einem konstanten Faktor. Da die gemessenen Spektren im Dateiformat der Messsoftware (winTMCA) vorliegen, die simulierten Spektren hingegen in einem einfachen $xy(z)$ -Format, war es zunächst nicht möglich die Spektren gemeinsam zu bearbeiten. Selbst die Differenz eines gemessenen Spektrums von einem simulierten konnte nicht berechnet werden. Die Lösung, die gemessenen Spektren in das $xy(z)$ -Format umzuwandeln, erwies sich als unbrauchbar, da immer wieder neue Spektrendateien erzeugt werden mussten. Eine Umwandlung der simulierten Spektren in das winTMCA-Format ist ungünstig, da hierbei Informationen verworfen werden müssten. Zum einen können die in den Simulationen gewonnenen Angaben über den statistischen Fehler der Kanalinhalt nicht verarbeitet werden, zum anderen lässt das winTMCA-Format nur ganzzahlige Kanalinhalt zu. Die simulierten Spektren müssten bei einer Umwandlung also gerundet werden.

Daher wurde eine C++-Klasse "Spektrum" entwickelt, in der die Spektren durch Objekte der Klasse repräsentiert werden. Die einzelnen Funktionen stehen als Methoden der Klasse zur Verfügung. Der objektorientierte Ansatz macht eine einheitliche Bearbeitung der Spektren möglich. Basierend auf dieser Klasse und der grafischen Klassenbibliothek Qt3 [Bla04] wurden verschiedene Programme entwickelt. Der Spektreninhalt wird in der Klasse in drei Datenfeldern **Energie**, **Ereignisse** und **Fehler** des Typs `double` abgelegt. Dieser Datentyp ermöglicht es, auch nicht-ganzzahlige Werte, die nach Skalierungen auftreten, zu verwalten. Um die Mess- bzw. Simulationsstatistik berücksichtigen zu können, wird das Feld **Fehler** verwendet. Dieses Feld kann für jeden Kanal eine Fehlerangabe speichern, die falls vorhanden aus den Simulationsdateien mit eingelesen wird. Für die Messungen und Simulationen, die keine Fehlerangaben enthalten, werden die Fehlerwerte auf Null gesetzt. Informationen über die Energieeinheit, das Erstellungsdatum, den Spektrentyp, die Messdauer bzw. die simulierte Teilchenanzahl, den Dateinamen und ein kurzer Beschreibungstext werden in Variablen des Typs `string` verwaltet. Zum Schreiben bzw. Lesen dieser Werte stehen zwei Methoden `setze_Wert(string, string)` und `lese_Wert(string)` zur Verfügung. Alle Variablen der Klasse sind `private`, d.h. auf sie kann nur über die Methoden der Klasse zugegriffen werden. Dieses verhindert ein unbeabsichtigtes Überschreiben der Werte durch die Programme.

Die Methode `Spektrum_einlesen(string)` erkennt, ob ein winTMCA-Spektrum oder ein simuliertes $xy(z)$ -Format vorliegt. Dazu wird die Datei gelesen und nach der Zeichenfolge "xUnit: keV" gesucht. Diese ist in allen winTMCA-Spektren vorhanden. Das Spektrum wird dann in das interne $xy(z)$ -Format umgewandelt. Zeilen mit einem `#` in der ersten Spalte werden als Kommentare bzw. Informationswerte behandelt. Die Informationen werden beim Speichern des Spektrums in Form von Kommentarzeilen am Anfang des Spektrums abgelegt und beim Laden des Spektrums wieder eingelesen. Gemessene Spektren im Format des Messprogramms (winTMCA der Firma Target) werden

beim Einlesen direkt in das $xy(z)$ -Format umgewandelt⁹. Beim Speichern des Spektrums durch die Methode `Spektrum_speichern(string)` wird das $xy(z)$ -Format geschrieben. Die Informationen aus den Stringvariablen werden zeilenweise als "`# Variablenname: Wert`" in die Datei geschrieben. In dieser Form können sie auch wieder eingelesen werden.

Weitere Methoden übernehmen die Aufgaben, die bei der Spektrenbearbeitung anfallen. Die Methode `integrieren(double, double)` gibt die Summe der Kanalinhalt zwischen den beiden angegebenen Energien an. Die Methode `skalieren(double)` multipliziert die Kanalinhalt (Ereignisse) mit dem angegebenen Faktor. Methoden, deren Namen mit einem `f_` beginnt, führen die Berechnungen mit dem Fehlerfeld durch. Für die Addition zweier Spektren wird angenommen, dass ihre Energieachsen identisch sind, d.h. es werden nur die Ereignisse addiert. Ist eines der Spektren kürzer, wird das andere vorher durch die Methode `verkuerzen()` auf die gleiche Länge (Kanalzahl) gebracht. Hierbei wird unterstellt, dass die unteren Kanäle der Spektren die interessantesten sind. Weitere Hilfsmethoden stehen der Klasse zur Verfügung. In die Klasse wurde zusätzlich eine Methode `peakintegration(double, double)` zur Integration und Ausgabe der reinen Peakfläche implementiert¹⁰. Die Methode `peakfitintegration(double, double)` passt zusätzlich eine Gaußkurve an den Peak an. Methoden zur Faltung der Spektren mit der Monte-Carlo-Methode (vgl. 3.2) stehen in der Klasse zur Verfügung. Diese Funktionen wurden aber nach der Integration des Faltungsalgorithmus in die Simulationen obsolet. Einen Überblick über die Klasse gibt der kommentierte Auszug aus der Headerdatei "`spektrum.h`" in Abbildung 3.23.

Zur Berechnung der inkorporierten Aktivitäten aus den Peakflächen wird ein lineares Gleichungssystem aufgestellt und gelöst (vgl. Kapitel 1.2.3). Dessen Abbildung auf dem Rechner erfolgt in zwei C++-Klassen `Effmatrix` und `Nuklidvektor`. Die Klasse `Effmatrix` enthält die Datenstrukturen für eine quadratische Matrix¹¹ des Datentyps `double`. Eine Vektorstruktur für `double`-Werte wird von der befreundeten Klasse `Nuklidvektor` zur Verfügung gestellt. Zur Lösung des Gleichungssystems wurde das Gauss-Jordan-Verfahren (mit Pivotisierung) zur Inversion der Effizienzmatrix in der Methode `effmatrix GaussJordan(effmatrix&)` implementiert. Die Multiplikation mit dem Vektor der Zählraten erfolgt durch die Methode `nuklidvektor vektmult(const nuklidvektor&) const`. Die gesuchten Aktivitäten befinden sich im so berechneten `Nuklidvektor`. Weitere Hilfsmethoden in beiden Klassen stellen Rechenverfahren der Matrixalgebra zur Verfügung. Zum Anzeigen der Matrix wurde eine eigene Qt-Klasse `MatrixZeigenDialog` verwendet, die ein eigenes Darstellungsfenster öffnet, entwickelt.

⁹Gespeichert wird allerdings das $xy(z)$ -Format.

¹⁰Hierzu wird vorher mit der Hilfsmethode `bg(double, double)` ein Untergrund unter dem Peak berechnet (vgl. Kapitel 3.3.2).

¹¹Die Effizienzmatrizen sind immer quadratisch.

```

#ifndef _SPEKTRUM
#define _SPEKTRUM
#define MAXK 2000
#include <string>      // stringklasse
:
:

using namespace std;
using std::string;

class Spektrum
{
public:
    Spektrum();                // Leeres Spektrum erzeugen
    Spektrum(string);          // Spektrum aus Datei 'string' laden
    int Spektrum_einlesen(string); // Spektrum aus Datei 'string' einlesen
    int speichern(string);      // Spektrum in Datei 'string' speichern
    int speichern();            // Spektrum in Dateiname speichern
    int skalieren(double);      // Spektrum skalieren
    double integrieren(double, double); // Integrieren von .. bis ..
    double peakintegrieren(double, double); // Peakfläche von .. bis .. auszählen
    double peakfitintegrieren(double, double); // Peakfläche von .. bis .. aus Fit
    double f.integrieren(double, double); // Fehlerwerte Integrieren von .. bis ..
    int addieren(Spektrum& );    // Ereignisse zweier Spektrum addieren
    int f.addieren(Spektrum& );  // Fehlerwerte zweier Spektrum addieren
    int addieren(Spektrum& ,Spektrum& ,Spektrum& );
    int getinfo();              // Informationen ueber Spektrum am Bildschirm ausgeben
    string holewert(string);     // Wert string auslesen
    int setzewert(string,string); // Wert string setzen
    int verkuerzen(int);
    int verlaengern(int);
    int falten(Spektrum&);
    double RNG();
    double Normalzufall();
    int initRNG();
    static void setzeSkala(string);
    double gibEnergieWert(int);
    double gibEreignisseWert(int);
    int Kanalzahl();
    int Energieachse(Spektrum& ); // Übernehmen der Energieachse vom angegebenen Spektrum

private:
    int Kanaele;
    double Energie[MAXK+1];
    double Ereignisse[MAXK+1];
    double ROIWert;
    string Typ;
    string EinheitEnergie;
    string EinheitEreignisse;
    string Detektorname;
    string Beschreibung;
    string Datum;
    string Dateiname;
    static double roi;
    static double roio;
};
#endif

```

Abbildung 3.23: Auszug aus der Headerdatei `spektrum.h` für die C++-Klasse `Spektrum`.

Für die zwei Grundaufgaben der Spektrenbearbeitung "Kalibrierung" und "Auswertung" wurden eigene, auf diesen Klassen basierende, Programme mit grafischer Oberfläche entwickelt. Das Programm `effizienzberechner` (vgl. Abbildung 3.24) liest die angegebenen Spektrendateien ein und integriert diese in der gewählten ROI. Aus den angegebenen gemessenen Aktivitäten bzw. simulierten Zerfällen und den Phantommassen wird die Effizienz-Massen-Kurve berechnet. An diese Kurve wird mit dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus eine Funktion angepasst. Die Parameter dieser Funktionen werden in einer Textdatei abgelegt und stehen dort dem `auswertetool` zur Verfügung. Dieses Programm (vgl. Abbildung 3.25) dient zur Auswertung der Messungen mit dem Kölner Ganzkörperzähler. Die benötigten ROI-Definitionen, die Kalibrierkurven und die Personendaten werden aus "Datenbanken"¹² (vgl. Anhang A.1.2) entnommen. Diese Datenbanken können online ausgetauscht oder bearbeitet werden. Dadurch können auf einfache Weise verschiedene Kalibrationen des Ganzkörperzählers parallel verwendet werden. Ein gemessenes Spektrum kann im Programm geladen und dargestellt werden. Ein eventuell notwendiger Untergrundabzug wird im Programm direkt durchgeführt. Nach Auswahl der Person und der auszuwertenden ROIs werden die Zählraten in den ROIs und die daraus berechneten Aktivitäten angezeigt und in einer Logdatei aufgezeichnet. So ist es möglich, auch ältere Auswertungen nachzuvollziehen. Auf Wunsch wird ein Report der Auswertung im HTML-Format erstellt und angezeigt. Die Anleitungen zu diesen und den anderen in dieser Arbeit entwickelten Programmen befinden sich im Anhang.

Die beiden Programme sind ausgiebig getestet worden. Mit dem `effizienzberechner` wurde aus den gemessenen Kalibrierspektren eine Kalibrationsdatenbank erzeugt. Die Messungen des ersten Quartals 2004 wurden mit dem `auswertetool` in dieser Kalibrierung ausgewertet. Die berechneten Aktivitäten wurden verglichen mit denen der Routineauswertung (ermittelt mit dem Programm BC-Soft). Insgesamt sind 93 Messungen ausgewertet worden. Überwiegend handelt es sich dabei um Messungen des Personals der Therapiestation der Klinik. Diese MitarbeiterInnen werden 14-tägig auf eine Inkorporation von ^{131}I untersucht. Im Rahmen der Inkorporationsmessungen wird immer auch die Aktivität des natürlich im Körper vorkommenden Nuklids ^{40}K ($E_\gamma = 1460\text{keV}$) bestimmt. Die mit der entwickelten Auswertesoftware berechneten ^{40}K -Aktivitäten liegen alle höher (im Mittel +1,5% Abweichung), als die mit BC-Soft ermittelten. Abbildung 3.26 zeigt eine Auftragung des Verhältnisses der ermittelten ^{40}K -Aktivitäten. Diese Abweichung ist auf Rundungsfehler zurückzuführen. Die Kanalinhalt in den Spektren werden innerhalb des Messprogramms als positive ganzzahlige Werte verwaltet. Nach einer Messung werden die Bruttospektren der vier NaI(Tl)-Detektoren gespeichert und zum Bruttosummenspektrum aufaddiert. Das über das Wochenende gemessene Untergrundspektrum wird skaliert auf die Messdauer der Inkorporationsmessung vom Bruttosummenspektrum abgezogen. Das Summenspektrum der Detektoren wird anschließend als Nettospektrum gespeichert. Durch die Skalierung entstehen Bruchteile, welche von der Messsoftware auf ganzzahlige Werte gerundet werden. Um diese Rundungsfehler

¹²Es handelt sich hierbei um einfache Textdateien.

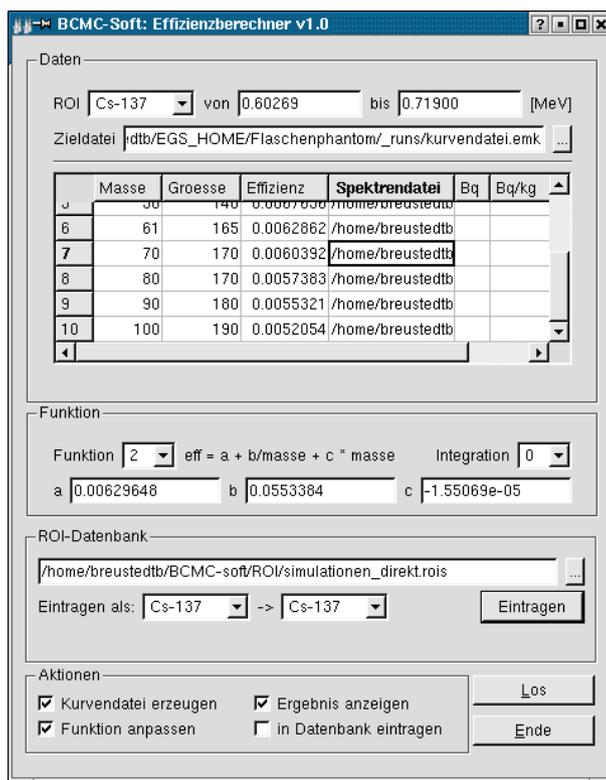


Abbildung 3.24: effizienzberechner: Programm zur Berechnung von Kalibrierkurven aus gemessenen oder simulierten Spektren.

zu umgehen, werden von der Messsoftware das Bruttosummenspektrum und das Untergrundspektrum in den jeweiligen ROIs integriert. Der Untergrundwert wird anschließend zeitskaliert. Zur Auswertung mit BC-Soft wird die Differenz der beiden Werte verwendet. Die Auswertung mit BCMC-Soft nutzt jedoch das "fehlerbehaftete" Nettosummenspektrum zur Berechnung der Aktivitäten. Der Wert, den eine Integration dieses Spektrums in der ROI ergibt, sind höher als die mit der oben beschriebenen Methode ermittelten Werte, da Kanäle mit rechnerisch negativem Inhalt auf Null festgesetzt werden und demnach einen größeren Beitrag liefern. Aus den so ermittelten größeren Peakflächen werden für dieses Nuklid höhere Aktivitäten berechnet. Daraus berechnen sich auch größere Einstreuanteile in die anderen ROIs, die wiederum zu abweichenden Aktivitätsangaben für diese Nuklide führen. Ein direkter Vergleich der für diese Nuklide ermittelten Aktivitäten ist daher nicht aussagekräftig, da die Einstreuung des in jeder Messung vorkommenden ^{40}K überschätzt wird.

Die entwickelte Software ist in der Lage, die Spektreninhalte auch als nicht ganzzahlige Werte zu behandeln. Man kann also ein aus den Bruttospektren der Einzeldetektoren und des Untergrundes nachträglich erzeugtes korrigiertes Nettosummenspektrum zur Auswertung verwenden. In diesem Fall erhält man (gleiche Kalibrierfunktionen vorausgesetzt) wie erwartet identische Aktivitäten. Die durchgeführten Tests zeigen, dass die entwickelte Software in der Lage ist, die Auswertung einer Inkorporationsmessung mit Ergebnissen durchzuführen, die im Rahmen der u.a. durch die Messdauer beschränkten Messgenauigkeit gleich den in der Routine ermittelten sind. Das BCMC-Soft System kann also in der bestehenden Form verwendet werden.

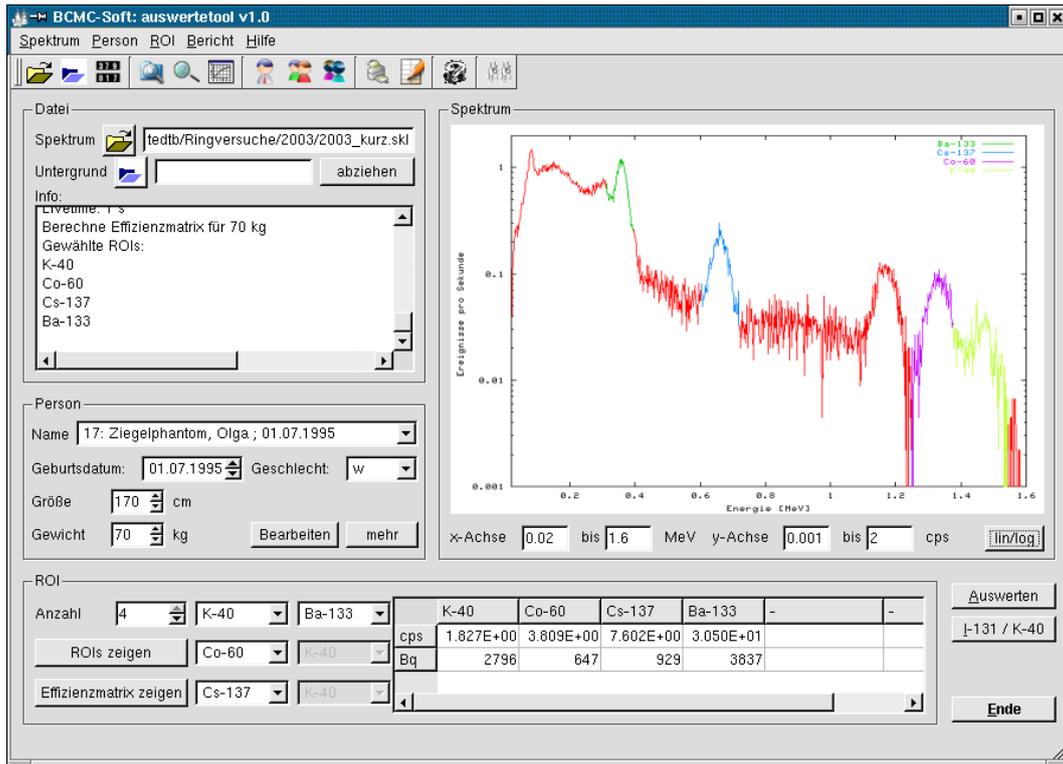


Abbildung 3.25: auswertetool: Programm zur Auswertung von Messungen mit dem Kölner Ganzkörperzähler.

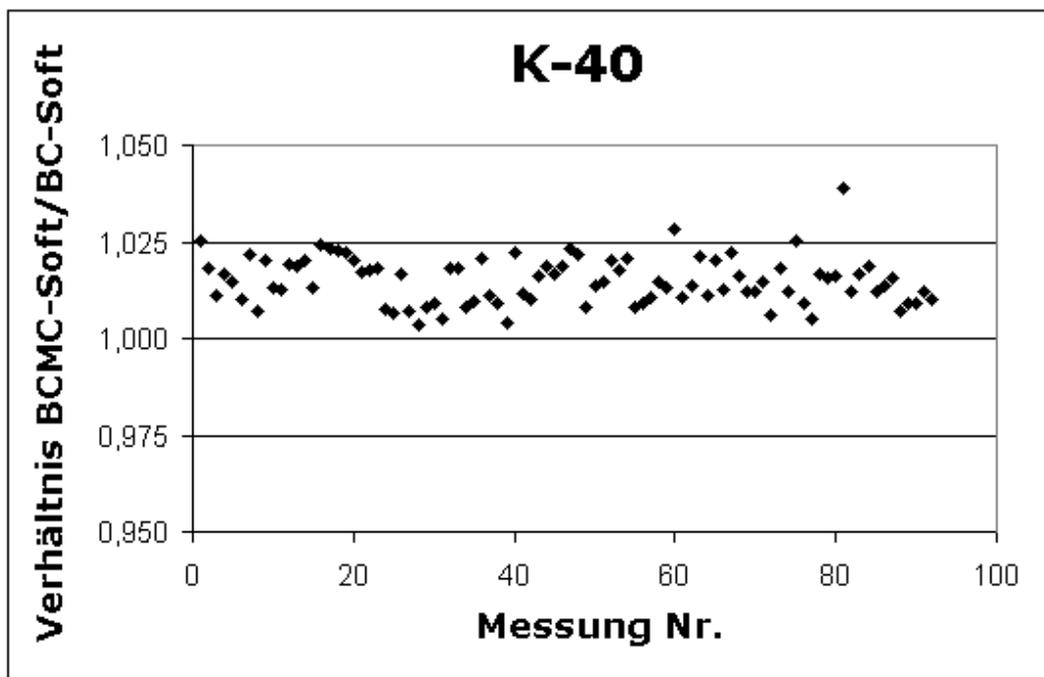


Abbildung 3.26: Verhältnis der mit den beiden Auswerteprogrammen ermittelten ⁴⁰K-Aktivitäten.

3.3.2 Eine Alternative zur Auswertung durch eine Effizienzmatrix

Die Bestimmung der Peakflächen für die Berechnung der Aktivitäten aus dem Netto-sommenspektrum erfolgt bislang durch Aufsummieren der gemessenen Kanalinhalt in der ROI. Es werden alle gemessenen Ereignisse im Peakfenster für die Auswertung verwendet. Durch die Nicht-Diagonal-Elemente der Effizienzmatrix wird dabei berücksichtigt, dass ein Teil der Ereignisse auf das einstreue Nuklid zurückzuführen ist. Die mit der Matrix berechneten Aktivitäten für verschiedene Nuklide sind voneinander abhängig. D.h. wird die Aktivität eines Nuklids "falsch" angegeben, ergeben sich automatisch ebenfalls "fehlerhafte" Angaben für die Aktivität der anderen Nuklide. Durch das in jeder Inkorporationsmessung beobachtete natürliche ^{40}K ($E_\gamma = 1460\text{keV}$) erhält man aber immer einen Streuuntergrund in den auszuwertenden ROIs. Die "Streu-geometrie" der gemessenen Personen wird vom Flaschenphantom nur unzureichend genau modelliert. Der dadurch entstehende systematische Fehler in der Aktivitäts-berechnung wird daher gerade in den Streuelementen der Effizienzmatrix besonders groß.

Die gegenseitige Abhängigkeit der berechneten Aktivitäten voneinander kann umgangen werden, wenn es zuverlässig gelingt, im Spektrum die "echten" Ereignisse, die auf das in der ROI beobachtete Nuklid zurückzuführen sind, von den Streueignissen zu trennen. Die Effizienzmatrix wird in diesem Fall zu einer Diagonalmatrix. Die "echten" Ereignisse bilden einen näherungsweise gaußförmigen Peak in der ROI, der auf einem Untergrund aus Streueignissen liegt. Die Bestimmung dieses Untergrundes kann auf verschiedene Weisen erfolgen. In der DIN-Norm 25482 "Nachweisgrenze und Erkennungsgrenze bei Kernstrahlungsmessungen" [DIN92] wird eine Gerade oder ein Polynom dritten Grades zur Approximation des Untergrundes vorgeschlagen. Die Parameter dieser Funktion sollen aus vier Bereichen des Spektrums außerhalb der ROI bestimmt werden. Die Breite dieser Bereiche ist entsprechend anzupassen. In den Spektren der Inkorporations-messungen ist dieses jedoch problematisch, da die ROIs dicht beieinander liegen können und dadurch der Bereich zur Bestimmung der Untergrundparameter eingeschränkt ist. Zusätzlich ist hier mit Problemen durch die schlechte Messstatistik zu rechnen. Alternativ kann der Untergrund durch ein iteratives Verfahren bestimmt werden [Wes81, Wes92]. Die Basis für dieses Vorgehen bildet eine Modellierung der gemessenen Spektrallinie durch Delta-Peaks H_δ in den Kanälen des Spektrums. In einem kleinen Bereich unterhalb des gemessenen Kanals erzeugt ein solcher Delta-Peak einen konstanten Untergrund der Höhe $\alpha \cdot H_\delta$. Die Konstante α kann aus dem gemessenen Spektrum durch

$$\alpha^{-1} = \sum_{i=M}^N \frac{H_{\delta,i}}{H_{B,B} - H_{B,A}}$$

berechnet werden [Wes92]. Hierbei sind M und N der untere bzw. obere Grenzkanal des Peaks. $H_{B,B}$ und $H_{B,A}$ sind die Kanalinhalt des Untergrundes oberhalb bzw. unterhalb des Peaks. Diese sollten durch Mittelung über wenige Kanäle berechnet werden, um statistische Schwankungen abzufangen. Für die Berechnung des Untergrundes unter einem Peak muss bei bekanntem α der Peak vom höchsten zum niedrigsten Kanal durchlaufen werden. Dabei wird jeweils aus der Höhe des Delta-Peaks im aktuellen

Kanal der Untergrund in den darunter liegenden Kanälen berechnet. Aus diesem Untergrund und dem Kanalinhalt ergibt sich die neue Höhe des Delta-Peaks im direkt darunter liegenden Kanal. Als Startuntergrund wird üblicherweise eine Gerade zwischen den Peakgrenzen verwendet. Diese können für unbekannte Nuklide z.B. durch numerische Ableitung des Spektrums gefunden werden [Wes81]. Um das störende statistische Rauschen zu minimieren, muss vorher eine geeignete Glättung des Spektrums erfolgen. Die Abbruchbedingung für die Iteration kann z.B. durch die Begrenzung der relativen Änderung der Nettopeakfläche pro Iterationsschritt definiert werden.

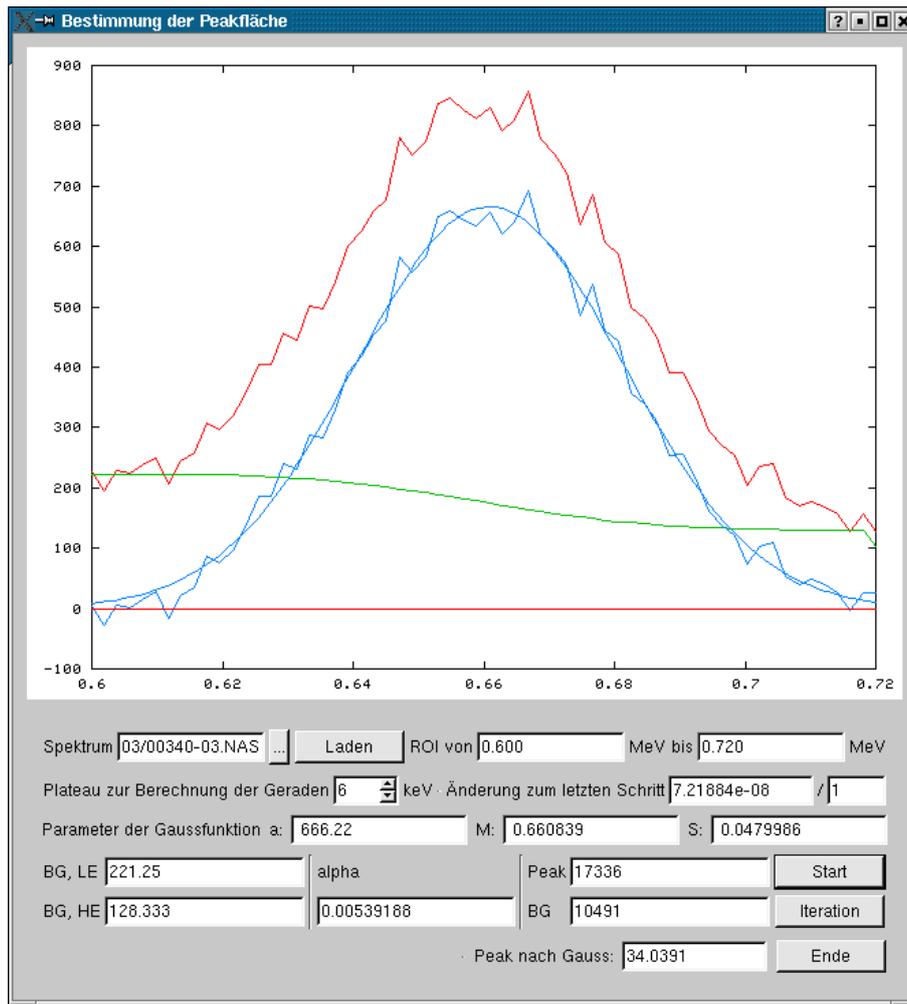


Abbildung 3.27: Das Programm `peakbg` zur Berechnung eines Peakuntergrundes.

Das iterative Verfahren wurde in der C++-Klasse `Spektrum` (vgl. Kapitel 3.3.1) implementiert. In den Spektren der Inkorporationsmessungen sind durch die vorgegebenen ROIs die gesuchten Peaks bereits definiert, so dass eine Peaksuche hier entfallen kann. Zum Testen der Eigenschaften dieses Verfahrens wurde ein kleines Qt-Programm `peakbg` geschrieben. Ein Spektrum kann darin geladen und in verschiedenen ROIs mit dem oben beschriebenen Verfahren integriert werden. Der Untergrund wird dazu im ersten Schritt durch eine Gerade genähert. Diese wird durch zwei Punkte in den

rechts und links direkt an die ROI angrenzenden Kanälen beschrieben. Verwendet wird dabei der Mittelwert der angrenzenden Kanalinhalt. Die Anzahl der Kanäle (bzw. die Energiebreite) über die gemittelt wird ("Plateaubreite") kann vom Benutzer geändert werden. Die einzelnen Iterationsschritte können vom Benutzer durchgeführt werden. Gezeigt wird jeweils das gemessene Spektrum, der aktuell berechnete Untergrund und die Differenz der beiden. Zusätzlich wird an die Differenz mit `Gnuplot` eine ebenfalls dargestellte Gaußkurve angepasst.

Tests mit verschiedenen Spektren zeigen, dass das Verfahren sehr schnell konvergiert. In der Regel genügen fünf Iterationen, um relative Änderungen der Peakfläche von weniger als 0,5% zu erreichen. Die Breite des Plateaus zur Bestimmung der Startgerade sollte bei 6-12keV (=3-6 Kanäle) liegen. Werden weniger Kanäle verwendet, kann es aufgrund der Messstatistik zu abweichenden Ergebnissen kommen. Wird über mehr Kanäle gemittelt, ist es möglich, dass in diesem Bereich kein "Plateau" mehr vorliegt. Interessant ist aber das Verhalten dieser Methode in Bereichen des Spektrums, in denen kein Peak vorliegt. Der rechnerisch ermittelte Untergrund nähert sich dort dem gemessenen Spektrum an. Dies ist zu erwarten, da in der ROI ja kein Peak sondern nur Untergrund vorliegt. In vielen Fällen zeigt sich dann ein "Schwungsverhalten" mit teilweise extremen Schwankungen (über mehrere Größenordnungen) in der bestimmten Nettopeakfläche. Aus diesen Tests wurden Abbruchbedingungen für die automatische Iteration festgelegt. Diese wurden zur Definition der Methode `bg(double, double)` in der Klasse `Spektrum` verwendet. Die automatische Iteration bricht ab, wenn die Schwankungen in der ausgezählten Nettopeakfläche kleiner als 0,5% sind. Sind zwischen zwei Iterationsschritten die relativen Änderungen größer als 10^6 wird die Iteration ebenfalls abgebrochen. In diesem Fall wird die Peakfläche zu Null festgesetzt, da angenommen wird, dass kein Peak gefunden wurde. In der entwickelten Auswertesoftware (vgl. Kapitel 3.3.1) wurde diese Methode zur Peakflächenbestimmung implementiert.

Die mit der iterativen Methode bestimmten Nettopeaks können alle sehr gut durch Gaußkurven beschrieben werden. Für die Anpassung der Parameter (Peakzentrum, -breite und -höhe) der Gaußkurven an die Nettopeaks ist es notwendig, geeignete Startparameter zu wählen. Als Startparameter bieten sich an: die ROI-Mitte, die Halbwertsbreite aus der bekannten Energie-Halbwertsbreiten-Beziehung des Ganzkörperzählers und der Inhalt des Kanals in der ROI-Mitte. Alternativ zum Auszählen der Kanalinhalt des Nettopeaks wurde eine analytische Bestimmung der Peakfläche aus der Gaußkurve implementiert. Dazu wurde der Levenberg-Marquardt-Algorithmus [Pre02] in die Klasse `Spektrum` implementiert. Wichtig ist die anschließende Kontrolle der ermittelten Gaußkurve. In vielen Fällen findet der Fitalgorithmus eine Gaußkurve, welche einen Teil der statistischen Schwankungen innerhalb der "leeren" ROI beschreibt. Die Parameter Zentrum und Breite dürfen daher nur in einem definierten Bereich um die erwarteten Werte schwanken (Breite $\pm 5\%$, Lage $\pm 5\%$). Ansonsten muss diese Gaußkurve verworfen werden. In diesen Fällen wird die Peakfläche ebenfalls auf Null gesetzt, da angenommen wird, dass kein echter Peak in der ROI gefunden wurde. Die Berechnung der Aktivität aus den Nettoflächen ermöglicht es auch Spektren auszuwerten, in denen die Peaks nahe

beieinander liegen und nicht vollständig getrennt werden können. Hierfür ist aber einiges Geschick in der Wahl der Parameter für die Bestimmung des Untergrundes und der Initialisierung des Peakfits notwendig. Ein Beispiel hierfür ist die Messung eines Ziegelphantoms mit ^{60}Co ($E_\gamma=1172\text{keV}$ und 1333keV) und ^{40}K ($E_\gamma=1460\text{keV}$) im Rahmen des Ringversuches 2003. Der 1333keV -Peak des ^{60}Co fällt teilweise in die ^{40}K -ROI ($1366 - 1555\text{keV}$).

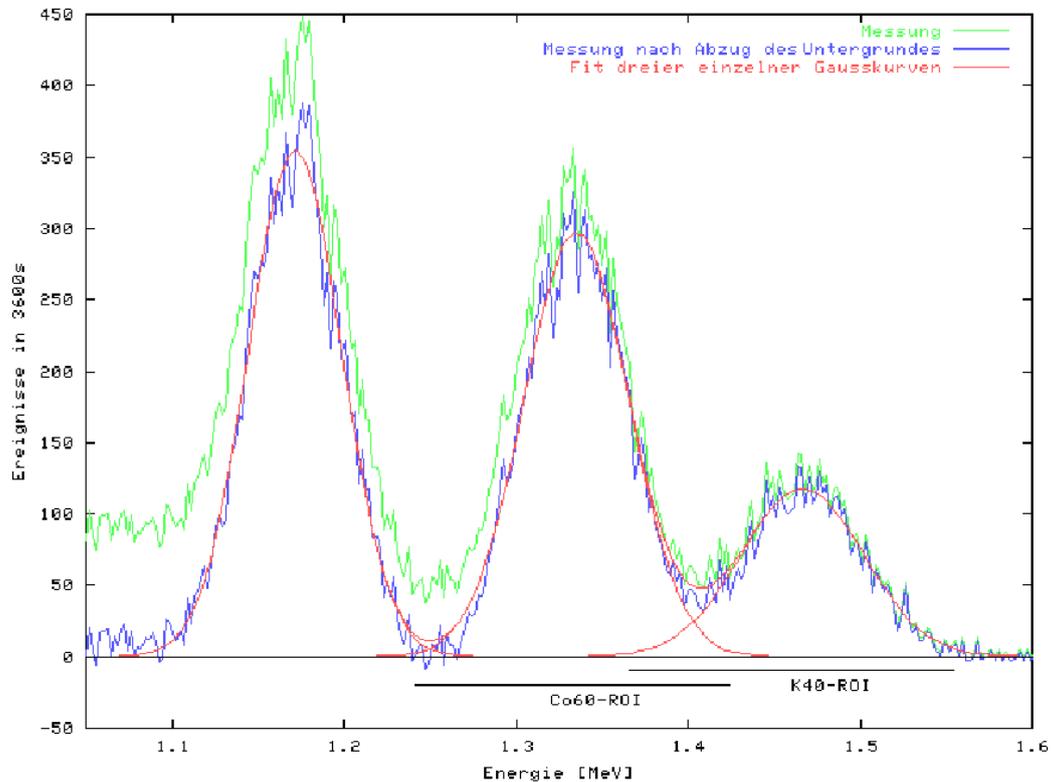


Abbildung 3.28: Trennung des ^{40}K Peaks von den beiden ^{60}Co Peaks durch Gaußkurven.

Die beiden Auswertemethoden über einen Peakfit beziehungsweise eine Matrix haben ihre Vor- und Nachteile. In der Matrixmethode entfallen die Unsicherheiten bei der Bestimmung des Untergrundes und des Peakfits. Alle gemessenen Ereignisse werden in dieser Methode berücksichtigt. Die Berücksichtigung der Streueereignisse bedeutet aber gleichzeitig auch eine höhere Geometrieabhängigkeit der Aktivitäten, da diese Matrixelemente durch die Streueigenschaften der verwendeten Phantome bestimmt werden. Die Übereinstimmung zwischen Messgeometrie (Person) und Kalibriergeometrie (Phantom) ist nur bedingt gegeben. Ein Peakfit eliminiert diese Abhängigkeit der bestimmten Aktivitäten voneinander und von der Streugeometrie, da nur die Vollenergieereignisse in dieser Auswertung berücksichtigt werden. Gleichzeitig erhält man jedoch die nächste Fehlerquelle. Die Bestimmung des Untergrundes ist in den Spektren nicht immer eindeutig möglich. Es gibt eine Abhängigkeit von der Breite der Plateaus links und rechts des Peaks und von der Wahl der Peakgrenzen. Die Wahl der Standardwerte der ROIs führt in den statistisch schwachen Spektren nicht immer zu den besten Resultaten. Hier muss der Benutzer, insbesondere bei nahe beieinander

liegenden Peaks, von Hand eingreifen. Um die Peakfitmethode anwenden zu können, ist keine Matrixrechnung notwendig, da die Effizienzmatrix zu einer Diagonalmatrix wird. Man benötigt allerdings für jedes Nuklid Kalibrierspektren. Die Kombinationsmethode (vgl. Kapitel 3.2.4) ist so nicht möglich. Es kann lediglich eine Interpolation aus der gemessenen Energieabhängigkeit der Effizienz erfolgen.

Beide Methoden stehen durch das `auswertetool` zur Auswertung der Spektren des Kölner Ganzkörperzählers zur Verfügung und können bei Bedarf angewendet werden. Die Umschaltung der Methoden kann online erfolgen. Es muss aber zusätzlich die ROI-Datenbank ausgetauscht werden, da die Effizienzfaktoren der beiden Methoden unterschiedlich sind. Im Routinebetrieb ist die Matrixmethode zu bevorzugen, da hier keine Probleme durch die Untergrundbestimmung oder den Peakfit auftreten. Außerdem kann mit der Kombinationsmethode jederzeit eine fehlende Effizienz nachbestimmt werden.

3.4 Beispiel: Die Ringversuche 2001 und 2003

Das in dieser Arbeit entwickelte und implementierte System konnte durch die Teilnahme der Messstelle an den Ringversuchen des BfS in den Jahren 2001 und 2003 getestet werden. Die Ringversuche für In-Vivo-Inkorporationsmessanlagen werden von der Leitstelle Inkorporationsüberwachung des BfS als Qualitätskontrollmaßnahme regelmäßig durchgeführt [Koe97, Koe04]. Zu den Aufgaben der Leitstelle gehören die Qualitätssicherung, sowie die Vereinheitlichung von Mess-, Analysen- und Interpretationsverfahren. Die amtlichen Messstellen sind durch §41 (8) StrlSchV verpflichtet, an diesen Vergleichen teilzunehmen.

Im Ringversuch wird das Phantom "Igor" (vgl. Abbildung 1.11 und [Kov00, RTC97]) verwendet. Dieses wird vom BfS mit, den Messstellen unbekannt, Nukliden und Aktivitäten befüllt. Das Phantom wird in jeder teilnehmenden Messstelle routinemäßig gemessen und bewertet. Das in der Kölner Messstelle im Jahr 2003 aufgenommene Spektrum zeigt Abbildung 3.29. Zusätzlich ist dort das Spektrum gezeigt, welches sich aus der Simulation der am Ende des Ringversuchs bekanntgegebenen Aktivitäten in der Flaschenphantomgeometrie ergibt. Die in dieser Messung (und der des Jahres 2001) identifizierten Nuklide sind: ^{133}Ba ($E_\gamma = 356\text{keV}$), ^{137}Cs ($E_\gamma = 662\text{keV}$), ^{60}Co ($E_\gamma = 1332\text{keV}$ und 1173keV) und ^{40}K ($E_\gamma = 1460\text{keV}$). Die Nuklide sind eher im kerntechnischen Bereich als in der Nuklearmedizin anzutreffen. In Köln gibt es derzeit nur wenige Personen, die auf diese Nuklide überwacht werden. Der Ringversuch bietet daher auch die seltene Gelegenheit, die Messung solcher Nuklide durchzuführen. Besonders für ^{60}Co ist dieses interessant, da dessen ROI mit der von ^{40}K überlappt.

Das gemessene Spektrum wurde mit den verschiedenen in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren ausgewertet:

- Matrix: basierend auf gemessenen Effizienzen (BC-Soft),

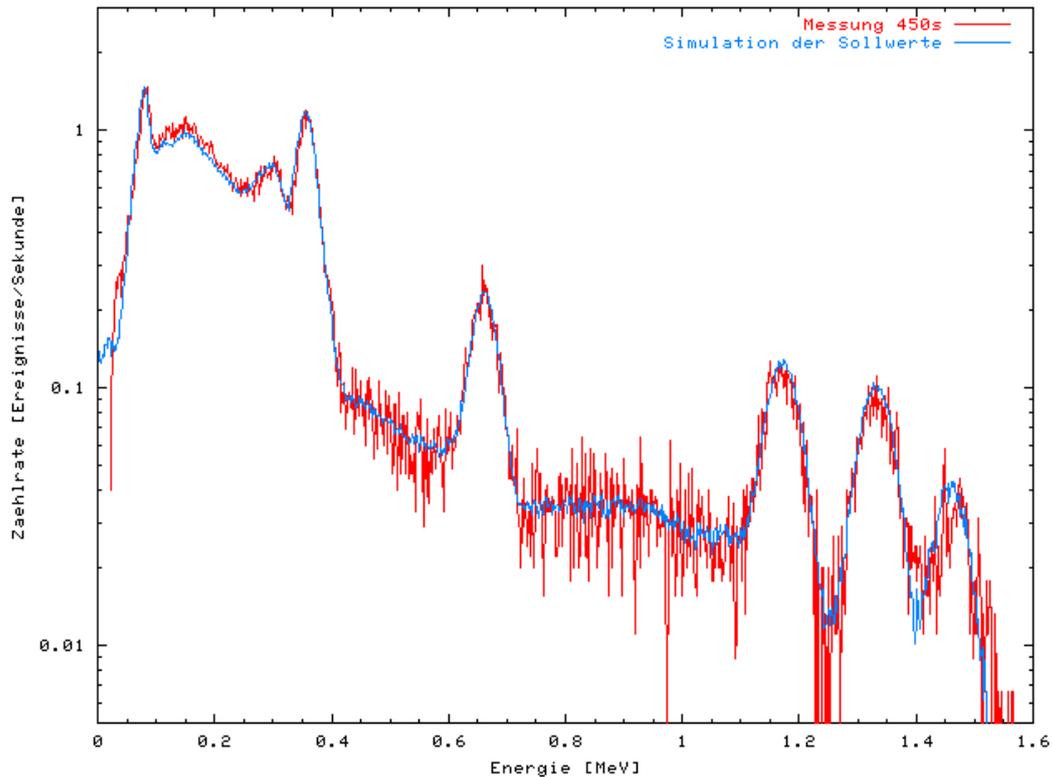


Abbildung 3.29: Ringversuch 2003: Spektrum des Phantoms "Igor" und Simulation dazu.

- Matrix: basierend auf Effizienzen aus der direkten Simulationen des Nuklidzerfalls,
- Matrix: basierend auf Effizienzen aus der Kombinationsmethode,
- Peakfit: basierend auf Effizienzen aus der direkten Simulation des Nuklidzerfalls.

Eine Zusammenstellung der Sollwerte und berechneten Aktivitäten zeigt Tabelle 3.8.

Die auf Simulationsbasis bestimmten Aktivitäten liegen alle innerhalb der gesetzlich geforderten Toleranzen (-25% , +50%). Die Abweichungen von den Sollwerten sind mit Ausnahme der durch Peakfit bestimmten Aktivitäten für ^{40}K und ^{60}Co sogar kleiner als 10%. Die beiden Peaks können nicht direkt getrennt werden. Eine Untergrundbestimmung ist hier insbesondere wegen der schlechten Messstatistik schwierig. Die mit der Kombinationsmethode bestimmten Aktivitäten stimmen sehr gut mit den aus direkten Simulationen ermittelten (> 2%) überein. Die Kombinationsmethode ist für diese Nuklide genauso gut zur Kalibrierung des Ganzkörperzählers geeignet wie die direkte Simulation des Zerfalls.

Die auf Basis der gemessenen Effizienzen berechneten Aktivitäten für ^{60}Co liegen in beiden Jahren außerhalb des Toleranzbereiches (Unterschätzung von 32,2% (2001) bzw. 37,7% (2003)). Durch die Ringversuche wurde ein Fehler in der bisherigen Kalibration entdeckt. Die zur Auswertung verwendeten Kalibrierkurven sind verschoben, da die mit

2001

Nuklid	Sollwert	BC-Soft	Zerfall	Simulation	
				Kombination	Peakfit
^{40}K	2807	3170	3922	4032	3130
^{60}Co	3355	2537	3350	3349	3407
^{137}Cs	5205	5300	5351	5368	5123
^{133}Ba	4333	4481	4666	4776	4244

2003

Nuklid	Sollwert	BC-Soft	Zerfall	Simulation	
				Kombination	Peakfit
^{40}K	2807	2846	2796	2853	2941
^{60}Co	679	493	647	646	600
^{137}Cs	867	768	929	934	861
^{133}Ba	3794	4324	3837	3849	3787

Tabelle 3.8: Zur Auswertung der Ringversuche 2001 und 2003, angegeben sind die Aktivitäten in Becquerel.

dem Ziegelphantom gemessenen Kalibrierspektren falschen Massen zugeordnet wurden. Das Phantom (Aufbau P4 liegend) hat eine Masse von $63,26\text{kg}$, stellt aber aufgrund der unterschiedlichen Schwächungseigenschaften von Polystyrol und Gewebe eine 70kg schwere Person dar. Die für die anderen Nuklide ermittelten Aktivitäten streuen mit Abweichungen von $-12,9\%$ bis $+12,3\%$ stark um die Sollwerte. Eine solche Streuung wird in den simulationsbasierten Werten nicht beobachtet.

Durch die numerische Kalibration konnte die Auswertung für die Messungen der Ringversuche verbessert werden. Die gemessenen Spektren des Ringvergleichs können auch durch die direkte Simulation der Sollaktivitäten reproduziert werden (vgl. Abbildung 3.29). Lediglich im Energiebereich unterhalb von 250keV kommt es zu geringen Abweichungen, wie sie bereits in Abschnitt 3.2.3 beschrieben wurden.

3.5 511keV-Zerfallereignisse im Bodycounter

In einigen Inkorporationsmessungen der letzten drei Jahre wurden in den Spektren Ereignisse bei 511keV beobachtet. Diese Energie tritt bei der Annihilation von Positronen auf. In der nuklearmedizinischen Diagnostik werden Nuklide, die Positronen emittieren, zur Untersuchung mit dem Positronen-Emissions-Tomographen (PET) verwendet. Da die entsprechenden Nuklide kurze Halbwertszeiten besitzen (z.B.: ^{18}F : 110min, ^{11}C : ca. 20min) wurden diese Messungen einige Stunden später erneut durchgeführt. In den Wiederholungsmessungen war keine solche Aktivität festzustellen. Die gemessenen

Personen (u.a. eine Schwester der Therapiestation) hatten jedoch keinen Umgang mit diesen Nukliden, so dass eine Inkorporation unwahrscheinlich scheint. Ein von 1997-2000 in der Klinik durchgeführtes Projekt zur Inkorporationsüberwachung in PET-Zentren [Esc01] zeigte, dass eine Inkorporation solcher Nuklide nur für gasförmige Radiopharmaka auftritt. Eine Einstreuung in die Messkammer erscheint auch unwahrscheinlich. Es müssten dazu 16cm Stahl und 3mm Blei von den Quanten ungestreut durchquert werden. Da es sich hierbei um mehrere Halbwertsschichtdicken (für 511keV-Photonen) handelt, müsste die Aktivität außerhalb der Kammer unrealistisch groß sein.

Es wurden zwei Simulationen mit 511keV Photonen als Quellteilchen gerechnet. In der ersten Simulation wurden die Photonen im wassergefüllten 70kg-Flaschenphantom emittiert. In der zweiten wurde als Flascheninhalt Luft verwendet. Dieses sollte luftgetragene Aktivität auf der Liege darstellen. Abbildung 3.30 zeigt einen Vergleich der beiden erhaltenen Spektren mit dem Spektrum des 511keV-Anteils einer Messung. Dieser ergibt sich als Differenz der Messung mit 511keV Ereignissen und der Wiederholungsmessung ohne diese Ereignisse. Die Spektrenform der Messung deutet auf die luftgetragene Aktivität hin, genauere Aussagen lassen sich auf Grund der schlechten Statistik der Messung nicht treffen.

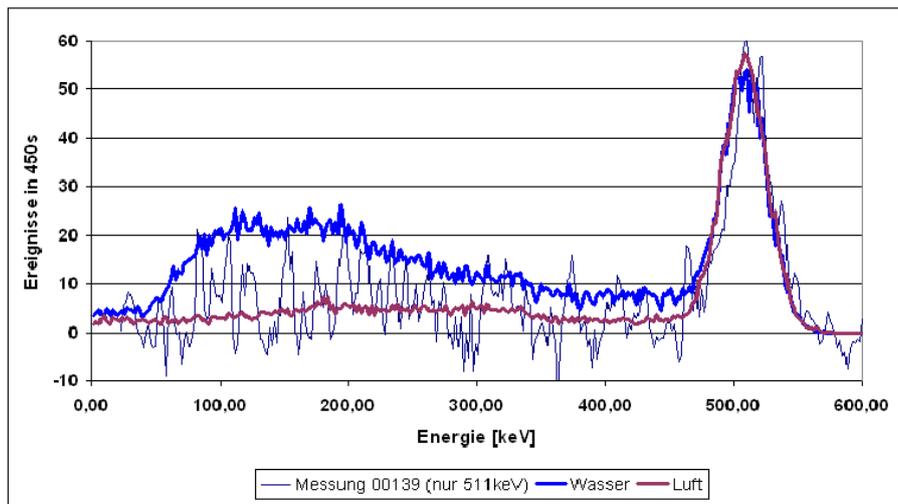


Abbildung 3.30: Spektren des 511keV-Anteils einer Messung und Simulationen dazu.

Um zu zeigen, dass es sich um luftgetragene Aktivität handelt, wurde eine neue Steuerdatei für die Messsoftware des Ganzkörperzählers entwickelt. Diese startet die Datenaufnahme aller Detektoren und schreibt alle 60 Sekunden den aktuellen Inhalt der Spektren in der 511keV-ROI mit der aktuellen Zeitangabe in eine Textdatei. Seit Dezember 2003 werden, wenn die Kammer nicht durch andere Messungen belegt war, solche Kontrollmessungen des Kammeruntergrundes fortlaufend durchgeführt. Ein kleines Qt-Programm `Annihilationstool` wurde zur Auswertung dieser Daten entwickelt. Dieses liest die Textdatei aus und berechnet die Zählrate zu den angegebenen

Zeitpunkten. Der Zählratenverlauf wird grafisch dargestellt. Zusätzlich werden die maximale und die minimale Zählrate, sowie die mittlere Zählrate mit Standardabweichung angezeigt (Abbildung 3.31). Der Benutzer kann den Zeitabschnitt, in dem die Zählrate dargestellt werden soll, interaktiv auswählen. Die Zählrate in der 511keV -ROI liegt im Mittel bei $2,5 \pm 0,2$ Ereignissen pro Sekunde. In einigen der Zeitreihen wurde allerdings ein Ansteigen und anschließendes Abfallen der Zählrate auf den Mittelwert zurück beobachtet. Der nach ca. 10 Minuten erreichte Maximalwert war in der einzelnen Messserien unterschiedlich (im Bereich von 4 -60 cps). Der ganze Vorgang hatte aber in allen Fällen jeweils die gleiche Dauer von etwa 40 Minuten. Abbildung 3.31 zeigt als Beispiel den Zählratenverlauf, der am 10.05.2004 beobachtet wurde. Der beobachtete Kurvenverlauf entspricht dem typischen Zählratenverlauf in einem Durchflusszähler, wie er zum Beispiel zur Raumluftüberwachung in Aktivbereichen eingesetzt wird, nach einer einmaligen Aktivitätsfreisetzung (vgl. [Esc00]). Einen Vergleich des am 10.05.2004 gemessenen Spektrums mit dem Untergrundspektrum vom vorangegangenen Wochenende zeigt die folgende Abbildung 3.32. Man erkennt den erhöhten Peak bei 511keV . Es ist also zwischen 10:50h und 11:30h luftgetragene β^+ -Aktivität in der Messkammer beobachtet worden.

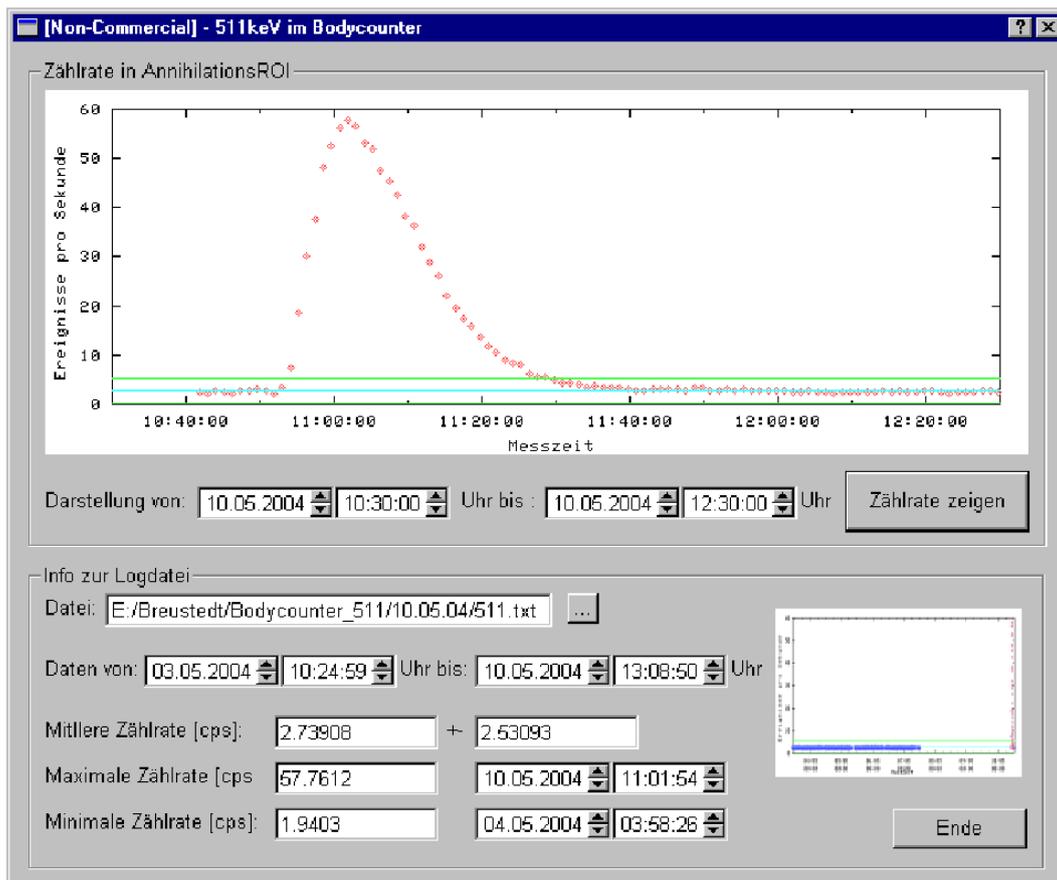


Abbildung 3.31: Zählratenverlauf in der 511keV -ROI am 10.05.2004.

Zunächst wurde versucht, die Größenordnung der beobachteten Aktivität abzuschätzen.

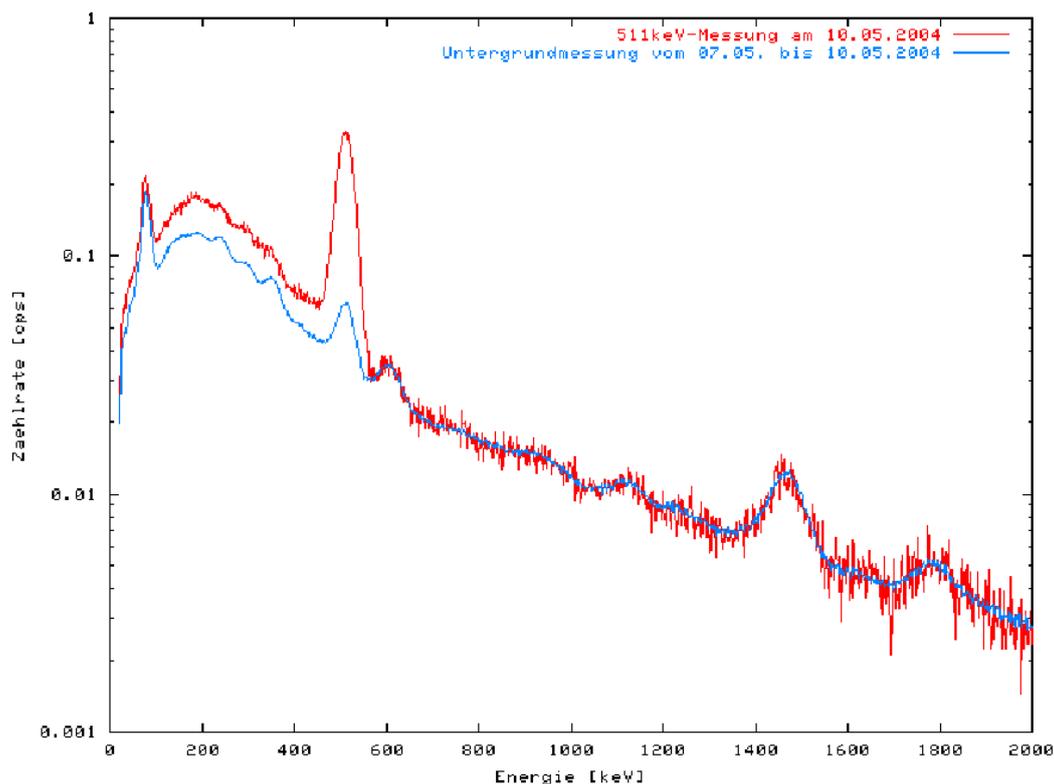


Abbildung 3.32: Vergleich des Spektrums der 511keV-Messung am 10.05.2004 mit dem Untergrundspektrum vom Vorwochenende.

Dazu wurde die Belüftung der Kammer genauer betrachtet. Die Messkammer wird über ein Filtersystem belüftet. Direkt oberhalb des Kammerfilters befindet sich die Auslassöffnung für die Zuluft des Messraums. Ein großer Teil der einströmenden Luft wird also direkt über die Filter in die Messkammer eingeleitet. Die Zuluft des Klinikgebäudes wird an der Südostseite des Baus angesaugt und im zwangsbelüfteten Bereich der Klinik verteilt. Die Abluft wird über das Klinikdach abgegeben. Die Fläche des Messraums ($51,4\text{m}^2$) entspricht ca. 1,5% des zwangsbelüfteten Teils der Klinik. Es werden also etwa 1,5% der angesaugten Luft in den Messraum getragen. Werden die Lüftungsverhältnisse der Kammer im Kompartimentformalismus¹³ [Cob00] modelliert, kann der gemessene Zählratenverlauf näherungsweise nachgebildet werden.

Als Nuklid wird ^{11}C angenommen, da dieses als $[^{11}\text{C}]\text{CO}_2$ -Gas in der Lage ist, die Filter zu überwinden. Aus der Lösung dieses Modells kann man ablesen, dass nach dem Eintrag eines Becquerels ^{11}C in die Kammer dort ca. 300 Zerfälle stattfinden. Aus einer Simulation mit in der Kammer gleichverteilter Positronenemission als Quelle kann eine Nachweiswahrscheinlichkeit für diese Zerfälle berechnet werden. Diese ist

¹³Dieser Formalismus wird vor allem in der Pharmakokinetik verwendet, um Zeit-Aktivitätsverläufe zu beschreiben. Für die Modellierung der Belüftung der Messkammer werden 2 Kompartimente (Messkammer und Vorraum) mit geeigneten Ratenkonstanten angesetzt. Zur Lösung des Modells wurde die Software SAAMII [SAAM2, Fos94, Cob98] eingesetzt.

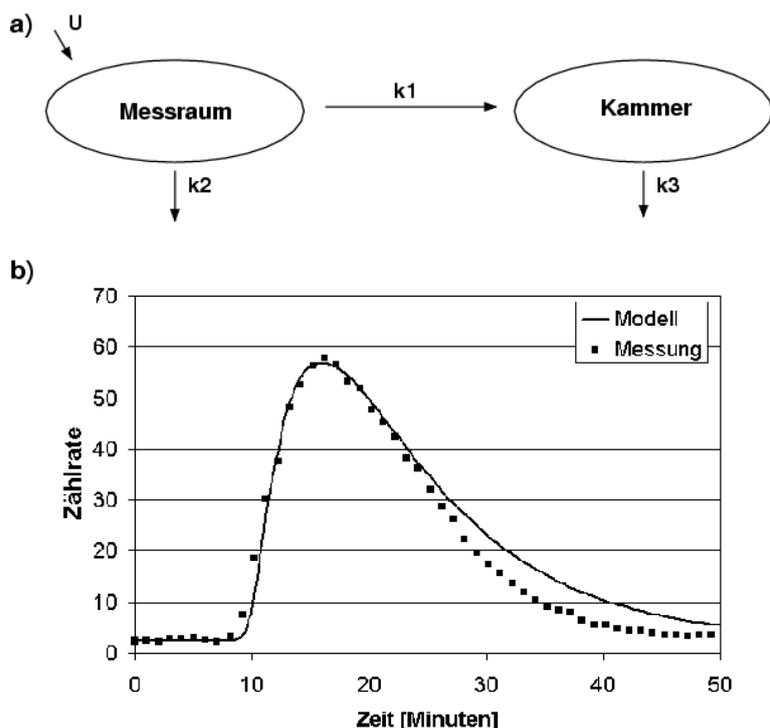


Abbildung 3.33: Zur Modellierung des Zählratenverlaufs im Kompartimentformalismus.

- a) Kompartimentmodell: gezeigt sind die zwei Kompartimente Messraum und Kammer mit den Zu- und Abflusswegen.
- b) Vergleich der Lösung des Modells (Zählratenverlauf im Kompartiment Kammer) mit dem am 10.05.2004 gemessenen Zählratenverlauf.

nur ein Näherungswert, weil der Zeitverlauf der räumlichen Verteilung der Aktivität in der Kammer nicht berücksichtigt wird. Über dieses Verhalten (ein Durchströmen der Kammer vom Fuß- zum Kopfende der Liege) können jedoch keine ausreichend gut begründeten Annahmen gemacht werden. Die angegebene Anzahl von Zerfällen und die daraus berechneten Werte sind daher als Größenordnungsangaben zu verstehen. Unter den getroffenen Annahmen erhält man für den 10.05.2004 acht Millionen ^{11}C -Zerfallsereignisse in der Kammer. Diese entsprechen nach der Lösung des Kompartimentmodells einer in die Kammer eingetragenen Aktivität von 27,2 kBq.

Durch diese unberücksichtigten 511keV -Ereignisse werden die Aktivitäten der Nuklide, deren Gammalinien unterhalb dieser Energie liegen, im Gleichungssystem überschätzt. Ein Beispiel für diese Auswirkungen zeigt eine Messung vom 26.05.2004. Die Messung einer Schwester der Therapiestation wurde unbeabsichtigt während eines 511keV -Ereignisses durchgeführt. Die Kurve der Kontrollmessung ist in Abbildung 3.34 gezeigt. Man erkennt den bekannten Zählratenverlauf zwischen 13:00h und 13:40h, mit einer Datenlücke zwischen 13:15h und 13:25h. Das Spektrum der Inkorporationsmessung, die gegen 13:15h gestartet wurde, zeigt Abbildung 3.35. Man erkennt dort deutlich den Peak bei 511keV .

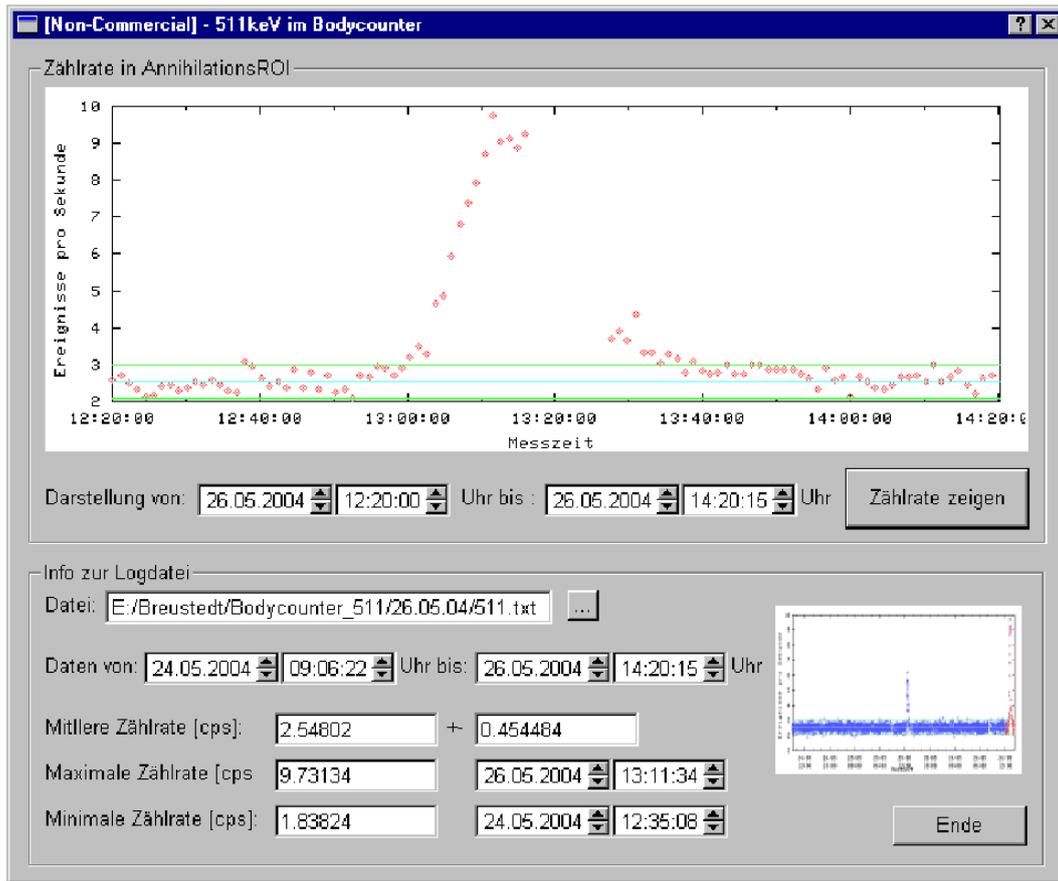


Abbildung 3.34: Zählratenverlauf in der 511keV-ROI am 26.05.2004.

Die Routineauswertung ohne Berücksichtigung der 511keV Ereignisse errechnet aus dem Spektrum eine ^{131}I -Aktivität von 117Bq. Diese ist aber offensichtlich nicht vorhanden, da in der Iod-ROI (316 – 413keV) keine Peakstruktur zu erkennen ist. Es wurden also Streueignisse der 511keV-Linie des luftgetragenen ^{11}C als scheinbare Iod-Aktivität interpretiert. Berechnet man die Aktivität unter Berücksichtigung der Einstreuung erneut, erhält man eine ^{131}I -Aktivität von -24Bq. Der negative Wert ist verständlich, da in der vorliegenden Kalibration die Einstreuung in die Iod-ROI überschätzt wird. Als Streumedium dient dort Wasser (die Aktivität ist im Flaschenphantom gelöst), welches einen höheren Wirkungsquerschnitt als Luft besitzt. Nimmt man an, die beobachteten Ereignisse bei 511keV seien auf eine ^{18}F -Inkorporation zurückzuführen, errechnet man eine Körperaktivität von 204 Bq ^{18}F . Man würde ohne Kenntnis des Ursprungs der 511keV-Linie in der Auswertung dieser Messung eine de facto nicht vorhandene Inkorporation angeben.

Der Nachweis dieser 511keV-Aktivität, die in allen anderen Detektoren der Klinik unbemerkt blieb, zeigt eindrucksvoll die hohe Empfindlichkeit des Messgerätes Ganzkörperzähler für den Strahlungsnachweis.

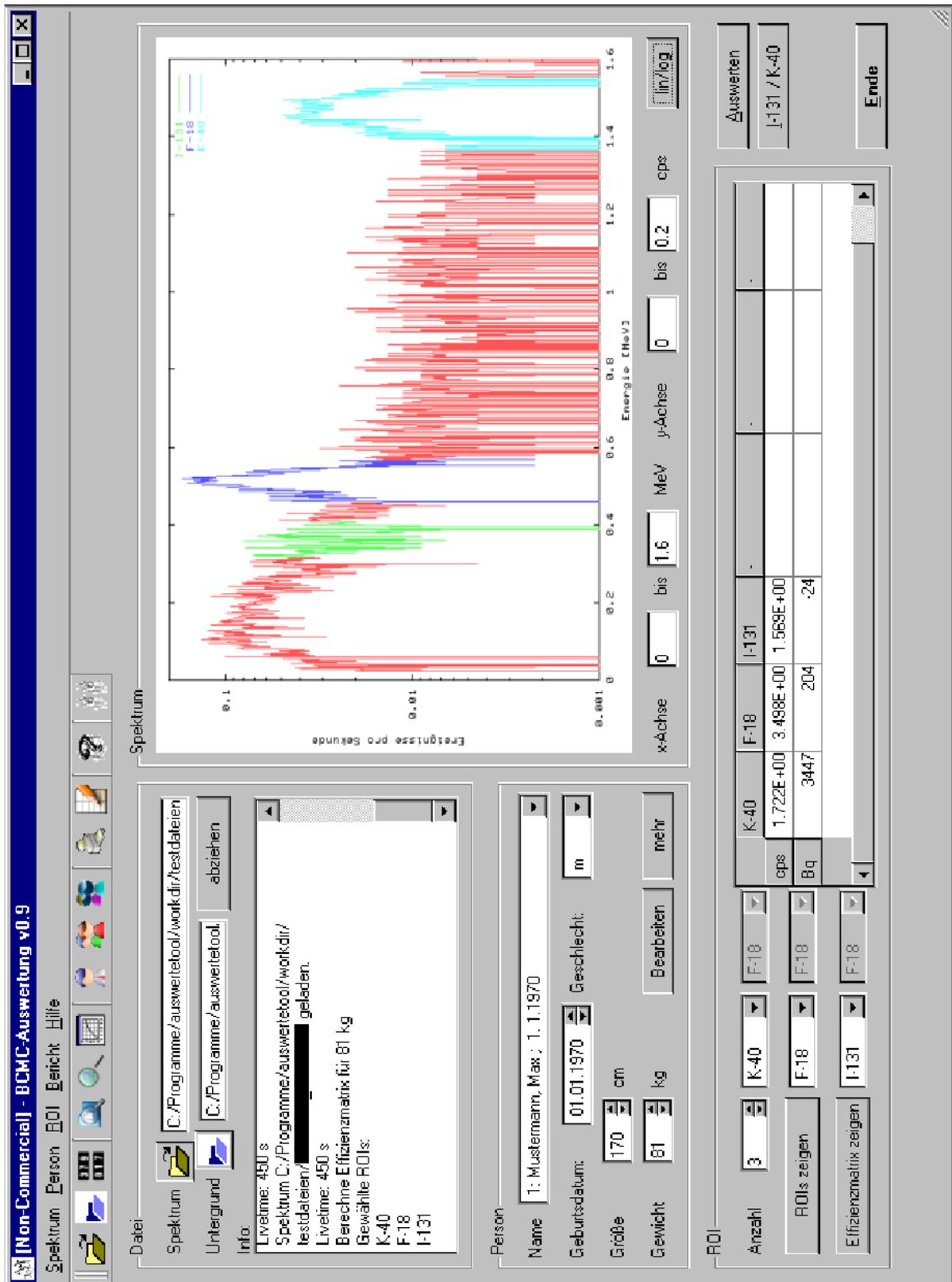


Abbildung 3.35: Zur Auswirkung der 511keV -Ereignisse auf die Auswertung einer Messung.

4 Diskussion und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Monte-Carlo basiertes System `BCMC-Soft` zur Kalibration und zur Auswertung von Messungen des Kölner Ganzkörperzählers entwickelt. Bislang stützte sich die Kalibration auf Messungen bekannter Aktivitäten in Flaschen- und Ziegelphantomen. Nur für Nuklide, die in einem der Phantome gemessen wurden, war eine Quantifizierung möglich. Es wurde gezeigt, dass es möglich ist, in Monte-Carlo-Simulationen die Spektrometrie im Kölner Ganzkörperzähler nachzuvollziehen. Zwei verfügbare Monte-Carlo-Systeme für den Strahlungstransport (EGSNrc [Kaw00] und MCNP [Bri00]) wurden zunächst auf ihre Handhabung und Eignung für die Simulation eines Ganzkörperzählers getestet. In den Ergebnissen dieser Testsimulationen sind nur geringfügige Unterschiede zwischen den Systemen feststellbar. Sie unterschieden sich für den Benutzer lediglich durch ihre Handhabung und die Rechengeschwindigkeit. Obwohl das EGSNrc-System einen nicht unerheblichen Programmieraufwand erfordert, wurde dieses für die weiteren Simulationen verwendet, da es dem Benutzer mehr und flexiblere Möglichkeiten bietet, Informationen aus den Simulationen zu ziehen. Im EGSNrc-System wurde ein Modell der Messkammer und der Detektoren programmiert, in das verschiedene Quellregionen implementiert werden können. Eine Art der Quellregionen sind die Flaschenphantome, die im usercode `Flaschenphantom` durch eine "teilkombinatorische Definition" implementiert wurden. Zusätzlich wurde in den usercodes eine Möglichkeit geschaffen Nuklidzerfälle zu simulieren. So kann in den usercodes direkt eine "Aktivität" (als Zahl der zu simulierenden Zerfälle) angegeben werden. Die Spektren, welche in den Simulationen erzeugt wurden, sind auf diese "Aktivität" normiert.

Die bestehende Kalibration in der Flaschenphantomgeometrie konnte durch die Simulationen nachvollzogen werden. Lediglich für das Nuklid ^{40}K werden die Bremsstrahlungsanteile unterschätzt. Hier kommt es zu Abweichungen für Energien unterhalb von 200keV . Auch für Nuklide, die bislang nicht in der Flaschenphantomgeometrie gemessen werden konnten (z.B. ^{137}Cs), wurden durch die Simulationen erstmals Kalibrierkurven gewonnen. Zur Berechnung dieser Kurven aus den Spektren wurde das Programm `effizienzberechner` geschrieben. Der Benutzer gibt die Spektren mit zugehörigen Massen und die ROI-Daten an. Mit dem Programm können auch Kalibrationskurven aus gemessenen Spektren berechnet werden. Der Benutzer muss dazu zusätzlich die verwendeten Aktivitäten angeben.

Die Energieabhängigkeit der Effizienz konnte durch die Simulationen erstmals untersucht und zur Kalibration des Ganzkörperzählers verwendet werden. Die Energieabhängigkeit der Effizienz lässt sich für Energien oberhalb von 200keV durch eine Potenzfunk-

tion beschreiben. Durch Simulationen mit fiktiven monoenergetischen Nukliden als Quellteilchen konnte ein Datensatz gewonnen werden, der eine Kalibration des Ganzkörperzählers für beliebige Nuklide ermöglicht. Die Nachweiswahrscheinlichkeit für das Nuklid wird dabei durch Kombination der Effizienzen für die beim Zerfall emittierten Photonenenergien berechnet. Die Effizienzen werden aus einer durch die Integration der Spektren des Spektrendatensatzes berechneten Energie-Effizienz-Kurve gewonnen. Für diese Berechnungen wurde ein Programm `kombitool` entwickelt, in welchem der Benutzer die Zerfalleigenschaften des Nuklids und die Ziel-ROI angibt. Das Programm berechnet aus dem Spektrendatensatz entweder einzelne Nachweiswahrscheinlichkeiten oder die ganze Kalibrierkurve. Der Spektrendatensatz wird derzeit durch Simulationen mit höheren Teilchenzahlen statistisch verbessert. Für andere Kalibrationsgeometrien sollten solche Datensätze ebenfalls gewonnen werden.

Eine Alternative zur Auswertung der Messungen mit der Matrixmethode ist die in der entwickelten Software implementierte Peakfit-Methode. Dazu wird durch ein iteratives Verfahren [Wes92] ein Untergrund unter den gemessenen Peak gelegt und an diesen eine Gaußkurve angepasst. Durch dieses Vorgehen werden die Streueignisse von den Vollenergieereignissen getrennt. Die in der Matrixmethode dazu verwendeten Matrixelemente werden zu Null. Die Matrix wird diagonalisiert. Problematisch ist in dieser Methode die Bestimmung des Peakuntergrundes, da die gemessenen Spektren aufgrund der niedrigen Zählraten und der kurzen Messdauer stark verrauscht sind.

Für die Auswertung der Inkorporationsmessungen mit dem Kölner Ganzkörperzähler wurde ein Programm `auswertetool` entwickelt. Es berechnet zunächst für die angegebenen Nuklide und die Masse der Person die Effizienzmatrix. Aus den Zählraten im gemessenen Spektrum und der Matrix werden dann die gesuchten Aktivitäten berechnet und ausgegeben. Ein HTML-Report über die Auswertung kann vom Programm erzeugt und angezeigt werden. Die Kalibrationsinformationen (ROI-Definitionen und Kalibrationskurven) werden aus Textdateien entnommen. Durch den Austausch dieser Textdateien kann die Effizienzkalibration jederzeit gewechselt werden. Mehrere solcher Kalibrierungen können nun parallel verwendet werden. Für die Verwaltung der Personendaten in der Auswertung wurde ebenfalls ein Textdateiformat definiert. Hier ist es erstrebenswert eine Schnittstelle zur bislang verwendeten Access-Datenbank zu schaffen. Die grundsätzlichen Vorbereitungen dazu sind bereits getroffen.

Das entwickelte System konnte durch die Auswertung der Ringversuche des BfS 2001 und 2003 getestet werden. Die mit den verschiedenen numerischen Verfahren ermittelten Effizienzen führen zu gut übereinstimmenden Aktivitätsangaben. Gegenüber der gemessenen Kalibration konnte sogar eine Verbesserung erreicht werden, die Aktivitäten für ^{60}Co werden nicht mehr um 30% unterschätzt. Die numerische Kalibration ermöglicht es nun, beliebige Nuklide¹ im Kölner Ganzkörperzähler zu quantifizieren. Durch die Kombinationsmethode kann die dazu notwendige Nachweiswahrscheinlichkeit sogar "in

¹Von diesen Nukliden müssen allerdings Photonen mit Energien größer 60keV emittiert werden.

time” aus dem vorhandenen Spektrendatensatz gewonnen werden.

Die in dieser Arbeit entwickelten Simulationscodes sind so angelegt, dass die Kalibrationsgeometrie leicht erweitert werden kann. Es können verschiedene Geometrien als Quellgeometrie implementiert werden. Eine Voxelstruktur für die Quellregion ist bereits vorgesehen und soll in Kürze vollständig implementiert werden. Durch den stetigen Anstieg der Rechnerleistung (Moorsches Gesetz) sollte es in absehbarer Zukunft möglich sein echte (evtl. aus MR-Daten der gemessenen Person gewonnen) Voxelphantome in den Codes zu verwenden (individuelle Kalibration).

Es können allerdings nicht nur Kalibrationen für die Inkorporationsmessungen erstellt werden. Für beliebige Messungen im Ganzkörperzähler können Kalibrationen gewonnen werden. In Zusammenarbeit mit der Abteilung Nuklearchemie am Institut für Biochemie der Universität zu Köln soll in Kürze die Aktivität eines Meteoritenbruchstückes bestimmt werden. Auch die Abluftfilter der Station (Größe ca. $100\text{cm} \cdot 100\text{cm} \cdot 20\text{cm}$) können im Ganzkörperzähler nach ihrem Abklingen zur Freigabe gemessen werden. Die darin enthaltene Restaktivität kann nun quantifiziert werden. Für alle diese Objekte lassen sich mit dem `BCMC-Soft` System Effizienzen errechnen, indem lediglich die Geometrie in den Simulationen angepasst wird.

Mit der Monte-Carlo Simulation können für den Ganzkörperzähler Einsatzgebiete erschlossen werden, die über Personenmessungen weit hinausgehen. Der Ganzkörperzähler wird damit zu einer Art universellen "low-level"-Aktivimeter mit höchster Nachweisempfindlichkeit.

Literaturverzeichnis

- [And91] Andreo P, *Monte Carlo techniques in medical radiation physics*, Phys.Med.Biol. **36**(1991) 861-920.
- [Bie94a] Bielajew AF, *Lecture Notes: Photon Monte Carlo Simulation*, National Research Council of Canada Report NRCC-PIRS-0393, Ottawa newblock (1994).
- [Bie94b] Bielajew AF, Rogers DWO, *Lecture Notes: Electron Monte Carlo Simulation*, National Research Council of Canada Report NRCC-PIRS-0394, Ottawa (1994).
- [Bie94c] Bielajew AF, Rogers DWO, *Lecture Notes: Variance Reduction Techniques*, National Research Council of Canada Report NRCC-PIRS-0396, newblock Ottawa newblock (1994).
- [Bie94d] Bielajew AF, Hirayama H, Nelson WR, Rogers DWO, *History, overview and recent improvements of EGS4*, National Research Council of Canada Report NRCC-PIRS-0436, Ottawa (1994).
- [Bie95] Bielajew AF, *HOWFAR and HOWNEAR: Geometry Modelling for Monte Carlo Particle Transport*, National Research Council of Canada Report NRCC-PIRS-0341, Ottawa (1995).
- [Bie00] Bielajew AF, *Fundamentals of the Monte Carlo method for neutral and charged particle transport*, Preprint, Michigan (2000).
- [Bla04] Blanchette J, Summerfield M, *C++ GUI Programming with Qt 3*, Prentice Hall, New Jersey, (2004).
- [Blo98] Blobel V, Lohrmann E, *Statistische und numerische Methoden der Datenanalyse*, Teubner, Stuttgart (1998).
- [Blo00] Blöte HWJ, HeringeaJR, Tsypin MM, *Three-dimensional Ising model in the fixed-magnetization ensemble: a Monte Carlo study*, Physical Review E, **62**(2000) 77.
- [Bre02] Breustedt B, *Kalibration eines Ganzkörperzählers mit Monte-Carlo-Methoden*, Diplomarbeit im Institut für Kernphysik der Universität zu Köln, Köln (2002).

- [Bri00] Briesmeister, JF (Editor), *MCNP - A General Monte Carlo Code N-Particle Transport Code*, Los Alamos National Laboratory Report LA-13709-M, Los Alamos, New Mexico (2000).
- [Bru00] Brücher W, Gawron C, Kaufmann S, et. al. *Simulation von Transportsystemen auf der Basis von Einzelpersonen und Einzelfahrzeugen*, Internationales Verkehrswesen Nr 1&2, (2000).
- [Bun94] Bundesministerium der Justiz (Hrsg.), *Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle zur Ermittlung der Körperdosen (§§62, 63, 63a StrlSchV; §§35, 35a RöV)*. GMBI 1994, Nr. 7, S. 286-307
- [Bun96] Bundesministerium der Justiz (Hrsg.), *Richtlinie über Anforderungen an Inkorporationsmeßstellen*, GMBI 1996 Nr. 46 v. 18.12.1996, S. 991-1006
- [Bun97] Bundesministerium der Justiz (Hrsg.), *Richtlinie für die Ermittlung der Körperdosen bei innerer Strahlenexposition gemäß den §§63, 63a StrlSchV (Berechnungsgrundlage)*, Bundesanzeiger 1997 Nr. 122a v. 5.7.1997
- [Bun02a] Bundesministerium der Justiz (Hrsg.), *Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S.1714), geändert aufgrund Artikel 2 der Verordnung vom 18. Juni 2002* Bundesgesetzblatt Teil I, Bonn(2002), S.1869
- [Bun02b] Bundesministerium der Justiz (Hrsg.), *Richtlinie Strahlenschutz in der Medizin 2002. Richtlinie nach der Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlung (Strahlenschutzverordnung -StrlSchV)*, Bundesanzeiger Nr. 207a v. 7.11.2002
- [Car02] Carter LL, Schwarz RA, *MCNP Visual Editor Computer Code Manual*, Los Alamos, (2002).
- [Chi02] Chibani O, Allen LX, *Monte Carlo dose calculations in homogeneous media and at interfaces: A comparison between GEPTS, EGSNrc, MCNP, and measurements*, Med Phys, **29** (2002) 835-847.
- [Cob98] Cobelli C, Foster DM, *Compartmental models: Theory and Practice using the SAAM II software system* Advances in Experimental Medicine and Biology, **445**(1998) 79-101.
- [Cob00] Cobelli C, Foster D, Toffolo G, *Tracer Kinetics in Biomedical Research - From Data to Model*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York (2000).
- [DIN92] Normenausschuss Kerntechnik im DIN, *Nachweisgrenze und Erkennungsgrenze bei Kernstrahlungsmessungen*, DIN 25 482 Teil 2, Berlin (1992).

- [Doe04] Doerfel HR, *77 Jahre In-vivo-Messung inkorporierter Radionuklide - wo stehen wir heute und wo wollen wir hin?*, Strahlenschutz Praxis, **04** (2004) 15-19.
- [Esc00] Eschner W, Vogg R, Bräunlich I et al., *Incorporation Risks for Workers in PET Centers*, Radiation Protection Dosimetry, **89**(2000) 211-13.
- [EUR94] Andradi A, Henrichs K, Bogner L et. al, *Guidance Notes on the Calibration of Whole-Body Counters and on the Interpretation of the measured Results*, European Commission Report EUR 15395 EN (1994).
- [Eva55] Evans RD, *The Atomic Nucleus*, McGraw-Hill, New York (1955).
- [Fos94] *SAAMII: Simulation, Analysis and Modelling System*, BMES Bull, **18**(1994) 19-21.
- [Fue86] Fueger GF, Schreiner W, *Dosimetrie offener Radionuklide - Prinzipien zur Ermittlung der Strahlenbelastung nach Inkorporation offener Radionuklide*, Informatica Ges., Wien (1986).
- [Gen03] Genicot JL, Geboers I, Damen A et. al, *The reduction of limits of detection in vivo counting of low-energy photon emitters by optimizing the shape and size of detectors*, Radiation Protection Dosimetry , **105**(2003) 457-462.
- [HAR98] Schotanus P, Stam G, Gerritse E *Harshaw/QS Scintillation Detectors*, Katalog, Baldham (1998).
- [Hea64] Heath RL *Scintillation Spectrometry: Gamma-Ray Spectrum Catalogue Vol.2* US Atomic Energy Commission Report IDO-16880-2, Washington DC (1997).
- [Hea67] Heath RL, Helmer RG, Schmittroth LA, Cazier CA, *A Method for Generating Single Gamma-Ray Shapes for the Analysis of Spectra*, Nucl. Inst. Meth. **47**(1967) 281.
- [Hee86] Heermann DW, *Computer simulation methods in theoretical physics*, Springer, Berlin (1986).
- [Hel98] Hellekalek P, *Good Random Number Generators are (not so) easy to find*, Math. Comp. Simul. **46**(1998) 485-505.
- [Hel03] Helbig D, Nagel K, *Verkehrsdynamik und urbane Systeme*, Physik Journal **2**(2003) 5:35-41.
- [Hun00] Hunt JG, Malatova I, Foltanova S, Dantas BM, *Calibration of In-Vivo Measurement Systems Using a Voxel Phantom with the Monte Carlo Technique*, Radiat. Prot. Dosim. **89**(2000) 283-286.
- [Hic97] Hickman DP, Firpo M, *Magnetic Resonance Image Phantom Program*, Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-MA-118455, Berkeley (1997).

- [HPS96] Health Physics Society *An American National Standard - Performance Criteria for Radiobioassay*, Health Physics Society, Report HPS N13.30-1996, Approved May 1996 American National Standards Institute Inc. McLean, VA (1996).
- [IAEA64] International Atomic Energy Agency (IAEA), *IAEA Directory of whole body radioactivity monitors (Low Activity Levels)*, International Atomic Energy Agency, Vienna (1964).
- [IAEA70] International Atomic Energy Agency (IAEA), *IAEA Directory of whole body radioactivity monitors (Low Activity Levels)*, International Atomic Energy Agency, Vienna (1970).
- [IAEA96] International Atomic Energy Agency (IAEA), *Direct Methods for Measuring Radionuclides in the Human Body, Safety Series No. 114*, International Atomic Energy Agency, Vienna (1996).
- [ICRU92] International Commission on Radiation Units and Measurements *Phantoms and Computational Models in Therapy, Diagnosis and Protection*, ICRU-Report 48, Bethesda, MD (1992).
- [ICRU03] International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), *ICRU Report 69, Direct Determination of the Body Content of Radionuclides* Nuclear Technology Publishing, Kent (2003).
- [INK97] Frasch G, et.al. *INKFORM 1.3 Formatanforderungen für die Übermittlung von Inkorporationsfeststellungen auf Datenträgern*, Bundesamt für Strahlenschutz - Strahlenschutzregister-, Oberschleißheim (1997).
- [Ish96] Ishikawa T, Matsumoto M, Uchiyama M, *A Calibration Method for Whole-Body Counters, using Monte Carlo Simulation*, Radiat. Prot. Dosim. **64**(1996) 283-288.
- [Ish97a] Ishikawa T, Uchiyama M, *Calculation of the Counting Efficiency for ^{137}Cs Using Voxel Phantoms with Lungs and Skeleton*, Radiat. Prot. Dosim. **69**(1997) 199-204.
- [Ish97b] Ishikawa T, Uchiyama M, *Estimation of the Counting Efficiencies for Individual Subjects in ^{137}Cs Whole-Body Counting, using Voxel Phantoms*, Radiat. Prot. Dosim. **71**(1997) 195-200.
- [Jae02] Jäckel P, *Monte Carlo methods in finance*, Wiley, Chichester (2002).
- [Jam94] James F, *RANLUX: a Fortran Implementation of the high-quality pseudo-random number generator of Lüscher*, Comp. Phys. Comm., **79**(1994) 111.
- [Jen88] Jenkins TM, Nelson WR, Rindi A (Hrsg.), *Monte Carlo Transport of Electrons and Photons below 50MeV*, Plenum Press, New York (1988).

- [Kaw00] Kawrakow I, Rogers DWO, *The EGSnrc Code System: Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport*, National Research Council of Canada Report NRCC-PIRS-0701, Ottawa (2000) .
- [Kin00a] Kinase S, Yoshizawa M, Kuwabara J, Noguchi H, *Application of EGS4 Code to Whole-body Counting*, In: "Proceedings of the Second International Workshop on EGS", KEK-Proceedings 2000-20, 23-30 (2000).
- [Kin00b] Kinase S, Yoshizawa M, Noguchi H, *Evaluation of Counting Efficiency of a Whole Body Counter using the EGS4 Code*, J Nucl Sci Technol, **37**(2000) 1103-1107.
- [Kli01] Kling A, Barão F, Nakagawa M, et.al. (eds.) *Advanced Monte Carlo for Radiation Physics, Particle Transport Simulation and Applications - Proceedings of the Monte Carlo 2005 Conference, Lisbon 23-26 October 2000*, Springer, Berlin (2001).
- [Koe97] König K, Meier S, Brose J, *Ringversuch im Jahr 1997 an Ganz- und Teilkörpermessanlagen in Deutschland*, In: Radioaktivität in Mensch und Umwelt: 30. Jahrestagung des Fachverbandes Strahlenschutz - Lindau, Publikationsreihe Fortschritte im Strahlenschutz, Fachverband für Strahlenschutz e.V. (IRPA), TÜV-Verlag GmbH, Köln (1998), 322-227.
- [Koe04] König K, Buchholz W, et.al. *Ergebnisse der Ringversuche der Leitstelle Inkorporationsüberwachung des BfS*, Strahlenschutz Praxis, **10** (2004) 22-24.
- [Kov00] Kovtun AN, Firсанov VB, Forminykh VI, Isaakyan GA *Metrological Parameters of the unified calibration whole-body phantom with gamma-emitting radionuclides*, Rad Prot Dosim **89** (2000) 239-242.
- [Kra02] Kramer GH, Burns LC, Guerriere S, *Monte Carlo Simulation of a Scanning Detector Whole Body Counter and the Effect of Bomab Phantom Size on the Calibration*, Health Phys **83** (2002) 526-533.
- [Lan00] Landau DP, Binder K, *A guide to Monte Carlo simulations in statistical physics*, Cambridge University Press, Cambridge (2000).
- [Lju98] Ljungberg M, Strand SE, King MA (eds.), *Monte Carlo Calculations in Nuclear Medicine - Applications in Diagnostic Imaging*, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia (1998).
- [Loe88] Loevinger R, Budinger TF, Watson EE, *MIRD primer for absorbed dose calculations*, Society of Nuclear Medicine, New York (1988).
- [Mal95] Mallet MW, Hickman DP, Kruchten DA, Poston JWsr, *Development of a Method for Calibrating In-Vivo Measurement Systems Using Magnetic Resonance Imaging and Monte Carlo Computations*, Health Phys. **68**(1995) 773-785.

- [Mic98] Michel R, Kirchhoff K, *Zur Ermittlung von Nachweis-, Erkennungs-, und Vertrauensgrenzen bei Kernstrahlungsmessungen*, Unterlagen zum Weiterbildungsseminar "Berechnungsbeispiele für Nachweisgrenzen nach DIN", Lindau (1998).
- [Mor88] Morin RL, *Monte Carlo Simulation in the Radiological Sciences*, CRC Press, Boca Raton (1988).
- [Nag03] Nagel K, Wagner P, Woesler R, *Still flowing: old and new approaches for traffic flow modeling*, Operations Research, **51**(2003) 681-710.
- [NEA03] National Energy Agency, *Intercomparison on the usage of computational codes in radiation dosimetry*, Proceedings of a workshop held in Bologna, July 14-16 (2003).
- [Obe80] Oberhausen E, Berberich R, *Funktionsmeßplätze - Ganzkörperzähler*, In: "Handbuch der Medizinischen Radiologie, Bd. 15: Nuklearmedizin", L.Diethelm et. al (Hrsg.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (1980).
- [Pou81] Poulheim KF, *Radioaktivität im Menschen und ihre Bestimmung durch physikalische Analyseverfahren*, VEB Gustav Fischer Verlag, Jena (1981).
- [Pre02] Press WH, Teukolsky SA, Vetterling WT, Flannery BP, *Numerical Recipes in C++ - The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, Cambridge (2002)².
- [Rah00] Rahola T, Falk R. *Whole-Body measurement and quality assurance*, Rad Prot Dosim **89** (2000) 243-245.
- [Rog95] Rogers DWO, Faddegon BA, Ding GX, et al. *BEAM: A Monte Carlo code to simulate radiotherapy treatment units*, Verlag, Ort Med Phys, **22**(1995) 503-524.
- [Rog00] Rogers DWO, Kawrakow I, Seuntjens SP, Walters BRB, *NRC User Codes for EGSnrc (incomplete Draft)*, National Research Council of Canada Report NRCC-PIRS-0702, Ottawa (2000).
- [RTC97] Kovtun AN, *Technical Documents for Human Whole Body Phantom with Reference Samples of Radionuclides Potassium-40, Cobalt-60, Barium-133, Caesium-137 and Europium-152, Set UPh-02T*, Research and Technical Centre "Protection", Saint-Petersburg (1997).
- [SAAM2] SAAM Institute, Inc., *SAAM II Software System*, Internetauftritt: <http://www.saam.com>, (November 2004).
- [Sac99] Sachs L, *Angewandte Statistik - Anwendung statistischer Methoden*, Springer, Berlin (1999).

- [Sie02] Siebert B, *QUADOS: Quality Assurance of Computational Tools for Dosimetry - Intercomparison on the usage of computational codes in radiation dosimetry*, Europäische Kommission FIGD-CT-2000-20062, Paris (2002).
- [Spi62] Spiers FW, *Whole-Body Counting: An Introductory Review*, In: Whole-Body Counting, Proceedings of the Symposium on whole-body counting held by the IAEA Vienna 12.-16.6. 1961, Wien (1962).
- [Sta99] Stauffer D, *Monte Carlo Simulation mikroskopischer Börsenmodelle*, Physikalische Blätter **55**(1999) 49-51.
- [TOI01] Lederer CM, Shirley VS, et al., *WWW-Table of Isotopes* Im Internet unter: <http://nucleardata.nuclear.lund.se>, (November2004).
- [Too00] Toohey R, Palmer E, Anderson L et al., *Current Status of Whole-Body Counting as a means to detect and quantify previous exposures to radioactive materials*, Health Phys. **60**(1991) Supp.1, 7-42.
- [Tre99] Treurniet JA, Rogers DWO, *EGS_WINDOWS 4.0, User's manual*, National Research Council of Canada Report NRCC-PIRS-0699. Ottawa, (1999).
- [Ven01] Venturini L, Campos VP, Berti EAR, *An Approach for the Efficiency Calibration of Whole Body Counters*, Health Phys, **81**(2001) 580-584.
- [Wes81] Westmeier W, *Background Subtraction in Ge(Li) Gamma-Ray Spectra*, Nucl Instr. Meth., **A 180**(1981) 205-210.
- [Wes92] Westmeier W, *Techniques and Problems of Low-Level Gamma-Ray Spectrometry*, Appl Radiat Isot, **43**(1992) 305-322.
- [Wis94] Wise KN, *An EGS4 Based Mathematical Phantom for Radiation Protection Calculations Using Standard Man*, Health Phys. **67**(1994) 548-553.
- [Xu00] Xu XG, Chao TG, Bozkurt A, *VIP-MAN: An image-based whole-body adult Male Model constructed from Color Photographs of the Visible Human Project for Multi-Particle Monte Carlo Calculations*, Health Phys. **78**(2000) 476-486.
- [Zai04] Zaidi H, Sgourous G (Hrsg.), *Therapeutic Applications of Monte Carlo Calculations in Nuclear Medicine*, Institute of Physics Publishing, Bristol (2004).

Anhang

A Anleitungen zu den Programmen des BCMC-Soft-Systems

A.1 Allgemeines und Systemvoraussetzungen

A.1.1 Installation

Alle hier beschriebenen Programme sind sowohl unter Linux als auch unter MS-Windows Betriebssystemen (NT 4.0 / 2000 / XP) verwendbar. Die Programme basieren auf der (in Kapitel 3.3.1 beschriebenen) C++-Klasse **Spektrum**. Die zu verarbeitenden Spektren werden in einem vom Benutzer frei wählbaren Verzeichnis (workdir) zwischengespeichert. Zur Darstellung der Spektren und Kurven wird das Programm "Gnuplot" verwendet, welches unter der GPL (GNU Public License) verfügbar ist, verwendet. Dieses erzeugt im workdir für jede Darstellung eine Grafikdatei im PNG (Portable Network Graphics) Format, welche von den Programmen eingelesen und dargestellt wird. Die Programme lesen die Informationen über das zu verwendende workdir, den Programmaufruf für Gnuplot und ggf. weitere Angaben aus einer bei ihrem Aufruf anzugebenden Initialisierungsdatei. Die Initialisierungsdatei ist eine Textdatei, in der, zeilenweise durch '#' getrennt, Name und Wert der betreffenden Information eingetragen sind. (z.B.: #workdir# C:/MonteCarlo/Arbeitsverzeichnis/#).

Zum Erzeugen der Programme werden benötigt:

- ein C++-Compiler (getestet wurden: g++ (v3.3 Linux) und Borland bcc32 (MS-Windows)),
- die Programmbibliothek Qt (ab Version 3.2.3) [Bla04],
- GNU Make.

Auf dem Klinikserver befindet sich ein Verzeichnis "Bodycounter/Software/Installation", in dem sich für die Microsoftsysteme vorkompilierte, ausführbare Programme befinden. Anleitungen und Beschreibungen zu den Programmen befinden sich im Verzeichnis "Bodycounter/Software/Installation/Doc".

A.1.2 Dateiformate

Für die Verwaltung der Kalibrierdaten wurde ein "Datenbankformat" durch Textdateien definiert. Die zu erwartende Datenmenge pro Kalibrationsdatensatz ist so gering, dass sie auch in Textdateien vernünftig verwaltbar bleibt. Die Verwendung einer Datenbanksoftware, die evtl. einen schnelleren Zugriff auf die Daten ermöglichen würde, scheint

nicht angebracht, zumal dieses eine weitere zusätzliche Softwarevoraussetzung schaffen würde. In allen Dateien können Kommentarzeilen eingefügt werden. Diese werden durch ein '#' eingeleitet.

ROI-Datenbank

Die Informationen über die ROIs und die zugehörigen Kalibrierfunktionen werden in zwei Dateien gleichen Namens gespeichert. Am Anfang der Datei mit der Endung ".roi" werden der Funktionstyp und die Integrationsmethode (vgl Kapitel 3.3.2) festgelegt. Dieses geschieht durch eine ganze Zahl Nr und erfolgt in zwei Zeilen der Form:

:Funktionstyp:Nr:

:Integrationstyp:Nr:

Die gültigen Werte für den Funktionstyp liegen zwischen 0 und 5, für die Integrationsmethode zwischen 0 und 2.

Typ	Funktion
0	$f(x) = a$
1	$f(x) = a + b \cdot \text{Masse}$
2	$f(x) = a + b \cdot \text{Masse} + \frac{c}{\text{Masse}}$
3	$f(x) = a + b \cdot \text{Masse} + c \cdot \text{Masse}^2$
4	$f(x) = \text{noch nicht definiert}$
5	$f(x) = \text{noch nicht definiert}$
6	$f(x) = \text{noch nicht definiert}$

Tabelle A.1: Zuordnung der Funktionstypen für die Kalibrierfunktionen.

Typ	Integrationsmethode
0	Auszählen der Bruttoereignisse in der ROI
1	Bestimmung eines Peakuntergrundes und Auszählen der Nettoereignisse in der ROI
2	Bestimmung eines Peakuntergrundes und Anpassung einer Gaußkurve. (Die analytisch berechnete Fläche der Gaußfunktion wird verwendet.)

Tabelle A.2: Zuordnung der Integrationsmethoden.

In den folgenden Zeilen wird jeweils durch Doppelpunkte getrennt ein Index, der Name der ROI, die untere und die obere Grenzenergie, sowie die Energie der beobachteten Gammalinie (jeweils in MeV, **Achtung:** als Dezimaltrennzeichen zwingend einen Punkt verwenden) eingetragen. Für jede ROI wird dabei eine mit einem Doppelpunkt eingeleitete eigene Zeile verwendet.

Die Parameter a, b und c der Kalibrierfunktionen werden in einer Datei mit der Endung ".rois.eff" gespeichert. Hier werden in einer Zeile der Name des generierenden Nuklids, der Name der ROI, und die drei Parameter ebenfalls durch Doppelpunkte getrennt

eingetragen. Die Parameter können in einem beliebigen Fließkommaformat eingetragen werden (auch hier ist ein Punkt als Dezimaltrennzeichen zwingend vorgeschrieben). Die Namen der ROI und der Nuklide müssen exakt den Namen in der ".roi"-Datei entsprechen, ansonsten kann die Datenzeile nicht zugeordnet werden. Sind mehrere Datensätze zu einer Nuklid-ROI-Kombination vorhanden, wird von den Programmen der letzte aus der Datei gelesene verwendet. Auch hier beginnen die Zeilen mit einem durch Doppelpunkt abgetrennten Index. Das Programm **Effizienzberechner** trägt als Index die Indexnummer der ROI ein. Zur Sicherheit werden am Anfang der Datei die Angaben für Funktionstyp und Integrationsmethode wiederholt.

Als Beispiel für eine ROI-Datenbank ist hier eine einfache Kalibration mit zwei Nukliden gezeigt.

```
# Beispieldatei für eine einfache Bodycounterkalibration
# hier die Nuklide K-40 und I-131
# die Kalibrierfunktionen besitzen den Typ 2: f(m)=a+b/m+c*m
# Das Zeilenformat für die Nuklide lautet:
# Index:Nuklidname:Untere Grenzenergie:Obere Grenzenergie:Peakzentrum
:Funktionstyp:2:
:Integrationsmethode:0:
1:K-40:1.36644:1.55497:1.46081
2:I-131:0.31619:0.41085:0.36448
```

Abbildung A.1: Die Datei "Beispiel.rois".

```
# Parameter der Kalibrierfunktionen des Bodycounters
# Zeilenformat:
# Index:Nuklid:ROI:a:b:c
:Funktionstyp:2:
:Integrationsmethode:0:
1:K-40:K-40:0.000746684:0.00105964:-2.90394e-06
1:K-40:I-131:0.00021384:-0.000210515:-3.96438e-07
2:I-131:K-40:0e0:0e0:0e0
2:I-131:I-131:0.01096926:0.00822807:-3.75515e-05
```

Abbildung A.2: Die Datei "Beispiel.rois.eff".

Personendatenbank

Die Personendaten für das Auswertetool werden ebenfalls in einer Textdatei verwaltet. In einer Zeile dieser "Datenbank"-Datei werden durch Doppelpunkte getrennt, die in der folgenden Tabelle angegebenen Werte (in dieser Reihenfolge) eingetragen.

Wert	Typ
Index	Zahl (Integer)
Nachname	Text
Vorname	Text
Geschlecht	Buchstabe: m,w oder n
Geb.-Datum	dd.mm.yyyy
Masse (in kg)	Zahl (Integer)
Größe (in cm)	Zahl (Integer)
Anrede	Text: Herr, Frau, Dr.
Straße	Text
PLZ	Zahl (fünfstellig)
Ort	Text
Geburtsort	Text

Tabelle A.3: Angaben in der Personendatenbank.

Als Beispiel ist hier ein Auszug aus einer solchen "Personendatenbank" gezeigt:

```
# 1:Name:Vorname:mwn:GebDatum:Gewicht:Groesse:Anrede:Strasse:PLZ:Ort:Geburtsort
1:Mustermann:Max:m: 1. 1.1970:70:170:Herr:Musterweg 1:12345:Musterstadt:Musterdorf
2:Musterfrau:Erika:w:01.04.1990:55:160:Frau:Musterweg 1:12345:Musterstadt:Beispieldorf
4:Flaschenphantom:70kg:n: 1. 1.1970:70:170:Herr:Joseph-Stelzmann-Str.9:50924:Köln:Bonn
17:Ziegelphantom:Olga:w:01.07.1995:70:170:Frau:BfS-Weg 1:8000:Neuherberg:St. Petersburg
```

Abbildung A.3: Auszug aus einer Personendatenbank.

An dieser Stelle scheint es sinnvoll, in Zukunft eine echte Datenbanklösung zu implementieren. Dieses könnte zum Beispiel die im bisherigen System verwendete Access-Datenbank (`bcsoft.mdb`) sein. Das Auswertetool wäre in dieser Form aber nur unter MS-Windows benutzbar. Die Zugriffe des Auswertetools auf die Werte der "Personendatenbank" sind bereits als eigene Funktionen implementiert. Für eine Umstellung auf ein anderes Datenbanksystem müssten lediglich diese Funktionen geändert werden. Zusätzlich müsste beim Programmstart eine Verbindung zur Datenbank hergestellt und beim Programmende getrennt werden. Die beiden Routinen "`connect_to_persdb(name)`" und "`disconnect_from_persdb()`", welche in der aktuellen Version die Textdateien öffnen und einlesen, sind bereits für diesen Fall vorgesehen. Eine detaillierte Beschreibung der notwendigen Änderungen befindet sich in der Dokumentation auf dem Klinikserver.

A.1.3 Gemeinsame Dialoge

Zur Bearbeitung der Datenbanken und zur Anzeige von Bildern werden von den Programmen die gleichen Dialoge verwendet. Diese werden hier beschrieben. Soweit nicht anders angegeben, sind alle von den Programmen zusätzlich geöffneten Fenster modale

Dialoge, d.h. sie müssen erst geschlossen werden, bevor das Basisfenster wieder bedient werden kann.

Dialog: "Bildanzeige"

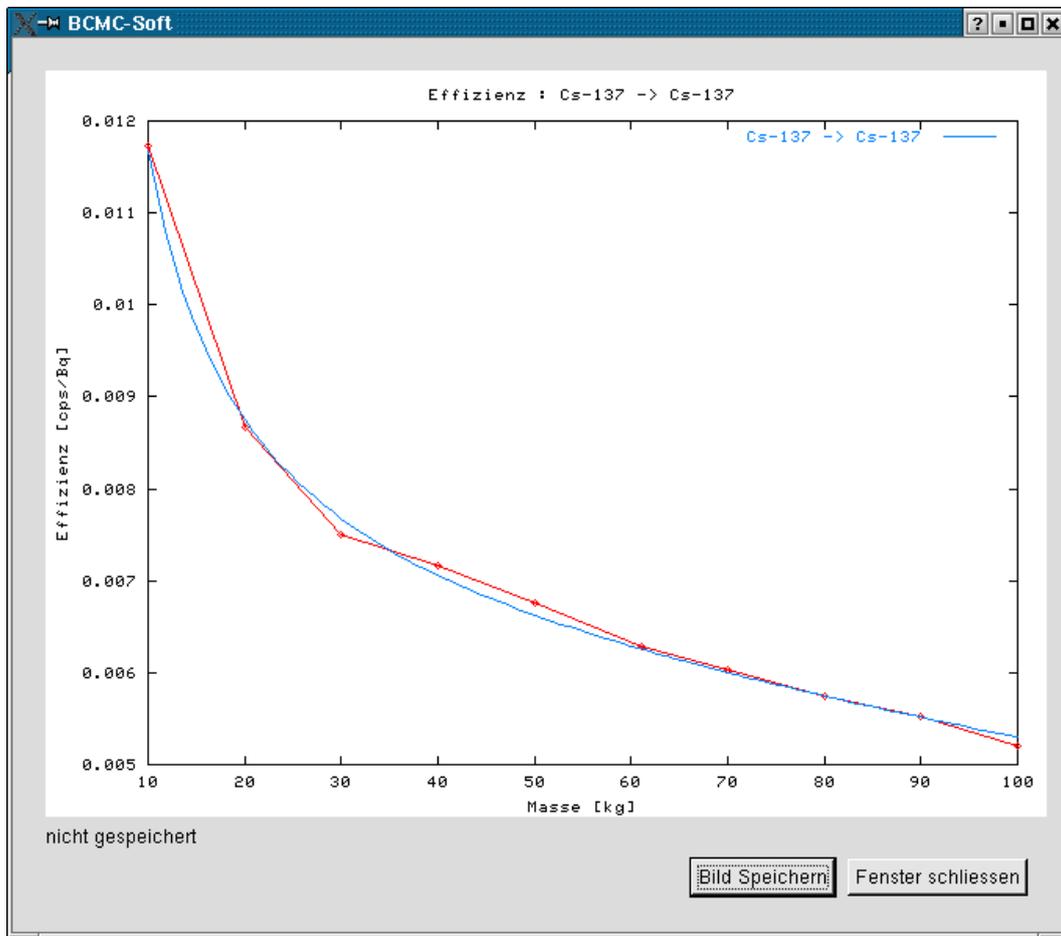


Abbildung A.4: Der Dialog "Bildanzeige".

Dieser Dialog wird immer verwendet, wenn eine Grafik anzuzeigen ist. Es wird ein neues Fenster, in dem die Bilddatei angezeigt wird, geöffnet. Diese kann dort im PNG-Format gespeichert werden. Mit dem Knopf "Bild speichern" wird dazu ein Dateiauswahldialog eingeblendet. Der Dateiname wird anschließend unter dem Bild angezeigt. Mit dem Knopf "Fenster schließen" wird der Dialog beendet.

Dialog: "ROI-Übersicht"

Dieses Fenster zeigt eine Tabelle mit den Werten der, in der ROI-Datenbank definierten ROIs an.

	Nuklid	Peakzentrum	Untergrenze	Obergrenze
1	F-18	0.511	0.45449	0.56751
2	Tc-99m	0.14051	0.11163	0.17059
3	Tl-201	0.07244	0.04911	0.10403
4	K-40	1.46081	1.36644	1.55497
5	I-131	0.36448	0.31619	0.41085
6	Co-57	0.12366	0.09644	0.16487
7	Co-58	0.81076	0.74005	0.88135
8	I-123	0.15899	0.12871	0.18966
9	I-125	0.2806	0.019	0.042
10	Cs-137	0.66166	0.598083	0.724213

Abbildung A.5: Der Dialog "ROI-Übersicht".

Dialog: "ROI-Datenbank bearbeiten"

Dieser Dialog bietet die Möglichkeit, die Einträge einer ROI-Datenbank anzusehen und zu bearbeiten. In der Tabelle werden die Funktionsparameter a , b und c für die definierten Nuklid-ROI-Kombinationen angezeigt. Durch Klicken in die Zelle kann der Wert der Zelle geändert werden. Die Parameter können in einem beliebigen Fließkommaformat angegeben werden. Die Werte für Nuklid und ROI müssen exakt mit den Namen der ROIs übereinstimmen. Existieren mehrere Zeilen mit der selben Nuklid-ROI-Kombination, wird die jeweils letzte verwendet. Der Funktionstyp wird unter der Tabelle angezeigt. Mit der Auswahlbox "Funktion" kann ein anderer Funktionstyp gewählt werden. Die Funktionsgleichung wird daneben angezeigt. Es stehen die o.g. sechs Funktionstypen in der Auswahlbox zur Verfügung. (**Achtung:** Die in der Datentabelle angegebenen Parameterwerte gelten dann aber noch für den ursprünglichen Funktionstyp!!) Ein Rechtsklick in der Tabelle zeigt die Kurve, die sich aus den Parametern in dieser Zeile ergibt in einem neuen Fenster. Durch den Knopf "neue Wertezeile" wird am Ende der Tabelle eine neue Zeile angehängt, in die dann die Nuklid-ROI-Kombination und die neuen Funktionsparameter eingetragen werden können.

Mit der Auswahlbox "ROI-Name" können die definierten ROIs ausgewählt und/oder umbenannt werden. (**Achtung:** Die Namen in der Tabelle bleiben davon unberührt.) Die Energiegrenzen bzw. das Zentrum der ROIs werden in der Zeile darunter angezeigt bzw. geändert. Die Werte werden mit einer Stelle vor und fünf Stellen nach dem

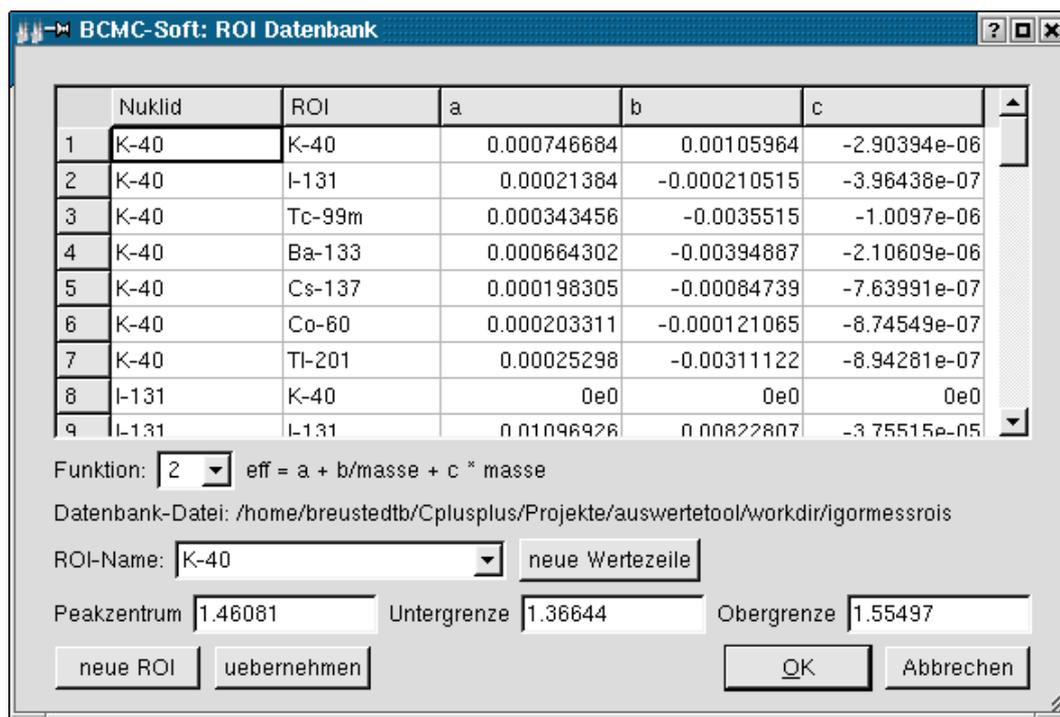
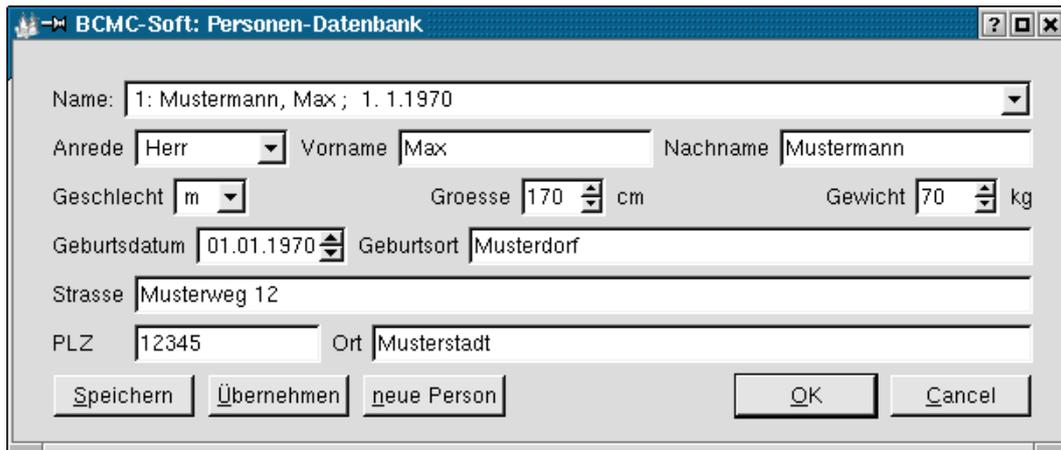


Abbildung A.6: Der Dialog "ROI-Datenbank bearbeiten".

Dezimaltrennzeichen angegeben (z.B.: "1.12345"). (**Achtung:** Hier muss zwingend ein Punkt, kein Komma, verwendet werden !!) Eine neue ROI kann durch Klick auf den Knopf "neue ROI" hinzugefügt werden. Vor dem Speichern müssen die Änderungen mit dem Knopf "übernehmen" akzeptiert werden. Gespeichert werden die Änderungen beim Verlassen des Dialogs mit "OK". (Es wird nach dem Dateinamen gefragt. Bestätigt man diesen Dialog, wird die Datenbank überschrieben, durch Angabe eines neuen Namens wird eine neue Datenbank erzeugt.) Um die Änderungen im Hauptprogramm verwenden zu können, muss die Datenbank dort neu geladen werden.

Dialog: "Personendatenbank bearbeiten"

Dieser Dialog bietet die Möglichkeit eine Personendatenbank zu bearbeiten. Mit der Auswahlbox "Name" kann eine Person ausgewählt werden. Die Inhalte der Box werden beim Aufruf aus der vorhandenen Datenbank automatisch generiert und können nicht verändert werden. Die Daten der Person können in den jeweiligen Feldern bearbeitet werden. Änderungen der Daten einer Person müssen vor dem Wechsel der Person oder dem Verlassen des Dialogs mit dem Knopf "Übernehmen" akzeptiert werden. Eine neue Person kann mit dem Knopf "neue Person" angelegt werden. Diese erhält zunächst die Einträge von "Max Mustermann" und als Index die Anzahl der vorhandenen Datensätze. Durch den Knopf "Speichern" wird die gesamte Datenbank gespeichert. Der Dateiname kann in einem Auswahldialog angegeben werden.



BCMC-Soft: Personen-Datenbank

Name: 1: Mustermann, Max; 1. 1.1970

Anrede Herr Vorname Max Nachname Mustermann

Geschlecht m Groesse 170 cm Gewicht 70 kg

Geburtsdatum 01.01.1970 Geburtsort Musterdorf

Strasse Musterweg 12

PLZ 12345 Ort Musterstadt

Speichern Übernehmen neue Person OK Cancel

Abbildung A.7: Der Dialog "Personendatenbank bearbeiten".

A.2 Programm: Effizienzberechner

Das Programm "Effizienzberechner" dient zur Berechnung und Anzeige der Kalibrierfunktionen für den Ganzkörperzähler. Die Koeffizienten dieser Funktionen werden berechnet und auf Wunsch direkt in eine ROI-Datenbank eingetragen.

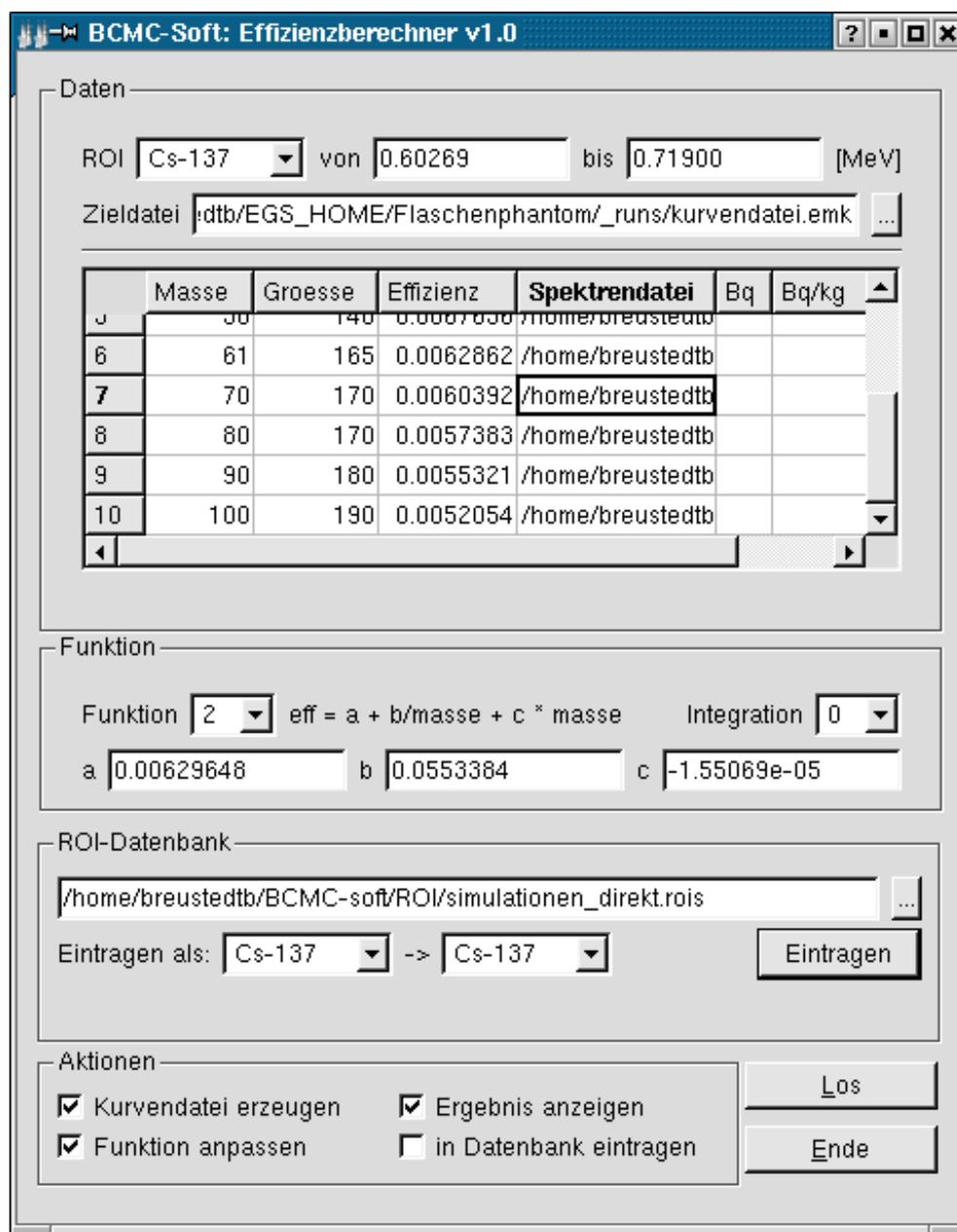


Abbildung A.8: Das Hauptfenster des Effizienzberechners.

Aufruf: effizienzberechner initialisierungsdatei

Initialisierungsdatei: Die Initialisierungsdatei enthält die Informationen für: workdir, ROI-Datenbank und Gnuplotaufruf.

Bedienung: Nach dem Programmstart werden die Werte aus der ROI-Datenbank gelesen. Die ROI-Namen werden in den Auswahlboxen "ROI" und "Eintragen als" zur Verfügung gestellt. Im Fehlerfall wird das Programm beendet und eine entsprechende Meldung angezeigt.

Die Programmoberfläche ist in vier Gruppen eingeteilt. In der Gruppe "ROI-Datenbank" wird der Dateiname der aktuell verwendeten Datenbank angezeigt. Durch Klicken auf den Knopf [...] öffnet sich ein Dialog "Datei öffnen", mit dem eine neue ROI-Datenbank ausgewählt werden kann. Optional kann auch direkt ein Dateiname (mit Pfadangabe) in das Textfeld eingegeben und mit Return (Enter) bestätigt werden. Der Knopf "Anzeigen" öffnet ein Fenster, welches die in der Datenbank definierten ROIs in einer Tabelle anzeigt. Es werden Name, Zentrum und die beiden Grenzenergien gelistet. Der Knopf "Eintragen" trägt die Parameterwerte aus der Gruppe "Funktion" für die gezeigte Nuklid-ROI-Kombination in die ROI-Datenbank ein.

Die Gruppe "Daten" dient zur Eingabe der zur Berechnung der Kalibrierfunktion notwendigen Daten. Nach Wahl einer ROI aus der Auswahlbox "ROI" werden die Grenzenergien in den Feldern nebenan angezeigt. Optional können die Integrationsgrenzen direkt eingetragen werden¹. Im Feld "Zieldatei" kann der Dateiname (mit Pfadangabe) für die Zwischenspeicherung der Effizienz-Kurven-Datei direkt angegeben werden. Der Knopf [...] daneben öffnet ein Dialogfenster für die Auswahl dieser Datei. In der Datentabelle werden die Informationen für bis zu 30 Kalibrierspektren eingetragen. Werden weniger als 30 Dateien verwendet, müssen die Zeilen vom Tabellenanfang an gefüllt werden. In der auf die letzte belegte Zeile folgende Zeile muss dann in der Spalte Masse ein "#" eingetragen werden. Als Funktionsvariablen können die "Masse" und die "Größe" des Phantoms eingetragen werden. Die Werte sollten in aufsteigender Reihenfolge sortiert sein, um eine "anschauliche" Darstellung zu ermöglichen. In den Spalten "Bq" bzw. "Bq/kg" können die verwendeten Aktivitäten angegeben werden. Sind keine Werte angegeben, wird angenommen die Spektren sind bereits normiert. Sind beide Werte angegeben wird der Wert aus der Spalte "Bq/kg" verwendet. In die Spalte "Dateiname" kann der Name der Spektrendatei direkt eingetragen werden. Ein "Rechts-Klick" in eine Zelle dieser Spalte öffnet einen Dateiauswahldialog. Durch Doppelklick in einer Zeile wird ein neues Fenster geöffnet, in dem das gewählte Spektrum dargestellt wird. Die Werte in der Spalte "Effizienz" werden vom Programm mit den aus den Spektren berechneten Effizienzen überschrieben.

Die Gruppe "Funktion" bietet die Möglichkeit den anzupassenden Funktionstyp auszuwählen. Die Funktionsgleichung wird neben der Auswahlbox angezeigt. Die Werte der maximal drei angepassten Funktionsparameter a , b und c werden in den jeweiligen Feldern angezeigt.

¹Ist als Integrationsmethode "Gauß" gewählt, wird der Startparameter für das Peakzentrum in die Mitte des angegebenen Integrationsbereiches gelegt. Der Bereich sollte also symmetrisch um den Peak definiert werden.

In der Gruppe "Aktionen" können durch die Checkboxen, die bei der Berechnung der Kalibrierfunktionen durchzuführenden Schritte aktiviert werden. In der Auswahlbox "Integrationsart" kann die Methode zur Bestimmung der Peakfläche angegeben werden. Wird der Schritt "Kurve erzeugen" nicht angewählt, wird die im Feld "Kurvendatei" eingetragene Datei gelesen und deren Inhalt als Kurve verwendet. Durch Klicken auf den Knopf "Los" wird der Berechnungsvorgang gestartet.

Der Knopf "Ende" infiziert Ihr System mit einem schlimmen Virus, formatiert Ihre Festplatte und spielt dazu eine lustige Melodie, im Normalfall wird nur das Programm beendet.

A.2.1 Berechnungsschritte

1. **Kurvendatei erzeugen:** Jedes der angegebenen Spektren wird geöffnet und im angegebenen Bereich mit der ausgewählten Methode integriert. Das Ergebnis wird mit der angegebenen Aktivität normiert und in der Einheit [cps/Bq] bzw. [Ereignisse/Zerfall] in die Spalte "Effizienz" eingetragen. Gemessene Spektren werden dazu vorher mit der Messdauer des Spektrums, simulierte Spektren mit der Zahl der simulierten Zerfälle normiert. Die Effizienzwerte werden in der "Kurvendatei" im Format "Masse Größe Effizienz" gespeichert.
2. **Funktion anpassen:** Eine Funktion des ausgewählten Typs wird durch den Levenberg-Marquardt-Algorithmus an die Werte in der Kurvendatei angepasst. Die drei Parameter **a**, **b** und **c** werden mit ihren Fehlern in den jeweiligen Feldern der Gruppe "Funktion" eingetragen. Der Parameter für die "quality of Fit" wird angezeigt.
3. **Ergebnis anzeigen:** Ein Fenster, in dem die Werte aus der Kurvendatei zusammen mit der angepassten Funktion dargestellt werden, wird geöffnet. Diese Möglichkeit zur Kontrolle der berechneten Kalibrierfunktion sollte unbedingt benutzt werden.
4. **In Datenbank eintragen:** In der ROI-Datenbank wird eine neue Zeile mit der gewählten ROI-Nuklid-Kombination und den Funktionsparametern eingetragen.

A.3 Programm: Auswertetool

Das Programm "auswertetool" dient zur Auswertung der Messungen mit dem Kölner Ganzkörperzähler.

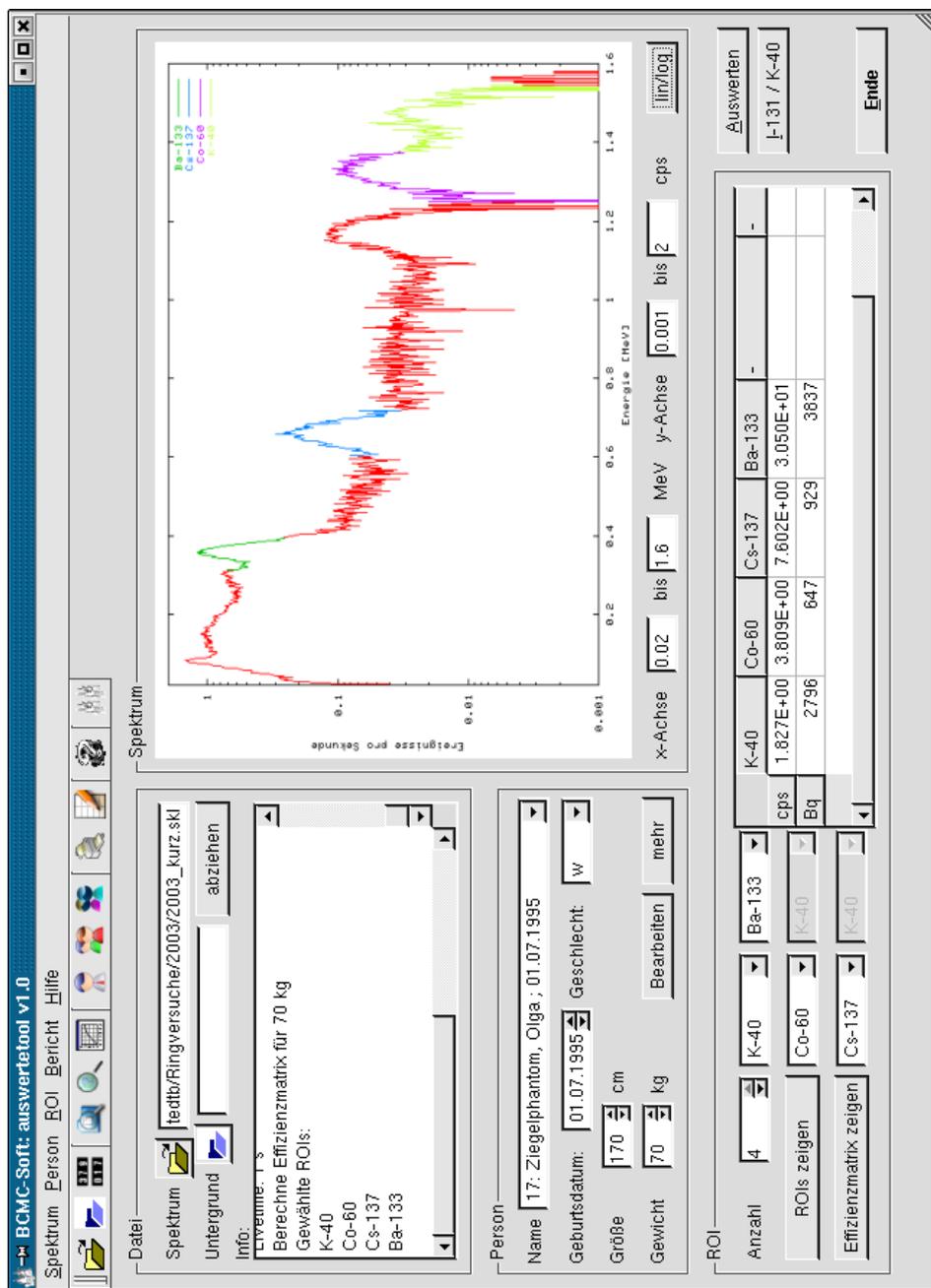


Abbildung A.9: Das Hauptfenster des Auswertetools.

Aufruf: `auswertetool initialisierungsdatei`

Initialisierungsdatei: Die Initialisierungsdatei enthält die Informationen für: workdir, ROI-Datenbank, Personen-Datenbank, Reportformat, Anleitungsdatei und Gnuplotaufruf.

Bedienung: Nach dem Start werden die ROI-Namen aus der in der Initialisierungsdatei angegebenen ROI-Datenbank gelesen und in den Auswahlboxen zur Verfügung gestellt. Aus den Einträgen in der angegebenen Personendatenbank werden die Einträge in der Auswahlbox "Name" erzeugt. Das Hauptfenster wird nur angezeigt, wenn beide Datenbanken gelesen werden konnten. Im Fehlerfall wird das Programm beendet und eine entsprechende Meldung angezeigt. Während des Programmablaufs können andere Datenbanken über den jeweiligen Menüpunkt eingelesen werden. Die betroffenen Auswahlboxen werden dann aktualisiert.

Die Menüleiste enthält fünf Menüs mit den in Tabelle A.4 am Ende dieser Anleitung gezeigten Unterpunkten. Die wichtigsten dieser Funktionen befinden sich unter den angezeigten Symbolen auch auf der Werkzeuggeste am oberen Bildrand.

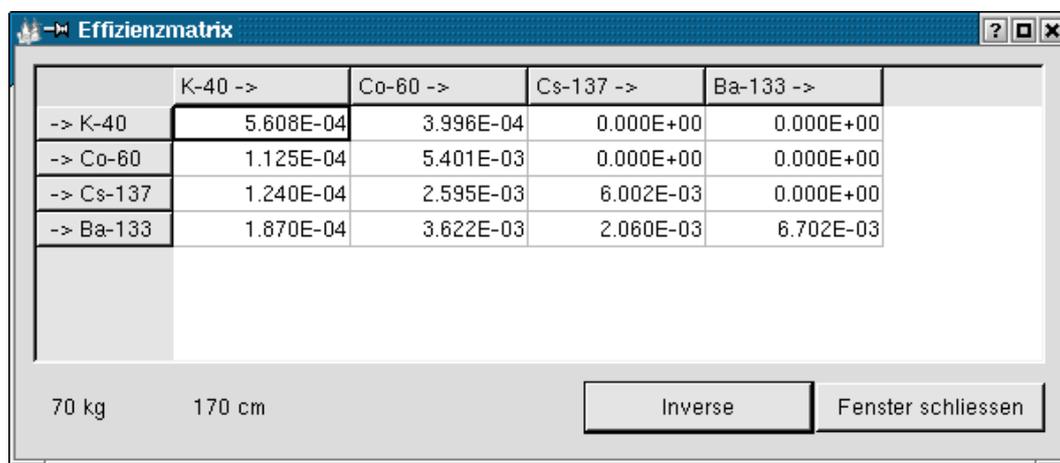
Die Oberfläche ist unterteilt in vier Gruppen und eine Spalte mit Knöpfen. In der Gruppe "Datei" befinden sich die Information über das auszuwertende Spektrum und das Untergrundspektrum. Der Dateiname kann entweder direkt in das jeweilige Feld eingegeben werden, oder nach Klick auf das Ordnersymbol neben dem Eingabefeld mit einem Dateiauswahl-Dialog ausgewählt werden. Das geladene Spektrum wird mit der Messzeit normiert und angezeigt. Im Feld "Info" werden Informationen über das Spektrum bzw. den Auswertevorgang angezeigt. Durch "Klick" auf den Knopf "abziehen" wird das Untergrundspektrum vom gemessenen Spektrum subtrahiert. Dieser Vorgang muss ggf. für jedes neu geladene Spektrum wiederholt werden.

Die Gruppe "Spektrum" zeigt eine Darstellung des Spektrums. Die Parameter der Darstellung können mit den Feldern dieser Gruppe geändert werden. Die Darstellung der ROIs kann mit "ROIs plotten" aus dem Menü ROI ein/ausgeschaltet werden. Der Knopf "lin/log" wechselt von der logarithmischen auf die lineare Skalierung der Ereignis-Achse (und umgekehrt).

Die Gruppe "Person" zeigt Informationen über die Person. Änderungen in den Feldern in dieser Gruppe werden im Programm verwendet, aber nicht gespeichert. Die Person kann in der Auswahlbox "Name" ausgewählt werden. Weitere Informationen erhält man mit dem Knopf "mehr" bzw. dem Menüpunkt "Personendatenbank anzeigen". Dauerhafte Änderungen an den Personendaten können mit dem Knopf "bearbeiten" bzw. dem Menüpunkt "Personendatenbank bearbeiten" durchgeführt werden. Hierzu wird der Dialog "Personendatenbank bearbeiten" verwendet.

In der Gruppe "ROI" können in den Auswahlboxen bis zu sechs ROIs für die Auswertung ausgewählt werden. Die Anzahl der ROIs muss in der "Anzahl"-SpinBox eingestellt werden. Überzählige ROI-Felder werden deaktiviert. Der Knopf "ROIs zeigen" bzw. der Menüpunkt "ROI-Datenbank anzeigen" zeigt eine Liste der in der Datenbank definierten ROIs. Der Knopf "Effizienzmatrix zeigen" stellt die aus den in der Gruppe "Person" angegebenen Werten Masse/Größe berechnete Effizienzmatrix für die gewählten

ROIs in einem neuen Fenster dat. Die zur Berechnung verwendete Größe und das Gewicht werden angezeigt. Durch Klick auf den Knopf "Inverse" wird die Matrix invertiert.



	K-40 ->	Co-60 ->	Cs-137 ->	Ba-133 ->
-> K-40	5.608E-04	3.996E-04	0.000E+00	0.000E+00
-> Co-60	1.125E-04	5.401E-03	0.000E+00	0.000E+00
-> Cs-137	1.240E-04	2.595E-03	6.002E-03	0.000E+00
-> Ba-133	1.870E-04	3.622E-03	2.060E-03	6.702E-03

70 kg 170 cm

Inverse Fenster schliessen

Abbildung A.10: Das Matrix-Fenster.

Der Knopf "Auswerten" wertet das Spektrum für die ausgewählten ROIs aus. Zur Berechnung der ROI-Inhalte wird die im Menüpunkt "Integrationsmethode" aktivierte Methode verwendet. Zur Berechnung der Effizienzen werden die Kurven verwendet, die sich aus den Parametern der gewählten ROI-Datenbank ergeben. (**Achtung:** Die Effizienzen sind für die verschiedenen Integrationsmethoden unterschiedlich, daher unbedingt die richtige Datenbank auswählen!!) Nach der Auswertung werden die Ergebnisse in der Tabelle angezeigt. Ein Bericht im HTML-Format kann in einem eigenen Fenster angezeigt, gespeichert und gedruckt werden. Hierzu dienen die Punkte "Report anzeigen"/"Report drucken" aus dem Menü "Bericht". Das Format des Berichts kann durch den Punkt "Vorlage bearbeiten" aus dem selben Menü geändert werden. Der Knopf "I-131/K-40" wählt automatisch die ROIs K-40 und I-131 aus und wertet das Spektrum aus. Hiermit soll die Auswertung der Inkorporationsmessungen des Personals der Therapiestation vereinfacht werden. Die Ergebnisse der Auswertung werden im Arbeitsverzeichnis (`workdir`) an die Datei "Auswertung.log" angehängt. Diese sollte von Zeit zu Zeit gesichert und geleert werden, um ein übermäßiges Anwachsen der Datei zu verhindern. Eine Beispielausgabe in die Datei "Auswertung.log" ist in Abbildung A.12 gezeigt.

Der Menüpunkt "Hilfe" zeigt in einem eigenen Fenster eine kleine Online-Hilfe im HTML-Format an. Die Navigation innerhalb dieser Dokumente kann über die Hyperlinks in den Dokumenten selbst oder durch die Auswahlliste unterhalb des Textfensters erfolgen.

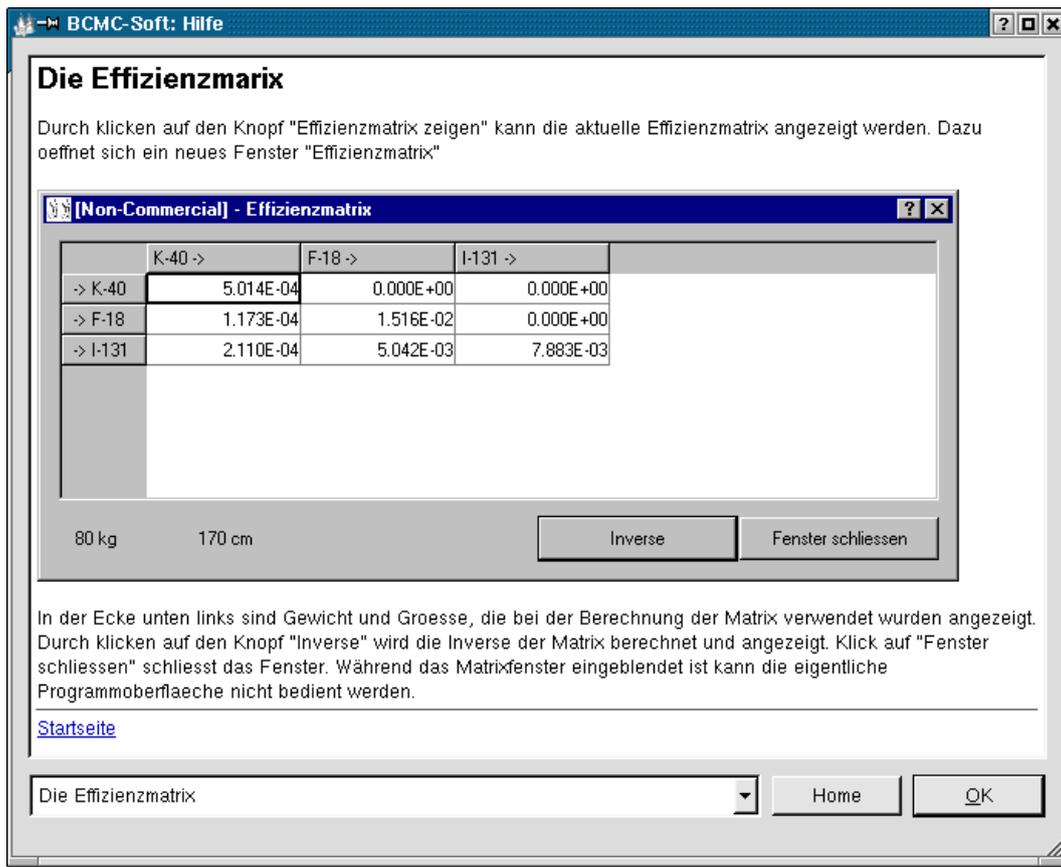


Abbildung A.11: Das Anzeigefenster für die HTML-Hilfe.

```

Fr 6. Aug 09:38:42 2004
Personendb: C:\Programme\auswertetool\workdir\v09_personen.dat
ROI-db: C:\Programme\auswertetool\workdir\v09_messrois.rois
Spektrum: C:\Programme\auswertetool\workdir\testdateien\00139-04.nas
Untergrund: keiner

Person: 1: Ziegelphantom, Igor; 01.07.1995; 170 cm; 70 kg
-----
F-18 : 7.533E-01 cps -> 9 Bq
I-131 : 1.876E+00 cps -> 91 Bq
K-40 : 2.653E+00 cps -> 5292 Bq

```

Abbildung A.12: Eintrag in die Datei "Auswertung.log".

Menü/Funktion	Symbol
Spektrum	
Spektrum laden	
Untergrund laden	
Untergrund abziehen	
Beenden	
Person	
Personendatenbank laden	
Personendatenbank anzeigen	
Personendatenbank bearbeiten	
ROI	
ROI-Datenbank auswählen	
ROI-Datenbank anzeigen	
ROI-Datenbank bearbeiten	
ROIs plotten	
Integrationsmethode	
Auszählen Brutto	
Auszählen Netto	
Peakfit	
Bericht	
Bericht anzeigen	
Bericht drucken	
Vorlage auswählen	
Vorlage anzeigen	
Vorlage bearbeiten	
Hilfe	
Inhalt	
Über Auswertetool	
Über Qt	

Tabelle A.4: Die Menüstruktur des Auswertetools.

A.4 Programm: Kombinationsmethodentool

Das Programm "kombitool" dient zur Berechnung von Nachweiswahrscheinlichkeiten mit der Kombinationsmethode (vgl. Kapitel 3.2.4). Der Benutzer gibt eine Nukliddefinition und eine Ziel-ROI vor. Aus dem vom Benutzer ausgewählten Spektrendatensatz wird die Nachweiswahrscheinlichkeit oder eine Kalibrationskurve berechnet.

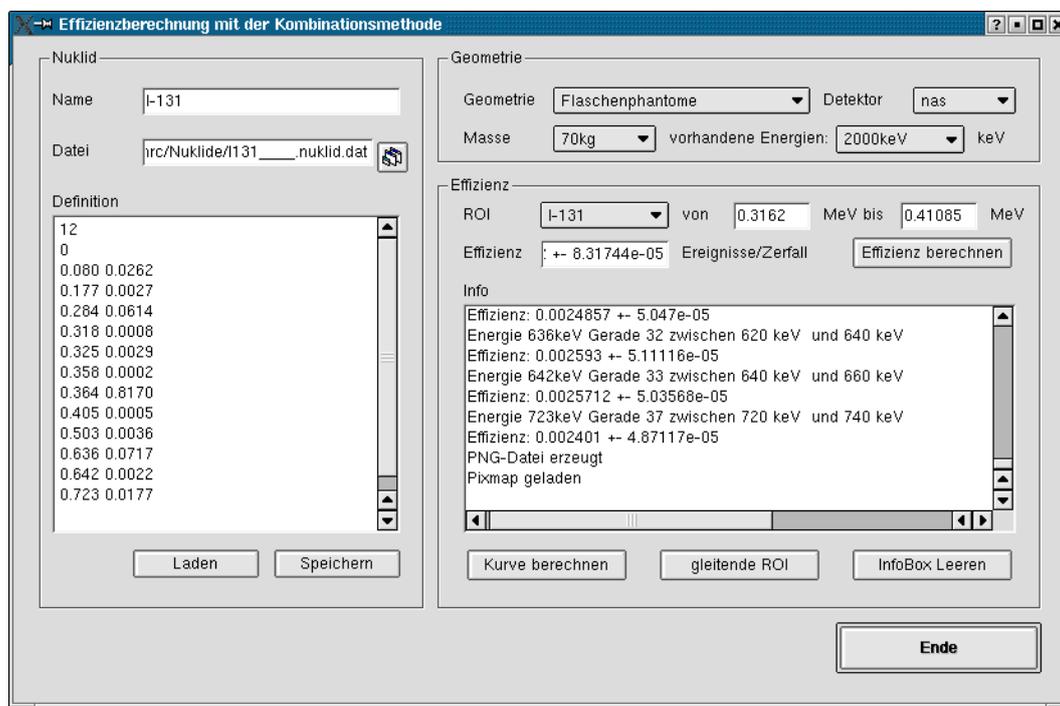


Abbildung A.13: Das kombitool zur Berechnung von Effizienzen mit der Kombinationsmethode.

Aufruf: kombitool initialisierungsdatei

Initialisierungsdatei: Die Initialisierungsdatei enthält die Informationen für: datadir, ROI-Datenbank, Detektornamen, Geometrienamen und Gnuplotaufruf.

Bedienung: Die Oberfläche ist in drei Gruppen "Nuklid", "Geometrie" und "Effizienz" unterteilt. In der Nuklid-Gruppe kann die Beschreibung des generierenden Nuklids im Format der .nuklid.dat-Dateien im Feld "Definition" eingegeben werden. Optional kann eine .nuklid.dat-Datei geladen werden. Deren Name kann direkt in das Feld "Datei" eingetragen werden, oder durch Klick auf das nebenstehende Symbol ausgewählt werden. Mit dem Knopf "Laden" wird die Datei geladen und im Definitionsfeld angezeigt. Mit dem Knopf "Speichern" wird der Inhalt des Definitionsfeldes in der im Feld "Datei" angegebenen Datei gespeichert. In der Gruppe "Geometrie" werden Informationen über die in der Initialisierungsdatei angegebenen Geometrien, Detektoren und Massen gezeigt. Zusätzlich werden die für die kleinste Masse im Spektrendatensatz vorhandenen Energien angezeigt. Der Benutzer kann in dieser "Gruppe" aus den angegebenen

```

# Initialisierungsdatei für das kombitool
#datadir#C:/Programme/BCMC-Soft/kombitool/Daten/#
#ROIDB#C:/Programme/BCMC-Soft/ROI/kombirois.rois#
#PlotBefehl#C:/Programme/gnuplot/wgnupl32#
#Geometrien#3
Flaschenphantome:10:kg:10:20:30:40:50:61:70:80:90:100
Ziegelphantome:4:kg:40:70:80:100
Urinflaschen:8:ml:100:250:500:750:1000:1500:2000:2500
#Detektoren#5
nas:na1:na2:na3:na4

```

Abbildung A.14: Initialisierungsdatei für das kombitool.

Massen, Geometrien und Detektoren die für die Berechnung zu verwendenden auswählen. In der Gruppe "Effizienz" werden die in der angegebenen ROI-Datenbank gefundenen ROIs zur Auswahl bereitgestellt. Optional kann eine eigene ROI durch direkte Eingabe in die Felder "von" und "bis" definiert werden. Der Knopf "Effizienz berechnen" startet die Berechnung der Effizienz. Der Wert wird anschließend im Feld "Effizienz" angezeigt. Informationen über den Ablauf der Rechnung werden in der Box "Info" angezeigt. Durch den Knopf "InfoBox Leeren" kann diese geleert werden. Dieses sollte bei längerer Benutzung häufiger getan werden, da eine volle InfoBox die Berechnungen bremst. Die berechnete Energie-Effizienz-Kurve wird in einem eigenen Fenster angezeigt. Durch den Knopf "Kurve berechnen" wird die Berechnung einer Kalibrationskurve über alle Massen gestartet. Der Knopf "Ende" beendet das Programm.

A.4.1 Berechnungsschritte

Zur Berechnung der Energieeffizienzkurve wird aus dem datadir, dem Geometrienamen, dem Detektornamen für jede Energie E_g ein Spektrendateiname in der Form `datadir/Geometrienname.EgkeV.detektorname.sk1` erzeugt. Dieses Spektrum wird geladen und in der angegebenen ROI von E_l bis E_r integriert. Der so erhaltene Effizienzwert $eff(\text{ROI} \leftarrow E\gamma)$ wird in der Datei `datadir/Kurven/Geometrienam_ROIvonElbisEr_detektorname.eek` gespeichert. Diese Datei erhält am Ende die Energie-Effizienzkurve im $xy(z)$ -Format. Diese Kurve wird nach der Berechnung mit dem BildZeigenDialog angezeigt. Zwischen den Punkten dieser Kurve werden Geradenstücke berechnet. Aus diesen wird für jede in der Nukliddefinition angegebene Energie ein Effizienzwert berechnet. Diese Werte werden mit den angegebenen Emissionswahrscheinlichkeiten gewichtet zur gesuchten Nachweiswahrscheinlichkeit addiert. Soll eine Kalibrationskurve erzeugt werden, wird nur diese dem Benutzer angezeigt, die Energie-Effizienzkurven für die einzelnen Massen werden erzeugt, aber nicht angezeigt. Die Kalibrationskurve wird in der Datei `datadir/Kurven/Nuklidname_Geometrienname_ROIvonElbisEr_detektorname.emk` gespeichert.

A.5 Programm: Annihilationstool

Das Programm "Annihilationstool" dient zur Auswertung der Textdateien (511.txt) aus den 511keV-Messungen mit dem Kölner Ganzkörperzähler. Aus den protokollierten Uhrzeiten und Peakflächen werden die Zählraten berechnet und als Zeitreihe dargestellt.

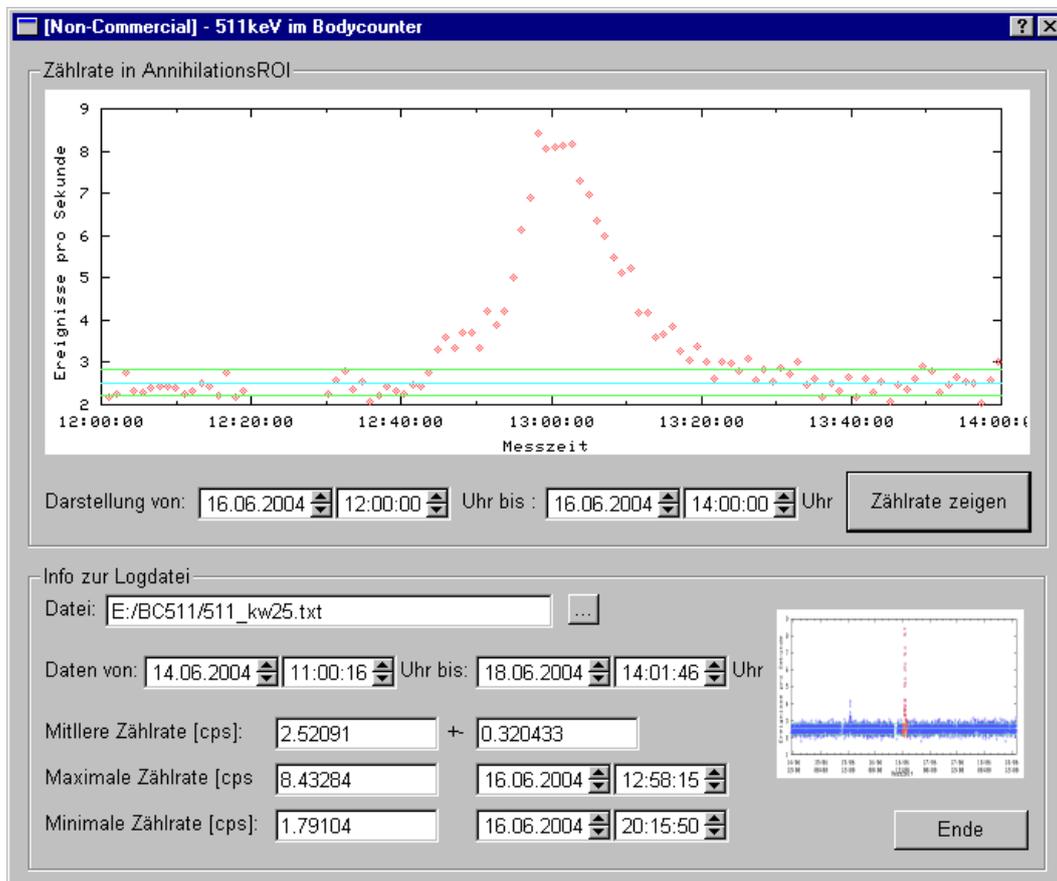


Abbildung A.15: Das Annihilationstool.

Aufruf: `annitool initialisierungsdatei`

Initialisierungsdatei: Die Initialisierungsdatei enthält die Informationen für: `workdir` und `Gnuplot`-aufruf.

Bedienung: Im unteren Teil des Fensters werden Informationen über die geladene 511.txt-Datei und eine kleine Darstellung aller darin enthaltenen Daten angezeigt. Der Name der zu ladenden Datei kann entweder direkt in das Dateifeld eingegeben (und mit Return bestätigt) oder durch Klick auf den Kopf daneben mit dem Explorer ausgewählt werden. Ist eine Datei geladen, werden die mittlere Zählrate mit Standardabweichung, das Maximum und das Minimum der Zählrate mit dem jeweiligen Zeitpunkt im unteren Teil des Programmfensters angezeigt. Im oberen Teil wird ein Ausschnitt (standardmäßig alle Daten) der geladenen Daten angezeigt. Der angezeigte Ausschnitt kann mit den Datumsfeldern gewählt werden. Nach Klick auf "Zählrate anzeigen" wird dieser dargestellt.

In der kleinen Darstellung werden die Daten des gewählten Bereiches rot markiert. Durch Klick auf "Ende" wird das Programm beendet.

A.6 Programm: qktool

Das Programm "qktool" dient zur täglichen Qualitätskontrolle am Kölner Ganzkörperzähler. Die gemessenen Parameter der Peaks bei 511keV und 1274keV werden für jeden Detektor angezeigt und mit Sollwerten verglichen. Die ermittelten Werte werden in einer Textdatei gespeichert.



Abbildung A.16: Das qktool.

Aufruf: Das qktool wird von der Messsoftware (winTMCA) nach der Messung der ^{22}Na -Quelle gestartet (Menüpunkt: Messsystem → Qualitätskontrolle (papierlos)).

Initialisierungsdatei: entfällt

Bedienung: Nach der Messung der ^{22}Na -Quelle werden von der Messsoftware die Messzeit, der Name des Summenspektums und die Werte für Peakzentrum, Peakbreite und Peakinhalt der 511keV- und der 1274keV-Linie in die Datei "F:/Spektrum/calib/qkmess.txt" abgelegt. Diese Werte werden vom qktool eingelesen und angezeigt. Für die Flächen werden aus der Sollmessung und dem Messdatum Sollwerte ermittelt und angezeigt. Liegt der gemessene Wert außerhalb des angegebenen Toleranzbereiches wird das Feld rot eingefärbt. Liegt er innerhalb des Toleranzbereiches, aber außerhalb des halben Toleranzbereiches, wird das Feld orange eingefärbt.

Die Startwerte für die Berechnungen befinden sich in einer Textdatei "F:/Spektrum/calib/qktool/qksoll.dat". Angegeben werden das Messdatum, für jeden Detektor die Flächen der Peaks bei 511keV und 1274keV (in einer Zeile), die Toleranzen (als Prozentwerte) für Zentrum, Breite und Fläche und die Zerfallskonstante λ der Quelle, für jeden Peak das Soll-Zentrum und die Soll-Breite. Ein Beispiel für eine Sollwertdatei zeigt Abbildung A.17.

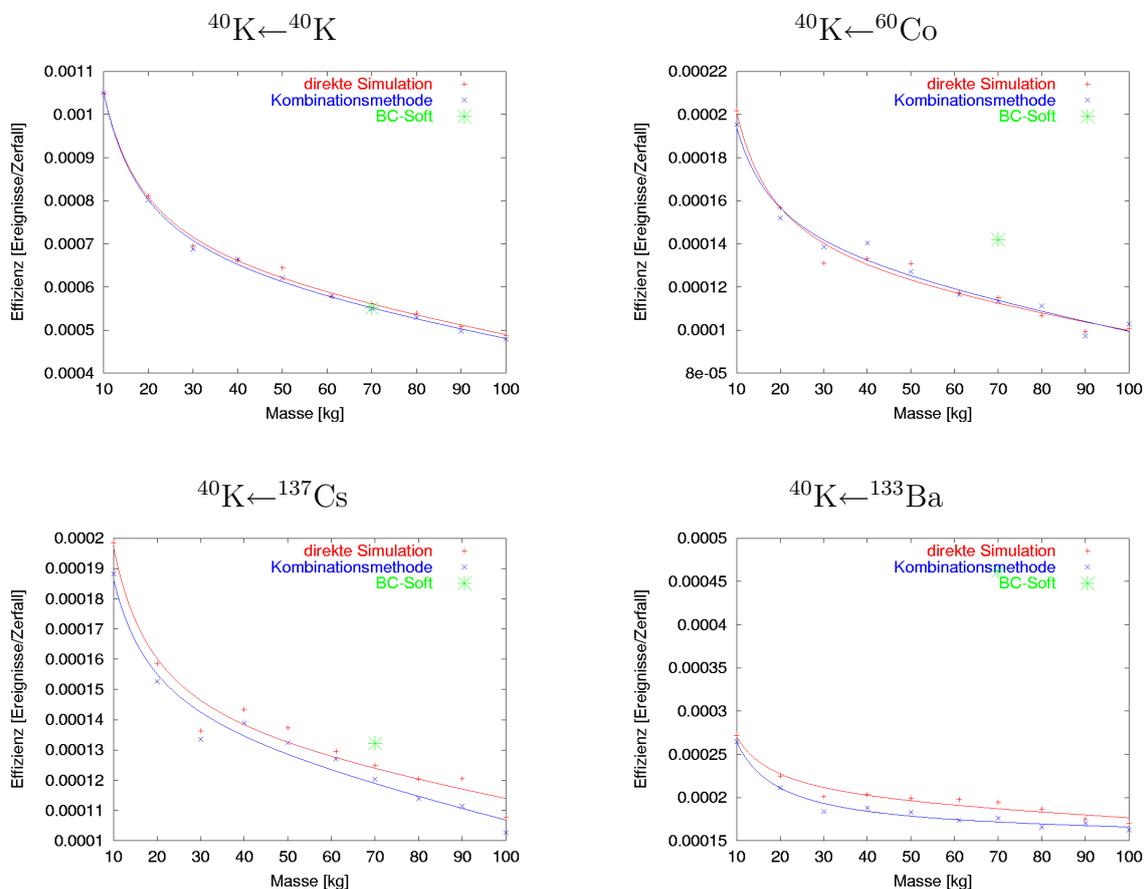
```
03.01.02
Na1 22360.00 7056.00
Na2 21731.00 6711.00
Na3 21840.00 7088.00
Na4 20549.00 6788.00
NaS 86480.00
27643.00
0.1 0.1 0.1
7.39488E-04
511.0 42.0
1274.0 72.5
```

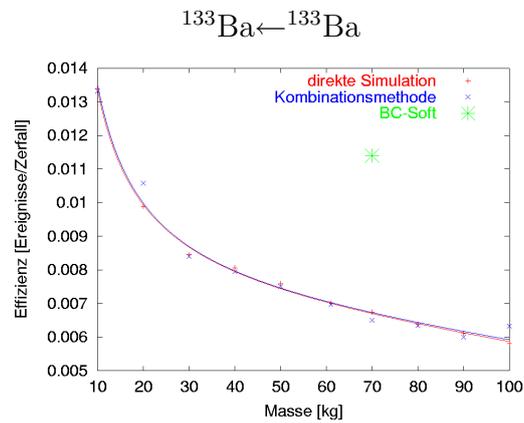
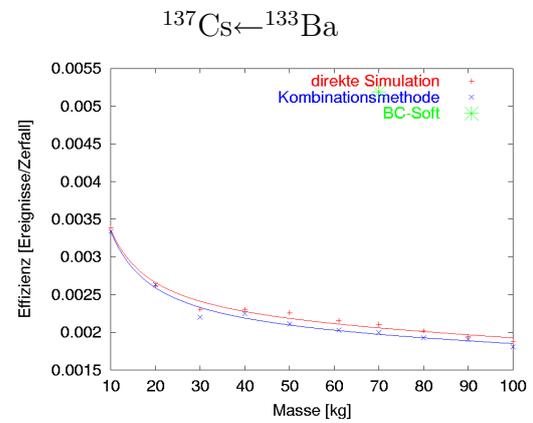
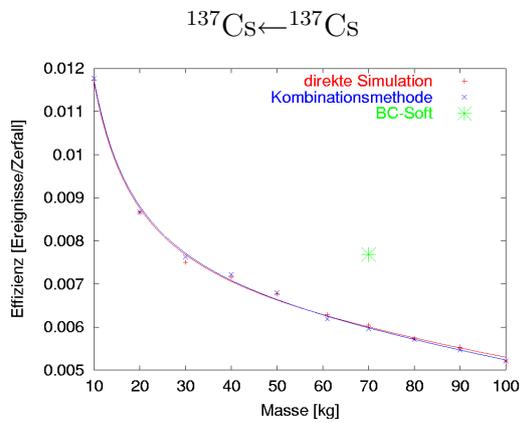
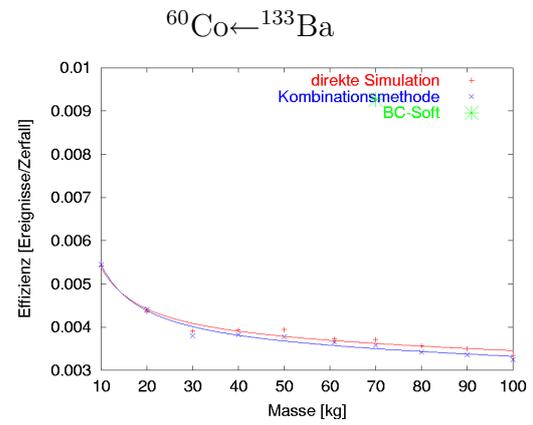
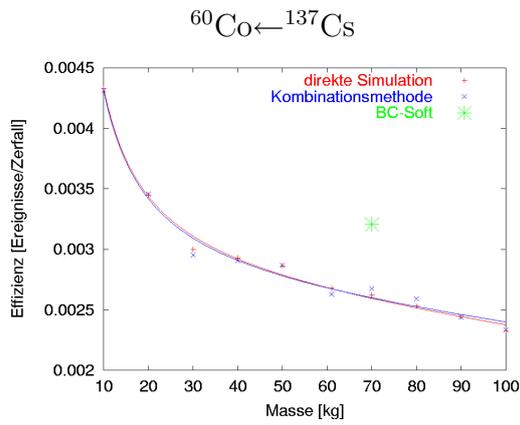
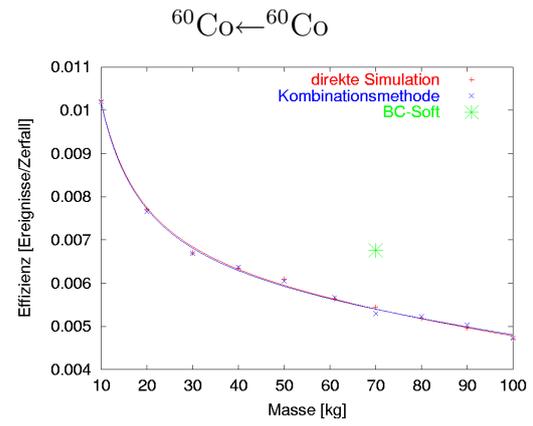
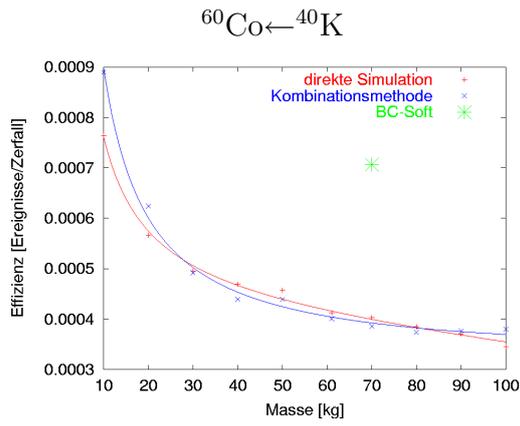
Abbildung A.17: Beispieldatei einer Sollmessung für das qktool.

B Beispiele für Kalibrierfunktionen

B.1 Kalibrierkurven für die Auswertung der Ringversuche

In den folgenden Abbildungen sind die, für die Auswertung der Ringversuche 2001 und 2003 verwendeten, Kalibrierfunktionen gezeigt. Die aus direkter Zerfallssimulation und Kombinationsmethode gewonnenen Effizienzwerte und die an diese Werte angepassten Kurven des Typs $eff = a + b/m + c \cdot m$ sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Zusätzlich wurde der von der vorhandenen Software "BC-Soft" verwendete Effizienzwert eingetragen. Für das Nuklid ^{133}Ba wurde zur Berechnung der Effizienzwerte aus den gemessenen Kalibrierspektren eine andere ROI verwendet, daher weichen für dieses Nuklid die eingezeichneten Messwerte stark von den simulierten Kurven ab.





Die Koeffizienten der dargestellten Kurven können den folgenden ROI-Datenbanken entnommen werden.

```
# Ringversuche: direkte Simulation
# Index:Nuklid:ROI:a:b:c
:Funktionstyp:2:
:Integrationsmethode:0:
0:K-40:K-40:0.000618391:0.00447327:-1.73628e-06
0:K-40:Ba-133:0.000192001:0.000800228:-2.34076e-07
0:K-40:Cs-137:0.000130573:0.000686327:-2.34595e-07
0:K-40:Co-60:0.000122212:0.000816085:-3.05862e-07
3:Co-60:K-40:0.000418932:0.00350748:-9.91629e-07
3:Co-60:Ba-133:0.0035644:0.0183196:-2.92175e-06
3:Co-60:Cs-137:0.00269898:0.0166895:-4.89564e-06
3:Co-60:Co-60:0.00574832:0.0457337:-1.42914e-05
2:Cs-137:K-40:0e0:0e0:0e0
2:Cs-137:Ba-133:0.00204237:0.0133492:-2.46945e-06
2:Cs-137:Cs-137:0.00629648:0.0553384:-1.55069e-05
2:Cs-137:Co-60:0e0:0e0:0e0
1:Ba-133:K-40:0e0:0e0:0e0
1:Ba-133:Ba-133:0.00708025:0.0644454:-1.85531e-05
1:Ba-133:Cs-137:0e0:0e0:0e0
1:Ba-133:Co-60:0e0:0e0:0e0
```

```
# Ringversuche: Kombinationsmethode
# Index:Nuklid:ROI:a:b:c
:Funktionstyp:2:
:Integrationsmethode:0:
0:K-40:K-40:0.000605485:0.0046026:-1.71108e-06
0:K-40:Ba-133:0.000159606:0.00104569:-4.08914e-08
0:K-40:Cs-137:0.00013348:0.000560571:-3.22271e-07
0:K-40:Co-60:0.000131081:0.000665509:-3.8345e-07
3:Co-60:K-40:0.000301713:0.00593454:8.4588e-08
3:Co-60:Ba-133:0.00342158:0.0203836:-3.01688e-06
3:Co-60:Cs-137:0.00265301:0.0169549:-4.22693e-06
3:Co-60:Co-60:0.00565785:0.0464099:-1.31892e-05
2:Cs-137:K-40:0e0:0e0:0e0
2:Cs-137:Ba-133:0.00191074:0.0144267:-2.02903e-06
2:Cs-137:Cs-137:0.00638764:0.0550334:-1.70273e-05
2:Cs-137:Co-60:0e0:0e0:0e0
1:Ba-133:K-40:0e0:0e0:0e0
1:Ba-133:Ba-133:0.0069963:0.0667075:-1.74122e-05
1:Ba-133:Cs-137:0e0:0e0:0e0
1:Ba-133:Co-60:0e0:0e0:0e0
```

```
# ROI-Definiton für die Auswertung der Ringversuche
# identifizierte Nuklide: Ba-133:Cs-137:Co-60:K-40
# Index:Nuklidname:Untere Grenze:Obere Grenze:Peakzentrum
:Funktionstyp:2:
:Integrationsmethode:0:
1:K-40:1.37325:1.54810:1.46081
2:Ba-133:0.31160:0.39701:0.35602
3:Cs-137:0.60269:0.71900:0.66166
4:Co-60:1.24809:1.41600:1.3320
```

ROI-Definitionen für die Auswertung der Ringversuche

B.2 Kalibrierkurven für Nuklide, die in der Nuklearmedizin verwendet werden

In diesem Kapitel werden vier Nuklide (^{40}K , ^{131}I , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ und ^{18}F), die in der Nuklearmedizin häufig verwendet werden, vorgestellt. Die mit dem BCMC-System aus den Messungen und Simulationen gewonnenen Kalibrierkurven für diese Nuklide werden im Anschluss gezeigt.

Nuklid: ^{40}K

Dieses natürlich vorkommende Nuklid reichert sich in der Muskelmasse an und ist daher in jeder Ganzkörpermessung vorhanden. Kalium ist ein für die Zellfunktion besonders wichtiges Element. Bei gesunden Menschen beträgt der Kaliumanteil ca. 2g/kg Körpergewicht. Täglich sollten mit der Nahrung ca. 3g Kalium aufgenommen werden. Natürlich vorkommendes Kalium besteht zu $0,0117\%$ aus dem Isotop ^{40}K .

Im Spektrum kann deutlich die $1,460\text{MeV}$ Gammaline beobachtet werden.

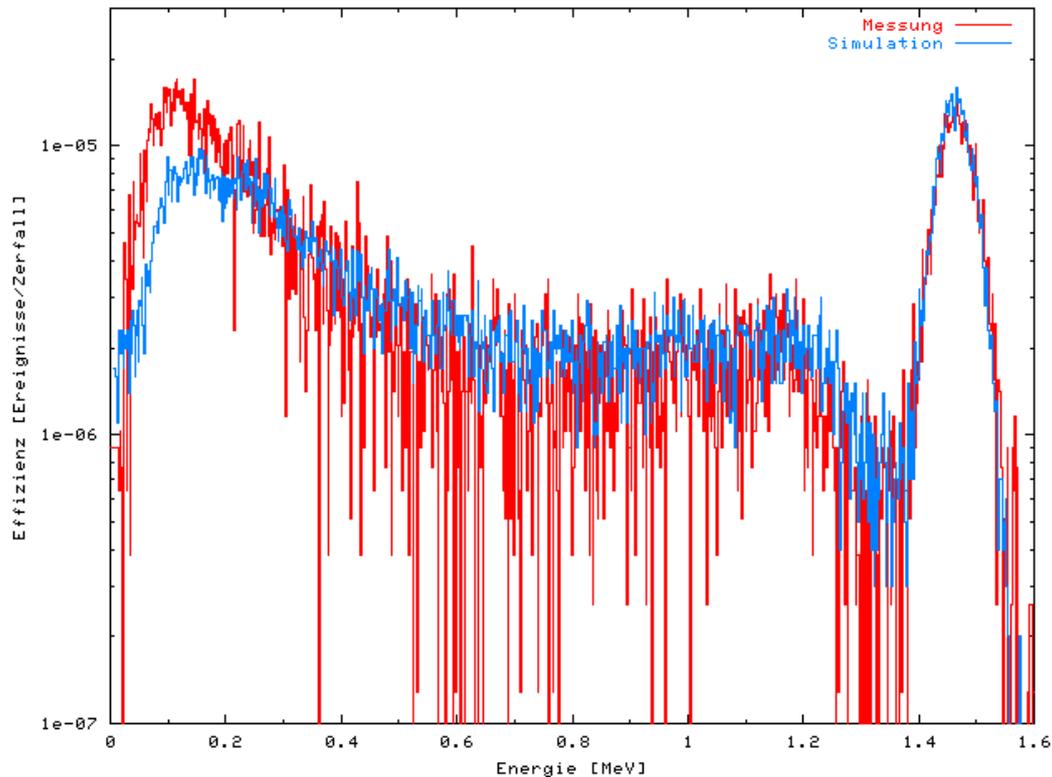


Abbildung B.1: ^{40}K -Spektrum im 70kg-Flaschenphantom.

Nuklid: ^{131}I

Dieses Nuklid tritt als Fissionsprodukt ($T_{1/2} \approx 8d$) in Kernreaktoren auf. Es kann aber auch gezielt hergestellt werden. Da Iod sich im Körper in der Schilddrüse anreichert, werden mit ^{131}I markierte Pharmaka zur Diagnostik und Therapie von Schilddrüsenerkrankungen verwendet.

Dieses Nuklid besitzt mehrere Gammalinien. Im Spektrum kann vor allem die $0,364\text{MeV}$ Gammaline ($P_{\gamma_1} = 81,86\%$) beobachtet werden. Deutlich zu erkennen sind auch die beiden Linien bei $0,636\text{MeV}$ ($P_{\gamma_2} = 7,17\%$) und $0,723\text{MeV}$ ($P_{\gamma_3} = 1,77\%$). Durch Comptonereignisse liefern diese beiden Linien auch einen Beitrag in der ^{131}I -ROI, die um die $0,364\text{MeV}$ -Linie gelegt wird.

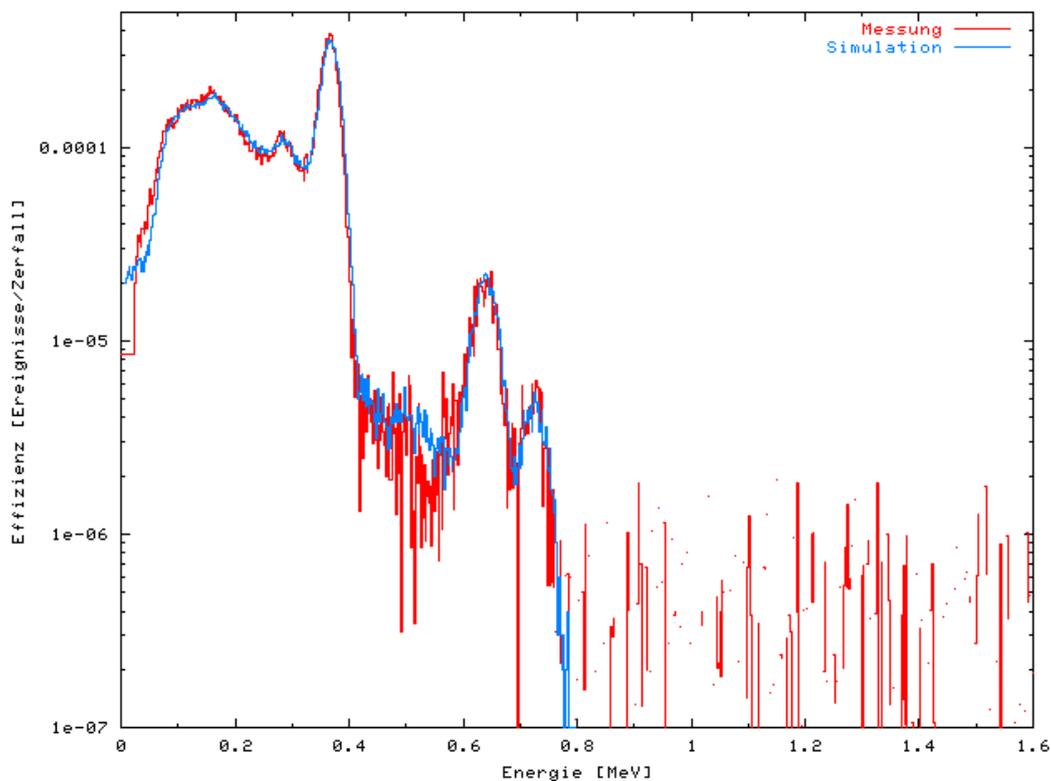


Abbildung B.2: ^{131}I -Spektrum im 70kg-Flaschenphantom.

Nuklid: ^{99m}Tc

Das metastabile Technetium-99m ($T_{1/2} \approx 6h$) ist das Arbeitspferd in der Nuklearmedizin. Es kann einfach aus sogenannten Generatoren als Zerfallsprodukt des ^{99}Mo gewonnen werden. Die 140keV -Photonen, die beim isomeren Übergang emittiert werden, sind in der Lage den Körper zu verlassen und können in den dünnen Kristallen einer Gammakamera nachgewiesen werden. Technetium wird daher für die Erstellung von Szintigrammen verwendet. Je nach verwendeter Trägersubstanz reichert sich das

Nuklid in verschiedenen Organen an. Als Per technetium kann es zur Szintigraphie der Schilddrüse eingesetzt werden.

Im Spektrum kann deutlich die $0,140\text{MeV}$ Gammaline ($P_\gamma = 89\%$) beobachtet werden.

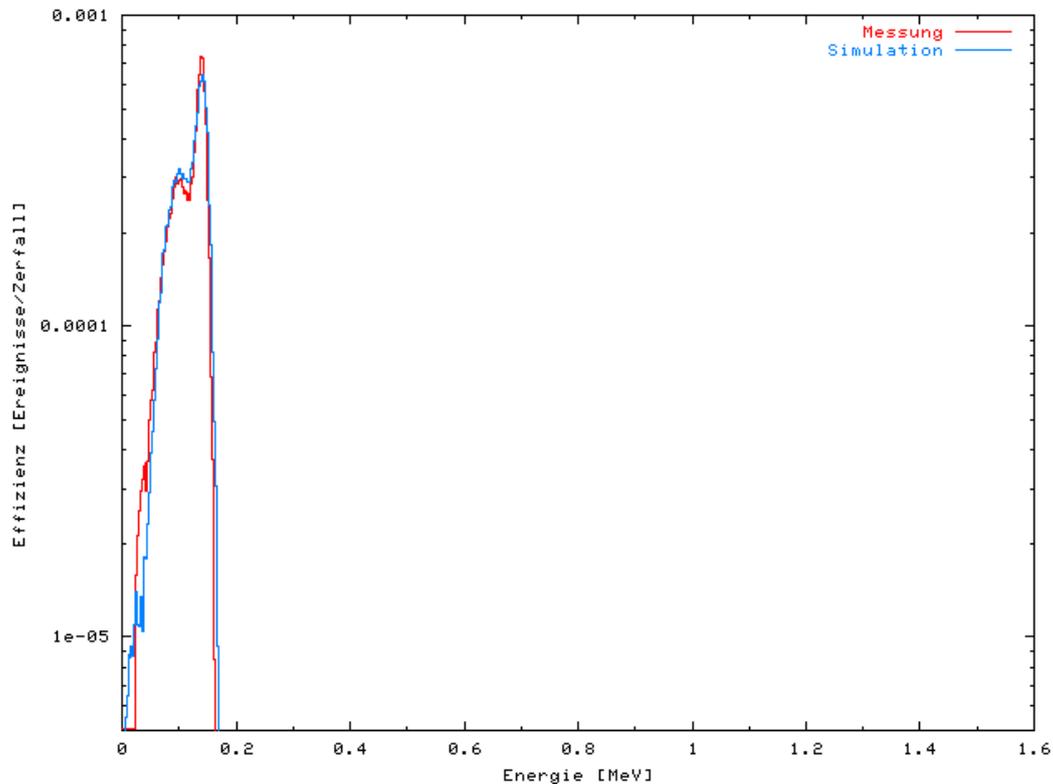


Abbildung B.3: ^{99m}Tc -Spektrum im 70kg-Flaschenphantom.

Nuklid: ^{18}F

Das Nuklid ^{18}F ist ein Positronenemitter. Es wird in der Nuklearmedizin zur Positronenemissionstomographie (PET) eingesetzt. Mit der Verbindung $[2\text{-}^{18}\text{F}]\text{-FDG}$, ein Derivat der Desoxyglucose, kann der Energiestoffwechsel des Körpers untersucht werden. Es kann zum Beispiel zur Metastasensuche eingesetzt werden, da Tumorzellen einen höheren Energieverbrauch besitzen als das umliegende Gewebe. Die Substanz ist in der Lage die Blut-Hirn-Schranke zu überwinden und kann daher auch zur Untersuchung des Hirnstoffwechsels eingesetzt werden. Das Nuklid ^{18}F wird durch Kernreaktionen am Zyklotron hergestellt.

Im Spektrum kann deutlich die $0,511\text{MeV}$ Gammaline der Annihilationsstrahlung beobachtet werden.

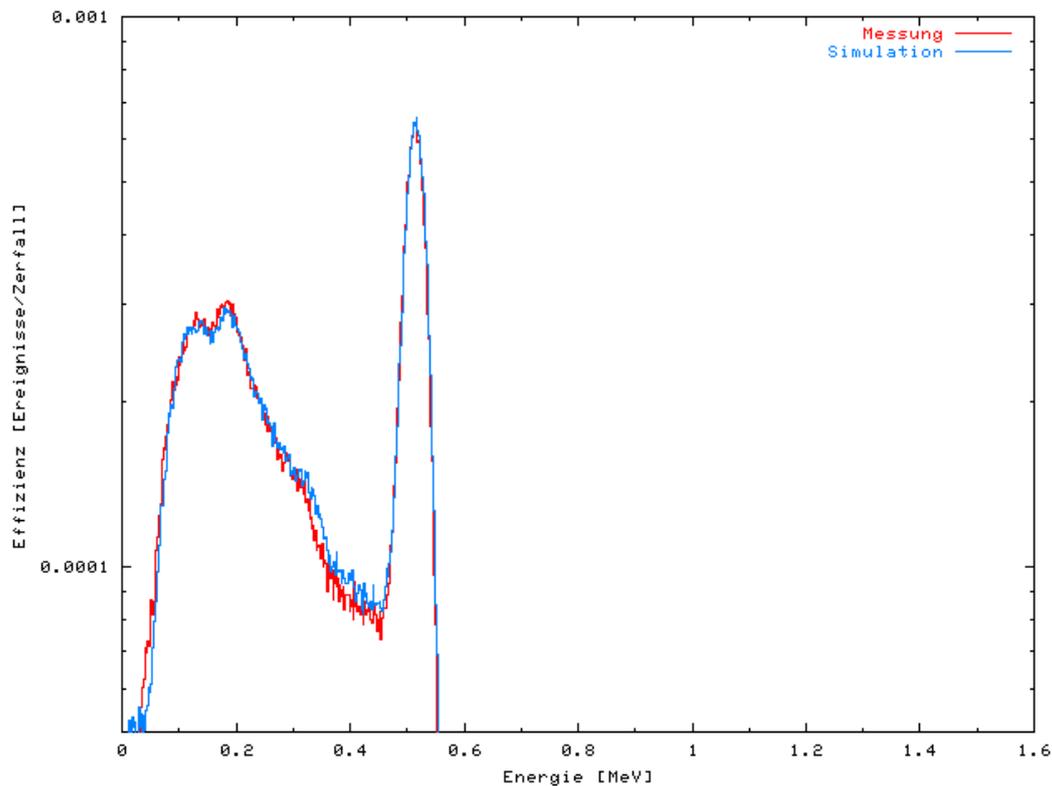


Abbildung B.4: ^{18}F -Spektrum im 70kg-Flaschenphantom.

ROI-Definition

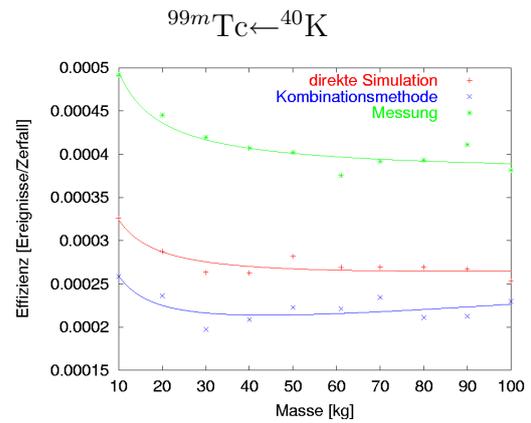
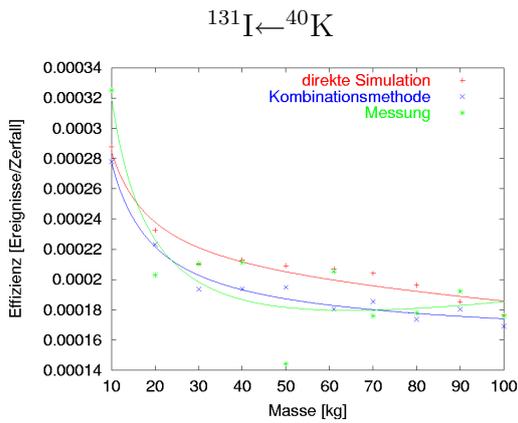
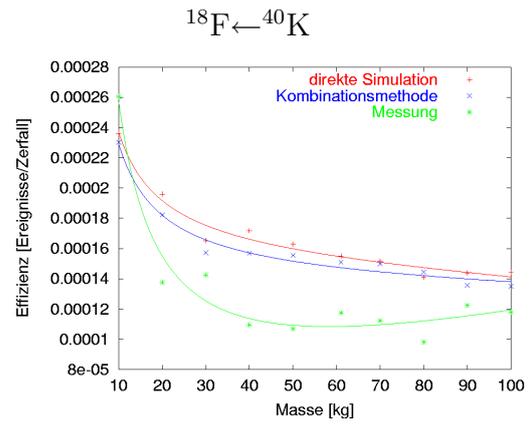
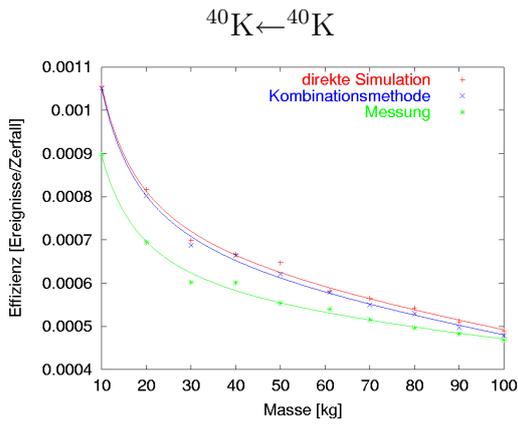
Die ROIs der Nuklide werden um die Linien mit der größten Emissionswahrscheinlichkeit gelegt. Die Breite der ROIs wird so gewählt, dass sie 2,5 Halbwertsbreiten des gemessenen Peaks umfasst. Man erhält für die oben vorgestellten Nuklide die ROIs:

```
# ROI-Definiton für Nuklide aus der Nuklearmedizin
# wichtige Nuklide: K-40:I-131:Tc-99m:F-18
# Index:Nuklidname:Untere Grenze:Obere Grenze:Peakzentrum
:Funktionstyp:2:
:Integrationsmethode:0:
1:K-40:1.37325:1.54810:1.46081
2:I-131:0.31619:0.41085:0.36448
3:Tc-99m:0.11163:0.17059:0.14051
4:F-18:0.45449:0.56751:0.511
```

ROI-Definitionen für die vorgestellten Nuklide.

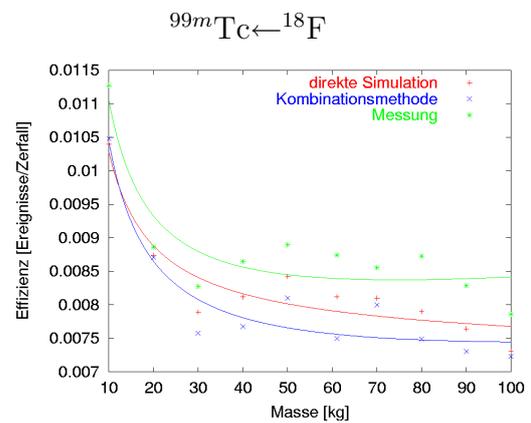
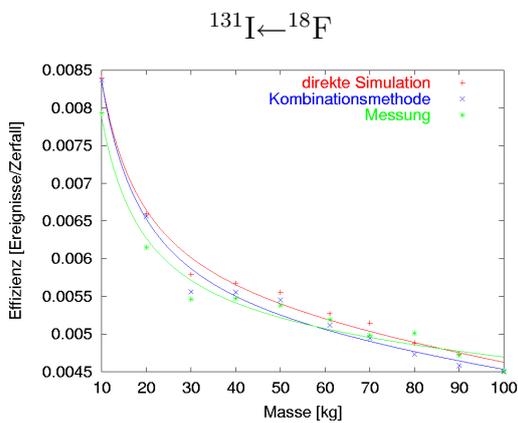
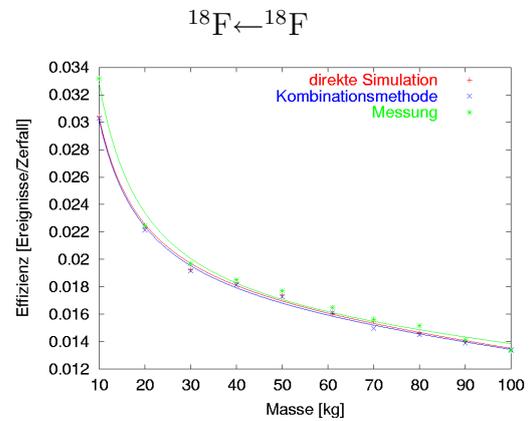
Kalibrierkurven

Die mit den verschiedenen Methoden gewonnenen Kalibrierkurven sind für die einzelnen Nuklide auf den folgenden Seiten gezeigt.

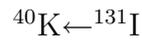


Kalibrierkurven für das Nuklid ^{40}K

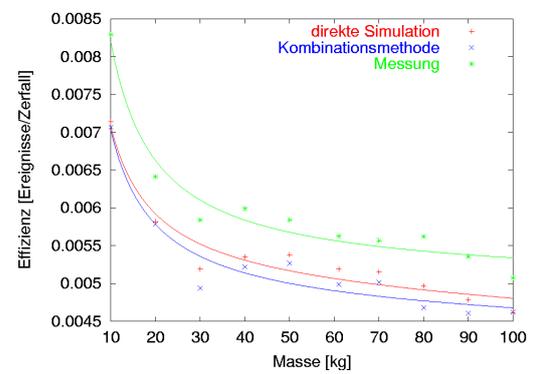
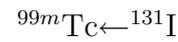
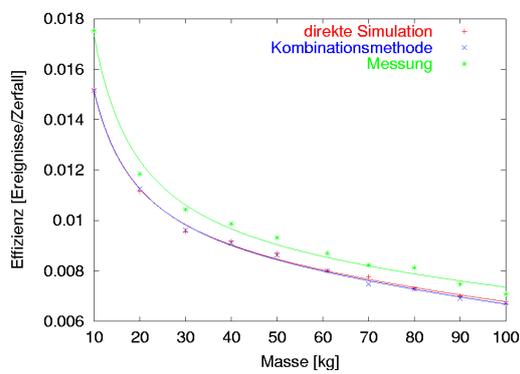
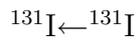
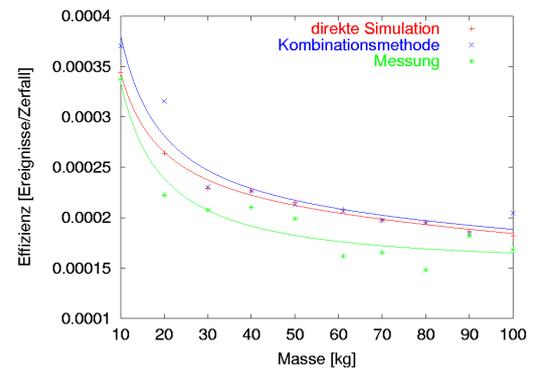
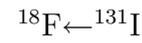
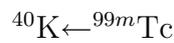
$^{40}\text{K} \leftarrow ^{18}\text{F}$
keine Einstreuung



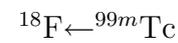
Kalibrierkurven für das Nuklid ^{18}F



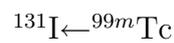
keine Einstreuung

Kalibrierkurven für das Nuklid ^{131}I 

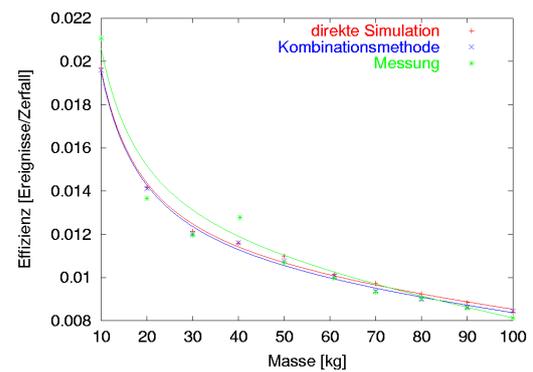
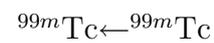
keine Einstreuung



keine Einstreuung



keine Einstreuung

Kalibrierkurven für das Nuklid ^{99m}Tc

Die Koeffizienten der dargestellten Kalibrierfunktionen sind in den folgenden Datenbankauszügen gezeigt.

```
# Nuklide aus der Nuklearmedizin - direkte Simulation
# Index:Nuklid:ROI:a:b:c
:Funktionstyp:2:
:Integrationsmethode:0:
1:K-40:K-40:0.00062267:0.00449059:-1.75546e-06
1:K-40:F-18:0.000152662:0.000860104:-2.00016e-07
1:K-40:I-131:0.000198047:0.000881875:-2.10947e-07
1:K-40:Tc-99m:0.000247242:0.000756232:1.01078e-07
2:F-18:K-40:0e0:0e0:0e0
2:F-18:F-18:0.0160115:0.146794:-3.96313e-05
2:F-18:I-131:0.00521333:0.0321928:-9.08152e-06
2:F-18:Tc-99m:0.00521333:0.0321928:-9.08152e-06
3:I-131:K-40:0e0:0e0:0e0
3:I-131:F-18:0.000195271:0.00149989:-2.60101e-07
3:I-131:I-131:0.00796296:0.073403:-1.92111e-05
3:I-131:Tc-99m:0.00486707:0.0221941:-2.8546e-06
4:Tc-99m:K-40:0e0:0e0:0e0
4:Tc-99m:F-18:0e0:0e0:0e0
4:Tc-99m:I-131:0e0:0e0:0e0
4:Tc-99m:Tc-99m:0.00986245:0.0994746:-2.32702e-05
```

```
# Nuklide aus der Nuklearmedizin - Kombinationsmethode
# Index:Nuklid:ROI:a:b:c
:Funktionstyp:2:
:Integrationsmethode:0:
1:K-40:K-40:0.000605485:0.0046026:-1.71108e-06
1:K-40:F-18:0.000137573:0.000923348:-8.76619e-08
1:K-40:I-131:0.000167397:0.00110202:-4.39197e-08
1:K-40:Tc-99m:0.000178944:0.000763369:3.99052e-07
2:F-18:K-40:0e0:0e0:0e0
2:F-18:F-18:0.0157416:0.147981:-3.78342e-05
2:F-18:I-131:0.00492856:0.0348707:-7.4501e-06
2:F-18:Tc-99m:0.00678971:0.0360035:2.95537e-06
3:I-131:K-40:0e0:0e0:0e0
3:I-131:F-18:0.000188097:0.00193823:-3.127e-07
3:I-131:I-131:0.00799622:0.0734166:-2.0491e-05
3:I-131:Tc-99m:0.00459379:0.024375:-1.59222e-06
4:Tc-99m:K-40:0e0:0e0:0e0
4:Tc-99m:F-18:0e0:0e0:0e0
4:Tc-99m:I-131:0e0:0e0:0e0
4:Tc-99m:Tc-99m:0.00972326:0.100325:-2.35469e-05
```

```
# Nuklide aus der Nuklearmedizin - Messungen
# Index:Nuklid:ROI:a:b:c
:Funktionstyp:2:
:Integrationsmethode:0:
1:K-40:K-40:0.000524967:0.00378399:-9.20807e-07
1:K-40:F-18:3.42767e-05:0.0021609:6.35882e-07
1:K-40:I-131:0.000119061:0.0019578:4.67575e-07
1:K-40:Tc-99m:0.00037772:0.00117315:-4.23624e-09
2:F-18:K-40:0e0:0e0:0e0
2:F-18:F-18:0.0148012:0.183007:-2.76895e-05
2:F-18:I-131:0.00481455:0.0308075:-4.24956e-06
2:F-18:Tc-99m:0.00741896:0.0355371:6.39801e-06
3:I-131:K-40:0e0:0e0:0e0
3:I-131:F-18:0.000142951:0.00190412:2.97305e-08
3:I-131:I-131:0.00783545:0.0964244:-1.44641e-05
3:I-131:Tc-99m:0.00508338:0.0310554:-5.46171e-07
4:Tc-99m:K-40:0e0:0e0:0e0
4:Tc-99m:F-18:0e0:0e0:0e0
4:Tc-99m:I-131:0e0:0e0:0e0
4:Tc-99m:Tc-99m:0.010912:0.100405:-3.78294e-05
```


Danksagung

Die vorliegende Dissertation wäre nicht zustande gekommen, wenn ich nicht breite Unterstützung und Hilfe gehabt hätte. An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben:

- Prof. Dr. J. Jolie und Prof. Dr. H. Schicha danke ich für die interessante Aufgabenstellung, sowie die Betreuung und Korrektur der Arbeit.
- Dem Leiter der Inkorporationsmesstelle Herrn Dr. W. Eschner danke ich für die umfassende Betreuung vor Ort, seine ständige Diskussionsbereitschaft, die viele Rechenzeit auf diversen Rechnern der Klinik und die sehr gute Zusammenarbeit in den letzten sieben Jahren.
- Der Universität zu Köln möchte ich für die Finanzierung dieses Projektes durch ein Stipendium danken.
- Meinen Eltern danke ich dafür, dass Sie mir das Studium der Physik ermöglicht und mich auf meinem Weg immer unterstützt haben.
- Den Mitgliedern der AG-Physik der Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin danke ich für die Unterstützung während der Durchführung der Messungen mit dem Ganzkörperzähler und die sehr gute Arbeitsatmosphäre in den sieben Jahren gemeinsamer Arbeit.
- Dr. W. Eschner, K. Sauer, Dipl.-Ing. M. Schmidt, Dr. F. Sudbrock und Dipl.-Ing. M. Wild danke ich dafür, dass Sie zusammen fast 1000 Seiten verschiedener Entwürfe dieser Arbeit fachlich und sprachlich korrektur gelesen haben.
- Meinem Bruder Bernd "Sherlock" Breustedt danke ich für seine Detektivarbeit in diversen Erlanger Bibliotheken auf der Suche nach [ICRU03].
- Mein besonderer Dank gilt meiner Freundin Katharina, die mir auch in der heißen Phase aufopferungsvoll den Rücken freigehalten hat und mich immer in liebevoller Weise unterstützt hat.

Erklärung

Ich versichere, daß ich die von mir vorgelegte Dissertation selbständig angefertigt, die benutzten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben und die Stellen der Arbeit - einschließlich Tabellen, Karten und Abbildungen -, die anderen Werken im Wortlaut oder Sinn nach entnommen sind, in jedem Einzelfall als Entlehnung kenntlich gemacht habe; daß diese Dissertation noch keiner anderen Fakultät oder Universität zur Prüfung vorgelegen hat; daß sie - abgesehen von unten angegebenen Teilpublikationen - noch nicht veröffentlicht worden ist sowie, daß ich solche Veröffentlichungen vor Abschluß des Promotionsverfahrens nicht vornehmen werde. Die Bestimmungen dieser Promotionsordnung sind mir bekannt. Die von mir vorgelegte Dissertation ist von Herrn Prof. Dr. J. Jolie betreut worden.

Teilpublikation:

Breustedt B, Paetz gen. Schieck H, Schicha H, Eschner W: Kalibration eines Ganzkörperzählers mit Monte-Carlo-Methoden, Z Med Phys **14**(2004) 85-94

Konferenzbeiträge:

Breustedt B, Eschner W, Schicha H:

Jahrestagung der deutschen Gesellschaft für Nuklearmedizin, Essen 2003

Breustedt B, Eschner W:

Jahrestagung der deutschen Gesellschaft für medizinische Physik, Heidelberg 2003

Breustedt B, Eschner W:

Jahrestagung der deutschen Gesellschaft für medizinische Physik, Leipzig 2004

Lebenslauf

Name: Breustedt
Vorname: Bastian
geboren: 17.07.1975 in Koblenz
Mutter: Helga Gries-Breustedt, geb. Gries
Vater: Heinz Breustedt
Familienstand: ledig
Staatsangehörigkeit: deutsch

Schulbildung:

1981 - 1983 Loreleyschule St. Goarshausen
1983 - 1985 Goetheschule Lahnstein
1985 - 1994 Johannesgymnasium Lahnstein
Juni 1994 Abitur

Studium:

WS 1995/96 Beginn des Physikstudiums an der Universität zu Köln
März 2001 Beginn der Diplomarbeit im Institut für Kernphysik
der Universität zu Köln und der Klinik und Poliklinik für
Nuklearmedizin des Klinikums der Universität zu Köln
mit dem Thema:
"Kalibrierung eines Ganzkörperzählers mit
Monte-Carlo-Methoden"
März 2002 Abschluß der Diplomarbeit
April 2002 Beginn der Promotion in Experimentalphysik