

# **Aktivitätsbestimmung von Gamma-Emittern in großvolumigen Objekten**

**Angelika Elhardt**

Vollständiger Abdruck der von der  
Fakultät für Physik der Technischen Universität München  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)  
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. W. Weise

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. P. Böni
2. Univ.-Prof. Dr. A. Türler

Die Dissertation wurde am 23.03.2006 bei der  
Technischen Universität München eingereicht und durch  
die Fakultät für Physik am 06.04.2006 angenommen.



# Zusammenfassung

Durch ein neu entwickeltes Auswerteverfahren bei der zerstörungsfreien Charakterisierung von radioaktiven Abfällen konnten Richtigkeit und Genauigkeit des nuklid-spezifischen, Gamma-Strahlung emittierenden Aktivitätsinventars eines großvolumigen Untersuchungsobjekts verbessert werden. Die in der Praxis der radioaktiven Abfallkontrolle eingesetzten Auswerteverfahren liefern nicht in jedem Fall ein genaues und richtiges Ergebnis, weil häufig Bedingungen, die den angewendeten Auswerteverfahren zugrunde liegen, nicht erfüllt sind. Oft reichen auch die vorhandenen Informationen zu einem Objekt nicht zu dessen exakten Charakterisierung aus, oder es werden nicht alle verfügbaren Informationen in eine Auswertung mit einbezogen, wobei auch eine einheitliche und fundierte Bestimmung der Genauigkeit nicht exakt bestimmter Größen fehlt.

Das neu entwickelte Auswerteverfahren beruht auf der konsequenten Einbeziehung aller direkt oder indirekt zur Verfügung stehender Informationen zu einem Messobjekt. Das Ergebnis der Auswertung sind die Erwartungswerte der nuklidspezifischen Aktivitäten des Gamma-Strahlen emittierenden radioaktiven Inventars im Untersuchungsobjekt sowie die zugehörigen Vertrauensbereiche, die auf der Basis der Unvollständigkeit der vorhandenen Informationen ermittelt werden.

Das Konzept des Auswerteverfahrens beruht auf einem modularen Aufbau und verlangt, dass zumindest eine Oberflächenzählratenverteilung aus einer segmentierten Gamma-Emissionsmessung vorliegt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Methoden entwickelt, um aus vorliegenden Messdaten Informationen zu extrahieren, auf deren Grundlage Modellbeschreibungen des Untersuchungsobjekts erstellt werden. Aus dem Ergebnis einer segmentierten Gamma-Emissionsmessung können für zylindrische Messobjekte Parameterdatensätze abgeleitet werden, auf deren Basis mögliche Verteilungen der Radionuklide innerhalb des Untersuchungsobjekts modelliert werden. Bei der Erstellung der Parameterdatensätze wird zwischen homogener und heterogener Zählratenverteilung an der Oberfläche des Objekts unterschieden. Anhand der Ergebnisse einer Gamma-Transmissionsmessung wie Digitale Radiographie oder "Einfache Transmission durch die Symmetrieachse des Messobjekts" können Behälter und innere Struk-

turen eines zylindrischen Messobjekts identifiziert und quantifiziert werden, d. h. ihre geometrischen Parameter wie Abmessungen und Lage im Raum, sowie ihre linearen Schwächungskoeffizienten ermittelt werden. Dazu stehen Modellfunktionen auf der Grundlage des exponentiellen Schwächungsgesetzes zur Verfügung, mit denen vorhandene Messdaten – das Produkt aus linearem Schwächungskoeffizient und Durchdringungslänge – angenähert werden. Ergänzend können weitere Informationen wie z. B. geometrische Abmessungen des Behälters und seine Materialzusammensetzung, sowie die aus einer Wägung ermittelte Bruttomasse etc. berücksichtigt werden. Hierzu werden diese Informationen zum Teil miteinander verknüpft, um abgeleitete Größen, wie z. B. die mittlere Dichte des Inhalts oder des Behälters, zu bestimmen.

Auf der Grundlage aller verfügbarer Informationen werden mögliche Modellbeschreibungen des Untersuchungsobjekts erstellt, für die jeweils die vorliegende Gamma-Emissionsmessung durch Simulation nachgebildet wird. Der Vergleich zwischen gemessenen und entsprechend simulierten Daten entscheidet über die Akzeptanz jeder einzelnen Modellbeschreibung. Aus allen Aktivitätswerten, die auf der Basis von akzeptierten Modellbeschreibungen ermittelt werden, wird der Erwartungswert und der zugehörige Vertrauensbereich des nuklidspezifischen Aktivitätsinventars des Untersuchungsobjekts bestimmt. Als zusätzliches Ergebnis wird eine Liste möglicher Objektzusammensetzungen, die mit den vorliegenden Informationen verträglich sind, erstellt. Die Anzahl der verschiedenen möglichen Objektzusammensetzungen spiegelt die Unmöglichkeit wider, ein Objekt in der Praxis auf der Grundlage der verfügbaren Informationen exakt zu beschreiben.

Das neue Auswerteverfahren konnte erfolgreich an einem komplexen realen Abfallgebilde angewendet werden. Es wurde eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem ermittelten Aktivitätsintervall für das Radionuklid  $^{60}\text{Co}$  und dem durch zerstörende Analyse bestimmten Aktivitätswert gefunden.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>iii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand von Wissenschaft und Technik</b>	<b>5</b>
2.1 Emissionsmessungen . . . . .	6
2.1.1 Messverfahren . . . . .	6
2.1.2 Auswerteverfahren . . . . .	12
2.2 Transmissionsmessungen . . . . .	17
2.2.1 Messverfahren . . . . .	17
2.2.2 Auswerteverfahren . . . . .	22
2.3 Kombinierte Messungen . . . . .	29
2.3.1 Vielfachscheiben-Scan mit Transmissionskorrektur . . . . .	29
2.3.2 Emissions-Computer-Tomographie . . . . .	32
2.4 Zusammenfassung . . . . .	32
2.5 Charakterisierung radioaktiver Abfälle in Europa . . . . .	33
<b>3 Problematik</b>	<b>37</b>
3.1 Richtigkeit und Genauigkeit . . . . .	37
3.2 Auswertung unter Routinebedingungen . . . . .	38
3.3 Zusammenfassung . . . . .	40
3.4 Lösungsvorschlag . . . . .	41
3.5 Konzept . . . . .	42
<b>4 Bereitstellung von Informationen</b>	<b>47</b>
4.1 Auswertung von Gamma-Emissionsmessungen . . . . .	47
4.1.1 Integrale Gamma-Emissionsmessungen . . . . .	47
4.1.2 Segmentierte Gamma-Emissionsmessungen . . . . .	48
4.2 Auswertung von Gamma-Transmissionsmessungen . . . . .	73
4.2.1 Hochauflösende Digitale Radiographie . . . . .	74

4.2.2	Nicht-hochauflösende Digitale Radiographie . . . . .	98
4.2.3	Auswertung in vertikaler Richtung . . . . .	105
4.2.4	Einfache Transmissionsmessung . . . . .	109
<b>5</b>	<b>Bestimmung der Aktivität</b>	<b>113</b>
5.1	Prinzipielles Vorgehen . . . . .	113
5.1.1	Objekterzeugung . . . . .	113
5.1.2	Aktivitätsbestimmung . . . . .	114
5.1.3	Auswahl über Güteparameter . . . . .	118
5.2	Praktische Vorgehensweise . . . . .	119
5.2.1	Vorgehen bei homogener Aktivitätsverteilung . . . . .	119
5.2.2	Vorgehen bei heterogener Aktivitätsverteilung . . . . .	147
<b>6</b>	<b>Experimenteller Teil</b>	<b>165</b>
6.1	Gamma-Detektor . . . . .	165
6.1.1	Beschreibung . . . . .	165
6.1.2	Simulation . . . . .	165
6.2	Fass mit Bleibehälter . . . . .	166
6.2.1	Zur Verfügung stehende Informationen . . . . .	166
6.2.2	Auswertung der Messergebnisse . . . . .	172
6.2.3	Objekterzeugung . . . . .	177
6.2.4	Modellbewertung und Aktivitätsbestimmung . . . . .	181
6.2.5	Auswertung nach Filß . . . . .	195
6.2.6	Vergleich und Bewertung der Ergebnisse . . . . .	195
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>199</b>
<b>A</b>	<b>Liste der verwendeten Abkürzungen</b>	<b>203</b>
<b>B</b>	<b>Führende europäische Messzentren</b>	<b>205</b>
<b>C</b>	<b>Das Programm SWGamma</b>	<b>207</b>
<b>D</b>	<b>Singulärwertzerlegung</b>	<b>215</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>217</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

Die Bestimmung von Gamma-Aktivitäten in Objekten kann aus den verschiedensten Gründen notwendig sein, doch ist die Problematik dabei immer ähnlich. Zur Bestimmung der Aktivitäten ist zum einen die Identifizierung der im Objekt enthaltenen Radionuklide und zum anderen die Bestimmung ihrer nuklidspezifischen Aktivitäten erforderlich. Manchmal interessieren auch nicht die absoluten Werte der Aktivitäten, sondern nur ihre Verteilung innerhalb eines vorliegenden Objekts.

Die besondere Problematik bei *großvolumigen* Objekten wird im Folgenden dargestellt. Im Rahmen dieser Arbeit sollen Objekte als großvolumig verstanden werden, wenn die Schwächung der im Objekt emittierten Strahlung durch das im Objekt vorliegende Material nicht mehr vernachlässigt werden kann. Oft ist es unerwünscht oder schlicht unmöglich, Teilproben aus einem Untersuchungsobjekt zu entnehmen, um daran die Aktivitätsbestimmung vorzunehmen und daraus auf die Gesamtaktivität im ganzen Objekt zu schließen. Es müssen Methoden zur Verfügung stehen, großvolumige Objekte als Ganzes zu vermessen und das Messergebnis entsprechend der vorliegenden Matrix auszuwerten. Nachdem die aus dem betrachteten Objekt austretende Strahlung in einem geeigneten Detektorsystem in Form von Impulsen pro Zeit (entspricht einer Zählrate) gemessen ist, muss für die quantitative Auswertung der korrekte Zusammenhang zwischen Zählrate und zugehöriger nuklidspezifischer Aktivität bekannt sein. Dazu müssen alle Effekte, die dazu beitragen, dass nur ein Bruchteil der von einer Quelle emittierten Strahlung in einem Detektor registriert wird, bekannt und in der Auswertung berücksichtigt werden. Von der radioaktiven Quelle unabhängige Effekte wie die Eigenschaften des Messsystems, also der Einfluss von Kollimator und Abschirmung oder die endliche Größe des Detektors, sowie die Messgeometrie, also der Abstand zwischen Messobjekt und Detektor, können durch Kalibrationsmessungen quantifiziert werden. Für ausgedehnte Objekte muss zusätzlich die Absorption in

der inaktiven Matrix<sup>(1)</sup> und die Selbstabsorption, d. h. die Absorption in der aktiven Matrix, berücksichtigt werden. Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten: Denkbar sind Kalibrationsmessungen mit Objekten, die im Aufbau, also Größe und chemischer Zusammensetzung identisch zum jeweiligen realen Untersuchungsobjekt sein müssen. Sind die Eigenschaften des Untersuchungsobjekts exakt bekannt, so kann die Schwächung der Strahlung beim Durchgang durch das Untersuchungsobjekt auch durch ein mathematisches Modell in die Auswertung mit einfließen. Es zeigt sich auf jeden Fall, dass die entscheidende Herausforderung bei der Aktivitätsbestimmung von großvolumigen Objekten die Korrektur der Schwächung der Gamma-Strahlung durch die Matrix darstellt, die die Kenntnis der Verteilung der Gamma-Aktivitäten sowie die der chemischen Zusammensetzung und der Verteilung der Matrix im Untersuchungsobjekt voraussetzt. Die Problematik dabei und mögliche Lösungen dazu werden in dieser Arbeit anhand dem Beispiel von radioaktiven Abfällen diskutiert.

Als Verursacher radioaktiver Abfälle gelten Kernkraftwerke, radiochemische Labore, nuklearmedizinische Institute, Beschleunigeranlagen, technische Betriebe, rückzubauende kerntechnische Anlagen und andere. So verschieden die beispielhaft aufgelisteten "Produzenten" von radioaktivem Abfall sind, so verschieden ist der anfallende Abfall in seiner Zusammensetzung und in seinem Aktivitätsinventar. Die Liste reicht von abgebrannten Brennelementen, kontaminiertem Laborabfall, ausgedienten Kalibrationsquellen über Elektronikschrott zu aktivierten Baumaterialien. Die Konditionierung dieses Rohabfalls, z. B. Verbrennen, Verpressen, Einbetonieren, u. a. verursacht Endprodukte, die sich in chemischer Zusammensetzung, also Material und Dichte<sup>(2)</sup>, sowie in der Verteilung des radioaktiven Inventars und der Matrix unterscheiden. Die Entsorgung radioaktiven Abfalls erfolgt durch die Lagerung an dafür ausgewiesenen Orten. Dafür legt jedes Land individuell Spezifikationen fest, denen der Abfall genügen muss. Um die Einhaltung der Spezifikationen zu gewährleisten wird von den Abfallerzeugern eine genaue Deklaration<sup>(3)</sup> ihrer Objekte verlangt und diese zumindest stichpunktartig von offiziellen Kontrollstellen überprüft. In Tab. 1.1 sind einige Beispiele für typische Behälter, die zur Verpackung von radioaktiven Abfällen verwendet werden, aufgelistet, wobei im Rahmen dieser Arbeit nur zylindrische Abfallgebinde untersucht werden.

---

<sup>(1)</sup>Unter inaktiver Matrix soll im Weiteren ein Material oder eine Materialzusammensetzung, die selbst keine Gamma-Strahlung emittiert und in dem Gamma-Strahlen emittierende Radionuklide verteilt sein können, verstanden werden. Unter aktiver Matrix versteht man folglich jegliche Materialzusammensetzung, die Gamma-Strahlen emittiert.

<sup>(2)</sup>In der Praxis treten für gewöhnliche radioaktive Abfälle maximale Dichtewerte von etwa  $3 \text{ g/cm}^3$  auf.

<sup>(3)</sup>Es wird vermehrt versucht, Messungen direkt am Rohabfall – vor einer Konditionierung – durchzuführen, da diese einfacher und genauer sind.

**Tabelle 1.1:** Übersicht einiger Behälter zur Verpackung von radioaktiven Abfällen [1], [2].

Behälter	Nutz- Volumen	Material	Leer- masse	max. Masse	Höhe	Durch- messer	Wand- stärke
	in m <sup>3</sup>		in kg		in mm		
200 L-Fass <sup>a</sup>	0,20	Stahl	55	1055	850	560	30,5
280 L-Fass	0,28	Stahl	75	1300	910	640	32,5
400 L-Fass	0,40	Stahl	75	1300	1035	710	32,5
570 L-Fass	0,57	Stahl	112	1300	1200	800	30,5
Mosaik <sup>b</sup>	0,50	Gusseisen mit Bleiabschirm.	6530	k. A. <sup>c</sup>	1170	740	160
5 L-Flasche	5·10 <sup>-3</sup>	Polyethylen	0,3	6	220	160	1
20 L-Flasche	50·10 <sup>-3</sup>	Polyethylen	2	k. A.	620	350	1
Container	31,4	Stahl	4,1·10 <sup>3</sup>	26·10 <sup>3</sup>	2591	<sup>d</sup>	k. A.

<sup>a</sup>Die Abmessungen aller Fässer beziehen sich jeweils auf den Typ *Rollsicke*.

<sup>b</sup>Hier ist beispielhaft der Behälter "MOSAIK II-16" aufgeführt.

<sup>c</sup>keine Angabe

<sup>d</sup>Länge x Breite: 6058 mm x 2438 mm

Eine Auswahl an Messverfahren, die für die Charakterisierung von radioaktiven Abfällen zur Verfügung stehen, wird im nächsten Kapitel vorgestellt. Eng mit den Messmethoden verknüpft sind die zugehörigen Auswerteverfahren, die kurz beschrieben werden. Ihr eingeschränkter Anwendungsbereich und die damit verbundene Problematik wird in Kapitel 3 aufgeführt. Als Lösung wird ein neu entwickeltes Auswerte- und Analyseverfahren vorgestellt, dessen grundsätzliches Konzept in Kapitel 3 beschrieben wird. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Routinen für das Verfahren werden in den Kapiteln 4 sowie 5 detailliert erläutert und ihre Anwendung anhand von Beispielen demonstriert. Die Auswertung eines realen komplexen Abfallgebundes wird in Kapitel 6 durchgeführt und mit Ergebnissen der "traditionellen" Auswertemethoden aus Kapitel 2 verglichen. In einem kurzen Ausblick in Kapitel 7 werden die weiteren Arbeiten aufgeführt, die nötig sind, um das neu entwickelte Auswerteverfahren weiter zu optimieren und es als Routineauswertung in die vorhandenen Untersuchungsaufgaben einzubinden.



# Kapitel 2

## Stand von Wissenschaft und Technik

Für die quantitative Charakterisierung radioaktiver Abfälle stehen prinzipiell zwei verschiedene Methoden zur Verfügung: zerstörende und zerstörungsfreie Messungen. Bei zerstörungsfreien Verfahren werden Informationen über das Untersuchungsobjekt gewonnen ohne dabei das Objekt zu beschädigen. Für zerstörende Untersuchungen wird ein Teil des gesamten Objekts verwendet, um daran radiochemische Analysen durchzuführen, wobei dabei immer die Ungewissheit bleibt, wirklich eine repräsentative Probe entnommen zu haben. Auch wenn auf zerstörende Messverfahren nicht vollständig verzichtet werden kann, werden für den Routinebetrieb der Abfallcharakterisierung überwiegend zerstörungsfreie Methoden, die mit wenigen Ausnahmen (siehe Abschnitt 2.3.2) die folgenden Vorteile bieten, eingesetzt.<sup>(1)</sup>

- Minimierung der Strahlenbelastung für das Bedienpersonal
- Minimierung der Entstehung von zusätzlichem radioaktiven Abfall durch die Untersuchung
- Minimierung von Zeit- und Kostenaufwand

Um ein radioaktives Objekt, z. B. einen mit radioaktivem Abfall befüllten Behälter, vollständig charakterisieren zu können, müssen Informationen über die enthaltenen, ionisierende Strahlen emittierende Nuklide, ihre Verteilung(en) in der aktiven Matrix und die Materialzusammensetzung der aktiven Matrix sowie Informationen über die Verteilung und Zusammensetzung der inaktiven Matrix gewonnen werden. Dazu stehen verschiedene zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden zur Verfügung, die sich prinzipiell in zwei Gruppen einteilen lassen (siehe Tab. 2.1). Mittels der einen Gruppe erhält

---

<sup>(1)</sup>Auf zerstörende Messverfahren wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

man Informationen über das radioaktive Inventar und durch die andere Gruppe gewinnt man Auskunft über die Matrix. In den nächsten Abschnitten werden die Grundzüge

**Tabelle 2.1:** *Prinzipielle Unterteilung der zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden.*

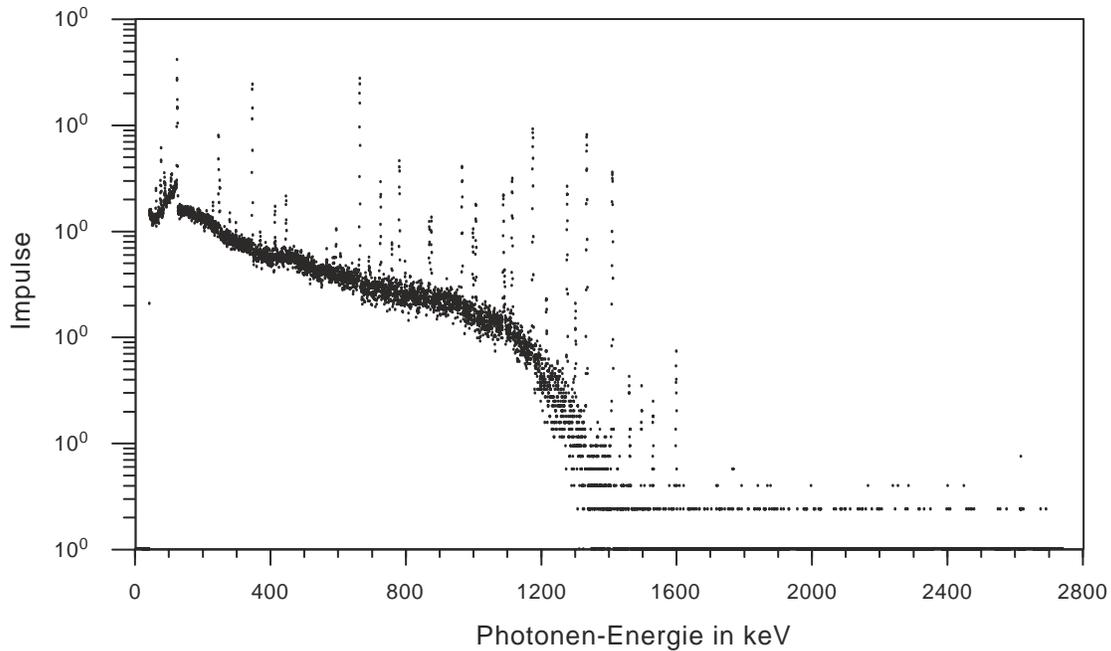
Methode	Aussage über
Emissionsmessungen	Verteilung der Radionuklide
Transmissionsmessungen	Verteilung der Matrix

der Emissions- und der Transmissionsmessung vorgestellt, wobei auf einzelne Messverfahren sowie Auswerteverfahren dazu und die damit verbundenen Näherungen und Einschränkungen eingegangen wird. Dosisleistungsmessungen sowie Neutronenmessungen werden innerhalb der Arbeit nicht behandelt. Abschnitt 2.5 bietet eine Übersicht über offizielle Institutionen in Europa, die sich mit der Charakterisierung radioaktiver Abfälle beschäftigen.

## 2.1 Emissionsmessungen

### 2.1.1 Messverfahren

Instabile Nuklide zerfallen unter Aussendung ionisierender Strahlung oder durch spontane Spaltung in leichtere Bruchstücke. Meistens entsteht bei der Emission ionisierender Teilchen, wie z. B.  $\alpha$ -,  $\beta^+$ -,  $\beta^-$ -Teilchen, ein angeregter Zwischenkern, der erst durch Abgabe von elektromagnetischer Strahlung in seinen Grundzustand übergeht. Bei Emissionsmessungen an radioaktiven Abfallbinden wird diese elektromagnetische Strahlung von geeigneten Detektoren nachgewiesen. Grundsätzlich kommt dabei Röntgenstrahlung, die durch die Wechselwirkung emittierter Gamma-Strahlen mit der Umgebung wie z. B. dem Abschirmmaterial des Detektorsystems entsteht, sowie Gamma-Strahlung in Frage. Alpha- und Beta-Strahlung können wegen ihrer geringen Reichweite übliche Abfallbinde nicht verlassen. Durch den Nachweis der für ein Radionuklid charakteristischen Linien der Gamma-Strahlung lässt sich ein Nuklid eindeutig identifizieren. Das für die Untersuchung radioaktiver Abfälle zu betrachtende Energieintervall emittierter Gamma-Strahlung erstreckt sich etwa von 50 keV bis 2800 keV. Um die Identifizierung mehrerer verschiedener Nuklide in einem komplexen Gamma-Spektrum, wie es beispielhaft in Abb. 2.1 abgebildet ist, zu ermöglichen, sind Detektoren mit hoher Energieauflösung nötig. Bevorzugt kommen dabei Halbleiterdetektoren wie z. B. der Reinstgermanium-Detektor (HPGe – high purity germanium detector) zum Einsatz.



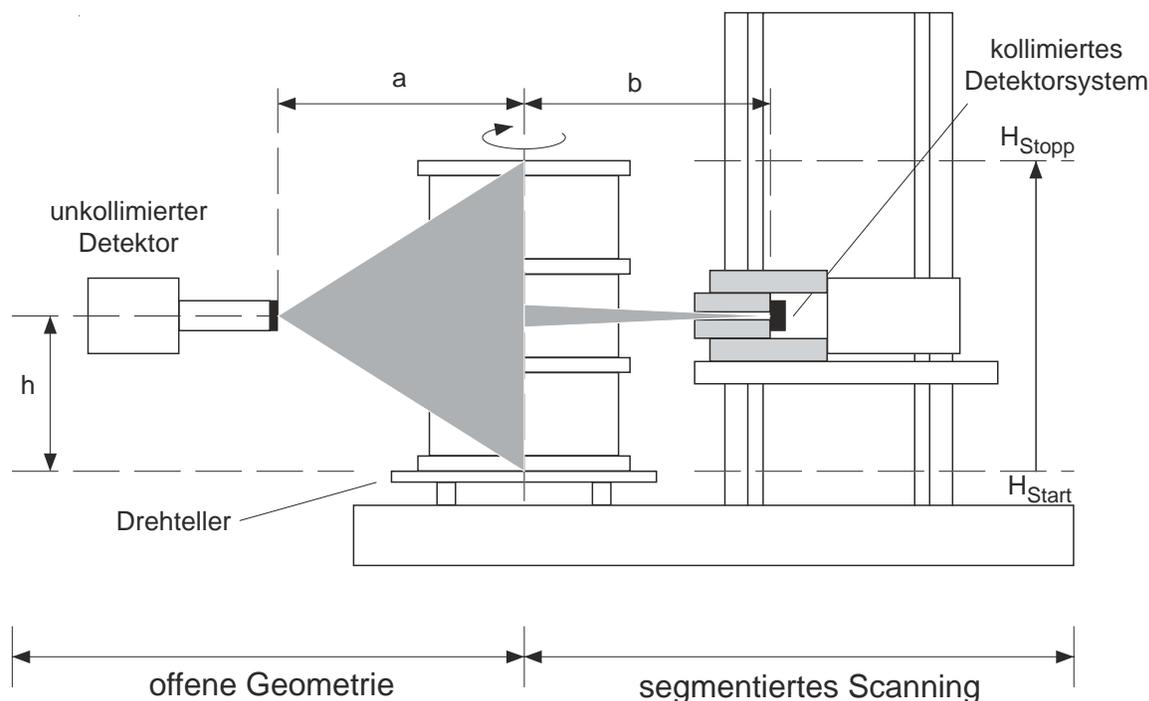
**Abbildung 2.1:** Beispiel für ein komplexes Gamma-Spektrum.

Die endliche Ausdehnung des Detektorkristalls sorgt für einen kontinuierlichen Untergrund an Ereignissen bekannt als Comptonuntergrund. Dieser Effekt sowie die Schwächung von Gamma-Strahlung durch Materie, die mit zunehmender Materialdichte und abnehmender Energie zunimmt (Details dazu siehe Abschnitt 2.2.2), sind Ursachen für den oft schwierigen oder sogar unmöglichen Nachweis von Radionukliden, die nur Gamma-Strahlen niedriger Energie aussenden, im Abfallgebinde nur in geringer Konzentration vorkommen oder z. B. hinter zusätzlichen Abschirmstrukturen liegen.

Im folgenden Abschnitt werden verschiedene Arten der Gamma-Messung beschrieben, die bei der Charakterisierung von radioaktiven Abfällen zum Einsatz kommen.

### Integrale Gamma-Messung

Unter dem integralen Gamma-Scanning (IGS) versteht man die Detektion von Gamma- oder Röntgenstrahlung in der so genannten offenen Geometrie. Dabei ist der Detektor so ausgerichtet, dass er gleichzeitig die aus dem gesamten Untersuchungsobjekt emittierte Strahlung registriert und Strahlung aus der Umgebung ausblendet (siehe Abb. 2.2 linke Seite). Üblicherweise wird dabei das zu messende Objekt bezüglich des ortsfesten Detektors gedreht, um über radiale Inhomogenitäten der verteilten Aktivität zu mitteln. Das Ergebnis einer IGS-Messung, ein Gamma-Spektrum vergleichbar mit dem Summenspektrum aus dem segmentierten Gamma-Scanning, dient der Identifizierung

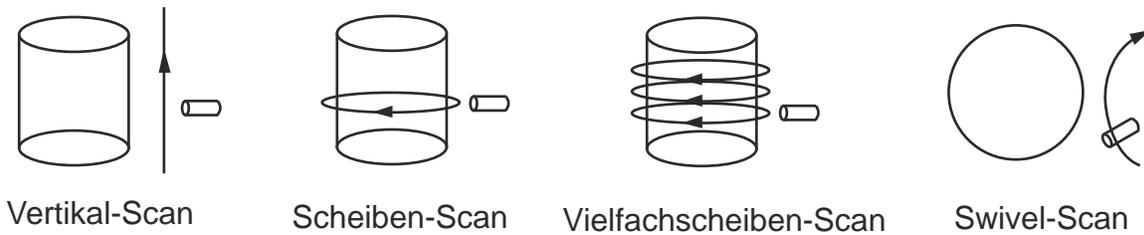


**Abbildung 2.2:** *Integrales (links) und segmentiertes (rechts) Gamma-Scanning.*

von Radionukliden. Über die räumliche Verteilung von Nukliden kann keine Aussage getroffen werden. Wird auf die Rotation des Untersuchungsobjekts verzichtet, so stellt diese Art der Gamma-Messung die Methode mit dem geringsten apparativen Aufwand dar, die allerdings auch die am wenigsten belastbaren Aussagen über den Inhalt des Untersuchungsobjekts zulässt.

### Segmentiertes Gamma-Scanning

Beim segmentierten Gamma-Scanning (SGS) wird durch einen Kollimator das Volumen des Untersuchungsobjekts, aus dem Gamma-Strahlen zum Detektor gelangen können und zum Messsignal beitragen, eingeschränkt (siehe Abb. 2.2 rechte Seite). Dabei hängt die Größe dieses Volumens von der Öffnungsfläche des Kollimators, vom Abstand zwischen Detektorsystem und Messobjekt sowie von den Abmessungen des Detektorkristalls ab. Um verschiedene Teilvolumina des Messobjekts zu untersuchen, kann der interessierende Teil oder auch das ganze Objekt abgetastet werden, indem Objekt und/oder Detektorsystem relativ zueinander bewegt werden und für jede Position des Detektors bezüglich des Messobjekts (Messposition) ein Gamma-Spektrum aufgenommen wird. Aus der Addition aller Einzelspektren ergibt sich ein Summenspektrum, auf dessen Basis die Identifizierung der Radionuklide erfolgen kann. Nuklide, die nur



**Abbildung 2.3:** Schematische Darstellung der Bewegungsabläufe verschiedener Scan-Arten.

lokal und in geringer Konzentration vorkommen und deswegen im Summenspektrum eventuell im Untergrund verschwinden, können anhand der Einzelspektren identifiziert werden. Aus den Einzelspektren lässt sich außerdem die räumliche Verteilung einzelner Nuklide projiziert auf die Außenseite des Messobjekts gewinnen.

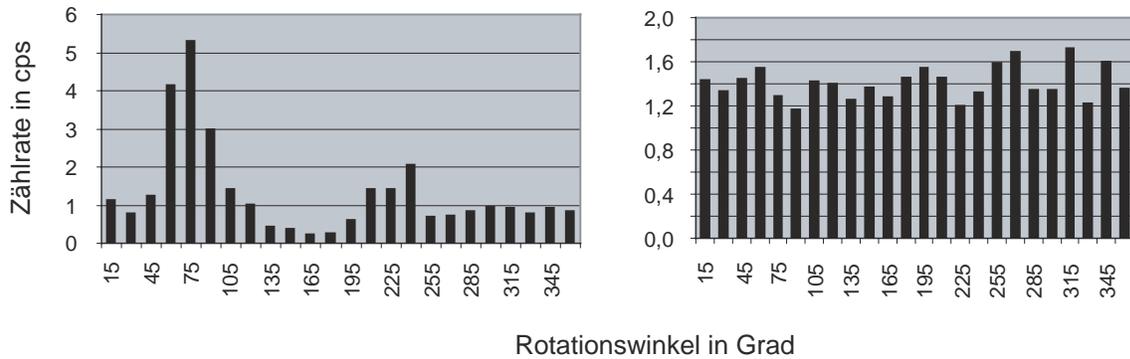
Im Folgenden werden Betriebsarten des SGS, die bei der Charakterisierung radioaktiver Abfälle zum Einsatz kommen, beschrieben [3]. Sie beziehen sich auf ein Messsystem, bei dem das Untersuchungsobjekt Rotationsbewegungen und der Detektor horizontale, vertikale, sowie Schwenkbewegungen ausführen kann. In Abb. 2.3 sind dazu die Bewegungsabläufe von Detektorsystem und Untersuchungsobjekt schematisch dargestellt. Eine Rotationsbewegung wird dabei in *Sektoren*, eine Bewegung in der Höhe in *Segmente* und eine Bewegung in der Horizontalen in *Schritte* unterteilt.

#### *Vertikal-Scan*

Beim Vertikal-Scan führt das Objekt keine Rotationsbewegung aus, nur der Detektor wird in der Höhe verfahren. Die Höhenbewegung beginnt in der Höhe  $h_{\text{start}}$  und endet mit der Höhe  $h_{\text{stop}}$  und wird in  $N_{\text{hoehe}}$  äquidistante Messpositionen (Segmente) unterteilt, für die jeweils ein komplettes Einzelspektrum aufgenommen und abgespeichert wird. Die Einzelspektren geben Auskunft über die axialen Verteilungen der Radionuklide im Objekt; dabei können allerdings keine Aussagen über die Verteilungen innerhalb eines Segments gemacht werden. Der Vertikal-Scan wird z. B. eingesetzt, um die vertikale Ausdehnung einer Aktivitätsverteilung zu bestimmen.

#### *Scheiben-Scan*

Beim Scheiben-Scan führt nur das zu untersuchende Objekt Rotationsbewegungen aus, während der Detektor in einer ausgewählten Höhenposition verbleibt. Die Rotationsbewegung wird in  $N_{\text{winkel}}$  Messpositionen (Sektoren) unterteilt, für die jeweils ein komplettes Einzelspektrum aufgenommen und abgespeichert wird. Die Einzelspektren geben Auskunft über die Winkelverteilung der Radionuklide in der ausgewählten Höhenposition im Objekt. Lokale Aktivitätsüberhöhungen (so genannte *Hot Spots*) sind deutlich



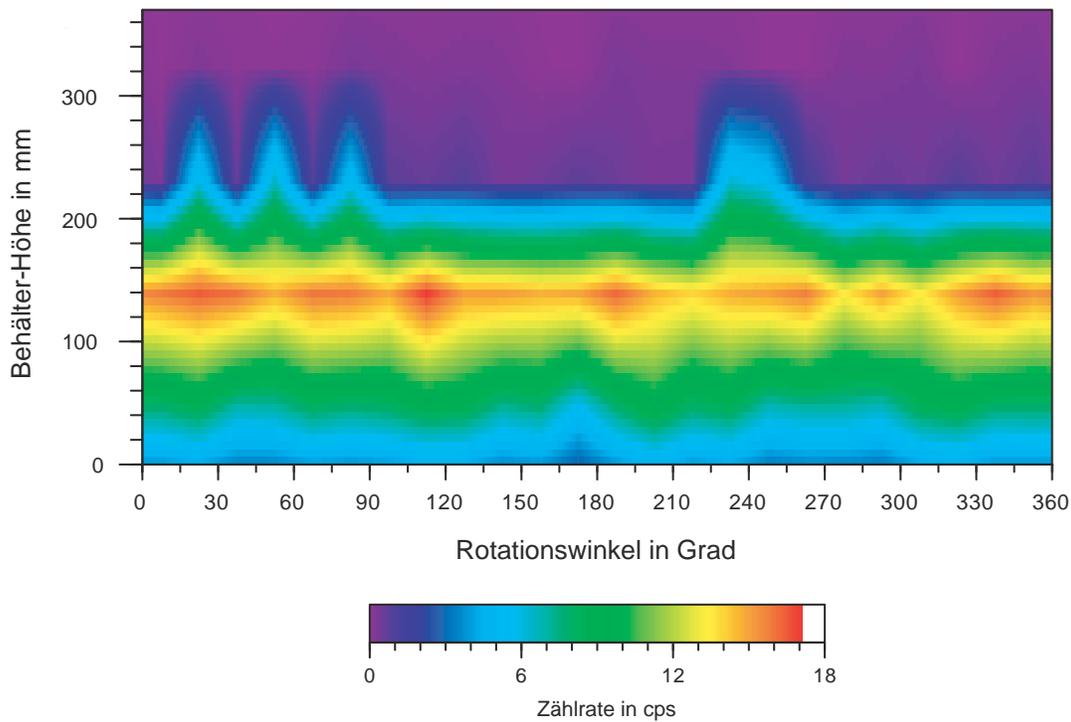
**Abbildung 2.4:** Zählratenverteilung eines Scheiben-Scans an einem Objekt mit Hot Spots (links) und homogener Aktivitätsverteilung (rechts).

an der Peakstruktur in der Zählratenverteilung z. B. in Abb. 2.4 (links) zu erkennen. Eine homogen erscheinende Zählratenverteilung (siehe Abb. 2.4 rechts) kann allerdings verschiedene Ursachen haben, zwischen denen ohne zusätzliche Untersuchungen nicht unterschieden werden kann:

- Aktivität ist im ganzen Segment homogen verteilt.
- Aktivität ist punktförmig konzentriert und befindet sich in der Mitte des Segments.
- Aktivität ist entlang der zentralen Achse des Objekts verteilt.
- Aktivität ist ringförmig im Segment verteilt.

### *Vielfachscheiben-Scan*

Die Methode des Vielfachscheiben-Scans (auch Multirotations-Scan genannt) stellt eine Kombination der Methoden Vertikal-Scan und Scheiben-Scan dar und hat sich für die Routineuntersuchung von (zylindrischen und auch quaderförmigen) radioaktiven Abfallgebinden durchgesetzt. Dabei wird das zu untersuchende Objekt in  $N_{\text{hoehe}}$  äquidistante Messpositionen (Segmente) unterteilt. Zusätzlich wird für jedes Segment eine komplette Rotation des Objekts von  $360^\circ$  unterteilt in  $N_{\text{winkel}}$  Messpositionen (Sektoren) ausgeführt. Pro Segment und Sektor wird ein Gamma-Spektrum aufgenommen und abgespeichert. Aus diesen Einzelspektren kann jeweils nuklidspezifisch die an der Außenseite des Messobjekts gemessene Zählrate in Abhängigkeit der Messpositionen (Höhe und Rotationswinkel) angegeben werden. Üblich dabei ist eine graphische Darstellung der nuklidspezifischen Zählraten projiziert auf die Mantelfläche des

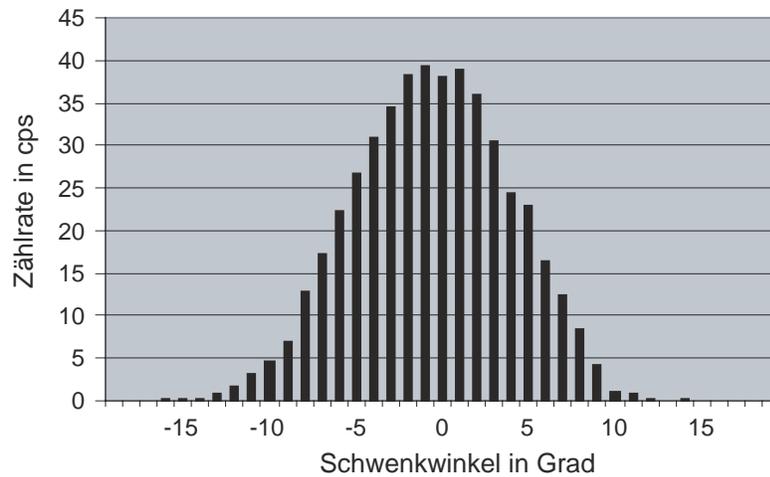


**Abbildung 2.5:** Falschfarben-Darstellung einer auf die Mantelfläche eines zylindrischen Untersuchungsobjekts projizierte Zählratenverteilung.

Untersuchungsobjekts wie sie z. B. in Abb. 2.5 gezeigt ist. Daraus kann die räumliche Verteilung einzelner Radionuklide im Objekt abgeleitet werden, wobei nur zwischen homogenen und nicht-homogenen Bereichen unterschieden werden kann; die reale Aktivitätsverteilung im Objekt, die z. B. eine homogene Zählratenverteilung verursacht (siehe dazu Aufzählung unter *Scheiben-Scan*), kann nur durch zusätzliche Untersuchungen ermittelt werden.

### *Swivel-Scan*

Beim Swivel-Scan oder Schwenk wird der Detektor innerhalb einer horizontalen Ebene geschwenkt, wobei beginnend bei einem Winkel  $\vartheta_{\text{start}}$   $N_k$  einzelne Gamma-Spektren bis hin zu einem Winkel  $\vartheta_{\text{stop}}$  aufgenommen und abgespeichert werden. Die Drehachse verläuft durch den Detektorkristall. Das zu untersuchende Objekt bleibt dabei in Ruhe. Die Methode des Swivel-Scans eignet sich für weiterführende Untersuchungen von Bereichen, in denen räumlich ausgedehnte radioaktive Quellen detektiert wurden. Damit ist eine Unterscheidung der verschiedenen Varianten, die in einer Messung ohne Schwenk eine homogene Zählratenverteilung ergeben (aufgeführt unter dem Abschnitt



**Abbildung 2.6:** Zählratenverteilung eines Swivel-Scans an einem Abfallgebinde mit einer Punktquelle im Zentrum.

(Scheiben-Scan) möglich. Abb. 2.6 zeigt das Ergebnis aus einem Swivel-Scan für ein Untersuchungsobjekt mit einer Punktquelle im Zentrum.

### 2.1.2 Auswerteverfahren

Die Auswertung von Gamma-Emissionsmessungen beruht grundsätzlich auf dem mathematischen Zusammenhang zwischen der gemessenen Nettopeakzählrate  $Z$  eines Radionuklids und der daraus berechneten nuklidspezifischen Aktivität  $A$  über eine geeignete Transferfunktion  $T$ .

$$A = T \cdot Z \quad (2.1)$$

#### Experimentell ermittelte Transferfunktion

*Auswertung für Punktquellen [4]*

Befindet sich in einem zylindrischen Abfallgebinde mit Radius  $R$  im Abstand  $r$  von der Mittelachse eine radioaktive Punktquelle<sup>(2)</sup>, so kann die Aktivität dieser Quelle bestimmt werden, in dem die emittierten Photonen von einem kollimierten Gamma-Detektorsystem registriert werden, während das Untersuchungsobjekt um seine Körperachse rotiert wird. Dabei können Photonen nur dann in den Detektor gelangen, wenn

<sup>(2)</sup>Unter Punktquelle versteht man eine radioaktive Quelle, deren Dimensionen klein gegenüber ihrem Abstand zum Detektor ist.

die Punktquelle innerhalb des Sichtkegels des Kollimators (siehe grau hinterlegter Bereich in Abb. 2.7) liegt. Die Exponentialfunktionen in Gl. 2.2 berücksichtigen die Schwächung der emittierten Gamma-Strahlen durch die im Abfallgebinde homogen verteilte inaktive Matrix mit dem linearen Schwächungskoeffizienten  $\mu$ .

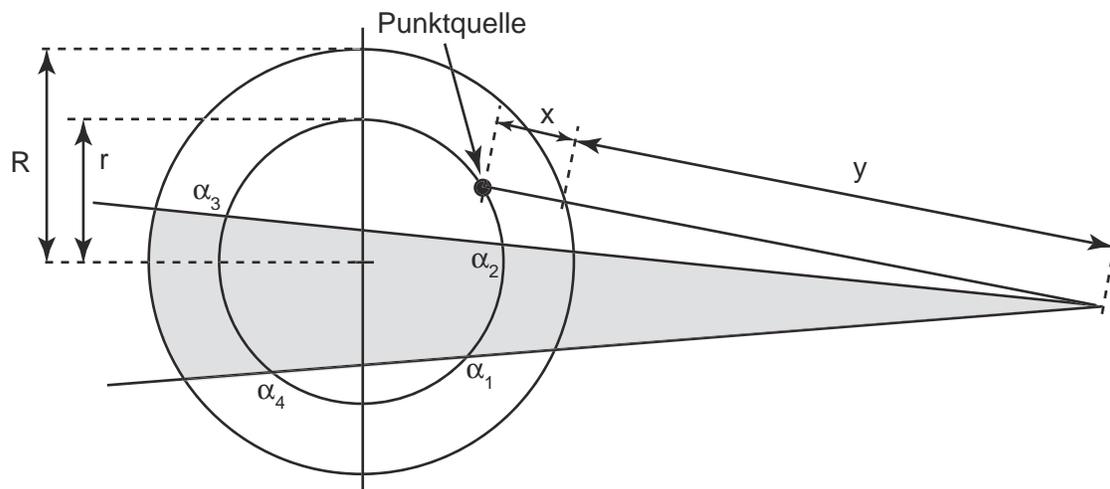
Die Transferfunktion  $T$  ergibt sich somit zu Gl. 2.2:

$$T^{-1} = \frac{K}{4\pi} \cdot \left\{ \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{e^{-\mu \cdot x}}{(x+y)^2} d\alpha + \int_{\alpha_3}^{\alpha_4} \frac{e^{-\mu \cdot x}}{(x+y)^2} d\alpha \right\} \quad (2.2)$$

wobei:

$K$ : Kalibrationskonstante; beschreibt die Effizienz des Detektorsystems (abhängig von der Geometrie des Detektorsystems und der Energie der emittierten Gamma-Strahlen) und muss experimentell für das jeweilige Detektorsystem ermittelt werden.

$x$  bzw.  $y$ : die Wege der Photonen innerhalb bzw. außerhalb des Abfallgebundes auf ihrem Weg zum Detektor



**Abbildung 2.7:** Schematische Darstellung einer rotierenden Punktquelle in einem zylindrischen Gebinde.

#### Auswertung für ausgedehnte Quellen [4]

Für den Fall, dass sich in einem zylindrischen Abfallgebinde mit Radius  $R$  eine radioaktive Quelle, die innerhalb eines Zylinders mit Radius  $R_0$  (wobei  $R_0 < R$ ) homogen verteilt ist, befindet, kann Gl. 2.2 entsprechend erweitert werden. Dabei wird analog dem vorherigen Fall eine homogen verteilte inaktive Matrix angenommen, die die radioaktive Quelle nach außen hin abschirmt. Der lineare Schwächungskoeffizient des

Quellenmaterials sei dabei der selbe, wie der der inaktiven Matrix. Für den Zusammenhang zwischen der Zählrate, die durch ein kollimiertes Detektorsystem registriert wird, und der Aktivität der Volumenquelle im Abfallgebinde kann folgende Transferfunktion angegeben werden:

$$T^{-1} = \frac{K}{4\pi^2 \cdot d} \cdot \frac{1}{R_0^2} \cdot \int_0^{R_0} \left\{ \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{e^{-\mu \cdot x}}{x + y} d\alpha + \int_{\alpha_3}^{\alpha_4} \frac{e^{-\mu \cdot x}}{x + y} d\alpha \right\} \cdot r dr \quad (2.3)$$

wobei:

$K$ : Kalibrationskonstante; beschreibt die Effizienz des Detektorsystems (abhängig von der Geometrie des Detektorsystems und der Energie der emittierten Gamma-Strahlen) und muss experimentell für das jeweilige Detektorsystem ermittelt werden;

$d$ : Abstand zwischen Zentrum des Untersuchungsobjekts und Detektor

Die Gln. 2.2 sowie 2.3 setzen eine genaue Kenntnis von Position und Verteilung einer radioaktiven Quelle in einem zylindrischen Behälter voraus. In den üblichen Fällen ist dieses Wissen allerdings nicht vorhanden und es muss auf Näherungslösungen, wie sie in den nächsten zwei Abschnitten (siehe Gln. 2.4 und 2.8) vorgestellt werden, zurückgegriffen werden.

#### *Auswertung für Integrale Gamma-Scanning [5]*

Wird ein zylindrisches radioaktives Abfallgebinde mit einem Detektorsystem in offener Geometrie (siehe dazu Abschnitt 2.1.1) vermessen, so kann zu seiner Aktivitätsbestimmung Gl. 2.4 herangezogen werden. Voraussetzung für ihre Gültigkeit ist die homogene Verteilung von Aktivität und Matrix innerhalb des Abfallgebundes. Im Weiteren wird zwischen der Matrix, in dem die Radionuklide eingebettet sind (aktive Matrix) und den inaktiven Abschirmungen wie z. B. der Behälterwand (inaktive Matrix) unterschieden.

$$T = m_{\text{Matrix}} \cdot \frac{1}{p_j} \cdot \frac{1}{\varepsilon_j \cdot F_\infty} \cdot \frac{(s + R)^2}{s^2} \cdot \left( \frac{\mu}{\rho} \right)_{\text{Matrix}} \cdot \frac{K_2}{K_1} \quad (2.4)$$

wobei:

$m_{\text{Matrix}}$ : Masse der aktiven Matrix

$p_j$ : Übergangswahrscheinlichkeit der Energielinie  $j$

$\varepsilon_j$ : Effizienz des Detektorsystems für die Energie  $j$ ; wird durch Kalibrationsmessung mit einer Punktquelle im Abstand der Gebindeoberfläche bestimmt.

$F_\infty$ : Querschnittsfläche des Abfallgebundes

$$F_\infty = 2R \cdot H \quad (2.5)$$

mit:

$H$ : Höhe des Abfallgebindes

$R$ : Radius des zylindrischen Abfallgebindes

$s$ : Abstand der Oberfläche des Abfallgebindes vom Detektor

$(\mu/\rho)_{\text{Matrix}}$ : Massenschwächungskoeffizient der aktiven Matrix

$K_1$ : Korrekturfaktor; berücksichtigt die Schwächung der emittierten Gamma-Strahlung durch die aktive Matrix gemittelt über die unterschiedlichen Strahllängen durch das Abfallgebäude.

$$K_1 = 1 - e^{-\mu_{\text{Matrix}} \cdot B} \quad (2.6)$$

mit:

$B$ : mittlere Strahllänge der emittierten Gamma-Strahlung durch das Gebindevolumen

$\mu_{\text{Matrix}}$ : linearer Schwächungskoeffizient der aktiven Matrix

$K_2$ : Korrekturfaktor; berücksichtigt die Schwächung der emittierten Gamma-Strahlung durch die Behälterwand.

$$K_2 = e^{\mu_{\text{Wand}} \cdot w} \quad (2.7)$$

Näherungsweise kann für die mittlere Strahlungslänge  $w$  der emittierten Gamma-Strahlung durch die Behälterwand 1,25 mal die Dicke der Behälterwand  $d_{\text{Wand}}$  eingesetzt werden [5]; damit werden typische Werte für den Abschirmfaktor  $K_2$  erzielt.

### *Auswertung für Segmentiertes Gamma-Scanning [6]*

Die im Folgenden vorgestellte Gl. 2.8 stellt die Basis für das etablierte Verfahren, SGS-Messungen auszuwerten, dar.<sup>(3)</sup> Die zur Auswertung nötigen nuklidspezifischen Netozählraten eines zylindrischen Untersuchungsobjekts werden dem gemessenen Summenspektrum entnommen. Das Modell der Auswertung beruht auf der Annahme, dass sowohl die Radionuklide als auch die Matrix, in der sie eingebettet sind, die so genannte aktive Matrix, homogen im gesamten Messobjekt verteilt sind, wie in den bereits diskutierten Auswerteverfahren ebenfalls vorausgesetzt.

$$T = m_{\text{Matrix}} \cdot \frac{1}{p_j} \cdot \left( \frac{\mu}{\rho} \right)_{\text{Matrix}} \cdot M \cdot \frac{K_2 \cdot K_3}{K_1} \quad (2.8)$$

wobei:

$m_{\text{Matrix}}$ : Masse der aktiven Matrix

<sup>(3)</sup>Das Verfahren wurde ehemals verwendet, um SGS-Messungen im so genannten Spiral-Scanmodus auszuwerten. Dieser Scanmodus findet in der Praxis keine Anwendung mehr und wird deswegen nicht weiter berücksichtigt.

$p_j$ : Übergangswahrscheinlichkeit der Energielinie  $j$

$(\mu/\rho)_{\text{Matrix}}$ : Massenschwächungskoeffizient der aktiven Matrix

$M$ : Kalibrationsfaktor; abhängig von der Energie der emittierten Gamma-Strahlung und der Geometrie des Detektorsystems.

$$M(E) = \frac{p_{kal,j} \cdot A_{kal}}{Z_{kal,j}} \cdot F_1 \quad (2.9)$$

mit:

$F_1$ : Öffnungsfläche des Kollimators am Ort der Kalibrationsquelle

$K_1$ : Korrekturfaktor; berücksichtigt die Schwächung der emittierten Gamma-Strahlung durch die aktive Matrix.

$$K_1 = 1 - e^{-\mu_{\text{Matrix}} \cdot 2R} \quad (2.10)$$

mit:

$\mu_{\text{Matrix}}$ : linearer Schwächungskoeffizient der aktiven Matrix

$R$ : Radius der aktiven Matrix

$K_2$ : Korrekturfaktor; berücksichtigt die Schwächung der emittierten Gamma-Strahlung durch inaktive Abschirmungen wie Behälterwand und zusätzliche Abschirmbehälter innerhalb des Abfallgebundes.

$$K_2 = e^{\sum_i \mu_i \cdot l_i} \quad (2.11)$$

mit:

$\mu_i$  bzw.  $l_i$ : lineare Schwächungskoeffizienten bzw. Abschirmdicken aller Schichten, die zwischen der aktiven Matrix und dem Detektor liegen

$K_3$ : Korrekturfaktor; berücksichtigt die wirkliche vertikale Ausdehnung der aktiven Matrix gegenüber der vermessenen Höhe.

$$K_3 = \frac{h}{h^*} \quad (2.12)$$

mit:

$h$ : gesamter abgetasteter (abgescannter) Höhenbereich des Abfallgebundes

$h^*$ : Höhenbereich der aktiven Matrix

### Mathematisch ermittelte Transferfunktion

Liegt ein zylindrisches Objekt vor, in dem Aktivität und Matrix homogen verteilt sind, so kann der Zusammenhang zwischen der Zählrate, die aus dem Summenspektrum einer SGS-Messung gewonnen wird, und der Aktivität dieses Objekts auch durch eine

mathematisch zu ermittelnde Transferfunktion  $T$  dargestellt werden [7]. Dabei wird die zylindrische Quelle durch eine lineare Quelle der selben Aktivität ersetzt (siehe Abb. 2.8). Die Schwächungseigenschaften des realen Objekts werden durch eine ebene Abschirmung repräsentiert, deren Massenschwächungskoeffizient und Dichte den Werten des Materials der realen zylindrischen Quelle entsprechen. Die für eine identische Schwächungswirkung nötige Dicke  $x$  der Abschirmung wird als Funktion des Massenschwächungskoeffizienten und des Radius  $R_0$  des zylindrischen Objekts berechnet. Für die Transferfunktion kann folgender Ausdruck angegeben werden:

$$T = \frac{1}{\varepsilon \cdot p} \cdot \frac{R_0}{2(d+x)} \cdot \int_0^{\arctan b_1} e^{-f(\theta, b_2)} d\theta \quad (2.13)$$

wobei:

$\varepsilon$ : Effizienz des Detektorsystems

$p$ : Übergangswahrscheinlichkeit der gemessenen Energielinie

$d$ : Abstand zwischen Detektor und Oberfläche des Zylinders

$\theta$ : Öffnungswinkel des Detektorkegels (siehe dazu Abb. 2.8)

und den Abkürzungen:

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{H_0}{2(d+x)} \quad \text{und} \\ b_2 &= \rho \cdot x \cdot \sum_j m_j \cdot \mu_j + \sum_i \rho_i \cdot \mu_i \cdot t_i \end{aligned} \quad (2.14)$$

mit:

$H_0$ : Höhe des zylindrischen Objekts

$\rho$ : theoretische Dichte des Abfalls

$\rho_i$ : Dichte des Materials der Abschirmung

$m_j$ : Massenverhältnis der unterschiedlichen Abfallelemente

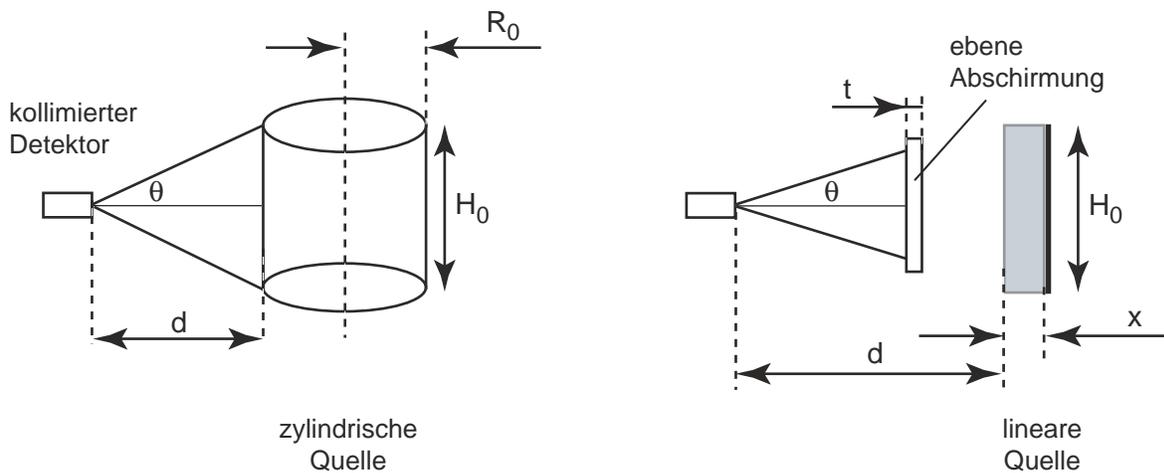
$\mu_i$ : Massenschwächungskoeffizient

$t_i$ : Dicke der Abschirmung

## 2.2 Transmissionsmessungen

### 2.2.1 Messverfahren

Bei Transmissionsverfahren wird das zu untersuchende Objekt mit einer externen Strahlenquelle durchleuchtet und die durchgehende Strahlung in einem geeigneten Detektorsystem registriert. Für die zerstörungsfreie Charakterisierung radioaktiver Abfäll-



**Abbildung 2.8:** Die zylindrische Quelle (links) wird durch eine lineare Quelle (rechts) der selben Aktivität hinter einer ebenen Abschirmung ersetzt.

le werden in der Praxis im Wesentlichen Röntgen<sup>(4)</sup>- und Gamma-Quellen eingesetzt. Diese müssen die folgenden Bedingungen erfüllen:

- Sie müssen intensiv genug sein, um das zu untersuchende Objekt auch an seiner dicksten Stelle noch durchdringen zu können, d. h. es muss eine statistisch aussagekräftige Intensität gemessen werden können.
- Sie sollten deutlich intensiver als die Eigenstrahlung des untersuchten Objekts sein, um letztere vernachlässigen zu können. Alternativ kann der Einfluss der Eigenstrahlung durch Messungen mit und ohne externer Quelle und anschließender Subtraktion der jeweiligen Intensitäten ausgeschaltet werden.
- Die Energie bzw. die Energien der externen Transmissionsquellen müssen an die jeweilige Fragestellung angepasst sein. So werden z. B. für die Schwächungskorrektur niederenergetischer Gamma-Strahler im Allgemeinen die mit einer Transmissionsquelle ähnlicher Energie gewonnenen Informationen benötigt.

Je nach zeitlichem und messtechnischem Aufwand unterscheidet man zwischen den nachfolgenden drei Messverfahren, wobei der Übergang zwischen ihnen fließend verläuft.

<sup>(4)</sup>Röntgenquellen können wegen ihrer niedrigen Energie nur für die Durchstrahlung von Abfällen geringer Dichte eingesetzt werden.

## Einfache Transmissionsmessung

Bei der Einfachen Transmissionsmessung wird das Untersuchungsobjekt (z. B. ein 200 L-Fass) senkrecht zu seiner Körperachse in verschiedenen Höhenpositionen mit einer externen Gamma-Quelle durchleuchtet (siehe dazu Abb. 2.9). Für jede dieser Messpositionen  $z_i$  kann aus der nach dem Durchgang durch das Objekt registrierten Strahlung ein gemittelter Wert der Schwächungseigenschaften aller auf dem Durchstrahlungsweg liegenden Materialien berechnet werden (siehe dazu Abschnitt 2.2.2). Damit ist eine erste grobe Aussage über die axiale Verteilung der Matrix im Objekt möglich. Eine Verbesserung der Aussage wird erreicht, wenn für jede Höhenposition das Objekt während der Transmissionsmessung um  $360^\circ$  gedreht wird. Hierdurch erreicht man eine Mittelung über die Inhomogenitäten der Matrix innerhalb der jeweiligen Höhenposition.

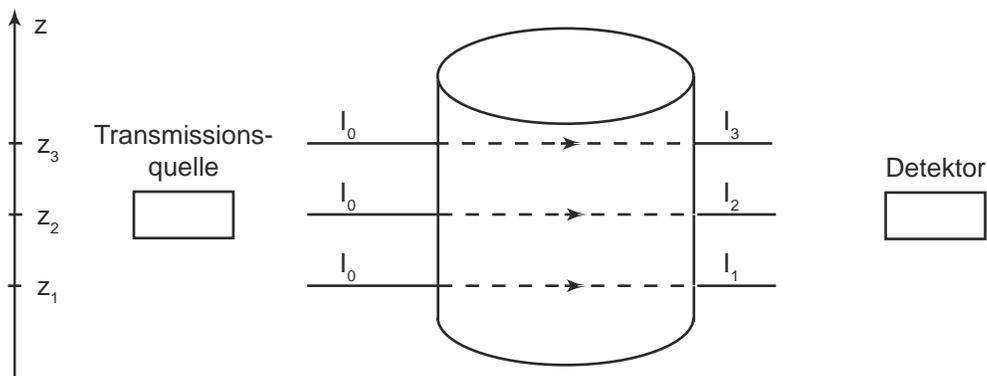


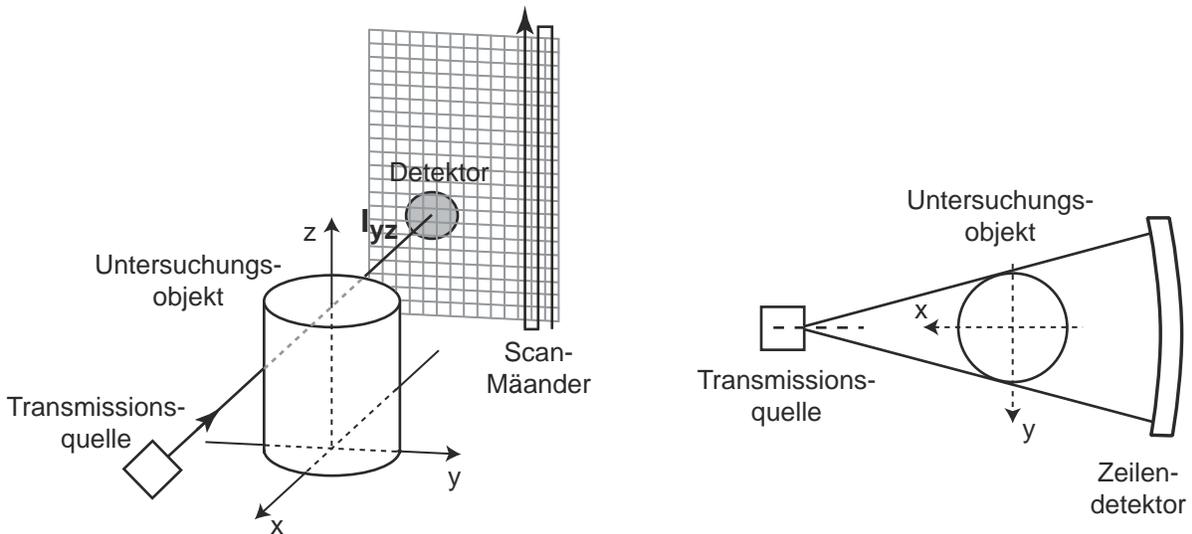
Abbildung 2.9: Schematische Darstellung der Einfachen Transmissionsmessung.

## Digitale Radiographie

Bei der Digitalen Radiographie (DR) wird ein so genanntes Radiogramm (auch Schattenbild genannt) des Untersuchungsobjekts erstellt [8]. Dieses besteht aus  $(N_{\text{horizontal}} \cdot N_{\text{vertikal}})$  Messdaten, dem so genannten Pixelfeld. Für die Aufnahme dieser Messdaten stehen abhängig vom eingesetzten Detektorsystem die folgenden Verfahren zur Verfügung:

### *Punktstrahlgeometrie*

Gamma-Strahlen, die aus einer kollimierten Transmissionsquelle emittiert werden, werden nach dem Durchgang durch das Untersuchungsobjekt mit einem kollimierten Einzelstrahldetektor nachgewiesen. Hierbei werden die Messdaten z. B. durch mäanderförmiges Abrastern des Untersuchungsobjekts gewonnen (siehe Abb. 2.10 links).



**Abbildung 2.10:** Schematische Darstellung verschiedener Verfahren der DR: Punktstrahlverfahren (links) und Fächerstrahlverfahren (rechts).

### Fächerstrahlgeometrie

Die Quelle blendet einen Fächerstrahl aus, der in einem eindimensionalen Detektor (Zeilendetektor) nachgewiesen wird (siehe Abb. 2.10 rechts). Durch die vertikale Verschiebung des Untersuchungsobjekts (oder der gleichzeitigen Verschiebung von Quelle und Detektorsystem) wird ein Schattenbild aufgebaut.

### Kegelstrahlgeometrie

Die Quelle bildet einen kegelförmigen Strahl aus, der das Untersuchungsobjekt vollständig enthält und in einem zweidimensionalen Detektor (Flächendetektor) nachgewiesen wird.

Das Ergebnis einer DR-Messung ist ein zweidimensionales Feld von Werten, die die Schwächungseigenschaft des durchstrahlten Materials in Abhängigkeit vom jeweils durchstrahlten Weg wiedergeben. Abb. 2.11 zeigt zwei Beispiele für die graphische Darstellung der Ergebnisse, wobei die gemessenen Impulse in eine Grauskala umgerechnet wurden. Aus einem Radiogramm können geometrische Abmessungen sowie Informationen über die Matrixverteilung im Untersuchungsobjekt abgeleitet werden. Die Pixelgröße in horizontaler und vertikaler Richtung ist jeweils durch die so genannte Abtastrate festgelegt. Bei der Routinekontrolle radioaktiver Abfallgebinde wird die DR außerdem verwendet, um Informationen über den Befüllungsgrad, eventuell vorliegende Innenbehälter sowie das Vorhandensein freier Flüssigkeiten zu gewinnen. Für nachfol-



**Abbildung 2.11:** Radiogramme (Schattenbilder) in Graustufenskalisierung.

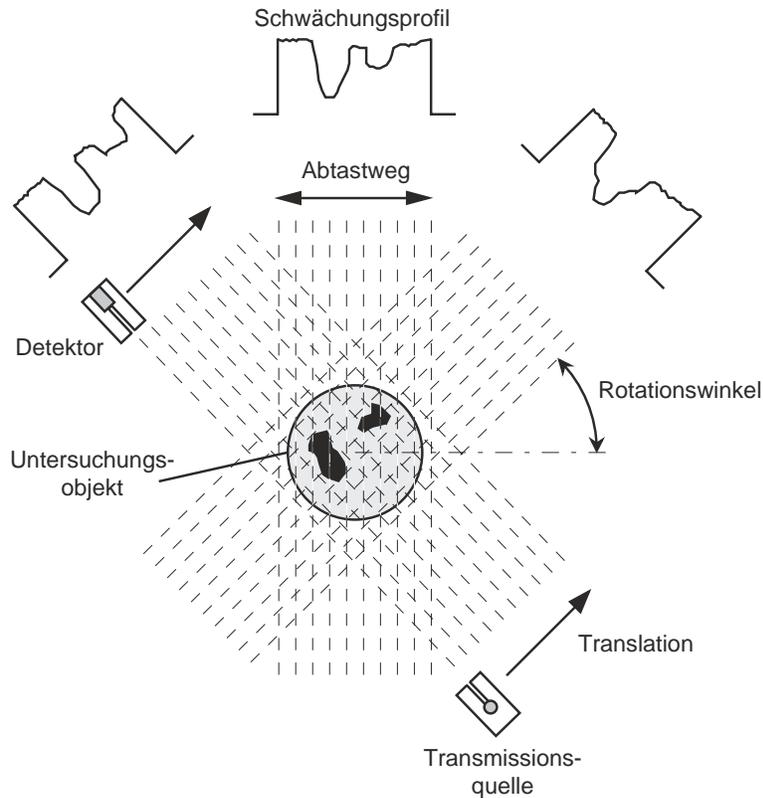
*links: ein mit losem Schrott gefülltes 200L-Fass*

*rechts: ein mit drei Pellets (hochdruckverpresster Abfall) gefülltes 200L-Fass.*

gende zweidimensionale tomographische Messungen oder eine notwendige Entnahme von Probenmaterial für chemische Analysen können auf der Basis der Radiogramme Höhenpositionen festgelegt werden.

### Transmissions-Computer-Tomographie

Bei der Transmissions-Computer-Tomographie (TCT) wird für das Untersuchungsobjekt eine Vielzahl an Digitalen Radiographien aufgenommen, wobei das Objekt zwischen den einzelnen Aufnahmen jeweils um einen festen Winkel weiter gedreht wird, bis typischerweise ein Gesamtdrehwinkel von  $180^\circ$  oder  $360^\circ$  erreicht ist (siehe dazu Abb. 2.12). Die Radiographiedaten werden anschließend durch das Leerbild, d. h. einer DR ohne strahlschwächenden Objekts im Strahlengang, dividiert, um eine Normalisierung der Daten zu erhalten. Gegebenenfalls müssen die Radiographie und das Leerbild vorher noch durch Subtraktion des Detektordunkelbildes, d. h. dem Signal, das der Detektor auch in Abwesenheit der externen Quelle liefert, korrigiert werden. Aus diesen Daten wird mittels geeigneter Rekonstruktionsverfahren (siehe Abschnitt 2.2.2) die Verteilung des linearen Schwächungskoeffizienten im Objekt berechnet. Das Ergebnis wird im Allgemeinen als zwei- oder dreidimensionale Verteilung unter Verwendung von Graustufen- oder Falschfarben-Bildern (siehe z. B. Abb. 2.13) visualisiert.



**Abbildung 2.12:** Schematische Darstellung des Prinzips einer TCT-Messung.

Aus so genannten Tomogrammen können die Abmessungen und Materialzusammensetzungen (genauer: die Verteilung der linearen Schwächungskoeffizienten für die verschiedenen Materialien) der inneren Strukturen abgeleitet werden. Hierbei ist aber zu beachten, dass der lineare Schwächungskoeffizient von der Energie der externen Quelle abhängt.

## 2.2.2 Auswerteverfahren

Bei der Durchleuchtung eines Objekts mit einer externen Röntgen- oder Gamma-Strahlungsquelle wird die Strahlung durch Wechselwirkung mit der Materie geschwächt, wobei in guter Näherung folgender Zusammenhang gilt:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (2.15)$$

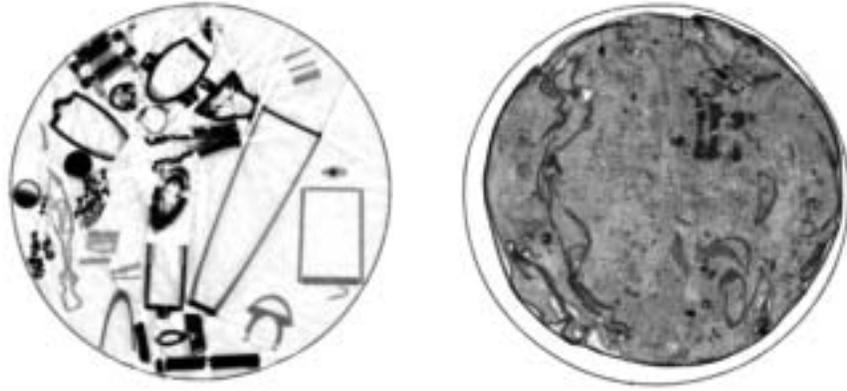
wobei (siehe dazu Abb. 2.14):

$I(x)$ : Impulse nach dem schwächenden Material

$I_0$ : Impulse vor dem schwächenden Material

$\mu$ : linearer Schwächungskoeffizient des durchstrahlten Materials

$x$ : durchstrahlter Weg



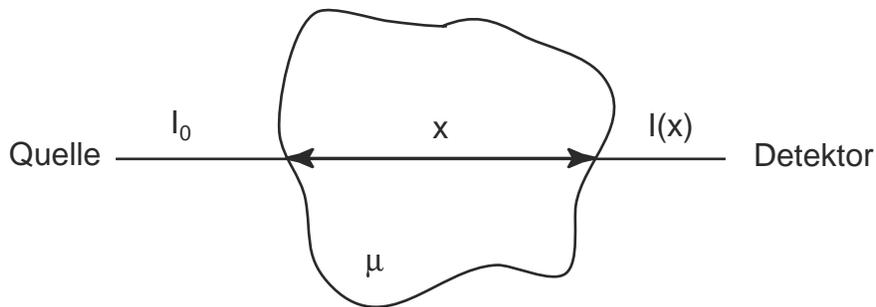
**Abbildung 2.13:** Zweidimensionale Tomogramme der Fässer aus Abb. 2.11 in Graustufen-skalierung.

links: ein mit losem Schrott gefülltes 200L-Fass

rechts: ein mit hochdruckverpresstem Abfall gefülltes 200L-Fass.

Die Photonen wirken je nach ihrer Energie und der chemischen Zusammensetzung des Absorbermaterials, d. h. der Kernladungszahl  $Z$  der Materie, auf verschiedene Weise. Mögliche Prozesse sind der Photoeffekt, der Compton-Effekt, sowie der Paarbildungseffekt. Der Photoeffekt erzeugt Sekundärelektronen durch Wechselwirkung der Photonen mit den gebundenen Elektronen der Materieatome. Er stellt die dominierende Wechselwirkung für Photonenenergien von  $E_\gamma < 500 \text{ keV}$  dar. Für den linearen Photo-Schwächungskoeffizienten  $\tau$  gilt [9]:

$$\tau \propto \frac{Z^4}{E_\gamma^3} \quad (2.16)$$



**Abbildung 2.14:** Schematische Darstellung einer Transmissionsmessung, bei der die von einer Quelle ausgesendete Strahlung der Intensität  $I_0$  beim Durchgang durch ein Material mit dem linearen Schwächungskoeffizienten  $\mu$  geschwächt wird.

Der Compton-Effekt beschreibt den elastischen Stoß von Photonen an freien Elektronen. Der Compton-Effekt dominiert im Bereich mittlerer Photonenenergien<sup>(5)</sup> [9]. Für den linearen Compton-Schwächungskoeffizienten  $\sigma$  gilt [9]:

$$\sigma \propto \frac{1}{E_\gamma} \quad (2.17)$$

Der Paarbildungseffekt beschreibt die Erzeugung eines Elektron-Positron-Paares im Coulombfeld eines Atomkerns. Die Reaktionsschwelle für diesen Prozess liegt bei  $E_\gamma = 2 m_e \cdot c^2 = 1022 \text{ keV}$ . Für den linearen Paar-Schwächungskoeffizienten  $\kappa$  gilt [9]:

$$\kappa \propto Z \cdot \ln E_\gamma \quad (2.18)$$

Der totale lineare Schwächungskoeffizient  $\mu$  ergibt sich aus den drei einzelnen Komponenten nach Gl. 2.19:

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (2.19)$$

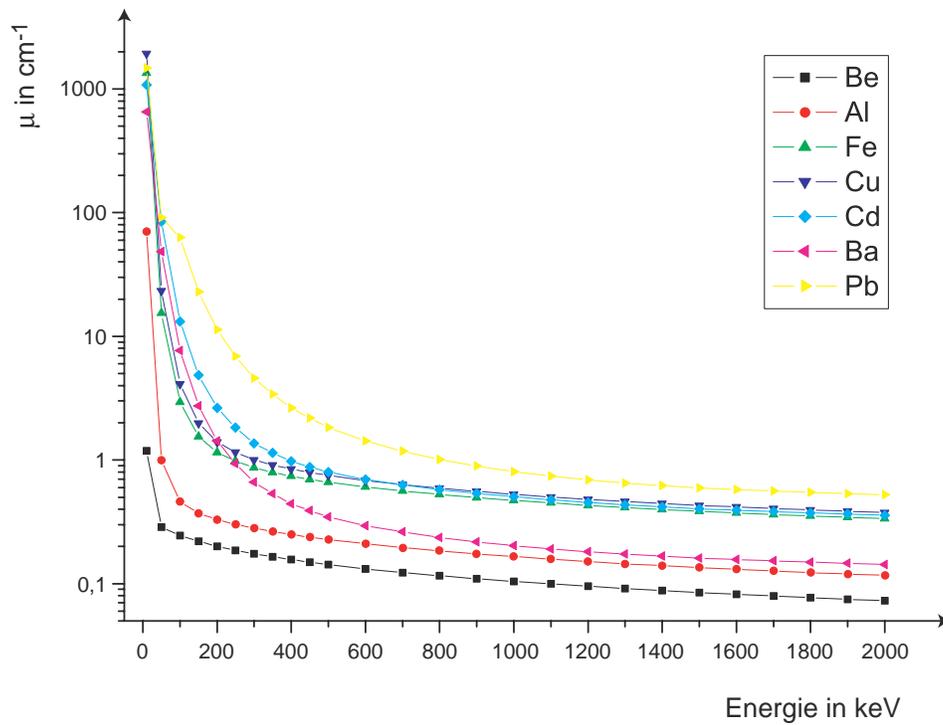
In Abb. 2.15 sind für einige ausgewählte Elemente (siehe Tab. 2.2) jeweils die linearen Schwächungskoeffizienten<sup>(6)</sup> aufgetragen. Zu erkennen ist die starke Materialabhängigkeit des linearen Schwächungskoeffizienten besonders bei niederen Energien (bis ca. 500 keV).

**Tabelle 2.2:** Kernladungszahl und Dichte verschiedener Elemente [9], für die die Energieabhängigkeit des totalen linearen Schwächungskoeffizienten in Abb. 2.15 dargestellt ist.

Element	Kernladungszahl $Z$	Dichte in $\text{g/cm}^3$
Be	4	1,85
Al	13	2,70
Fe	26	7,90
Cu	29	8,95
Cd	48	8,65
Ba	56	3,51
Pb	82	11,37

<sup>(5)</sup>Dabei ist das Energieintervall, in dem der Compton-Effekt dominiert, abhängig vom Material: z. B. für  $\text{H}_2\text{O}$ :  $30 \text{ keV} < E_\gamma < 25000 \text{ keV}$  und für  $\text{Pb}$ :  $500 \text{ keV} < E_\gamma < 5000 \text{ keV}$ .

<sup>(6)</sup>Im Weiteren ist mit der Bezeichnung *linearer Schwächungskoeffizient* immer der totale lineare Schwächungskoeffizient gemeint.



**Abbildung 2.15:** Energieabhängigkeit des totalen linearen Schwächungskoeffizienten für verschiedene Elemente (siehe Tab. 2.2).

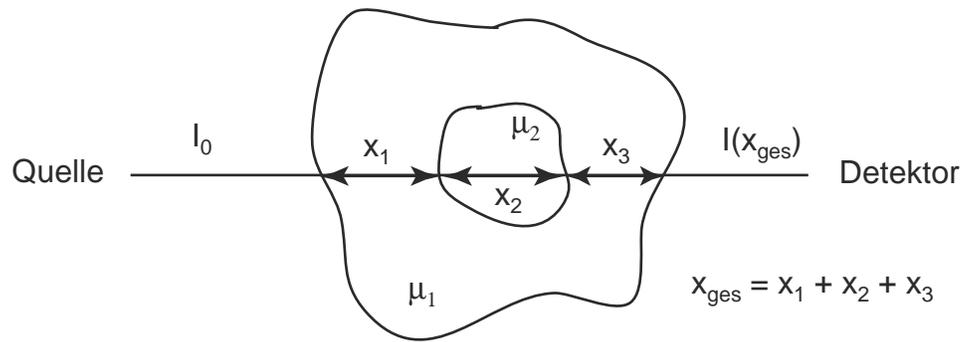
## Auswertung für Einfache Transmissionsmessung

### Monoenergetisch

Bei der Einfachen Transmissionsmessung wird das Untersuchungsobjekt in definierten Höhenpositionen durch seine mittlere Körperachse mit einer externen Quelle durchstrahlt. Nach Gl. 2.20 kann für jede Energielinie der externen Quelle, die nach dem Durchgang durch das Untersuchungsobjekt registriert wird, ein Mittelwert der linearen Schwächungskoeffizienten aller auf der Strecke  $x_{\text{ges}}$  liegenden Materialien berechnet werden (siehe dazu Abb. 2.16).

$$\bar{\mu} = \frac{\sum_i \mu_i \cdot x_i}{x_{\text{ges}}} = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I(x_{\text{ges}})}\right)}{x_{\text{ges}}} = \frac{\ln I_0 - \ln I(x_{\text{ges}})}{x_{\text{ges}}} \quad (2.20)$$

Mit den äußeren Abmessungen des Objekts ist der gesamte durchstrahlte Weg  $x_{\text{ges}}$  gegeben. Für  $I_0$  wird eine Messung in identischer Messgeometrie, aber ohne Objekt im Strahlengang, durchgeführt.



**Abbildung 2.16:** Schematische Darstellung einer Transmissionsmessung, bei der die von einer Quelle ausgesendete Strahlung der Intensität  $I_0$  von allen Materialien auf dem Weg  $x_{\text{ges}}$  zum Detektor entsprechend ihrer jeweiligen linearen Schwächungskoeffizienten  $\mu_i$  geschwächt wird.

### Viele Energien

Bei der Verwendung einer externen Quelle, die mehrere Energielinien emittiert, und einem energieauflösenden Detektorsystem, kann die Auswertung für jede Energielinie, die nach dem Durchgang durch das Untersuchungsobjekt registriert wird, durchgeführt werden.

### Auswertung für Digitale Radiographie

Für eine DR werden  $N$  Messpositionen aufgenommen (siehe dazu Abschnitt 2.2.1), wobei:

$$N = N_{\text{horizontal}} \cdot N_{\text{vertikal}} = N_y \cdot N_z \quad (2.21)$$

mit:

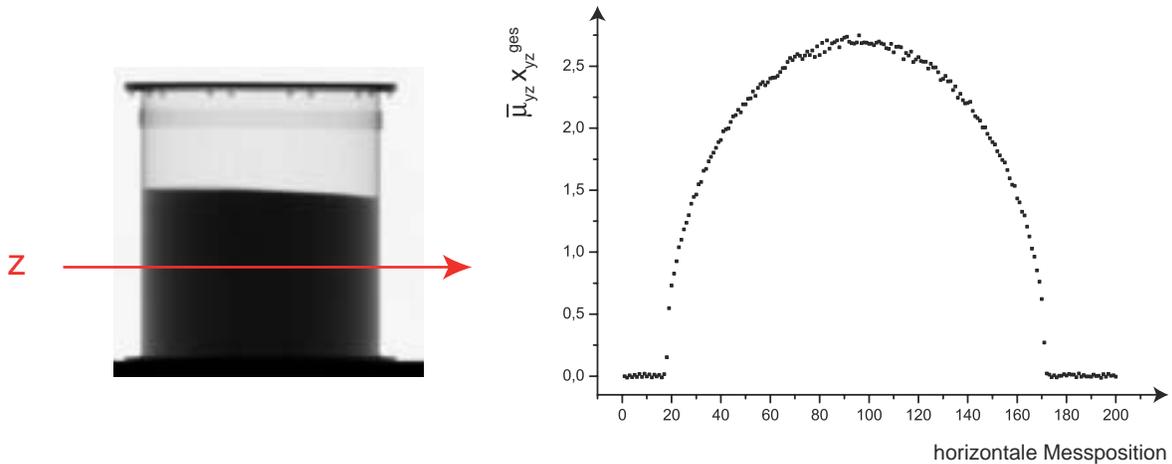
$N_{\text{horizontal}}$  bzw.  $N_y$ : Anzahl der Messpositionen in horizontaler bzw.  $y$ -Richtung

$N_{\text{vertikal}}$  bzw.  $N_z$ : Anzahl der Messpositionen in vertikaler bzw.  $z$ -Richtung

Analog der zuvor beschriebenen Auswertung für eine Einfache Transmissionsmessung kann für jeden der  $N$  Messpunkte eine (analoge) Auswertung durchgeführt werden. Da im Allgemeinen die durchstrahlten Weglängen  $x_i$  von Punkt zu Punkt unterschiedlich sind, wird Gl. 2.20 in diesem Fall zu:

$$\bar{\mu}_{yz} = \frac{\ln I_{yz}(0) - \ln I_{yz}(x_{yz}^{\text{ges}})}{x_{yz}^{\text{ges}}} \quad (2.22)$$

In Abb. 2.17 links ist das Ergebnis einer DR-Messung für ein zylindrisches Objekt graphisch dargestellt. Die gemessenen Impulse  $I_{yz}(x_{yz}^{\text{ges}})$  wurden in eine Grauskala transferiert. Rechts sind für eine beliebige vertikale Messposition  $z$  die aus den Messwerten



**Abbildung 2.17:** Radiogramm eines zylindrischen Untersuchungsobjekts, das zu etwa zwei Drittel mit homogener Matrix gefüllt ist (links) und Darstellung der Messwerte für eine Höhe  $z$ , die durch die homogene Matrix verläuft (rechts).

nach Gl. 2.22 bestimmten Werte für den mittleren linearen Schwächungskoeffizienten multipliziert mit der Gesamtweglänge als Funktion der horizontalen Messposition aufgetragen. Bei bekannter chemischer Zusammensetzung des vorliegenden Materials kann der jeweilige Massenschwächungskoeffizient ( $\mu/\rho$ ) aus Tabellenwerken (z. B. [10]) gewonnen werden und damit nach Gl. 2.23 die mittlere Dichte des Materials bestimmt werden.

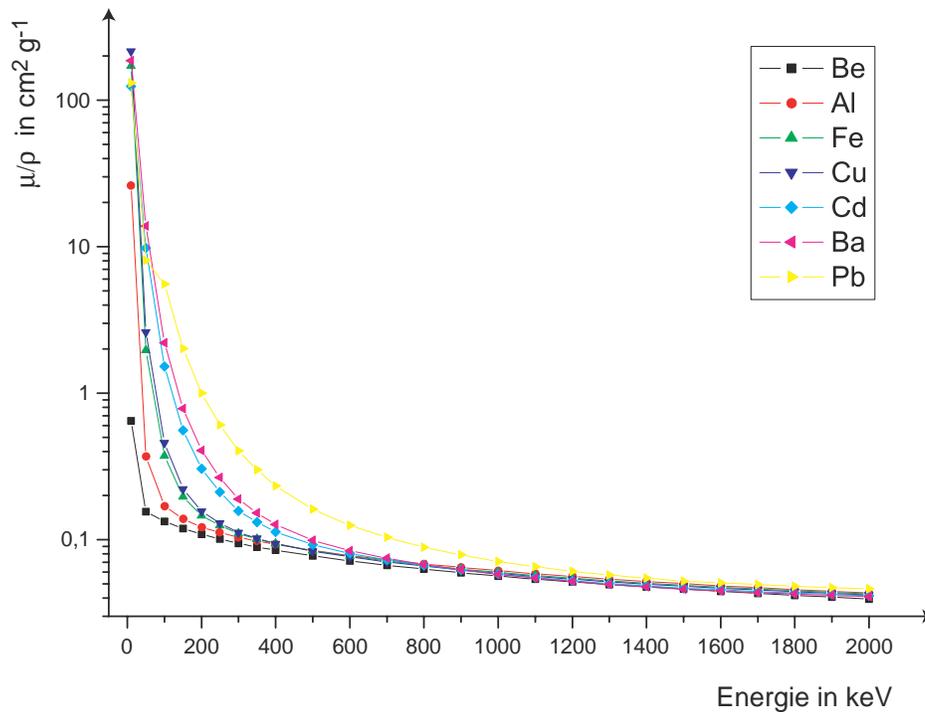
$$\bar{\rho}_{yz} = \bar{\mu}_{yz} \cdot \left( \frac{\mu}{\rho} \right)_{E_\gamma}^{-1} \quad (2.23)$$

Bei unbekanntem Material kann der Umstand ausgenutzt werden, dass der Massenschwächungskoeffizient von Feststoffen bei Energien ab ca. 1000 keV nur mehr geringfügig vom Material abhängt (siehe Abb. 2.18). Für die Energielinien einer externen Strahlenquelle in diesem Bereich, z. B.  $^{60}\text{Co}$  mit den beiden Energielinien 1173,24 keV und 1332,50 keV, kann mit einem mittleren Wert für den Massenschwächungskoeffizienten<sup>(7)</sup> aus der experimentell ermittelten Verteilung der linearen Schwächungskoeffizienten die Verteilung der mittleren Dichte berechnet werden.

### Auswertung für Transmissions-Computer-Tomographie

Das Ergebnis einer TCT-Messung besteht aus einer Vielzahl einzelner DR-Messungen, wobei zwischen den einzelnen Messungen das Objekt jeweils um einen festen Winkel  $\Delta\theta$  gedreht wird (siehe Abb. 2.12), sowie aus mindestens einem Leerbild (d. h. eine DR ohne

<sup>(7)</sup> $(\mu/\rho)$  für 1200 keV: 0,0053 cm<sup>2</sup>/g



**Abbildung 2.18:** Massenschwächungskoeffizient für verschiedene Elemente (siehe Tab. 2.2).

Objekt) und gegebenenfalls eines Dunkelbildes zur Erfassung des internen Detektorrauschens. Die nachfolgende Diskussion wird auf ein eindimensional ortsauflösendes Detektorsystem beschränkt, d. h. es wird nur ein waagrechter Schnitt (Tomogramm) durch das Objekt betrachtet. Dieser hat eine endliche Dicke  $d$ , die von der Pixelhöhe oder von der Kollimatorhöhe des verwendeten Detektorsystems abhängt. Für jeden Messwert, d. h. für jedes Pixel der DR wird in einem vorbereitenden Arbeitsschritt der zugehörige Projektionswert  $P$  berechnet:

$$P(m \cdot a, n \cdot \Delta\theta) = \ln \left( \frac{I_0}{I} \right) = \int \mu(x, y) dx \quad (2.24)$$

wobei:

$I_0$ : ungeschwächte Intensität aus dem Leerbild an der Position  $m \cdot a$

$I$ : geschwächte Intensität in der DR für die Winkelposition  $n \cdot \Delta\theta$  an der Stelle  $m \cdot a$

$a$ : Pixelbreite

$\mu(x, y)$ : linearer Schwächungskoeffizient an der Stelle  $(x, y)$ , gemittelt über die Höhe  $d$

Die Projektionswerte für jede Winkelposition geben das jeweilige Schwächungsprofil (auch Projektion genannt) des untersuchten Objekts wieder. Die Aufgabe der Auswertung einer TCT-Messung besteht darin, aus den gegebenen Projektionen die Verteilung der linearen Schwächungskoeffizienten  $\mu(x, y)$  zu bestimmen. Hierfür stehen eine Vielzahl an unterschiedlichen Verfahren zur Verfügung (siehe z. B. [11]), von denen sich in

der Praxis vor allem die *gefilterte Rückprojektion* – ein analytisches Verfahren – sowie die *Algebraische Rekonstruktions-Technik* (ART) – ein iteratives Verfahren – durchgesetzt haben. Für eine detaillierte Beschreibung der jeweiligen Verfahren sei auf [11] verwiesen.

Das Ergebnis einer Auswertung ist ein diskretes zweidimensionales Feld der linearen Schwächungskoeffizienten. Durch Zusammenfassen übereinanderliegender Schichten kann so eine dreidimensionale Verteilung der linearen Schwächungskoeffizienten  $\mu(x, y, z)$  erstellt werden. Dies zeigt beispielhaft Abb. 2.19. Durch zusätzliche Anwendung von Methoden der Bildverarbeitung wurden Bereiche mit gleichem linearen Schwächungskoeffizienten in gleicher Farbe wiedergegeben, sowie Teilbereiche transparent gesetzt.



**Abbildung 2.19:** *Dreidimensionale Ansicht eines Untersuchungsobjekts durch Zusammenfassung vieler zweidimensionaler Tomogramme. Bereiche mit gleichen linearen Schwächungskoeffizienten sind in der gleichen Farbe wiedergegeben.*

## 2.3 Kombinierte Messungen

### 2.3.1 Vielfachscheiben-Scan mit Transmissionskorrektur

Bei dieser Auswertemethode [12] wird das Untersuchungsobjekt in  $n$  einzelne Segmente unterteilt (siehe dazu Abb. 2.20). Für jedes einzelne Segment werden die nuklid-spezifischen Aktivitäten aus den Ergebnissen eines Vielfachscheiben-Scans berechnet

4. Segment	$A'_4$
3. Segment	$A'_3$
2. Segment	$A'_2$
1. Segment	$A'_1$

**Abbildung 2.20:** Schematische Darstellung der Unterteilung des Untersuchungsobjekts in einzelne Segmente.

und unter der Annahme einer nahezu homogen verteilten Matrix mit Hilfe experimentell ermittelter Transmissionsdaten für die  $n$  Segmente korrigiert. Die Gesamtkativität  $A$  eines Radionuklids innerhalb des Untersuchungsobjekts ergibt sich durch Summation der Aktivitätswerte jedes einzelnen Segments:

$$A = \sum_{i=1}^n A'_i \quad (2.25)$$

Dabei stellt  $A'_i$  den Aktivitätswert dar, der alleine aus dem Beitrag des betrachteten Segments  $i$  herrührt. Er wird gemäß Gl. 2.26 durch Entfaltung der gemessenen Aktivitätswerte  $A_i^*$  ermittelt; dabei werden die Beiträge durch die benachbarten Segmente aufgrund des endlichen Öffnungswinkels des Detektors abgezogen.

$$A'_i = F^{-1}(A_i^*) = A_i^* - \sum_{k=1, k \neq i}^n (a_k \cdot A_k^*) \quad (2.26)$$

wobei:

$a_k$ : von der Messgeometrie und den Schwächungseigenschaften des Messobjekts abhängige Entfaltungsfaktoren; werden durch Kalibrationsmessungen ermittelt.

Der für das Segment  $i$  gültige Aktivitätswert  $A_i^*$  umfasst die aus dem Segment  $i$  emittierte Gamma-Strahlung sowie die Beiträge aus den benachbarten Segmenten und wird mit Hilfe der Gl. 2.27 bestimmt.

$$A_i^* = \frac{1}{\varepsilon_j \cdot p_j} \cdot COR_{i,j} \cdot V_i \cdot Z_{i,j} \quad (2.27)$$

mit:

$\varepsilon_j$ : Effektivität des Detektorsystems für die Energielinie  $j$

$p_j$ : Übergangswahrscheinlichkeit der Energielinie  $j$

$Z_{i,j}$ : gemessene Zählrate für die Energielinie  $j$  im Segment  $i$

$V_i$ : Volumen zwischen Untersuchungsobjekt und Kollimatorkegel

$COR_{i,j}$ : Korrekturfaktor

Der aus experimentell ermittelten Transmissionsdaten berechnete Korrekturfaktor  $COR_{i,j}$  beruht auf einem einfachen geometrischen Modell, das die Schwächung der von einer externen Gamma-Quelle emittierten Strahlung durch ein Segment in zwei Anteile aufspaltet:

$$COR(E) = C_{ext}(E) \cdot C_{self}(E) \quad (2.28)$$

Wobei  $C_{ext}$  die Schwächung der emittierten Gamma-Strahlung durch die Objektbegrenzung gemäß Gl. 2.29 berücksichtigt und  $C_{self}$  die Selbstabsorption durch die im betrachteten Segment näherungsweise homogen verteilte Matrix (Gl. 2.30).

$$C_{ext}(E) = e^{\mu_{Wand} \cdot d_{Wand}} \quad (2.29)$$

$$C_{self}(E) = \frac{k \cdot \ln T(E)}{(1 - T(E))^k} \quad (2.30)$$

mit:

$k$ : Skalierungsfaktor, der die vorliegende Messgeometrie berücksichtigt

$T(E)$ : Transmissionsfunktion

Die Transmissionsfunktion  $T(E)$  wird für jedes Segment auf der Basis experimentell ermittelter Transmissionsfaktoren  $T_{i,j}$  berechnet [13]. Dafür wird das Untersuchungsobjekt durch seine Körperachse in verschiedenen Höhenpositionen mit einer externen Gamma-Quelle mehrerer Energielinien (z. B.  $^{192}\text{Ir}$  oder  $^{152}\text{Eu}$ ) durchstrahlt und die durchgehende Gamma-Strahlung mit einem Detektor registriert. Für jeden identifizierten Peak im aufgenommenen Spektrum kann der Transmissionsfaktor für das durchstrahlte Segment  $i$  nach Gl. 2.31 bestimmt werden.

$$T_{i,j} = \frac{Z_{i,j}}{Z_{i0}} \quad (2.31)$$

mit:

$Z_{i,j}$ : Zählrate des Segments  $i$  für die Energielinie  $j$

$Z_{i0}$ : Zählrate für die Energielinie  $j$  aus der entsprechenden Referenzmessung mit leerem Objekt

Die experimentell ermittelten Transmissionsfaktoren werden durch eine Funktion angenähert, die die Energieabhängigkeit sowie die Abhängigkeit der chemischen Zusammensetzung des Materials berücksichtigt und Transmissionsdaten für beliebige Energien zur Verfügung stellt.

### 2.3.2 Emissions-Computer-Tomographie

Die leistungsfähigste aller tomographischen Untersuchungsmethoden ist die Emissions-Computer-Tomographie (ECT). Dabei werden die Ergebnisse aus Emissions- und Transmissionstomographischen Messungen verknüpft. Die emittierte Gamma-Strahlung aus dem Untersuchungsobjekt wird nuklidspezifisch mittels eines oder mehrerer hochauflösender kollimierter Germanium-Detektoren gemessen und die Verteilung der Schwächungskoeffizienten wird innerhalb des Objekts analog zur TCT ermittelt. Der Bewegungsablauf beim Registrieren der Daten entspricht dabei dem einer TCT-Messung, d. h. für eine zweidimensionale Tomographie wird das Objekt an den Detektoren vorbeigefahren und nach jeder kompletten Translationsbewegung um einen bestimmten Rotationswinkel gedreht. Das Ergebnis einer ECT-Messung, ein so genanntes Emissions-Tomogramm, gibt die grobe Aktivitätsverteilung eines ausgewählten Gamma-Strahlers in einer Ebene (Höhenposition) im Untersuchungsobjekt wieder. Durch die Korrektur dieser Ergebnisse mit den aus der TCT bestimmten Verteilung der linearen Schwächungskoeffizienten der Matrix, in der die Gamma-Strahler eingebettet sind, ist eine gute Lokalisierung und eine Quantifizierung der erkannten Nuklide möglich. Wird auf diese Weise das gesamte Objekt abgetastet, d. h. Messung in vielen Höhenpositionen, ist es prinzipiell möglich, alle in einem Abfallgebilde identifizierten Gamma-Strahler zu quantifizieren. Der hierfür erforderliche Zeitaufwand ist für dieses Verfahren allerdings so groß, dass die ECT in der Routinekontrolle von radioaktiven Abfallprodukten keine Anwendung findet.

## 2.4 Zusammenfassung

In den vorherigen Abschnitten wurden die wichtigsten, in der routinemäßigen, zerstörungsfreien Kontrolle radioaktiver Abfallgebilde eingesetzten Messverfahren diskutiert. Es wurde deutlich, dass je einfacher das eingesetzte Messverfahren ist, desto mehr Annahmen werden für die Auswertung der Messdaten benötigt. In welchem Maße diese Annahmen gerechtfertigt sind, wird nicht diskutiert; Fehler und Toleranzbereiche können praktisch nicht angegeben werden. Andererseits wurde gezeigt, dass eine unvoreingenommene Auswertung (wie z. B. für die ECT), d. h. eine Auswertung ohne zusätzliche

Annahmen, zwar prinzipiell möglich ist, in der Praxis aufgrund des extrem hohen Zeitaufwands (und auch der hohen Anschaffungs- und Unterhaltskosten eines derartigen Messsystems) nicht sinnvoll einsetzbar ist. Diese Problematik wird in Kapitel 3 näher untersucht.

## 2.5 Charakterisierung radioaktiver Abfälle in Europa

Abschließend wird eine tabellarische Übersicht der auf dem Gebiet der Produktkontrolle radioaktiver Abfälle führenden europäischen Messzentren gegeben. Sie alle stehen miteinander im ständigen Kontakt und Austausch (z. B. über ENTRAP<sup>(8)</sup>); daher konnten die Erfahrungen der vergangenen Jahren in die Entwicklung und Optimierung des in Kapitel 3 beschriebenen Analyse- und Auswerteverfahrens einfließen. In den Tabn. 2.3 und 2.4 werden für jede Institution<sup>(9)</sup> die folgenden Punkte aufgeführt:

- der Modus der eingesetzten Gamma-Scan-Technik; dabei werden nur die in Abschnitt 2.1 beschriebenen Betriebsarten des SGS aufgeführt; andere eingesetzte Methoden (wie z. B. Punktmessung, Horizontal-Scan und Spiral-Scan) sind in der Tabelle mit dem Hinweis *andere Betriebsarten* markiert.
- die angewendete Absorptionskorrektur
- das mögliche Dichteintervall der untersuchten Matrix

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass die Messzentren in Deutschland und Frankreich über die umfangreichste Messtechnik verfügen, so dass dort die aussagekräftigsten Messergebnisse zur Verfügung stehen.

---

<sup>(8)</sup>European Network of Testing Facilities for the Quality Checking of Radioactive Waste Packages

<sup>(9)</sup>Für die genaue Bezeichnung der aufgeführten Institutionen sei auf Anhang B verwiesen.

Institution, Land	Gamma- Messung	Scan-Modus (typische Anzahl Messpositionen)	Absorptions- korrektur	externe Quelle	Matrixdichte in g/cm <sup>3</sup>
RCM, D	SGS, IGS	- Vertikal (40) - Winkel (24) - Vielfachscheiben (336) - Swivel (30)	- mittlere Dichte über Wägung - zusätzliche Transmissionsmessung	Co-60	0,2 - 4,0
FZJ, D	SGS, IGS	- Winkel (8) - Vielfachscheiben (96)	- bekannte Matrix - mittlere Dichte über Wägung (- zusätzliche Transmissionsmessung)	-----	0,4 - 4,0
NNC, GB	SGS	- Vertikal (8) - Winkel (1)	- zusätzliche Transmissionsmessung	Eu-152	keine Angaben
LOVI, FIN	IGS	andere Betriebsarten	- bekannte Matrix	-----	keine Angaben
TVO, FIN	IGS	andere Betriebsarten	- bekannte Matrix	-----	keine Angaben
SCK, B	SGS, IGS	- Vertikal (4)	- mittlere Dichte über Wägung	-----	0,02 - 1,9

**Tabelle 2.3:** Übersicht (Teil 1) der europäischen Messzentren, die auf dem Gebiet der Produktkontrolle radioaktiver Abfälle führend sind [3]; die genauen Bezeichnungen der einzelnen Institutionen sind in Anhang B aufgeführt. Es werden die zwei Möglichkeiten der Gamma-Messung, das integrale Gamma-Scanning (IGS) und das segmentierte Gamma-Scanning (SGS) unterschieden.

Institution, Land	Gamma- Messung	Scan-Modus (typische Anzahl Messpositionen)	Absorptions- korrektur	externe Quelle	Matrixdichte in g/cm <sup>3</sup>
ITN, E	SGS	- Vertikal (8) - Winkel (1)	- bekannte Matrix - mittlere Dichte über Wägung	-----	keine Angaben
NUCL, I	SGS	- Vertikal (8)	- bekannte Matrix - zusätzliche Transmissionsmessung	Na-22	0,2 - 1,2
ENEA, I	SGS	- Vertikal (8-10) - Winkel (keine Angaben)	- mittlere Dichte über Wägung - zusätzliche Transmissionsmessung	Na-22	0,2 - 2,0
CEA, F	SGS, IGS	- Vertikal (12) - Winkel (9) - Vielfachscheiben (12)	- bekannte Matrix - zusätzliche Transmissionsmessung	Co-60	0,2 - 6,0
KEMA, NL	IGS	andere Betriebsarten	- bekannte Matrix	-----	0,2 - 4,0

Tab. 2.4: Teil 2 der Übersicht (für Erklärungen sei auf den Teil 1 (Tab. 2.3) verwiesen).



# Kapitel 3

## Problematik

### 3.1 Richtigkeit und Genauigkeit

Das Ziel der Quantifizierung des Gamma-strahlenden Aktivitätsinventars in großvolumigen Objekten ist die Bestimmung der nuklidspezifischen Aktivitäten auf der Grundlage aller vorhandenen Daten mit höchstmöglicher Richtigkeit und Genauigkeit. Dabei versteht man unter Richtigkeit die Übereinstimmung des Erwartungswerts für die unbekannte Größe mit dem wahren Wert dieser Größe. Unter Genauigkeit versteht man den Bereich aller berechneten Werte, die aufgrund der vorhandenen Daten und ihrer statistischen Schwankungen für den Wert der unbekanntes Größe in Frage kommen, d. h. den zum Erwartungswert gehörenden Vertrauensbereich. Die in Kapitel 2 vorgestellten Auswerteverfahren erzielen ein hohes Maß an Richtigkeit bei der Berechnung des Aktivitätswertes eines Untersuchungsobjekts, wenn die jeweils geforderten Bedingungen für die Aktivitäts- und Matrixverteilungen erfüllt sind. Dies ist in der Praxis nur selten der Fall. Außerdem liefert keines dieser Verfahren eine fundierte Bestimmung der Genauigkeit. Der Vertrauensbereich wird hier oft nur auf der Grundlage der einfachen Zählstatistik bestimmt ohne auftretende (mögliche) Abweichungen von diesen Bedingungen zu berücksichtigen. Letztere sind aber in der Regel der Hauptgrund für große Vertrauensbereiche. Ein weiteres Problem tritt auf, wenn in der Auswertung benötigte Parameter nicht in Form von Messdaten oder sonstigen Informationen vorliegen. Hierfür gibt es keine allgemein anwendbare Methode, die diese Unkenntnis der (exakten) Eingangsdaten und deren Auswirkung auf die Ergebnisdaten in einer Auswertung quantitativ berücksichtigen kann. Oft wird dieser Unsicherheitsfaktor vernachlässigt, oder nur mittels eines empirischen Faktors berücksichtigt.

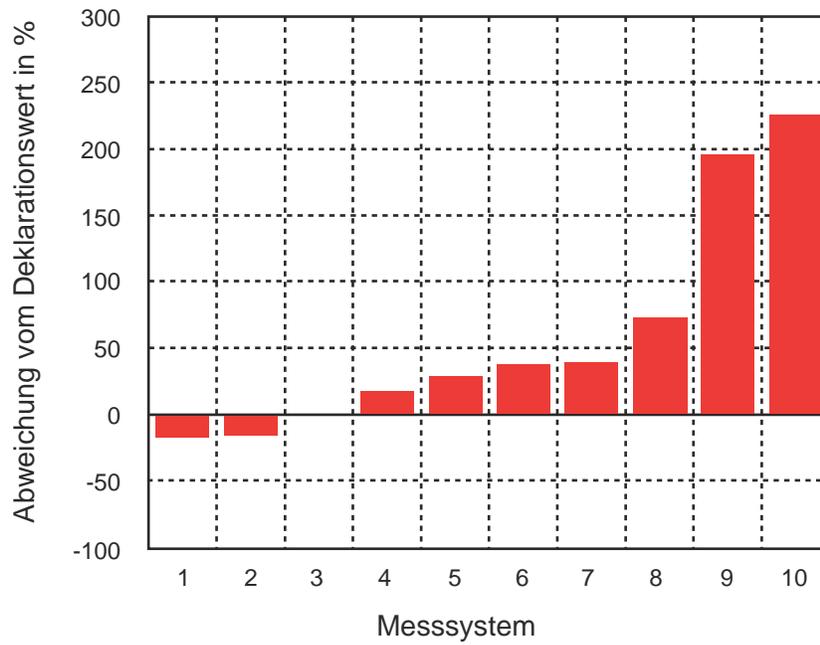
## 3.2 Auswertung unter Routinebedingungen

Im Rahmen einer Studie wurden mehr als 1000 konditionierte Abfallgebinde, die zwischen 1975 und 1988 von Kernkraftwerken verursacht wurden, untersucht [12]. Das Ergebnis hinsichtlich der Aktivitäts- und Matrixverteilungen ist im Folgenden aufgeführt:

- Die Verteilung von Aktivität und Dichte kann bei 25 % der Abfallgebinde als nahezu homogen bezeichnet werden.
- Der größte Teil der Abfallgebinde (60 %) beinhaltet eine zumindest teilweise inhomogene Verteilung von Aktivität und Dichte.
- Bei 15 % der Abfallgebinde liegt eine signifikant inhomogene Verteilung von Aktivität und Dichte vor.

Obwohl die wenigsten der Abfallgebinde den Voraussetzungen entsprechen, die für eine Anwendung der in Kapitel 2 vorgestellten Auswertemethoden gefordert werden, bilden diese Verfahren – mit Ausnahme der Emissions-Computer-Tomographie – für die Routinekontrolle radioaktiver Abfallgebinde häufig die Grundlage der Auswertung. Die Folgen für das Ergebnis der quantitativen Charakterisierung eines Objekts mit unbekanntem Inhalt auf der Basis zerstörungsfreier Messungen unter Anwendung solcher Auswerteroutinen wird an den Resultaten eines europäischen Ringversuchs [14] deutlich. Der zwischen 1996 und 2001 durchgeführte Ringversuch bestand aus der zerstörungsfreien Analyse von 220 L-Gebinden, die jeweils ein repräsentatives Beispiel für die Abfälle, die typischerweise in den beteiligten Instituten bzw. Ländern kontrolliert werden, darstellen sollten. Es wurden insgesamt 18 Gebinde von Teilnehmern des Ringversuchs hergestellt (bzw. bereitgestellt) und ihr jeweiliger Deklarationswert zum Teil messtechnisch ermittelt. Die Dichte der jeweiligen inaktiven Matrix lag zwischen 0,08 und 3,00 g/cm<sup>3</sup>. An dem Test nahmen 10 Institute aus sieben europäischen Ländern, die jeweils in ihrem Land akzeptierte Prüfstellen darstellen, teil. Die Vorgabe war, alle zerstörungsfreien Messmethoden, die auch in der Praxis bei der Untersuchung radioaktiver Abfälle zum Einsatz kommen, einzusetzen, mindestens aber Gamma-Scanning. Die bei diesem Ringversuch gewonnenen Erfahrungen im Gebiet der zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden für großvolumige Abfallgebinde sollten im Besonderen der Verbesserung der Genauigkeit vorhandener Systeme dienen.

Beispielhaft für die Ergebnisse des Ringversuchs zeigt Abb. 3.1 für jeden Teilnehmer die prozentuale Abweichung des Aktivitätswertes bezogen auf den Deklarationswert des Nuklids <sup>60</sup>Co in einem der mit realem Abfall gefüllten 200 L-Fässer. Die Ergebnisse



**Abbildung 3.1:** Ergebnisse des Ringversuchs: prozentuale Abweichung des Aktivitätswertes von  $^{60}\text{Co}$  bezogen auf den Deklarationswert des Nuklids in einem der mit realem Abfall gefüllten 200L-Fässer. Der Deklarationswert wurde von Institution 3 messtechnisch ermittelt.

der Institutionen 1 bis 5 beruhen auf integralem Gamma-Scanning (IGS), die Systeme 6 bis 10 setzten segmentiertes Gamma-Scanning (SGS) ein und nur die Institute 9 und 10 verwendeten zusätzlich Transmissionstechniken wie Digitale Radiographie (DR) und Transmissions-Computer-Tomographie (TCT). Der Deklarationswert wurde von Institution 3 durch Auswertung der Ergebnisse aus dem IGS bestimmt. Die drastische Abweichung in den Ergebnissen für das im Allgemeinen leicht zu bestimmende Nuklid  $^{60}\text{Co}$  basiert auf dem Vorhandensein einer zusätzlichen Abschirmstruktur im Inneren des Abfallfasses, die a-priori nicht bekannt war und deshalb in der Auswertung nicht ohne weiteres berücksichtigt werden konnte. Dieser falsche Deklarationswert war Bezugswert für die Ergebnisse der einzelnen Institute. Die Institutionen 9 und 10 konnten durch Anwendung von Transmissionsmessungen die Abschirmstruktur erkennen und in ihren Auswertungen mit einbeziehen und kamen mit ihren Ergebnissen dem wahren Wert der Aktivität für das Abfallfass am Nächsten. Für einfache Verhältnisse, d. h. für weitestgehend homogene Aktivitätsverteilungen in nahezu homogener inaktiver Matrix sowie für Abfälle mit geringer Dichte zeigten die Ergebnisse der einzelnen Institute im Rahmen der Messgenauigkeit eine gute Übereinstimmung. Bei stark inhomogener Aktivitätsverteilung und Matrixzusammensetzung sowie bei zusätzlichen Abschirmungen, die nicht deklariert waren, variierten die Ergebnisse zwischen den einzelnen Instituten um mehrere Größenordnungen (siehe Abb. 3.1). Hier zeigte sich deutlich, dass in Fäl-

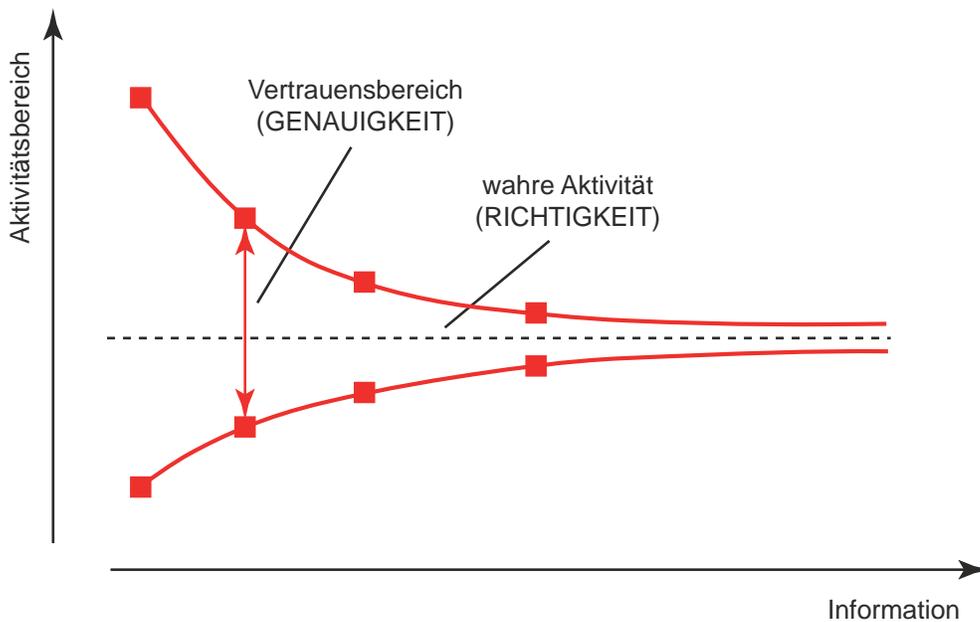
len mit ungenügender Information über die Zusammensetzung des Abfalls zusätzliche Messverfahren, wie z. B. Transmissionsmessungen, zwingend notwendig sind. Aber auch die Ergebnisse der Institute, die derartige erweiterte Messverfahren einsetzten, zeigten Abweichungen auf, die nicht durch statistische Schwankungen zu erklären sind. Hier zeigte sich deutlich das Fehlen eines einheitlichen Auswertemodells, welches alle verfügbaren Informationen auf eindeutige Weise miteinander kombiniert und neben dem Erwartungswert auch Angaben über den Vertrauensbereich des Messresultats liefert.

### 3.3 Zusammenfassung

Unter Routinebedingungen wird die Oberflächenzählratenverteilung in einem Untersuchungsobjekt durch eine SGS-Messung ermittelt. Ist diese homogen verteilt und ist die inaktive Matrix in diesem Objekt ebenfalls homogen verteilt, so dürfen die in Kapitel 2 beschriebenen Auswerteverfahren zur Bestimmung der Gesamtaktivität im Untersuchungsobjekt angewendet werden. Anhand von Korrekturfaktoren wird die gleichmäßige Schwächung von Gamma-Strahlung durch das vorliegende Material berücksichtigt. Ist die inaktive Matrix in einem Untersuchungsobjekt nicht gleichmäßig verteilt, so muss die unterschiedliche Schwächung der Gamma-Strahlung mit Hilfe zusätzlicher Transmissionsmessungen korrigiert werden; da die Schwächung außer vom schwächenden Material auch von der Energie der geschwächten Gamma-Strahlung abhängt, müssten zu allen aus dem Untersuchungsobjekt emittierten Gamma-Energien Transmissionsdaten ermittelt werden. In der Routineauswertung wird allerdings meist nur die Transmission einer (oder sehr weniger) Energien beim Durchgang durch das Untersuchungsobjekt gemessen und anhand dieser Ergebnisse eine Korrektur durchgeführt.

Im Folgenden sind die Probleme der momentan in der Routinekontrolle radioaktiver Abfallobjekte auf der Basis zerstörungsfreier Messverfahren zur Verfügung stehenden Auswerteverfahren zusammengestellt:

- Bedingungen, die die Anwendung der Auswerteverfahren erlauben, sind nur selten erfüllt.
- In der Regel reichen die vorhandenen Informationen zu einem Objekt nicht zu dessen exakten Charakterisierung.
- Häufig werden nicht alle verfügbaren Informationen in eine Auswertung mit einbezogen.
- Eine einheitliche und fundierte Bestimmung der Vertrauensbereiche fehlt.



**Abbildung 3.2:** Verbesserung von Genauigkeit und Richtigkeit des zu bestimmenden Aktivitätsbereichs mit zunehmendem Informationsgehalt.

### 3.4 Lösungsvorschlag

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Analyse- und Auswerteverfahren vorgestellt, das die quantitative Aktivitätsbestimmung radioaktiver Objekte auf der Basis von Ergebnissen aus zerstörungsfreien Messungen an diesem Objekt ermöglicht. Das Konzept, das im nächsten Abschnitt beschrieben wird, wurde entwickelt, um die im letzten Abschnitt angesprochenen Probleme zu beheben und beruht auf der konsequenten Einbeziehung aller direkt oder indirekt zur Verfügung stehenden Informationen zu einem Objekt in die Auswertung. Das Ergebnis sind die Erwartungswerte der nuklidspezifischen Aktivitäten des radioaktiven Inventars eines Untersuchungsobjekts sowie die zugehörigen Vertrauensbereiche, die auf der Basis der Unvollständigkeit der vorhandenen Informationen ermittelt werden. Zusätzlich wird eine Liste möglicher Objektzusammensetzungen, die mit den vorliegenden Informationen verträglich sind, erstellt, wobei insbesondere auf die Verteilung von nuklidspezifischen Aktivitäten sowie die Verteilung der inaktiven Matrix eingegangen wird. Die Anzahl der verschiedenen möglichen Objektzusammensetzungen spiegelt die Unmöglichkeit wider, ein Objekt in der Praxis exakt zu beschreiben. Je mehr Informationen in die Charakterisierung mit einfließen, desto kürzer wird die Liste der unterschiedlichen Möglichkeiten ausfallen. Dieser Sachverhalt ist qualitativ in Abb. 3.2 dargestellt.

## 3.5 Konzept

Das Analyse- und Auswerteverfahren basiert auf einem modularen Aufbau und hat die automatische Ermittlung des nuklidspezifischen Aktivitätsinventars eines Untersuchungsobjekts zum Ziel. Im Folgenden wird das prinzipielle Konzept des Verfahrens kurz erläutert. Module, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden, werden in den Kapiteln 4 und 5 detailliert beschrieben.<sup>(1)</sup> Auf die technische Umsetzung in einem umfassenden Software-Programm wird in dieser Arbeit nicht eingegangen; dazu sei auf [15] verwiesen. Der modulare Aufbau gewährleistet, dass das aktuell zugrunde liegende Auswertemodell gegebenenfalls innerhalb des bestehenden Konzepts erweitert werden kann.

Abb. 3.3 zeigt den schematischen Ablauf des entwickelten Analysemodells, für das zumindest eine Oberflächenzählratenverteilung aus einer Gamma-Emissionsmessung vorliegen muss. In einem ersten, vorbereitenden Schritt werden alle für die Auswertung nutzbaren Informationen zusammengetragen (Modul **Eingabe**). Für ihre Verknüpfung ist es erforderlich, sie auf geeignete Weise umzuwandeln (Modul **Aufbereitung**). Auf der Grundlage dieser Informationen werden Modellbeschreibungen des Untersuchungsobjekts erstellt. Da die Informationen in der Regel nicht ausreichen bzw. so genau sind, dass sie nur eine eindeutige Modellbeschreibung erlauben, wird es eine Vielzahl an prinzipiell mit allen vorhandenen Daten und Informationen konsistenten Modellbeschreibungen geben. Diese Modellerzeugung erfolgt im Modul **Simulation**, in dem auch alle vorliegenden Messungen für die verschiedenen Modellbeschreibungen simuliert werden. Aus dem Vergleich von gemessenen und den entsprechenden simulierten Daten wird im Modul **Analyse** über die Akzeptanz einer Modellbeschreibung entschieden und gegebenenfalls der entsprechende Aktivitätswert bestimmt. Aus allen möglichen Aktivitätswerten wird abschließend der Erwartungswert und der zugehörige Vertrauensbereich bestimmt. Im Folgenden werden die einzelnen Module kurz beschrieben.

### Eingabe

Durch systematische Abfrage-Routinen werden alle zur Verfügung stehenden Informationen zu einem Untersuchungsobjekt gesammelt; im Folgenden werden sie nach ihrem Ursprung unterschieden: durch Messung gewonnene Informationen gehören der Kategorie *Messdaten* an und Informationen, die z. B. durch den Eigentümer des Objekts bereitgestellt werden, werden mit *a-priori-Daten* bezeichnet. Eine weitere Gruppe stellen jene Informationen dar, die allgemein zur Auswertung beliebiger Objekte zur

---

<sup>(1)</sup>Das gesamte Analyse- und Auswerteverfahren wurde im Rahmen eines vom BMBF geförderten Projekts in Kooperation zwischen RCM und FZJ (siehe Anhang B) verwirklicht.

Verfügung stehen müssen; diese werden in *Datenbanken* gesammelt. Im Folgenden sind zu jeder Kategorie einige Beispiele aufgeführt:

1. Messdaten

- äußere Abmessungen
- Masse
- Dosisleistung
- nuklidspezifische Zählratenverteilung von Gamma-Messungen
- energiespezifische Transmissionsdaten von Gamma-Messungen

2. a-priori-Daten

- Nuklidvektor
- interne Abschirmung(en)
- Matrixmaterial
- Füllhöhe
- Dichtebereich der Matrix

3. Datenbanken

- Behälter
- Detektor
- Nuklide (Energienlinien, Übergangswahrscheinlichkeiten)
- Materialien (Schwächungskoeffizienten, Dichten)

### **Aufbereitung von Informationen**

Um die Informationen zu einem Untersuchungsobjekt weiter verarbeiten zu können, müssen viele Messdaten erst aufbereitet werden. Die Methode der Aufbereitung von Messdaten aus dem SGS, der DR sowie der Einfachen Transmission wird in Kapitel 4 ausführlich erläutert. Das Ziel dabei ist jeweils die Erstellung von Parameterdatensätzen, in denen die gewonnenen Informationen zusammengefasst werden. Kann ein Parameter aus den vorhandenen Informationen nicht eindeutig bestimmt werden, so kann doch zumindest eine Bandbreite für ihn angegeben werden, innerhalb deren Grenzen sein Wert variieren kann.

## Simulation

### *Objekterzeugung*

Aus den vorhandenen Informationen werden mögliche virtuelle Objekte (Modellbeschreibungen) erstellt, die die Kenntnis über das real untersuchte Objekt widerspiegeln. Ein Objekt setzt sich dabei im Allgemeinen aus einzelnen Bereichen (Körper) zusammen, wobei jeder Bereich durch die Angabe folgender "Eigenschaften" beschrieben wird:

- Geometrie + äußere Abmessungen
- Position im Raum
- Material (Dichte, Schwächungskoeffizient)
- Radionuklide, Energie
- enthält weitere Bereiche

Häufig ist die Verteilung der Radionuklide sowie der inaktiven Matrix nur unvollständig bekannt; deswegen gelten alle Modelle, die den vorliegenden Informationen nicht widersprechen, als potentiell möglich, den Aufbau des realen Untersuchungsobjekts zu beschreiben. In Abschnitt 5.2 wird das schrittweise Vorgehen bei der Objekterzeugung anhand von Beispielen diskutiert.

### *Messung simulieren*

Für jedes potentiell mögliche virtuelle Objekt muss die SGS-Messung, die am tatsächlichen Objekt durchgeführt wurde, durch Simulation nachgebildet werden. Dazu werden im virtuellen Objekt an Stellen, an denen sich Radionuklide befinden, statistisch Startpunkte für Photonen verteilt und ihre Schwächung beim Durchgang durch die im Objekt verteilte inaktive Matrix berechnet.<sup>(2)</sup> Als Ergebnis erhält man die Photonenverteilung außerhalb des virtuellen Objekts. Die Verknüpfung von Effizienzfeld des Detektorsystems und Photonenverteilung ergibt die simulierte Oberflächenzählratenverteilung. Durch Einsatz der in der realen Messung vorgelegenen Messparameter (z. B. Messzeit, Anzahl der einzelnen Messpositionen) zur Erstellung der Photonenverteilung erreicht man für das simulierte Messergebnis den selben Aufbau wie für das reale Messergebnis.

---

<sup>(2)</sup>Für detaillierte Ausführungen über die Simulation einer Messung sei auf [15] verwiesen.

### *Detektorsystem simulieren*

Für die Simulation von Messungen ist die Kenntnis des Effizienzfeldes des eingesetzten Detektorsystems erforderlich. Auf der Basis von Kalibrationsmessungen mit radioaktiven Punktquellen oder MCNP<sup>(3)</sup>-Rechnungen kann dieses abhängig von der Energie sowie der Raumrichtung der in den Detektor eintreffenden Photonen berechnet werden.<sup>(4)</sup> In der Regel ist die Simulation eines Detektorsystems (bei festem Kollimator und Abschirmung) nur einmal durchzuführen.

### **Analyse**

Jedes durch Simulation erzeugte Messergebnis wird mit dem entsprechenden real vorliegenden Messergebnis verglichen. Stimmen beide für jede Messposition innerhalb eines festgelegten Toleranzbereichs (siehe dazu Abschnitt 5.1.3) überein, so wird der dem simulierten Messergebnis zugrunde liegende virtuelle Objektaufbau als Möglichkeit bewertet, das reale Untersuchungsobjekt zu beschreiben und die zugehörigen Aktivitätswerte als mögliche Lösungen betrachtet.

### **Ausgabe**

Das Ergebnis des Auswerteverfahrens ist zum einen eine Liste aller möglichen Objektaufbauten, die mit den vorhandenen Informationen über das Untersuchungsobjekt verträglich sind. Zum anderen werden alle nuklidspezifischen Aktivitätswerte, die für die akzeptierten Objektmodelle berechnet wurden, zu einem Aktivitätsintervall zusammengefasst, das den wahren Wert der Gesamtaktivität im Untersuchungsobjekt beinhaltet. Aus diesen Werten kann abschließend der Erwartungswert und der Vertrauensbereich bestimmt werden.

---

<sup>(3)</sup>Monte Carlo N-Particle Transport

<sup>(4)</sup>Für detaillierte Ausführungen über die Simulation eines Detektorsystems sei auf [16] verwiesen.

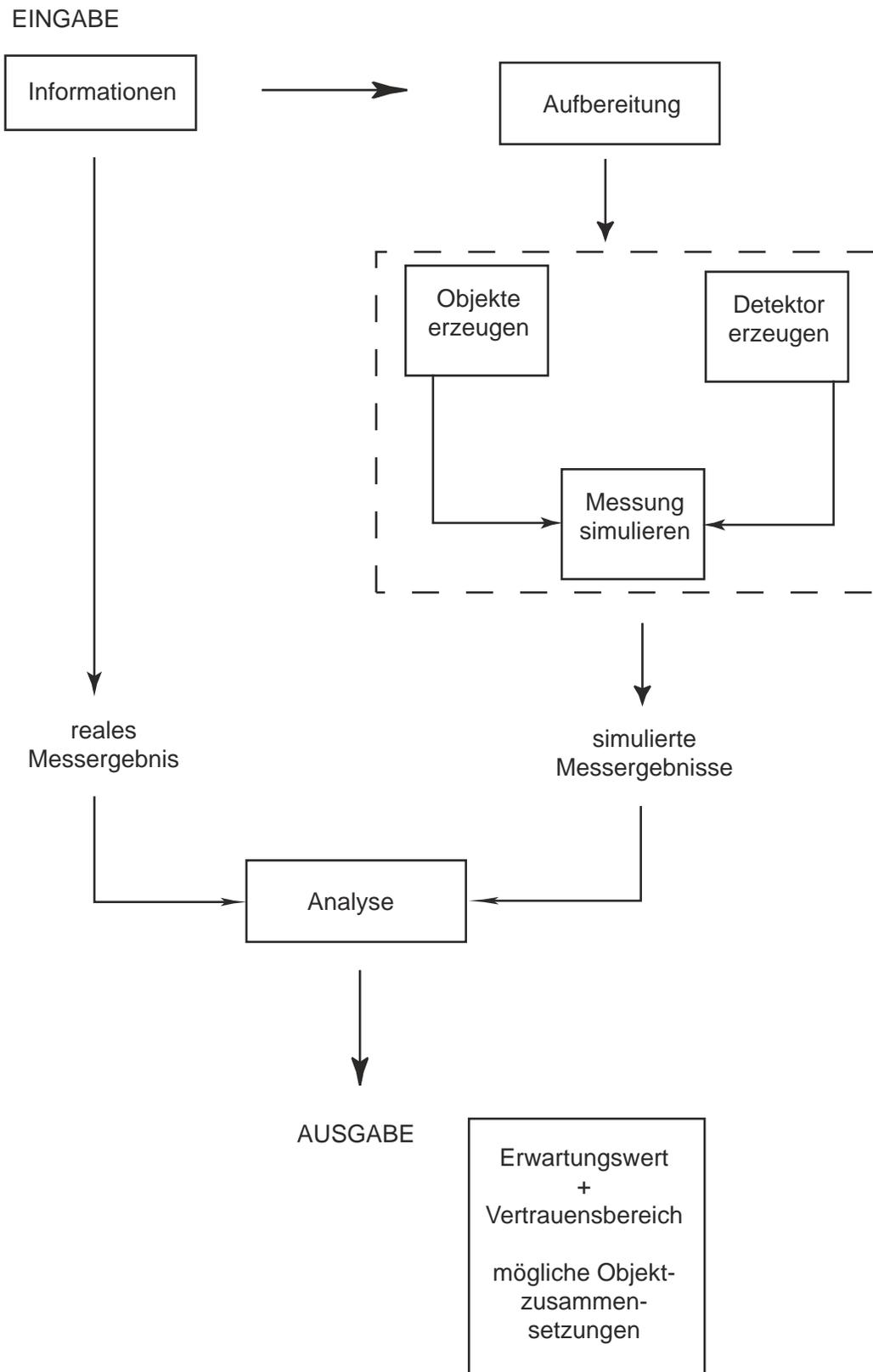


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des Konzepts des neuen Auswertemodells.

# Kapitel 4

## Bereitstellung von Informationen

Manche Informationen können direkt weiter verwendet werden, wie z. B. das Ergebnis einer Wägung oder auch Informationen zu einem verwendeten Behälter (a-priori-Information), andere dagegen liegen erst nach der Analyse von primär zur Verfügung stehenden Daten vor; dazu gehören z. B. die Information über die Verteilung von Radionukliden, die aus dem Ergebnis eines segmentierten Gamma-Scannings (SGS) gewonnen werden kann und die Information über die Verteilung der inaktiven Matrix im Untersuchungsobjekt, die aus dem Ergebnis von Transmissionsmessungen gewonnen werden kann. Diese beiden Möglichkeiten der Informationsaufbereitung bzw. Analyse wird im Folgenden detailliert beschrieben.

### 4.1 Auswertung von Gamma-Emissionsmessungen

Die Ergebnisse von Gamma-Emissionsmessungen<sup>(1)</sup> dienen der Identifikation und Lokalisation von Radionukliden, die in einem zu untersuchenden Messobjekt enthalten sind. Im Folgenden wird die Auswertung von zur Verfügung stehenden Messergebnissen erläutert. Das Ziel dabei ist, Parametersätze zu bestimmen, auf deren Basis mögliche, d. h. mit allen vorhandenen Informationen verträgliche, Zusammensetzungen des Untersuchungsobjekts (Geometrie, Aktivitätsverteilung, Matrixverteilung) erstellt werden können.

#### 4.1.1 Integrale Gamma-Emissionsmessungen

Auf der Basis von Ergebnissen aus der integralen Gamma-Messung können Radionuklide identifiziert werden; ist bekannt (aus zusätzlichen Informationsquellen), dass die

---

<sup>(1)</sup>Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich *Gamma*-Emissionsmessungen diskutiert, deswegen wird im Weiteren häufig auf den Zusatz "Gamma" verzichtet.

Radionuklide homogen verteilt sind und in welchem Material sie verteilt sind, so kann aus der Zählrate der einzelnen identifizierten Nuklide ihre jeweilige Aktivität ermittelt werden.

### 4.1.2 Segmentierte Gamma-Emissionsmessungen

Aus dem segmentierten Gamma-Scanning (SGS) gewinnt man an der Außenseite des Untersuchungsobjekts ortsabhängige, energiespezifische Zählratenverteilungen, so genannte Oberflächenzählratenverteilungen. Die graphische Darstellung der auf die Mantelfläche des Untersuchungsobjekts projizierte Zählratenverteilung<sup>(2)</sup>, wie sie exemplarisch in Abb. 4.1 gezeigt ist, erlaubt visuell schnell und einfach eine Beurteilung der Verteilung eines Radionuklids. Im Folgenden wird die Möglichkeit der automatischen Ermittlung der räumlichen Verteilung einzelner Radionuklide innerhalb eines Messobjekts auf der Basis ihrer jeweiligen Oberflächenzählratenverteilung erläutert. Die Methode wird am Beispiel der künstlich erzeugten Zählratenverteilung, die der Abb. 4.1 zugrunde liegt, demonstriert. Sie entspricht dem Ergebnis für eine Energielinie einer SGS-Messung an einem 200 L-Fass mit einer Gesamtmesszeit von  $t_{\text{life}} = 10304 \text{ s}$ , in der für zehn Höhenpositionen und jeweils 24 Winkelschritten pro Höhenposition jeweils ein Einzelspektrum aufgenommen wurde.<sup>(3)</sup> Die Zählratenverteilung wurde aus der Kombination zweier tatsächlich durchgeführter SGS-Messungen erzeugt, um so realistisches Rauschen über der Zählratenverteilung zu gewährleisten. Das Beispiel beinhaltet gleichzeitig beide Fälle, die homogene und die heterogene Verteilung eines Radionuklids.

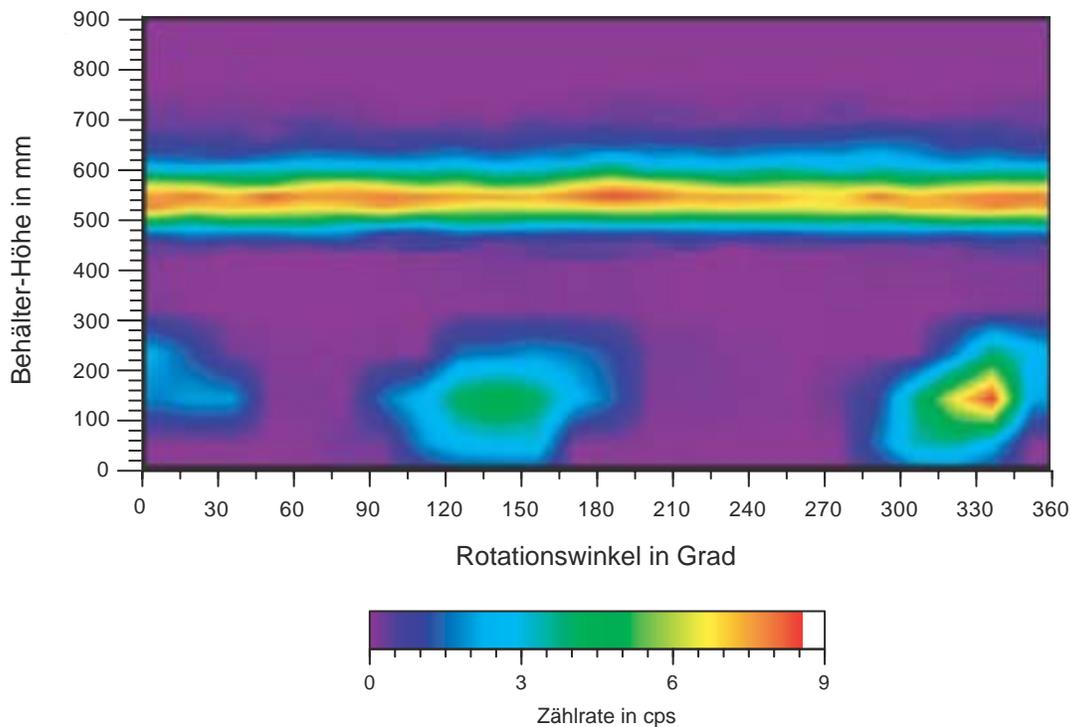
Eine Oberflächenzählratenverteilung ist ein Feld gemessener Zählraten für jeweils eine Energielinie, die nach ihrem Messort – also Höhen- und Winkelposition<sup>(4)</sup> – sortiert sind. Erstes Ziel der Auswertung einer SGS-Messung ist, das zu untersuchende Objekt für jedes Radionuklid (bzw. für eine Energielinie) in homogene und heterogene Bereiche zu unterteilen. Um diese Bereiche anschließend in einer entsprechenden Simulation der Messung eines virtuell aufgebauten Messobjekts darzustellen, sind geeignete Körper nötig, deren Abmessungen und jeweilige Position im virtuellen Messobjekt durch Auswertung der gemessenen Oberflächenzählratenverteilung bestimmt werden sollen. In Kapitel 5 wird ihre jeweilige Aktivität ermittelt. Es sei erwähnt, dass Oberflächenzählratenverteilungen jeweils für eine Energielinie erzeugt werden. Werden für

---

<sup>(2)</sup>Werte für die Zählrate zwischen den tatsächlich vorhandenen Messwerten werden durch lineare Interpolation gewonnen.

<sup>(3)</sup>Für die Erläuterung der Auswertung ist die Angabe eines konkreten Radionuklids sowie dessen betrachtete Energielinie nicht notwendig.

<sup>(4)</sup>Die Höhenposition wird ausgehend von der Unterkante des Messobjekts, die Winkelposition ausgehend von der Schweißnaht des Messobjekts entgegen dem Uhrzeigersinn gerechnet.



**Abbildung 4.1:** Graphische Darstellung einer künstlich erzeugten Zählratenverteilung aus der Messung eines 200L-Fasses.

ein Radionuklid mehrere Energielinien gemessen, so kann aus deren Oberflächenzählratenverteilungen jeweils unabhängig voneinander die Verteilung des entsprechenden Nuklids ermittelt werden und anschließend miteinander verglichen werden. Die Ergebnisse aus der Auswertung unterschiedlicher Oberflächenzählratenverteilungen für ein Radionuklid dürfen sich nicht gegenseitig ausschließen.

### Idee

Ausgangspunkt für die Bestimmung der räumlichen Nuklidverteilung ist das Feld der Zählraten für eine Energielinie des interessierenden Nuklids. Die Zählraten werden zusammen mit der Gesamtmesszeit, die in eine gemittelte Zeit pro gemessenes Segment umgerechnet wird, in Impulse umgewandelt. Die Analyse unterscheidet grundsätzlich zwei Schritte:

- die Analyse der Zählratenverteilung entlang der vertikalen Achse des Untersuchungsobjekts, also entlang der gemessenen Höhenpositionen und
- die Analyse der Zählratenverteilung in der horizontalen Ebene des Untersuchungsobjekts, also in Abhängigkeit der gemessenen Winkelpositionen.

Dazu werden entsprechend zwei verschiedene Darstellungsformen der gemessenen Impulse und ihrer Fehler<sup>(5)</sup> gewählt, so genannte Höhenverteilungen und Winkelverteilungen. Für eine Höhenverteilung werden die Impulse über alle  $N_\alpha$  gemessenen Winkelpositionen innerhalb einer Höhenposition  $i$  gemäß Gl. 4.1 aufsummiert.

$$I_i = \sum_{j=1}^{N_\alpha} I_{ij} \quad \text{für die Höhenposition } i \quad (4.1)$$

Für das vorliegende Beispiel ist die Höhenverteilung in Abb. 4.2 gezeigt. Peaks<sup>(6)</sup> in der Höhenverteilung repräsentieren z. B. zusammengehörige Bereiche, die sich dadurch ergeben, dass eine räumlich konzentrierte Aktivitätsverteilung in mehreren aneinander grenzenden Höhenpositionen zu messen ist. Solche nebeneinander liegenden als zusammengehörig erkannten Höhenpositionen können zu einer Schicht zusammengefasst werden. Für jede Schicht kann eine Winkelverteilung erzeugt werden, indem für jede Winkelposition  $j$  die Impulse aller zu dieser Schicht zugehörigen Höhen ( $k_1$  bis  $k_2$ ) gemäß Gl. 4.2 aufsummiert werden. Dabei empfiehlt sich eine periodisch erweiterte Auftragung über das tatsächlich gemessene Winkelintervall  $[0^\circ; 360^\circ[$  hinaus.

$$I_j = \sum_{i=k_1}^{k_2} I_{ij} \quad \text{für die Winkelposition } j \quad (4.2)$$

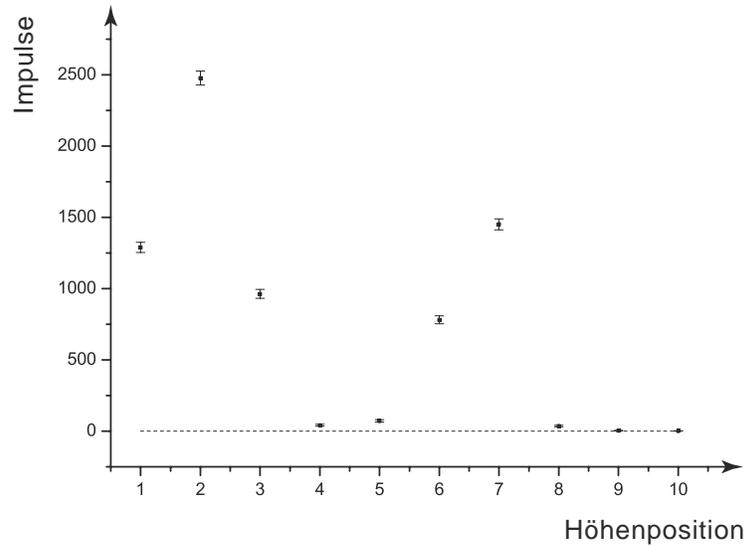
In Abb. 4.3 ist exemplarisch die Winkelverteilung einer Schicht des vorliegenden Beispiels gezeigt. Peaks in der Winkelverteilung stellen Bereiche räumlich konzentrierter Aktivitätsverteilungen, so genannte *Hot Spots*, dar. Eine Analyse dieser Peaks ermöglicht die Zuordnung der Lage sowie der Ausdehnung von Hot Spots innerhalb einer Schicht. Liegen in einer Schicht keine Peaks vor, deutet dies auf eine homogene Aktivitätsverteilung innerhalb der Schicht hin.

In den folgenden Abschnitten wird die Identifikation von Peaks in Höhen- bzw. Winkelverteilungen sowie deren Analyse erläutert. Der naheliegende Ansatz, die Höhen- bzw. Winkelverteilungen durch passende Funktionen anzunähern, erweist sich als nur bedingt geeignet. Zum besseren Verständnis der Problematik wird dieser Ansatz nachfolgend (im Abschnitt "1. Ansatz") trotzdem kurz beschrieben und auf seine Schwachstellen eingegangen. Auf diesen Erfahrungen basierend wurde ein geeigneteres Verfahren entwickelt, das im Abschnitt "2. Ansatz" detailliert vorgestellt wird.

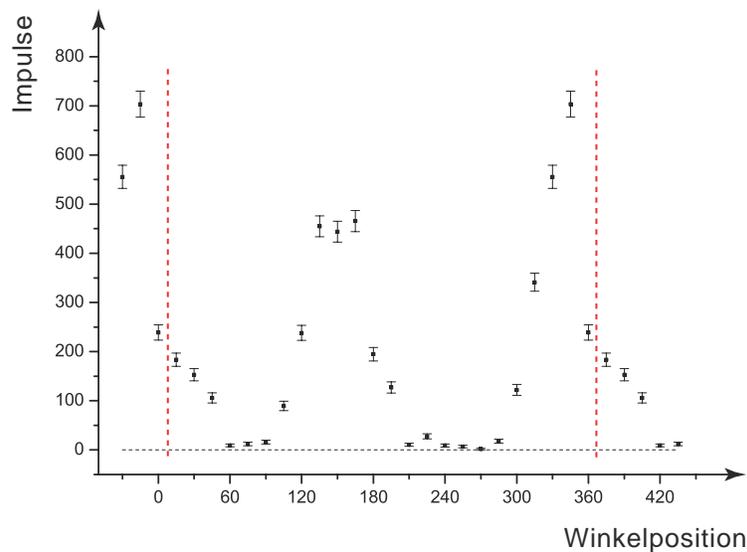
---

<sup>(5)</sup>Als Fehler wird die normale Standardabweichung verwendet.

<sup>(6)</sup>Unter Peaks werden lokale Erhöhungen der Impulse in der jeweils betrachteten Verteilung verstanden.



**Abbildung 4.2:** Höhenverteilung des vorliegenden Beispiels. Die Impulse in einer Höhenposition ergeben sich durch Summation der gemessenen Impulse in allen gemessenen Winkelpositionen innerhalb dieser Höhe gemäß Gl. 4.1.



**Abbildung 4.3:** Winkelverteilung einer Schicht des vorliegenden Beispiels periodisch erweitert aufgetragen, d. h. die Winkel-Messposition bei  $0^\circ$  entspricht der bei  $360^\circ$ . Die Impulse für eine Winkelposition ergeben sich dabei durch Summation der gemessenen Impulse für diese Winkelposition in allen zur betrachteten Schicht zugehörigen Höhenpositionen gemäß Gl. 4.2.

## 1. Ansatz

Ein Peak in einer Verteilung (Höhen- oder Winkelverteilung) wird um die Messposition mit der größten Impulszahl (= Maximum) vermutet. Für die Analyse des Peaks werden die wenigen, verfügbaren Datenpunkte um das identifizierte Maximum herum mit einer geeigneten Funktion (z. B. Gl. 4.4) angenähert. Die Anzahl der dabei eingesetzten Datenpunkte wird dabei iterativ so lange erhöht, bis der Güteparameter  $R^2$  (gemäß Gl. 4.3) der Approximation einen maximalen Wert überschritten hat.<sup>(7)</sup>

$$R^2 = 1 - \frac{\chi^2}{SYY} \quad (4.3)$$

wobei:

$$\chi^2(p_1, p_2, \dots) = \sum_{i=1}^N w_i \cdot \left[ y_i - f(x_i; p_1, p_2, \dots) \right]^2 \quad \text{und}$$

$$SYY = \sum_{i=1}^N w_i \cdot (y_i - \bar{y})^2 \quad , \quad \text{mit} \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$$

mit:

$\chi^2$ : Chi-Quadrat; Summe der Abweichungsquadrate der Approximationsfunktion der gegebenen Daten

$f(x_i; p_1, p_2, \dots)$ : Approximationsfunktion abhängig von den Parametern  $p_1, p_2, \dots$

$y_i$ : gemessene Werte der abhängigen Variable  $y$  an den Stellen  $x_i = x_1, x_2, \dots, x_N$

$N$ : Gesamtzahl der in der Approximation eingesetzten experimentellen Punkte

$w_i$ : Gewichtung eines jeden experimentellen Punktes  $y_i$

Ein sinkender Güteparameter bei steigender Anzahl an Datenpunkten deutet darauf hin, dass schon ein nächster Peak erreicht wurde. Übersteigt der bei der Approximation erreichte Güteparameter  $R^2$  einen festgelegten Grenzwert, so gilt die Annäherung als erfolgreich und der Peak als analysiert. Der Anteil eines angenäherten Peaks wird im jeweils für die durchgeführte Approximation vorgelegenen Datensatz subtrahiert. Im dadurch entstehenden *reduzierten* Datensatz wird erneut nach einem Peak gesucht und dieser gegebenenfalls analysiert; so wird die Anzahl der Peaks in einer Verteilung sukzessive verringert. Eine knappe Darstellung der Auswertung des vorliegenden Beispiels nach der geschilderten Methode zeigt deren Schwachstellen auf. Für die Approximation von Peaks sowohl in der Höhen- wie auch in der Winkelverteilung wurde exemplarisch

---

<sup>(7)</sup>Diese Art der Eingrenzung des Approximationsbereichs ist im Hinblick auf eine automatische Auswertung notwendig.

jeweils eine Gaußfunktion nach Gl. 4.4 gewählt.<sup>(8)</sup>

$$y = y_0 + \frac{A}{w \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \cdot e^{-2 \frac{(x - x_c)^2}{w^2}} \quad (4.4)$$

wobei:

$y_0$ : Basislinie

$x_c$ : Position des Peak-Maximums

$w$ : Breite des Peaks

$A$ : Fläche des Peaks

### *Analyse der Höhenverteilung*

In Abb. 4.4 ist die Approximation des höchsten Peaks in der Höhenverteilung durch eine Gaußfunktion dargestellt. Die Annäherung an die fünf Datenpunkte (Höhenposition eins bis fünf) liefert den maximalen Wert für den Güteparameter  $R^2$ . Mit Hilfe der in der Approximation bestimmten Parameter der Gaußfunktion ist der Peak und damit die erste Schicht analysiert; die Schicht hat ihr Maximum bei der Höhenposition zwei und wird durch die Höhenpositionen eins und drei begrenzt. Für die Ermittlung der Begrenzung einer Schicht wird die folgende Definition nach Gl. 4.5 gewählt:

$$\text{Schichtgrenze} = x_c \pm \frac{1}{2} \cdot w \quad (4.5)$$

wobei:

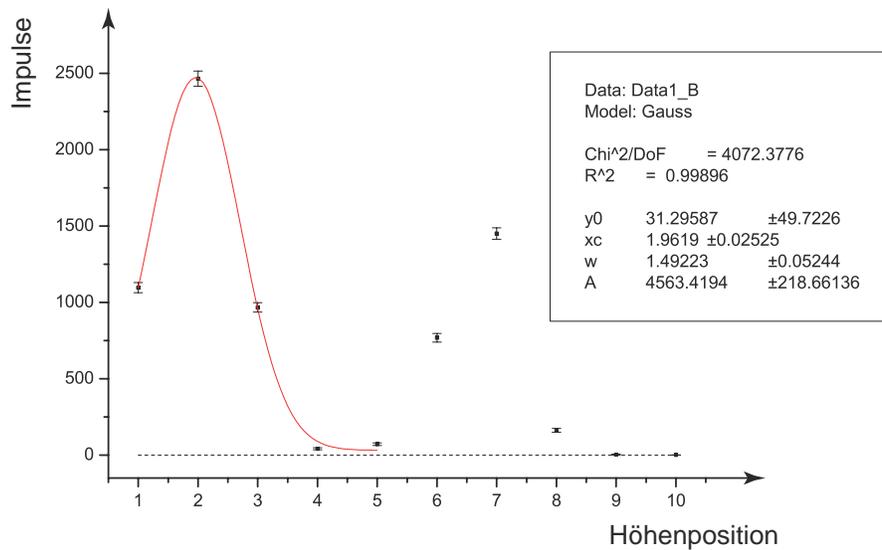
$x_c$ : Position des Peak-Maximums

$w$ : Breite des Peaks

Die Werte beider Parameter  $x_c$  und  $w$  werden durch Approximation bestimmt; die berechneten Schichtgrenzen werden jeweils auf ganzzahlige Werte (Höhenpositionen) gerundet.

Eines der Probleme bei der Identifizierung und Analyse von Peaks durch Approximation mit einer geeigneten Funktion deutet sich hier schon an: auch bei optimaler Wahl der Approximationsfunktion müssen für eine erfolgreiche Approximation mehr Datenpunkte für die Annäherung zur Verfügung stehen als Parameter in der Funktion zu bestimmen sind. Bei der Identifikation der ersten Schicht ist diese Bedingung nur knapp erfüllt: die Annäherung von fünf Datenpunkte muss Werte für die vier unbekannten Parameter der Gaußfunktion liefern. Würden die zwei nebeneinander liegenden Peaks, die zwei getrennte Schichten darstellen, noch dichter zusammen liegen, würde diese Methode der Approximation scheitern. Auf die Beschreibung der Identifizierung weiterer Schichten wird hier verzichtet.

<sup>(8)</sup>Andere Funktionen wurden ebenfalls untersucht (siehe dazu Abschnitt "Zusammenfassung").



**Abbildung 4.4:** Höhenverteilung mit Approximation des 1. Peaks durch eine Gaußfunktion.

#### Analyse der Winkelverteilung

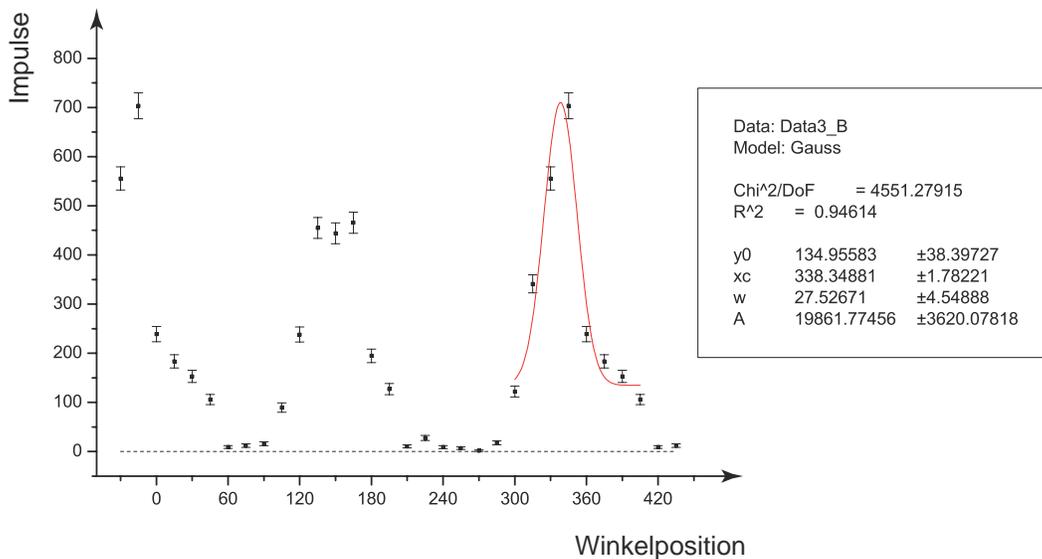
Die Behandlung von Schichten wird am Beispiel der im vorherigen Abschnitt identifizierten Schicht auf der Basis ihrer zugehörigen Winkelverteilung (siehe Abb. 4.5) demonstriert. Durch Identifikation und Analyse der Peaks in der Winkelverteilung soll die Position und Ausdehnung von Hot Spots in der betrachteten Schicht ermittelt werden. Dazu wird im Datensatz jeweils die Winkelposition mit maximaler Impulszahl innerhalb des tatsächlich gemessenen Winkelintervalls  $[0^\circ; 360^\circ[$  bestimmt. Die Analyse des Peaks erfolgt dann über die Intervallgrenzen hinaus, um zu gewährleisten, dass für die Approximation ein vollständiger Peak vorliegt. Auf diese Weise findet sich bei Winkelposition  $345^\circ$  der erste Peak. Die Approximation durch eine Gaußfunktion nach Gl. 4.4 ist in Abb. 4.5 dargestellt. Der Güteparameter  $R^2$  (siehe Gl. 4.3) nimmt für den hier gewählten Approximationsbereich  $[300^\circ; 405^\circ]$  den maximalen Wert an. Der Anteil der Aktivitätskonzentration – repräsentiert durch den ersten identifizierten Peak – an der Impulsverteilung dieser Schicht wird im Originaldatensatz subtrahiert. Impuls- werte, die dabei negativ werden, werden auf Null gesetzt. Der dadurch entstehende reduzierte Datensatz ist in Abb. 4.6 graphisch dargestellt. Nach der selben Methode lässt sich darin ein weiterer Peak an der Position  $165^\circ$  ermitteln. Seine Annäherung durch eine Gaußfunktion liefert im Approximationsbereich  $[120^\circ; 225^\circ]$  den maximalen Wert für  $R^2$  und ist in Abb. 4.6 gezeigt. Die Parameter für diese beiden Peaks innerhalb der ersten Schicht sind in Tab. 4.1 zusammengestellt. Der Datensatz, der um den Anteil beider identifizierter radioaktiver Quellen reduziert wurde (siehe Abb. 4.7), weist weiterhin Erhöhungen auf. Diese Erhöhungen resultieren allerdings hauptsächlich aus

der Abweichung der Approximationsfunktion für die jeweiligen Peaks von den wirklich vorliegenden Datenwerten, obwohl der Güteparameter  $R^2$  in beiden Fällen eine sehr gut gelungene Approximation anzeigt.

**Tabelle 4.1:** Analyse-Ergebnisse der beiden eindeutig identifizierten Peaks innerhalb der 1. Schicht.

Peak-Nr.	$R^2$	Maximum	Fehler	HWB <sup>a</sup>	Fehler	Peakfläche	Fehler
1	0,99896	338,4°	1,8°	27,5°	4,6°	19861,8 cts	3620,1 cts
2	0,92581	149,1°	2,7°	38,5°	7,2°	18106,0 cts	4195,6 cts

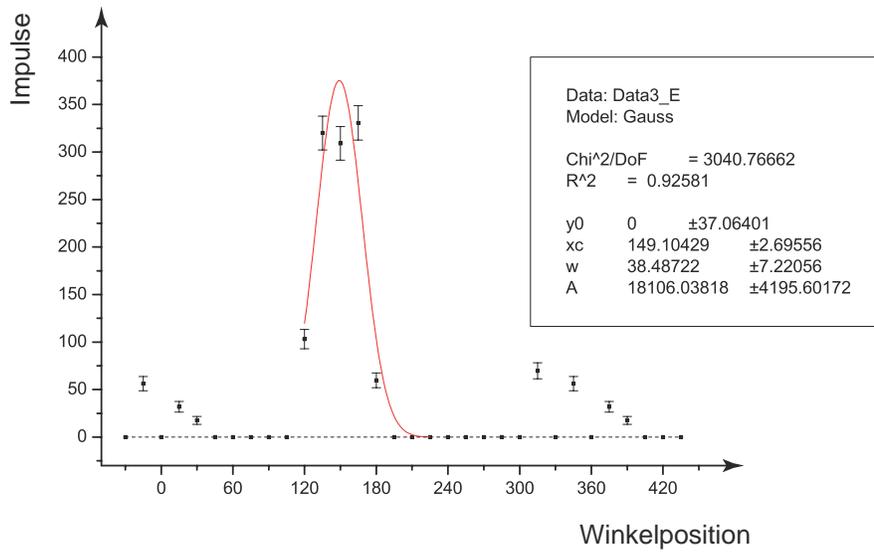
<sup>a</sup>Halbwertsbreite



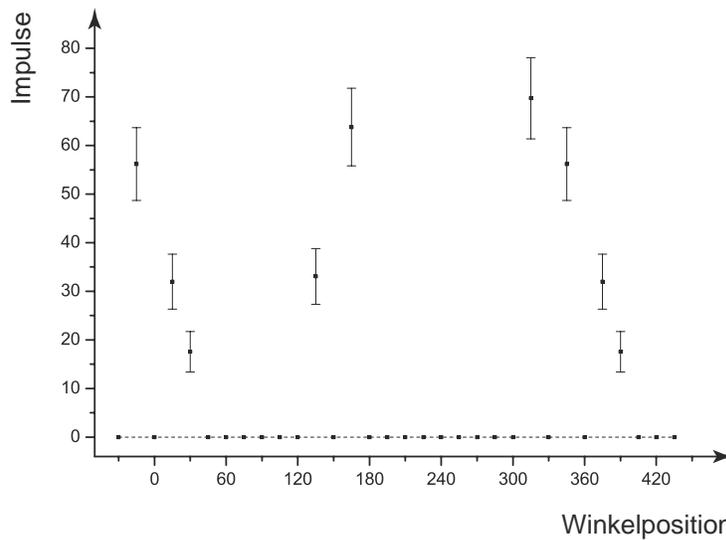
**Abbildung 4.5:** Winkelverteilung der 1. Schicht mit Identifizierung des 1. Peaks durch Annäherung mit einer Gaußfunktion.

### Zusammenfassung

Die Methode, Höhen- und Winkelverteilungen durch Annäherung mit einer geeigneten Funktion zu analysieren, weist zwei grundsätzliche Probleme auf: Anhand des vorliegenden Beispiels wurde gezeigt, dass eine Gaußfunktion in der Regel keine geeignete Funktion darstellt. Der symmetrische Verlauf einer Gaußfunktion ist zumindest für Peak Nummer 1 der betrachteten Schicht nicht gegeben. Peak Nummer 2 weist zusätzlich die Besonderheit einer abgeflachten Peakspitze – eines so genannten Plateaus – auf, was durch eine Gaußfunktion nicht berücksichtigt werden kann. Aber auch der Einsatz



**Abbildung 4.6:** Graphische Darstellung des reduzierten Datensatzes (Daten des 1. Peaks wurden subtrahiert) mit Identifizierung des 2. Peaks durch Annäherung mit einer Gaußfunktion.



**Abbildung 4.7:** Graphische Darstellung des doppelt-reduzierten Datensatzes (Daten des 1. und 2. Peaks wurden subtrahiert).

anderer Funktionen, insbesondere auch solcher, die die getrennte Annäherung beider Flanken eines Peaks erlauben, wie z. B. die Boltzmannfunktion, liefert die Erkenntnis, dass die durch Subtraktion der angenäherten Peakformen entstandenen Datensätze keine geeignete Basis für die Identifizierung und Analyse weiterer Peaks darstellen. Der Grund dafür liegt darin, dass die Form eines jeden Peaks, der eine radioaktive Quelle repräsentiert, von der tatsächlichen Form der Quelle sowie der Materialzusammensetzung und -verteilung der umgebenden Matrix abhängt. Hinzu kommt noch der Einfluss des endlichen Detektorkegels sowie der raumwinkelabhängigen Detektoreffizienz. Es wird sich also keine allgemein gültige Funktion finden, die jede theoretisch mögliche Peakform beschreibt, was allerdings für eine automatische Auswertung erforderlich ist. Eine weitere Problematik besteht in der notwendigen Anzahl an Datenpunkten für eine theoretisch erfolgreiche Approximation. Schmalere Peaks, die durch wenige Datenpunkte beschrieben werden, oder eine größere Schrittweite zwischen den Messpositionen (kleine Abtastrate) würden eine sinnvolle Approximation unmöglich machen.

Aufgrund der aufgeführten Probleme wurde eine einfachere Methode, Peaks zu identifizieren und zu analysieren, entwickelt. Diese wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

## 2. Ansatz

Für die Identifikation von Peaks werden in der jeweiligen Verteilung (Höhen- bzw. Winkelverteilung) die Positionen von Extremstellen nach folgender Vorschrift bestimmt: Ist für die Impulse  $I$  nebeneinander liegender Datenpunkte die Bedingung gemäß Gl. 4.6 erfüllt, so liegt an der Stelle  $i$  ein Maximum vor; ist die Bedingung unter Gl. 4.7 erfüllt, so liegt ein Minimum vor.

$$(I_i > I_{i-1}) \quad \vee \quad (I_i > I_{i+1}) \quad (4.6)$$

$$(I_i < I_{i-1}) \quad \vee \quad (I_i < I_{i+1}) \quad (4.7)$$

Ein Peak definiert sich im Allgemeinen durch ein Maximum und wird begrenzt durch die zwei dem Maximum am nächsten liegenden Minima. Eine Ausnahme dieser Definition stellt der so genannte Plateau-Peak dar, auf den im nächsten Abschnitt kurz eingegangen wird. Die Analyse eines Peaks beschränkt sich auf die Ermittlung seiner Breite, wobei dafür auf die jeweilige Impulsverteilung zurückgegriffen wird und keine Annäherung der Datenpunkte durch eine Approximationsfunktion (wie im 1. Ansatz) versucht wird. Dadurch ist die angewendete Analyse unabhängig von der jeweiligen Form eines Peaks.

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der vollständigen Auswertung der Oberflächenzählratenverteilung des vorliegenden Beispiels (siehe Abb. 4.1) erläutert und die jeweils erzielten Ergebnisse vorgestellt.

### *Plateau-Peak*

Erfüllen zwei nebeneinander liegende Peaks folgende Bedingung, so werden sie zu einem gemeinsamen Peak – dem so genannten Plateau-Peak, dessen Spitze abgeflacht ist – zusammengefasst (siehe dazu Abb. 4.8).

$$\left[ \Delta_1 - \delta(\Delta_1) \leq 0 \right] \quad \vee \quad \left[ \Delta_2 - \delta(\Delta_2) \leq 0 \right] \quad (4.8)$$

wobei:

$$\Delta_1 = I(max_1) - I(min) \quad \text{und} \quad (4.9)$$

$$\delta(\Delta_1) = \sqrt{\sigma^2(I(max_1)) + \sigma^2(I(min))} \quad (4.10)$$

$\Delta_2$  und  $\delta(\Delta_2)$  werden analog zu den Gln. 4.9 und 4.10 berechnet.

Die Winkelposition des Maximums des Plateau-Peaks berechnet sich nach Gl. 4.11.

$$max = \frac{1}{2} \cdot (max_1 + max_2) \quad (4.11)$$

Alle Winkelpositionen zwischen den beiden Maxima der einzelnen Peaks ( $max_1$  und  $max_2$  in Abb. 4.8) werden mit dem neuen Wert  $I(max)$  gemäß Gl. 4.12 besetzt:

$$I(max) = \frac{1}{\frac{max_2 - max_1}{\Delta\alpha} + 1} \cdot \sum_{i=max_1}^{max_2} I_i \quad (4.12)$$

wobei:

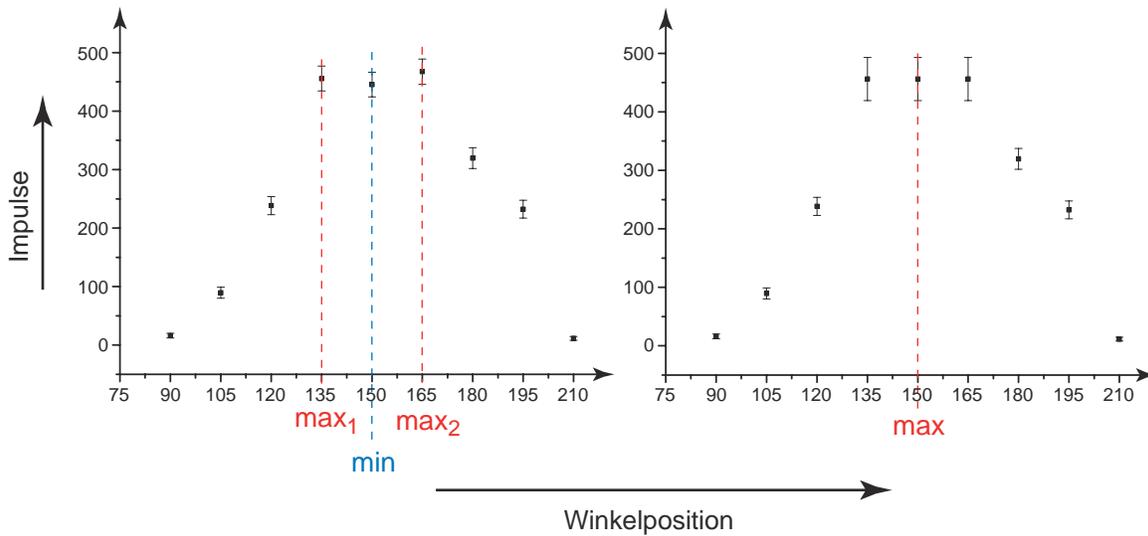
$\Delta\alpha$ : Abtastrate in Winkelrichtung

### *Klassifizierung der Höhenverteilungen*

Für jede Höhenposition wird einzeln untersucht, ob die Impulse homogen oder heterogen innerhalb der jeweiligen Höhe verteilt sind; entsprechend erfolgt ihre weitere Behandlung. An dieser Stelle sei angemerkt, dass alleine aus den Messergebnissen einer Gamma-Messung nicht festgestellt werden kann, ob eventuell in einer Höhe gar keine Aktivität vorliegt oder diese nur durch zu starke Schwächung in der Matrix nicht nachweisbar ist. Eine Impulsverteilung innerhalb einer Höhe wird als homogen bezeichnet, wenn für die Impulse  $I_i$  jeder Winkelposition  $i$  innerhalb der betrachteten Höhe gilt:

$$|I_i - \bar{I}| \leq q \quad \forall \quad i \in [1, \dots, N_\alpha] \quad (4.13)$$

$$\text{mit: } \bar{I} = \frac{1}{N_\alpha} \cdot \sum_{i=1}^{N_\alpha} I_i$$



**Abbildung 4.8:** Originaldatensatz eines Plateau-Peaks (links) dargestellt in der Winkelverteilung; für die weitere Analyse wird der variierte Datensatz (rechts) verwendet.

wobei:

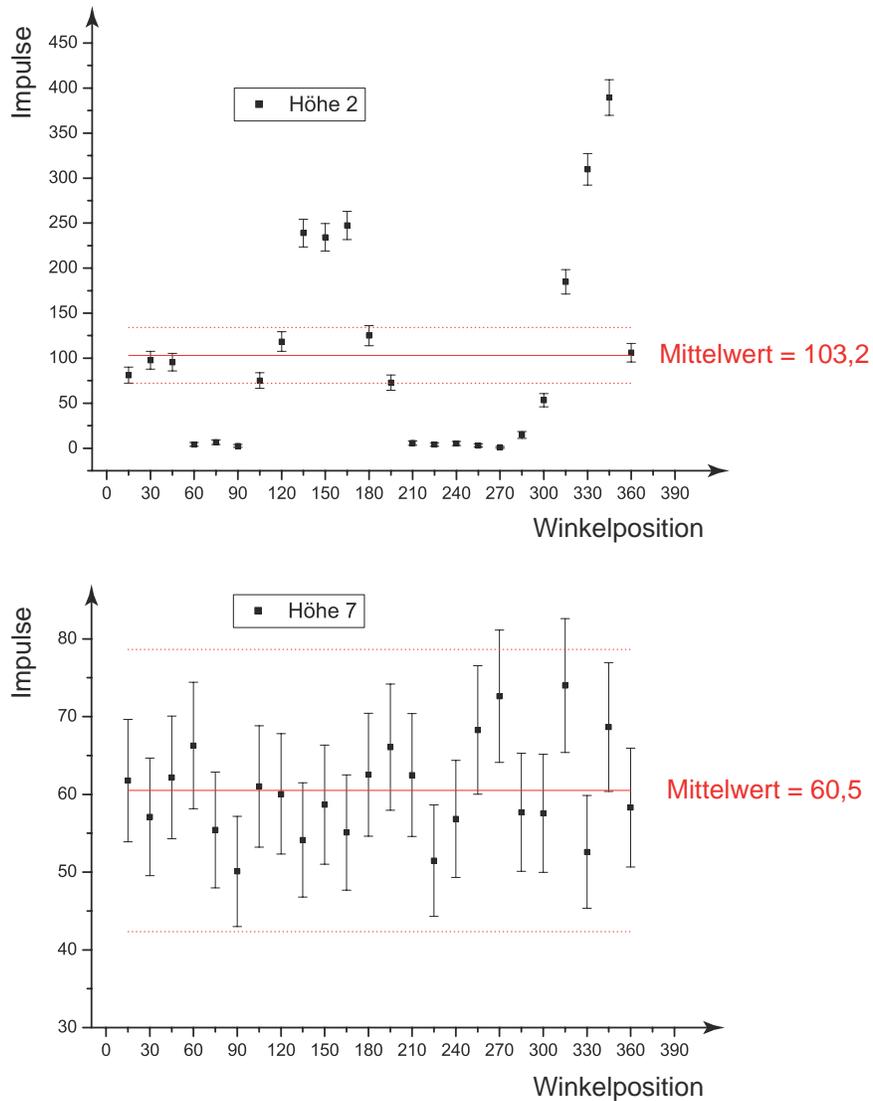
$q$ : von der im Messobjekt enthaltenen Matrix abhängiger Grenzwert

$\bar{I}$ : Mittelwert der Impulse aller Winkelpositionen in der betrachteten Höhe

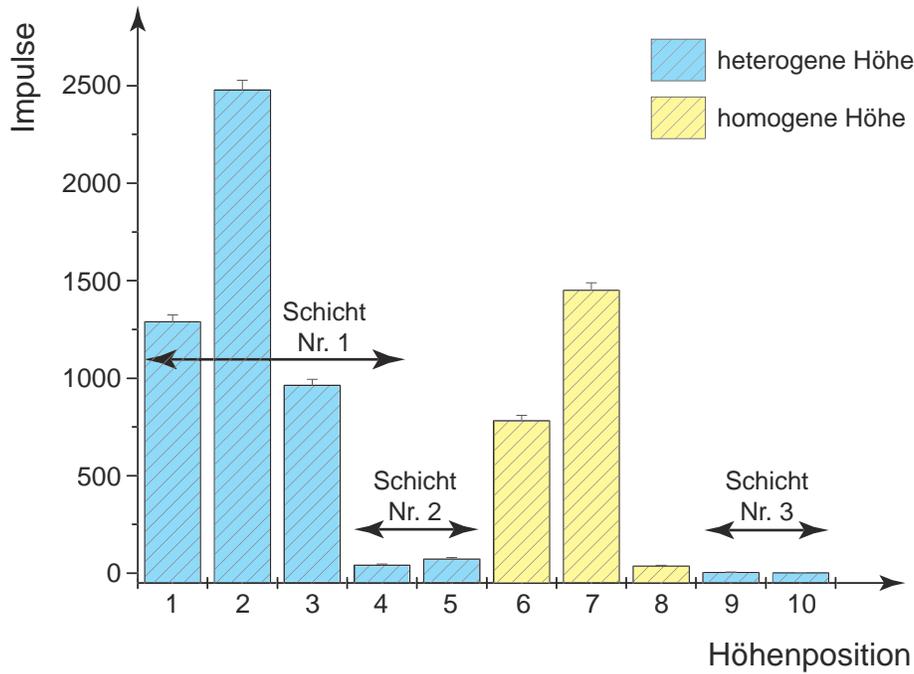
$N_\alpha$ : Anzahl der gemessenen Winkelpositionen pro Höhenposition

Der für das vorliegende Beispiel eingesetzte Grenzwert wurde durch Kalibrationsmessungen an bekannten, homogenen Objekten zu  $q = 0,3$  bestimmt; d. h. für eine homogene Höhe beträgt die Abweichung jedes Messwertes innerhalb der Höhe vom Mittelwert aller Messwerte dieser Höhe weniger als 30 %. Genügt eine Impulsverteilung nicht der Bedingung aus Gl. 4.13, so wird sie als heterogen bezeichnet. In Abb. 4.9 ist beispielhaft die Winkelverteilung einer als heterogen ermittelten (Nummer 2) und einer als homogen ermittelten Höhe (Nummer 7) gezeigt. Die Klassifizierung aller zehn Höhen des vorliegenden Beispiels kann in Abb. 4.10 abgelesen werden.

Die unterschiedliche Behandlung der als homogen oder heterogen ermittelten Höhen wird in verschiedenen Abschnitten erläutert. Ziel ist dabei jeweils, Parametersätze zu erstellen, mit deren Hilfe geeignete Körper beschrieben werden können, die die unterschiedlichen Bereiche im untersuchten Messobjekt repräsentieren. Die Daten des vorliegenden Beispiels entsprechen dem Ergebnis einer SGS-Messung eines 200 L-Fasses, also eines zylindrischen Messobjekts. Daher erfolgt die Angabe der Größen in den gesuchten Parametersätzen in Zylinderkoordinaten.



**Abbildung 4.9:** Winkelverteilungen für einzelne Höhen zur Beurteilung der Zählratenverteilung: heterogene Verteilung in Höhe 2 (oben) und homogene Verteilung in Höhe 7 (unten) bei einer erlaubten Abweichung der Impulse vom Mittelwert aller Impulse von bis zu 30% für homogene Höhen.



**Abbildung 4.10:** Innerhalb der blau gekennzeichneten Höhen ist die Aktivität heterogen verteilt, innerhalb der gelb gekennzeichneten homogen (unter der Voraussetzung: Grenzwert  $q = 0,3$ ). Die Höhe Nr. 4 gehört zu gleichen Teilen der Schicht Nr. 1 sowie der Schicht Nr. 2 an.

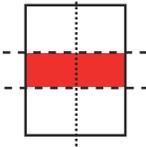
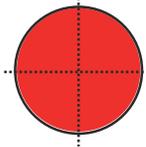
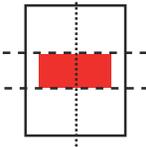
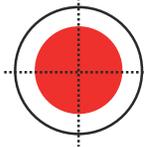
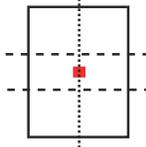
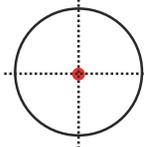
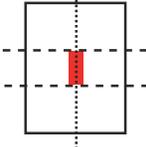
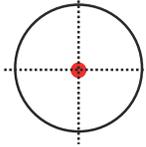
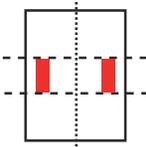
#### Behandlung homogener Höhenpositionen

Jede als homogen ermittelte Höhe wird im virtuellen Messobjekt einzeln dargestellt. Dazu werden Zylinder, die durch die Angabe folgender Parameter vollständig beschrieben sind, eingesetzt: die Höhe  $\Delta H$ , der äußere Radius  $R_{\text{ausßen}}$  sowie der innere Radius  $R_{\text{innen}}$ . Die Angabe des inneren Radius ist für die Beschreibung eines Hohlzylinders, mit dem z. B. eine ringförmige Quelle nachgebildet werden kann, notwendig. Die Höhe  $\Delta H$  wird nach Gl. 4.14 ermittelt.

$$\Delta H = z_2 - z_1 \quad (4.14)$$

Die jeweilige Höhenposition der Unter- bzw. Oberkante des Zylinders ( $z_1$  bzw.  $z_2$ ) wird über die Messpositionen in Höhenrichtung der SGS-Messung festgelegt (siehe dazu Gl. 4.15).

Eine nach außen hin homogen erscheinende Zählratenverteilung kann verschiedene Ursachen haben. Vereinfachend wird unterstellt, dass radioaktives Material jeweils in einer nahezu homogenen Matrix gleichmäßig verteilt ist. Eine schematische Darstellung der unterschiedlichen Möglichkeiten, diese aktive Matrix innerhalb einer Höhe so zu ver-

Fall	rad. Quelle	Seitenansicht	Draufsicht	Bemerkung
1	Volumenquelle			Ausdehnung in vertikaler Richtung variabel
2	Volumenquelle			Ausdehnung in vertikaler Richtung variabel
3	Punktquelle			vertikale Position variabel
4	Stabquelle			Ausdehnung in vertikaler Richtung variabel
5	Ringquelle			Ausdehnung in vertikaler Richtung variabel

**Tabelle 4.2:** Schematische Darstellung der möglichen Anordnungen von aktiver Matrix (jeweils rot markiert), so dass außerhalb des Untersuchungsobjekts eine homogene Zählratenverteilung zu messen ist.

teilen, dass außerhalb des Messobjekts eine homogene Zählratenverteilung zu messen ist, ist Tab. 4.2 zu entnehmen.

- Höhe ist vollständig (Fall 1) oder teilweise (Fall 2) mit aktiver Matrix gefüllt.
- Aktive Matrix ist nahezu punktförmig konzentriert und befindet sich entlang der Symmetrieachse des Untersuchungsobjekts (Fall 3).
- Aktive Matrix kann als Stabquelle bezeichnet werden (Fall 4); diese Möglichkeit ist als Extremfall in Fall 2 enthalten.
- Aktive Matrix ist ringförmig angeordnet (Fall 5).

Nachdem diese theoretischen Möglichkeiten nur auf Basis der Oberflächenzählratenverteilung nicht unterschieden werden können, müssen sie alle als jeweils potentiell möglicher Objektaufbau betrachtet werden und durch die Wahl der Parameterwerte, die den entsprechenden für die Aktivitätsverteilung stellvertretenden Körper (Zylinder) beschreiben, berücksichtigt werden. Dazu wird für jeden Parameter ( $z_1$ ,  $z_2$ ,  $R_{\text{innen}}$ ,  $R_{\text{ausßen}}$ ) ein Intervall festgelegt, innerhalb dessen der Wert des entsprechenden Parameters liegen muss. Aus folgenden Überlegungen ergeben sich die Grenzen der Intervalle für die Parameter des Zylinders, der die Höhe  $i$  repräsentiert:

$$HP(i) - 0,5 \cdot \Delta_{\text{vertikal}} \leq z_1 < z_2 \leq HP(i) + 0,5 \cdot \Delta_{\text{vertikal}} \quad (4.15)$$

mit den generellen Einschränkungen:

$$z_1 \geq h_{\text{unten}} \quad \text{und} \quad z_2 \leq h_{\text{oben}}$$

sowie:

$$0 \leq R_{\text{innen}} < R_{\text{ausßen}} \leq R_{\text{Messobjekt}} \quad (4.16)$$

wobei:

$HP(i)$ : Höhenposition des Detektors während der Messung der Höhe Nummer  $i$

$\Delta_{\text{vertikal}}$ : Höhenunterschied zwischen zwei Messpositionen in vertikaler Richtung (vertikale Abtastrate)

$h_{\text{unten}}$  bzw.  $h_{\text{oben}}$ : Höhenposition der Unter- bzw. Oberkante des untersuchten Messobjekts

$R_{\text{Messobjekt}}$ : Radius des untersuchten Messobjekts

Die äußeren Abmessungen des untersuchten Messobjekts ( $h_{\text{unten}}$ ,  $h_{\text{oben}}$ ,  $R_{\text{Messobjekt}}$ ) stehen in jedem Fall zur Verfügung, da sie z. B. durch einfaches Abmessen gewonnen werden können.

Alle ermittelten Parameter werden in einem Parametersatz zusammengefasst, der dazu dient, die in Tab. 4.2 aufgelisteten, theoretisch möglichen Verteilungen von aktiver Matrix, die nach außen hin als homogene Zählratenverteilung gemessen werden können, abzudecken. In Gl. 4.17 ist die allgemeine Form des vollständigen Parametersatzes (PS) für einen Zylinder angegeben. Der erste Parameter in der Liste ist die Energie  $E$ , für die die Auswertung der Oberflächenzählratenverteilung durchgeführt wird.

$$\text{PS}_{\text{Zylinder}} = \left\{ E; \min(z_1), \max(z_1); \min(z_2), \max(z_2); \right. \\ \left. \min(R_{\text{innen}}), \max(R_{\text{innen}}); \min(R_{\text{ausßen}}), \max(R_{\text{ausßen}}) \right\} \quad (4.17)$$

Für das in diesem Kapitel verwendete Beispiel findet man drei homogene Höhen (siehe Abb. 4.10). Ihre Parametersätze sind in tabellarischer Form angegeben (siehe Tab. 4.3). Auf die Angabe der Energie  $E$  wurde jeweils verzichtet, weil sie für die Demonstration

der Methode der Auswertung keine Bedeutung hat. Die Umrechnung der Höhenpositionen in tatsächliche Höhenwerte des Detektors während der entsprechenden Messung erfolgt unter zu Hilfenahme von Tab. 4.4. Der Nullpunkt der vertikalen Achse liegt in dem verwendeten Bezugssystem auf Höhe der Unterkante des Messobjekts.

**Tabelle 4.3:** Parametersätze für die Zylinder zur Darstellung der homogenen Höhen sechs, sieben und acht; dabei ist  $R_{\text{Messobjekt}} = 280 \text{ mm}$  der Radius eines 200L-Fasses. Die Höhenangaben beziehen sich auf einen Nullpunkt, der auf Höhe der Unterkante des Messobjekts liegt.

Zylinder für Höhe	$z_1$		$z_2$		$R_{\text{innen}}$		$R_{\text{ausen}}$	
	min	max	min	max	min	max	min	max
Nummer 6	427,5 mm	$z_1'$	$z_2'$	522,5 mm	0	$r_i'$	$r_a'$	280 mm
Nummer 7	522,5 mm	$z_1''$	$z_2''$	617,5 mm	0	$r_i''$	$r_a''$	280 mm
Nummer 8	617,5 mm	$z_1'''$	$z_2'''$	712,5 mm	0	$r_i'''$	$r_a'''$	280 mm

**Tabelle 4.4:** Zuordnung tatsächlicher Höhenpositionen des Detektors während der Messung zu den Nummern der Messpositionen. Der Nullpunkt des zugrunde liegenden Bezugssystems liegt auf Höhe der Unterkante des Messobjekts.

Höhenposition	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Höhe in mm	0	95	190	285	380	475	570	665	760	850

#### Behandlung heterogener Höhenpositionen

Zunächst werden heterogene Höhen zu so genannten Schichten zusammengefasst, wobei die untere und obere Schichtgrenze durch Minima der Impuls-Summenwerte der heterogenen Höhen (gemäß Gl. 4.7) oder durch beginnende homogene Höhen definiert sind. Im einfachsten Fall besteht eine Schicht aus nur einer Höhenposition.

Die anschließende Analyse einer Schicht wird an der entsprechenden Winkelverteilung durchgeführt und hat zum Ziel, Peaks, die in der Verteilung Hot Spots repräsentieren, zu identifizieren und zu analysieren. Hot Spots werden im virtuellen Messobjekt als Ellipsoide dargestellt. Ihre jeweilige Position im Messobjekt sowie ihre Abmessungen sollen durch die Analyse der Peaks bestimmt werden. Durch die Angabe folgender Parameter gilt ein Ellipsoid als vollständig beschrieben: sein Mittelpunkt  $M = (M_\varrho, M_r, M_z)$ , sowie die Längen seiner drei Halbachsen  $a/2$ ,  $b/2$  und  $c/2$ . Sind alle drei Halbachsen nahezu gleich lang, so liegt der Spezialfall einer Kugel vor.

Die Erkennung von Peaks erfolgt durch Bestimmung der Extremstellen in der entsprechenden Verteilung nach den Gln. 4.6 und 4.7. Ein zu analysierender Peak in der Winkelverteilung wird durch die beiden Winkelpositionen begrenzt, die als Minima der Verteilung erkannt wurden, und die einem Maximum der Verteilung, das sich innerhalb des tatsächlich gemessenen Winkelintervalls  $[0^\circ; 360^\circ[$  befindet, am Nächsten liegen. Die Anzahl der primär gefundenen Peaks in einer Winkelverteilung kann sich auf zwei Arten reduzieren:

1. Erfüllen zwei nebeneinander liegende Peaks die Bedingung aus Gl. 4.8, so werden sie zu einem so genannten Plateau-Peak (z. B. dargestellt in Abb. 4.8) zusammengefasst. Die Berechnung der Winkelposition sowie des Inhalts des Maximums dieses neuen Peaks ist den Gln. 4.11 sowie 4.12 zu entnehmen.
2. Alle Peaks werden auf ihre Signifikanz überprüft. Die als nicht signifikant erkannten Peaks bilden zusammen einen mittleren homogenen Untergrund innerhalb der betrachteten Schicht. Ein Peak gilt als nicht signifikant, wenn für die Winkelpositionen zwischen den beiden den Peak begrenzenden Minima  $min_1$  und  $min_2$  folgende Bedingung erfüllt ist:

$$\left\{ |I_i - I_{i+1}| - \sqrt{\sigma^2(I_i) + \sigma^2(I_{i+1})} \right\} \leq 0 \quad \forall \quad i \in [min_1; min_2] \quad (4.18)$$

Besteht eine Schicht aus mehreren Höhenpositionen, so muss die Ausdehnung eines Peaks auch in Höhen- (bzw.  $z$ -) Richtung berücksichtigt werden. Deswegen wird ermittelt, in welcher der Schicht zugehörigen Höhenpositionen ein betrachteter Peak seinen maximalen Wert erreicht.

Die Peak-Maxima  $A$  sowie  $C$  in Winkel- sowie in Höhenrichtung werden zur Angabe des Ellipsoid-Mittelpunkts benutzt:  $M_\rho$  ist die Komponente in Winkelrichtung und  $M_z$  die in Höhenrichtung; beide liegen allerdings nach den bisher erfolgten Auswerte-Schritten jeweils nur in Einheiten diskreter Messpositionen vor. Eine genauere Angabe ist nach Ermittlung der Breiten der einzelnen Peaks möglich. Die Breiten eines Peaks werden sowohl in Winkel- als auch in Höhenrichtung auf die selbe Weise bestimmt. Zur Verdeutlichung der Methode sei auf Abb. 4.11 verwiesen, in der ein Peak des Beispiels in der Winkelverteilung dargestellt ist. Ausgehend von der Winkelposition  $A$  des Peak-Maximums werden in Richtung kleinerer Winkelpositionen die beiden Winkelpositionen ermittelt, für deren Impulse gilt:

$$\left\{ \min \left[ I_i - \frac{1}{n} \cdot I_A \right] \geq 0 \right\} \quad \vee \quad \left\{ \min \left[ I_{i-1} - \frac{1}{n} \cdot I_A \right] \leq 0 \right\} \quad (4.19)$$

In Abb. 4.11 ist die Ermittlung der Halbwertsbreite dargestellt; dazu muss in Gl. 4.19 jeweils  $n=2$  eingesetzt werden.<sup>(9)</sup> Zwischen den dabei gewonnenen Datenpunkten wird linear interpoliert. Der Schnittpunkt mit der waagrechten Linie, die den halben Wert des Inhalts des Peak-Maximums kennzeichnet, ergibt die Winkelposition  $A_1$ . Die Strecke zwischen der Winkelposition  $A$  des Peak-Maximums und der Winkelposition  $A_1$ , der *linken Peakgrenze*, stellt den Anteil  $\alpha_1$  der gesamten Peakbreite  $\alpha$  in der Winkelverteilung dar. Entsprechend werden für die Bestimmung der Winkelposition  $A_2$  (*rechte Peakgrenze*) ausgehend vom Peak-Maximum in Richtung größerer Winkel die beiden Positionen ermittelt, für deren Impulse Gl. 4.20 (mit  $n=2$ ) erfüllt sind, und zwischen ihnen linear interpoliert.

$$\left\{ \min \left[ I_i - \frac{1}{n} \cdot I_A \right] \geq 0 \right\} \quad \vee \quad \left\{ \min \left[ I_{i+1} - \frac{1}{n} \cdot I_A \right] \leq 0 \right\} \quad (4.20)$$

Die gesamte Breite  $\alpha$  des betrachteten Peaks in der Winkelverteilung ergibt sich aus den Anteilen  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  (wird analog zu  $\alpha_1$  bestimmt) gemäß Gl. 4.21.

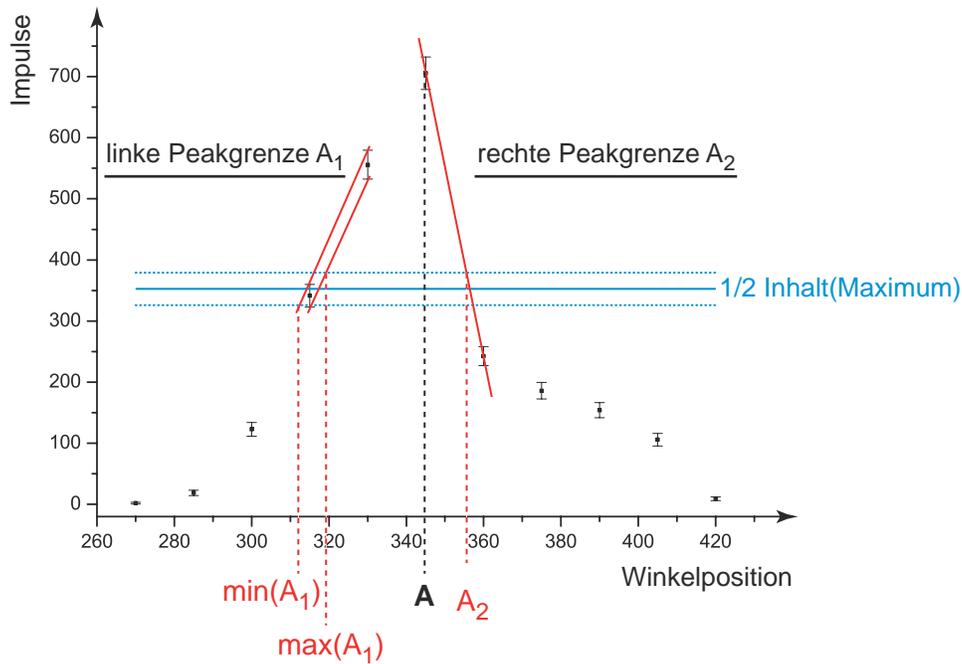
$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (4.21)$$

Die getrennte Ermittlung ist wegen der im Allgemeinen unsymmetrischen Form der vorliegenden Peaks, die durch die Methode der linearen Interpolation zumindest in erster Näherung berücksichtigt wird, notwendig. Wird in die Bestimmung der Peakbreite der jeweilige Toleranzbereich der Impulse mit einbezogen, so lässt sich für jede Peakgrenze  $A_i$  zusätzlich ein minimaler sowie ein maximaler Wert ( $\min(A_i)$ ,  $\max(A_i)$ ) angeben und damit der Toleranzbereich der Peakbreite  $\alpha$  berechnen.

In analoger Weise wird die Breite eines Peaks in der Höhenverteilung (siehe z. B. Abb. 4.15) bestimmt. Dabei werden die Höhenpositionen der Peakgrenzen mit  $C_1$  und  $C_2$  bezeichnet, die gesamte Breite des Peaks, die sich aus den Anteilen  $c_1$  und  $c_2$  zusammensetzt, mit  $c$ .

Die Breiten in der Winkelverteilung ( $\alpha$ ) und in der Höhenverteilung ( $c$ ) eines Peaks werden in den Parametersatz eines Ellipsoids aufgenommen und später dazu verwendet, die Länge der Ellipsenachsen in Winkel- bzw. Höhenrichtung zu ermitteln. Die Maxima eines Peaks in Winkel- ( $A$ ) sowie in Höhenrichtung ( $C$ ) können in erster Näherung zur Angabe des Schwerpunktes einer räumlich konzentrierten Aktivitätsverteilung verwendet werden. Eine genauere Bestimmung wird durch den Einsatz der jeweiligen Peakbreiten möglich. Mit Hilfe der Gln. 4.22 bis 4.24 lässt sich der neue Schwerpunkt  $A'$  in Winkelrichtung sowie sein Toleranzbereich  $[\min(A'); \max(A')]$  aus den Peakgrenzen  $A_1$  und  $A_2$  berechnen. Für den neuen Schwerpunkt  $C'$  in Höhenrichtung gelten analoge

<sup>(9)</sup>Denkbar wären theoretisch auch andere Möglichkeiten wie z. B. Zehntelwertsbreite, also  $n=10$ .



**Abbildung 4.11:** Ermittlung beider Anteile der Halbwertsbreite eines Peaks in der Winkelverteilung am Beispiel von Peak Nummer 3 in Schicht Nummer 1. Die waagrechte Linie (blau gekennzeichnet) markiert den halben Inhalt des Peak-Maximums. Mit  $A_1$  wird die linke und mit  $A_2$  die rechte Peakgrenze bezeichnet.

Gleichungen. Die neuen Schwerpunkte  $A'$  und  $C'$  werden im Parametersatz als Mittelpunktskomponenten eines Ellipsoids in Winkel- ( $M_\theta$ ) sowie in Höhenrichtung ( $M_z$ ) verwendet.

$$A' = \frac{1}{2} \cdot (A_1 + A_2) \quad (4.22)$$

$$\min(A') = \frac{1}{2} \cdot [\min(A_1) + \min(A_2)] \quad (4.23)$$

$$\max(A') = \frac{1}{2} \cdot [\max(A_1) + \max(A_2)] \quad (4.24)$$

Über die Ausdehnung der räumlich konzentrierten Aktivitätsverteilung in radialer Richtung und somit über die Länge der für die Beschreibung des Ellipsoids nötigen dritten Achse  $b$  kann keine Aussage gemacht werden. Für die Position  $r$  einer lokalen Aktivitätskonzentration in radialer Richtung kann ohne weitere Analyseschritte nur der Toleranzbereich  $[0 + b; R_{\text{Messobjekt}} - b]$  angegeben werden. Nur in besonderen Fällen ist eine genauere Angabe der radialen Position  $r$  möglich: Erfüllen die Winkelpositionen  $A'_i$

und  $A'_j$  zweier Peak-Maxima aus der selben Schicht folgende Bedingung:

$$\min(\delta) \leq 180^\circ \leq \max(\delta) \quad (4.25)$$

mit:

$$\min(\delta) = \left| \min(A'_j) - \max(A'_i) \right| \quad \text{und} \quad \max(\delta) = \left| \max(A'_j) - \min(A'_i) \right| ,$$

so kann dies als Indiz gewertet werden, dass das Messsignal, dargestellt durch den Peak  $i$ , und das Messsignal, dargestellt durch den Peak  $j$ , eventuell von der selben radioaktiven Quelle verursacht wurden. In diesem Fall werden die beiden entsprechenden Peaks für eine ausführlichere Analyse, die in Abschnitt 5.2.2 genauer beschrieben wird, markiert.

Alle nach der bisher erfolgten Analyse der heterogenen Höhenpositionen vorliegenden Parameter, die für die Beschreibung der Ellipsoide, die im virtuellen Untersuchungsobjekt Hot Spots darstellen, benötigt werden, werden analog zu Gl. 4.17 in der allgemeinen Form eines Parametersatzes (PS) zusammengestellt.

$$\text{PS}_{\text{Ellipsoid}} = \left\{ E; M_\varrho, \Delta M_\varrho; M_z, \Delta M_z; \alpha, \Delta\alpha; c, \Delta c; r, \Delta r; \text{Marker} \right\} \quad (4.26)$$

mit:

$E$ : Energie, für die die Oberflächenzählratenverteilung der SGS-Messung vorliegt

$M_\varrho$ : Mittelpunktskomponente des Ellipsoids in Winkelrichtung

$M_z$ : Mittelpunktskomponente des Ellipsoids in Höhenrichtung

$\alpha$ : Länge der Achse des Ellipsoids in Winkelrichtung

$c$ : Länge der Achse des Ellipsoids in Höhenrichtung

$r$ : radiale Position des Ellipsoids

Marker: diskrete Winkelposition eines potentiell zugehörigen Peaks (falls vorhanden)

Unter  $\Delta X$  ist jeweils der Toleranzbereich  $[\min(X); \max(X)]$  der Größe  $X$  zu verstehen.

Im Folgenden wird die Ermittlung der einzelnen Parameter, die zur Beschreibung eines Ellipsoids nötig sind, schrittweise am Beispiel der Schicht Nummer 1 des vorliegenden Beispiels demonstriert.

Eine Übersicht über die Zusammenfassung der heterogenen Höhen des vorliegenden Beispiels zu Schichten ist Tab. 4.5 zu entnehmen. Die Höhenposition vier begrenzt sowohl Schicht Nummer 1 als auch 2; deswegen wird jeder der beiden Schichten jeweils die Hälfte der Gesamtimpulszahl aus Höhe vier zugeteilt. In den Abbn. 4.12 bis 4.14 sind für die drei gefundenen Schichten jeweils die Winkelverteilung gezeigt, die über das tatsächliche gemessene Winkelintervall  $[0^\circ; 360^\circ[$  hinaus periodisch erweitert aufgetragen ist. Die Impulszahlen für jede Winkelposition ergeben sich dabei aus der Summation über alle Höhen, die der jeweiligen Schicht angehören.

**Tabelle 4.5:** Zusammenfassung aller heterogenen Höhen des vorliegenden Beispiels zu Schichten (Ermittlung mit Grenzwert  $q = 0,3$ ).

Schicht-Nr.	zugehörige Höhen	maximale Höhe
1	1, 2, 3, 4	2
2	4, 5	5
3	9, 10	9

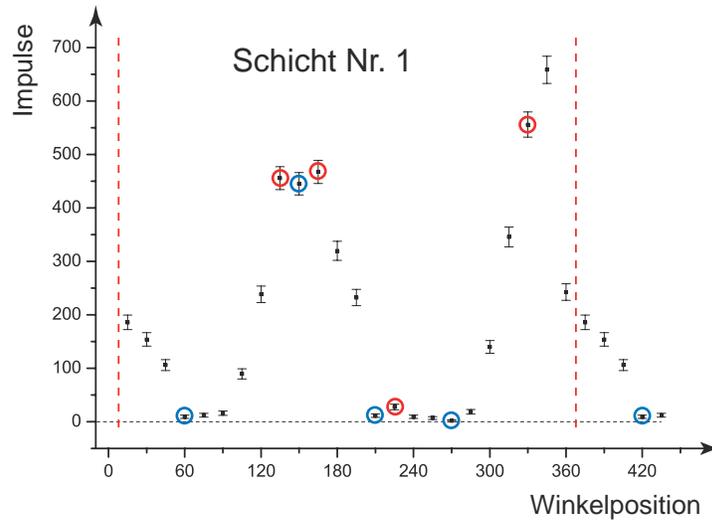
Die Erkennung von Peaks erfolgt durch Bestimmung der Extremstellen in der entsprechenden Verteilung nach den Gln. 4.6 und 4.7. Damit lassen sich innerhalb der Schicht Nummer 1 primär vier Peaks finden (siehe dazu Abb. 4.12), wovon zwei zu einem Plateau-Peak mit Maximum bei Winkelposition  $150^\circ$  zusammengefasst werden. Jeder der drei Peaks erfüllt die Signifikanz-Bedingung (siehe dazu Gl. 4.18). Das lässt die Vermutung zu, dass die Aktivität in Schicht Nummer 1 ausschließlich an einzelnen Stellen konzentriert ist und nicht zusätzlich ein Anteil gleichmäßig über die ganze Schicht verteilt ist und als homogener Untergrund behandelt werden muss.<sup>(10)</sup> Um die Höhenposition zu finden, in der jeder Peak seinen maximalen Wert erreicht, sind in Abb. 4.15 für die drei identifizierten Peaks die Impulse für die Winkelposition seines jeweiligen Maximums einzeln in jeder der vier Höhenpositionen, die Schicht Nummer 1 bilden, aufgetragen. Die ermittelten Positionen der Maxima in Winkel- sowie in Höhenrichtung für die drei signifikanten Peaks der Schicht Nummer 1 sind in Tab. 4.6 zusammengefasst.

**Tabelle 4.6:** Identifizierte, signifikante Peaks in Schicht Nummer 1.

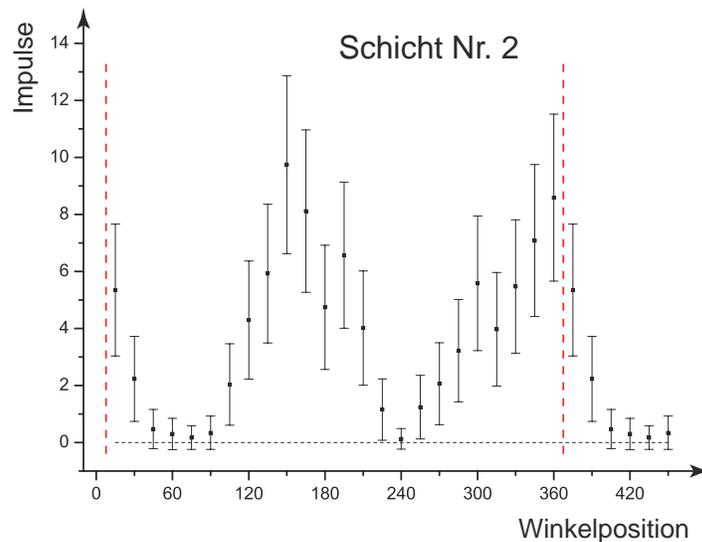
Peak-Nr.	Winkelposition für			maximale Höhenposition
	linkes Minimum	Maximum	rechtes Minimum	
1	$60^\circ$	$150^\circ$	$210^\circ$	2
2	$210^\circ$	$225^\circ$	$270^\circ$	1
3	$270^\circ$	$345^\circ$	$420^\circ = 60^\circ$	2

---

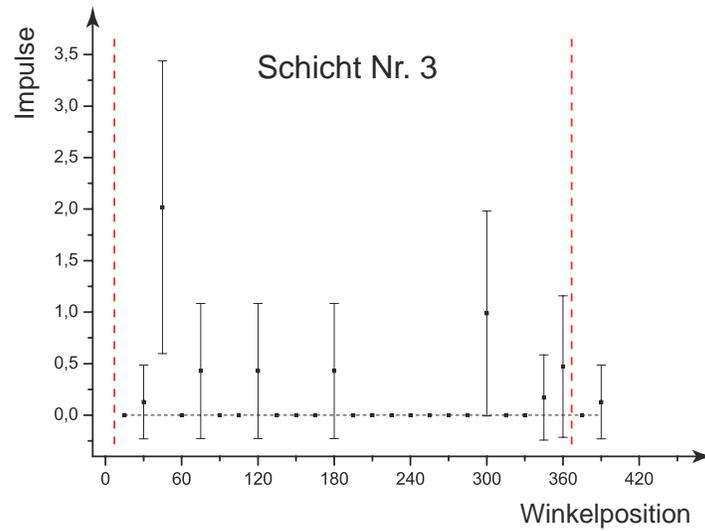
<sup>(10)</sup>Homogener Untergrund in einer Schicht erfordert zu seiner Darstellung im virtuellen Untersuchungsobjekt den Parametersatz eines Zylinders wie er im vorherigen Abschnitt definiert wurde. Der Unterschied zu einer als homogen erkannten Höhe liegt hierbei nur darin, dass eine Schicht aus mehreren Höhen zusammengesetzt sein kann und somit die Höhe  $\Delta H$  des Zylinders größer sein kann als für die Darstellung einer homogenen Höhe erforderlich.



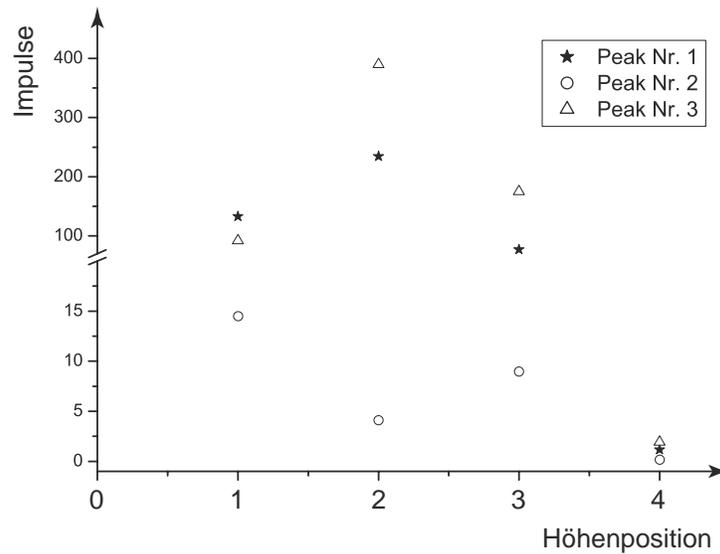
**Abbildung 4.12:** Winkelverteilung für Schicht Nummer 1; das Intervall innerhalb der gestrichelten roten Linien entspricht dem jeweils tatsächlich gemessenen Winkelintervall  $[0^\circ; 360^\circ]$ . Die blauen Kreise markieren minimale Winkelpositionen, die roten Kreise maximale Winkelpositionen.



**Abbildung 4.13:** Winkelverteilung für Schicht Nummer 2; das Intervall innerhalb der gestrichelten roten Linien entspricht dem jeweils tatsächlich gemessenen Winkelintervall  $[0^\circ; 360^\circ]$ .



**Abbildung 4.14:** Winkelverteilung für Schicht Nummer 3; das Intervall innerhalb der gestrichelten roten Linien entspricht dem jeweils tatsächlich gemessenen Winkelintervall  $[0^\circ; 360^\circ]$ .



**Abbildung 4.15:** Positionierung der drei Peaks aus Schicht Nummer 1 in Höhenrichtung.

Für jeden der drei Peaks aus Schicht Nummer 1 können gemäß der vorherigen Ausführungen die Halbwertsbreiten ( $n=2$ ) in der Winkel- sowie in der entsprechenden Höhenverteilung ermittelt werden. Die dabei erzielten Ergebnisse sind in Tab. 4.7 zusammengefasst.

**Tabelle 4.7:** Halbwertsbreiten für die Peaks aus Schicht Nummer 1.

Peak Nr.	in der Winkelverteilung jeweils in °			in der Höhenverteilung jeweils in mm		
	$A_1$	$A_2$	$\alpha$	$C_1$	$C_2$	$c$
1	118,95	195,30	76,35	-14,65	165,74	180,39
2	212,31	236,21	23,9	-47,5	208,54	256,04
3	313,79	356,87	43,8	32,83	181,23	148,40

Aus den Größen  $A_1$ ,  $A_2$  sowie  $C_1$  und  $C_2$  werden mit Hilfe der Gln. 4.22 bis 4.24 für jeden Peak in Schicht Nummer 1 die neuen Schwerpunkte  $A'$  sowie  $C'$  und ihre zugehörigen Toleranzbereiche bestimmt und in Tab. 4.8 zusammengestellt.

**Tabelle 4.8:** Neue Schwerpunkte ( $A'$  und  $C'$ ) für die drei Peaks aus Schicht Nummer 1.

Peak Nr.	in der Winkelverteilung jeweils in °				in der Höhenverteilung jeweils in mm			
	$A$	$A'$	$\min(A')$	$\max(A')$	$C$	$C'$	$\min(C')$	$\max(C')$
1	<b>150</b>	157,13	155,35	158,92	<b>95</b>	75,5	61,46	89,84
2	<b>225</b>	224,26	218,83	229,77	<b>0</b>	80,52	46,46	98,58
3	<b>345</b>	335,33	333,68	337,04	<b>95</b>	123,45	98,08	115,92

Aus dem Vergleich der Winkelpositionen ( $A'$ ) aller drei Peak-Maxima aus Schicht Nummer 1 lässt sich folgern, dass sowohl der Peak Nummer 1 ( $A = 150^\circ$ ) als auch der Peak Nummer 3 ( $A = 345^\circ$ ) ein Messsignal der selben radioaktiven Quelle darstellen könnte. Jedem dieser Peaks wird die diskrete Winkelposition  $A$  seines potentiell zugehörigen Peaks als Marker zugeteilt, um in einer weiteren Untersuchung aus den Daten beider Peaks die radiale Position der einen radioaktiven Quelle im Untersuchungsobjekt, die für beide Messsignale verantwortlich ist, zu ermitteln.

Die Parameter der Peaks aus Schicht Nummer 1 des vorliegenden Beispiels werden in Parametersätzen für Ellipsoide (siehe Gl. 4.26), die diese Schicht vollständig beschreiben, gesammelt und in tabellarischer Form dargestellt (siehe Tab. 4.9). Auf die Angabe

der Energie  $E$  wurde jeweils verzichtet, weil sie für die Demonstration der Methode der Auswertung keine Bedeutung hat.

**Tabelle 4.9:** Vollständige Parametersätze der Ellipsoide zur Darstellung aller identifizierter Hot Spots in der Schicht Nummer 1 im virtuellen Messobjekt in tabellarischer Form. Auf die Angabe einer Energielinie wurde verzichtet.

Ellipsoid für	Mittelpunkt des Ellipsoids			
	$M_\varrho = A'$	$\Delta M_\varrho$	$M_z = C'$	$\Delta M_z$
	jeweils in °		jeweils in mm	
Peak Nr. 1	157,13	[155,35; 158,92]	75,5	[61,64; 89,84]
Peak Nr. 2	224,26	[218,83; 229,77]	80,52	[46,46; 98,58]
Peak Nr. 3	335,33	[333,68; 337,04]	123,45	[98,08; 115,92]

Achsen des Ellipsoids				Marker
$\alpha$	$\Delta\alpha$	$c$	$\Delta c$	
jeweils in °		jeweils in mm		
76,35	[72,62; 79,77]	180,39	[150,91; 207,67]	345°
23,9	[11,67; 33,55]	256,04	[187,92; 292,15]	-
43,08	[39,63; 46,34]	148,4	[129,99; 165,67]	150°

## 4.2 Auswertung von Gamma-Transmissionsmessungen

Im folgenden Kapitel wird die Informationsgewinnung aus Gamma-Transmissionsmessungen<sup>(11)</sup> beschrieben. Dabei werden die zweidimensionale Digitale Gamma-Radiographie in hoher und in geringer Auflösung sowie die Einfache Gamma-Transmission durch die Symmetrieachse des Messobjekts diskutiert. Ziel der Auswertung von Transmissionsmessdaten ist die Identifikation und Quantifizierung von Behälter(n) und inneren Strukturen. Unter Quantifizierung wird die Bestimmung von geometrischen Parametern, wie Abmessung und Lage eines Objekts sowie die Bestimmung der linearen Schwächungskoeffizienten  $\mu$  verstanden. Den nachfolgend diskutierten Auswertemodellen liegt das exponentielle Schwächungsgesetz von Lambert-Beer

<sup>(11)</sup>Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich *Gamma*-Transmissionsmessungen diskutiert, deswegen wird im Weiteren häufig auf den Zusatz "Gamma" verzichtet.

(siehe Abschnitt 2.2.2) zugrunde.

$$I(E) = I_0(E) \cdot \exp\left(-\int_l \mu(x, E) dx\right) \quad (4.27)$$

$I_0$  und  $I$  bezeichnen dabei die detektierte Intensität ohne und mit Objekt im Strahlengang. Der ortsabhängige lineare Schwächungskoeffizient  $\mu(x, E)$  ist abhängig von der Energie  $E$  der einfallenden Strahlung.  $l$  bezeichnet die Strecke von der Quelle zu einem Detektorelement.

Aus Gl. 4.27 lässt sich der Projektionswert  $P$  ableiten.

$$P(E) = -\ln \frac{I(E)}{I_0(E)} = \ln I_0(E) - \ln I(E) = \int_l \mu(x, E) dx \quad (4.28)$$

Grundsätzlich sind bei der Bewertung der Ergebnisse einer Auswertung von Transmissionsdaten folgende Einschränkungen zu beachten:

- Die Digitale Radiographie erlaubt nur die Gewinnung überlagerter Informationen, d. h. es ist keine Information über die Lage in der Tiefe einzelner Objekte erhältlich.
- Das Schwächungsgesetz beschreibt die Schwächung monoenergetischer Einzelstrahlen (so genannter *Nadelstrahlen*) und stellt somit für den Realfall nur eine Näherung dar.
- Die Auflösung "kleiner" Strukturen wie z. B. die Wandstärke von Objekten ist durch das Shannonsche Abtasttheorem [17] begrenzt. In den Ortsraum übertragen besagt das Theorem, dass die Abtastrate einer Messung höchstens halb so groß sein darf, wie die Abmessung der kleinsten aufzulösenden Struktur. Für eine ausführliche Darstellung sei auf [18], [19] oder [20] verwiesen.

Im Folgenden wird gezeigt, welche Informationen aus den Ergebnissen von Transmissionsmessungen gewonnen werden können. Können weitere Informationen, so genannte a-priori-Informationen in die Auswertung von Transmissionsdaten mit einbezogen werden, so kann die Genauigkeit der Objektbeschreibung in vielen Fällen erhöht werden.

### 4.2.1 Hochauflösende Digitale Radiographie

Wenn die Abtastrate in horizontaler Richtung, mit der ein Objekt durchleuchtet wird, wesentlich kleiner als die Abmessungen der zu identifizierenden Objekte sind, dann soll dabei im Weiteren die hochauflösende Digitale Radiographie (DR) verstanden werden. Dabei sei auf Kapitel 6 hingewiesen, in dem die Auswertung realer Daten aus DR-Messungen mit einer Auflösung im Millimeterbereich für Objekte, deren Durchmesser mindestens 40 cm betragen, diskutiert wird.

## Methoden

Enthält ein Hauptobjekt eine endliche Anzahl ( $k - 1$ ) erlaubter<sup>(12)</sup> Objekte, so können die Gl. 4.27 und 4.28 in diskretisierter Weise formuliert werden:

$$I(E) = I_0(E) \cdot \exp \left( - \sum_k \mu_k(E) \cdot x_k \right) \quad (4.29)$$

$$P(E) = \ln I_0(E) - \ln I(E) = \sum_k \mu_k(E) \cdot x_k \quad (4.30)$$

Da ein Algorithmus, der auf der Basis von Transmissionsdaten Behälter sowie darin enthaltene innere Strukturen erkennen sowie quantifizieren soll, in einer automatischen Auswertung zur Charakterisierung von radioaktiven Abfällen genutzt werden soll, wird die Entwicklung eines entsprechenden Algorithmus speziell auf die Erfahrungen aus den Routineuntersuchungen solcher Abfälle gestützt. Wie in Kapitel 3 aufgeführt, ist für die Aktivitätsbestimmung z. B. besonders wichtig, zusätzliche Abschirmstrukturen in einem Untersuchungsobjekt zu erkennen. Mit der Annäherung von identifizierten Objekten durch zylindrische Körper (Zylinder) können Modelle entwickelt werden, die ein reales Untersuchungsobjekt nachbilden.

Für die Erkennung von Strukturen stehen prinzipiell verschiedene Ansätze zur Verfügung, die alle gemeinsam haben, dass sie jeweils den Datensatz einer vertikalen Messposition analysieren. Ergebnisse der Analyse, also Informationen über geometrische Parameter sowie Schwächungseigenschaften einzelner Objekte, beziehen sich auf die analysierte vertikale Messposition (= Höhe). Um ganze Objekte innerhalb eines Hauptobjekts zu erkennen, muss die Analyse für alle vertikalen Messpositionen durchgeführt werden und dann Bereiche mit vergleichbaren Ergebnissen entlang der vertikalen Achse zu einem Objekt zusammengesetzt werden. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Ansätze, ihre prinzipielle Idee, sowie ihre Qualität anhand simulierter Datensätze, die Messergebnissen aus einzelnen vertikalen Positionen entsprechen, vorgestellt. Am Ende dieses Abschnitts wird auf die Ausdehnung einzelner identifizierter Objekte entlang der vertikalen Achse des Hauptobjekts eingegangen.

### 1. Ansatz

Im 1. Ansatz wird versucht, das gesamte zu untersuchende Objekt mathematisch zu beschreiben. Die Parameter der dabei zugrunde liegenden Modellfunktion beschreiben die

---

<sup>(12)</sup>Für die Routine-Auswertung wird nur eine begrenzte Anzahl an Objekten berücksichtigt, d. h. es wird z. B. nicht versucht, Rohabfall in seine einzelnen Bestandteile zu zerlegen. Besonders interessant sind dabei Bereiche in einem Hauptobjekt, in denen auch Aktivität enthalten sein kann. Das erfordert die Verknüpfung von Informationen aus unterschiedlichen Quellen (z. B. Ergebnisse aus einer SGS- und einer DR-Messung), was in Kapitel 5 ausführlich dargestellt wird.

Geometrie sowie die Schwächungseigenschaften der vorliegenden Objekte; ihre Werte werden durch die optimale Annäherung der Modellfunktion an die Transmissionsdaten bestimmt. Die Erstellung der Modellfunktion erfolgt über zwei Schritte: durch Ausnutzen der bekannten äußeren Form eines zu untersuchenden Abfallbehälters bzw. im Allgemeinen des vorliegenden Hauptobjekts wird die *Grundfunktion* festgelegt. Die Erweiterung zu einer jeweils vollständigen Modellfunktion erfolgt über die mathematische Beschreibung ausgewählter innerer Strukturen<sup>(13)</sup> im Hauptobjekt. Die Modellfunktion stellt eine stufenweise definierte Funktion dar, die den unterschiedlichen Bereichen innerhalb eines Objektes die jeweils gültige mathematische Beschreibung zuordnet. Die Annäherung der Modellfunktion an die Transmissionsdaten erfolgt durch (die nichtlineare) Approximation nach der Methode der kleinsten Abweichungsquadrate auf der Basis des Levenberg-Marquardt-Algorithmus [21], [22]. Das Ziel einer Approximationsprozedur besteht darin, für die unbekannt, abhängigen Parameter eines theoretischen Modells Werte zu finden, so dass damit ein Satz vorgegebener Daten am Besten beschrieben wird. Die beste Approximation liegt vor, wenn die Summe der Abweichungsquadrate der theoretischen Kurve von den gegebenen Daten, das so genannte Chi-Quadrat  $\chi^2$ , minimal wird.

$$\chi^2(p_1, p_2, \dots) = \sum_i w_i \cdot \left[ y_i - f(x_i; p_1, p_2, \dots) \right]^2 \equiv \min \quad (4.31)$$

mit:

$f(x_i; p_1, p_2, \dots)$ : theoretisches Modell abhängig von den Parametern  $p_1, p_2, \dots$

$y_i$ : gemessene Werte der abhängigen Variable  $y$  an den Stellen  $x_i = x_1, x_2, \dots, x_N$

$N$ : Gesamtzahl der in der Approximation eingesetzten Messpunkte

$w_i$ : Gewichtung eines jeden experimentellen Punktes  $y_i$

Oft wird auch das reduzierte Chi-Quadrat (siehe Gl. 4.32) als Kriterium verwendet.

$$\chi^2(p_1, p_2, \dots) / DoF = \frac{\chi^2(p_1, p_2, \dots)}{N - p} \quad (4.32)$$

wobei:

$DoF$ : Freiheitsgrade<sup>(14)</sup>

$p$ : Gesamtzahl der anzunähernden Parameter  $p_1, p_2, \dots$

Das iterative Auffinden eines Satzes von Werten für die Parameter  $p_1, p_2, \dots$ , so dass Chi-Quadrat ein Minimum einnimmt, erfolgt bei der Methode von Levenberg und Marquardt auf zwei verschiedene Arten: weit weg von einem Minimum wird das *Verfahren*

<sup>(13)</sup>Dabei wird auf Erfahrungen aus der Praxis zurückgegriffen und eine beschränkte Auswahl an Möglichkeiten zusammengestellt.

<sup>(14)</sup>Die Abkürzung DoF steht für *dimensions of freedom*.

des steilsten Abstiegs angewendet; in der Nähe eines Minimums, geht der Algorithmus in die Methode der *Inversen Hesse Matrix* über. Detaillierte Ausführungen über den Approximations-Algorithmus finden sich z. B. in [23]. Der Wert für  $\chi^2$  nähert sich asymptotisch dem kleinsten theoretisch möglichen Wert – nämlich Null – an, wird ihn aber auch bei einer optimal durchgeführten Approximation nie erreichen. Zur Beurteilung der Güte einer Approximation wird das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  (Gl. 4.33) eingeführt. Es nähert sich bei optimal durchgeführter Approximation von unten an den Wert eins an.

$$R^2 = 1 - \frac{\chi^2}{SYY} \quad (4.33)$$

wobei:

$$\chi^2(p_1, p_2, \dots) = \sum_{i=1}^N w_i \cdot \left[ y_i - f(x_i; p_1, p_2, \dots) \right]^2 \quad \text{und}$$

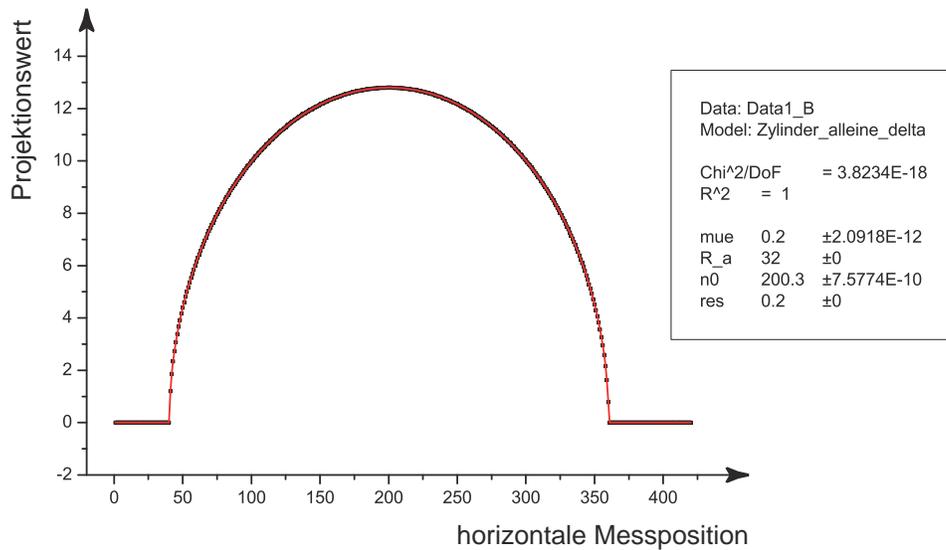
$$SYY = \sum_{i=1}^N w_i \cdot (y_i - \bar{y})^2$$

$$\text{mit: } \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$$

In allen weiteren Ausführungen wird stets die selbe Gewichtung für jeden Datenpunkt gewählt, d. h. alle  $w_i = 1$ . Somit vereinfacht sich  $\bar{y}$  folgendermaßen:

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N y_i$$

Um ein zu untersuchendes Objekt zu quantifizieren, ohne dabei auf a-priori-Informationen über seinen Inhalt zurückzugreifen, muss auf der Basis der bekannten äußeren Form des Hauptobjekts (= äußerstes Objekt) die entsprechende Grundgleichung gewählt werden und dann eine passende Beschreibung für den Inhalt gefunden werden. Dazu werden iterativ die verschiedenen zur Verfügung stehenden Modellfunktionen aus einer "Liste der Möglichkeiten" angewendet. Die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Modellfunktion die jeweils vorliegende Situation beschreibt, kann über den Güteparameter  $R^2$  abgeleitet werden. Bei zu kleinem  $R^2$  wird ein Modell verworfen. Alle Modellfunktionen, mit denen eine akzeptable Approximation erzielt wird, d. h. der Güteparameter  $R^2$  eine vorgegebene Schwelle überschreitet, stellen eine potentielle Möglichkeit dar, die Realität im zu untersuchenden Objekt zu beschreiben, d. h. unter Umständen können einem Objekt auch mehrere Modelle zugeordnet werden.



**Abbildung 4.16:** Durch Simulation erzeugte Messdaten (Punkte) für eine homogene Scheibe und Ergebnis einer Annäherung der Punkte durch eine geeignete Funktion (durchgezogene Linie).

#### Grundfunktion für zylindrische Hauptobjekte

Das einfachste Modell aller möglichen zylindrischen Strukturen ist der homogene Vollzylinder. In Abb. 4.16 sind die aus den simulierten Messdaten abgeleiteten Projektionswerte  $P$  in einer Höhenposition (vertikale Position) jeweils abhängig von der horizontalen Messposition  $n_i$  aufgetragen, sowie das Ergebnis einer Approximation (Erläuterungen dazu siehe im Weiteren). Folgende Funktion, die auf Gl. 4.30 basiert, beschreibt die Durchstrahlung eines homogenen zylindrischen Objekts in Abhängigkeit von der horizontalen Messposition  $n_i$ , wobei  $\mu$  der lineare Schwächungskoeffizient des homogenen Zylindermaterials,  $\Delta$  die Abtastrate in horizontaler Richtung<sup>(15)</sup> und die Wurzel der halbe zurückgelegte Weg durch ein zylindrisches Objekt mit Radius  $R_a$  und Mittelpunkt bei der Messposition  $n_0$  darstellt.

$$y(n_i) = P(n_i) = \begin{cases} \mu \cdot 2 \cdot \sqrt{R_a^2 - [(n_i - n_0) \cdot \Delta]^2} & , \text{ innerhalb d. Zyl.} \\ 0 & , \text{ außerhalb d. Zyl.} \end{cases} \quad (4.34)$$

Gl. 4.34 stellt die Grundfunktion eines zylindrischen Hauptobjekts dar, das mit verschiedenen weiteren Objekten gefüllt sein kann. Deren mathematische Beschreibung erweitert die Grundfunktion zu einer vollständigen Modellfunktion.

<sup>(15)</sup>Es werden jeweils Daten aus *einer* Höhenposition (vertikale Position) betrachtet, so dass im Weiteren nur die *horizontale* Abtastrate  $\Delta$  von Bedeutung ist. In Abschnitt 4.2.3 wird zusätzlich die vertikale Abtastrate eingeführt und zur Unterscheidung mit  $\Delta_{\text{vertikal}}$  bezeichnet.

*Erweiterung zur vollständigen Modellfunktion*

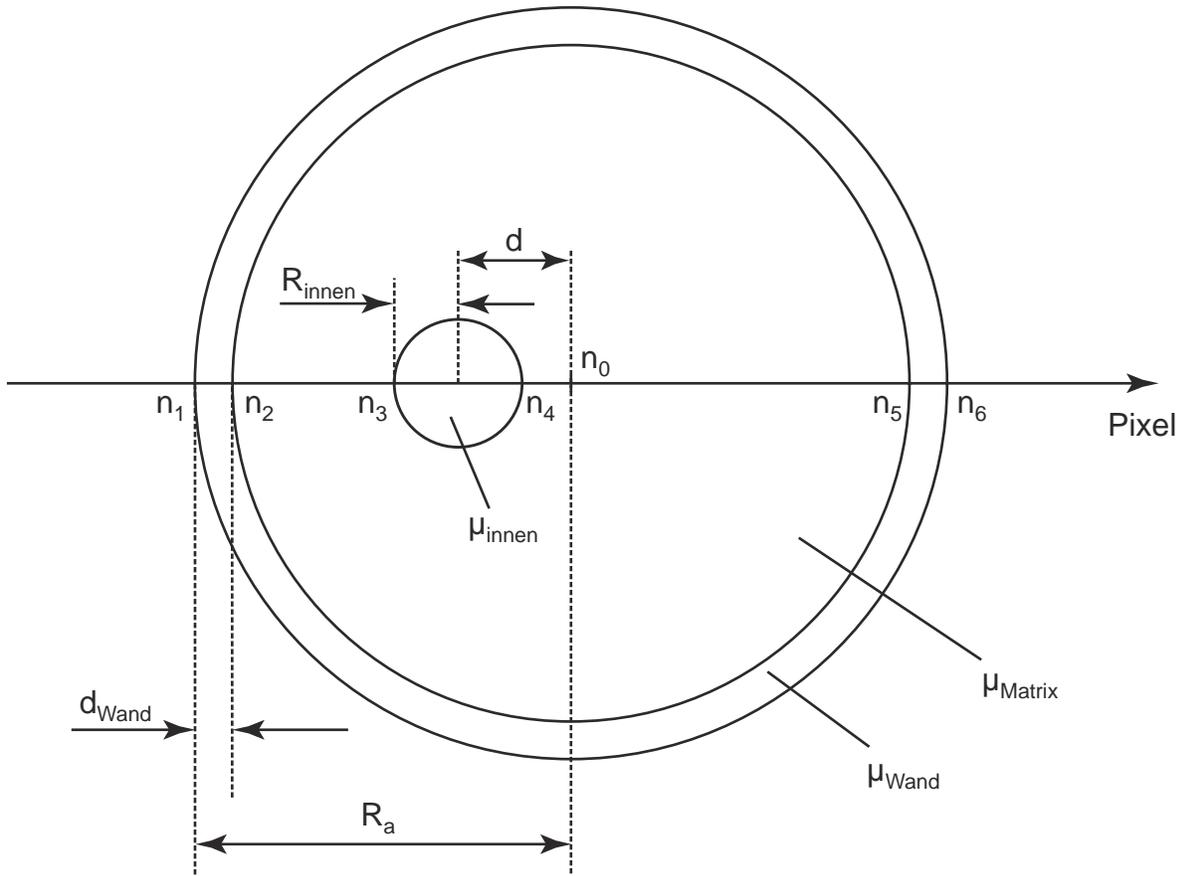
An Hand eines einfachen Beispiels wird im Folgenden die Erstellung einer vollständigen Modellfunktion erläutert und ihre Anwendung demonstriert. Dazu wurden Daten, die Ergebnissen einer DR-Messung an einem zylindrischen Objekt entsprechen, durch Simulation erzeugt. Im Inneren dieses Objekts befindet sich ein weiterer, aus der Symmetrieachse verschobener, homogener Zylinder eingebettet in einer homogen verteilten Matrix. Im Folgenden wird jeweils von drei unterschiedlichen "Objekten" gesprochen: dem zylindrischen Behälter (Objekt 1 oder Hauptobjekt), der Matrix (Objekt 2) und dem Innenzylinder (Objekt 3). Das Modell bzw. die vollständige Modellfunktion, die das vorliegende Beispiel beschreibt, wird mit "drei Zylinder ineinander" bezeichnet.

In Abb. 4.17 ist ein vertikaler Schnitt durch die Skizze des simulierten Objekts gezeigt. Die verwendeten Größensymbole und ihre jeweilige Bedeutung sind dieser Abbildung sowie Tab. 4.10 zu entnehmen. Zur Beschreibung der Lage einzelner Objekte im Hauptobjekt dient ein Koordinatensystem, dessen Ursprung im Zentrum  $n_0$  des Hauptobjekts liegt.

**Tabelle 4.10:** Größenbezeichnung und Werte für das simulierte Objekt.

Beschreibung	Größe	Wert
Radius des Hauptobjekts	$R_a$ / cm	28
Wandstärke	$d_{\text{Wand}}$ / cm	0,85
Mittelpunkt des Hauptobjekts	$n_0$ / Pixel	200,7
Abtastrate in horizontaler Richtung	$\Delta$ / cm/Pixel	0,2
Radius des Innenzylinders	$R_{\text{innen}}$ / cm	4,9
Position des Innenzylinders	$d$ / cm	-4
lin. Schwächungskoeffizient der Matrix	$\mu_{\text{Matrix}}$ / $\text{cm}^{-1}$	0,1
lin. Schwächungskoeffizient der Wand	$\mu_{\text{Wand}}$ / $\text{cm}^{-1}$	0,4
lin. Schwächungskoeffizient des Innenzylinders	$\mu_{\text{innen}}$ / $\text{cm}^{-1}$	0,35

Das zylindrische Hauptobjekt ist mit zwei weiteren "Objekten" gefüllt: der homogenen Matrix und einem zylindrischen homogenen Körper (im Weiteren mit Innenzylinder bezeichnet), der aus dem Zentrum des Hauptobjekts verschoben ist. Wird die Nomenklatur aus Gl. 4.30 verwendet, liegen also insgesamt  $k=3$  zylindrische ineinander gestellte Objekte vor; wird außerdem der Bereich außerhalb des Hauptobjekts mit berücksichtigt, so gibt es vier Bereiche, in denen jeweils eine unterschiedliche Struktur vorliegt. Zur vollständigen mathematischen Beschreibung des gesamten Objekts aus Abb. 4.17 sind somit vier unterschiedliche Teilfunktionen nötig, die zusammen die voll-



**Abbildung 4.17:** Skizze für zylindrisches Hauptobjekt mit homogener Matrix und einem homogenen Innenzylinder, der aus der Symmetrieachse verschoben ist.

ständige Modellfunktion ergeben. Jede Teilfunktion ordnet einem der drei unterschiedlichen Objekte (Wand des äußeren Zylinders, Matrix und Innenzylinder) innerhalb des Hauptobjekts sowie dem Bereich außerhalb des Hauptobjekts die jeweils gültige mathematische Beschreibung zu. Die vier Teilfunktionen lauten:

$$y_1(x) = 0 \quad (4.35)$$

$$y_2(x) = \mu_{\text{Wand}} \cdot 2 \cdot \sqrt{R_a^2 - \left[ (x - n_0) \cdot \Delta \right]^2} \quad (4.36)$$

$$y_3(x) = (\mu_{\text{Matrix}} - \mu_{\text{Wand}}) \cdot 2 \cdot \sqrt{(R_a - d_{\text{Wand}})^2 - \left[ (x - n_0) \cdot \Delta \right]^2} \quad (4.37)$$

$$y_4(x) = (\mu_{\text{innen}} - \mu_{\text{Matrix}}) \cdot 2 \cdot \sqrt{R_{\text{innen}}^2 - \left[ \left( x - \left( n_0 + \frac{d}{\Delta} \right) \right) \cdot \Delta \right]^2} \quad (4.38)$$

$y_1$  beschreibt die Situation außerhalb des Hauptobjekts,  $y_2$  entspricht der "Grundgleichung für das zylindrische Hauptobjekt" (siehe Gl. 4.34) und  $y_3$  und  $y_4$  stellen die mathematische Beschreibung der inneren Strukturen – homogene Matrix und Innenzylinder – dar.

Die Modellbeziehungen  $M_i$  mit  $i = 1, \dots, 7$  grenzen die einzelnen Bereiche, deren jeweilige Grenzen  $n_i$  mit  $i = 1, \dots, 7$  aus Abb. 4.17 hervorgehen, voneinander ab. Dabei sei erwähnt, dass die Intervallgrenzen  $n_i$  selbst abhängig von den zu bestimmenden Größen wie  $R_a$ ,  $R_{\text{innen}}$ , usw. sind. In jedem Bereich ist eine bestimmte Kombination der Teilfunktionen aus den Gln. 4.35 bis 4.38 gültig.

Das Intervall  $\mathcal{I}_I$  liegt vor, wenn entweder die Modellbeziehung  $M_1$  oder die Modellbeziehung  $M_7$  erfüllt ist, wobei:

$$M_1 : x \leq n_1 \quad \text{und} \quad M_7 : x \geq n_6 \quad (4.39)$$

Das Intervall  $\mathcal{I}_{II}$  liegt vor, wenn entweder die Modellbeziehung  $M_2$  oder die Modellbeziehung  $M_6$  erfüllt ist, wobei:

$$M_2 : n_1 < x \leq n_2 \quad \text{und} \quad M_6 : n_5 \leq x < n_6 \quad (4.40)$$

Das Intervall  $\mathcal{I}_{III}$  liegt vor, wenn entweder die Modellbeziehung  $M_3$  oder die Modellbeziehung  $M_5$  erfüllt ist, wobei:

$$M_3 : n_2 < x \leq n_3 \quad \text{und} \quad M_5 : n_4 \leq x < n_5 \quad (4.41)$$

Das Intervall  $\mathcal{I}_{IV}$  liegt vor, wenn die Modellbeziehung  $M_4$  erfüllt ist, wobei:

$$M_4 : n_3 < x < n_4 \quad (4.42)$$

Durch eine Modellprior-Funktion  $g(M_i)$ , die über Gl. 4.43 definiert ist, kann ausgedrückt werden, ob eine Modellbeziehung  $M_i$  erfüllt ist oder nicht. Wird nun für jedes Intervall die entsprechende Modellprior-Funktion aufgestellt, kann damit die jeweilige Kombination der gültigen Teilfunktionen mathematisch formuliert werden.

$$g(M_i) = \begin{cases} 1 & , \quad \text{falls } M_i \text{ erfüllt} \\ 0 & , \quad \text{falls } M_i \text{ nicht erfüllt} \end{cases} \quad (4.43)$$

Die Modellprior-Funktion  $g_i$  mit  $i = 1, \dots, 4$  für die Bereiche  $\mathcal{I}_I$  bis  $\mathcal{I}_{IV}$  lauten:

$$g_1(x) = \mathcal{H}(n_1 - x) + \mathcal{H}(x - n_6) - 2 \cdot \mathcal{H}(n_1 - x) \cdot \mathcal{H}(x - n_6) \quad (4.44)$$

$$g_2(x) = [1 - \mathcal{H}(n_1 - x)] \cdot \mathcal{H}(n_2 - x) + \mathcal{H}(x - n_5) \cdot [1 - \mathcal{H}(x - n_6)] \\ - 2 \cdot [1 - \mathcal{H}(n_1 - x)] \cdot \mathcal{H}(n_2 - x) + \mathcal{H}(x - n_5) \cdot [1 - \mathcal{H}(x - n_6)] \quad (4.45)$$

$$\begin{aligned}
g_3(x) &= [1 - \mathcal{H}(n_2 - x)] \cdot \mathcal{H}(n_3 - x) + \mathcal{H}(x - n_4) \cdot [1 - \mathcal{H}(x - n_5)] \\
&\quad - 2 \cdot [1 - \mathcal{H}(n_2 - x)] \cdot \mathcal{H}(n_3 - x) + \mathcal{H}(x - n_4) \cdot [1 - \mathcal{H}(x - n_5)]
\end{aligned} \tag{4.46}$$

$$g_4(x) = [1 - \mathcal{H}(n_3 - x)] \cdot [1 - \mathcal{H}(x - n_4)] \tag{4.47}$$

Mit  $\mathcal{H}$  wird dabei die *Heavisidesche Einheitsstufenfunktion* bezeichnet, für die gilt:

$$\mathcal{H}(t) = \begin{cases} 1 & , \text{ für } t \geq 0 \\ 0 & , \text{ für } t < 0 \end{cases}$$

Zusammen mit den Teilfunktionen aus den Gln. 4.35 bis 4.38 und den entsprechenden Modellprior-Funktionen (Gln. 4.44 bis 4.47) ergibt sich für das Modell "drei Zylinder ineinander" folgende vollständige Modellfunktion:

$$y(x) = g_1 \cdot y_1 + \sum_{i=2}^{k+1} g_i \cdot \sum_{j=2}^i y_j \tag{4.48}$$

mit:

$k$ : Gesamtanzahl der Objekte im Hauptobjekt, hier  $k=3$ .

Diese Modellfunktion ist grundsätzlich auf  $n$  ineinander stehende zylindrische Objekte, die sich nicht überschneiden dürfen, erweiterbar. Dabei erhöht sich für jedes weitere Objekt die Anzahl der zu bestimmenden Parameter in der Modellfunktion, die Anzahl der zu berücksichtigenden Teilfunktionen, sowie die dazu nötigen Modellprior-Funktionen. In Abb. 4.18 ist die Approximation von simulierten Daten, die ideale bzw. reale Messergebnisse einer DR darstellen, durch die Modellfunktion aus Gl. 4.48 (mit  $k=3$ ) gezeigt. In einem ersten Schritt (Vorbereitung) werden die äußeren Abmessungen des Hauptobjekts bestimmt. Dazu werden im Datensatz Stellen signifikanter Veränderung (Anstieg bzw. Abfall), die die Randbegrenzung des Objekts markieren, gesucht. Damit kann der äußere Radius  $R_a$  des Hauptobjekts mit der Genauigkeit, die durch die bei der Messung gewählten Abtastrate  $\Delta$  vorgegeben ist, bestimmt werden.  $R_a$  wird im Weiteren als bekannter Parameter behandelt. Die freien, durch eine bestmögliche Annäherung an die Messdaten zu bestimmenden Parameter verbleiben für diesen Fall: die linearen Schwächungskoeffizienten der Zylinderwand, der als homogen angenommenen Matrix, sowie des inneren homogenen Zylinders, außerdem der Mittelpunkt des Hauptobjekts, der Radius des Innenzylinders, sowie der Abstand seines Mittelpunkts vom Zentrum des Hauptobjekts. In Tab. 4.11 sind die eingesetzten Startwerte für jeden Parameter,

**Tabelle 4.11:** Verwendete Startwerte für die zu bestimmenden Parameter.

Größe	SOLL-Wert	Status	Startwert für Fit
$R_a$ / cm	28	fest	28
$d_{\text{Wand}}$ / cm	0,85	variabel	1
$n_0$ / Pixel	200,7	variabel	201
$\Delta$ / cm/Pixel	0,2	fest	0,2
$R_{\text{innen}}$ / cm	4,9	variabel	1
$d$ / cm	-4	variabel	-1
$\mu_{\text{Matrix}}$ / $\text{cm}^{-1}$	0,1	variabel	1
$\mu_{\text{Wand}}$ / $\text{cm}^{-1}$	0,4	variabel	1
$\mu_{\text{innen}}$ / $\text{cm}^{-1}$	0.35	variabel	1

der während des Fit-Algorithmus variiert wird, angegeben.<sup>(16)</sup> Weiter wurde für die Approximation die Einhaltung folgender logischer Bedingungen gefordert:

- Die Werte aller Parameter müssen größer Null sein. Einzige Ausnahme stellt der Abstand  $d$  dar: ein negatives Vorzeichen für  $d$  bedeutet, dass der Mittelpunkt des Innenzylinders links vom Zentrum des Hauptobjekts  $n_0$  liegt, wie auch in Abb. 4.17 skizziert.
- $R_a \leq n_0 \cdot \Delta$
- $d_{\text{Wand}} < R_a$
- $R_{\text{innen}} + |d| + d_{\text{Wand}} \leq R_a$

Die Ergebnisse der Approximation, d. h. die Werte der zu bestimmenden Parameter sowie die jeweiligen Güteparameter  $R^2$  der Approximation, sind innerhalb der entsprechenden Ergebnisfenster in Abb. 4.18 angegeben. Die in der Approximation erzielten Werte für die zu bestimmenden Parameter stimmen sehr gut mit ihren entsprechenden Soll-Werten (siehe dazu Tab. 4.10) überein. Das zeigt, dass der 1. Ansatz, experimentelle Daten aus DR-Messungen durch ausgewählte Modellfunktionen anzunähern, prinzipiell gut funktioniert. Es muss allerdings angemerkt werden, dass es sich um simulierte Daten handelt, die auf der Grundlage des für einen Nadelstrahl geltenden Schwächungsgesetzes von Lambert-Beer (siehe Gl. 4.29) erzeugt wurden und auch unter Zuhilfenahme des gleichen Gesetzes analysiert wurden. Außerdem wurde die Approximation unter idealen in der Wirklichkeit nie vorliegenden Bedingungen durchgeführt:

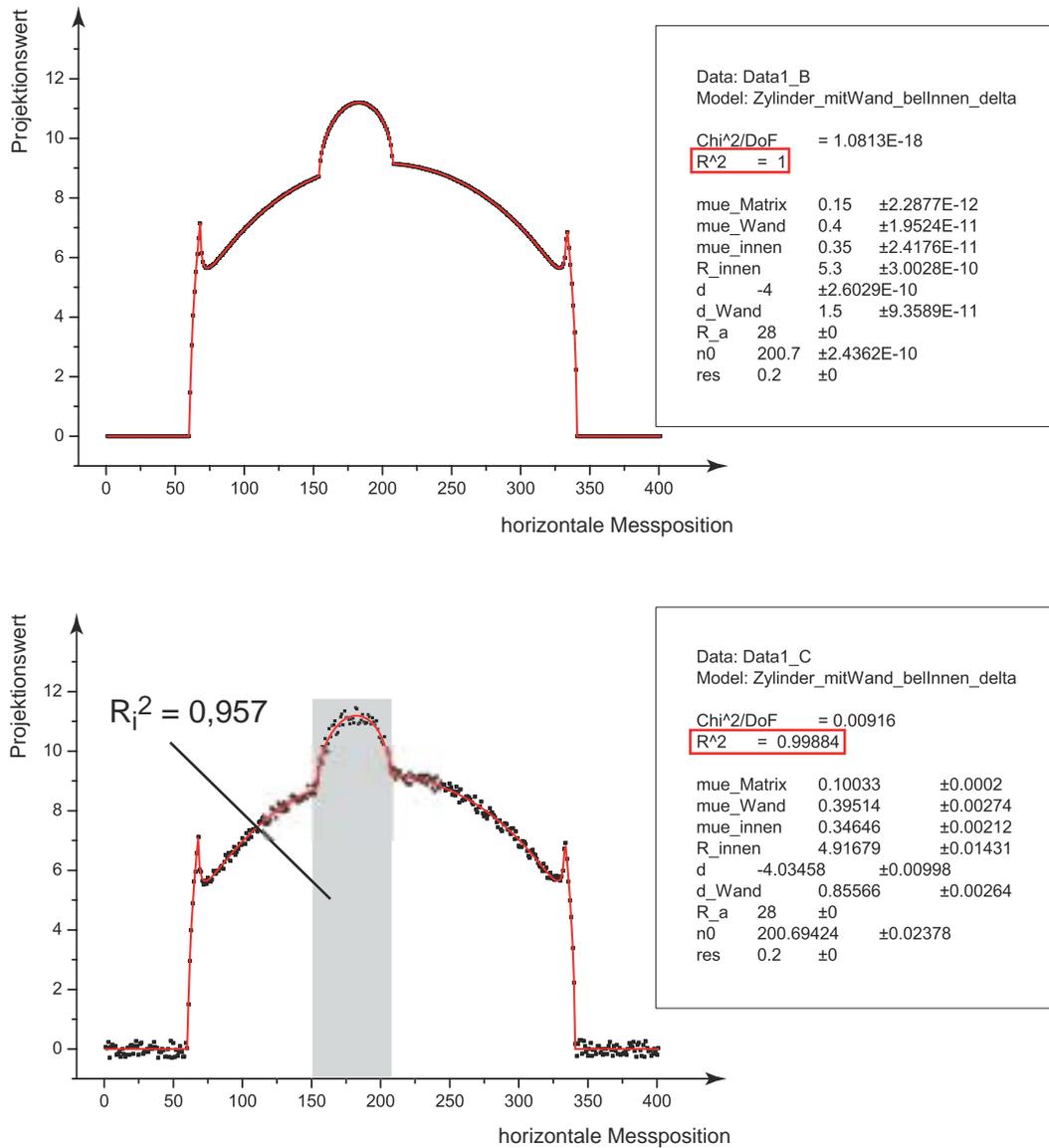
<sup>(16)</sup>Der Einfluss der Startwerte auf das Ergebnis einer Approximation wird im Weiteren noch erläutert.

- Es wurde die geeignete Modellfunktion "drei Zylinder ineinander" angewendet.
- Für die Startwerte der zu bestimmenden Parameter wurden günstige Werte, d. h. Werte nahe ihrer jeweiligen Soll-Werte, eingesetzt.

Besonders im Hinblick auf unbekanntes Inhalt in einem Hauptobjekt kann bei der realen Durchführung einer Approximation nicht gewährleistet werden, dass beide Punkte gleichzeitig erfüllt sind. Wie sich die Wahl der Modellfunktion sowie der Startwerte für die zu bestimmenden Parameter unter realen Bedingungen auf das Ergebnis einer Approximation auswirkt, wird im Folgenden kurz demonstriert. Allgemein gilt eine Approximation als erfolgreich, wenn der Güteparameter  $R^2$  der Approximation eine festgelegte Schwelle überschreitet. Gleichzeitig müssen die Fehler der ermittelten Parameter nach der Approximation in einem sinnvollen Bereich bezüglich der Werte der Parameter liegen (im Allgemeinen sehr viel kleiner als der Wert des Parameters). Ein dadurch akzeptiertes Modell, d. h. die in der Approximation angewendete Modellfunktion zusammen mit den in der Approximation ermittelten Parameter, stellt eine potentielle Möglichkeit dar, das vorliegende Objekt zu beschreiben. Für das Beispiel, dem ein simulierter Datensatz zugrunde liegt, hat sich eine Schwelle für  $R^2$  von 0,95 als geeignet erwiesen. Sie kann unter Umständen, speziell für reale Beispiele (siehe dazu Kapitel 6) auch niedriger angesetzt werden.

#### *Ungünstige Modellfunktion*

Der Datensatz des vorliegenden Beispiels (zylindrisches Hauptobjekt gefüllt mit homogener Matrix und homogenem Innenzylinder) wird mit einem der Wirklichkeit nicht entsprechenden Modell – dem Modell "zwei Zylinder ineinander" – angenähert. Die zugehörige vollständige Modellfunktion ergibt sich aus Gl. 4.48, wenn die entsprechende Anzahl der Objekte ( $k=2$ ) eingesetzt wird. Die Modellfunktion kann keinen heterogenen Inhalt in einem Hauptobjekt beschreiben, ist also für das vorliegende Beispiel ungeeignet. Es zeigt sich, dass in der Approximation die Schwelle für den Güteparameter  $R^2$  nicht unterschritten wird, d. h. die Approximation würde in einer automatischen Routine akzeptiert. Obwohl für die Werte der Parameter, die in der vorliegenden Modellfunktion zur Bestimmung vorliegen, eine relativ gute Übereinstimmung mit den Soll-Werten erreicht wird (siehe dazu Tab. 4.12), darf doch dieses Modell nicht akzeptiert werden, weil damit wesentliche Bestandteile des zu charakterisierenden Inhalts – nämlich der heterogene Anteil (der Innenzylinder) – unterschlagen werden würden. Obwohl das menschliche Auge die durchgeführte Annäherung (Abb. 4.19) als nicht gut gelungen beurteilen würde, liegt der nach Gl. 4.33 berechnete Wert des Güteparameters  $R^2$  oberhalb des festgesetzten Grenzwertes von 0,95, ab dem eine Approximation



**Abbildung 4.18:** Approximation künstlich erzeugter Daten durch die Modellfunktion "drei Zylinder ineinander".

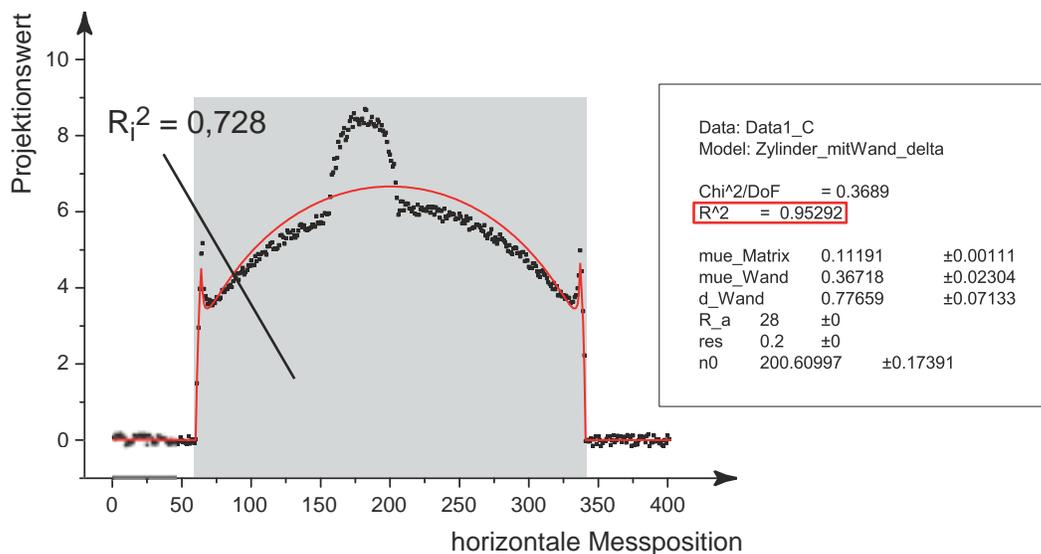
Oben: Daten ohne Rauschen (ideale Messergebnisse) und unten: Daten mit 30% Rauschen (reale Messergebnisse).

Im Ergebnisfenster ist der Güteparameter  $R^2$  der durchgeführten Approximation rot markiert. Erklärungen zum grau markierten Bereich sowie zu  $R_i^2$  folgen im Abschnitt "Zusammenfassung".

**Tabelle 4.12:** Ergebnisse der Approximation an künstlich erzeugten Daten des Beispiels durch die ungeeignete Modellfunktion "zwei Zylinder ineinander"; es wurden Daten mit 30% Rauschen verwendet.

Modellfunktion		"zwei Zylinder ineinander"
		Abb. 4.19
Größe	SOLL	IST
		<b><math>R^2 = 0,953</math></b>
$d_{\text{Wand}} / \text{cm}$	<b>0,85</b>	$(0,78 \pm 0,07)$
$n_0 / \text{Pixel}$	<b>200,7</b>	$(200,61 \pm 0,17)$
$\mu_{\text{Matrix}} / \text{cm}^{-1}$	<b>0,1</b>	$(0,112 \pm 0,001)$
$\mu_{\text{Wand}} / \text{cm}^{-1}$	<b>0,4</b>	$(0,37 \pm 0,02)$

als erfolgreich gewertet werden soll. Der Grund hierfür liegt in der Tatsache, dass je kleiner die Summe  $SY Y$  der quadratischen Abweichungen der einzelnen Datenpunkte vom Mittelwert aller Datenpunkte im Approximationsbereich ist, desto empfindlicher reagiert der Güteparameter  $R^2$  auf Abweichungen der Datenpunkte von der Approximationsfunktion (siehe Gl. 4.33). Im Verhältnis der im Beispiel großen Summe der quadratischen Abweichungen der Datenpunkte vom Mittelwert ( $SY Y = 3111$ ) fallen



**Abbildung 4.19:** Approximation an künstlich erzeugten Daten mit 30% Rauschen des Beispiels durch die ungeeignete Modellfunktion "zwei Zylinder ineinander". Im Ergebnisfenster ist der Güteparameter  $R^2$  der durchgeführten Approximation rot markiert. Erklärungen zum grau markierten Bereich sowie zu  $R_i^2$  folgen im Abschnitt "Zusammenfassung".

die Abweichungen der Datenpunkte von der Approximationsfunktion ( $\chi^2 = 147$ ) aufgrund des nicht angenäherten Innenzylinders wenig ins Gewicht und der Wert für  $R^2$  zeigt eine erfolgreiche Approximation an. Eine Ablehnung des Modells passiert erst bei:

$$R^2 < 0,95 \quad \Leftrightarrow \quad \chi^2 > 5\% \cdot SY Y$$

### *Ungünstige Startwerte*

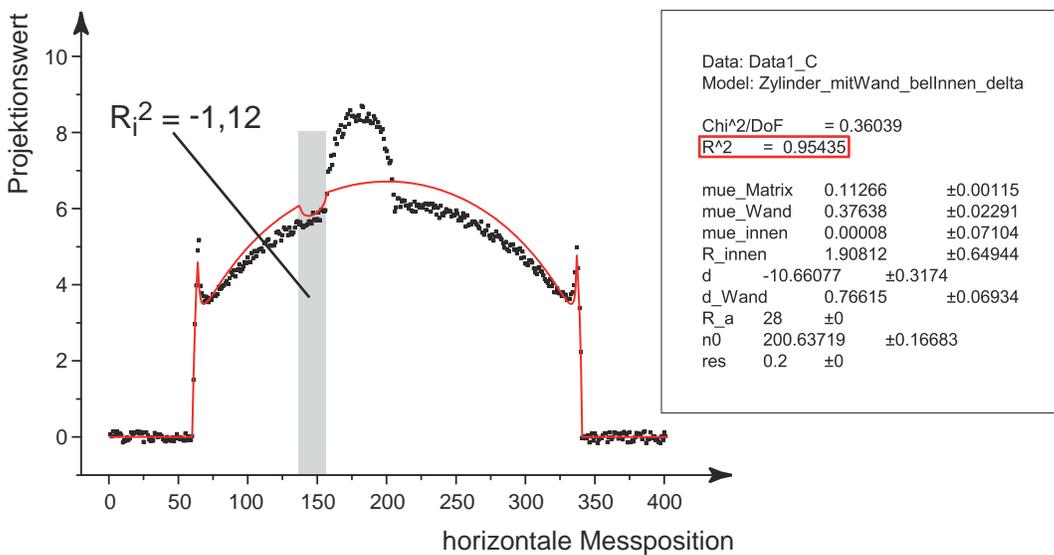
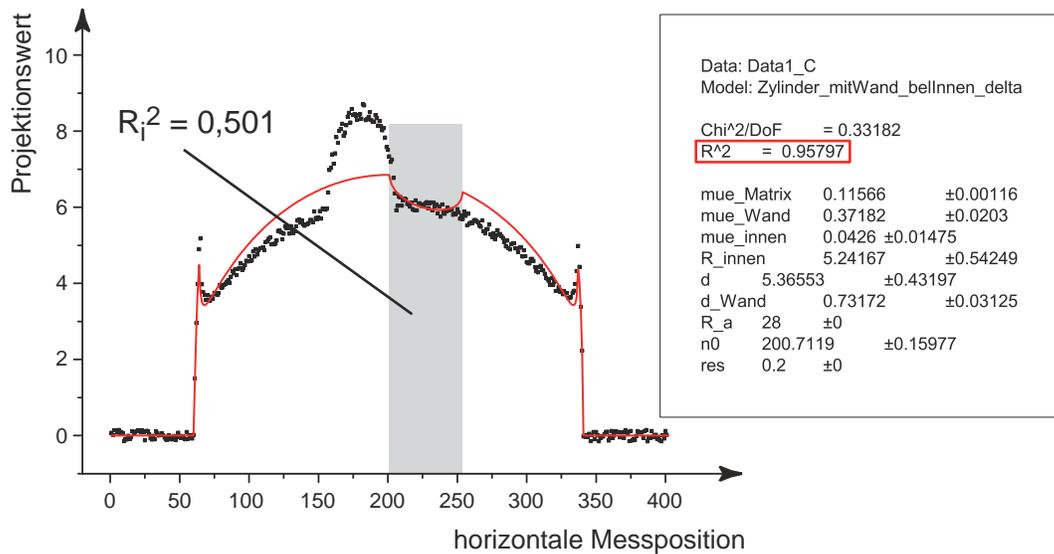
In Abb. 4.20 sind zwei Beispiele gezeigt, in denen die Annäherung an die simulierten Daten des Beispiels jeweils mit der geeigneten Modellfunktion "drei Zylinder ineinander", aber mit für den Approximationsverlauf ungünstigen Startwerten für die zu bestimmenden Parameter durchgeführt wurde. Die Ergebnisse, die in beiden Approximationen erreicht wurden, sind Tab. 4.13 zu entnehmen. Die Tabelle enthält außerdem die bei einer Approximation unter optimalen Bedingungen bezüglich der gewählten Startwerte erzielten Ergebnisse für die zu bestimmenden Parameter (durchgeführte Approximation siehe Abb. 4.18 unten). Beide durchgeführten Approximationen würden aufgrund ihres Güteparameters  $R^2$  als erfolgreich gewertet werden. Doch obwohl die jeweils angewendete Modellfunktion "drei Zylinder ineinander" den kompletten Aufbau des Objekts eindeutig beschreiben sollte, führt jeder Satz von Startwerten zu einer anderen Lösung für die Werte der zu bestimmenden Parameter. Man erkennt, dass speziell die Parameter, die den Innenzylinder beschreiben, im Besonderen seine Position  $d$ , erheblich variieren.

Das Ziel jeder Minimierungsprozedur besteht darin, das globale (absolute) Minimum von Chi-Quadrat zu finden. Dazu wählt die Levenberg-Marquardt-Methode sorgfältig einen Weg im Parameterraum, der zu einem Minimum führen sollte. Ein Minimum ist gefunden, wenn eine weitere Minimierung von Chi-Quadrat unmöglich erscheint. Dabei muss allerdings nicht immer das globale Minimum erreicht worden sein. Je nach Wahl der anfänglichen Werte für die unbekannt Parameter kann auch ein Weg im Parameterraum eingeschlagen worden sein, der nur zu einem der lokalen Minima führt, was am Ergebnis der Approximation nicht erkennbar ist; d. h. falls der theoretisch berechnete Güteparameter  $R^2$  oberhalb der festgesetzten Schwelle liegt, würde die Approximation und damit das zugrunde liegende Modell akzeptiert werden, obwohl es die Wirklichkeit des Objekts definitiv nicht am Besten beschreiben kann, wenn nur eines der lokalen Minima erreicht wäre. Unter der Voraussetzung, dass die gewählte Modellfunktion theoretisch geeignet ist, kann die optimale Beschreibung des Objekts nur durch die Werte der Parameter erfolgen, die durch Erreichen des globalen Minimums bestimmt werden. Durch eine vernünftige Wahl der Startwerte für die zu be-

**Tabelle 4.13:** Ergebnisse der Approximation an künstlich erzeugten Daten mit 30% Rauschen des Beispiels durch die passende Modellfunktion "drei Zylinder ineinander" mit unterschiedlichen Startwerten für die zu bestimmenden Parameter. Ideale Bedingungen: für den Approximationsverlauf günstige Startwerte und reale Bedingungen: für den Approximationsverlauf ungünstige Startwerte.

		ideale Bedingungen		reale Bedingungen			
		Abb. 4.18 unten		Abb. 4.20 oben		Abb. 4.20 unten	
		$R^2 = 0,99884$		$R^2 = 0,95797$		$R^2 = 0,95435$	
Größe	SOLL	Start	IST	Start	IST	Start	IST
$d_{\text{Wand}}/ \text{cm}$	<b>0,85</b>	1	0,856 $\pm 0,003$	1	0,73 $\pm 0,03$	1	0,77 $\pm 0,07$
$n_0/ \text{Pixel}$	<b>200,7</b>	201	200,69 $\pm 0,02$	201	200,71 $\pm 0,16$	201	200,64 $\pm 0,17$
$R_{\text{innen}}/ \text{cm}$	<b>4,9</b>	1	4,92 $\pm 0,01$	1	5,24 $\pm 0,54$	1	1,91 $\pm 0,65$
$d/ \text{cm}$	<b>-4</b>	-1	-4,03 $\pm 0,01$	1	5,37 $\pm 0,43$	-10	-10,66 $\pm 0,32$
$\mu_{\text{Matrix}}/ \text{cm}^{-1}$	<b>0,1</b>	1	0,1003 $\pm 0,0002$	1	0,116 $\pm 0,001$	1	0,113 $\pm 0,001$
$\mu_{\text{Wand}}/ \text{cm}^{-1}$	<b>0,4</b>	1	0,395 $\pm 0,003$	1	0,37 $\pm 0,02$	1	0,38 $\pm 0,02$
$\mu_{\text{innen}}/ \text{cm}^{-1}$	<b>0,35</b>	1	0,346 $\pm 0,002$	1	0,04 $\pm 0,01$	1	8,0E-05 $\pm 0,07$

stimmenden Parameter, also nahe ihrer tatsächlichen Werte, kann der Approximationsalgorithmus auf den richtigen Weg im Parameterraum gelenkt werden; schwierig ist dies allerdings bei zu charakterisierenden Objekten mit unbekanntem Inhalt. So kann also nicht ausgeschlossen werden, dass eine durchgeführte Approximation mit einem hohen Wert für den Güteparameter, ein Modell unterstützt, das den tatsächlichen Aufbau im Objekt nur minderwertig beschreibt. Es sei noch darauf hingewiesen, dass der Einfluss der Wahl der Startwerte umso größer wird, je mehr Objekte vorliegen und je mehr Parameter in einem Approximationsdurchgang zugleich bestimmt werden müssen. Das heißt, es gibt mehr Kombinationen der Startwerten für die zu bestimmenden Parameter, die in eine Approximation eingesetzt werden und dann zu einem akzeptierten Ergebnis führen könnten, das eventuell nur auf dem Erreichen eines lokalen Minimums von  $\chi^2$  basiert.



**Abbildung 4.20:** Zwei Beispiele für die Annäherung der künstlich erzeugten Daten des vorliegenden Beispiels mit jeweils ungünstigen Startwerten für die zu bestimmenden Parameter. In beiden Fällen wurde für die Approximation die passende Modellfunktion "drei Zylinder ineinander" verwendet. Im Ergebnisfenster ist jeweils der Güteparameter der durchgeführten Approximation rot markiert. Erklärungen zum grau markierten Bereich sowie zu  $R_i^2$  folgen im Abschnitt "Zusammenfassung".

### Zusammenfassung

Unter einem akzeptierten Modell versteht man eine geeignete vollständige Modellfunktion sowie die in der Approximation ermittelten Werte für alle unbekannt Parameter. Der letzte Abschnitt zeigt, dass die Entscheidung über die Eignung eines Modells nicht alleine auf der Basis des Güteparameters  $R^2$  einer Approximation getroffen werden kann. Dieser lässt, zumindest über den gesamten Gültigkeitsbereich der Modellfunktion (Approximationsraum) berechnet, keine allgemein gültige, zuverlässige Aussage über die Güte einer durchgeführten Approximation und somit über die Wahrscheinlichkeit, dass die ausgewählte Modellfunktion die wirkliche Situation hinreichend gut beschreiben kann, zu. Wesentlich aussagekräftiger dagegen zeigt sich der Güteparameter, wenn er für die einzelnen Teilfunktionen<sup>(17)</sup>, aus denen die vollständige Modellfunktion zusammengesetzt ist, separat berechnet wird. Aus den ermittelten Parameter einer vollzogenen Approximation ergeben sich die Intervallgrenzen für die einzelnen Gültigkeitsbereiche  $\mathcal{I}_i$  der Teilfunktionen. Für jeden Gültigkeitsbereich  $\mathcal{I}_i$  kann ein separater Güteparameter  $R_i^2$  gemäß Gl. 4.33 berechnet werden. Wenn jeder einzelne dieser separaten Güteparameter  $R_i^2$  über der festgelegten Schwelle liegt, so kann das gewählte Modell als mögliche Beschreibung für das vorliegende Objekt akzeptiert werden. Für jede der drei unter *realen* Bedingungen durchgeführten Approximationen (siehe Abbn. 4.19 und 4.20) ist beispielhaft der Wert eines separaten Güteparameters  $R_i^2$  berechnet. Der jeweilige Gültigkeitsbereich  $\mathcal{I}_i$  ist in den zugehörigen Abbildungen grau schraffiert gekennzeichnet und stellt jeweils für das gewählte Modell einen entscheidenden Teilbereich dar. In Tab. 4.14 sind die Werte für die  $R_i^2$  zusammen mit den Werten der Güteparameter  $R^2$  berechnet für die vollständige Modellfunktion aufgeführt. Alle drei ungeeigneten Modelle, die auf der Basis des Güteparameters  $R^2$  akzeptiert wurden, können nun nach der erneuten Überprüfung ihrer Eignung auf Basis der separaten Güteparameter  $R_i^2$ , die jeweils weit unterhalb der geforderten Schwelle von 0,95 liegen, abgelehnt werden.

Die Erfahrungen mit dem 1. Ansatz haben gezeigt, dass die Methode, experimentelle Daten aus DR-Messungen durch ausgewählte Modellfunktionen anzunähern, prinzipiell funktioniert, wenn für die Entscheidung über die Eignung eines Modells die separaten Güteparameter  $R_i^2$  eingesetzt werden. Als eindeutig kann die Entscheidung über ein Modell allerdings nur dann bezeichnet werden, wenn eine Variante gefunden wird, in der zu einer Modellfunktion ein Satz von Startwerten zu einer Lösung führt, so dass alle  $R_i^2$  über einer festgelegten Schwelle liegen. Wird so eine Variante nicht gefunden,

---

<sup>(17)</sup>Jede Teilfunktion ordnet einem Objekt innerhalb des Hauptobjekts (wie z. B. der homogenen Matrix oder dem homogenen Innenzylinder im Beispiel) sowie dem Bereich außerhalb des Hauptobjekts eine mathematische Beschreibung zu.

**Tabelle 4.14:** *Fitgüte in Teilbereichen: In den Spalten 3, 4 und 5 sind die ungeeigneten Modelle (Modellfunktion bzw. Startwerte) aufgeführt; im Vergleich dazu sind in Spalte 2 die gleichen Berechnungen für ein passendes Modell durchgeführt.*

<b>Modellfunktion</b>	günstig	günstig	günstig	ungünstig
<b>Startwerte</b>	günstig	ungünstig	ungünstig	günstig
Abbildung	4.18 unten	4.20 oben	4.20 unten	4.19
<b>ges. Bereich</b>				
$R^2$	0,999	0,958	0,954	0,953
$\chi^2$	3,61	130,74	141,99	146,45
$SY Y$	3110,59	3110,59	3110,59	3110,59
<b>Teilbereich</b>	innerhalb d. identifizierten Innenzyl.			innerh. d. Hauptobj.
$R_i^2$	0,957	0,501	-1,124	0,728
$\chi^2$	0,87	2,17	0,97	145,51
$SY Y$	20,23	4,34	0,46	534,78

so bleibt immer die Ungewissheit, ob es diese Variante wirklich nicht gibt, weil die ausgewählte Modellfunktion ungeeignet ist und deswegen den tatsächlich vorliegenden Objektaufbau nie – mit keinem Satz von Startwerten – beschreiben könnte, oder ob die Variante übersehen wurde, weil nicht jede theoretisch mögliche Kombination an Startwerten für die unbekannt Parameter ausprobiert wurde. Für eine automatische Auswertung von DR-Daten unter realen Bedingungen wird eine Methode benötigt, mit der sicher, stabil und eindeutig und mit minimalem Rechenaufwand über die Eignung eines Modells entschieden werden kann und gegebenenfalls die Werte der unbekannt Parameter in der Modellfunktion zweifelsfrei ermittelt werden können. Dazu ist notwendig, die starke Abhängigkeit des Approximationsergebnisses von den eingesetzten Startwerten zu verringern. Besonders deswegen, weil die Abhängigkeit umso stärker ausgeprägt ist, je mehr Objekte in einem Aufbau beschrieben werden müssen, d. h. aus je mehr Teilfunktionen eine vollständige Modellfunktion zusammengesetzt ist und umso mehr Parameter gleichzeitig durch Approximation bestimmt werden müssen. Zu erwähnen ist, dass die unbekannt Parameter gleichzeitig auch in den Intervallgrenzen, die die Gültigkeitsbereiche der einzelnen Teilfunktionen definieren, vorkommen.

Durch die Vereinfachung der anzuwendenden Modellfunktionen kann der Einfluss der Startwerte der zu bestimmenden Parameter auf das Ergebnis einer Approximation erheblich reduziert werden. Eine neue Methode, die weiterhin auf der Annäherung von DR-Daten durch geeignete Modellfunktionen beruht, allerdings Modellfunktionen in vereinfachter Form anwendet, wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

## 2. Ansatz

Im 2. Ansatz wird im Gegensatz zum 1. Ansatz nicht das komplette zu untersuchende Objekt mit einer einzigen Modellfunktion, die für den gesamten Datenbereich gilt, beschrieben, sondern es werden ausgehend vom äußersten Objekt (Hauptobjekt) nach innen hin schrittweise einzelne Strukturen identifiziert. Ein Objekt wird dabei identifiziert, in dem analog zum 1. Ansatz eine Modellfunktion gesucht wird, die die vorgegebenen Datenpunkte optimal annähert. Die Grundidee des 2. Ansatzes ist, den Einfluss aller *einhüllenden* Strukturen, die den potentiell vorhandenen heterogenen Inhalt im Hauptobjekt gleichmäßig umgeben, wie z. B. der Behälter selbst oder eine homogen verteilte Matrix, systematisch zu eliminieren, bis im dadurch veränderten Datensatz nur noch die Information des heterogenen Inhalts vorliegt. Äußere Objekte werden also quantifiziert, indem jeweils wenige Datenpunkte aus dem linken sowie aus dem rechten Randbereich des betrachteten Objekts in zwei voneinander unabhängigen Approximationen eingesetzt werden. Mit dieser Methode müssen potentiell vorhandene Objekte im Inneren des momentan betrachteten Objekts nicht berücksichtigt werden und die in Frage kommenden Modellfunktionen für ein zylindrisches Hauptobjekt vereinfachen sich im Wesentlichen auf die Modelle "ein Zylinder" und "zwei Zylinder ineinander", deren entsprechende Modellfunktionen aus Gl. 4.48 hervorgehen, indem die Anzahl der zu betrachtenden Objekte eingesetzt wird, also für "ein Zylinder"  $k=1$  und für "zwei Zylinder ineinander"  $k=2$ . Ein Objekt gilt als identifiziert und quantifiziert, wenn beide Approximationen mit der selben Modellfunktion für beide Seiten des Objekts ein akzeptables und innerhalb eines zulässigen Toleranzbereichs gleiches Ergebnis liefern. Die daraus resultierenden Werte für die zu bestimmenden Parameter werden im weiteren Verlauf der Quantifizierung als gegeben betrachtet. Der den Approximationen zugrunde gelegte Datensatz wird jeweils um den Anteil, den das zuletzt quantifizierte Objekt beiträgt, reduziert. Dadurch wird die Anzahl der unbekanntem Objekte iterativ verringert. Mit der Aufteilung in einzelne Bereiche innerhalb des zu untersuchenden Objekts wird erreicht, dass die einzusetzenden Modellfunktionen wesentlich einfacher sind: da sie nicht versuchen, alle vorhandenen Objekte gemeinsam mathematisch zu beschreiben, sind sie aus weniger Teilfunktionen zusammengesetzt und müssen nur in einem begrenzten Intervall innerhalb eines Objekts gültig sein. Gleichzeitig reduziert sich die Anzahl der zu bestimmenden Parameter in einem Approximations-Algorithmus.

Um die Methode des 2. Ansatzes und besonders seine Stärken im Gegensatz zum 1. Ansatz zu demonstrieren, wird das gleiche Beispiel (Zylinder mit Wand gefüllt mit homogener Matrix und Innenzylinder) verwendet und die schrittweise Bestimmung der

unbekannten Parameter durchgeführt. Dabei sind die Zylinderwand des Hauptobjekts (Objekt 1) sowie die homogene Matrix (Objekt 2) als die einhüllenden Strukturen zu verstehen, deren Einfluss eliminiert werden soll, um in einer weiteren Approximation an die verbleibenden Daten die Struktur des heterogenen Inhalts zu bestimmen. Der äußere Radius  $R_a$  des Hauptobjekts wird gemäß Gl. 4.49 aus den Stellen signifikanter Veränderungen im Datensatz bestimmt und im Weiteren als bekannter Parameter behandelt.

$$R_a = \frac{n_r - n_l}{2} \cdot \Delta \quad (4.49)$$

Die Stellen signifikanter Veränderungen  $n_l$  sowie  $n_r$ , die die linken sowie rechten Randbegrenzungen eines Objekts markieren, werden nach folgender Vorschrift gefunden:

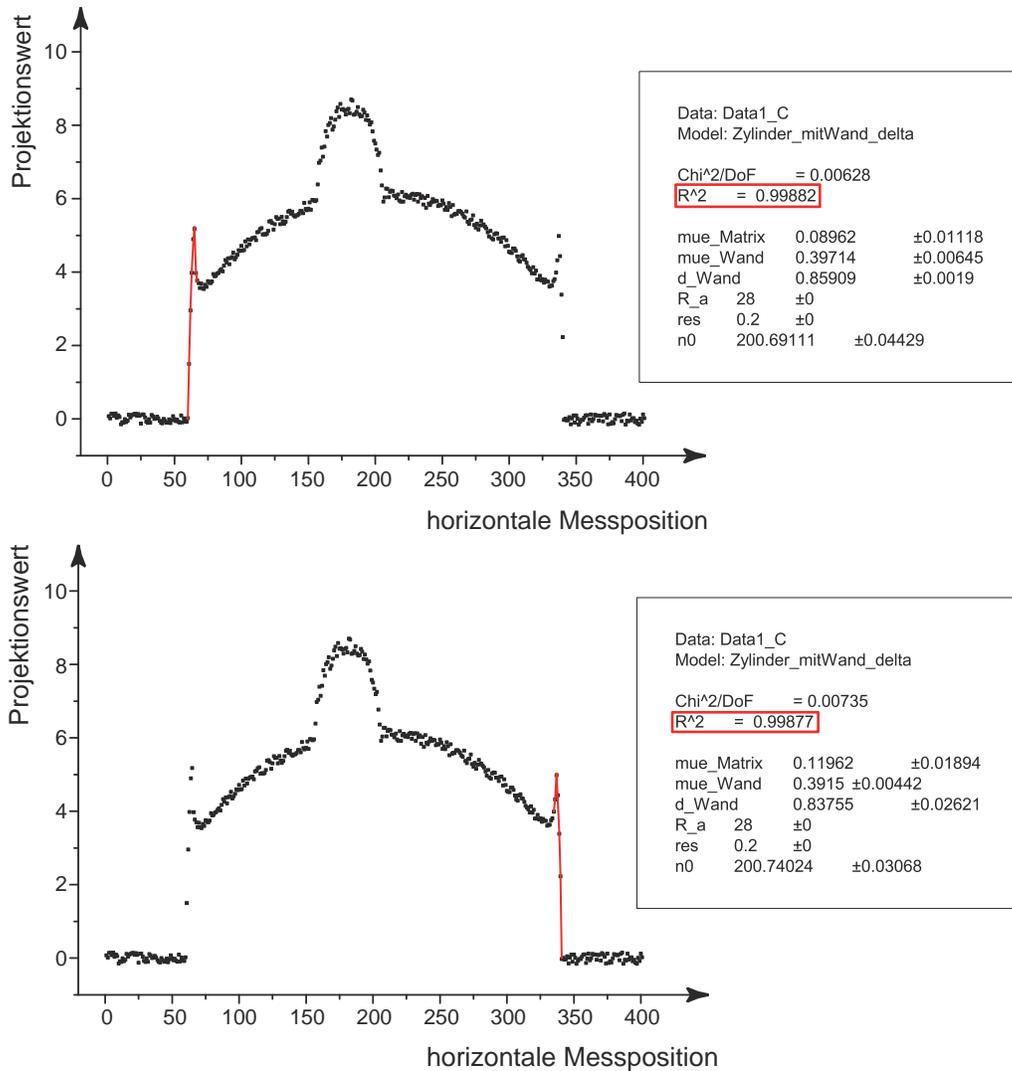
$$\left\{ |I(n_l - 1) - I(n_l)| - \sqrt{\sigma^2(I(n_l - 1)) + \sigma^2(I(n_l))} \leq 0 \right\} \vee \\ \left\{ |I(n_l) - I(n_l + 1)| - \sqrt{\sigma^2(I(n_l)) + \sigma^2(I(n_l + 1))} > 0 \right\}$$

sowie:

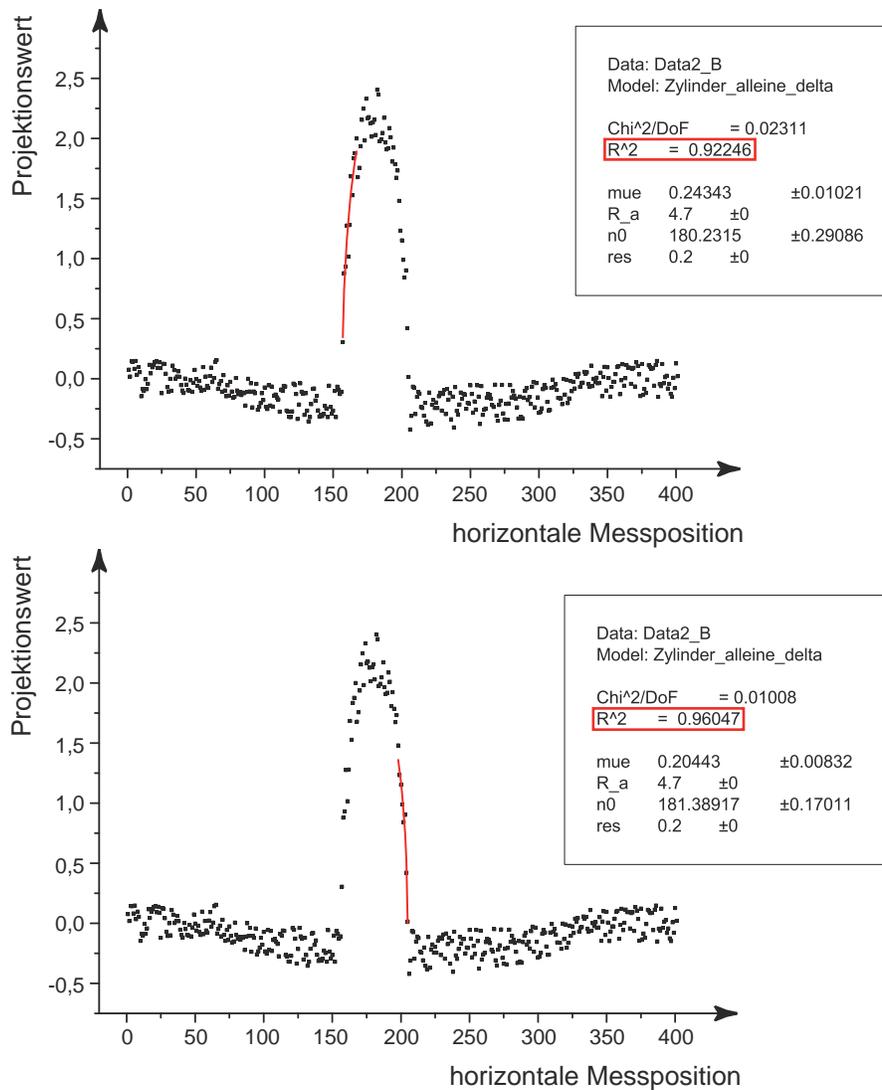
$$\left\{ |I(n_r - 1) - I(n_r)| - \sqrt{\sigma^2(I(n_r - 1)) + \sigma^2(I(n_r))} > 0 \right\} \vee \\ \left\{ |I(n_r) - I(n_r + 1)| - \sqrt{\sigma^2(I(n_r)) + \sigma^2(I(n_r + 1))} \leq 0 \right\}$$

Die Quantifizierung der einhüllenden Objekte wird durch zwei getrennt durchgeführte Approximationen jeweils an die beiden Randbereiche des zylindrischen Hauptobjekts jeweils nur an wenigen Datenpunkten, die sich innerhalb des Objektes befinden müssen, durchgeführt. Die Anzahl der dazu notwendigen Datenpunkte ergibt sich aus dem Kompromiss, genügend Datenpunkte für eine erfolgreiche Approximation einzusetzen und gleichzeitig eine Überschneidung mit einem potentiell möglichen nächsten Objekt zu vermeiden. Für die erfolgreiche Anwendung der einfachen Modellfunktionen "ein Zylinder" und "zwei Zylinder ineinander" sind zwischen fünf und zehn Datenpunkte nötig; das entspricht bei der im vorliegenden Beispiel angesetzten Abtastrate in horizontaler Richtung von  $\Delta = 0,2 \text{ cm/Pixel}$  einer Strecke von ein bis zwei Zentimeter. Für die erfolgreiche Durchführung von Ansatz 2 wird also gefordert, dass sich ein weiteres (in diesem Fall: drittes) Objekt mehr als zwei Zentimeter vom Rand des vorherigen Objekts befindet. Die Annäherung der Datenpunkte durch die Modellfunktion "ein Zylinder" schlägt fehl, so dass dieses Modell verworfen werden kann. Die Anwendung der Modellfunktion "zwei Zylinder ineinander" liefert für beide Seiten ein akzeptables Ergebnis der Approximation, welches in Abb. 4.21 gezeigt ist. Mit dem ersten Approximationsdurchlauf sind die Geometrie-Parameter Mittelpunkt  $n_0$  und Wandstärke  $d_{\text{Wand}}$

des Hauptobjekts, sowie die linearen Schwächungskoeffizienten der Wand  $\mu_{\text{Wand}}$  sowie der Matrix  $\mu_{\text{Matrix}}$  bestimmt; sie werden jeweils als Mittelwert aus den Ergebnissen der beiden einzelnen Approximationen berechnet. Auf der Grundlage dieser Werte wird ein Datensatz erzeugt, der einen vollständig mit homogener Matrix befüllten Zylinder dieser Abmessungen beschreibt. Dieser künstliche Datensatz wird vom Ausgangsdatsatz (Originaldatsatz) subtrahiert. Der dadurch resultierende reduzierte Datensatz trägt nur mehr die Informationen aller übrigen Objekte im Inneren des Hauptobjekts außer der homogen verteilten Matrix und ist in Abb. 4.22 graphisch dargestellt. Eine neue Suche nach Stellen signifikanter Veränderungen im reduzierten Datensatz ergibt, dass noch mindestens ein weiteres Objekt vorliegt, dessen Eigenschaften in einem weiteren Approximationsdurchgang bestimmt werden müssen. Im Gegensatz zum äußersten Objekt ist die geometrische Form aller innen liegenden Objekte unbekannt. Es müssen also unter den zur Verfügung stehenden Modellen die gefunden werden, die das vorliegende Objekt mit größtmöglicher Wahrscheinlichkeit beschreiben. Begonnen wird mit der Annahme eines weiteren zylindrischen Objekts, dessen Randbegrenzung und Radius  $R_{\text{innen}}$  durch die Stellen signifikanter Veränderungen im Datensatz gegeben sind. In Abb. 4.22 ist das Ergebnis der erfolgreichen Approximation an die Datenpunkte des linken sowie des rechten Randbereichs des Objekts durch die Modellfunktion "ein Zylinder" gezeigt. Die Anwendung anderer Modelle wie z. B. "zwei Zylinder ineinander" führen jeweils zu keinem akzeptablen Ergebnis und werden deswegen verworfen. Damit steht fest, dass sich im Hauptobjekt außer der Matrix nur noch ein weiteres Objekt befindet, dessen Struktur einem homogenen Vollzylinder am Nächsten kommt und im Weiteren als Innenzylinder bezeichnet wird. Sein linearer Schwächungskoeffizient  $\mu_{\text{innen}}$  berechnet sich als Mittelwert aus den Ergebnissen der beiden einzelnen Approximationen, die jeweils noch um den Wert  $\mu_{\text{Matrix}}$  der nach dem ersten Approximationsdurchgang subtrahierten Matrix korrigiert werden müssen. Die Angabe der geometrischen Position des Innenzylinders erfolgt als Verschiebung seines Mittelpunktes bezüglich des Zentrums des Hauptobjekts. Eine zusätzliche Bestätigung der Gesamtzahl an Objekten von drei erhält man, wenn der für die Quantifizierung zugrunde gelegte Datensatz noch um den Anteil des Innenzylinders reduziert wird und in diesem doppelt-reduzierten Datensatz keine Stellen signifikanter Veränderungen mehr gefunden werden. Zusammengefasst sind in Tab. 4.15 die in beiden Approximationsdurchläufen ermittelten Werte aller zu bestimmenden Parameter aufgeführt. Sie stimmen sehr gut mit den jeweiligen Soll-Werten überein. Für die Berechnung der in Tab. 4.15 zusammengefassten Werte für die Parameter des Innenzylinders wurden die aus den Ergebnissen der beiden einzelnen Approximationen (siehe Abb. 4.21 oben und unten) ermittelten Mittelwerte für  $\mu_{\text{Matrix}}$  und  $n_0$  eingesetzt.



**Abbildung 4.21:** Erster Approximationsdurchlauf am Originaldatensatz zur Quantifizierung der einhüllenden Objekte (Zylinderwand des Hauptobjekts sowie Matrix) mit den jeweils besten erzielten Ergebnissen bei Anwendung der Modellfunktion "zwei Zylinder ineinander". Oben: linker Randbereich des Hauptobjekts und unten: rechter Randbereich des Hauptobjekts.



**Abbildung 4.22:** Zweiter Approximationsdurchlauf am reduzierten Datensatz zur Identifizierung und Quantifizierung der heterogenen Struktur im Hauptobjekt mit den jeweils besten erzielten Ergebnissen bei Anwendung der Modellfunktion "ein Zylinder".

Oben: linker Randbereich des Innenzylinders und unten: rechter Randbereich des Innenzylinders.

**Tabelle 4.15:** Ergebnisse der beiden Approximationsdurchgänge für das vorliegende Beispiel. Die einhüllenden Objekte (Hauptzylinder und homogen verteilte Matrix) werden mit der Modellfunktion "zwei Zylinder ineinander" beschrieben, der Innenzylinder mit der Modellfunktion "ein Zylinder".

Größe	SOLL	Peak-Fit	1. App.	2. App.	IST	Fehler
<b>horizontale Abtastrate: <math>\Delta = 0,2</math> cm/Pixel</b>						
$R_a$ / cm	28	X			28,00	0,4
$d_{\text{Wand}}$ / cm	0,85		X		0,85	0,01
$n_0$ / Pixel	200,7		X		200,72	0,03
$R_{\text{innen}}$ / cm	4,9			X	4,70	0,4
$d$ / cm	-4			X	-3,98	0,03
$\mu_{\text{Matrix}}$ / $\text{cm}^{-1}$	0,1		X		0,10	0,01
$\mu_{\text{Wand}}$ / $\text{cm}^{-1}$	0,4		X		0,39	0,004
$\mu_{\text{innen}}$ / $\text{cm}^{-1}$	0,35			X	0,33	0,01

Mit den bisherigen Ausführungen konnte gezeigt werden, dass mit dem 2. Ansatz zuverlässig entschieden werden kann, ob in einem Hauptobjekt der Inhalt eine erkennbar homogene Struktur aufweist, oder nicht. Prinzipiell ähnlich wie unter "Problem 1 zum 1. Ansatz" geschildert, wird nach der Quantifizierung des Hauptobjekts entschieden, ob sein Inhalt einer weiteren Behandlung, d. h. weitere Approximationsdurchgänge zu seiner Identifizierung und Quantifizierung, bedarf, weil er als nicht homogen erkannt wurde. Diese Frage konnte durch den 1. Ansatz nicht (richtig) beantwortet werden, wodurch die Notwendigkeit eines neuen Ansatzes begründet war. Wie demonstriert wurde, stellt der 2. Ansatz in dieser Hinsicht eine Verbesserung dar. Eine weitere Notwendigkeit, den 1. Ansatz zu ersetzen, war die Abhängigkeit der Ergebnisse einer Approximation von den eingesetzten Startwerten für die zu bestimmenden Parameter, zu verringern. Nach wie vor wird eine Approximation nach der Methode von Levenberg-Marquardt durchgeführt, wobei die Abhängigkeit der Ergebnisse von den Startwerten bestehen bleibt, allerdings ist nun der Unterschied, ob ein lokales oder das globale Minimum erreicht wurde, offensichtlich.

### *Zusammenfassung*

Der Vorteil des 2. Ansatzes liegt besonders darin, dass eine ungünstige Wahl an Startwerten für die zu bestimmenden Parameter entweder trotzdem zu einem akzeptablen

und auch richtigen Ergebnis führen, oder aber der Wert der Fitgüte einen gescheiterten Approximations-Versuch anzeigt. Die Wahrscheinlichkeit, einen Satz an Parametern zu akzeptieren, weil der Wert der Fitgüte über einem festgesetzten Schwellwert liegt, obwohl die Approximation misslungen ist (siehe dazu die Beispiele in den Abbn. 4.19 und 4.20), ist hierbei wesentlich geringer. Die erzielten Ergebnisse stimmen sehr gut mit den eingesetzten Werten für die verschiedenen Parameter überein. Doch der entscheidende Unterschied zum 1. Ansatz liegt hier in der Stabilität des Verfahrens. Im 1. Ansatz mussten in einer Approximation sieben Parameter bestimmt werden, wobei die Intervallgrenzen der Bereiche, in denen die jeweiligen Teilfunktionen einer kompletten Modellfunktion gelten, selbst wieder abhängig von den zu bestimmenden Parametern sind. Im 2. Ansatz ist die Anzahl der zu bestimmenden Parameter pro Approximationsdurchlauf jeweils reduziert. Außerdem muss bei jeder Approximation nur immer ein Teilbereich des gesamten Datenbereichs durch eine ausgewählte Modellfunktion angenähert werden.

### 4.2.2 Nicht-hochauflösende Digitale Radiographie

Liegt die Abtastrate in horizontaler Richtung für eine DR-Messung in der Größenordnung (oder größer) der Abmessungen der zu identifizierenden Objekte, so kann nicht mehr von hochauflösender DR gesprochen werden. In diesem Abschnitt werden die Grenzen der Aussagekraft von Daten aus DR-Messungen abhängig von der Auflösung der durchgeführten Messung anhand des in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Beispiel-Objekts (Zylinder mit Wand gefüllt mit homogen verteilter Matrix und Innenzylinder) aufgezeigt. Die Auswertung der durch Simulation erzeugten Daten erfolgt jeweils nach dem Schema, das unter "2. Ansatz" vorgestellt wurde.

#### Auflösung $\Delta = 1 \text{ cm/Pixel}$

In Abb. 4.23 ist der Originaldatensatz des Beispiels mit einer Abtastrate in horizontaler Richtung von  $\Delta = 1 \text{ cm/Pixel}$  dargestellt. Für die Quantifizierung der einhüllenden Objekte wurden die Modelle<sup>(18)</sup> "ein Zylinder" und "zwei Zylinder ineinander" angewendet. Die dabei erzielten Werte für den Güteparameter sind in Tab. 4.16 jeweils für die Approximation an den linken und den rechten Randbereich des Objekts getrennt aufgeführt. Nur bei der Anwendung des Modells "zwei Zylinder ineinander" übersteigen die Güteparameter der beiden getrennt durchgeführten Approximationen die festgesetzte Schwelle von 0,95. Ein weiteres Indiz dafür, dass das Modell "ein Zy-

<sup>(18)</sup>Modelle werden erstellt, indem in der Modellfunktion gemäß Gl. 4.48 die Anzahl der zu betrachtenden Objekte eingesetzt wird, also für "ein Zylinder"  $k=1$  und für "zwei Zylinder ineinander"  $k=2$ .

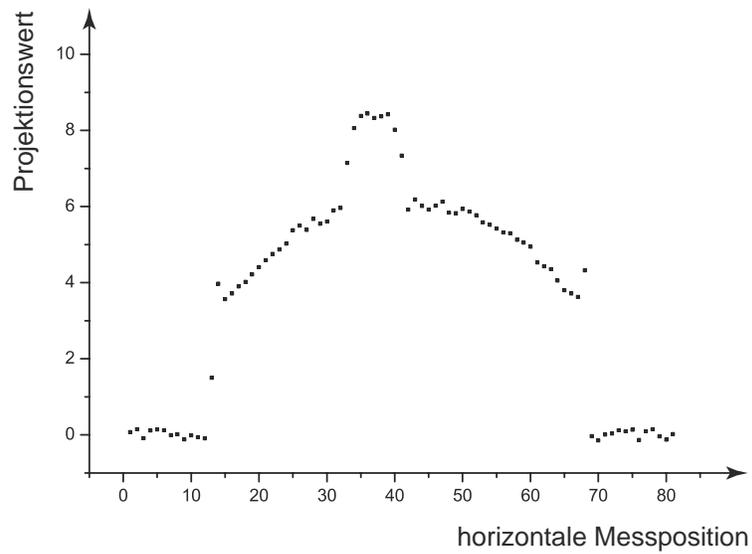
**Tabelle 4.16:** Anwendung verschiedener Modellfunktionen und der jeweils dabei erzielte Güteparameter bei der horizontalen Abtastrate  $\Delta = 1 \text{ cm/Pixel}$ .

Modellfunktion	Güteparameter $R^2$	
	linker Randbereich	rechter Randbereich
"ein Zylinder"	0,8673	0,58422
"zwei Zylinder ineinander"	0,99999	0,99961

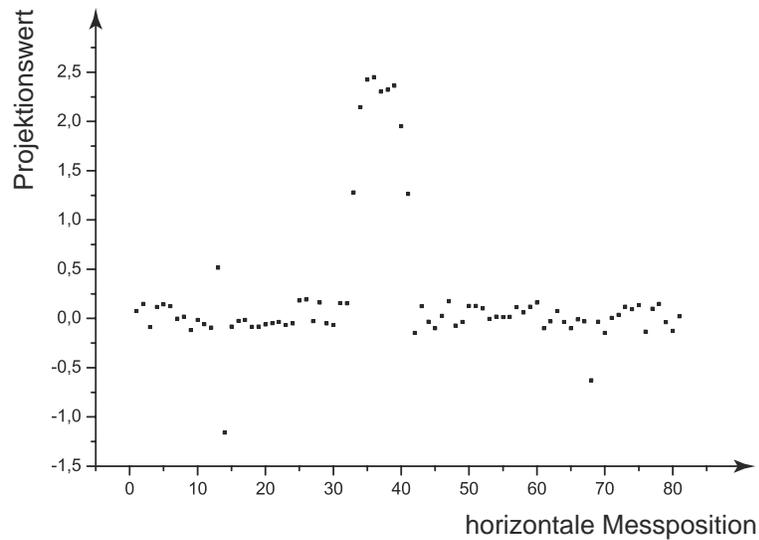
linder" keine gute Beschreibung des vorhandenen Objekts liefert, sind die für links und rechts erheblich unterschiedlichen Werte für  $R^2$ . Der Datensatz nach der Reduktion des Anteils von Hauptobjekt und homogen verteilter Matrix ist in Abb. 4.24 dargestellt. Die "Ausreißer" auf Höhe der horizontalen Schritte 14 und 69 deuten darauf hin, dass die ermittelten Parameter der einhüllenden Objekte von ihren Soll-Werten merklich abweichen. Für den zweiten Approximationsdurchgang zur Quantifizierung weiterer Objekte werden deswegen die Datenpunkte aus dem Randbereich des Hauptobjekts ausgespart. Die Datenpunkte des reduzierten Datensatzes mit der Information des Innenzylinders werden alle zusammen mit der Modellfunktion "ein Zylinder" angenähert. Der dabei ermittelte Schwächungskoeffizient muss noch um den Wert  $\mu_{\text{Matrix}}$  der nach dem ersten Approximationsdurchgang subtrahierten Matrix korrigiert werden. Es sei darauf hingewiesen, dass auch der Einsatz verschiedener Startwerte für die zu bestimmenden Parameter in der Modellfunktion "ein Zylinder" trotzdem nur zu einem akzeptierten Satz an Werten für die den Innenzylinder beschreibenden Parameter führt. Einige Versuche für Startwerte führen zu einem Approximationsergebnis, dessen Güte weit unterhalb der festgelegten Schwelle liegt und somit ausgeschlossen werden kann.

### Auflösung $\Delta = 2 \text{ cm/Pixel}$

In Abb. 4.25 ist der Originaldatensatz des selben Beispiels mit einer Abtastrate von  $\Delta = 2 \text{ cm/Pixel}$  dargestellt. Für die Quantifizierung der einhüllenden Objekte wurden analog zum vorherigen Abschnitt die Modelle "ein Zylinder" und "zwei Zylinder ineinander" angewendet. Die dabei erzielten Werte für den Güteparameter sind in Tab. 4.17 jeweils für die Approximation an den linken und den rechten Randbereich des Objekts getrennt aufgeführt. Hier zeigt sich im Vergleich zur kleineren Abtastrate von  $\Delta = 1 \text{ cm/Pixel}$ , dass das Modell "ein Zylinder" nur knapp nicht akzeptiert wird; nur der Güteparameter für den rechten Randbereich liegt unterhalb der Schwelle. Der resultierende Datensatz nach der Reduktion um den Anteil, den das Modell "zwei Zylinder ineinander" für die einhüllenden Objekte liefert, ist in Abb. 4.26 graphisch dargestellt.



**Abbildung 4.23:** Graphisch dargestellter Originaldatensatz des Beispiels mit einer Abtast-rate in horizontaler Richtung von  $\Delta = 1$  cm/Pixel.

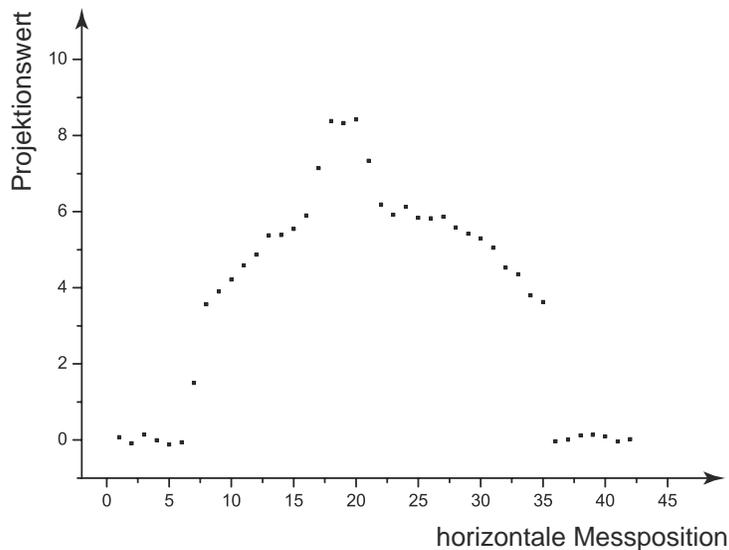


**Abbildung 4.24:** Graphisch dargestellter reduzierter Datensatz des Beispiels mit einer Abtastrate in horizontaler Richtung von  $\Delta = 1$  cm/Pixel nach Reduktion mit dem Modell "zwei Zylinder ineinander".

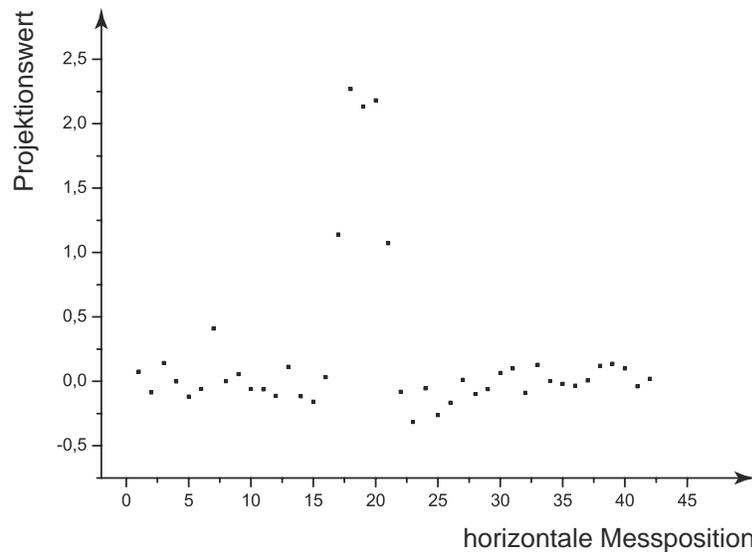
**Tabelle 4.17:** Anwendung verschiedener Modellfunktionen und der jeweils dabei erzielte Güteparameter bei der horizontalen Abtastrate  $\Delta = 2 \text{ cm/Pixel}$ .

Modellfunktion	Güteparameter $R^2$	
	linker Randbereich	rechter Randbereich
"ein Zylinder"	0,9787	0,9226
"zwei Zylinder ineinander"	0,9983	0,9984

Analog zum vorherigen Abschnitt werden die Datenpunkte aus dem Randbereich des Hauptobjekts ausgespart und die übrigen mit der Modellfunktion "ein Zylinder" angenähert, wobei  $\mu_{\text{Matrix}}$  aus dem ersten Approximationsdurchgang verwendet wird, um den ermittelten Schwächungskoeffizienten zu korrigieren. Wiederum führt der Einsatz verschiedener Startwerte für die zu bestimmenden Parameter nur zu einem akzeptierten Satz an Werten für die den Innenzylinder beschreibenden Parameter.



**Abbildung 4.25:** Graphisch dargestellter Originaldatensatz des Beispiels mit einer Abtastrate in horizontaler Richtung von  $\Delta = 2 \text{ cm/Pixel}$ .



**Abbildung 4.26:** Graphisch dargestellter reduzierter Datensatz des Beispiels mit einer Abtastrate in horizontaler Richtung von  $\Delta = 2 \text{ cm/Pixel}$  nach Reduktion mit dem Modell "zwei Zylinder ineinander".

### Auflösung $\Delta = 5 \text{ cm/Pixel}$

In Abb. 4.27 ist der Originaldatensatz des selben Beispiels mit einer Abtastrate von  $\Delta = 5 \text{ cm/Pixel}$  dargestellt. Mit dieser großen Abtastrate ist die Auflösung der Wandstärke des Hauptobjekts nicht mehr möglich und so muss das Modell "zwei Zylinder ineinander", das die Zylinderwand berücksichtigen würde, scheitern. Zu einem akzeptierten Ergebnis für die einhüllenden Objekte führt nur die Anwendung des Modells "ein Zylinder" (Die Erstellung eines Modells erfolgt wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben.). Das Hauptobjekt wird also als Vollzylinder mit einem linearen Schwächungskoeffizienten, der sich als Kombination aus den Werten der tatsächlich vorhandenen Zylinderwand und der im Hauptobjekt befindlichen homogen verteilten Matrix ergibt, beschrieben. Der nach der Reduktion des Anteils von Hauptobjekt und homogen verteilter Matrix im Originaldatensatz resultierende Datensatz ist in Abb. 4.28 dargestellt. Die "Ausreißer" auf Höhe der horizontalen Schritte 4 und 14 sind auf die in der Beschreibung des Hauptobjekts fehlenden Zylinderwand zurückzuführen. Nach Aussparung der Datenpunkte aus den Randbereichen werden alle übrigen mit der Modellfunktion "ein Zylinder" angenähert, wobei  $\mu_{\text{Matrix}}$  aus dem ersten Approximationsdurchgang zur Korrektur des ermittelten Schwächungskoeffizienten verwendet wird. Unter der Voraussetzung eine potentiell in Frage kommende Modellfunktion gewählt zu haben, ist eine weitere Bedingung für eine erfolgreiche Approximation die Mindestanzahl zur Verfügung gestellter Datenpunkte von fünf bis zehn. In dem Beispiel wird

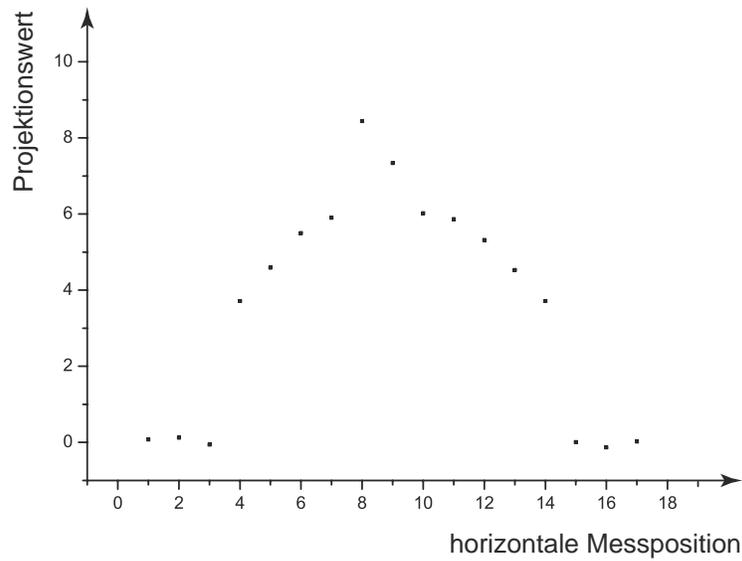
**Tabelle 4.18:** Einzelwerte für die Parameter des Innenzylinders aus den drei akzeptierten Approximationen bei der horizontalen Abtastrate  $\Delta = 5$  cm/Pixel; die einzelnen Approximationen unterscheiden sich in der Wahl der Startwerte für die zu bestimmenden Parameter.

		$R^2 = 0,99996$		$R^2 = 0,9664$		$R^2 = 0,95745$	
Größe	SOLL	IST	Fehler	IST	Fehler	IST	Fehler
$R_{\text{innen}}/ \text{cm}$	<b>4,9</b>	5,3766	0,011353	5,7627	0,8532	5,8359	1,0964
$d/ \text{cm}$	<b>-4</b>	-4,6460	0,00604	-4,2593	0,3524	-4,1868	0,4315
$\mu_{\text{innen}}/ \text{cm}^{-1}$	<b>0,35</b>	0,3383	0,00148	0,3067	0,0520	0,3020	0,0612

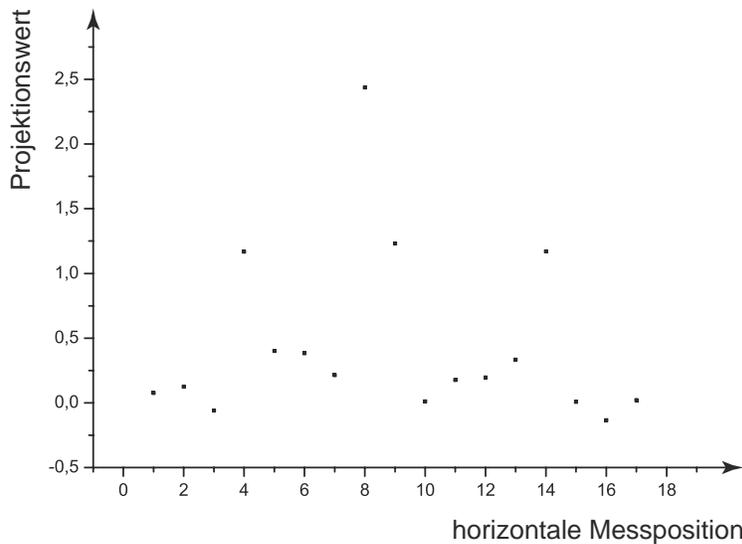
dieses Minimum mit insgesamt nur noch vier vorliegenden Datenpunkten zur Identifikation des Innenzylinders unterschritten. Deswegen kann ein akzeptiertes Ergebnis dieser Approximationen nicht als eindeutig bezeichnet werden. Für den Vergleich der Auswertungen bei verschiedenen Abtastraten (siehe Tab. 4.19) werden allerdings auch die nicht eindeutigen Ergebnisse aus diesem zweiten Approximationsdurchgang verwendet. Es zeigt sich, dass unterschiedliche Startwerte für die zu bestimmenden Parameter der Modellfunktion zu leicht unterschiedlichen Ergebnissen führen. Bei den selben Sätzen der Startwerte, wie für die Abtastraten  $\Delta = 1$  und  $2$  cm/Pixel eingesetzt wurden, werden hier nur insgesamt für drei (von 16) Approximationen Güteparameter oberhalb der festgesetzten Schwelle erreicht. Die Ergebnisse dieser drei erfolgreichen (aber nicht eindeutigen!) Approximationen sind in Tab. 4.18 zusammengestellt. Einige der Approximationen mit Güteparametern von knapp 0,99 erfüllen die zusätzlich nötige Voraussetzung, dass die Fehler der zu bestimmenden Parameter genügend klein sein müssen, nicht.

### Zusammenfassung

Mit den Ergebnissen aus den drei Auswertungen für die unterschiedlichen Abtastraten in horizontaler Richtung für jeweils das selbe Beispiel-Objekt lässt sich die Theorie des Shannonschen Abtasttheorems (siehe Abschnitt 4.2) bestätigen. In Tab. 4.19 sind für alle drei Fälle die erzielten Werte der Geometrie-Parameter  $d_{\text{Wand}}$  und  $R_{\text{innen}}$ , sowie die direkt mit deren Ermittlung zusammenhängenden Werte der linearen Schwächungskoeffizienten der Zylinderwand  $\mu_{\text{Wand}}$  und des Innenzylinders  $\mu_{\text{innen}}$  zusammengefasst. Für die größte Abtastrate (5 cm/Pixel) sind die Werte für die Parameter des Innenzylinders dabei jeweils als Mittelwerte der Ergebnisse der drei akzeptierten Approximationen (siehe Tab. 4.18) berechnet.



**Abbildung 4.27:** Graphisch dargestellter Originaldatensatz des Beispiels mit einer Abtast-rate in horizontaler Richtung von  $\Delta = 5 \text{ cm/Pixel}$ .



**Abbildung 4.28:** Graphisch dargestellter reduzierter Datensatz des Beispiels mit einer Abtastrate in horizontaler Richtung von  $\Delta = 5 \text{ cm/Pixel}$  nach Reduktion mit dem Modell "ein Zylinder".

**Tabelle 4.19:** Ergebnisse für ausgewählte Parameter abhängig von der Abtastrate in horizontaler Richtung, sowie die jeweiligen Grenzen von Abmessungen, die noch aufgelöst werden können.

Abtastrate		$\Delta = 1 \text{ cm/Pixel}$		$\Delta = 2 \text{ cm/Pixel}$		$\Delta = 5 \text{ cm/Pixel}$	
mögliche Auflösung von Strukturen		< 2 cm		< 4 cm		< 10 cm	
Größe	<b>SOLL</b>	IST	Fehler	IST	Fehler	IST	Fehler
$d_{\text{Wand}} / \text{cm}$	<b>0,85</b>	1,05	0,12	1,65	1,29	-	-
$\mu_{\text{Wand}} / \text{cm}^{-1}$	<b>0,4</b>	0,34	0,05	0,22	0,15	-	-
$R_{\text{innen}} / \text{cm}$	<b>4,9</b>	4,73	0,12	4,56	0,15	5,66	1,39
$\mu_{\text{innen}} / \text{cm}^{-1}$	<b>0,35</b>	0,37	0,01	0,36	0,02	0,32	0,08

### 4.2.3 Auswertung in vertikaler Richtung

Die vorgestellten Ansätze für eine Auswertung von Daten aus einer DR-Messung wurden jeweils für eine vertikale Position (= Höhenposition) demonstriert und diskutiert, wobei insbesondere auf die Erkennung von zylindrischen Objekten eingegangen wurde. Um vollständige Objekte innerhalb eines gegebenen Hauptobjekts zu identifizieren, muss eine zusätzlich Auswertung für alle vorliegenden vertikalen Messpositionen durchgeführt und daraus zusammenhängende Bereiche (d. h. Objekte) abgeleitet werden. Die in der Analyse aller vertikaler Messpositionen identifizierten Objekte werden ebenfalls durch Körper einfacher geometrischer Form dargestellt. Dazu wird für jeden Körper ein allgemeiner Parametersatz zusammengestellt, der alle nötigen Informationen enthält, um den einzelnen Körper vollständig zu beschreiben;<sup>(19)</sup> das sind seine geometrischen Daten sowie sein linearer Schwächungskoeffizient. Zur einheitlichen Angabe der geometrischen Größen in den Parametersätzen wird ein allgemein gültiges Bezugssystem eingeführt. Es ist so angeordnet, dass sein Nullpunkt im Mittelpunkt des untersuchten Hauptobjekts auf Höhe der Unterkante des Objekts liegt. Nachdem die Auswertung der Daten einer DR-Messung keine Aussage über die Lage in der Tiefe eines identifizierten Objekts innerhalb des Hauptobjekts erlaubt, ist die  $y$ -Richtung (Tiefen-Richtung) im Bezugssystem bedeutungslos. Ein Objekt ist entlang der  $y$ -Richtung beliebig verschiebbar, soweit keine weiteren Informationen vorliegen.

Alle identifizierten Objekte werden auf eine der drei Grundgeometrien Zylinder, Kegel(stumpf) oder Ellipsoid zurückgeführt. Die entsprechenden vollständigen Para-

<sup>(19)</sup>Die weitere Behandlung der Parametersätze wird in Kapitel 5 erläutert.

Parametersätze in ihrer allgemeinen Form sind den Gln. 4.50 bis 4.52 zu entnehmen.

$$\text{PS}_{\text{Zylinder}} = \left\{ E; z_1, \Delta z_1; z_2, \Delta z_2; x_0, \Delta x_0; R, \Delta R; \mu, \Delta \mu \right\} \quad (4.50)$$

wobei:

$E$ : Energielinie(n) (oder Energieintervall), für die die Transmission gemessen wurde

$z_1$  bzw.  $z_2$ : Höhenposition der Unter- bzw. Oberkante des Zylinders

$x_0$ : Mittelpunkt des Zylinders auf der  $x$ -Achse

$R$ : Radius des Zylinders

$\mu$ : linearer Schwächungskoeffizient des Zylindermaterials

$$\text{PS}_{\text{Kegel}} = \left\{ E; z_1, \Delta z_1; z_2, \Delta z_2; x_0, \Delta x_0; R_1, \Delta R_1; R_2, \Delta R_2; \mu, \Delta \mu \right\} \quad (4.51)$$

wobei:

$E$ : Energielinie(n) (oder Energieintervall), für die die Transmission gemessen wurde

$z_1$  bzw.  $z_2$ : Höhenposition der Unter- bzw. Oberkante des Kegels

$x_0$ : Mittelpunkt der nach unten begrenzenden Grundfläche des Kegels auf der  $x$ -Achse

$R_1$  bzw.  $R_2$ : Radius der nach unten bzw. nach oben begrenzenden Grundfläche des Kegels

$\mu$ : linearer Schwächungskoeffizient des Kegelmaterials

$$\text{PS}_{\text{Ellipsoid}} = \left\{ E; M_x, \Delta M_x; M_z, \Delta M_z; b, \Delta b; c, \Delta c; \mu, \Delta \mu \right\} \quad (4.52)$$

wobei:

$E$ : Energielinie(n) (oder Energieintervall), für die die Transmission gemessen wurde

$M_x$ : Mittelpunktskomponente des Ellipsoids in  $x$ -Richtung

$M_z$ : Mittelpunktskomponente des Ellipsoids in  $z$ -Richtung

$b$ : Länge der Achse des Ellipsoids in  $x$ -Richtung

$c$ : Länge der Achse des Ellipsoids in  $z$ -Richtung

$\mu$ : linearer Schwächungskoeffizient des Ellipsoidmaterials

Unter  $\Delta X$  ist jeweils die Variation der Größe  $X$  zu verstehen.

Im Folgenden wird kurz die Analyse einzelner vertikaler Messpositionen und die Erstellung der Parametersätze gemäß der Gln. 4.50 bis 4.52 erläutert. Ist die Bedingung unter Gl. 4.53 für zwei Körper der selben Grundgeometrie (also z. B. zwei Zylinder) aus den übereinander liegenden Höhen  $i$  und  $(i+1)$  erfüllt, so kann dies als Hinweis gewertet werden, dass es sich um das selbe Objekt handelt.

$$\left\{ \mu_i - \Delta \mu_i < \mu_{i+1} + \Delta \mu_{i+1} \leq \mu_i + \Delta \mu_i \right\} \quad \wedge \quad \left\{ \mu_i - \Delta \mu_i < \mu_{i+1} - \Delta \mu_{i+1} \leq \mu_i + \Delta \mu_i \right\} \quad (4.53)$$

In diesem Fall werden die Geometrie-Daten beider Körper im selben Sinne gemäß Gl. 4.54 überprüft.

$$\left\{ X_i - \Delta X_i < X_{i+1} + \Delta X_{i+1} \leq X_i + \Delta X_i \right\} \wedge \left\{ X_i - \Delta X_i < X_{i+1} - \Delta X_{i+1} \leq X_i + \Delta X_i \right\} \quad (4.54)$$

$X$  steht dabei stellvertretend für alle geometrischen Daten, die die Objekte in den einzelnen vertikalen Höhenpositionen beschreiben.

Für die Überprüfung zweier Zylinder können sich die folgenden verschiedenen Varianten ergeben:

- Ist die Bedingung aus Gl. 4.54 für  $x_0$  und  $R$  aller Höhen zwischen  $i$  und  $(i+z)$  erfüllt, so handelt sich in der Beschreibung der einzelnen Parametersätze um einen Zylinder, der durch den Parametersatz aus Gl. 4.50 beschrieben wird, wobei:

$$z_1 = i \quad \text{und} \quad z_2 = i + z \quad \text{mit:} \quad \Delta z_1 = \Delta z_2 = 0,5 \cdot \Delta_{\text{vertikal}}$$

$$R = \frac{1}{(z+1)} \cdot \sum_{h=i}^{i+z} R_h \quad \text{mit:} \quad \Delta R = \frac{1}{(z+1)} \cdot \sqrt{\sum_{h=i}^{i+z} (\Delta R_h)^2}$$

$$x_0 = \frac{1}{(z+1)} \cdot \sum_{h=i}^{i+z} x_0(h) \quad \text{mit:} \quad \Delta x_0 = \frac{1}{(z+1)} \cdot \sqrt{\sum_{h=i}^{i+z} [\Delta x_0(h)]^2}$$

mit:

$\Delta_{\text{vertikal}}$ : Abtastrate in vertikaler Richtung

$R_h$ : Radius des in der Höhe  $h$  identifizierten Zylinders

$x_0(h)$ : Mittelpunkt des in der Höhe  $h$  identifizierten Zylinders

- Ist die Bedingung aus Gl. 4.54 für alle  $x_0$  zwischen den Höhen  $i$  und  $(i+z)$  erfüllt und variieren die jeweiligen Radien in der Weise, dass sie mit zunehmender Höhe erst größer, dann wieder kleiner werden, so handelt es sich bei der Beschreibung der einzelnen Parametersätze um ein Ellipsoid (im Spezialfall um eine Kugel) und wird durch den Parametersatz aus Gl. 4.52 beschrieben, wobei:

$$M_x = \frac{1}{(z+1)} \cdot \sum_{h=i}^{i+z} x_0(h) \quad \text{mit:} \quad \Delta M_x = \frac{1}{(z+1)} \cdot \sqrt{\sum_{h=i}^{i+z} [\Delta x_0(h)]^2}$$

$$M_z = \frac{1}{2} \cdot [i + (i + z)] \quad \text{mit:} \quad \Delta M_z = \sqrt{0,5} \cdot \Delta_{\text{vertikal}}$$

$$b = R(M_z) \quad \text{mit:} \quad \Delta b = \Delta R(M_z)$$

$$c = [(i + z) - i] \quad \text{mit:} \quad \Delta c = \sqrt{0,5} \cdot \Delta_{\text{vertikal}}$$

Eine Kugel liegt vor, wenn  $b$  und  $c$  nahezu gleich sind.

- Ist die Bedingung aus Gl. 4.54 für alle  $x_0$  zwischen den Höhen  $i$  und  $(i + z)$  erfüllt und variieren die jeweiligen Radien in der Weise, dass sie mit zunehmender Höhe größer oder kleiner werden, so handelt es sich bei der Beschreibung der einzelnen Parametersätze um einen Kegel(stumpf) und wird durch den Parametersatz aus Gl. 4.51 beschrieben, wobei:

$$z_1 = i \quad \text{und} \quad z_2 = i + z \quad \text{mit:} \quad \Delta z_1 = \Delta z_2 = 0,5 \cdot \Delta_{\text{vertikal}}$$

$$x_0 = \frac{1}{(z + 1)} \cdot \sum_{h=i}^{i+z} x_0(h) \quad \text{mit:} \quad \Delta x_0 = \frac{1}{(z + 1)} \cdot \sqrt{\sum_{h=i}^{i+z} [\Delta x_0(h)]^2}$$

$$R_1 = R_i \quad \text{mit:} \quad \Delta R_1 = \Delta R_i$$

$$R_2 = R_{i+z} \quad \text{mit:} \quad \Delta R_2 = \Delta R_{i+z}$$

Ein Kegelstumpf liegt vor, wenn  $R_1$  und  $R_2$  ungleich Null sind.

- Ist die Bedingung aus Gl. 4.54 für alle  $R$  zwischen den Höhen  $i$  und  $(i + z)$  erfüllt und werden die Werte für  $x_0$  kontinuierlich kleiner oder größer, so kann es sich bei der Beschreibung der einzelnen Parametersätze um einen schräg liegenden Zylinder handeln.

Für alle vier beschriebenen Fälle errechnet sich der lineare Schwächungskoeffizient  $\mu$  jeweils aus folgender Gleichung:

$$\mu = \frac{1}{(z + 1)} \cdot \sum_{h=i}^{i+z} \mu_h \quad \text{mit:} \quad \Delta \mu = \frac{1}{(z + 1)} \cdot \sqrt{\sum_{h=i}^{i+z} (\Delta \mu_h)^2} \quad (4.55)$$

mit:

$\mu_h$ : linearer Schwächungskoeffizient des in der Höhe  $h$  identifizierten Zylinders

### 4.2.4 Einfache Transmissionsmessung

In Abb. 4.29 ist das Ergebnis einer Einfachen Transmissionsmessung (siehe Abschnitt 2.2.1) durch die zentrale Achse eines zylindrischen Objekts graphisch dargestellt; dabei ist dem Transmissionspektrum das Radiogramm des zu zwei Drittel mit homogenem Material gefüllten Zylinders unterlegt. Während der Messung, die mit einer sehr hohen Abtastrate in vertikaler Richtung (0,2 cm/Pixel) durchgeführt wurde, wurde das Untersuchungsobjekt in jeder Höhenposition um 360° rotiert, um über eventuelle Matrixinhomogenitäten zu mitteln. Der von der Energie der Transmissionsquelle abhängige Projektionswert  $P$  für eine vertikale Messposition  $z$  aus Gl. 4.30 vereinfacht sich für ein zylindrisches Messobjekt zu folgendem Ausdruck:

$$P(E, z) = \ln I_0(E, z) - \ln I(E, z) = \bar{\mu}(E, z) \cdot 2R_{\text{Messobjekt}} \quad (4.56)$$

mit:

$\bar{\mu}$ : linearer Schwächungskoeffizient, gemittelt über das im Strahlengang befindliche Material in der jeweiligen vertikalen Messposition

$2R_{\text{Messobjekt}}$ : Durchmesser des Messobjekts

Bei bekannten äußeren Abmessungen des Messobjekts kann nach Gl. 4.57 aus dem Projektionswert  $P$  der mittlere lineare Schwächungskoeffizient  $\bar{\mu}$  des Materials im Strahlengang ermittelt werden; für das vorliegende Beispiel ist er in Abb. 4.30 für den gesamten vertikalen Messbereich aufgetragen.

$$\bar{\mu}(E, z) = \frac{1}{2R_{\text{Messobjekt}}} \cdot P(E, z) \quad (4.57)$$

Die Informationen, die aus einer Messposition  $z_i$  gewonnen werden, werden in der Form eines vollständigen Parametersatzes weitergegeben. Dabei empfiehlt sich für zylindrische Untersuchungsobjekte der Parametersatz für Zylinder analog zu Gl. 4.50.

$$\text{PS}_{\text{Zylinder}} = \left\{ E; z_1, \Delta z_1; z_2, \Delta z_2; x_0, \Delta x_0; R, \Delta R; \mu, \Delta \mu \right\}$$

wobei:

$$z_1 = z_i - \Delta z_1 \quad \text{und} \quad z_2 = z_i + \Delta z_2$$

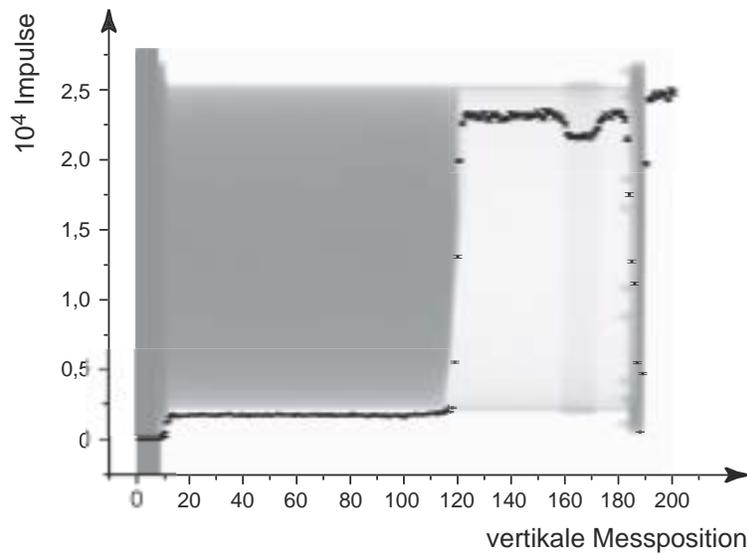
$$\text{mit: } \Delta z_1 = \Delta z_2 = w \cdot \Delta_{\text{vertikal}} \quad \text{wobei: } w \in [0; 1 [$$

$$x_0 = 0$$

$$0 < R \leq R_{\text{Messobjekt}}$$

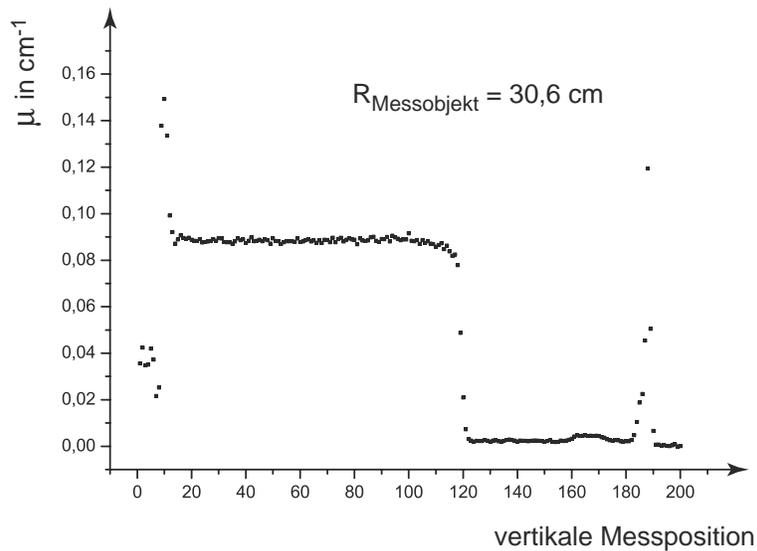
$$\mu = \bar{\mu}(E, z_i) \quad \text{aus Gl. 4.57.}$$

Üblicherweise erhält man ebenso viele Parametersätze für Zylinder wie vertikale Messpositionen vorliegen; mit jedem dieser Parametersätze wird ein Teilbereich des Untersuchungsobjekts beschrieben. Für Teilbereiche, die außerhalb dieser Zylinder liegen, für



**Abbildung 4.29:** Messdaten aus der Einfachen Transmissionsmessung an einem zu zwei Drittel mit homogenem Material gefüllten zylindrischen Objekt. Dem Transmissionsspektrum ist das Radiogramm des Untersuchungsobjekts unterlegt.

die also keine Messwerte vorliegen, kann vorerst keine Aussage getroffen werden; ein mögliches Vorgehen in diesem Fall ist im Abschnitt "Einfache Transmission" in 5.2.1 erläutert.



**Abbildung 4.30:** Linearer Schwächungskoeffizient, gemittelt über das im Strahlengang befindliche Material, aus der Einfachen Transmissionsmessung durch die zentrale Achse eines zylindrischen Objekts.

Für den Fall einer hohen<sup>(20)</sup> Abtastrate  $\Delta_{\text{vertikal}}$  wie im vorliegenden Beispiel können aus der Verteilung  $\bar{\mu}(E, z)$  zusammenhängende Bereiche ermittelt werden. Ein Bereich gilt dabei als zusammenhängend, wenn für die Schwächungskoeffizienten zu allen vertikalen Messpositionen  $i$  und  $(i + 1)$  innerhalb des Bereiches gilt:

$$\left\{ \bar{\mu}_i - \Delta\bar{\mu}_i < \bar{\mu}_{i+1} + \Delta\bar{\mu}_{i+1} \leq \bar{\mu}_i + \Delta\bar{\mu}_i \right\} \wedge$$

$$\left\{ \bar{\mu}_i - \Delta\bar{\mu}_i < \bar{\mu}_{i+1} - \Delta\bar{\mu}_{i+1} \leq \bar{\mu}_i + \Delta\bar{\mu}_i \right\}$$

Die Messpositionen, die jeweils einem zusammenhängenden Bereich angehören, und die dazugehörigen Informationen werden in einem gemeinsamen Parametersatz analog dem allgemein verwendeten Parametersatz für Zylinder zusammengefasst, wobei Folgendes gilt:

$$z_1 = i \quad \text{und} \quad z_2 = i + z \quad \text{mit:} \quad \Delta z_1 = \Delta z_2 = w \cdot \Delta_{\text{vertikal}}$$

$$\mu = \frac{1}{(z + 1)} \cdot \sum_{h=z_1}^{z_2} \bar{\mu}_h \quad \text{mit:} \quad \Delta\mu = \frac{1}{(z + 1)} \cdot \sqrt{\sum_{h=z_1}^{z_2} (\Delta\bar{\mu}_h)^2}$$

---

<sup>(20)</sup>Der Abstand zweier nebeneinander liegender vertikaler Messpositionen muss wenigstens im Bereich des Öffnungskegels des Detektorkollimators liegen.



# Kapitel 5

## Bestimmung der Aktivität

### 5.1 Prinzipielles Vorgehen

In diesem Kapitel wird ausführlich dargestellt, wie mit den Ergebnissen der Analyse von Messergebnissen (siehe Kapitel 4) weiter verfahren wird, wie daraus virtuelle Objekte, die das Untersuchungsobjekt darstellen, zusammengestellt werden und auf dieser Grundlage die Gesamtaktivität im Untersuchungsobjekt ermittelt wird. Der gesamte Ablauf der Auswertung ist in Abschnitt 3.5 erläutert und schematisch in Abb. 3.3 gezeigt. Im Folgenden wird kurz auf das Prinzip der Objekterzeugung eingegangen, bevor ausführlich die Aktivitätsbestimmung erläutert und dann deren Anwendung an zwei Beispielen demonstriert wird.

#### 5.1.1 Objekterzeugung

Alle weiteren Erläuterungen setzen voraus, dass für ein Untersuchungsobjekt zumindest eine segmentierte Gamma-Scan-Messung (SGS-Messung) vorliegt.

Bei der Frage, welche Aktivität in einem zu untersuchenden Objekt enthalten ist, wird im Rahmen des neuen Auswertemodells erst die Frage, wie das Untersuchungsobjekt aufgebaut sein kann, gestellt und versucht diese zu beantworten. Die Unvollständigkeit der zur Verfügung stehenden Informationen über das Untersuchungsobjekt und seinen Inhalt ist dafür verantwortlich, dass in der Regel keine eindeutige Lösung gefunden werden kann. Vielmehr wird man eine Reihe von möglichen Objektzusammensetzungen erstellen können, die alle mit den vorliegenden Informationen verträglich sind und somit prinzipiell vorliegen könnten. Diese so genannten virtuellen Untersuchungsobjekte sind aus einem Hauptobjekt sowie aus weiteren einzelnen Objekten, die den Inhalt des Messobjekts wiedergeben sollen, zusammengesetzt. Zur Beschreibung des Hauptobjekts ist das Wissen über seine Geometrie notwendig. Seine äußeren Abmessungen stehen in jedem Fall zur Verfügung, da sie z. B. durch einfaches Abmessen gewonnen werden

können.<sup>(1)</sup> Die Herausforderung besteht darin, den Inhalt des untersuchten Objekts so darzustellen, dass das virtuelle Untersuchungsobjekt ein Modell darstellt, mit dem die Wirklichkeit, die durch die vorliegenden Messergebnisse repräsentiert wird, hinreichend gut beschrieben werden kann. Dazu werden Körper einfacher geometrischer Formen wie Kugeln, Zylinder etc. in das Hauptobjekt eingesetzt. Jedem einzelnen Körper, der einen bestimmten Bereich im Messobjekt darstellt, können bestimmte "Eigenschaften", wie geometrische Daten (Abmessungen und Lage im Raum), Materialeigenschaften und Informationen über enthaltene Radionuklide zugeordnet werden. Die einzelnen Körper werden auf der Basis der Parametersätze, die aus den vorliegenden Messdaten gewonnen wurden (siehe Kapitel 4), erzeugt. Allerdings sind nicht immer alle zur Beschreibung eines Körpers notwendigen Parameter (exakt) verfügbar. Die Bandbreite der einzelnen Parameter, die sich aus der Unvollständigkeit der zur Verfügung stehenden Information ergibt, ist verantwortlich für die Fülle von möglichen Objektaufbauten, mit denen das tatsächliche Untersuchungsobjekt dargestellt werden kann.

### 5.1.2 Aktivitätsbestimmung

Im Folgenden wird beschrieben, wie die Aktivität einzelner Körper und damit die Gesamtaktivität im Untersuchungsobjekt bestimmt wird. Die Aktivitätsbestimmung muss für jedes identifizierte Radionuklid bzw. für jede identifizierte Energielinie separat durchgeführt werden.

Für jeden aktivitätstragenden Körper im virtuellen Untersuchungsobjekt wird durch Simulation ermittelt, welche Zählratenverteilung ein in ihm enthaltenes Radionuklid verursachen würde, wenn sich der betrachtete Körper alleine im Untersuchungsobjekt befinden würde und er eine Aktivität  $A$  enthält. Dabei wird das Wissen über die Verteilung der inaktiven Matrix bzw. die Eigenschaften der inaktiven Matrix für das gesamte Objekt eingesetzt. Die Messparameter, die für die Simulation verwendet werden, entsprechen dabei denen der real durchgeführten SGS-Messung am Untersuchungsobjekt, d. h. es wird die selbe Messzeit pro Messposition sowie die selbe Anzahl an Höhen- und Winkelpositionen eingesetzt, und für jede Messposition der individuelle Beitrag jedes aktivitätstragenden Körpers ermittelt. Die Simulation der Impulse an einer Messposition eines Objekts beruht grundsätzlich auf den folgenden drei Schritten. Für eine genauere Beschreibung sei auf [15] verwiesen.

---

<sup>(1)</sup>Die weiteren Ausführungen beschränken sich auf zylindrische Hauptobjekte, die in der Routine der radioaktiven Abfallcharakterisierung am Häufigsten vorkommen; andere Geometrien wie z. B. Quader können gegebenenfalls in gleicher Weise behandelt werden.

1. Auf der Basis von Kalibrationsmessungen mit radioaktiven Punktquellen oder von MCNP-Rechnungen wird das Effizienzfeld für das jeweils verwendete Detektorsystem abhängig von der Energie sowie der Raumrichtung der in den (kollimierten) Detektor eintreffenden Photonen berechnet.
2. In einem aktivitätstragenden Objekt werden statistisch verteilt Startpunkte für Photonen gesetzt, deren Schwächung beim Durchgang durch die sie umgebende Materie bis zur Detektorposition berechnet wird. Als Ergebnis ergibt sich die resultierende Photonverteilung außerhalb des Objekts.
3. Die Verknüpfung von Effizienzfeld und Photonverteilung ergibt die simulierte Verteilung der Impulse.

Die Punkte 2 und 3 sind für jede Messposition  $p$  neu durchzuführen. Als Ergebnis erhält man für jeden einzelnen der insgesamt  $k$  im virtuellen Untersuchungsobjekt verteilten Körper die für eine Energielinie eines betrachteten Radionuklids simulierte Impulsverteilung  $I'_\lambda$  ( $\lambda = 1, 2, \dots, k$ ); teilt man für jede Messposition die Impulszahl  $I'_{\lambda,p}$  durch die Messzeit pro Messposition  $p$ , so erhält man insgesamt die simulierte Zählratenverteilung  $Z'_\lambda$ , die in Gl. 5.1 in Vektorschreibweise dargestellt ist.

$$\vec{Z}'_\lambda = \{Z'_{\lambda,p}\} = \begin{pmatrix} Z'_{\lambda,1} \\ Z'_{\lambda,2} \\ \vdots \\ Z'_{\lambda,p} \\ \vdots \\ Z'_{\lambda,N \times M} \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

wobei:

$\{Z'_{\lambda,p}\}$ : einzelne Komponenten der simulierten Zählratenverteilung in Vektorschreibweise verursacht durch den Körper  $\lambda$  an der Messposition  $p$

$p$ : Messposition; ist im Allgemeinen durch die gemessenen Höhen- und Winkelpositionen gegeben

$N$ : Anzahl der gemessenen Höhenpositionen (allgemein: vertikale Messpositionen)

$M$ : Anzahl der gemessenen Winkelpositionen (allgemein: horizontale Messpositionen)

Durch Addition der einzelnen Beiträge aller  $k$  virtuellen Körper ergibt sich für jede Messposition  $p$  die simulierte Gesamtzählrate  $Z'_p$  für das gesamte Untersuchungsobjekt gemäß Gl. 5.2.

$$Z'_p = \sum_{\lambda=1}^k Z'_{\lambda,p} \cdot \frac{A_\lambda}{A'_\lambda} \quad (5.2)$$

wobei:

$Z'_p$ : simulierte Gesamtzählrate an der Messposition  $p$  verursacht durch alle  $k$  virtuellen Körper

$Z'_{\lambda,p}$ : simulierte Zählrate an der Messposition  $p$  verursacht durch den einen virtuellen Körper  $\lambda$

$k$ : Anzahl der im virtuellen Untersuchungsobjekt verteilten Körper

$A_\lambda$ : Aktivität, die der Körper  $\lambda$  haben müsste, wenn er in der in die Simulation eingesetzten Geometrie vorliegen würde und zusammen mit allen anderen Körpern insgesamt die gemessene Zählratenverteilung  $Z$  des Untersuchungsobjekt ergeben sollte

$A'_\lambda$ : in die Simulation eingesetzte beliebige Aktivität des Körpers  $\lambda$

Um die unbekanntenen Aktivitäten  $A_\lambda$  zu bestimmen, wird die Gültigkeit folgender Bedingung gefordert: Die simulierte Gesamtzählrate  $Z'_p$  muss für jede Messposition  $p$  der gemessenen Zählrate  $Z_p$  entsprechen:

$$Z'_p \equiv Z_p \quad (5.3)$$

Damit kann für die Zählratenverteilung für das gesamte Untersuchungsobjekt folgendes lineares Gleichungssystem aufgestellt werden:

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z'_{1,1} \cdot \frac{A_1}{A'_1} + \dots + Z'_{\lambda,1} \cdot \frac{A_\lambda}{A'_\lambda} + \dots + Z'_{k,1} \cdot \frac{A_k}{A'_k} \\ &\vdots \\ Z_p &= Z'_{1,p} \cdot \frac{A_1}{A'_1} + \dots + Z'_{\lambda,p} \cdot \frac{A_\lambda}{A'_\lambda} + \dots + Z'_{k,p} \cdot \frac{A_k}{A'_k} \\ &\vdots \\ Z_{N \times M} &= Z'_{1,N \times M} \cdot \frac{A_1}{A'_1} + \dots + Z'_{\lambda,N \times M} \cdot \frac{A_\lambda}{A'_\lambda} + \dots + Z'_{k,N \times M} \cdot \frac{A_k}{A'_k} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Mit Anwendung der Matrixschreibweise vereinfacht sich Gl. 5.4 zu Gl. 5.5:

$$\vec{Z} = \hat{Z}' \cdot \vec{a} \quad (5.5)$$

mit:

$$\vec{Z} = \{Z_p\} = \begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_p \\ \vdots \\ Z_{N \times M} \end{pmatrix} \quad \text{und}$$

$$\hat{Z}' = \{\vec{Z}'_1, \dots, \vec{Z}'_\lambda, \dots, \vec{Z}'_k\} = \begin{pmatrix} Z'_{1,1} & \cdots & Z'_{\lambda,1} & \cdots & Z'_{k,1} \\ Z'_{1,2} & & Z'_{\lambda,2} & & Z'_{k,2} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z'_{1,p} & \cdots & Z'_{\lambda,p} & \cdots & Z'_{k,p} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z'_{1,N \times M} & \cdots & Z'_{\lambda,N \times M} & \cdots & Z'_{k,N \times M} \end{pmatrix} \quad \text{und}$$

$$\vec{a} = \left\{ \frac{A_\lambda}{A'_\lambda} \right\} = \begin{pmatrix} \frac{A_1}{A'_1} \\ \vdots \\ \frac{A_\lambda}{A'_\lambda} \\ \vdots \\ \frac{A_k}{A'_k} \end{pmatrix}$$

wobei:

$\{Z_p\}$ : einzelne Komponenten der gemessenen Zählratenverteilung für das gesamte Messobjekt in Vektorschreibweise (analog zu Gl. 5.1)

$\{\vec{Z}'_1, \dots, \vec{Z}'_\lambda, \dots, \vec{Z}'_k\}$ : Vektoren der simulierten Zählratenverteilungen der einzelnen Körper zusammengefasst in einer Matrix

$\{A_\lambda/A'_\lambda\}$ : einzelne Komponenten der Aktivitätsverhältnisse in Vektorschreibweise

Es gilt, das Gleichungssystem (Gl. 5.5) nach dem Vektor  $\vec{a}$  gemäß Gl. 5.6 aufzulösen.

$$\vec{a} = \left(\hat{Z}'\right)^{-1} \cdot \vec{Z} \quad (5.6)$$

Ist eine Lösung für das Verhältnis der Aktivitäten gefunden, so können mit den in die Simulation eingesetzten  $A'_\lambda$  die unbekanntes Aktivitäten  $A_\lambda$  ermittelt werden.

Das lineare Gleichungssystem aus Gl. 5.5 kann gemäß Gl. 5.6 nur dann exakt gelöst werden, wenn die inverse Matrix  $\hat{Z}'^{-1}$  existiert. Das ist allerdings nur der Fall, wenn das Gleichungssystem exakt bestimmt ist, d. h. genauso viele linear voneinander unabhängige Gleichungen wie zu bestimmende Parameter vorliegen ( $k = N \cdot M$ ). Die Anzahl

der Gleichungen ist durch die Anzahl der Messpositionen in der Messung wie auch in der jeweiligen Simulation für jeden einzelnen Körper gegeben und die Anzahl der zu bestimmenden Parameter durch die Anzahl der einzelnen aktivitätstragenden Körper im virtuellen Untersuchungsobjekt. In diesem Fall gibt es genau eine Lösung für das lineare Gleichungssystem, die nach Gl. 5.6 ermittelt werden kann. In der überwiegenden Anzahl der praktischen Fälle wird allerdings ein überbestimmtes Gleichungssystem ( $k < N \cdot M$ ) vorliegen: Die Anzahl  $k$  der virtuellen Körper, deren Aktivitäten durch Lösung des Gleichungssystem bestimmt werden sollen, ist geringer als die zur Verfügung stehenden Gleichungen, d. h. die Anzahl der Messpositionen. Im Allgemeinen gibt es für diesen Fall keine eindeutige Lösung. Mit der Singulärwertzerlegung (SVD<sup>(2)</sup>[23]) kann eine Näherungslösung, die am Besten alle Gleichungen gleichzeitig erfüllt, gefunden werden. Das Auffinden der eindeutigen Lösung für den Fall des exakt bestimmten Gleichungssystems wird als Spezialfall der Lösungsmöglichkeit für ein überbestimmtes System mit behandelt, da dieser Fall in der Praxis nur sehr selten vorkommt. Auf den theoretisch ebenso möglichen Fall eines unterbestimmten Gleichungssystems ( $k > N \cdot M$ ) muss nicht weiter eingegangen werden, weil er für die Praxis nicht relevant ist. Durch Auswertung von Messergebnissen können nicht mehr Parametersätze (und damit virtuelle Körper) erzeugt werden, wie einzelne Messpositionen vorliegen. Die Methode der Singulärwertzerlegung ist in Anhang D beschrieben.

Die Gesamtaktivität  $A_{\text{ges}}$  eines Radionuklids im Untersuchungsobjekt ergibt sich durch Summation der Aktivitäten aller einzelnen Körper, die das betreffende Radionuklid beinhalten.

$$A_{\text{ges}} = \sum_{\lambda=1}^k A_{\lambda} \quad (5.7)$$

### 5.1.3 Auswahl über Güteparameter

Das Ergebnis der Aktivitätsbestimmung für eine Objektzusammensetzung ist zum einen die jeweilige Gesamtaktivität der einzelnen Radionuklide in diesem Objekt und zum anderen die jeweilige Zählratenverteilung, die ein einzelnes Radionuklid aufgrund seiner räumlichen Verteilung im Untersuchungsobjekt verursacht. Der Vergleich dieser durch Simulation gewonnenen Zählratenverteilung eines Radionuklids mit der entsprechenden gemessenen Zählratenverteilung ermöglicht eine Bewertung des der Simulation zugrunde gelegten Objektaufbaus, der aufgrund der vorliegenden Informationen als theoretisch möglich gewertet wurde. Für die Beurteilung der Übereinstimmung wird das Verhältnis  $\vec{V}$  aus simulierter ( $Z'_p$ ) und gemessener Zählratenverteilung ( $Z_p$ ) heran-

---

<sup>(2)</sup>SVD – singular value decomposition

gezogen, das sich in Vektorschreibweise gemäß Gl. 5.8 darstellen läßt.

$$\vec{V} = \left\{ V_p \right\} = \left\{ \frac{Z'_p}{Z_p} \right\} \quad (5.8)$$

Ein Modell für den Aufbau des vorliegenden Untersuchungsobjekts wird als eine potentielle Möglichkeit der Objektzusammensetzung bewertet, d. h. als eine Variante, die mit den vorliegenden Informationen verträglich ist, wenn das Verhältnis  $V_p$  für jede Höhenposition  $p$  folgender Bedingung (Gl. 5.9) genügt:

$$(1 - n \cdot \delta V_p) \leq V_p \leq (1 + n \cdot \delta V_p) \quad (5.9)$$

wobei:

$n$ : von der gemessenen Zählrate abhängiger Faktor

$\delta V_p$ : nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung berechneter Toleranzbereich zu  $V_p$

Ist die Bedingung nicht erfüllt, ist also die Abweichung zwischen simulierter und gemessener Zählratenverteilung zu groß, so wird dieses Modell für die Objektzusammensetzung verworfen. Aus allen akzeptierten Aktivitätswerten kann ein durch einen minimalen Wert  $A_{\min}$  und einen maximalen Wert  $A_{\max}$  beschränktes Aktivitätsintervall bestimmt werden, das den Vertrauensbereich festlegt. Da keines der akzeptierten Modelle bevorzugt wird, wird als Erwartungswert der Aktivität für das Untersuchungsobjekt der Mittelwert aller Aktivitätswerte berechnet.

## 5.2 Praktische Vorgehensweise

Anhand von zwei Beispielen, die die unterschiedlichen Möglichkeiten der Verteilung (homogen und heterogen) von Radionukliden in einem Untersuchungsobjekt repräsentieren, wird im Folgenden die Vorgehensweise bei der Objekterzeugung sowie der Aktivitätsbestimmung im Detail erläutert sowie die daraus resultierenden Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

### 5.2.1 Vorgehen bei homogener Aktivitätsverteilung

Gegeben sei das Ergebnis<sup>(3)</sup> eines Vielfachscheiben-Scans an einem zylindrischen Objekt (siehe Abb. 5.1), die Oberflächenzählratenverteilungen für Energielinien der Nuklide  $^{241}\text{Am}$  (59,5 keV) und  $^{152}\text{Eu}$  (1408,0 keV) wie in Abb. 5.2 graphisch dargestellt.

---

<sup>(3)</sup>Der Vielfachscheiben-Scan mit einem kollimierten Germanium-Detektorsystem wurde hier nur fiktiv durchgeführt. Für die Simulation der virtuellen Untersuchungsobjekte wird immer das selbe durch Simulation erzeugte Detektorsystem verwendet. Damit wird der Effekt beim Vergleich von gemessenen mit simulierten Messergebnissen, den ein nicht exakt bekanntes Detektorsystem hat, eliminiert.

Die Messparameter der durchgeführten SGS-Messungen sind in Tab. 5.1 und die zur Verfügung stehenden Informationen über das Untersuchungsobjekt in Tab. 5.2 zusammengestellt.

**Tabelle 5.1:** Messparameter des Vielfachscheiben-Scans.

Parameter	Wert
Anzahl Höhenpositionen	11
Anzahl Winkelpositionen	24
Messzeit pro Messposition	43 s
Startposition (vertikal)	0 mm
Stopposition (vertikal)	370 mm
$\Delta h$ (vertikal)	37 mm

**Tabelle 5.2:** Zur Verfügung stehende Informationen über das Untersuchungsobjekt. Zur Erläuterung der Größen sei auf die schematische Skizze des Untersuchungsobjekts in Abb. 5.1 hingewiesen.

Parameter	Wert
Außendurchmesser	306 mm
Innendurchmesser	302 mm
Höhe	370 mm
Stärke des Deckels	5 mm
Stärke des Bodens	5 mm
Gesamtmasse des Objekts	29 kg
Leermasse des Objekts	4,7 kg

Die Auswertung des vorliegenden Vielfachscheiben-Scans für die Energien 59,5 keV sowie 1408,0 keV gemäß der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Methode liefert für jedes der beiden identifizierten Radionuklide  $^{241}\text{Am}$  und  $^{152}\text{Eu}$  je zehn Parametersätze für Zylinder, die jeweils im Untersuchungsobjekt Bereiche darstellen, für die außerhalb des Objekts eine homogene Zählratenverteilung des entsprechenden Radionuklids gemessen wurde.

Im Weiteren wird schrittweise gezeigt, auf welche Weise jeweils das Aktivitätsintervall einzelner identifizierter Radionuklide abhängig von ihrer möglichen räumlichen Verteilung sowie der Verteilung der inaktiven Matrix im Untersuchungsobjekt ermittelt werden kann. Abhängig von den vorliegenden Informationen werden dazu verschiedene Wege eingeschlagen, die in den nächsten Abschnitten beschrieben werden.

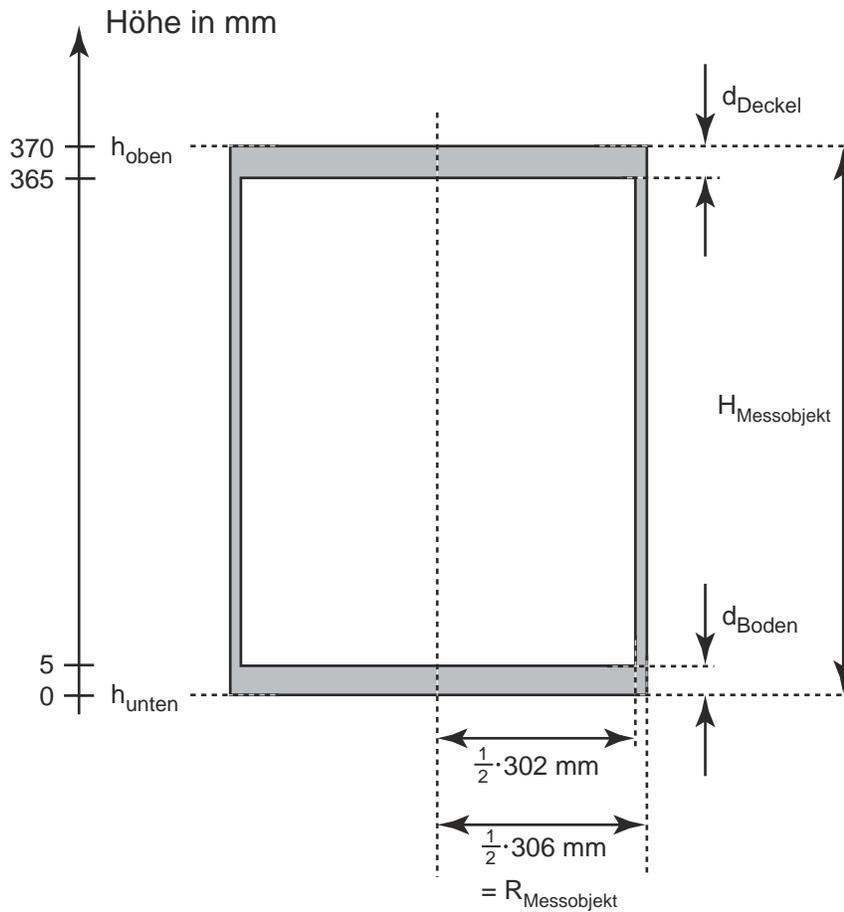


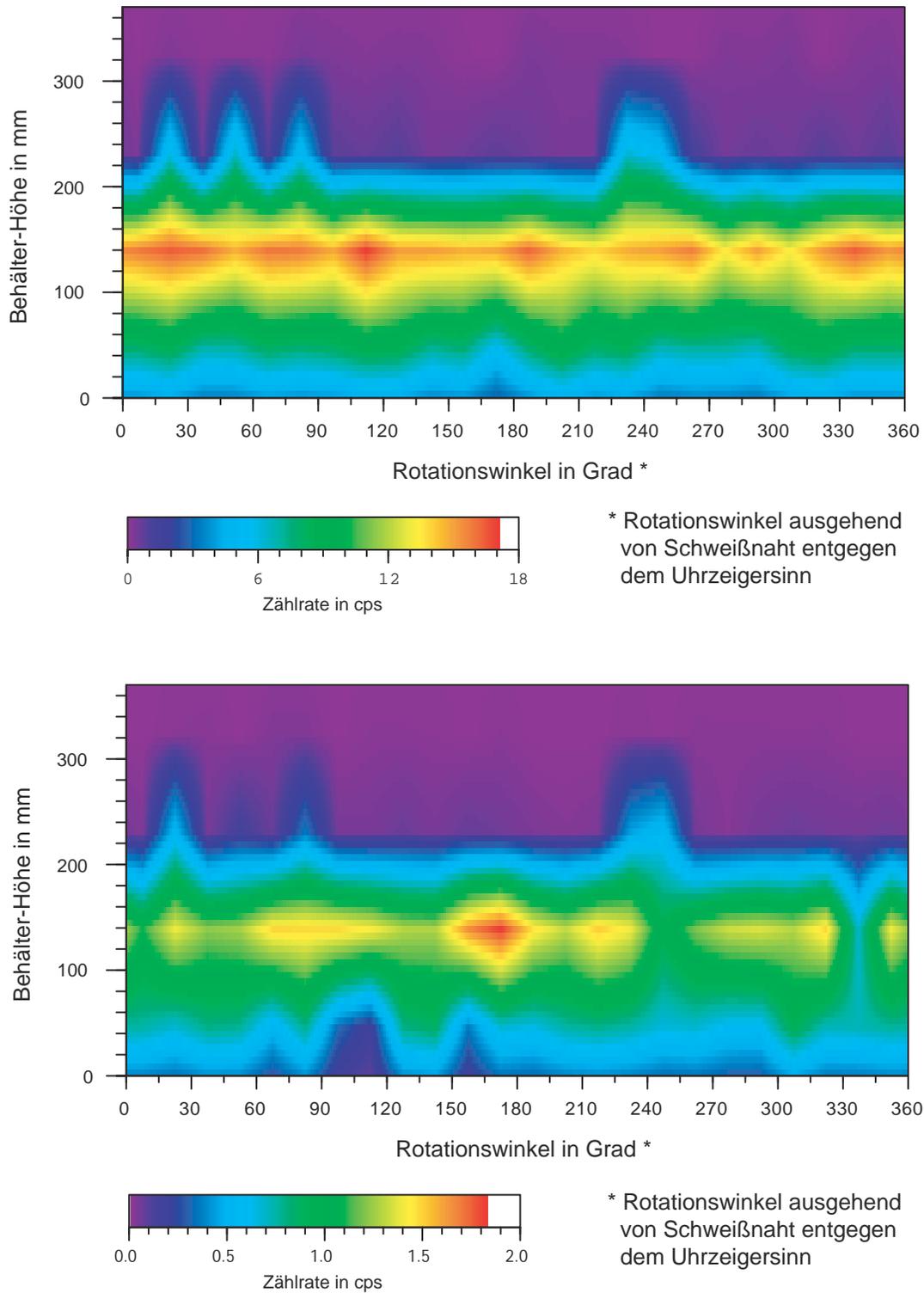
Abbildung 5.1: Schematische Skizze des Untersuchungsobjekts.

### Information aus Wägung

Die folgende Analyse wird unter der Voraussetzung durchgeführt, dass zur Charakterisierung der Matrix im Untersuchungsobjekt nur das Ergebnis einer einfachen Wägung ( $m_{\text{brutto}}$ ), aber keine weiteren Informationen insbesondere aus Transmissionsmessungen, vorliegen.

#### 0. Aufbau des Hauptobjekts

Aus den vorhandenen Informationen über das Messobjekt (siehe dazu Tab. 5.2) wird das Hauptobjekt (der Behälter), welches alle weiteren Objekte enthält, aufgebaut. Im vorliegenden Fall handelt es sich um einen einfachen regelmäßigen Zylinder aus Aluminium.



**Abbildung 5.2:** Oberflächenzählratenverteilungen von  $^{241}\text{Am}$  für die Energielinie 59,5keV (oben) und von  $^{152}\text{Eu}$  für die Energielinie 1408,0keV (unten); zwischen den jeweiligen Messwerten wurde linear interpoliert.

### 1. Befüllung mit inaktiver Matrix

Ohne zusätzliche Informationen über die Verteilung der inaktiven Matrix im Untersuchungsobjekt kann zwischen den theoretisch unendlich vielen möglichen Varianten nicht unterschieden werden; deswegen wird für den ersten Schritt der Analyse angenommen, dass die inaktive Matrix homogen im gesamten Untersuchungsobjekt verteilt ist. Mit dem Ergebnis einer Wägung des gesamten Untersuchungsobjekts ( $m_{\text{brutto}}$ ) sowie den Behälterdaten kann gemäß Gl. 5.10 eine mittlere Dichte  $\rho_{\text{Matrix}}$  für die inaktive Matrix berechnet werden, die der Bedingung aus Gl. 5.11 genügen muss.

$$\rho_{\text{Matrix}} = \frac{m_{\text{Matrix}}}{V_{\text{Matrix}}} = \frac{m_{\text{brutto}} - m_{\text{leer}}}{V_{\text{Matrix}}} \quad (5.10)$$

$$\rho_{\text{Matrix}} \in [\rho_{\text{min}}; \rho_{\text{max}}] = [0 \text{ g/cm}^3; 19,4 \text{ g/cm}^3] \quad (5.11)$$

Die obere Grenze für die Dichte  $\rho_{\text{max}}$  entspricht der Dichte von Wolfram<sup>(4)</sup>[9]. In der Praxis treten für gewöhnliche radioaktive Abfälle maximale Dichtewerte von etwa  $3 \text{ g/cm}^3$  auf. In die Berechnung der Matrixmasse und ihres Volumens geht die Füllhöhe der Matrix sowie Abmessungen des Untersuchungsobjekts ein. Die maximal mögliche Füllhöhe der Matrix  $h_{\text{Matrix,max}}$  ist durch die innere Behälterhöhe gemäß Gl. 5.12 gegeben; damit wird der kleinste mögliche Dichtewert  $\rho_{\text{Matrix,min}}$  bei homogener Verteilung der inaktiven Matrix erreicht. Liegen Abmessungen des Untersuchungsobjekts (z. B.  $d_{\text{Deckel}}$  oder  $d_{\text{Boden}}$ ) nicht vor, so werden dafür Annahmen unterstellt, die später weiter angepasst werden können.

$$h_{\text{Matrix,max}} = \left( H_{\text{Messobjekt}} - d_{\text{Deckel}} - d_{\text{Boden}} \right) \quad (5.12)$$

Anhand des so berechneten Werts für die Dichte der Matrix wird das Material und somit der lineare Schwächungskoeffizient der inaktiven Matrix bestimmt.<sup>(5)</sup>

### 2. Aufbau der Objekte

Um die Verteilung von Radionukliden im Untersuchungsobjekt zu erzeugen, wird das vollständig mit einer homogenen Matrix der mittleren Dichte gemäß Gl. 5.10 gefüllte Untersuchungsobjekt mit einzelnen Körpern gefüllt. Diese werden im Falle der homogenen Aktivitätsverteilung jeweils durch einen Parametersatz für Zylinder (gemäß

---

<sup>(4)</sup>Dieses Material wird neben Blei und abgereichertem Uran zur Abschirmung von radioaktiven Stoffen verwendet.

<sup>(5)</sup>Der Einfachheit halber wird für das Beispiel nur jeweils die Dichte und somit der lineare Schwächungskoeffizient variiert, nicht aber das Material selbst.

Gl. 4.17) beschrieben.

$$\text{PS}_{\text{Zylinder}} = \left\{ E; \min(z_1), \max(z_1); \min(z_2), \max(z_2); \right. \\ \left. \min(R_{\text{innen}}), \max(R_{\text{innen}}); \min(R_{\text{ausssen}}), \max(R_{\text{ausssen}}) \right\}$$

Für jeden einzelnen Körper, der eine Aktivitätsverteilung in der Höhe  $i$  repräsentiert, wird dabei die maximale Ausdehnung, die durch die Angaben im Parametersatz erlaubt ist, angenommen, also:

$$\begin{aligned} z_1 &= \min(z_1) &= & HP(i) - 0,5 \cdot \Delta_{\text{vertikal}} \\ z_2 &= \max(z_2) &= & HP(i) + 0,5 \cdot \Delta_{\text{vertikal}} \\ R_{\text{ausssen}} &= \max(R_{\text{ausssen}}) &= & R_{\text{Messobjekt}} - d_{\text{Wand}} \\ R_{\text{innen}} &= \min(R_{\text{innen}}) &= & 0 \end{aligned}$$

mit den generellen Einschränkungen:

$$z_1 \geq h_{\text{unten}} \quad \text{und} \quad z_2 \leq h_{\text{oben}}$$

wobei:

$z_1$  bzw.  $z_2$ : Höhenposition der Unter- bzw. Oberkante des einzelnen Körpers

$h_{\text{unten}}$  bzw.  $h_{\text{oben}}$ : Höhenposition der Unter- bzw. Oberkante des Untersuchungsobjekts

$HP(i)$ : Höhenposition des Detektors während der Messung der Höhe Nummer  $i$

$\Delta_{\text{vertikal}}$ : Höhenunterschied zwischen zwei Messpositionen in vertikaler Richtung (vertikale Abtastrate)

$R_{\text{Messobjekt}}$ : Radius des Untersuchungsobjekts

Das Material jedes Körpers wird jeweils dem Material der inaktiven Matrix, die ihn umgibt, gleichgesetzt.

Die Anzahl  $J$  der verschiedenen, theoretisch möglichen Objektzusammensetzungen ergibt sich aus den unterschiedlichen Kombinationen der einzelnen aktivitätstragenden Körper und berechnet sich gemäß Gl. 5.13:

$$J = \sum_{j=1}^k \frac{k!}{j! (k-j)!} \quad (5.13)$$

wobei:

$k$ : Anzahl der aktivitätstragenden Körper

Die hier im Beispiel vorliegenden zehn Körper<sup>(6)</sup> für jedes der beiden Radionuklide

---

<sup>(6)</sup>Die Auswertung des Vielfachscheiben-Scans liefert für jedes der beiden identifizierten Radionuklide  $^{241}\text{Am}$  und  $^{152}\text{Eu}$  je zehn Parametersätze für Zylinder, die jeweils im Untersuchungsobjekt Bereiche darstellen, für die außerhalb des Objekts eine homogene Zählratenverteilung des entsprechenden Nuklids gemessen wurde.

können insgesamt auf 1023 verschiedene Arten kombiniert werden, die jede einzeln eine theoretisch mögliche Objektzusammensetzung darstellt. Diese verschiedenen Objektzusammensetzungen unterscheiden sich nur in der Verteilung der Radionuklide innerhalb des vollständig mit inaktiver Matrix befüllten Untersuchungsobjekts.

### *3. Simulation der Zählratenverteilung*

Für jedes einzelne dieser theoretisch möglichen Modelle des Untersuchungsobjekt, das für das vorliegende Beispiel einen bis zu insgesamt zehn aktivitätstragende Körper beinhalten kann, wird die Gesamtzählratenverteilung ermittelt, die sich unter den selben Messbedingungen wie im wirklichen Vielfachscheiben-Scan vorlagen, ergibt. Es sei erwähnt, dass dazu für jeden einzelnen vorliegenden Körper nur einmal durch Simulation die Zählratenverteilung ermittelt wird, die dieser Körper alleine im Untersuchungsobjekt (in einem vollständig mit inaktiver Matrix befülltem Objekt) verursachen würde. Die Gesamtzählrate für die unterschiedlichen Möglichkeiten, diese maximal  $k$  Körper zu einem Objekt zusammenzusetzen, wird ermittelt, indem jeweils nur die entsprechenden Zählratenverteilungen der im Modell vorkommenden Körper in das lineare Gleichungssystem (siehe Gl. 5.5) eingesetzt werden.

### *4. Vergleich von simulierten und gemessenen Zählratenverteilungen*

Jede durch Simulation erzeugte Zählratenverteilung wird mit der entsprechenden gemessenen Verteilung verglichen; dazu wird für jede Messposition  $p$  die Bedingung nach Gl. 5.9 für das Verhältnis  $V_p$  aus simulierter und gemessener Zählratenverteilung überprüft. Im vorliegenden Beispiel wird damit die Zahl der theoretisch möglichen 1023 Modelle auf 18 (für  $^{241}\text{Am}$  mit  $n=4$ ) bzw. 45 (für  $^{152}\text{Eu}$  mit  $n=1$ ) potentiell mögliche Grundmodelle reduziert.

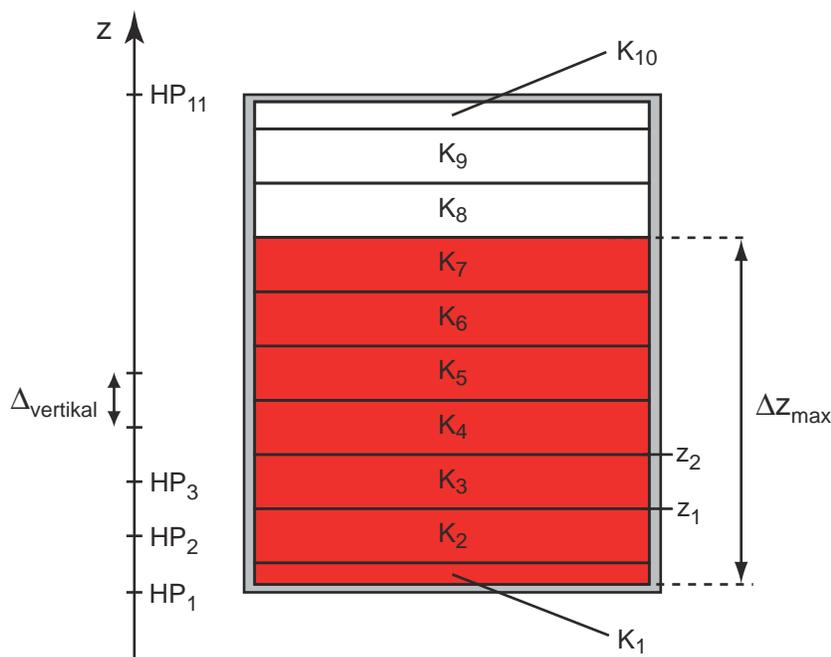
Beispielhaft wird anhand eines Grundmodells, in dem die Radionuklide in einer zusammenhängenden Schicht verteilt sind (siehe dazu die schematische Skizze in Abb. 5.3) schrittweise aufgezeigt, wie das Aktivitätsintervall für die Radionuklide  $^{241}\text{Am}$  und  $^{152}\text{Eu}$  ermittelt wird. Für alle anderen Grundmodelle ist analog zu verfahren.

### *5. Variation der vertikalen Ausdehnung*

Die vertikale Ausdehnung eines jeden aktivitätstragenden Körpers wird unter Beibehaltung zusammenhängender Aktivitätsschichten so lange reduziert<sup>(7)</sup>, bis für die durch

---

<sup>(7)</sup>Die Schrittgröße bei der Reduzierung ist stark abhängig von der Gesamthöhe des Untersuchungsobjekts, der Abstände übereinanderliegender Detektormesspositionen (vertikale Abtastrate), der Kollimatoröffnung und der zur Verfügung stehenden Rechenzeit.



**Abbildung 5.3:** Schematische Darstellung eines möglichen Grundmodells, in dem die Radionuklide in einer zusammenhängenden Schicht verteilt sind.  $HP_i$  sind die Höhenpositionen des Detektors während der Messung der einzelnen Höhen  $i$ .

In diesem Modell sind die Körper  $K_1$  bis  $K_7$  mit Aktivität besetzt (rot markiert), die Körper  $K_8$  bis  $K_{10}$  nicht. Mit der maximalen Ausdehnung der Körper, die durch die Angaben im Parametersatz gegeben sind, ist die maximale Ausdehnung  $\Delta z_{\max}$  der Aktivitätsschicht festgelegt; die inaktive Matrix ist homogen im ganzen Untersuchungsobjekt verteilt.

Simulation erzeugte Zählratenverteilung die Bedingung unter Gl. 5.9 nicht mehr erfüllt ist. Das demnach zuletzt akzeptierte Modell für die Verteilung der Radionuklide stellt die minimale vertikale Ausdehnung  $\Delta z_{\min}$  der Aktivitätsschicht dar, die noch mit der gemessenen Zählratenverteilung verträglich ist. Die maximale vertikale Ausdehnung  $\Delta z_{\max}$  der Aktivitätsschicht ist durch die Ausdehnung der aktivitätstragenden Körper im Grundmodell gegeben.

Für das hier behandelte Grundmodell können nur die Höhenabmessungen der Körper  $K_1$  und  $K_7$ , die die Aktivitätsschicht nach unten sowie nach oben hin begrenzen, reduziert werden. Eine Halbierung der maximalen Ausdehnung des oberen Körpers ( $K_7$ ) ergibt dabei ein akzeptiertes Modell für die Verteilung der Radionuklide im Untersuchungsobjekt, die im Weiteren als die minimale vertikale Ausdehnung  $\Delta z_{\min}$  der Aktivitätsschicht für dieses Grundmodell betrachtet wird. Der in seiner vertikalen Ausdehnung reduzierte Körper  $K_7$  wird im Weiteren mit  $K_{7\text{reduz}}$  bezeichnet.

### 6. Variation einer homogenen inaktiven Matrix

Mit der minimal möglichen vertikalen Ausdehnung des Körpers, der die Aktivitätsschicht nach oben hin begrenzt, ergibt sich eine Höhe  $h_{\text{Matrix,min}}$ , bis zu der die inaktive Matrix mindestens gefüllt sein muss, wenn unterstellt wird, dass sich Aktivität nur dort befinden kann, wo auch Material vorhanden ist.<sup>(8)</sup> Mit dem Wert  $h_{\text{Matrix,min}}$  kann ein minimales Volumen für die inaktive Matrix berechnet werden und damit nach Gl. 5.10 die maximale Dichte  $\rho_{\text{Matrix,max}}$ , die sich für die inaktive Matrix unter der Bedingung der homogenen Verteilung ergeben kann. Die minimale Dichte  $\rho_{\text{Matrix,min}}$  liegt für den Fall der vollständigen Befüllung ( $h_{\text{Matrix,max}}$ ) des Untersuchungsobjekts vor. Alle übrigen möglichen Füllhöhen der Matrix liegen innerhalb des Intervalls  $[h_{\text{Matrix,min}}; h_{\text{Matrix,max}}]$  und ergeben somit auch einen Wert für die Dichte der inaktiven Matrix, der im Intervall  $[\rho_{\text{Matrix,min}}; \rho_{\text{Matrix,max}}]$  liegen muss. Für das hier betrachtete Beispiel liegt die Dichte der inaktiven Matrix aufgrund der beiden extremen Möglichkeiten, die inaktive Matrix im Untersuchungsobjekt homogen zu verteilen, im Intervall  $[1,0 \text{ g/cm}^3; 1,6 \text{ g/cm}^3]$ .

### 7. Variation der radialen Ausdehnung

Um nach außen hin eine homogene Zählratenverteilung zu verursachen, gibt es verschiedene Möglichkeiten, Radionuklide radial zu verteilen; grundsätzlich sind dabei die folgenden unterschiedlichen Fälle denkbar: Stabquelle, Ringquelle und Volumenquelle (siehe dazu Tab. 4.2). Für verschiedene Ausdehnungen dieser drei Variationen wurde jeweils die Gesamtaktivität für beide Radionuklide unter dem Einsatz der tatsächlich vorliegenden Füllhöhe und Dichte der inaktiven Matrix ermittelt. Die Ergebnisse (siehe Abb. 5.4) zeigen, dass gerade bei niedrigen Energien ( $^{241}\text{Am}$ ) die radiale Aktivitätsverteilung den Wert der berechneten Aktivität stark beeinflusst. Für die Ermittlung eines Aktivitätsintervalls ist es in der Regel ausreichend, nur einige Extremfälle, wie die Radionuklide in radialer Richtung verteilt sein können, zu betrachten.

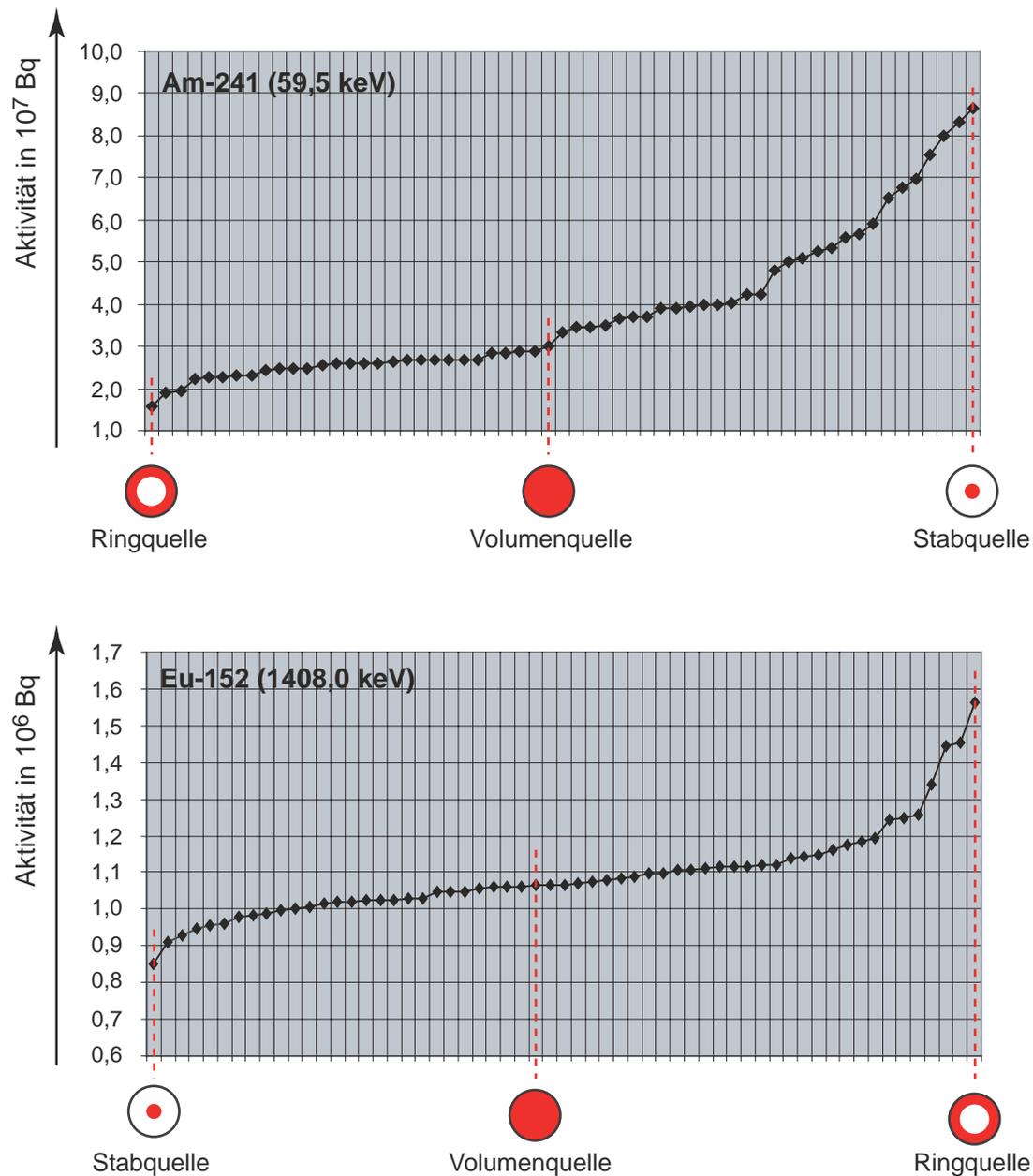
### 8. Aktivitätsintervall

Die potentiell möglichen Modelle für das virtuelle Untersuchungsobjekt, die auf dem jeweils behandelten Grundmodell basieren, ergeben sich aus der Kombination der Überlegungen der Analyseschritte (5.) bis (7.), in denen die jeweils möglichen Bandbreiten für die folgenden Parameter ermittelt wurden:

- Füllhöhe und mittlere Dichte einer homogen verteilten inaktiven Matrix

---

<sup>(8)</sup>Davon abweichende Fälle, die in der Praxis allerdings selten vorkommen, wie z. B. eine gasförmige, radioaktive Substanz, die sich oberhalb der inaktiven Matrix an der Objektwand niederschlägt, können unter Umständen als Sonderfälle berücksichtigt werden.



**Abbildung 5.4:** Berechnete Gesamtaktivität für die Radionuklide  $^{241}\text{Am}$  (oben) und  $^{152}\text{Eu}$  (unten) für verschiedene radiale Verteilungen der Aktivität; die inaktive Matrix ist dabei homogen im gesamten Untersuchungsobjekt verteilt. Es bleibt hier unberücksichtigt, ob das jeweilige Modell akzeptiert wird oder nicht. Für die beiden Extremfälle (schmale Stabquelle zentriert im Untersuchungsobjekt sowie schmale Ringquelle an der Innenseite der Objektwand) ergeben sich Grenzwerte für die Aktivität.

- vertikale Ausdehnung der Radionuklidverteilung
- radiale Ausdehnung der Radionuklidverteilung

In der Regel wird es ausreichen, Modelle für das Untersuchungsobjekt aus den jeweiligen Extremwerten dieser drei Parameter zu konstruieren und dafür die Zählratenverteilung durch Simulation zu ermitteln. Genügt das Verhältnis  $\vec{V}$  von simulierter zu gemessener Zählratenverteilung der geforderten Bedingung aus Gl. 5.9, dann stellt der dabei berechnete Aktivitätswert ein mögliches mit den vorliegenden Informationen verträgliches Ergebnis dar. Alle diese Ergebnisse werden zu einem Intervall  $[A_{\min}; A_{\max}]$  zusammengefasst.

Im vorliegenden Beispiel werden für das behandelte Grundmodell, in dem die Aktivität in einer zusammenhängenden Schicht verteilt ist, für insgesamt sechs Varianten die Zählratenverteilung ermittelt und damit die Gesamtaktivität für jedes der beiden Radionuklide. Die Aktivität sei jeweils homogen verteilt, dabei einmal im Zentrum des Untersuchungsobjekts lokalisiert (Stabquelle mit Durchmesser 1 mm), einmal auf der Innenseite der Objektwandung (Ringquelle mit "Wandstärke" 1 mm) und zum Vergleich über das gesamte Untersuchungsobjekt bis zur Füllhöhe der inaktiven Matrix verteilt (Volumenquelle). Als Füllhöhe wird dabei die minimal mögliche vertikale Ausdehnung (bis zur Höhe  $h_{\text{Matrix, min}}$ ) der Aktivitätsverteilung eingesetzt. Die drei unterschiedlichen Varianten bezüglich der Aktivitätsverteilung werden jeweils für ein mit inaktiver Matrix vollständig befülltes Untersuchungsobjekt ( $\rho_{\text{Matrix, min}}$ ) und für ein bis zur Füllhöhe der Aktivität ( $h_{\text{Matrix, min}}$ ) befülltes Untersuchungsobjekt ( $\rho_{\text{Matrix, max}}$ ) behandelt. Die Einzelergebnisse sind in Tab. 5.3 zusammengestellt. Für  $^{241}\text{Am}$  muss die theoretische Möglichkeit, die Radionuklide im Zentrum des Untersuchungsobjekts (als so genannte Stabquelle) zu lokalisieren, verworfen werden, weil sie nicht mit den Messergebnissen verträglich ist.<sup>(9)</sup> Alle anderen Möglichkeiten stellen potentielle Modelle für das Untersuchungsobjekt dar.

### 9. Sonderfälle

In den bisherigen Betrachtungen, wie die inaktive Matrix im Untersuchungsobjekt verteilt sein kann, wurde jeweils vorausgesetzt, dass es sich um ein homogenes Material handelt, das in einem vorgegebenen Volumen gleichmäßig verteilt ist. Als variabler

---

<sup>(9)</sup>Der im Vergleich zu den anderen Werten hohe Aktivitätswert (siehe Tab. 5.3) für das Modell Stabquelle führt dazu, dass der Beitrag für Messpositionen oberhalb der aktiven Matrix so groß ist, dass das Verhältnis aus simulierter und gemessener Zählratenverteilung in diesem Bereich nicht mehr akzeptiert wird (siehe Bedingung in Gl. 5.9).

**Tabelle 5.3:** Gesamtaktivität für  $^{241}\text{Am}$  und für  $^{152}\text{Eu}$  für die sechs unterschiedlichen Modelle für das Untersuchungsobjekt; die Abkürzung "VQ" steht für Volumenquelle, "SQ" für Stabquelle (Durchmesser 1 mm) und "RQ" für Ringquelle ("Wandstärke" 1 mm). Die vertikale Ausdehnung der Aktivitätsschicht entspricht der ermittelten minimal möglichen Ausdehnung  $\Delta z_{\min} = K_1$  bis  $K_{7\text{reduz}}$  der Aktivitätsschicht.

Befüllung	vollständig			bis $h_{\text{Matrix,min}}$		
$\rho_{\text{Matrix}}$	1,0 g/cm <sup>3</sup>			1,6 g/cm <sup>3</sup>		
<b><math>^{241}\text{Am}</math></b>						
Modell	VQ	RQ	SQ	VQ	RQ	SQ
A/ Bq	2,93E+07	2,94E+07	8,83E+07 <sup>a</sup>	4,74E+07	4,77E+07	7,65E+08 <sup>a</sup>
<b><math>^{152}\text{Eu}</math></b>						
Modell	VQ	RQ	SQ	VQ	RQ	SQ
A/ Bq	1,17E+06	1,17E+06	0,89E+06	1,59E+06	1,59E+06	1,47E+06

<sup>a</sup>Diese Werte gehen nicht in das mögliche Intervall für die Gesamtaktivität des Radionuklids  $^{241}\text{Am}$  ein, weil das jeweils zugrunde liegende Modell (Stabquelle) nicht akzeptiert wurde.

Parameter wurde nur die Füllhöhe  $h_{\text{Matrix}}$  und damit – bei feststehender Matrixmasse – die Dichte  $\rho_{\text{Matrix}}$  der inaktiven Matrix zugelassen. Steht für die Ermittlung der inaktiven Matrix allerdings nur die Wägung des Untersuchungsobjekts zur Verfügung, so kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich im Untersuchungsobjekt so genanntes Abschirmmaterial befindet, d. h. Material mit einer hohen Kernladungszahl bzw. hoher Dichte, wie z. B. Schwerbeton ( $\rho > 2,8 \text{ g/cm}^3$  [24]), Grauguss<sup>(10)</sup> ( $\rho > 7 \text{ g/cm}^3$  [26]), Blei ( $\rho = 11,4 \text{ g/cm}^3$  [9]) oder abgereichertes Uran ( $\rho = 19,0 \text{ g/cm}^3$  [9]). Die Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass Abschirmungen häufig in Form von zusätzlichen Behältern, in denen die Aktivität eingebracht ist, vorliegen. Die Abmessungen dieser Behälter ergeben sich dabei hauptsächlich aus der Ausdehnung der Aktivitätsverteilung. Für die Bestimmung des Aktivitätsintervalls identifizierter Radionuklide müssen auch solche Fälle betrachtet werden. Anhand des betrachteten Grundmodells werden zwei verschiedene Beispiele einer Abschirmung vorgestellt und in der Berechnung der Aktivität berücksichtigt.

1. In das virtuelle Untersuchungsobjekt wird ein weiterer Behälter aus Grauguss eingestellt. Sein äußerer Durchmesser soll dem inneren Durchmesser des Untersuchungsobjekts entsprechen. Die Höhe des Behälters sei an die minimal mögliche Füllhöhe der inaktiven Matrix angepasst.

<sup>(10)</sup>Unter Grauguss versteht man eine Eisenlegierung mit einem hohen Anteil an Kohlenstoff (> 2%), der in Form von dünnen unregelmäßigen Plättchen vorliegt [25].

2. Im Zentrum des Untersuchungsobjekts wird ein zylindrischer Abschirmbehälter aus Blei platziert. Sein innerer Durchmesser entspreche der minimal möglichen Ausdehnung einer Aktivitätsverteilung (Stabquelle), die in Analyseschritt (7.) als akzeptiertes Modell bewertet wurde.

Die Wandstärke der zusätzlichen Behälter soll in beiden Fällen für das gesamte Objekt gleich sein und wird jeweils aus dem für die Abschirmung gemäß Gl. 5.14 zur Verfügung stehenden Volumen  $V_{\text{Abschirm}}$  berechnet. Dabei wird der unrealistische, aber extreme Fall betrachtet, dass nur das Abschirmmaterial selbst einen Beitrag zur Masse  $m_{\text{Matrix}}$  liefert.

$$V_{\text{Abschirm}} = \frac{m_{\text{Matrix}}}{\rho_{\text{Abschirm}}} \quad (5.14)$$

Damit ergeben sich für die beiden betrachteten Abschirmungen die in Tab. 5.4 zusammengestellten Abmessungen. Die Radionuklide seien jeweils in Inneren des zusätzlichen Behälters homogen verteilt.

**Tabelle 5.4:** Abmessungen der zusätzlichen Abschirmungen, wobei mit  $r_i$  bzw.  $r_a$  der innere bzw. äußere Radius bezeichnet wird und mit  $h_i$  bzw.  $h_a$  die innere bzw. äußere Höhe der jeweils betrachteten Abschirmung.

	Ummantelung	Abschirmbehälter
	Fall 1	Fall 2
Material	Grauguss	Blei
Dichte	7,0 g/cm <sup>3</sup>	11,4 g/cm <sup>3</sup>
$r_i$	14,1 cm	1,0 cm
$r_a$	15,1 cm	5,2 cm
$h_i$	20,7 cm	17,5 cm
$h_a$	22,7 cm	25,9 cm
Wandstärke	1,0 cm	4,2 cm

Die Aktivitäten, die sich für die im Inneren der Abschirmung befindlichen Radionuklide durch Simulation ihrer Zählratenverteilung und anschließendem Vergleich mit der gemessenen Verteilung ergeben, sind Tab. 5.5 zu entnehmen. Im Fall der Ummantelung aus Grauguss wird für beide Radionuklide eine Zählratenverteilung simuliert, die mit der gemessenen Verteilung vereinbar ist; diese Abschirmung stellt somit ein mögliches Modell für die Zusammensetzung des virtuellen Untersuchungsobjekt dar. Der Fall, im Untersuchungsobjekt einen Abschirmbehälter aus Blei vorzufinden, kann zumindest für <sup>241</sup>Am ausgeschlossen werden, da die Simulation für keine der 264 Messpositionen eine

Zählrate ungleich Null<sup>(11)</sup> liefert. Auch für  $^{152}\text{Eu}$  wird nur eine mit der gemessenen Zählratenverteilung verträgliche simulierte Verteilung ermittelt, wenn die Bodenstärke des Abschirmbehälters (auf 5 mm) reduziert wird. Im ursprünglichen Fall (Abmessungen siehe Tab. 5.4) zeigten sich gerade im unteren Bereich des Untersuchungsobjekts Abweichungen zwischen gemessener und simulierter Zählrate.

Es zeigt sich wie erwartet eine starke Abhängigkeit der Schwächung von Gamma-Strahlung durch im Strahlengang befindliches (Abschirm-)Material von der Energie der Gamma-Strahlung. Der Grund dafür liegt in der starken Energieabhängigkeit des linearen Schwächungskoeffizienten eines Materials (siehe dazu Abb. 2.15 in Kapitel 2). Bei einer fälschlicherweise angenommenen Abschirmung kann somit das ermittelte Aktivitätsinventar im Untersuchungsobjekt erheblich von der tatsächlich im Objekt befindlichen Aktivität abweichen. Im Beispiel ergibt sich für die betrachteten und akzeptierten Abschirm-Modelle für  $^{152}\text{Eu}$  eine Überschätzung knapp um den Faktor vier (Fall 2) und für  $^{241}\text{Am}$  sogar eine Überschätzung um etwas mehr als drei Größenordnungen (Fall 1).

**Tabelle 5.5:** Aktivitäten für  $^{241}\text{Am}$  und  $^{152}\text{Eu}$  hinter Abschirmungen

		Ummantelung aus Grauguss	Abschirmbehälter aus Blei
	$A_{\text{SOLL}}/ \text{Bq}$	$A/ \text{Bq}$	
$^{241}\text{Am}$	4,8E+07	5,1E+10	1,8E+13 <sup>a</sup>
$^{152}\text{Eu}$	1,6E+06	0,9E+06	5,9E+06 <sup>b</sup>

<sup>a</sup>Dieser Wert geht nicht in das mögliche Intervall für die Gesamtaktivität des Radionuklids  $^{241}\text{Am}$  ein, weil das zugrunde liegende Modell (Abschirmbehälter aus Blei) nicht akzeptiert wurde.

<sup>b</sup>mit reduzierter Bodenstärke des Abschirmbehälters

<sup>(11)</sup>Die Ausgabe der Simulation ist so programmiert, dass Zahlenwerte nur mit 10 Stellen nach dem Komma ausgegeben werden, kleinere Werte werden also wie Null behandelt. Für das vorliegende Beispiel wurde unter der unrealistischen Annahme, dass die Impulse für jede Messposition  $9 \cdot 10^{-11}$  wären, die Aktivitätsbestimmung durchgeführt und der dadurch berechnete Wert für die Gesamtaktivität für  $^{241}\text{Am}$  mit in Tab. 5.5 aufgenommen. Diese nahezu willkürliche Festlegung der Impulswerte lässt natürlich keine Aussage über die wirkliche Verteilung zu. Das Verhältnis aus simulierter und gemessener Zählratenverteilung genügt deswegen nur zufällig für einige Messpositionen der Bedingung in Gl. 5.9; die Mehrheit der Messpositionen erfüllt die Bedingung nicht.

## 10. Endergebnis

Werden alle Ergebnisse aus den einzelnen Analyseschritten des betrachteten Grundmodells, in dem die Aktivität in einer zusammenhängenden Schicht verteilt ist, zusammengefasst, so ergeben sich für die beiden Radionuklide  $^{241}\text{Am}$  und  $^{152}\text{Eu}$  die in Tab. 5.6 aufgeführten Intervalle, innerhalb derer sich die jeweilige Gesamtaktivität für das ganze Untersuchungsobjekt befindet, die aufgrund der in die Analyse eingegangenen Informationen auf der Basis des betrachteten Grundmodells ermittelt werden konnten. Wird für alle übrigen potentiell möglichen Grundmodelle entsprechend ver-

**Tabelle 5.6:** Aktivitätsintervall für  $^{241}\text{Am}$  und  $^{152}\text{Eu}$ .

	$A_{\text{SOLL}}$	$A_{\text{min}}$	$A_{\text{max}}$
	in Bq		
$^{241}\text{Am}$	4,8E+07	2,9E+07	5,1E+10
$^{152}\text{Eu}$	1,6E+06	0,9E+06	5,9E+06

fahren wie unter den Analyseschritten (5.) bis (9.) beschrieben, so erhält man auf der Basis aller vorliegenden und in der Analyse verwendeten Informationen das Aktivitätsintervall der ausgewerteten Radionuklide im ganzen Untersuchungsobjekt.<sup>(12)</sup> In der Routineauswertung wird man aufgrund der dafür benötigten Rechenzeit eventuell nicht für jedes der durch die Objekterzeugung erstellten Modelle das Aktivitätsintervall aller Radionuklide ermitteln können. Vielmehr wird man eine Auswahl aus den potentiell möglichen Objektzusammensetzungen in Anlehnung an Erfahrungen aus der Praxis treffen, wie es z. B. schon in Analyseschritt (9.) bei der Auswahl der betrachteten Abschirmmöglichkeiten geschehen ist, und nur dafür die Aktivitätsbestimmung durchführen. Aus allen akzeptierten Aktivitätswerten kann ein durch einen minimalen Wert  $A_{\text{min}}$  und einen maximalen Wert  $A_{\text{max}}$  beschränktes Aktivitätsintervall bestimmt werden, das den Vertrauensbereich festlegt. Da keines der akzeptierten Modelle bevorzugt wird, wird als Erwartungswert der Aktivität für das Untersuchungsobjekt der Mittelwert aller Aktivitätswerte berechnet.

### Keine Information

Liegt zur Charakterisierung des Untersuchungsobjekts nur eine SGS-Messung sowie äußere Abmessungen des Objekts vor, so wird die Aktivitätsbestimmung der identifi-

<sup>(12)</sup>Das Endergebnis liegt für das betrachtete Beispiel nicht vor, da die *automatische* Ermittlung des Aktivitätsintervalls für ein Modell noch nicht vollständig zur Verfügung steht. Zu Demonstrationszwecken wurden die einzelnen Analyseschritte an einem Modell schrittweise manuell durchgeführt.

zierten Radionuklide prinzipiell genauso durchgeführt wie im vorhergehenden Abschnitt "Information aus Wägung" detailliert beschrieben. Der Unterschied dazu besteht allerdings in der größeren Bandbreite für den Dichtewert der inaktiven Matrix, die sich ohne weitere Informationen nur zu  $[0 \text{ g/cm}^3; 19,4 \text{ g/cm}^3]$  angeben lässt. Die Zahl der theoretisch möglichen Modelle, um das Untersuchungsobjekt darzustellen, wird demnach erheblich größer. Jeweils der Vergleich von simulierter mit gemessener Zählratenverteilung erlaubt die Bewertung eines Modells. Man wird die Auswertung unter den Umständen, dass keine Information über die inaktive Matrix vorliegt, ebenfalls mit der Variante einer im gesamten Untersuchungsobjekt homogen verteilten inaktiven Matrix mit einer mittleren Dichte  $\rho_{\text{Matrix}}$ , die innerhalb des erlaubten Intervalls liegen muss, beginnen und die verschiedenen Variationsmöglichkeiten (vertikal und radial) der Aktivitätsverteilung in der Simulation betrachten. Im Weiteren kann der Befüllungsgrad dieser homogen verteilten inaktiven Matrix schrittweise verringert werden. Die Rechenzeit zur Ermittlung des Aktivitätsintervalls für diesen Fall, dass keine zusätzliche Information zum Inhalt des Messobjekts vorliegt, ist wegen der sehr großen Zahl an zu betrachtenden theoretischen Möglichkeiten so groß, dass empfohlen wird, die Auswertung einer vorliegenden Gamma-Messung nur zu beginnen, wenn zusätzlich wenigstens eine Wägung des Untersuchungsobjekts zur Verfügung steht.<sup>(13)</sup>

### Information aus Einfacher Transmissionsmessung

Anhand des vorliegenden Beispiels wird erläutert, wie die Aktivitätsintervalle von Radionukliden, die in einem Untersuchungsobjekt identifiziert wurden, auf der Grundlage der Messergebnisse eines SGS und einer Einfachen Transmissionsmessung ermittelt werden können. Dabei wird besonders auf die Unterschiede zum Abschnitt "Information aus Wägung" eingegangen. Wie in Abschnitt 4.2.4 erläutert, wird das Ergebnis einer Einfachen Transmissionsmessung, bei der das Untersuchungsobjekt mit einer externen Gamma-Quelle durchleuchtet und die durch das Objekt geschwächte Strahlung registriert wird, in Form von Parametersätzen, mit denen Matrixeigenschaften einzelner Bereiche in einem zylindrischen Untersuchungsobjekt beschrieben werden, übergeben. Informationen zum Untersuchungsobjekt sowie zu den Parametern der SGS-Messung sind den Tabn. 5.1 und 5.2 zu entnehmen. Die Ergebnisse der Einfachen Transmissionsmessung mit einer  $^{60}\text{Co}$ -Quelle am Untersuchungsobjekt sind in Tab. 5.7 zusammengestellt.

---

<sup>(13)</sup>Nahezu alle kommerziell vertriebenen Gamma-Scan-Messsysteme sind mit einer integrierten Wägeeinheit ausgestattet.

**Tabelle 5.7:** Ergebnisse der Einfachen Transmissionsmessung mit einer  $^{60}\text{Co}$ -Quelle am Untersuchungsobjekt des vorliegenden Beispiels. Der mittlere lineare Schwächungskoeffizient  $\bar{\mu}$  (4. Spalte) wurde aus den Messergebnissen (3. Spalte) unter Einsatz des Objektdurchmessers nach Gl. 4.57 berechnet. Die fünfte Spalte stellt eine Erweiterung dar, auf die später eingegangen wird.

Messposition	Höhe in mm	gemessene Impulse	$\bar{\mu}$ in $\text{cm}^{-1}$	$\mu_{\text{Matrix}}$ in $\text{cm}^{-1}$
1	0	1,09	0,15	
2	100	2,70	0,09	0,09
3	200	2,70	0,09	0,09
4	300	0,07	0,002	3,4E-4
5	400	0,003	9,0E-5	

### 0. Aufbau des Hauptobjekts

Das Hauptobjekt wird analog der Beschreibungen im Abschnitt "Information aus Wägung" aufgebaut.

### 1. Vergleich der Parametersätze mit Objektmessungen

Die Daten in den Parametersätzen der Einfachen Transmission werden mit den äußeren Abmessungen<sup>(14)</sup> des Untersuchungsobjekts (siehe dazu Tab. 5.2) unter den folgenden Aspekten verglichen und gegebenenfalls daran angepasst.

- Für die Aktivitätsbestimmung werden nur Parametersätze verwendet, deren Höhenposition  $h$  innerhalb des befüllbaren Volumens  $V_{\text{Fuel}}$  des Untersuchungsobjekts liegen. Gilt also für die Höhe einer Messposition folgende Bedingung nicht, so dient der zugehörige Parametersatz aus der Einfachen Transmission nicht der Beschreibung der inaktiven Matrix im Untersuchungsobjekt:

$$(h_{\text{unten}} + d_{\text{Boden}}) \leq h \leq (h_{\text{oben}} - d_{\text{Deckel}}) \quad (5.15)$$

wobei:

$h_{\text{unten}}$  bzw.  $h_{\text{oben}}$ : Höhenposition der Unterkante bzw. Oberkante des untersuchten Messobjekts

$d_{\text{Boden}}$  bzw.  $d_{\text{Deckel}}$ : Stärke des Bodens bzw. des Deckels des Untersuchungsobjekts

Für das vorliegende Beispiel kann damit die Zahl der zur Beschreibung der inaktiven Matrix verwendbaren Parametersätze auf drei reduziert werden; die unterste

<sup>(14)</sup>Die Kenntnis der äußeren Abmessungen des Untersuchungsobjekts wird vorausgesetzt.

Messposition ( $h_1 = 0$  mm) liegt innerhalb des Bodens des Untersuchungsobjekts ( $d_{\text{Boden}} = 5$  mm) und liefert damit nur Information über das Material des Untersuchungsobjekts. Die oberste Messposition ( $h_5 = 400$  mm) liegt schon außerhalb des Untersuchungsobjekts ( $H_{\text{Messobjekt}} = 370$  mm).

- Der mittlere lineare Schwächungskoeffizient  $\bar{\mu}$  stellt einen Mittelwert über alle Materialien, die sich im Strahlengang befinden, dar. Unterstellt man für die Messpositionen, die zur Beschreibung der inaktiven Matrix herangezogen werden, innerhalb der durch die Kollimatoröffnung gegebene Ausdehnung eine vollständige und gleichmäßige Verteilung eines Materials – der inaktiven Matrix – so kann dessen Schwächungskoeffizient  $\mu_{\text{Matrix}}$  aus Gl. 5.16 extrahiert werden.

$$\begin{aligned}\bar{\mu} &= \frac{1}{x_{\text{ges}}} \cdot \sum_i \mu_i \cdot x_i \\ &= \frac{1}{2 \cdot R_{\text{Messobjekt}}} \cdot \left\{ \mu_{\text{Wand}} \cdot 2 d_{\text{Wand}} + \mu_{\text{Matrix}} \cdot 2 (R_{\text{Messobjekt}} - d_{\text{Wand}}) \right\}\end{aligned}\quad (5.16)$$

Für das vorliegende Beispiel wurde für die Messpositionen 2, 3 und 4 jeweils der Wert für  $\mu_{\text{Matrix}}$  gemäß Gl. 5.16 berechnet und in Tab. 5.7 (5. Spalte) aufgenommen.

## 2. Verteilung der inaktiven Matrix im Untersuchungsobjekt

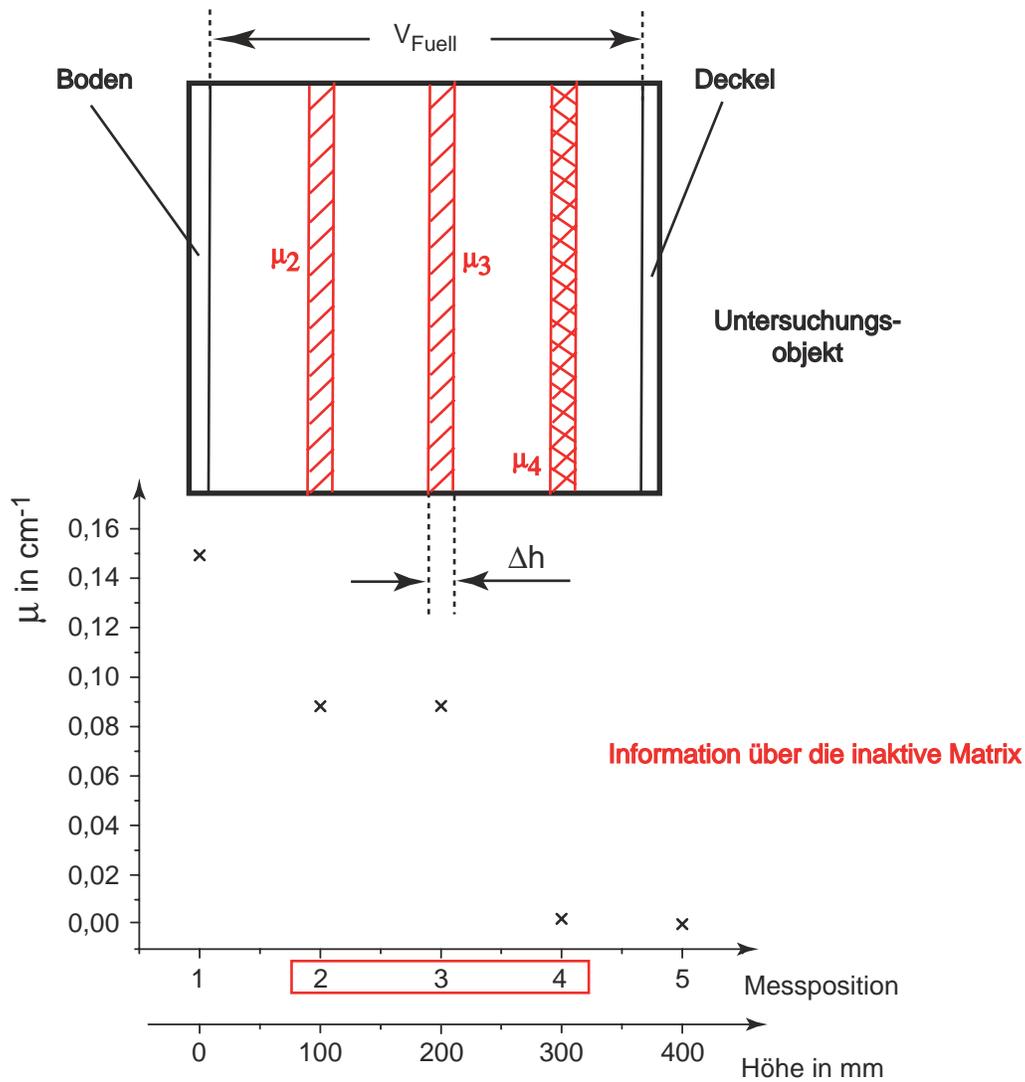
Jeder Parametersatz gibt direkt nur Auskunft über eine schmale, von der Kollimatoröffnung des Detektorsystems abhängige Schicht der Ausdehnung  $\Delta h$ , für die jeweils der gemittelte lineare Schwächungskoeffizient  $\bar{\mu}$  bzw. gemäß Gl. 5.16 der nur auf die inaktive Matrix reduzierte Wert  $\mu_{\text{Matrix}}$  vorliegt (siehe dazu Abb. 5.5). Die Befüllung des gesamten virtuellen Untersuchungsobjekts mit inaktiver Matrix erfolgt auf der Grundlage folgender Annahmen:

- Die inaktive Matrix ist innerhalb einer Schicht vollständig und gleichmäßig verteilt, d. h. für den Radius  $R$  der Schicht wird Folgendes eingesetzt:

$$R = R_{\text{innen}} = R_{\text{Messobjekt}} - d_{\text{Wand}} \quad (5.17)$$

Davon abweichende Möglichkeiten werden unter Analyseschritt (5.) behandelt.

- Die vorliegende Information über die Matrix innerhalb einer Schicht wird jeweils auf das angrenzende Volumen (ober- und unterhalb), zu dem keine Ergebnisse aus der Transmissionsmessung vorliegt, ausgedehnt. Damit wird die Höhe einer Schicht, primär gegeben durch  $\Delta h$ , auf das Intervall  $[h_{\text{min}}; h_{\text{max}}]$ , dessen Grenzen in sinnvoller Weise bestimmt werden müssen, vergrößert.



**Abbildung 5.5:** Aus den gemessenen Impulsen berechneter mittlerer linearer Schwächungskoeffizient  $\bar{\mu}$  des im Strahlengang befindlichen Materials und darüber schematisch das Untersuchungsobjekt.

- Die Befüllung erfolgt kontinuierlich, d. h. unterschiedliche Materieschichten schließen direkt aneinander an und "schweben" nicht. Das bedeutet für die Grenzen zweier übereinanderliegender Materieschichten mit den Höhenpositionen  $h_i$  und  $h_{i+1}$ :

$$h_{i,\max} = h_{i+1,\min} \quad (5.18)$$

- Die Befüllung beginnt am Boden des Untersuchungsobjekts und endet am Deckel.
- Schichten übereinanderliegender Messpositionen, deren lineare Schwächungskoeffizienten gleich sind, werden zu einer gemeinsamen Schicht zusammengefasst.

Die Werte der linearen Schwächungskoeffizienten  $\mu_2$ ,  $\mu_3$  und  $\mu_4$  (siehe Tab. 5.7) lassen die Annahme zu, dass das Untersuchungsobjekt mit zwei unterschiedlichen Materialien befüllt ist: Der untere Teil (im Weiteren mit Bereich A bezeichnet) ist mit einem Material mittlerer Dichte<sup>(15)</sup> gefüllt und setzt sich aus den Schichten 2 und 3 zusammen. Darüber (Bereich B) scheint ein Material sehr kleiner Dichte – eventuell Luft – zu liegen. Informationen zu den Bereichen A und B sind in Tab. 5.8 zusammengestellt.

**Tabelle 5.8:** Daten über die beiden Bereiche, in die der Inhalt des virtuellen Untersuchungsobjekts aufgeteilt werden kann.

	Bereich A	Bereich B
besteht aus	Schicht 2 und 3	Schicht 4
$\bar{\mu}$	$\frac{1}{2} \cdot (\mu_2 + \mu_3)$	$\mu_4$
$h_{\min}$	$h_{\text{unten}} + d_{\text{Boden}}$	x
$h_{\max}$	x	$h_{\text{oben}} + d_{\text{Deckel}}$

Der Wert für  $x$  kann aus den Ergebnissen der Einfachen Transmissionsmessung nicht ermittelt werden; es kann lediglich folgendes Intervall dafür angegeben werden:

$$(h_3 + 0,5 \cdot \Delta h) \leq x \leq (h_4 - 0,5 \cdot \Delta h) \quad (5.19)$$

Liegt allerdings zusätzlich das Ergebnis einer Wägung des gesamten Untersuchungsobjekts ( $m_{\text{brutto}}$ ) vor, so kann damit im Fall der zwei unterschiedlichen Bereiche auf die Ausdehnung beider Schichten mit Hilfe des folgenden Zusammenhangs geschlossen werden:

$$\begin{aligned} m_{\text{Matrix}} &= m_{\text{brutto}} - m_{\text{leer}} \\ &= \frac{\mu_{\text{Matrix,A}}}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{E_\gamma}} \cdot V_A + \frac{\mu_{\text{Matrix,B}}}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{E_\gamma}} \cdot (V_{\text{Fuell}} - V_A) \end{aligned} \quad (5.20)$$

wobei:

$$V_A = R^2 \cdot \pi \cdot \left[ x - (h_{\text{unten}} + d_{\text{Boden}}) \right] \quad (5.21)$$

Für das vorliegende Beispiel wird für  $x$  – der Trennung zwischen Bereich A und Bereich B – der Wert 220 mm ermittelt, was der tatsächlich vorliegenden Füllhöhe der inaktiven Matrix entspricht. Den folgenden Analyseschritten wird ein virtuelles Untersuchungsobjekt zugrunde gelegt, das bis zu einer Höhe von 220 mm mit der inaktiven

<sup>(15)</sup>Für die Energie der Transmissionsquelle ( $E(^{60}\text{Co}) = 1173,24 \text{ keV}$ ) ist der lineare Schwächungskoeffizient nahezu direkt proportional zur Dichte (siehe dazu Abschnitt 2.2.2).

Matrix Sand mit der Dichte  $1,6 \text{ g/cm}^3$ <sup>(16)</sup> gefüllt ist; darüber befindet sich das Material Luft.

### *3. Bestimmung der potentiell möglichen Objektzusammensetzungen*

Das gemäß dem vorherigen Analyseschritt mit inaktiver Matrix befüllte Untersuchungsobjekt wird mit den einzelnen Körpern, die durch die Parametersätze für Zylinder aus dem SGS (siehe dazu Analyseschritt (2.) im Abschnitt "Information aus Wägung") gegeben sind, besetzt; dadurch wird eine Verteilung von Radionukliden im Untersuchungsobjekt erzeugt. Jedem Körper wird die Materialeigenschaft der ihn umgebenden Matrix zugeordnet. Wird in einer Schicht das Material Luft identifiziert, so werden in diesem Bereich keine aktivitätstragenden Körper platziert. Körper, die sich aufgrund ihrer dem jeweiligen Parametersatz entsprechenden Geometrie-Daten innerhalb mehrerer Materieschichten befinden, werden aufgeteilt, so dass ein aktivitätstragender Körper jeweils nur aus einem Material besteht.

Die Anzahl  $J$  der verschiedenen, theoretisch möglichen Objektzusammensetzungen ergibt sich aus den unterschiedlichen Kombinationen der einzelnen aktivitätstragenden Körper und berechnet sich gemäß Gl. 5.13. Für jedes einzelne dieser theoretisch möglichen Modelle des Untersuchungsobjekts wird die Gesamtzählratenverteilung ermittelt, die sich unter den selben Messbedingungen wie im wirklichen Vielfachscheiben-Scan vorlagen, ergibt. Nur die Modelle, für die das Verhältnis  $\vec{V}$  aus simulierter und gemessener Zählratenverteilung (siehe Gl. 5.8) der Bedingung unter Gl. 5.9 genügen, werden als potentielle Möglichkeiten zur Beschreibung des Untersuchungsobjekts bewertet. Alle anderen Modelle werden verworfen.

Im Fall des vorliegenden Beispiels wird im Weiteren das mögliche Grundmodell betrachtet, in dem die Aktivität in einer zusammenhängenden Schicht bis zur Füllhöhe der inaktiven Matrix verteilt ist, d. h.  $h_{\text{Matrix}} = h_{\text{aktiv}} = 220 \text{ mm}$ .

### *4. Variation der radialen Ausdehnung*

Wie im Abschnitt "Information aus Wägung" ausführlich diskutiert, können unterschiedliche radiale Verteilungen von Radionukliden nach außen hin eine homogene Zählratenverteilung verursachen; denkbar ist das Vorkommen eines Radionuklids als Stab-, Ring- oder Volumenquelle unterschiedlicher Ausdehnung. In der Regel wird es ausreichen, nur einige Extremfälle (siehe Analyseschritt (7.) im Abschnitt "Informati-

---

<sup>(16)</sup>Zur Berechnung der Dichte werden die Werte  $\mu_A = 0,0875 \text{ cm}^{-1}$  sowie  $(\mu/\rho)_{1,2 \text{ MeV}} = 0,0535 \text{ cm}^2/\text{g}$  eingesetzt; wie schon in den vorherigen Abschnitten wird das tatsächlich vorliegende Material Sand nicht verändert, sondern nur dessen Dichte durch den jeweils berechneten Wert ersetzt.

on aus Wägung”), wie die Radionuklide in radialer Richtung verteilt sein können, zu betrachten.

Für das vorliegende Beispiel werden für das behandelte Grundmodell, in dem die Aktivität in einer zusammenhängenden Schicht verteilt ist, für drei unterschiedliche Varianten die Zählratenverteilung ermittelt und damit die Gesamtaktivität für jedes der beiden Radionuklide. Die Aktivität sei dabei jeweils homogen verteilt, dabei einmal im Zentrum des Untersuchungsobjekts lokalisiert (Stabquelle mit Durchmesser 1 mm), einmal auf der Innenseite der Objektwandung (Ringquelle mit ”Wandstärke” 1 mm) und zum Vergleich über das gesamte befüllbare Volumen (Volumenquelle) verteilt. Die Füllhöhe von inaktiver Matrix und Aktivität liegt fest und ist in Analyseschritt (3.) zu 220 mm ermittelt worden.

Die Ergebnisse der Aktivitätsermittlung sind in Tab. 5.9 zusammengestellt. Für  $^{241}\text{Am}$  muss die theoretische Möglichkeit, die Radionuklide im Zentrum des Untersuchungsobjekts (als so genannte Stabquelle) zu lokalisieren, verworfen werden, weil sie nicht mit den Messergebnissen verträglich ist.<sup>(17)</sup> Alle anderen Möglichkeiten stellen potentielle Modelle für das Untersuchungsobjekt dar.

**Tabelle 5.9:** Gesamtaktivität für  $^{241}\text{Am}$  und für  $^{152}\text{Eu}$  für die drei unterschiedlichen Modelle für das Untersuchungsobjekt; die Abkürzung ”VQ” steht für Volumenquelle, ”SQ” für Stabquelle und ”RQ” für Ringquelle.

		VQ	RQ	SQ
$^{241}\text{Am}$	A/ Bq	4,74E+07	4,77E+07	7,65E+08 <sup>a</sup>
$^{152}\text{Eu}$	A/ Bq	1,59E+06	1,59E+06	1,47E+06

<sup>a</sup>Dieser Wert geht nicht in das mögliche Intervall für die Gesamtaktivität des Radionuklids  $^{241}\text{Am}$  ein, weil das zugrunde liegende Modell (Stabquelle) nicht akzeptiert wurde.

### 5. Sonderfälle

Für Analyseschritt (2.) wurde innerhalb einer Schicht die gleichmäßige und vollständige Verteilung von einem Material – der inaktiven Matrix – mit dem linearen Schwächungskoeffizienten  $\mu_{\text{Matrix}}$  gefordert. Nachdem der lineare Schwächungskoeffizient  $\mu_{\text{Matrix}}$  (bzw.  $\bar{\mu}$ ) nur die gemittelte Information über alle im Strahlengang befindlichen Mate-

<sup>(17)</sup>Analog zum Abschnitt ”Information aus Wägung” führt der im Vergleich zu den anderen Werten hohe Aktivitätswert (siehe Tab. 5.9) für das Modell Stabquelle dazu, dass der Beitrag für Messpositionen oberhalb der aktiven Matrix so groß ist, dass das Verhältnis aus simulierter und gemessener Zählratenverteilung in diesem Bereich nicht mehr akzeptiert wird.

rialien wiedergibt, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die vereinfachte Annahme *eines* Materials nicht dem tatsächlichen Aufbau des Untersuchungsobjekts entspricht. Für die Aktivitätsberechnung sind besonders Materialien mit großem Schwächungskoeffizienten, wie sie in Analyseschritt (9.) im Abschnitt "Information aus Wägung" als Abschirmbehälter bezeichnet und ausführlich diskutiert wurden, relevant. Im Fall der homogenen Aktivitätsverteilung muss die gesamte inaktive Matrix weitestgehend symmetrisch zum Zentrum des Untersuchungsobjekts verteilt sein, damit eine gleichmäßige Schwächung der emittierten Gamma-Strahlung in alle Richtungen zum Detektorsystem gewährleistet ist; somit kommt für die Lage eines Abschirmbehälters nur das Zentrum des Untersuchungsobjekts in Frage. Prinzipiell müssen für ein festes Abschirmmaterial mit dem linearen Schwächungskoeffizienten  $\mu_{\text{Abschirm}}$  die Abmessungen eines zusätzlichen Behälters so gewählt werden, dass folgende Anforderungen erfüllt sind:

- Die Wandstärke  $d_{\text{Abschirm}}$  ergibt sich aus folgender Bedingung:

$$\mu_{\text{Matrix}} \cdot 2 R_{\text{innen}} = \mu_{\text{Abschirm}} \cdot 2 d_{\text{Abschirm}} + \mu_{\text{Matrix}}^* \cdot 2 (R_{\text{innen}} - d_{\text{Abschirm}}) \quad (5.22)$$

Wobei  $\mu_{\text{Matrix}}^*$  der lineare Schwächungskoeffizient einer inaktiven Matrix zusätzlich zum Abschirmmaterial ist; diese inaktive Matrix kann theoretisch auf die folgenden verschiedenen Weisen verteilt sein:

- nur außerhalb des zusätzlichen Behälters (im Weiteren mit *Abschirmbehälter* bezeichnet)
  - nur innerhalb des Abschirmbehälters
  - sowohl außerhalb als auch innerhalb des Abschirmbehälters
- Zusammen mit der Wandstärke  $d_{\text{Abschirm}}$  und der Masse des Untersuchungsobjekts  $m_{\text{brutto}}$  kann das mögliche Abschirmvolumen  $V_{\text{Abschirm}}$  und damit die Ausdehnung des zusätzlichen Behälters ermittelt werden:

$$\begin{aligned} m_{\text{Matrix}} &= m_{\text{brutto}} - m_{\text{leer}} \\ &= \rho_{\text{Abschirm}} \cdot V_{\text{Abschirm}} + \rho_{\text{Matrix}}^* \cdot (V_{\text{Matrix}} - V_{\text{Abschirm}}) \quad (5.23) \\ &= \frac{1}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{E_\gamma}} \cdot \left[ \mu_{\text{Abschirm}} \cdot V_{\text{Abschirm}} + \mu_{\text{Matrix}}^* \cdot (V_{\text{Matrix}} - V_{\text{Abschirm}}) \right] \end{aligned}$$

$V_{\text{Matrix}}$  ergibt sich dabei aus den Abmessungen des Untersuchungsobjekts und der Ausdehnung der Aktivität (siehe Analyseschritt (3.)).

Genauso wie die inaktive Matrix auf verschiedene Weise im Untersuchungsobjekt verteilt sein kann, können theoretisch auch für die Verteilung der Radionuklide die folgenden verschiedenen Varianten betrachtet werden:

- nur außerhalb des Abschirmbehälters
- nur innerhalb des Abschirmbehälters
- sowohl außerhalb als auch innerhalb des Abschirmbehälters
- innerhalb des Abschirmmaterials<sup>(18)</sup>.

Nachdem die Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass Material mit einem höheren linearen Schwächungskoeffizienten dazu benutzt wird, um Aktivität stärker nach außen hin abzuschirmen, ist nur die Variante, dass sich die Aktivität *innerhalb* eines zusätzlichen Behälters befindet, interessant und wird im Weiteren betrachtet.

Für das vorliegende Beispiel werden zwei Fälle der Abschirmung in der Aktivitätsberechnung berücksichtigt, wobei jeweils der unrealistische, aber extreme Fall konstruiert wird, dass nur das Abschirmmaterial selbst einen Beitrag zur Masse  $m_{\text{Matrix}}$  liefert. Die Radionuklide seien homogen im zusätzlichen Behälter verteilt. In beiden Fällen ist die Höhe des Abschirmbehälters durch die Ausdehnung der Aktivität (siehe Analyseschritt (3.)) gegeben.

1. Für eine Abschirmung aus Grauguss wird gemäß Gl. 5.22 die maximal mögliche Wandstärke von 3,1 cm bei einem Außendurchmesser des Behälters von 17,9 cm (nach Gl. 5.23) berechnet.
2. Für einen Abschirmbehälter aus Blei ergibt sich gemäß Gl. 5.22 die maximal mögliche Wandstärke von 1,9 cm bei einem Außendurchmesser des Behälters von 17,3 cm (nach Gl. 5.23).

Die Aktivitäten, die sich für die im Inneren der Abschirmung befindlichen Radionuklide durch Simulation ihrer Zählratenverteilung und anschließendem Vergleich mit der gemessenen Verteilung ergeben, sind Tab. 5.10 zu entnehmen.

Für  $^{152}\text{Eu}$  wird im Fall der Abschirmung aus Grauguss (Wandstärke: 3,1 cm) nur eine mit der gemessenen Zählratenverteilung verträgliche simulierte Verteilung ermittelt, wenn die Bodenstärke des Abschirmbehälters (um 1 cm) reduziert wird. Im ursprünglichen Fall zeigen sich gerade im unteren Bereich des Untersuchungsobjekts Abweichungen zwischen gemessener und simulierter Zählraten. Das Modell der Abschirmung aus Blei zeigt mit den Originalabmessungen (Wandstärke: 1,9 cm) ein mit der gemessenen Zählratenverteilung verträgliches Ergebnis. In beiden Fällen entspricht der ermittelte Wert für die Aktivität dem Soll-Wert.

Für  $^{241}\text{Am}$  müssen beide betrachteten Modelle einer Abschirmung verworfen werden, weil die Simulation jeweils außerhalb der Abschirmung keine messbaren<sup>(19)</sup> Zähl-

<sup>(18)</sup>Denkbar ist z. B. abgereichertes Uran als Material für eine zusätzliche Abschirmung.

<sup>(19)</sup>In der Simulation werden kleinere Werte als  $1 \cdot 10^{-10}$  wie Null behandelt.

raten liefert. Analog zum Abschnitt "Information aus Wägung" wurde unter der Annahme, dass die Impulse an allen Messpositionen  $9 \cdot 10^{-11}$  seien, die Gesamtaktivität berechnet und für den Vergleich in Tab. 5.10 mit aufgenommen.

**Tabelle 5.10:** Berechnete Aktivitäten für  $^{241}\text{Am}$  und  $^{152}\text{Eu}$  hinter Abschirmungen.

Abschirmung aus	Grauguss	Blei	
	$A_{\text{SOLL}}/\text{Bq}$	$A/\text{Bq}$	
$^{241}\text{Am}$	4,8E+07	1,8E+13 <sup>a</sup>	1,8E+13 <sup>a</sup>
$^{152}\text{Eu}$	1,6E+06	1,4E+06 <sup>b</sup>	1,6E+06

<sup>a</sup>Diese Werte gehen nicht in das mögliche Intervall für die Gesamtaktivität des Radionuklids  $^{241}\text{Am}$  ein, weil die jeweils zugrunde liegenden Modelle (Ummantelung aus Grauguss sowie Abschirmbehälter aus Blei) nicht akzeptiert wurden.

<sup>b</sup>mit reduzierter Bodenstärke des Abschirmbehälters

### 6. Aktivitätsintervall

Jeder Aktivitätswert, der auf der Basis eines potentiell möglichen Modells für das vorliegende Untersuchungsobjekt berechnet wird, stellt ein mögliches, mit den vorliegenden Informationen verträgliches Ergebnis dar. Alle diese Ergebnisse werden zu einem Intervall  $[A_{\text{min}}; A_{\text{max}}]$  zusammengefasst, innerhalb dessen sich die jeweilige Gesamtaktivität für das ganze Untersuchungsobjekt befindet, die aufgrund der in die Analyse eingegangenen Informationen ermittelt werden konnte.

Für das vorliegende Beispiel ist das Ergebnis in Tab. 5.11 aufgeführt. Es zeigt sich, dass das Intervall für die berechnete Gesamtaktivität unter Einbeziehung der Ergebnisse aus der Einfachen Transmissionsmessung wesentlich geringer ist als im Fall "Information aus Wägung" (vergleiche dazu Tab. 5.6). Dabei ist natürlich die Abweichung des berechneten Aktivitätswerts vom tatsächlichen Wert extrem abhängig davon wie stark homogen die inaktive Matrix innerhalb des Untersuchungsobjekts verteilt ist und wie groß die Abtastrate bei der Einfachen Transmission gewählt wird.

**Tabelle 5.11:** Aktivitätsintervall für  $^{241}\text{Am}$  und  $^{152}\text{Eu}$ .

	$A_{\text{SOLL}}$	$A_{\text{min}}$	$A_{\text{max}}$
	in Bq		
$^{241}\text{Am}$	4,8E+07	4,7E+07	4,8E+07
$^{152}\text{Eu}$	1,6E+06	1,4E+06	1,6E+06

## Information aus Digitaler Radiographie

Im Folgenden werden die einzelnen Analyseschritte dargestellt, die für die Bestimmung des Aktivitätsintervalls identifizierter Radionuklide in einem Untersuchungsobjekt nötig sind, wenn zusätzlich zu den Ergebnissen eines SGS noch die Ergebnisse einer Digitalen Radiographie (DR) zur Verfügung stehen.

Wie ausführlich in Abschnitt 4.2.1 diskutiert, können anhand der Messergebnisse einer DR einzelne Strukturen (Körper) innerhalb eines Untersuchungsobjekts identifiziert und charakterisiert werden, d. h. ihre Abmessungen<sup>(20)</sup> sowie lineare Schwächungskoeffizienten bestimmt werden.

### 0. Aufbau des Hauptobjekts

Das Hauptobjekt wird analog der Beschreibungen im Abschnitt "Information aus Wägung" aufgebaut.

### 1. Verteilung der inaktiven Matrix im Untersuchungsobjekt

Das virtuelle Untersuchungsobjekt wird mit inaktiver Matrix befüllt. Dabei wird das gesamte zur Verfügung stehende Volumen  $V_{\text{Fuel}}$  mit einzelnen Körpern, die auf einfache geometrische Grundformen (Zylinder, Ellipsoid, Kugel, Kegel(stumpf)) zurückgeführt werden, besetzt. Für diese Körper stehen nach der Auswertung der DR (siehe Abschnitt 4.2.1) folgende Informationen zur Verfügung: (Zur Verdeutlichung der benutzten Größen sei auf die Abb. 4.17 verwiesen.)

- die Position  $d$  entlang der Bewegungsrichtung des Untersuchungsobjekts während der DR-Messung
- die Ausdehnung, z. B. der Radius  $R$  eines zylindrischen Körpers, längs der Bewegungsrichtung des Untersuchungsobjekts während der DR-Messung
- der lineare Schwächungskoeffizient  $\mu$
- Inhalt weiterer Körper

Über die Lage eines Körpers quer zur Bewegungsrichtung des Untersuchungsobjekts während der DR-Messung kann keine Aussage getroffen werden. Genauso können Körper, die in der Tiefe des Untersuchungsobjekts direkt hintereinander liegen, nicht als einzelne Strukturen aufgelöst werden.

---

<sup>(20)</sup>Die Abmessungen der kleinsten noch aufzulösenden Strukturen dürfen dabei die doppelte Abtastrate der DR-Messung nicht unterschreiten (siehe dazu Abschnitt 4.2.2).

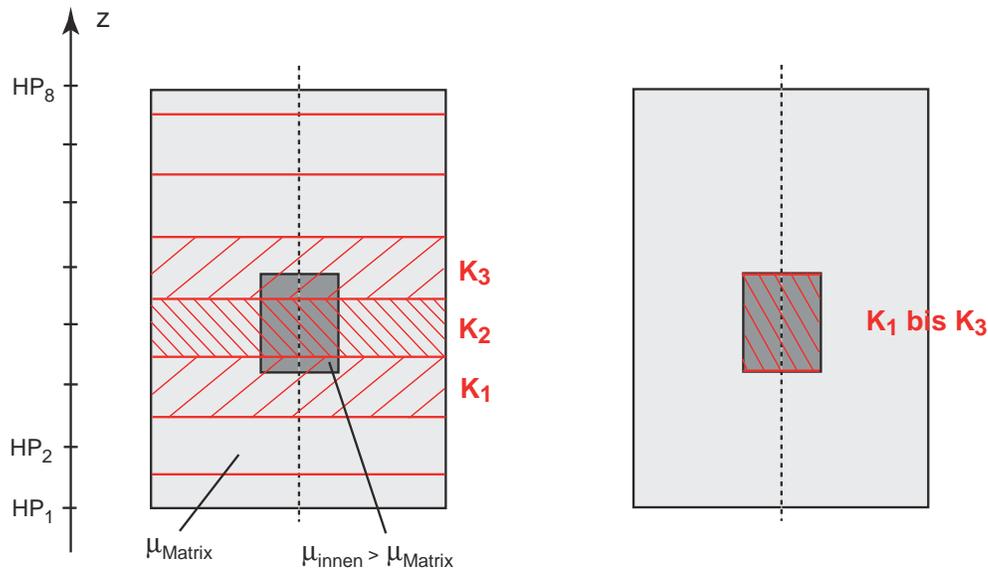
Im Fall der homogenen Aktivitätsverteilung muss die inaktive Matrix in den Höhen, in denen auch Radionuklide vorkommen, weitestgehend symmetrisch zum Zentrum des Untersuchungsobjekts verteilt sein, damit eine gleichmäßige Schwächung der emittierten Gamma-Strahlung in alle Richtungen zum Detektorsystem gewährleistet ist; für die entsprechenden Körper ist somit die mögliche Lage in der Tiefe innerhalb des Untersuchungsobjekts zumindest eingeschränkt.

## *2. Verteilung der Radionuklide im Untersuchungsobjekt*

Das gemäß dem vorherigen Analyseschritt mit inaktiver Matrix befüllte Untersuchungsobjekt wird mit den einzelnen Körpern, die durch die Parametersätze für Zylinder aus dem SGS (siehe dazu Analyseschritt (2.) im Abschnitt "Information aus Wägung") gegeben sind, besetzt; dadurch wird eine Verteilung von Radionukliden im Untersuchungsobjekt erzeugt. Die Abmessungen der aktivitätstragenden Körper werden in diesem Fall stark an der Ausdehnung der Körper, die die Verteilung der inaktiven Matrix repräsentieren, ausgerichtet. Dabei sind die folgenden Aspekte zu beachten:

- Ein aktivitätstragender Körper  $K_i$  wird innerhalb einer Höhe dem Matrixbeschreibenden Körper zugeteilt, der in dieser Höhe den größten Schwächungskoeffizient hat; ausgenommen ist dabei die äußere Wand des Untersuchungsobjekts selbst. Diese Forderung stützt sich auf Erfahrungen aus der Praxis, dass Material mit einem größeren Schwächungskoeffizienten als die umgebende Matrix zur effektiven Abschirmung von radioaktivem Material benutzt wird.
- Erstreckt sich die gleiche Matrixverteilung über mehrere aktivitätstragende Körper, so werden diese zu einem Körper zusammengefasst.
- Jedem Körper wird die Materialeigenschaft der ihn umgebenden Matrix zugeordnet.
- Die vertikale Ausdehnung des aktivitätstragenden Körpers innerhalb der ihm zugeteilten Matrix ist variabel.

Anhand des schematischen Beispiels in Abb. 5.6 werden die genannten Forderungen demonstriert: in einem SGS mit insgesamt acht Höhenmesspositionen wird in den Höhen drei, vier und fünf außerhalb des Untersuchungsobjekts eine homogene Zählratenverteilung gemessen und daraus die Parametersätze für die Zylinder  $K_1$ ,  $K_2$  und  $K_3$  erzeugt. Eine am Untersuchungsobjekt durchgeführte DR identifiziert innerhalb des Untersuchungsobjekts einen zusätzlichen zylindrischen Körper mit Schwächungskoeffizient  $\mu_{\text{innen}}$ , der im Zentrum des Untersuchungsobjekts in einer



**Abbildung 5.6:** Schematische Darstellung der Messergebnisse eines SGS und einer DR an einem Untersuchungsobjekt (links) und die Kombination beider Ergebnisse zu einem virtuellen Untersuchungsobjekt (rechts).

Matrix mit Schwächungskoeffizient  $\mu_{\text{Matrix}}$  eingebettet ist. Die vertikale Ausdehnung des zusätzlichen Körpers ist geringer als die maximale vertikale Ausdehnung der aktivitätstragenden Körper K<sub>1</sub> bis K<sub>3</sub>. Nachdem  $\mu_{\text{innen}} > \mu_{\text{Matrix}}$ , kann vermutet werden, dass der zylindrische Körper im Zentrum des Untersuchungsobjekts als zusätzlicher Abschirmbehälter fungiert und dass sich darin das gesamte radioaktive Material befindet.<sup>(21)</sup> Somit werden die drei einzelnen aktivitätstragenden Körper K<sub>1</sub> bis K<sub>3</sub> zu einem zusammengefasst, dessen Ausdehnung an die Abmessungen des zusätzlichen Abschirmbehälters angepasst wird. Die theoretisch mögliche Variation in der radialen sowie vertikalen Ausdehnung der Aktivitätsverteilung innerhalb des Abschirmbehälters kann Rechnung getragen werden, indem einige extreme Varianten in der Simulation berücksichtigt werden, z. B. vollständige Befüllung des Behälters ("Volumenquelle") oder Lokalisation der Aktivität zentral im Behälter ("Stab- bzw. Punktquelle").

Für alle Modelle des virtuellen Untersuchungsobjekts wird die Gesamtzählratenverteilung ermittelt, die sich unter den selben Messbedingungen wie im wirklichen Vielfachscheiben-Scan vorlagen, ergibt. Die Modelle, für die das Verhältnis  $\vec{V}$  aus simulierter und gemessener Zählratenverteilung (siehe Gl. 5.8) der Bedingung unter Gl. 5.9 genügt, werden als potentielle Möglichkeiten zur Beschreibung des Untersuchungsobjekts bewertet. Alle anderen Modelle werden verworfen.

<sup>(21)</sup>Theoretisch kann auch die unwahrscheinlichere Variante, dass sich das gesamte radioaktive Material *außerhalb* des zusätzlichen Abschirmbehälters befindet, in der Simulation berücksichtigt werden.

### 3. Aktivitätsintervall

Analog der vorherigen Abschnitte werden alle – für gültige Modelle – berechneten Aktivitätswerte zu einem Intervall  $[A_{\min}; A_{\max}]$  zusammengefasst, innerhalb dem sich die jeweilige Gesamtaktivität für das ganze Untersuchungsobjekt befindet, die aufgrund der in die Analyse eingegangenen Informationen ermittelt werden konnte.

Für ein reales Beispiel, in dem auf der Basis von Messergebnissen aus dem SGS und der DR das Aktivitätsintervall identifizierter Radionuklide in einem Untersuchungsobjekt ermittelt wird, sei auf Kapitel 6 verwiesen.

## 5.2.2 Vorgehen bei heterogener Aktivitätsverteilung

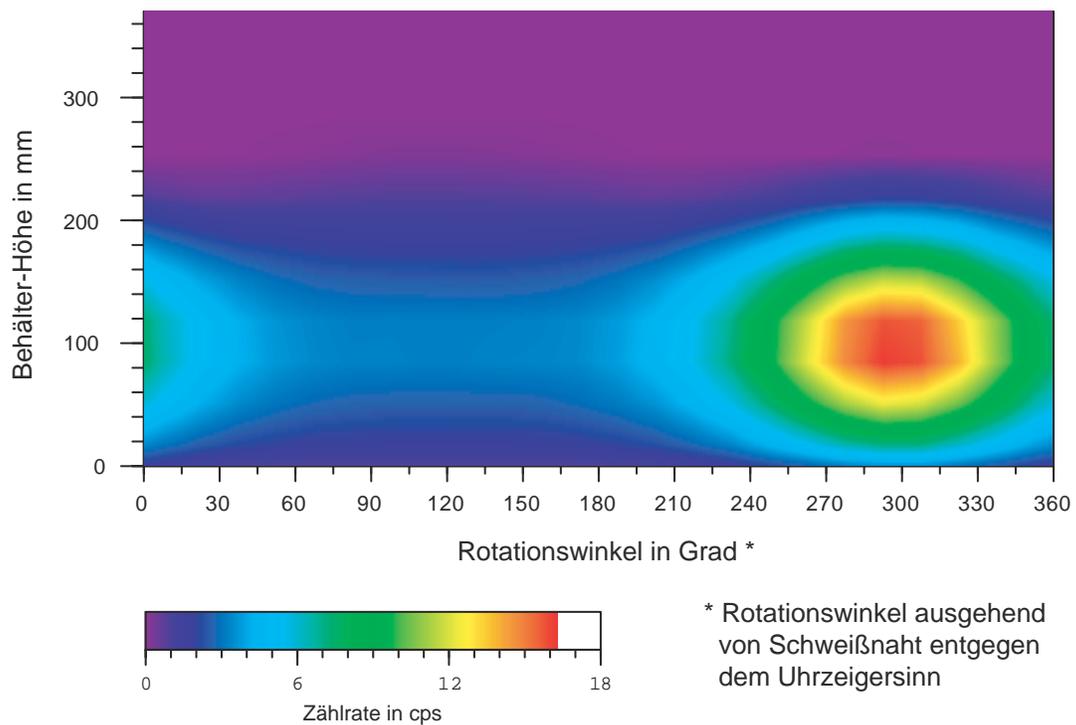
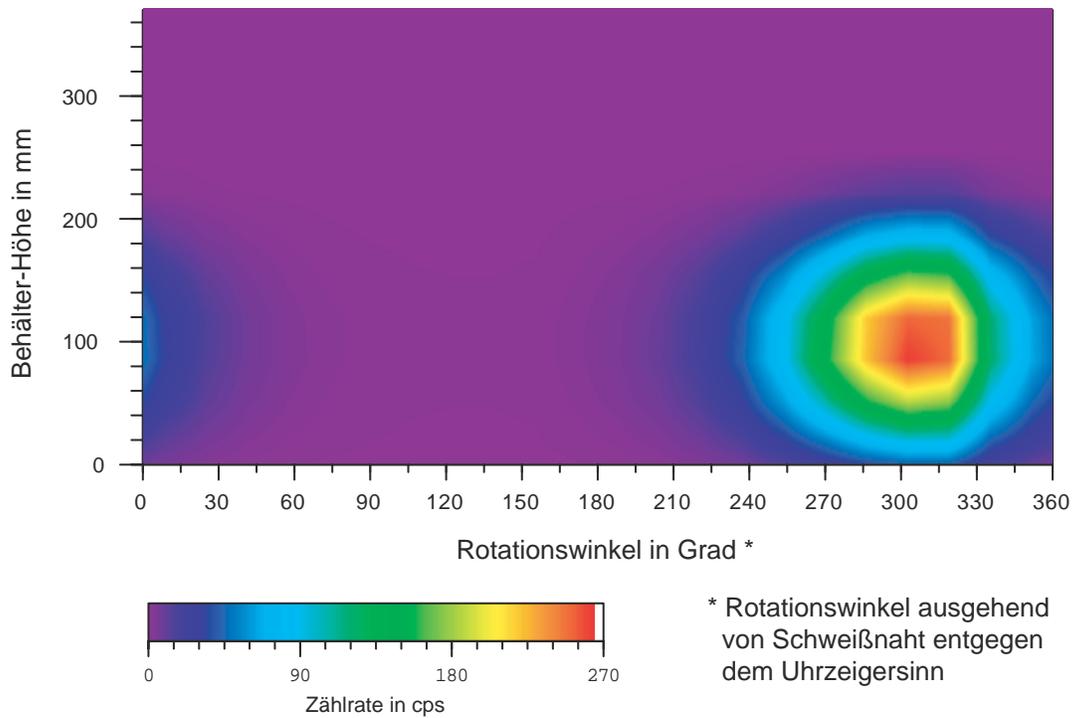
Analog dem Beispiel einer homogenen Aktivitätsverteilung in einem Messobjekt (vergleiche dazu Abschnitt 5.2.1) sei das Ergebnis<sup>(22)</sup> eines Vielfachscheiben-Scans an einem zylindrischen Objekt, die Oberflächenzählratenverteilungen für Energielinien der Nuklide  $^{241}\text{Am}$  (59,5 keV) und  $^{152}\text{Eu}$  (1408,0 keV) gegeben (dargestellt in Abb. 5.7). Das Messobjekt sei bis auf die Verteilung der Radionuklide identisch mit dem aus Abschnitt 5.2.1, deswegen können die zur Verfügung stehenden Informationen darüber Tab. 5.2 entnommen werden. Die Messparameter der durchgeführten SGS-Messung sind in Tab. 5.1 zusammengestellt. Außerhalb des Untersuchungsobjekts wird eine heterogene Zählratenverteilung für  $^{241}\text{Am}$  und  $^{152}\text{Eu}$  gemessen. Die Auswertung des vorliegenden Vielfachscheiben-Scans für die Energien 59,5 keV sowie 1408,0 keV liefert für die beiden identifizierten Radionuklide je einen Parametersatz für ein Ellipsoid, mit dem im Untersuchungsobjekt ein Bereich lokalisierter Aktivität dargestellt wird. Für dieses Beispiel liefert die Auswertung des Vielfachscheiben-Scans keinen homogenen Anteil der Zählratenverteilung, also keine Parametersätze für Zylinder.

### Vorgehen bei mehreren Parametersätzen für Ellipsoide

Enthalten vorliegende Parametersätze einer Energielinie zusammengehörige Marker, so liegt ein Hinweis dafür vor, dass die Messsignale, die durch die betrachteten beiden Parametersätze dargestellt werden, eventuell von der selben radioaktiven Quelle verursacht wurden. In diesem Fall wird im virtuellen Messobjekt nur eine räumlich konzentrierte Aktivitätsverteilung positioniert. Die Parameter zur Beschreibung des dafür nötigen Ellipsoids werden aus den Daten des Peaks ermittelt, der das größere Messsignal (Fläche in der Winkelverteilung) verursacht hat. Der Parametersatz, der den kleineren Peak (verursacht durch das schwächere Messsignal) beschreibt, wird verworfen. Für die

---

<sup>(22)</sup>Der Vielfachscheiben-Scan mit einem kollimierten Germanium-Detektorsystem wurde hier aus den selben Gründen wie in Abschnitt 5.2.1 nur fiktiv durchgeführt.



**Abbildung 5.7:** Oberflächenzählratenverteilung für das Beispiel der heterogenen Verteilung von  $^{241}\text{Am}$  (oben) und  $^{152}\text{Eu}$  (unten) in einem zylindrischen Untersuchungsobjekt.

Bestimmung der radialen Position  $r$  der Aktivitätsverteilung im Untersuchungsobjekt (siehe dazu Abb. 5.8) wird folgende vereinfachte Annahme getroffen: innerhalb der betrachteten Schicht, in dem beide Peaks  $i$  und  $j$  identifiziert wurden, ist eine homogene Matrix mit dem linearen Schwächungskoeffizienten  $\mu^{(23)}$  vorhanden. In erster Näherung kann damit für die Impulse  $I_i$  und  $I_j$ , die an den Winkelpositionen  $A'_i$  bzw.  $A'_j$  gemessen wurden, das Schwächungsgesetz in einer Dimension (radiale Richtung) aufgestellt werden:

$$\begin{aligned} I_i(x_1) &= I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x_1} \quad \text{und} \\ I_j(x_2) &= I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x_2} = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot (2R_{\text{Messobjekt}} - x_1)} \end{aligned} \quad (5.24)$$

Aus der Kombination dieser beiden Gleichungen kann  $x_1$  gefolgert werden:

$$x_1 = \frac{1}{2} \cdot \left( 2R_{\text{Messobjekt}} - \frac{1}{\mu} \cdot \ln \frac{I_i}{I_j} \right) \quad (5.25)$$

Daraus lässt sich gemäß Gl. 5.26 die radiale Position des Schwerpunkts der Aktivitätsverteilung bestimmen.

$$r = R_{\text{Messobjekt}} - x_1 \quad (5.26)$$

Die Ermittlung des Aktivitätsintervalls einzelner identifizierter Radionuklide wird mit Hilfe der reduzierten Anzahl der Parametersätze vorgenommen. Im Weiteren werden die dazu notwendigen Analyseschritte anhand des heterogenen Beispiels abhängig von den vorhandenen Informationen schrittweise erläutert. Dazu wird insbesondere auf Unterschiede zu den Ausführungen in Abschnitt 5.2.1 eingegangen; für die analog durchzuführenden Analyseschritte wird auf die jeweiligen Abschnitte des homogenen Beispiels verwiesen.

### Information aus Wägung

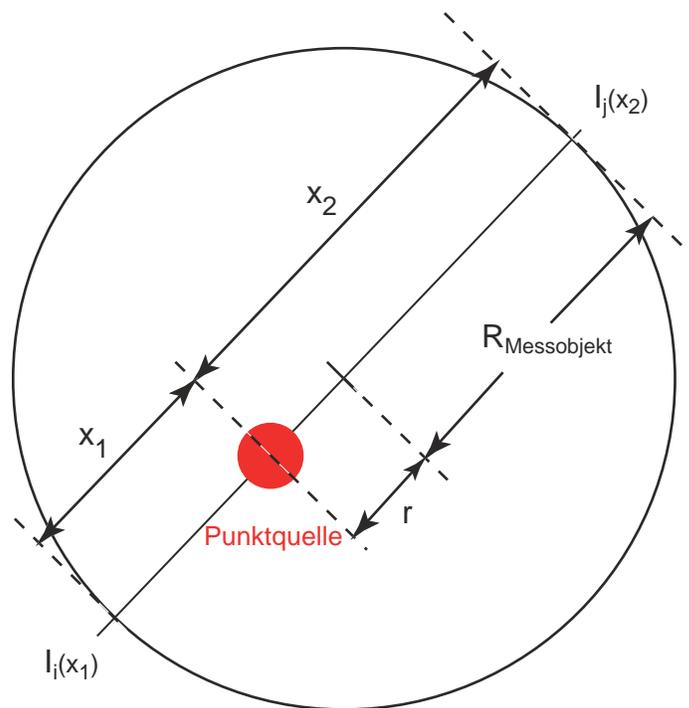
Im Weiteren wird dargestellt, welche Folgerungen bezüglich der inaktiven Matrix im Untersuchungsobjekt getroffen werden können, wenn zur Charakterisierung der Matrix nur das Ergebnis einer Wägung ( $m_{\text{brutto}}$ ) vorliegt, aber keine weiteren Informationen insbesondere aus Transmissionsmessungen.

#### 1. Aufbau des virtuellen Untersuchungsobjekts

Das virtuelle Untersuchungsobjekt (siehe Analyseschritt (0.) in Abschnitt 5.2.1 "Information aus Wägung") muss entsprechend der vorliegenden Parametersätze mit in-

---

<sup>(23)</sup>Der lineare Schwächungskoeffizient wird entsprechend der vorliegenden Informationen über die inaktive Matrix angenommen.



**Abbildung 5.8:** Schematische Darstellung zur Erläuterung der 180°-Überprüfung.

aktiver Matrix sowie mit Radionukliden besetzt werden. Basierend auf dem jeweiligen Parametersatz kann für jedes Ellipsoid, das im virtuellen Untersuchungsobjekt einen Bereich räumlich konzentrierter Aktivität darstellt, die mögliche Bandbreite seiner Ausdehnung bestimmt werden. Zur Verdeutlichung der verwendeten Größen sei auf Abb. 5.9 verwiesen.

$$PS_{\text{Ellipsoid}} = \left\{ E; M_\varrho, \Delta M_\varrho; M_z, \Delta M_z; \alpha, \Delta\alpha; c, \Delta c; r, \Delta r; \text{Marker} \right\}$$

wobei:

$E$ : in der Auswertung betrachtete Energielinie

$M_\varrho = A'$ : Mittelpunkt der Aktivitätskonzentration in Winkelrichtung

$M_z = C'$ : Mittelpunkt der Aktivitätskonzentration in Höhenrichtung

$\alpha$  bzw.  $c$ : Länge der Ellipsenachse in Winkel- bzw. in Höhenrichtung

$r$ : radiale Position des Mittelpunkts der Aktivitätskonzentration

Marker: Für die weitere Analyse wird dieser Parameter nicht mehr benötigt.

Unter  $\Delta X$  ist jeweils der Toleranzbereich  $[\min(X); \max(X)]$  der Größe  $X$  zu verstehen.

Gemäß Gl. 5.27 wird aus der Länge der Ellipsenachse  $\alpha$  in Winkelrichtung die Länge des Kreisbogens  $a$  an der Objektaußenseite berechnet. Sind die Längen beider Ellipsenachsen  $a$  und  $c$  im Rahmen ihres Toleranzbereichs gleich, so wird eine radioaktive

Quelle im virtuellen Untersuchungsobjekt in Form einer Kugel dargestellt.

$$a = \frac{2\pi \cdot \alpha}{360^\circ} \cdot R_{\text{Messobjekt}} \quad (5.27)$$

Steht die radiale Position  $r$  der Quelle im Parametersatz nicht zur Verfügung, so kann sie theoretisch jeden Wert im Bereich  $]0; R_{\text{innen}}]$  unter Berücksichtigung folgender Bedingung annehmen.

$$r + R_Q \leq R_{\text{innen}} \quad (5.28)$$

wobei:

$R_Q$ : Radius der Quelle

$R_{\text{innen}}$ : Radius des zylindrischen Bereichs, in dem sich die Quelle befinden kann

Abhängig von der radialen Position  $r$  der Quelle im Untersuchungsobjekt berechnet sich – basierend auf den Ergebnissen der Auswertung des Vielfachscheiben-Scans – ihr jeweils maximal möglicher Radius  $R_{Q,\text{max}}$  gemäß Gl. 5.29 aus der Sehne  $s'$  des Kreisbogens mit Radius  $r$  (vergleiche dazu auch Abb. 5.9).

$$R_{Q,\text{max}}(r) = \frac{s'}{2} = r \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \quad (5.29)$$

Ihre insgesamt maximale Ausdehnung  $R_{\text{max}}^*$  kann die Quelle im Abstand  $r_{\text{max}}$  vom Zentrum des Untersuchungsobjekt einnehmen und berechnet sich mit Gl. 5.29 zu:

$$R_{\text{max}}^* = r_{\text{max}} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \quad , \quad \text{mit} \quad r_{\text{max}} = \frac{R_{\text{innen}}}{1 + \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (5.30)$$

Theoretisch mögliche Modelle zur Darstellung der Aktivitätsverteilung im Untersuchungsobjekt ergeben sich aus der Kombination aller möglichen radialen Positionen  $r$  und der dazu gehörigen erlaubten Ausdehnungen  $R_Q$  (berechnet mit Gl. 5.29) einer Quelle, wobei das Material eines jeden Körpers (im Allgemeinen Ellipsoide und im Spezialfall, wenn  $a \approx c$ , Kugeln) jeweils dem Material der inaktiven Matrix gleichgesetzt wird, die ihn umgibt.

Für das vorliegende Beispiel wird aus den gegebenen Parametersätzen der Energielinien 59,5 keV und 1408,0 keV die begrenzende Geometrie der Körper, die die gemessene Verteilung der Radionuklide  $^{241}\text{Am}$  und  $^{152}\text{Eu}$  im virtuellen Untersuchungsobjekt darstellen, ermittelt. Die dazu nötigen Daten aus den entsprechenden Parametersätzen, sowie die Geometrieparameter der Körper sind in Tab. 5.12 zusammengestellt. Nachdem für beide Radionuklide  $^{241}\text{Am}$  und  $^{152}\text{Eu}$  die Längen  $a$  und  $c$  nicht gleich sind, wird die Darstellung ihrer räumlichen Verteilung im virtuellen Untersuchungsobjekt jeweils durch ein Ellipsoid vorgenommen.

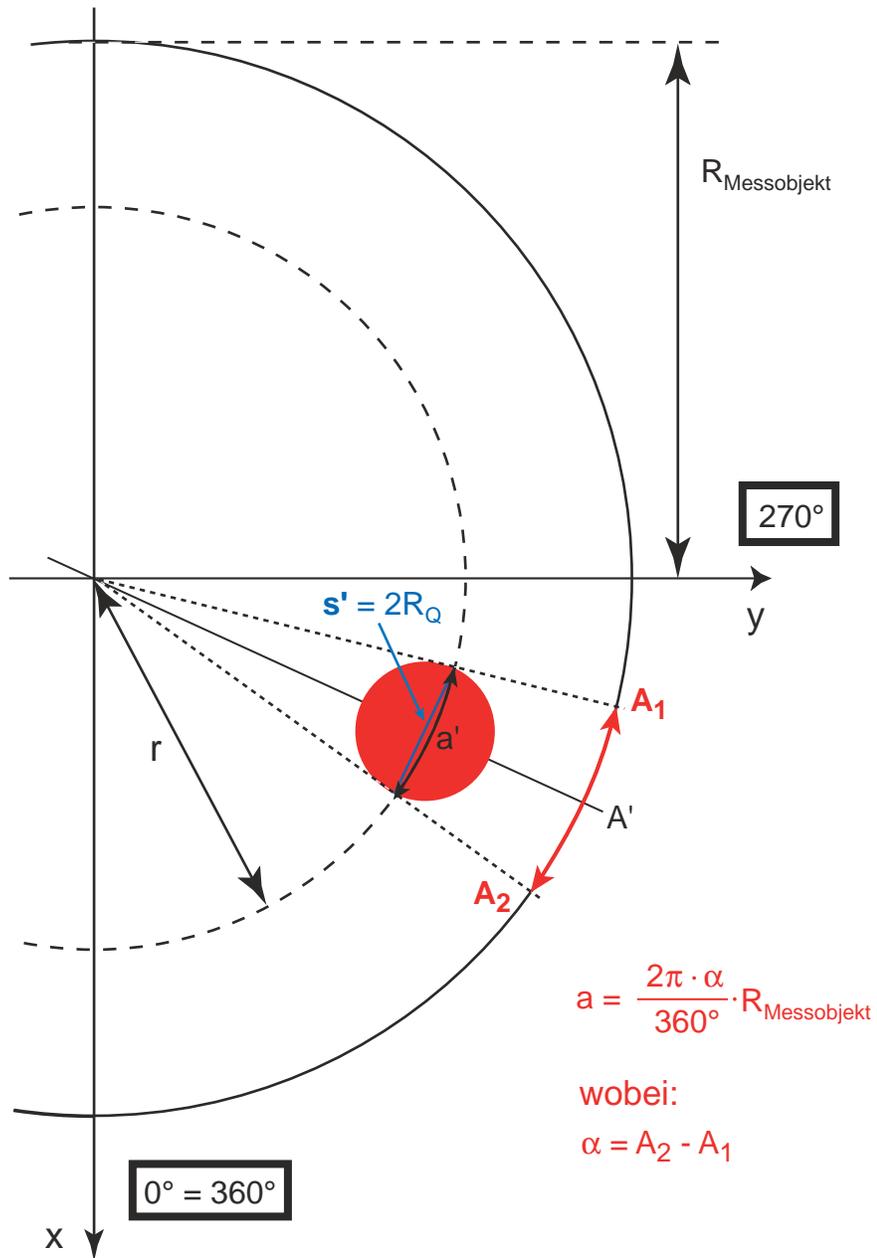


Abbildung 5.9: Zur Verdeutlichung der verwendeten Größensymbole.

**Tabelle 5.12:** Begrenzende Geometrie der Körper, die im virtuellen Untersuchungsobjekt die gemessene nicht-homogene Aktivitätsverteilung wiedergeben.

	$^{241}\text{Am}$	$^{152}\text{Eu}$
$E$	59,5 keV	1408,0 keV
$C' = M_z$	89,9 mm	90,2 mm
$c$	148,2 mm	165,5 mm
$A' = M_\rho$	289,4°	297,2°
$\alpha$	77,2°	133,7°
$a$	206,2 mm	357,0 mm
$r_{\max}$	93,0 mm	78,7 mm
$R_{\max}^*$	58,0 mm	72,4 mm

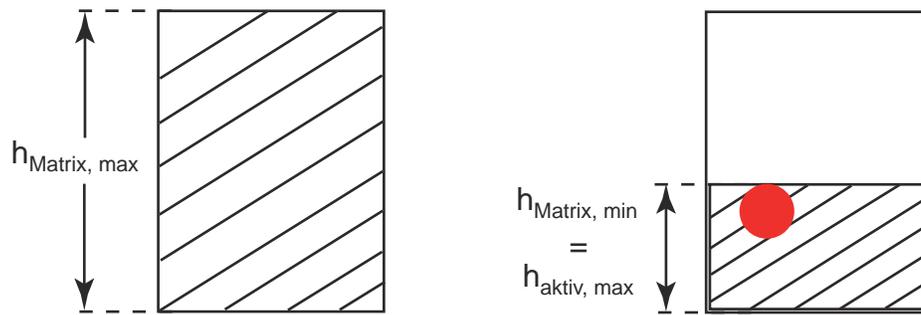
Zusätzlich muss das Untersuchungsobjekt mit inaktiver Matrix befüllt werden, wobei die Füllhöhe der inaktiven Matrix einen Wert zwischen den beiden im Folgenden aufgeführten Grenzwerten (siehe dazu Abb. 5.10) annehmen kann.

- Das Untersuchungsobjekt ist vollständig und homogen mit inaktiver Matrix befüllt. Für die Dichte der inaktiven Matrix ergibt sich damit der kleinste mögliche Wert  $\rho_{\text{Matrix},\min}$ , der außerdem der Bedingung aus Gl. 5.11 genügen muss.
- Die inaktive Matrix reicht bis zu der Höhe, in der noch Aktivität gemessen wird ( $h_{\text{aktiv},\max}$  in Abb. 5.10). Damit ergibt sich für die Dichte der maximal mögliche Wert  $\rho_{\text{Matrix},\max}$ .

$$h_{\text{aktiv},\max} = h_{\text{Matrix},\min} = \begin{cases} C' + \frac{c}{2} & , \text{ für Ellipsoide} \\ C' + R_{\max}^* & , \text{ für Kugeln} \end{cases} \quad (5.31)$$

Analog den Ausführungen der Analyseschritte (1.) und (6.) im Abschnitt "Information aus Wägung" für das homogene Beispiel kann damit für die Dichte einer homogen verteilten inaktiven Matrix das Intervall  $[\rho_{\text{Matrix},\min}; \rho_{\text{Matrix},\max}]$  berechnet werden; damit wird jeweils das Material und somit der lineare Schwächungskoeffizient der inaktiven Matrix bestimmt.<sup>(24)</sup>

<sup>(24)</sup>Der Einfachheit halber wird für das Beispiel nur jeweils die Dichte und somit der lineare Schwächungskoeffizient variiert, nicht aber das Material selbst.



**Abbildung 5.10:** Schematische Darstellung der beiden Extremfälle, wie die inaktive Matrix im Untersuchungsobjekt homogen verteilt werden kann: vollständig bis oben (links) und nur bis zu der Höhe, in der noch Aktivität gemessen wurde (rechts).

## 2. Potentiell mögliche Modelle für die Objektzusammensetzung

Die theoretisch möglichen Modelle für das virtuelle Untersuchungsobjekt ergeben sich aus der Kombination der folgenden Parameter, für die jeweils die mögliche Bandbreite aus den vorhandenen Informationen ermittelt wurde:

- Füllhöhe und mittlere Dichte einer homogen verteilten inaktiven Matrix
- radiale Position der Radionuklidkonzentration
- Ausdehnung der Radionuklidkonzentration

Analog den entsprechenden Ausführungen für das homogene Beispiel entscheidet jeweils der Vergleich von simulierter und zugehöriger gemessener Zählratenverteilung über jedes theoretische Modell: Modelle, für die die in Gl. 5.9 eingeführte Bedingung erfüllt ist, werden als potentielle Möglichkeit der Objektzusammensetzung bewertet; alle anderen Modelle werden verworfen.

Aufgrund der nötigen Rechenzeit wird man in der Praxis nicht jede theoretisch mögliche Variante für ein Modell betrachten. Man wird für jeden Parameter eine Schrittweite<sup>(25)</sup> definieren, mit der Werte aus den jeweils erlaubten Bandbreiten der Parameter ausgewählt und miteinander zu einem Modell kombiniert werden. Dieses Vorgehen wird anhand des vorliegenden Beispiels erläutert, wobei aus Gründen der Übersicht folgende Einflüsse getrennt voneinander untersucht werden:

<sup>(25)</sup>Die Schrittweite für die einzelnen Parameter wird man entsprechend der zur Verfügung stehenden Rechenzeit wählen müssen. In der Praxis empfiehlt sich, in einem ersten Simulationsdurchgang mit einer großen Schrittweite die erlaubten Intervalle für einzelne Parameter einzuschränken und in folgenden Durchgängen eine kleinere Schrittweite zu wählen, um die wahrscheinlichsten Kombinationen der Parameter zu finden.

- der Einfluss der Dichte der inaktiven Matrix unter dem Einsatz der tatsächlich vorliegenden Geometrie-Daten der Quelle, d. h. ihre Ausdehnung und Position. Die theoretisch möglichen Grenzen für die Dichte der inaktiven Matrix werden aus den beiden Extremfällen für die Füllhöhe der inaktiven Matrix für beide Radionuklide  $^{241}\text{Am}$  und  $^{152}\text{Eu}$  ermittelt. Durch Variation der Dichte der inaktiven Matrix in Schritten von  $0,1\text{ g/cm}^3$  werden die unterschiedlichen virtuellen Untersuchungsobjekte erzeugt.
- der Einfluss der radialen Position der Quelle unter dem Einsatz der tatsächlichen Ausdehnung der Quelle sowie der tatsächlichen Dichte der inaktiven Matrix. Das theoretisch erlaubte Intervall für die radiale Position der Quelle ergibt sich dabei aus den als bekannt vorausgesetzten Abmessungen des Hauptobjekts. Die unterschiedlichen Modelle für das vorliegende Untersuchungsobjekt werden durch Variation der radialen Position in Schritten von 10 mm erzeugt.

Die Ergebnisse beider Untersuchungen sind in den Tabn. 5.13 und 5.14 zusammengestellt. Dabei sind für die Parameter *Dichte der inaktiven Matrix* und *radiale Position der Quelle* neben dem theoretisch erlaubten Intervall jeweils die entsprechenden Werte, für die das zugrunde gelegte Modell akzeptiert wurde, aufgeführt. Für das Nuklid  $^{152}\text{Eu}$  bleibt sowohl für die Dichte als auch für die radiale Position eine Bandbreite von potentiell möglich Werten übrig, die allerdings im Vergleich zum theoretisch möglichen Intervall erheblich eingeschränkt ist. Für das Nuklid  $^{241}\text{Am}$  werden nur Modelle akzeptiert, für die die tatsächlich vorliegenden Werte für Dichte und radiale Position eingesetzt waren. Für alle anderen Werte ist die Abweichung der simulierten Zählratenverteilung von der gemessenen zu groß.

**Tabelle 5.13:** Einfluss der Dichte der inaktiven Matrix bei bekannter Geometrie der Quelle: Radius der Quelle  $R = 30\text{ mm}$  und radiale Position (d. h. Abstand vom Mittelpunkt des Untersuchungsobjekts)  $r = 75\text{ mm}$ .

in $\text{g/cm}^3$	Dichte der inaktiven Matrix			
	theoretisch erlaubt		potentiell möglich	
	$\rho_{\min}$	$\rho_{\max}$	$\rho_{\min}$	$\rho_{\max}$
$^{241}\text{Am}$	1,0	2,2	1,6 <sup>a</sup>	
$^{152}\text{Eu}$	1,0	2,0	1,6 <sup>a</sup>	1,8

<sup>a</sup>Die tatsächlich vorliegende inaktive Matrix hat die Dichte  $1,6\text{ g/cm}^3$ .

Es zeigt sich, dass das Modell für eine räumlich konzentrierte Aktivitätsverteilung nur dann als potentiell möglich (gemäß Gl. 5.9) bewertet wird, wenn es dem tatsächlich

**Tabelle 5.14:** Einfluss der Position der Quelle bei bekannter Ausdehnung (Radius der Quelle  $R = 30$  mm) sowie Dichte der inaktiven Matrix ( $\rho_{\text{Matrix}} = 1,6$  g/cm<sup>3</sup>).

in mm	radiale Position			
	theoretisch erlaubt		potentiell möglich	
	$r_{\min}$	$r_{\max}$	$r_{\min}$	$r_{\max}$
<sup>241</sup> Am	30	120	75 <sup>a</sup>	
<sup>152</sup> Eu	30	120	70	75 <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Die tatsächlich vorhandene Quelle befindet sich 75 mm vom Zentrum des Untersuchungsobjekts entfernt.

vorhandenen Objekt sehr ähnlich ist. Für den Fall, eine perfekt dimensionierte Punktquelle in einer Matrix zu positionieren, für deren Dichte nur ein theoretisch erlaubtes Intervall zur Verfügung steht, sind in Tab. 5.15 die Aktivitätswerte gegenübergestellt, die sich nur für die akzeptierten Modelle ergeben, und daneben die Werte, die auf der Basis aller Modelle berechnet wurden.

**Tabelle 5.15:** Aktivitätsintervall für <sup>241</sup>Am und <sup>152</sup>Eu.

Basis		nur gültige Modelle		alle Modelle	
in Bq	$A_{\text{SOLL}}$	$A_{\min}$	$A_{\max}$	$A_{\min}$	$A_{\max}$
<sup>241</sup> Am	1,0E+08	1,0E+08		3,2E+07	2,0E+08
<sup>152</sup> Eu	5,0E+06	5,0E+06	5,5E+06	3,5E+06	6,1E+06

### 3. Sonderfälle

Für das vorliegende Beispiel werden verschiedene Möglichkeiten von zusätzlichen Abschirmbehältern im Untersuchungsobjekt betrachtet, die auf den grundsätzlichen Ideen aus Abschnitt 5.2.1 (siehe Analyseschritt (9.) der Ausführungen zu "Information aus Wägung") basieren:

- In das virtuelle Untersuchungsobjekt wird ein zusätzlicher "großer" zylindrischer Behälter aus Grauguss eingestellt (Fall 1 und 2). Sein Außendurchmesser soll dem Innendurchmesser des Untersuchungsobjekts entsprechen.
- Im virtuellen Untersuchungsobjekt befindet sich ein kleiner zylindrischer Abschirmbehälter aus Blei, der die Aktivität in idealer Weise umschließt (Fall 3

und 4). Seine Position ist durch die radiale Position der tatsächlich vorliegenden Quelle vorgegeben.

Für beide Abschirmmaterialien werden jeweils die folgenden grundsätzlich verschiedenen Varianten betrachtet:

- Neben dem Abschirmmaterial befindet sich keine weitere inaktive Matrix im Untersuchungsobjekt.
- Neben dem Abschirmmaterial befindet sich zusätzlich die tatsächlich vorliegende inaktive Matrix (Sand mit  $\rho_{\text{Matrix}} = 1,6 \text{ g/cm}^3$ ) im Untersuchungsobjekt.

Zusammen mit den tatsächlich vorliegenden Geometrie-Daten der Quelle (Ausdehnung und radiale Position), die zur Berechnung der Aktivität eingesetzt werden, und der vereinfachenden Annahme, dass die zusätzlichen Abschirmbehälter jeweils überall die selbe Wandstärke haben sollen, werden deren Abmessungen mit Hilfe von Gl. 5.14 berechnet; sie sind in Tab. 5.16 zusammengestellt.

**Tabelle 5.16:** Die vier betrachteten Modelle für eine Abschirmung im virtuellen Untersuchungsobjekt.

	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
Material	Grauguss	Grauguss	Blei	Blei
zusätzliche inaktive Matrix	keine <sup>a</sup>	im Abschirmbehälter	keine <sup>a</sup>	Abschirmbehälter darin eingebettet
Wandstärke in mm	7,7	5,0 <sup>b</sup>	42,0	21,2
Höhe in mm	360,0	155,4	144,0	102,4

<sup>a</sup>Der damit entstehende Fall, dass die Aktivität bzw. der zusätzliche Abschirmbehälter im Untersuchungsobjekt "schwebt", ist in der Praxis nur äußerst selten zu erwarten.

<sup>b</sup>Für größere Wandstärken (z. B. 10 mm bzw. 20 mm) berechnen sich zulässige Höhe für den Abschirmbehälter (114,0 mm bzw. 66,8 mm), die unterhalb der Höhe liegen, bis zu der die tatsächlich vorliegende Punktquelle reicht (120 mm).

Der starke Anstieg des linearen Schwächungskoeffizienten  $\mu$  fast aller Materialien bei niedrigen Energien (z. B. für Blei:  $\mu(50 \text{ keV}) = 91,3 \text{ cm}^{-1}$  und  $\mu(1400 \text{ keV}) = 0,6 \text{ cm}^{-1}$ ) erklärt, dass für  $^{241}\text{Am}$  mit einer Gamma-Energie von 59,5 keV keine Impulse außerhalb des Bleibehälters gemessen werden. Somit kann zumindest für  $^{241}\text{Am}$  eine Abschirmung aus Blei ausgeschlossen werden. Die Modelle, in denen neben dem Abschirmmaterial keine weitere inaktive Matrix im Untersuchungsobjekt vorliegt (Fall 1 und 3), können

für beide Radionuklide ebenfalls ausgeschlossen werden, da sie nicht mit den vorhandenen Informationen (insbesondere mit der gemessenen Impulsverteilung) verträglich sind. Für das Beispiel der Grauguss-Abschirmung ist die Impulsverteilung für beide Radionuklide in der Höhe, in der die Aktivitätskonzentration vorliegt, graphisch in Abb. 5.11 dargestellt. Beim Vergleich zwischen gemessener und simulierter Verteilung wird deutlich, dass die Abschirmung alleine (ohne zusätzliche inaktive Matrix) die Punktquelle in Rückwärtsrichtung (d. h.  $180^\circ$  vom Maximum der Verteilung entfernt) zu wenig abschirmt. Jede Änderung der Abmessungen des Abschirmbehälters selbst führt zum gleichen Ergebnis. Erst die Befüllung des Untersuchungsobjekts mit zusätzlicher Matrix (Fall 2 und 4) liefert zumindest für  $^{152}\text{Eu}$  jeweils Modelle, die akzeptiert werden. Die dabei berechneten Aktivitäten sind in Tab. 5.17 aufgeführt. Der Fall 2 (Grauguss-Abschirmung zusätzlich gefüllt mit der inaktiven Matrix Sand) ist für das Radionuklid  $^{152}\text{Eu}$  in Abb. 5.12 dargestellt.

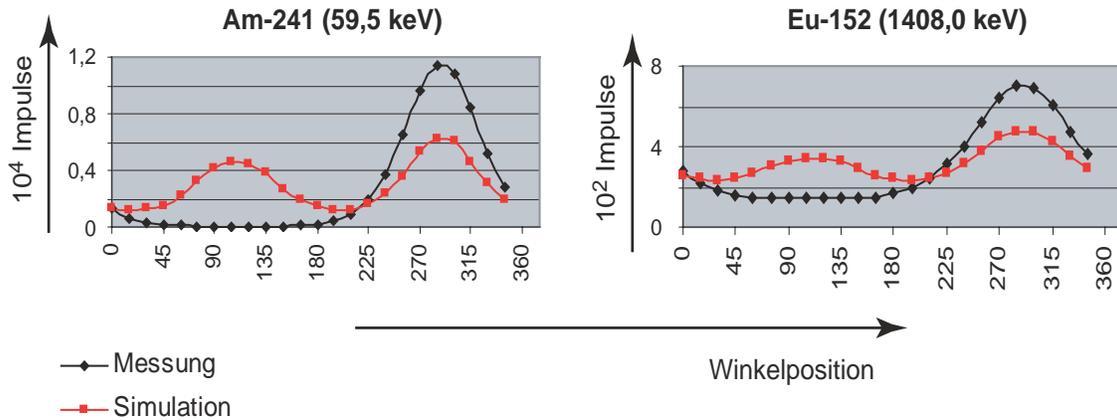
**Tabelle 5.17:** Berechnete Aktivitäten für  $^{152}\text{Eu}$  auf der Basis von akzeptierten Objektmodellen mit zusätzlichen Abschirmstrukturen.

Material	Grauguss Fall 2	Blei Fall 4
Dichte	7,0 g/cm <sup>3</sup>	11,4 g/cm <sup>3</sup>
$A_{\text{SOLL}}/ \text{Bq}$	A/ Bq	
5,0E+06	5,8E+06	1,6E+07

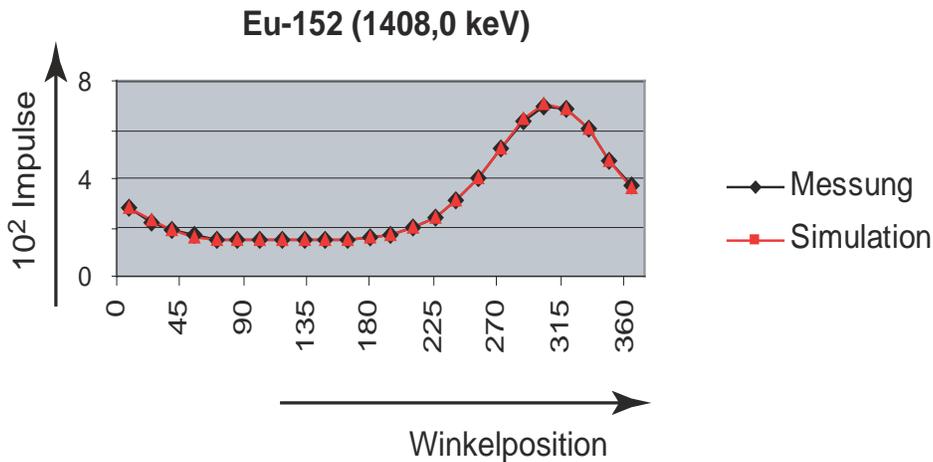
#### 4. Aktivitätsintervall

Alle Aktivitätswerte, die sich auf der Basis von potentiell möglichen Modellen berechnen lassen, werden zu einem Intervall  $[A_{\text{min}}; A_{\text{max}}]$  zusammengefasst, das den Vertrauensbereich für die Aktivität im Untersuchungsobjekt festlegt. Da keines der akzeptierten Modelle bevorzugt wird, wird als Erwartungswert der Aktivität der Mittelwert aller Aktivitätswerte berechnet.

Für das betrachtete Beispiel liegt das Endergebnis nicht vor, da die *automatische* Erzeugung unterschiedlicher Modelle und damit verbunden die Ermittlung der jeweiligen Aktivitäten noch nicht vollständig zur Verfügung steht.



**Abbildung 5.11:** Vergleich der gemessenen Impulsverteilung mit der simulierten in der Höhe, in der die Punktquelle platziert ist; für die Simulation wurde im ganzen Untersuchungsobjekt eine Abschirmung aus Grauguss mit der Wandstärke 7,7mm angenommen, innerhalb derer sich keine weitere inaktive Matrix befindet (entspricht dem Fall 1).



**Abbildung 5.12:** Vergleich der gemessenen Impulsverteilung mit der simulierten analog zu Abb. 5.11. Innerhalb der Abschirmung aus Grauguss (mit der Wandstärke 7,7mm) befindet sich zusätzlich die inaktive Matrix Sand (entspricht dem Fall 2).

## Keine Information

Liegt zur Charakterisierung des Untersuchungsobjekts nur eine SGS-Messung sowie äußere Abmessungen des Objekts vor, so wird die Aktivitätsbestimmung der identifizierten Radionuklide prinzipiell genauso durchgeführt wie im vorhergehenden Abschnitt "Information aus Wägung" detailliert beschrieben. Der Unterschied dazu besteht allerdings in der größeren Bandbreite für den Dichtewert der inaktiven Matrix. Die Zahl der theoretisch möglichen Modelle, um das Untersuchungsobjekt darzustellen, wird demnach erheblich größer. Jeweils der Vergleich von simulierter mit gemessener Zählratenverteilung erlaubt die Bewertung eines Modells. Man wird die Auswertung unter den Umständen, dass keine Information über die inaktive Matrix vorliegt, ebenfalls mit der Variante einer im gesamten Untersuchungsobjekt homogen verteilten inaktiven Matrix mit einer mittleren Dichte  $\rho_{\text{Matrix}}$  beginnen und im Weiteren den Befüllungsgrad schrittweise verringern. Die Rechenzeit zur Ermittlung des Aktivitätsintervalls für diesen Fall, dass keine zusätzliche Information zum Inhalt des Messobjekts vorliegt, ist wegen der sehr großen Zahl an zu betrachtenden theoretischen Möglichkeiten so groß, dass empfohlen wird, die Auswertung einer vorliegenden SGS-Messung nur zu beginnen, wenn zusätzlich wenigstens eine Wägung des Untersuchungsobjekts zur Verfügung steht.<sup>(26)</sup>

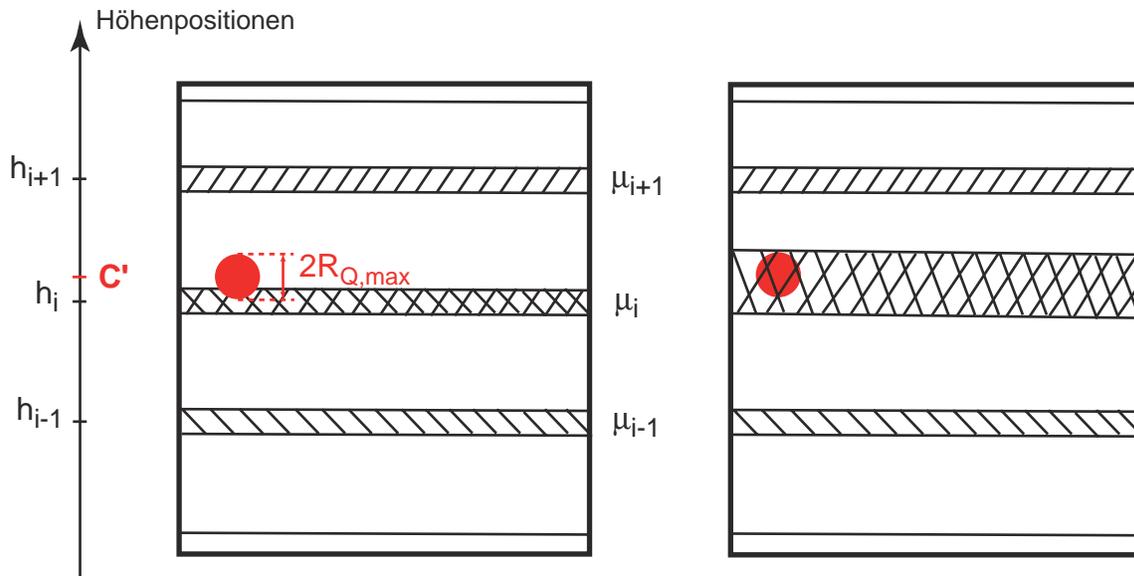
## Information aus Einfacher Transmissionsmessung

Im Folgenden wird schematisch erläutert, wie die Aktivitätsintervalle von Radionukliden, die in einem Untersuchungsobjekt identifiziert wurden, auf der Grundlage der Messergebnisse eines SGS und einer Einfachen Transmissionsmessung ermittelt werden können. Es werden dabei keine Aktivitätswerte berechnet, sondern nur das prinzipielle Vorgehen erläutert.

Das virtuelle Untersuchungsobjekt (siehe Analyseschritt (0.) in "Information aus Wägung" in Abschnitt 5.2.1) muss entsprechend der vorliegenden Informationen mit inaktiver Matrix und mit Radionukliden besetzt werden. Wie für das homogene Beispiel in den Analyseschritten (1.) und (2.) im Abschnitt "Information aus Einfacher Transmission" ausführlich dargestellt, werden die Parametersätze, mit denen Matrixeigenschaften einzelner Bereiche in einem zylindrischen Untersuchungsobjekt beschrieben werden, mit den Abmessungen des Hauptobjekts verglichen und gegebenenfalls daran angepasst, um das virtuelle Untersuchungsobjekt mit einzelnen Körpern, die die inaktive Matrix repräsentieren, zu besetzen. Zusätzlich zu den Annahmen, die schon für

---

<sup>(26)</sup>Nahezu alle kommerziell vertriebenen Gamma-Scan-Messsysteme sind mit einer integrierten Wägeeinheit ausgestattet.



**Abbildung 5.13:** Schematische Darstellung der Annahme, die in 1. Näherung über die Ausdehnung von Materieschichten, in denen sich Aktivität befindet, gemacht werden kann.

das homogene Beispiel aufgestellt wurden, kann – so lange keine andere Information vorliegt – vereinfachend folgende Vereinbarung getroffen werden: eine Punktquelle soll sich immer vollständig in einer Materieschicht befinden. So kann auch für den Fall, dass sich die inaktive Matrix in einem Untersuchungsobjekt aus mehreren Materialien mit unterschiedlichen linearen Schwächungskoeffizienten zusammensetzt, eine erste Näherung für die Ausdehnung der Materieschichten, in denen sich Aktivität befindet, angenommen werden. Dieser Sachverhalt ist schematisch in Abb. 5.13 dargestellt. Bei der Bestimmung der Ausdehnung  $\Delta h_i$  aller einzelnen Materieschichten muss außerdem folgende Bedingung erfüllt sein:

$$\begin{aligned} m_{\text{Matrix}} &= m_{\text{brutto}} - m_{\text{leer}} & (5.32) \\ &= \sum_i \bar{\rho}_i \cdot V_i = \sum_i \left( \frac{\bar{\mu}_i}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{E_\gamma}} \right) \cdot \left( R_{\text{innen}}^2 \cdot \pi \cdot \Delta h_i \right) \end{aligned}$$

wobei:  $\Delta h_i \in [h_{i,\text{min}}; h_{i,\text{max}}]$  und  $h_{i,\text{max}} = h_{i+1,\text{min}}$

Außer die Ausdehnung der einzelnen Materieschichten, deren mittlerer Schwächungskoeffizient  $\bar{\mu}_i$  jeweils in Form der Messergebnisse vorliegt, können die Geometrie-Parameter<sup>(27)</sup> der identifizierten Punktquelle (radiale Position sowie Ausdehnung) innerhalb ihrer erlaubten Bandbreiten variiert werden. Die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten dieser Parameter ergeben die unterschiedlichen Objektzusammensetzun-

<sup>(27)</sup>Der Einfluss nicht genau bekannter Geometrie-Daten einer Quelle wurde im Abschnitt "Information aus Wägung" detailliert untersucht.

gen, die durch Simulation und Vergleich der jeweiligen Zählratenverteilung bestätigt werden müssen.

Die Erfahrungen aus dem Abschnitt "Information aus Wägung" für eine Punktquelle zeigen, dass eine Abschirmung ohne zusätzliche inaktive Matrix eine Punktquelle zu wenig abschirmt (siehe Abb. 5.11). Bei der Kombination von Abschirmmaterial ( $\mu_{\text{Abschirm}}$ ) und zusätzlicher inaktiver Matrix ( $\mu_{\text{Matrix}}^*$ ) müssen gleichzeitig die beiden in Abschnitt 5.2.1 erstmals aufgeführten Bedingungen (Gln. 5.22 und 5.23) erfüllt sein.

Analog der vorherigen Abschnitte berechnet sich die Gesamtaktivität für das Untersuchungsobjekt aus den Aktivitätswerten, die für alle gültigen Modelle ermittelt werden. Sie werden zu einem Intervall  $[A_{\text{min}}; A_{\text{max}}]$  zusammengefasst, innerhalb dem sich der Erwartungswert für die Gesamtaktivität im ganzen Untersuchungsobjekt befindet.

### Information aus Digitaler Radiographie

Im Folgenden werden die einzelnen Analyseschritte prinzipiell dargestellt, die für die Bestimmung des Aktivitätsintervalls identifizierter Radionuklide in einem Untersuchungsobjekt nötig sind, wenn zusätzlich zu den Ergebnissen einer SGS-Messung noch die Ergebnisse einer DR zur Verfügung stehen. Für ein Beispiel, für das die Auswertung durchgeführt wird, sei auf Kapitel 6 verwiesen.

Das virtuelle Untersuchungsobjekt (siehe Analyseschritt (0.) in "Information aus Wägung" Abschnitt 5.2.1) muss entsprechend der vorliegenden Parametersätze mit inaktiver Matrix und mit Radionukliden besetzt werden. Zur Beschreibung der inaktiven Matrix im virtuellen Untersuchungsobjekt dienen Parametersätze von Körpern einfacher geometrischer Form (für detaillierte Ausführungen sei auf den Abschnitt "Informationen aus Digitaler Radiographie" des homogenen Beispiels verwiesen), über deren Tiefenposition innerhalb des Hauptobjekts vorerst keine Aussage getroffen werden kann.<sup>(28)</sup> Die Besetzung des Hauptobjekts mit Radionukliden erfolgt mit Hilfe der Parametersätze für Ellipsoide aus dem SGS (siehe dazu Analyseschritt (1.) im Abschnitt "Information aus Wägung"). Generell wird dabei jedem Körper die Materialeigenschaft der ihn umgebenden Matrix zugeordnet.

Durch die Kombination folgender Parameter, für die im entsprechenden Parametersatz jeweils eine mögliche Bandbreite festgelegt ist, können alle theoretisch möglichen Modelle zur Darstellung des Untersuchungsobjekts gebildet werden:

- die Position in der Tiefe der im Untersuchungsobjekt identifizierten Strukturen
- die radiale Position der identifizierten Punktquelle

---

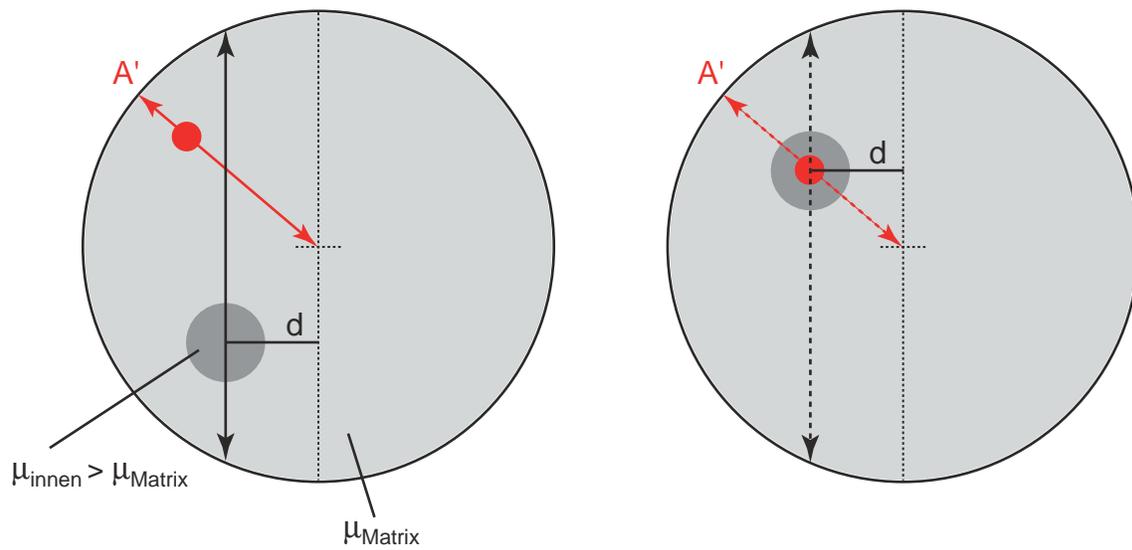
<sup>(28)</sup>Natürlich müssen sich diese einzelnen Körper innerhalb des Untersuchungsobjekts befinden.

- die Ausdehnung der Punktquelle

Durch die schematische Korrelation der Körper, die die Verteilung der inaktiven Matrix sowie der Radionuklide beschreiben, können auf der Basis von Erfahrungen aus der Routinekontrolle radioaktiver Abfälle Spezialfälle analog z. B. Analyseschritt (3.) in "Information aus Wägung" konstruiert werden, wie im Folgenden exemplarisch erläutert.

Wenn aus den Ergebnissen der DR-Messung hervorgeht, dass sich innerhalb der Höhe, in der die SGS-Messung eine räumlich konzentrierte Aktivitätsverteilung festgestellt hat, ein Objekt befindet, dessen linearer Schwächungskoeffizient größer ist als der seiner unmittelbaren Umgebung, so ist die Annahme eines zusätzlichen Behälters zur effektiven Abschirmung von Aktivität – im Folgenden mit *Abschirmbehälter* bezeichnet – berechtigt. Damit könnten die Abmessungen des aktivitätstragenden Körpers sowie dessen Position im Untersuchungsobjekt mit der Ausdehnung des Abschirmbehälters sowie dessen Position korreliert werden. In Abb. 5.14 ist dieser Sachverhalt schematisch dargestellt. Aus dem Ergebnis einer SGS-Messung kann die Position in Winkelrichtung ( $A'$ ) einer Punktquelle, nicht aber deren radiale Position  $r$  ermittelt werden. Die DR kann die horizontale Position  $d$  einer im Untersuchungsobjekt identifizierten Struktur, nicht aber deren Lage in der Tiefe bestimmen. Durch Korrelation der freien Parameter kann das Modell, in dem sich die vorliegende Punktquelle vollständig innerhalb des zusätzlichen Abschirmbehälters befindet, erzeugt werden; der Radius der Quelle würde entsprechend an die Abmessungen des Abschirmbehälters angepasst. Dieses Modell ist mit den Erfahrungen aus der Praxis verträglich, muss aber trotzdem durch Simulation und Vergleich der Zählratenverteilungen bestätigt werden.

Analog der vorherigen Abschnitte werden alle – für gültige Modelle – berechneten Aktivitätswerte zu einem Intervall  $[A_{\min}; A_{\max}]$  zusammengefasst, innerhalb dem sich die Gesamtaktivität für das ganze Untersuchungsobjekt befindet, die aufgrund der in die Analyse eingegangenen Informationen ermittelt werden konnte.



**Abbildung 5.14:** Schematische Darstellung der Messergebnisse eines SGS und einer DR an einem Untersuchungsobjekt (links) und die Kombination beider (nicht exakt vorliegender) Ergebnisse zu einem virtuellen Untersuchungsobjekt (rechts).

# Kapitel 6

## Experimenteller Teil

### 6.1 Gamma-Detektor

Die Aktivitätsbestimmung beruht auf dem Prinzip, aus verfügbaren Informationen mögliche Modelle für das Untersuchungsobjekt abzuleiten und dafür die entsprechende segmentierte Gamma-Scan-Messung (SGS-Messung) durch Simulation zu erzeugen. Der anschließende Vergleich mit dem Ergebnis der entsprechenden Messung entscheidet über die Gültigkeit eines Modells. Für alle akzeptierten Modelle werden die jeweiligen Aktivitätswerte bestimmt, die zusammen das Ergebnis der Aktivitätsbestimmung auf der Basis der vorliegenden Informationen bilden.

Ein wichtiger Bestandteil der Simulation ist die Berücksichtigung der Energie- und ortsabhängigen Detektoreffizienz. Dies erfolgt ebenfalls durch Simulation. Das Modul dazu wurde von FZJ<sup>(1)</sup> entwickelt. Für detaillierte Angaben dazu sei auf [15] verwiesen.

#### 6.1.1 Beschreibung

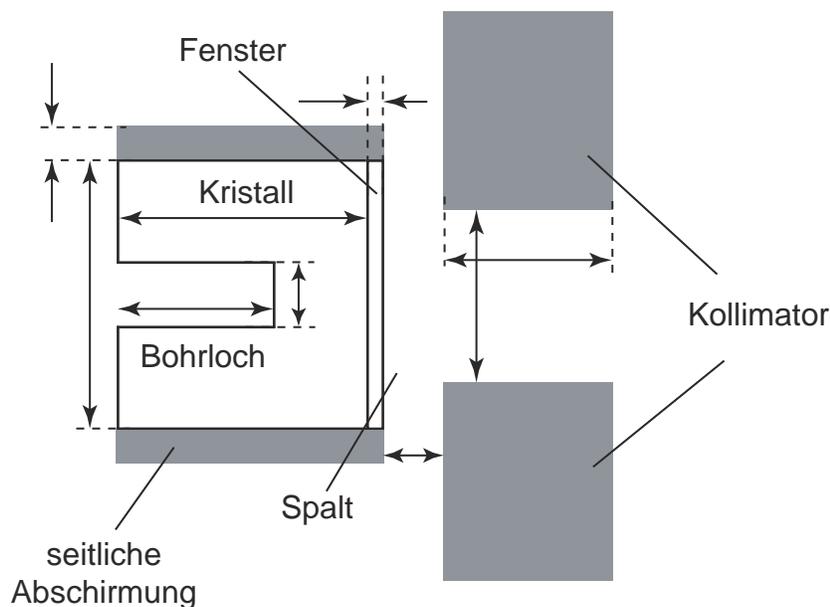
Die SGS-Messung am Untersuchungsobjekt, das im nächsten Abschnitt behandelt wird, wurde mit einem hochauflösenden Germanium-Detektor (HPGe-Detektor) mit einem zylinderförmigen Blei-Kollimator durchgeführt. Das verwendete Detektorsystem ist schematisch in Abb. 6.1 skizziert und die Abmessungen in Tab. 6.1 zusammengestellt.

#### 6.1.2 Simulation

Die Simulation des verwendeten Detektorsystems liefert dessen intrinsische Effizienz auf einem geeigneten räumlichen Raster abhängig von der Energie einfallender Gamma-Strahlen. Diese Berechnung muss für ein vorhandenes Detektorsystem nur einmalig

---

<sup>(1)</sup>Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik, Forschungszentrum Jülich GmbH.



**Abbildung 6.1:** Schematische Darstellung des verwendeten Detektorsystems für die SGS-Messung.

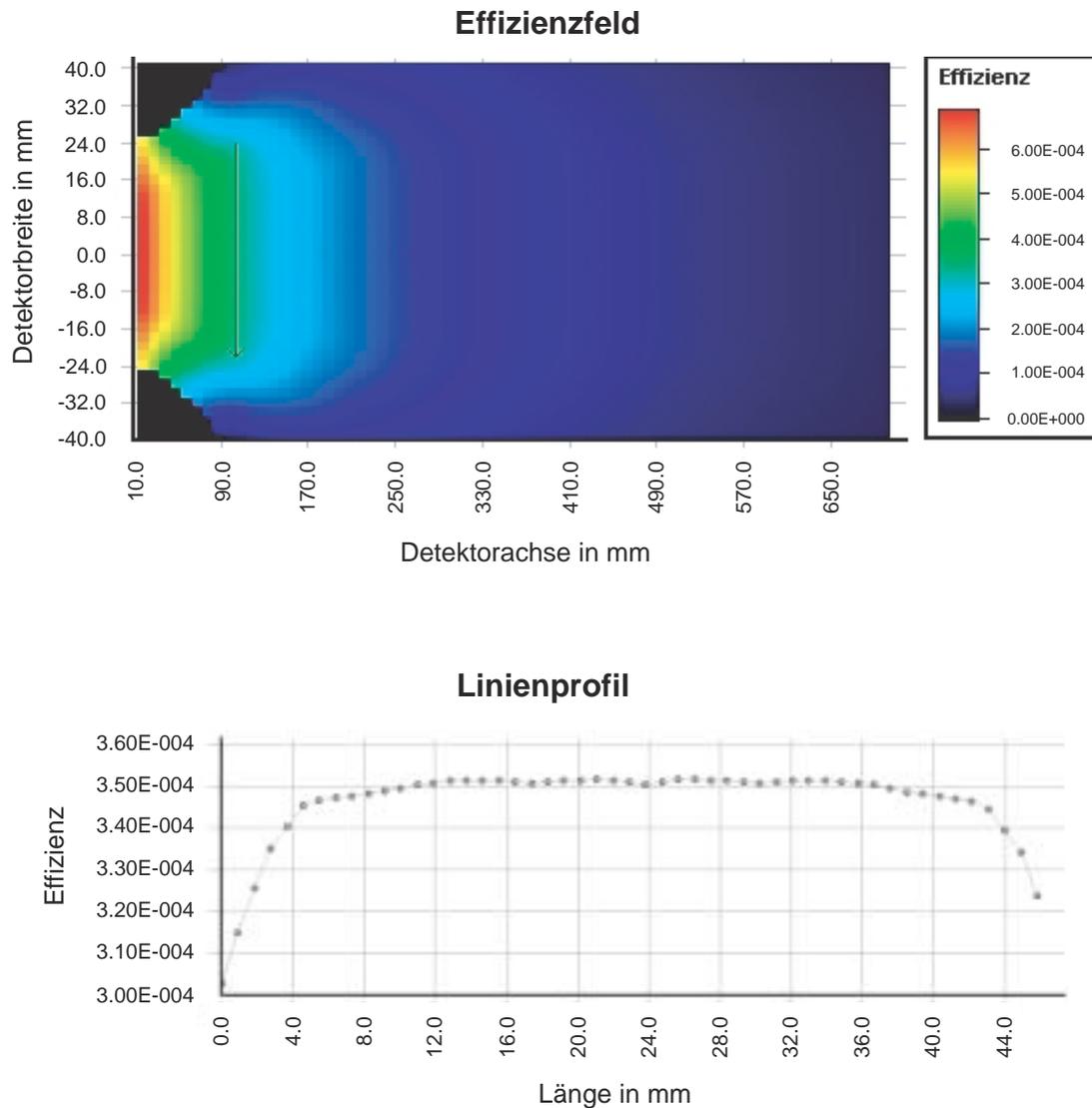
durchgeführt werden. Das Ergebnis der Simulationsrechnung des hier verwendeten Detektorsystems zeigt Abb. 6.2. Für die Erzeugung der simulierten Zählratenverteilungen eines virtuellen Untersuchungsobjekts werden die intrinsischen Effizienzwerte für beliebige Energien und Raumpunkte durch Interpolation zwischen den berechneten Werten ermittelt.

## 6.2 Fass mit Bleibehälter

Die in den Kapiteln 4 und 5 ausführlich dargestellten Methoden zur Auswertung und Aktivitätsbestimmung eines Messobjekts werden im Folgenden an einem komplexen Untersuchungsobjekt angewendet. Es werden die zur Verfügung stehenden Informationen aufgelistet, die Auswertung der vorliegenden Messergebnisse dargestellt und das resultierende Aktivitätsintervall mit dem "traditionell" berechneten Aktivitätswert verglichen.

### 6.2.1 Zur Verfügung stehende Informationen

Das Untersuchungsobjekt ist ein 280 L-Rollsickenfass, dessen Abmessungen in Tab. 6.2 zusammengestellt sind. An dem Objekt wurden folgende Messungen, deren Ergebnisse in der Auswertung berücksichtigt werden, durchgeführt:



**Abbildung 6.2:** Ergebnis der berechneten absoluten Effizienz für das verwendete Detektorsystem. Oben: zweidimensionale Farbdarstellung der absoluten Effizienzverteilung und unten: Linienprofile für einen horizontalen Schnitt durch die Effizienzverteilung (schwarze Linie im Farbfeld).

**Tabelle 6.1:** Informationen über das verwendete Detektorsystem für die SGS-Messung.

<b>Detektor</b>	
Typ	Koaxial
relative Effizienz	33 %
Material Kristall	Germanium ( $\rho = 5,35 \text{ g/cm}^3$ )
Kristalllänge	64 mm
Kristalldurchmesser	60 mm
Bohrlochdurchmesser	10 mm
Bohrlochtiefe	48 mm
Material seitliche Abschirmung	Aluminium ( $\rho = 2,3 \text{ g/cm}^3$ )
seitliche Abschirmung	3,325 mm
Material Fenster	Aluminium
Fensterdicke	0,5 mm

<b>Kollimator</b>	
Material	Blei ( $\rho = 11,4 \text{ g/cm}^3$ )
Typ	Zylinder
Länge	200 mm
Durchmesser	40 mm

**Tabelle 6.2:** Zur Verfügung stehende Informationen über den äußeren (sichtbaren) Behälter des Untersuchungsobjekts.

Außendurchmesser	659 mm
Innendurchmesser	655 mm
Wandstärke	2 mm
Höhe innen	966 mm
Stärke des Bodens	4 mm
Außendurchmesser des Deckels	736 mm
Stärke des Deckels	27 mm
Leermasse des Objekts	125 kg

- Wägung mit der im Mobilien Gamma-Scanner [3] integrierten Wägeinheit
- SGS-Messung (Vielfachscheiben-Scan) mit dem Mobilien Gamma-Scanner (Detektor ist schematisch in Abb. 6.1 gezeigt.)
- Digitale Radiographie (DR) mit dem Integrierten Tomographie-System [3]

### Wägung

Die Wägung des Untersuchungsobjekts ergab folgenden Wert:

$$m_{\text{brutto}} = (579 \pm 3) \text{ kg.}$$

### Vielfachscheiben-Scan

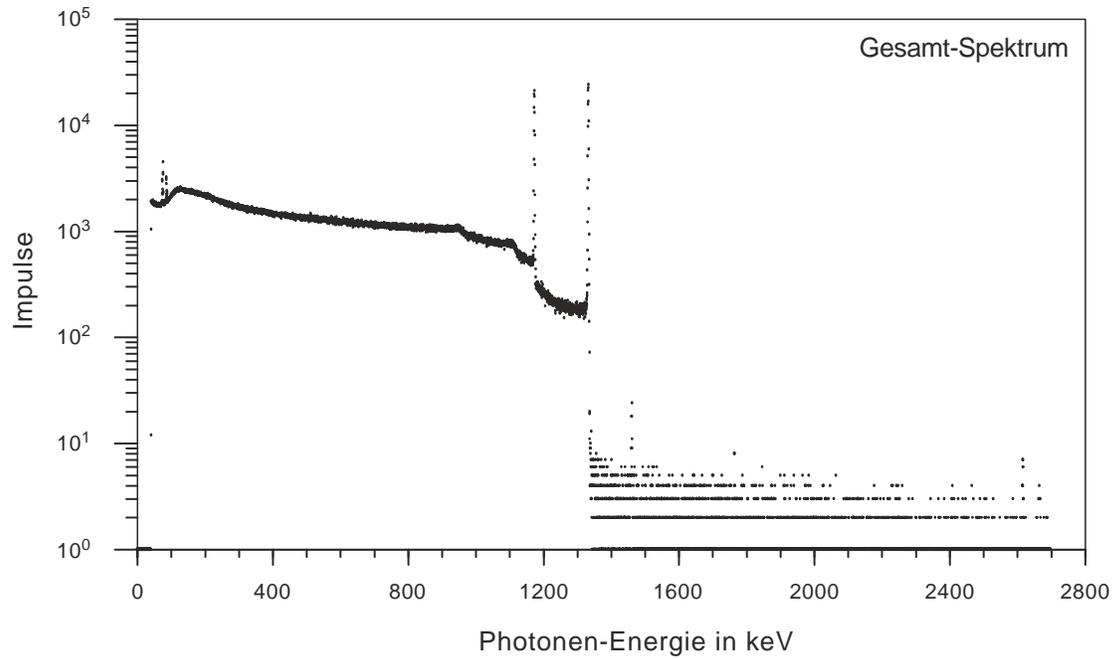
Mit dem Mobilien Gamma-Scanner wurde am Untersuchungsobjekt ein Vielfachscheiben-Scan durchgeführt. Die wichtigsten Parameter dazu sind in Tab. 6.3 zusammengestellt. Die Auswertung des Summenspektrums dieser Messung (siehe

**Tabelle 6.3:** Zusammenstellung der wichtigsten Parameter der SGS-Messung.

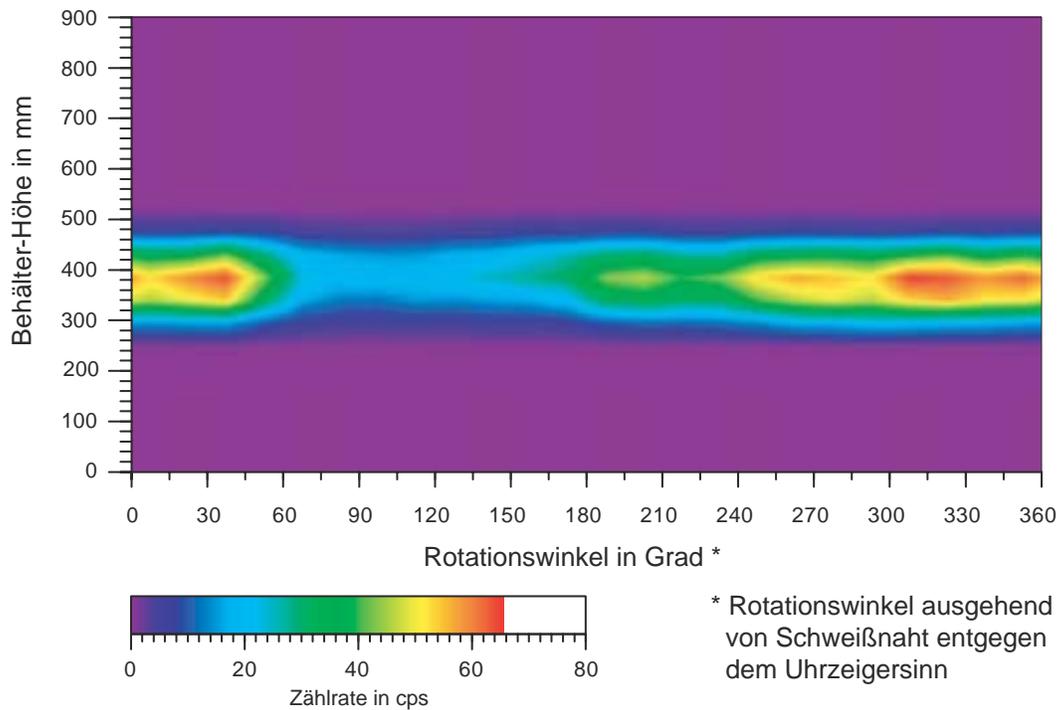
Messdatum	25.08.1998
Messobjekt	280 L-Overpack
Detektortyp	MGS <sup>a</sup> -Detektor
Kollimatordurchmesser	40 mm
Abstand Detektor–Drehachse	700 mm
Messmodus	Vielfachscheiben-Scan
Anzahl Höhenpositionen	20
vertikale Auflösung	47,4 mm
Anzahl Winkel-Sektoren	24
Winkelauflösung	15°
Gesamt-Messzeit	21353 s
Messzeit pro Messposition	45 s

<sup>a</sup>Mobiler Gamma-Scanner

Abb. 6.3) ergibt, dass im Untersuchungsobjekt nur das Nuklid <sup>60</sup>Co nachweisbar ist. Die anderen identifizierten Nuklide stammen aus der Umgebungsstrahlung bzw. aus Reaktionen mit den Abschirm- oder Kollimatormaterialien des Detektors. Alle identifizierten Nuklide sind in Tab. 6.4 aufgeführt. Für die Energielinie 1332,50 keV des Nuklids <sup>60</sup>Co wurde eine Oberflächenzählratenverteilung erstellt, die in Abb. 6.4 dargestellt ist.



**Abbildung 6.3:** Summenspektrum des Vielfachscheiben-Scans am vorliegenden Untersuchungsobjekt.



**Abbildung 6.4:** Oberflächenzählratenverteilung für die Energielinie 1332,50 keV des Radionuklids  $^{60}\text{Co}$ .

**Tabelle 6.4:** Im Summenspektrum der SGS-Messung identifizierten Nuklide.

Peaknummer	Energie in keV	Halbwertsbreite in keV	Nettoperakfläche in cts	Zuordnung
1	73,15	1,50	3751	Pb- $K_{\alpha_1}$
2	75,23	1,50	7490	Pb- $K_{\alpha_1}$
3	85,11	1,50	5192	Pb- $K_{\beta_1}$
4	1172,40	2,10	116867	$^{60}\text{Co}$
5	1332,50	2,20	142542	$^{60}\text{Co}$
6	1460,01	2,20	87	$^{40}\text{K}$
7	2615,41	2,50	51	$^{208}\text{Tl}$

### Digitale Radiographie-Messung

Mit dem Integrierten Tomographie-System wurde am Untersuchungsobjekt eine DR-Messung durchgeführt. Das resultierende Schattenbild zeigt Abb. 6.5. Seitlich am Untersuchungsobjekt wurden vor der Messung schmale Stäbe aus unterschiedlichen Materialien zu Kalibrationszwecken angebracht. Für die Auswertung der Messergebnisse wurde dieser Bereich ausgespart. Die wichtigsten Parameter der Messung sind in Tab. 6.5 zusammengestellt.

**Tabelle 6.5:** Zusammenstellung der wichtigsten Parameter der DR.

Messobjekt	280 L-Overpack
Transmissionsquelle	$^{60}\text{Co}$ ( $9,4 \cdot 10^{12}$ Bq) <sup>a</sup>
Detektorsystem	30 kollimierte Plastiksintillatoren mit Photomultipliern
Messmodus	1-Detektor-Schattenbild
Messbereich horizontal	992 mm
Anzahl horizontale Kanäle	512
horizontale Auflösung	19,4 mm/Pixel
Messbereich vertikal	992 mm
Anzahl vertikale Kanäle	512
vertikale Auflösung	19,4 mm/Pixel
Messzeit pro Pixel	0,2 s

<sup>a</sup>zum Zeitpunkt der DR-Messung



**Abbildung 6.5:** Schattenbild des Untersuchungsobjekts. Unterhalb des Gebindes ist ein Teil des Drehtellers zu erkennen. Zu Kalibrierzwecken werden vor einer DR-Messung am Untersuchungsobjekt jeweils verschiedene Körper mit bekannter Dichte angebracht. Im vorliegenden Schattenbild sind rechts am Gebinde die Kalibrierstäbe und auf dem Gebinde die Kalibrierzylinder aus Aluminium, Eisen und Blei (von rechts nach links) zu erkennen.

## 6.2.2 Auswertung der Messergebnisse

### Vielfachscheiben-Scan

Das Messergebnis der SGS-Messung, d. h. die Oberflächenzählratenverteilung der Energielinie 1332,50 keV, wird nach der Methode, die in Abschnitt 4.1 ausführlich vorgestellt wurde, ausgewertet. Das Ergebnis daraus wird in Form von Parameterdatensätzen angegeben, die dazu dienen, die Verteilung der Radionuklide im Untersuchungsobjekt zu beschreiben. Es wurde eine homogene Schicht (bestehend aus einer Höhenposition), sowie eine heterogene Schicht (bestehend aus zehn zusammenhängenden Höhenpositionen) gefunden.

Für den Parameterdatensatz der homogenen Schicht ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned}
 \text{PS}_{\text{Zylinder}} &= \left\{ E; \min(z_1), \max(z_1); \min(z_2), \max(z_2); \right. \\
 &\quad \left. \min(R_{\text{innen}}), \max(R_{\text{innen}}); \min(R_{\text{aussen}}), \max(R_{\text{aussen}}) \right\} \\
 &= \left\{ 1332, 50 \text{ keV}; 498 \text{ mm}, -; -, 545 \text{ mm}; 0, -; -, 286 \text{ mm} \right\}
 \end{aligned}$$

Für jede der fünf innerhalb der heterogenen Schicht identifizierten Aktivitätskonzentration ergeben sich im entsprechenden Parametersatz folgende Werte:<sup>(2)</sup>

$$\begin{aligned} \text{PS}_{\text{Ellipsoid}} &= \left\{ E; M_\varrho, \Delta M_\varrho; M_z, \Delta M_z; \alpha, \Delta\alpha; c, \Delta c; r, \Delta r; \text{Marker} \right\} \\ &= \left\{ 1332, 50 \text{ keV}; M_\varrho, \Delta M_\varrho; M_z, \Delta M_z; \alpha, \Delta\alpha; c, \Delta c; -, [0; 286 \text{ mm}]; - \right\} \end{aligned}$$

Die Werte der übrigen Parameter werden individuell für jedes Ellipsoid in tabellarischer Form (siehe Tab. 6.6) angegeben.

**Tabelle 6.6:** Parameter der in der heterogenen Schicht identifizierten Aktivitätskonzentrationen sortiert nach abnehmender Impulszahl integriert über die Fläche des jeweiligen Peaks.

Ellipsoid für	Mittelpunkt des Ellipsoids			
Peak-Nr.	$M_\varrho$	$\Delta M_\varrho$	$M_z$	$\Delta M_z$
	jeweils in °		jeweils in mm	
1	332,6	[330,0; 335,0]	369,4	[367,4; 371,4]
2	347,6	[346,0; 349,3]	372,1	[370,2; 373,9]
3	188,4	[184,4; 192,1]	375,2	[372,9; 377,6]
4	311,6	[308,0; 313,0]	370,0	[368,2; 371,9]
5	262,4	[260,0; 264,0]	370,8	[368,8; 372,8]

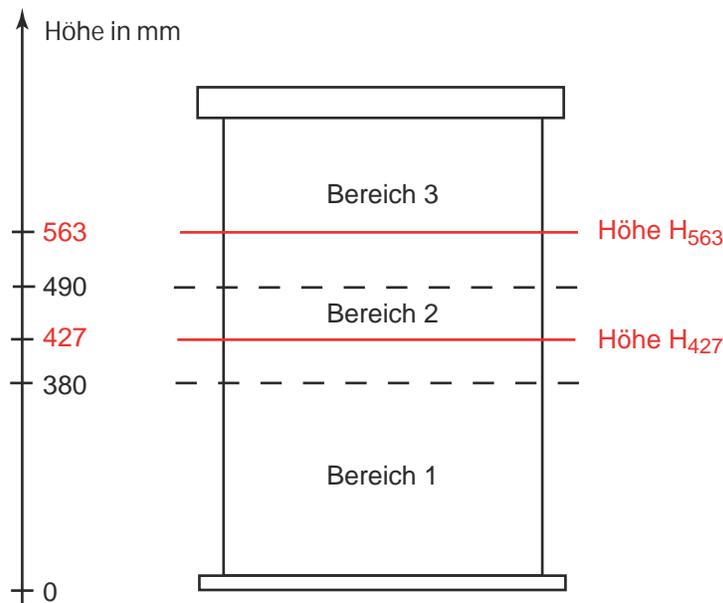
Ellipsoid für	Achsen des Ellipsoids			
Peak-Nr.	$\alpha$	$\Delta\alpha$	$c$	$\Delta c$
	jeweils in °		jeweils in mm	
1	320,1	[311,2; 328,8]	142,8	[138,8; 146,7]
2	132,1	[128,8; 135,3]	136,8	[133,0; 140,4]
3	132,8	[124,7; 140,2]	134,7	[129,8; 139,3]
4	205,0	[199,8; 208,1]	138,0	[134,2; 141,6]
5	331,0	[322,0; 339,9]	132,3	[128,2; 136,3]

## Digitale Radiographie

Der Datensatz der DR-Messung wird so lange reduziert, bis nur noch Informationen über das tatsächliche Untersuchungsobjekt vorliegen: verworfen werden die Informationen über den Drehteller sowie die Informationen über die seitlich angebrachten Kalibrierstäbe und die oberhalb angebrachten Kalibrierzylinder (siehe dazu Abb. 6.5).

<sup>(2)</sup>Es sei daran erinnert, dass der Ausdruck  $\Delta X$  jeweils für den Toleranzbereich  $[\min(X); \max(X)]$  der Größe  $X$  verwendet wird.

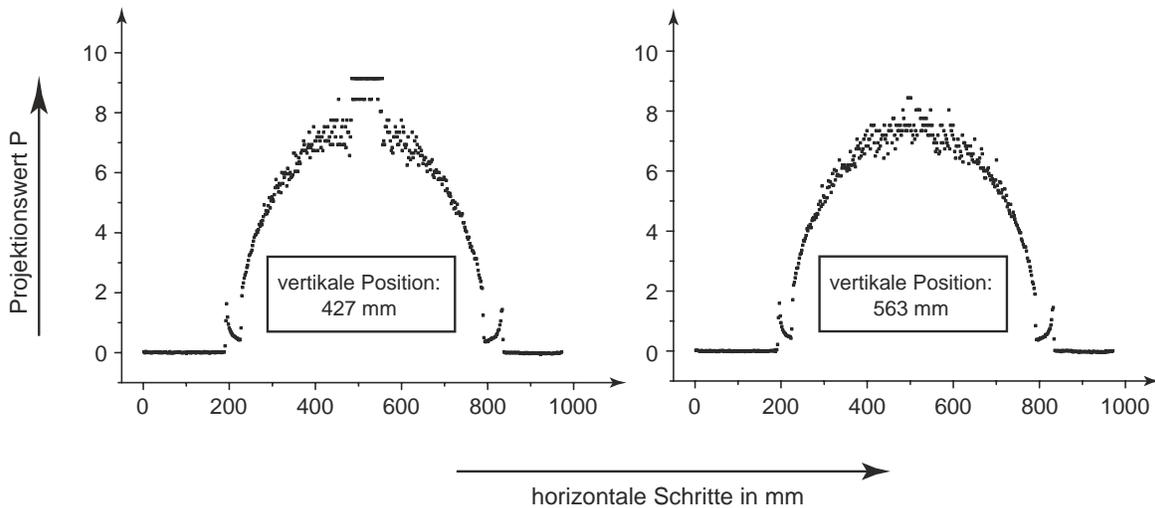
Für jede vertikale Position im reduzierten Datensatz wird die Auswertung so durchgeführt wie in Abschnitt 4.2.1 ausführlich erläutert, ohne Einbeziehung von a-priori-Informationen bezüglich des Behälters. Wie auch das Schattenbild des Untersuchungsobjekts (siehe Abb. 6.5) vermuten lässt, lassen sich die Ergebnisse aller vertikalen Messpositionen innerhalb des Untersuchungsobjekts (also ausgenommen des Boden- und des Deckelbereichs) in zwei Gruppen aufteilen: die eine Gruppe umfasst Ergebnisse der Auswertung von Höhenpositionen zwischen 380 mm und 490 mm und ist in Abb. 6.6 mit *Bereich 2* gekennzeichnet. Unterhalb (*Bereich 1*) bzw. oberhalb (*Bereich 3*) davon weist die Matrix eine andere Zusammensetzung auf, die für beide Bereiche so ähnlich ist, dass nur von einer weiteren Gruppe gesprochen wird.



**Abbildung 6.6:** Schematische Darstellung des Untersuchungsobjekts und Ergebnisse der Auswertung der DR.

Im Weiteren werden die Ergebnisse der Auswertung jeweils beispielhaft für eine Höhenposition pro Gruppe diskutiert: die Höhe  $H_{427}$  liegt im Bereich 2 und die Höhe  $H_{563}$  im Bereich 3. In Abb. 6.7 sind für beide Höhenpositionen die Projektionswerte  $P$  gemäß Gl. 4.30 gegen die horizontalen Schritte aufgetragen. Durch geeignete Modellfunktionen<sup>(3)</sup> werden schrittweise einzelne Strukturen innerhalb des Untersuchungsobjekts identifiziert.

<sup>(3)</sup>Modelle werden erstellt, indem in der Modellfunktion gemäß Gl. 4.48 in Kapitel 4 die Anzahl der zu betrachtenden Objekte eingesetzt wird, also für die im Folgenden verwendeten Modellfunktionen "ein Zylinder"  $k=1$  und für "zwei Zylinder ineinander"  $k=2$ .



**Abbildung 6.7:** Projektionswerte  $P$  in Abhängigkeit der horizontalen Schritte für die Höhenposition  $H_{427}$  (links) und die Höhenposition  $H_{563}$  (rechts).

Bei der Anwendung folgender Modellfunktionen konnten für die Höhe  $H_{427}$  die besten Ergebnisse erzielt werden:

1. Approximation mit der Modellfunktion "zwei Zylinder ineinander"

Damit wird das *Hauptobjekt*, dessen Radius zu  $R_a = 32,5$  cm bestimmt wird, charakterisiert. An beiden Rändern des Objekts wird jeweils eine Approximation durchgeführt, um Werte für folgende Parameter zu ermitteln:

- zentrales (mittleres) Pixel  $n_{0_1}$
- linearer Schwächungskoeffizient des Hauptobjekts  $\mu_{\text{Wand}}$
- linearer Schwächungskoeffizient des nächsten Objekts  $\mu_{\text{Matrix}_1}$
- Wandstärke  $d_{\text{Wand}}$

Für die Approximationen werden folgende Güteparameter erzielt:  $R_{\text{links}}^2 = 0,89$  und  $R_{\text{rechts}}^2 = 0,82$ . Die Mittelwerte der einzelnen Ergebnisse sind in Tab. 6.7 aufgeführt.

2. Approximation mit der Modellfunktion "ein Zylinder"

Im reduzierten Datensatz kann ein weiteres Objekt, für dessen Radius der Wert  $R_2 = 28,6$  cm ermittelt wird, identifiziert werden. In den getrennt durchgeführten Approximationen am linken ( $R^2 = 0,99$ ) und rechten ( $R^2 = 0,97$ ) Rand dieses Objekts werden die Mitte  $n_{0_2}$  (in Pixel) und der lineare Schwächungskoeffizient  $\mu_{\text{Matrix}_2}$  des 2. Objekts bestimmt (Ergebnisse siehe Tab. 6.7).

## 3. Approximation mit der Modellfunktion "ein Zylinder"

Im doppelt-reduzierten Datensatz kann ein weiteres Objekt mit Radius  $R_3 = 3,7$  cm identifiziert werden, in dem die Modellfunktion "ein Zylinder" an alle Datenpunkte in diesem Bereich angenähert wird ( $R^2 = 0,68$ ). Die Projektionswerte lassen keine weitere Auflösung des 3. Objekts zu. Seine Position ( $n_{0_3}$ ) sowie sein linearer Schwächungskoeffizient  $\mu_{\text{Matrix}_3}$  sind in Tab. 6.7 aufgeführt.

**Tabelle 6.7:** Zusammenfassung der Ergebnisse der Auswertung der DR-Messung für die Höhe  $H_{427}$ .

Hauptobjekt (1. Objekt)	
mit $R_a = 32,5$ cm	
$n_{0_1}$	$(265,03 \pm 0,25)$ Pixel
$\mu_{\text{Wand}}$	$(0,10 \pm 0,01)$ cm <sup>-1</sup>
$\mu_{\text{Matrix}_1}$	$(0,003 \pm 0,005)$ cm <sup>-1</sup>
$d_{\text{Wand}}$	$(0,80 \pm 0,09)$ cm
2. Objekt	
mit $R_2 = 28,6$ cm	
$n_{0_2}$	$(262,22 \pm 0,16)$ Pixel
$\mu_{\text{Matrix}_2}$	$(0,13 \pm 0,01)$ cm <sup>-1</sup>
3. Objekt	
mit $R_3 = 3,7$ cm	
$n_{0_3}$	$(267,45 \pm 0,81)$ Pixel
$\mu_{\text{Matrix}_3}$	$(0,32 \pm 0,01)$ cm <sup>-1</sup>

Für die Höhe  $H_{563}$  wurden folgende Modellfunktionen angewendet, um die besten Ergebnisse zu erzielen:

## 1. Approximation mit der Modellfunktion "zwei Zylinder ineinander"

Das *Hauptobjekt* ( $R_a = 32,3$  cm) wird durch zwei getrennt durchgeführte Approximationen an den jeweiligen Rändern des Objekts charakterisiert. Für die Approximationen werden folgende Güteparameter erzielt:  $R_{\text{links}}^2 = 0,90$  und  $R_{\text{rechts}}^2 = 0,84$ . Die Mittelwerte der einzelnen Ergebnisse sind in Tab. 6.8 aufgeführt.

## 2. Approximation mit der Modellfunktion "ein Zylinder"

Im reduzierten Datensatz kann nur ein weiteres Objekt mit Radius  $R_2 = 28,5$  cm

identifiziert werden, indem die Datenpunkte getrennt am linken ( $R^2 = 0,99$ ) sowie am rechten ( $R^2 = 0,98$ ) Rand des Objekts durch die Modellfunktion angenähert werden (Ergebnisse siehe Tab. 6.8).

**Tabelle 6.8:** Zusammenfassung der Ergebnisse der Auswertung der DR-Messung für die Höhe  $H_{563}$ .

Hauptobjekt (1. Objekt)	
mit $R_a = 32,3$ cm	
$n_{0_1}$	$(264,90 \pm 0,26)$ Pixel
$\mu_{\text{Wand}}$	$(0,10 \pm 0,01)$ cm $^{-1}$
$\mu_{\text{Matrix}_1}$	$(0,003 \pm 0,006)$ cm $^{-1}$
$d_{\text{Wand}}$	$(0,76 \pm 0,11)$ cm
2. Objekt	
mit $R_2 = 28,5$ cm	
$n_{0_2}$	$(262,16 \pm 0,13)$ Pixel
$\mu_{\text{Matrix}_2}$	$(0,13 \pm 0,01)$ cm $^{-1}$

### 6.2.3 Objekterzeugung

Bei der Kombination von verschiedenen Messergebnissen ist wichtig, dass sich die geometrischen Angaben auf ein einheitliches Koordinatensystem beziehen. Das hier verwendete System hat seinen Nullpunkt im Zentrum  $n_{0_1}$  des Bodens des Untersuchungsobjekts (siehe dazu auch Abb. 6.8).

#### Grundmodell

Auf der Basis der Ergebnisse der DR lässt sich das folgende Grundmodell für das virtuelle Untersuchungsobjekt erstellen, wobei die Rollstücken des Gebindes in der Objekterzeugung vereinfachend vernachlässigt wurden:

1. Das zylindrische Hauptobjekt hat eine Wandstärke von 0,8 cm; ihm wird das Material Zement mit der Dichte  $\rho = 1,9$  g/cm $^3$  zugeordnet.<sup>(4)</sup>

<sup>(4)</sup>Das jeweilige Material für einen Körper wird ermittelt, indem die beste Übereinstimmung zwischen dem durch Approximation ermittelten Schwächungskoeffizienten  $\mu_{\text{Approx.}}$  des Körpers und den Werten verschiedener in der Objekterzeugung zur Verfügung stehender Materialien für die Energie der verwendeten Transmissionsquelle (hier: 1332,50 keV-Linie von  $^{60}\text{Co}$ ) gesucht wird. Die beschränkte

2. In das mit Luft gefüllte Hauptobjekt ist ein weiterer zylindrischer Körper eingestellt. Da für dieses 2. Objekt keine Wand aufgelöst werden kann, wird es als Vollzylinder behandelt. Das 2. Objekt hat einen kleineren Radius als die Innenabmessungen des Hauptobjekts ( $R_2 < R_a - d_{\text{Wand}}$ ) und ist gegen das Zentrum  $n_{0_1}$  des Hauptobjekts in Richtung der positiven  $y$ -Achse verschoben.<sup>(5)</sup> Aufgrund des gefundenen Schwächungskoeffizienten wird ihm ebenfalls das Material Zement allerdings mit einer höheren Dichte ( $\rho = 2,4 \text{ g/cm}^3$ ) zugeteilt.
3. Innerhalb des Höhenbereichs [380 mm; 490 mm] kann ein weiteres 3. Objekt identifiziert werden. Es handelt sich um einen kleinen zylindrischen Körper ( $R_3 \ll R_a$ ), der in Richtung der negativen  $y$ -Achse platziert ist. Sein linearer Schwächungskoeffizient hat den größten Wert aller identifizierten Körper. Aufgrund dieser Ergebnisse ist zu vermuten, dass dieses 3. Objekt die Funktion eines zusätzlichen Abschirmbehälters hat und eventuell in ihm die identifizierten Radionuklide verteilt sind.

Zusammengefasst sind die Ergebnisse aus der Auswertung der DR-Daten in einem horizontalen Schnitt durch das Untersuchungsobjekt in der Höhe  $H_{427}$  schematisch eingezeichnet (siehe Abb. 6.8). Die Ergebnisse der Höhe  $H_{563}$  entsprechen dieser Abbildung ohne dem zylindrischen 3. Objekt.

### Diskussion der offenen Parameter

Es gibt Parameter, die aufgrund der vorliegenden Informationen nicht (exakt) bestimmt sind. Für sie kann in der Regel eine mögliche Bandbreite angegeben werden. Die Kombination dieser Parameter ergibt eine Liste der theoretisch möglichen Modelle für das virtuelle Untersuchungsobjekt. Erst der Vergleich von simulierten mit gemessenen Zählratenverteilungen kann einzelne Modelle bestätigen bzw. verwerfen. Im Folgenden sind einiger dieser "offenen" Parameter aufgelistet. In den weiteren detaillierten Ausführungen zur Modellerzeugung werden nur die letzten drei Punkte (4. bis 6.) behandelt.

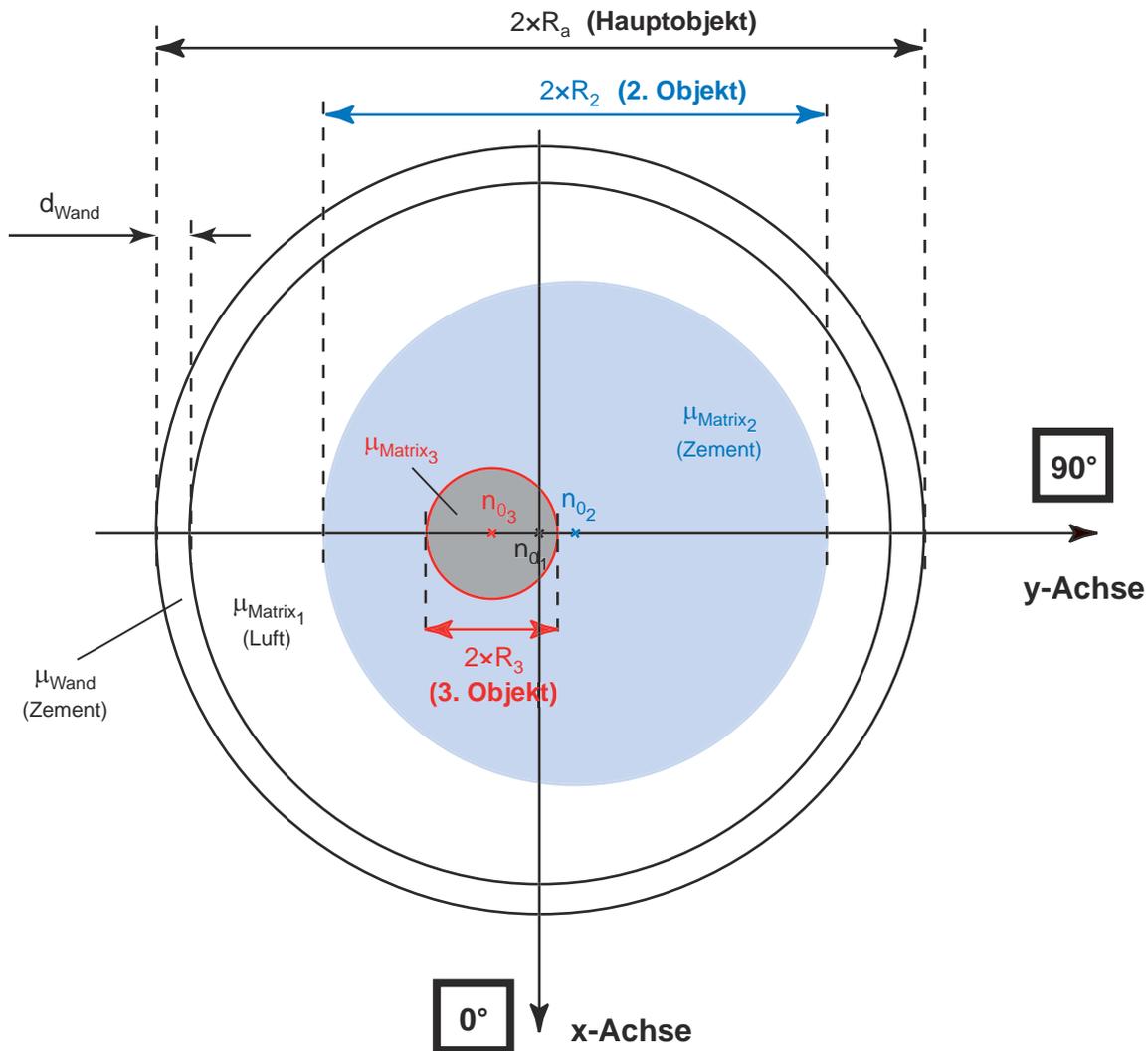
#### 1. Wandstärke und Material des Hauptobjekts

Mit den Ergebnissen der DR kann die tatsächliche Wandstärke (siehe Tab. 6.2) und somit das tatsächlich vorliegende Material des Hauptobjekts nicht aufgelöst

---

Auswahl an Materialien wird ausgeglichen, indem für ein ermitteltes Material jeweils der individuelle Wert für die Dichte berechnet und eingesetzt wird:  $\rho = \mu_{\text{Approx.}} / \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{1,3 \text{ MeV}}$ .

<sup>(5)</sup>Für die Anpassung der Ergebnisse aus der DR-Messung an die Winkelorientierung der SGS-Messung wurde folgende Konvention getroffen: gilt für das Zentrum eines Körpers  $i$  ( $n_{0_i} < n_{0_1}$ ), so liegt es in Richtung der positiven  $y$ -Achse, d. h. "rechts" vom Nullpunkt  $n_{0_1}$  des Koordinatensystems; in Abschnitt 4.2.1 wurde eine andere Konvention verwendet.



**Abbildung 6.8:** Horizontaler Schnitt durch das Untersuchungsobjekt in der Höhe  $H_{427}$ ; Ergebnisse der Auswertung schematisch (nicht maßstabsgetreu!) dargestellt.

werden. Bei einem bekannten Objekt, wie hier einem 280 L-Fass, könnten Informationen über Abmessungen und Materialien aus Behälterdatenbanken herangezogen werden. Hier wurde allerdings bei der Erstellung des Grundmodells für das virtuelle Untersuchungsobjekt (siehe vorheriger Abschnitt) bewusst auf die Einbeziehung von solchen a-priori-Informationen verzichtet.

## 2. Material des 2. Objekts

Die Erfahrung zeigt, dass das zylindrische 2. Objekt im tatsächlichen Untersuchungsobjekt kein Vollzylinder sein wird, sondern ebenfalls ein Behältnis, z. B. ein 200 L-Fass, das mit einer homogenen Matrix gefüllt ist. Unter Berücksichtigung des in der Approximation ermittelten Werts für den Schwächungs-

koeffizienten  $\mu_{\text{Matrix}_2}$  könnten auch andere Material(-kombinationen) für das 2. Objekt eingesetzt werden.

### 3. Position des 2. Objekts in der Tiefe

Dieser Parameter kann durch die Auswertung von Transmissionsdaten nicht ermittelt werden. Einschränkend gilt: das zylindrische 2. Objekt muss sich innerhalb des Hauptobjekts befinden, d. h. für die Koordinaten des Zentrums  $n_{0_2}$  muss gelten:

$$(x_{0_2} \pm R_2)^2 + (y_{0_2} \pm R_2)^2 < (R_a - d_{\text{Wand}})^2 \quad (6.1)$$

### 4. Position des 3. Objekts in der Tiefe

Analog zur Position des 2. Objekts kann für die Position des zylindrischen 3. Objekts in der Tiefe nur einschränkend angegeben werden, dass sie innerhalb des 2. Objekts liegen muss, d. h. für die Koordinaten des Zentrums  $n_{0_3}$  muss gelten:

$$(x_{0_3} \pm R_3)^2 + (y_{0_3} \pm R_3)^2 < (x_{0_2} \pm R_2)^2 + (y_{0_2} \pm R_2)^2 \quad (6.2)$$

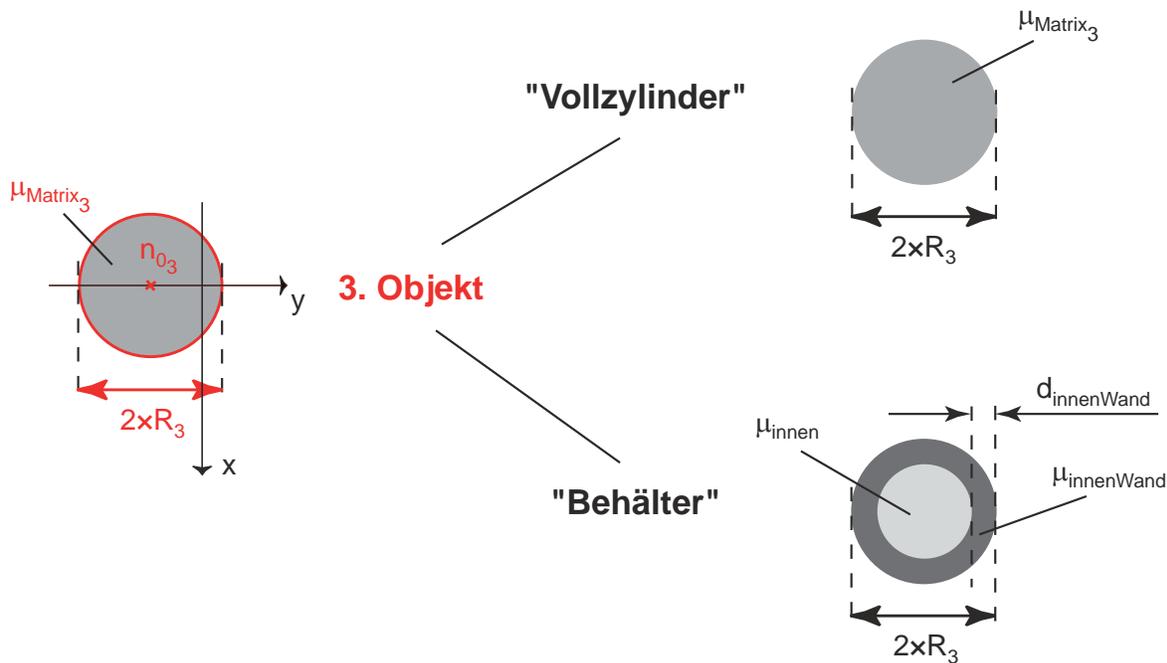
### 5. Verteilung der Radionuklide

Die Auswertung der SGS-Messung ergibt eine heterogene Aktivitätsverteilung für das Untersuchungsobjekt. Prinzipiell können sich die Radionuklide, die sich über den selben Höhenbereich erstrecken wie das 3. Objekt identifiziert wurde, innerhalb oder außerhalb dieses Zylinders (oder eine Kombination aus beidem) befinden. Für die Variante der innerhalb liegenden Radionuklide werden nachfolgend die fünf einzelnen Ellipsoide vereinfachend zu einer homogenen Aktivitätsschicht zusammengezogen.

### 6. Aufbau des 3. Objekts

Aus der Kombination der Approximations-Ergebnisse ( $\mu_{\text{Matrix}_3}$  und  $R_3$ ) und Erfahrungen aus der Praxis der Abfallbehandlung können mögliche Varianten für den Aufbau des 3. Objekts erstellt werden. Die beiden einfachsten Möglichkeiten (schematisch dargestellt in Abb. 6.9) sind der homogene Vollzylinder mit dem linearen Schwächungskoeffizient  $\mu_{\text{Matrix}_3}$  und ein Hohlzylinder mit Wand und Innenbereich (im Folgenden mit *Behälter* bezeichnet). Mit vorgegebenen Materialien für die Wand des Behälters ( $\mu_{\text{innenWand}}$ ) können das Material im Inneren des Behälters ( $\mu_{\text{innen}}$ ) sowie seine Abmessungen ( $d_{\text{innenWand}}$ ) gemäß Gl. 6.3 berechnet werden:

$$\mu_{\text{Matrix}_3} = \frac{1}{R_3} \cdot \left[ \mu_{\text{innenWand}} \cdot d_{\text{innenWand}} + \mu_{\text{innen}} \cdot (R_3 - d_{\text{innenWand}}) \right] \quad (6.3)$$



**Abbildung 6.9:** Schematische Darstellung der beiden einfachsten Möglichkeiten für das zylindrische 3. Objekt: der homogene Vollzylinder (rechts oben) sowie der Hohlzylinder mit Wand und Innenbereich (rechts unten); die zuletzt genannte Möglichkeit wird im Weiteren mit Behälter bezeichnet.

#### 6.2.4 Modellbewertung und Aktivitätsbestimmung

Die unterschiedliche Variation und Kombination der im vorherigen Abschnitt aufgeführten nicht exakt bestimmten Parameter ergibt eine Vielzahl an theoretischen Modellen, deren Akzeptanz jeweils mit dem Vergleich der durch Simulation am virtuellen Untersuchungsobjekt erzeugten Zählratenverteilung und der tatsächlichen Verteilung geklärt werden muss. Im Folgenden wird an einer eingeschränkten Auswahl<sup>(6)</sup> von Möglichkeiten der prinzipielle Weg der Modellbewertung und der Aktivitätsbestimmung für das Untersuchungsobjekt aufgezeigt.

Die weiteren Ausführungen basieren dabei jeweils auf dem im vorherigen Abschnitt beschriebenen Grundmodell für das virtuelle Untersuchungsobjekt: ein 280 L-Fass (Hauptobjekt), in den ein Vollzylinder aus Zement (2. Objekt) eingestellt ist. Dieses Grundmodell bleibt im Wesentlichen unverändert; variiert wird nur das in Zement eingebettete 3. Objekt (grau markierter Körper in Abb. 6.8). Abhängig von dessen Zusammensetzung, Position und Ausdehnung, die gemäß der offenen Parameter (4. bis 6.)

<sup>(6)</sup>Die Erzeugung eines Objektmodells sowie die Überprüfung seiner Gültigkeit erfolgt momentan noch manuell und ist deswegen sehr zeitintensiv.

gewählt werden können, werden verschiedene Objektmodelle erzeugt, die im Weiteren diskutiert werden. In den Modellen A, B, C und D wird das 3. Objekt als Behälter betrachtet, im Modell E als homogener Vollzylinder (siehe dazu Abb. 6.9). In allen diesen Modellen befindet sich die Aktivität ausschließlich innerhalb des 3. Objekts. In Modell F wird die Verteilung von Radionukliden auch außerhalb des 3. Objekts zugelassen.

### Modell A: Grundmodell Behälter

Mit Modell A wird das Grundmodell für einen zusätzlichen (Abschirm-)Behälter innerhalb der im Hauptobjekt homogen verteilten Zementmatrix bezeichnet. Dieses Modell ergibt sich im Wesentlichen aus Informationen, die direkt aus den Ergebnissen der DR-Messung gewonnen werden:

- Für die Position des Behälters wird nur die bekannte Verschiebung entlang der  $y$ -Achse ( $n_{0_3}$ ) verwendet, d. h. die Koordinaten seines Mittelpunktes sind  $x = 0$  und  $y = \frac{n_{0_1} - n_{0_3}}{\Delta_{\text{horizontal}}}$ , wobei  $\Delta_{\text{horizontal}}$  die horizontale Auflösung ist und Tab. 6.5 entnommen werden kann.
- Die Wandstärke des Behälters hat überall den konstanten Wert  $d_{\text{innenWand}}$ , der für vorgegebene Materialien für den Behälter sowie die Matrix in seinem Inneren berechnet werden kann.
- Die Matrix sowie die Radionuklide sind im Inneren des Behälters homogen verteilt.

Aus allen theoretischen Möglichkeiten (gemäß Gl. 6.3) werden die folgenden in Tab. 6.9 zusammengestellten Kombinationen aus Material für den Behälter und Material der in seinem Inneren verteilten Matrix ausgewählt, wobei jede Materialkombination eindeutig bezeichnet ist (siehe 1. Spalte in Tab. 6.9). Für den Behälter werden die für eine Abschirmung typischen Materialien Blei und Grauguss eingesetzt; dazu wird jeweils die mögliche Wandstärke  $d_{\text{innenWand}}$  des Behälters berechnet, wenn er mit der Matrix Luft bzw. der Matrix, in der der Behälter eingebettet ist (Zement), gefüllt ist.

Für diese vier Varianten des Modells A (Modell A1 bis A4<sup>(7)</sup>) sind die gemessenen und die simulierten Impulse für eine Höhe, die durch den Behälter verläuft<sup>(8)</sup>, in Abb. 6.10 aufgetragen.

<sup>(7)</sup>Der Modellname setzt sich im Fall des Behälters jeweils aus einem Buchstaben, der die Geometrie des Modells beschreibt und einer Zahl, die für eine Materialkombination steht, zusammen.

<sup>(8)</sup>Zur Verdeutlichung der Höhenlage bezüglich des Behälters sei auf Abb. 6.14 verwiesen.

**Tabelle 6.9:** Ausgewählte Modelle für einen Behälter, die aufgrund der durch Approximation ermittelten Werte  $\mu_{\text{innen}} = 0,32 \text{ cm}^{-1}$  und  $R_{\text{innen}} = 3,7 \text{ cm}$  möglich sind.

Modell	Innenbereich		Wand		
	Material	$\mu_{\text{Matrix}_3}^a$ in $\text{cm}^{-1}$	Material	$\mu_{\text{Abschirm}}^a$ in $\text{cm}^{-1}$	Stärke in cm
A1	Luft	$7 \cdot 10^{-5}$	Blei	0,65	<b>1,8</b>
A2	Zement	0,11	Blei	0,65	<b>1,3</b>
A3	Luft	$7 \cdot 10^{-5}$	Grauguss	0,4	<b>2,95</b>
A4	Zement	0,11	Grauguss	0,4	<b>2,55</b>

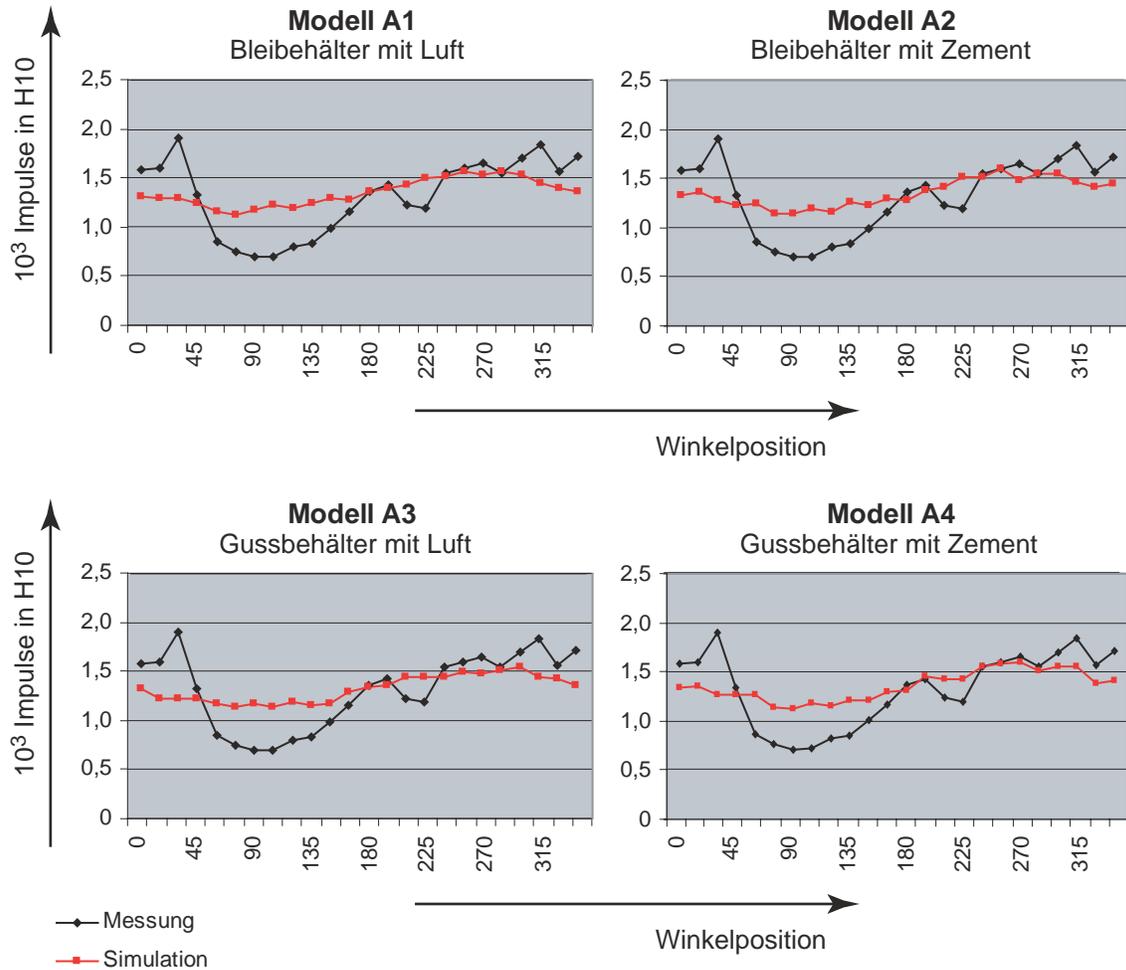
<sup>a</sup>Der Wert des linearen Schwächungskoeffizienten für die Energie der verwendeten Transmissionsquelle ( $^{60}\text{Co}$ , 1332,50 keV).

Die gemessene Impulsverteilung weist eine starke Winkelabhängigkeit auf, die für die simulierten Impulsverteilungen mit den Objektmodellen A nicht erreicht werden konnte. Unabhängig vom Material der im Behälter befindlichen Matrix schwächt der homogen gefüllte Behälter, der nur minimal aus dem Zentrum  $n_{0_1}$  des Hauptobjekts verschoben ist, die Aktivität zu gleichmäßig entlang aller Winkelrichtungen.

### Modell B: Verschobener Behälter

Für das Modell B wird der selbe Grundaufbau des Behälters wie in Modell A beschrieben zugrunde gelegt. Während die aus der Approximation ermittelte Verschiebung entlang der  $y$ -Achse ( $n_{0_3}$ ) unverändert bleibt, wird zusätzlich eine Verschiebung des Behälters in der Tiefe, d. h. in  $x$ -Richtung zugelassen, wobei hier theoretisch nur die Einschränkung aus Gl. 6.2 für den zu variierenden Parameter  $x_{0_3}$  zu beachten ist. Die gemessene Impulsverteilung zeigt ein ausgeprägtes Minimum im Winkelbereich zwischen  $60^\circ$  und  $150^\circ$ . In der hier durchgeführten manuellen Auswertung wurde dieses Zusatzwissen genutzt und deswegen die (theoretisch mögliche) Verschiebung in Richtung der negativen  $x$ -Achse nicht weiter verfolgt (siehe dazu Abb. 6.8).<sup>(9)</sup> Abb. 6.11 zeigt jeweils die simulierte Impulsverteilung für einen verschobenen Behälter aus Blei (Modell B1 sowie B2) in der gleichen Höhe H10 wie die Ergebnisse für Modell A, wobei für den Mittelpunkt  $n_{0_3}$  des Behälters folgende Koordinaten gewählt wurden:  $x = +15 \text{ mm}$  und  $y = \frac{n_{0_1} - n_{0_3}}{\Delta_{\text{horizontal}}}$ .

<sup>(9)</sup>In einer automatischen Analyse würden diese Modelle erst durch den Vergleich der gemessenen und simulierten Impulsverteilungen als ungültig bewertet werden.

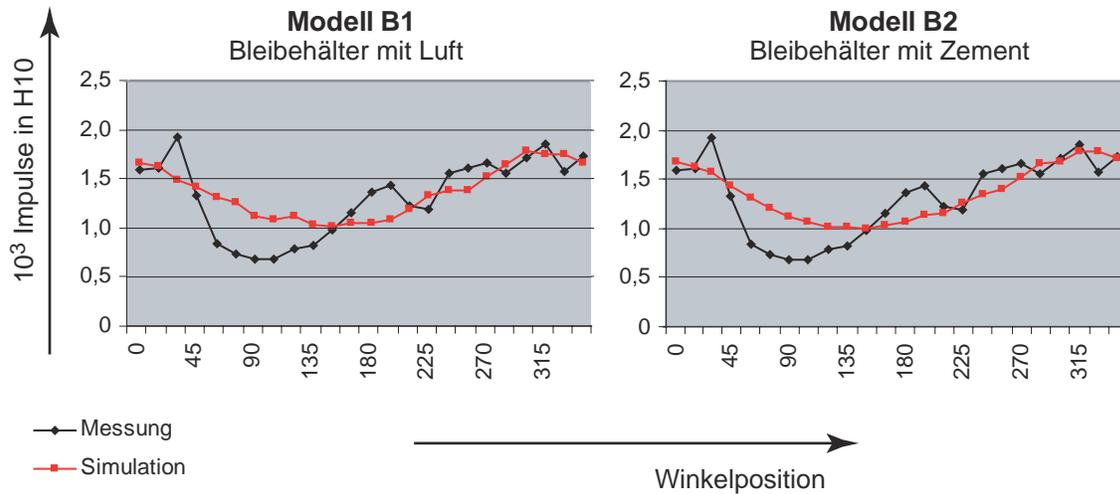


**Abbildung 6.10:** Vergleich der simulierten und der gemessenen Impulse in der Höhe H10 für das Modell A, das Grundmodell eines Behälters mit gleichmäßiger Wandstärke und homogen verteilter Matrix innerhalb. Der Mittelpunkt des Behälters ist nur um die durch Approximation ermittelte Verschiebung entlang der  $y$ -Achse bezüglich des Nullpunkts verschoben: er liegt bei  $x = 0$  und  $y = \frac{n_{01} - n_{03}}{\Delta_{\text{horizontal}}}$ .

Obere Reihe: Behälter aus Blei mit Luft gefüllt (links) und mit Zement gefüllt (rechts).

Untere Reihe: Behälter aus Grauguss mit Luft gefüllt (links) und mit Zement gefüllt (rechts).

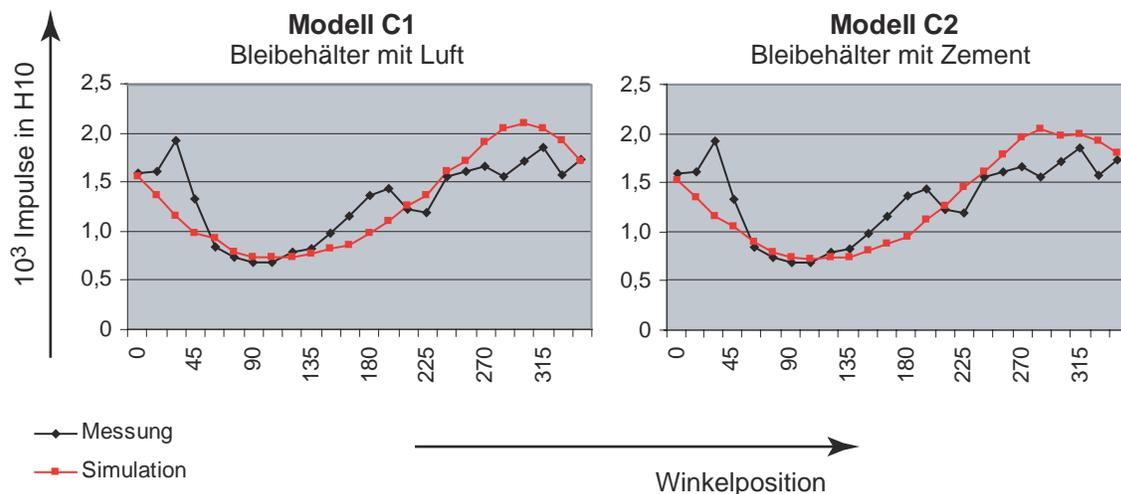
Für alle vier betrachteten Materialkombinationen weisen die Impulsverteilungen in Modell B eine wesentlich stärker ausgeprägte Winkelabhängigkeit auf als für das Modell A erreicht wurde. Die maximale Schwächung in der simulierten Verteilung tritt allerdings um die Winkelposition  $150^\circ$  auf, um etwa  $50^\circ$  bezüglich des Minimums in der gemessenen Verteilung verschoben. Eine Verschiebung des Behälters alleine in der Tiefe ( $x$ -Richtung) unter Beibehaltung der durch Approximation ermittelten horizontalen Verschiebung (in negative  $y$ -Richtung) gleicht dies nicht aus.



**Abbildung 6.11:** Vergleich der simulierten und der gemessenen Impulse in der Höhe H10 für einen Behälter aus Blei mit gleichmäßiger Wandstärke und homogener verteilter Matrix innerhalb (links: Luft (Modell B1) und rechts: Zement (Modell B2)). Der Mittelpunkt des Behälters ist zusätzlich zur Verschiebung entlang der  $y$ -Achse (aus der Approximation) noch in  $x$ -Richtung aus dem Zentrum des Hauptobjekts verschoben: er liegt bei  $x=+15\text{mm}$  und  $y = \frac{n_{01} - n_{03}}{\Delta_{\text{horizontal}}}$ .

### Modell C: Ungleichmäßiger Behälter

Für die ungenügende Übereinstimmung der Winkelverteilung von gemessenen und simulierten Impulsen in Modell B (siehe dazu Abb. 6.11) könnte eine ungleichmäßige Abschirmwirkung des Behälters in unterschiedlichen Winkelrichtungen verantwortlich sein. Für das Modell C wird deswegen die bisher konstante Wandstärke des Behälters aufgegeben. Bezüglich seiner Position und Befüllung dient der verschobene Behälter aus Modell B als Grundlage; seine Wandstärke wird im Winkelbereich von  $60^\circ$  bis  $150^\circ$  vergrößert und gleichzeitig im Winkelbereich von  $240^\circ$  bis  $330^\circ$  verkleinert. Das hier beschriebene Objektmodell findet in der Wirklichkeit des vorliegenden Untersuchungsobjekts eine gewisse Bestätigung: bei der zerstörenden Analyse des betrachteten Untersuchungsobjekts wurden im Inneren des in der Zementmatrix eingebetteten Behälters schraubenähnliche Gebilde aus Edelstahl gefunden, mit denen die Aktivität umschlossen war (siehe dazu die Photos in Abb. 6.20). Diese einzelnen Objekte innerhalb des



**Abbildung 6.12:** Vergleich der simulierten und der gemessenen Impulse in der Höhe H10 für zwei Varianten des Modells C: ein verschobener Behälter aus Blei mit unterschiedlicher, homogener verteilter Matrix innerhalb (links: Luft (Modell C1) und rechts: Zement (Modell C2)) und unterschiedlicher Abschirmwirkung in den verschiedenen Winkelrichtungen aufgrund einer ungleichmäßigen Wandstärke. Mittelpunkt des Behälters bei  $x=+15\text{ mm}$  und  $y = \frac{n_{01}-n_{03}}{\Delta_{\text{horizontal}}}$ .

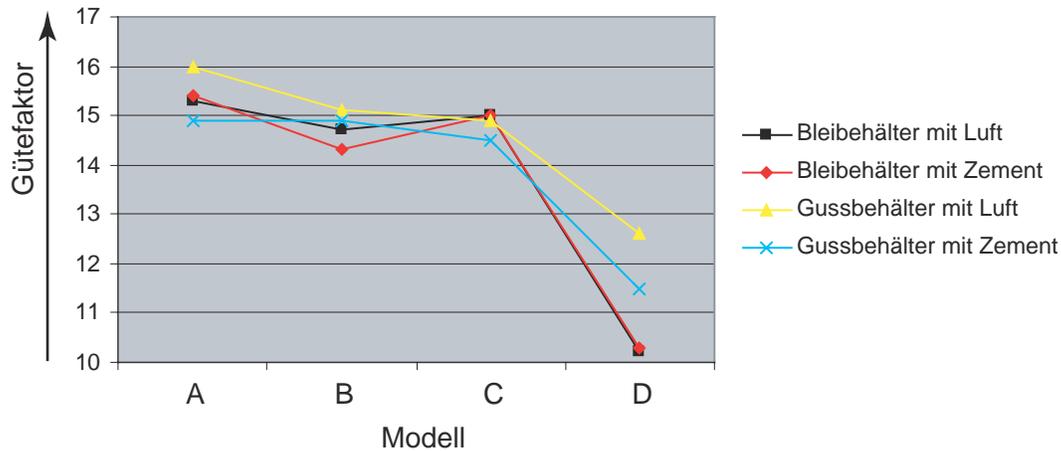
Abschirmbehälters konnten durch die Auswertung der DR-Ergebnisse nicht aufgelöst werden,<sup>(10)</sup> stellen allerdings zusätzliche Abschirmstrukturen dar. Für einen Behälter aus Blei gemäß Modell C sind die simulierten Impulse in der Höhe H10 (analog der Darstellungen für die Modelle A und B) in Abb. 6.12 aufgeführt.

### Fazit für Modell A bis Modell C

Die graphisch dargestellten Ergebnisse der unterschiedlichen Objektmodelle eines Behälters (Modell A, B und C) demonstrieren die schrittweise Angleichung der Winkelverteilung der simulierten Impulse an die der gemessenen Impulse. Zur objektiven Beurteilung der Übereinstimmung zweier Impulsverteilungen wird zusätzlich ein so genannter Gütefaktor eingeführt. Er berechnet sich als Summe der relativen Abweichungen von simulierten und gemessenen Impulsen für jede Messposition in den Höhen, die sich innerhalb des 3. Objekts befinden (H9 und H10; siehe dazu auch Abb. 6.14.).<sup>(11)</sup>

<sup>(10)</sup>Der in der Auswertung ermittelte mittlere lineare Schwächungskoeffizient  $\mu_{\text{innen}}$  wurde für den Fall des Behälters in einen Anteil für die Behälterwand konstanter Stärke und einen Anteil für die homogen verteilte Matrix im Inneren des Behälters aufgeteilt (siehe dazu Abb. 6.9).

<sup>(11)</sup>Die relative Abweichung wurde nicht über alle Messpositionen aufsummiert, weil die Messdaten noch ein ungewöhnlich schnelles Abklingen im Gegensatz zu den entsprechenden simulierten Daten zeigen, was im Weiteren noch geklärt werden muss.



**Abbildung 6.13:** Gütefaktoren der vier Objektmodelle für den Fall des Behälters.

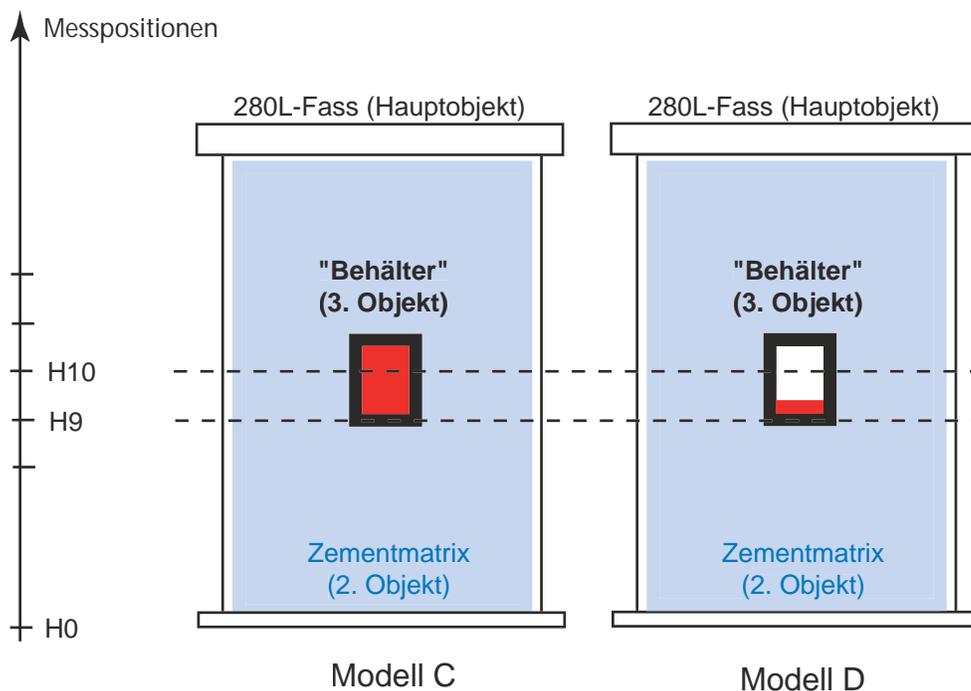
Für alle vier Materialkombinationen ergibt sich beim Übergang von Modell A zu Modell B eine leichte Verbesserung, d. h. Verkleinerung, des Gütefaktors, der graphisch in Abb. 6.13 dargestellt ist. Die ungleichmäßige Schwächung in Modell C (ungleiche Wandstärke des Behälters) liefert die gewünschte Verschiebung der Winkelverteilung der simulierten Impulse, was sich allerdings im Gütefaktor nicht bemerkbar macht. Eine erhebliche Verkleinerung der Abweichung kann durch eine weitere Veränderung am Objektmodell erreicht werden, die im Folgenden (unter Modell D) beschrieben wird. Der Gütefaktor für Modell D ist in Abb. 6.13 schon mit aufgeführt.

### Modell D: Geringere Befüllung des Behälters

Eine wesentliche Verbesserung des Gütefaktors (siehe Abb. 6.13) kann erreicht werden, indem die Radionuklide nicht mehr über die gesamte Höhe des vorliegenden Behälters verteilt werden. Grundlage für das Modell D ist der verschobene Behälter mit ungleichmäßiger Wandstärke aus Modell C, der jeweils nur in seinem unteren Bereich (etwa ein Fünftel der Gesamthöhe) mit Aktivität gefüllt wird (siehe dazu Abb. 6.14). Für die Modellvarianten 2 und 4, in denen der Behälter Zement beinhaltet, werden jeweils die folgenden zwei unterschiedlichen Fälle unterschieden:

- Der obere Teil des Behälters ist "leer", d. h. er ist mit Luft gefüllt: Modell D2a bzw. D4a.
- Im oberen Teil des Behälters befindet sich ebenfalls Zement, allerdings keine Aktivität: Modell D2b bzw. D4b.

Abb. 6.15 verdeutlicht für einen Behälter aus Blei, der mit Zement gefüllt ist, den Unterschied der Impulsverteilungen zwischen Modell C und Modell D: aufgetragen sind

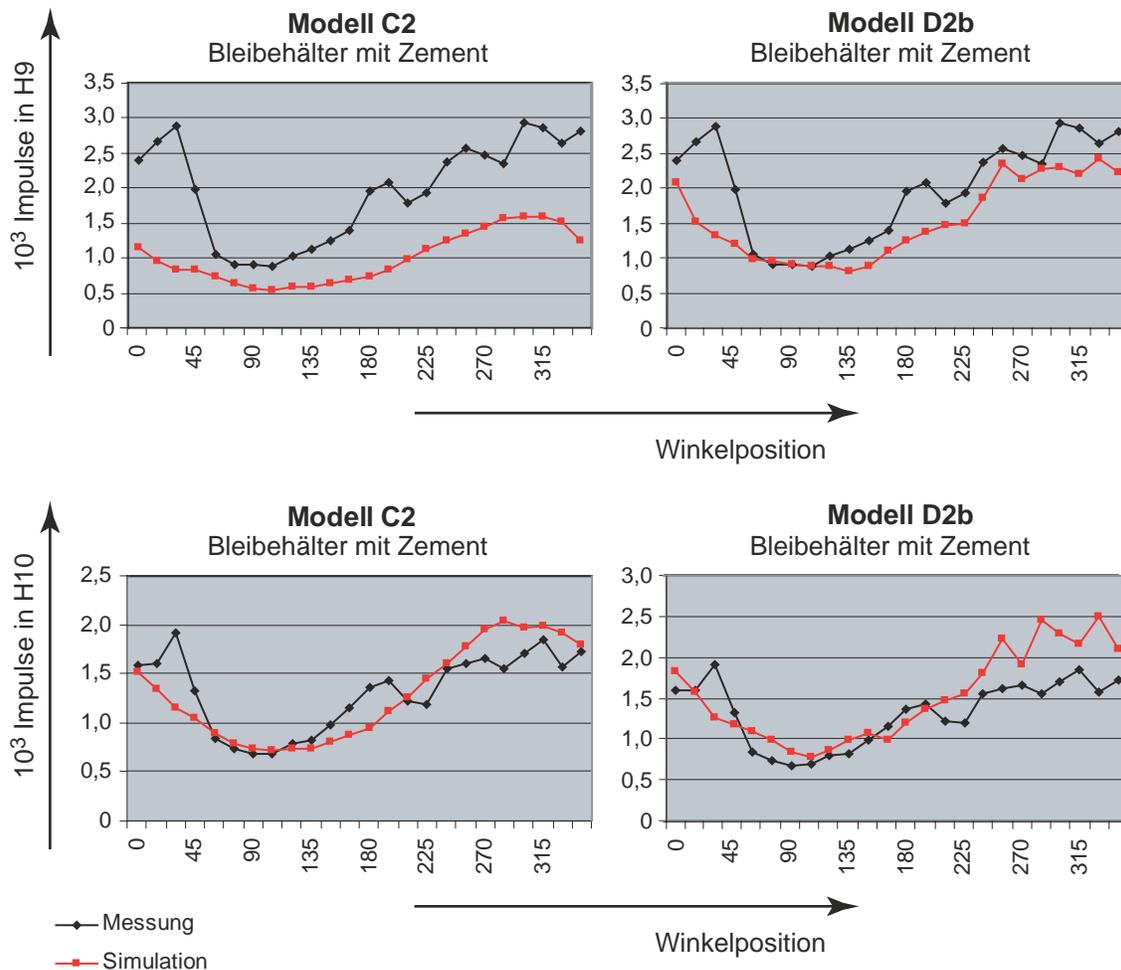


**Abbildung 6.14:** Schematische Darstellung des Untersuchungsobjekts mit dem in einer homogenen Zementmatrix eingebetteten Behälter. Die Verteilung der Radionuklide innerhalb des Behälters ist jeweils durch den rot markierten Bereich angedeutet.

Links: vollständig gefüllt (Modell C) und rechts nur teilweise (Modell D).

Die gestrichelten Linien geben die Höhen der Messpositionen an, die zur Berechnung des Gütefaktors herangezogen werden.

jeweils die Höhen H9 und H10, die beide durch den Behälter verlaufen; links für den vollständig mit Aktivität gefüllten Behälter (Modell C) und rechts für den nur teilweise befüllten Behälter (Modell D). Die Winkelabhängigkeit der simulierten Impulse ändert sich grundsätzlich nicht, d. h. das Maximum der Schwächung ist im Bereich zwischen  $50^\circ$  und  $150^\circ$  zu finden, doch stimmt die absolute Impulszahl nun in beiden übereinander liegenden Höhen besser überein, was sich direkt auf den Wert des Gütefaktors auswirkt. Der Wert für die Aktivität eines aktivitätstragenden Körpers wird in der Routine *Aktivitätsbestimmung* so gewählt, dass eine möglichst große Übereinstimmung der simulierten und gemessenen Impulse für alle Messpositionen erreicht wird (siehe dazu Abschnitt 5.1.2). In diesem Beispiel wird also dem einen aktivitätstragenden Körper in Modell D wegen seiner geringeren Ausdehnung eine höhere Aktivität zugeteilt, so dass er auch in Höhen, über die er sich nicht erstreckt (z. B. H10), noch einen Beitrag zum Messsignal liefert, d. h. messbar ist. Das führt gleichzeitig dazu, dass alle Impulse in der darunter liegenden Höhe H9 einen größeren Wert haben und somit im größeren Maße den gemessenen Impulsen entsprechen.

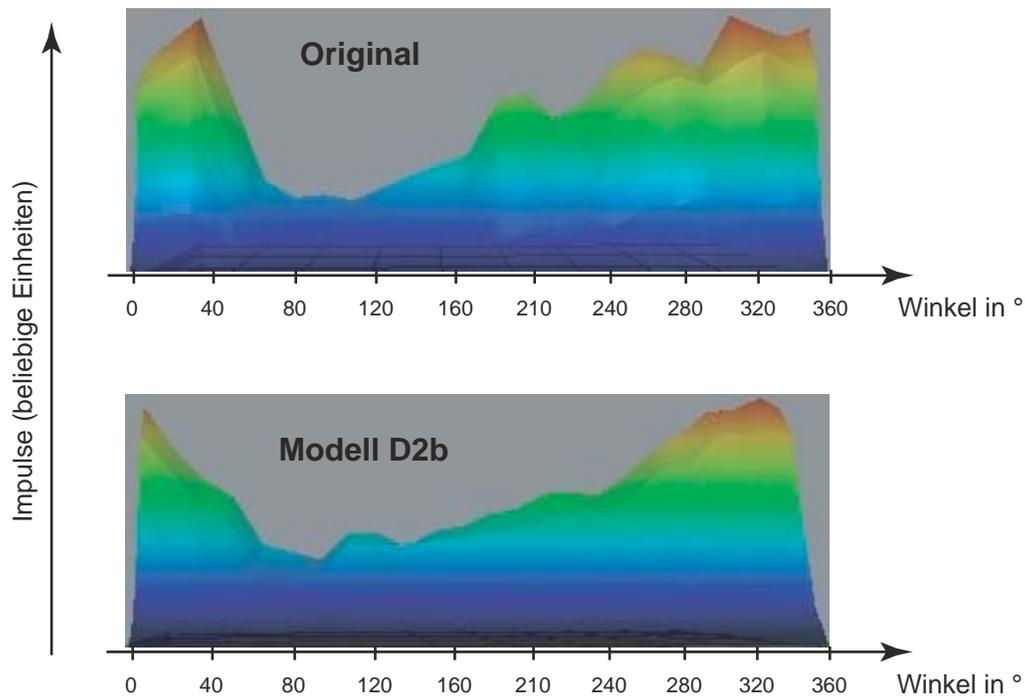


**Abbildung 6.15:** Vergleich der simulierten Impulsverteilungen in zwei übereinander liegenden Höhen, die innerhalb des Behälters verlaufen, jeweils für einen verschobenen Behälter mit ungleichmäßiger Wandstärke aus Blei, der mit Zement gefüllt ist.

Links: der Behälter ist vollständig mit Aktivität gefüllt (Modell C) und rechts: der Behälter ist nur teilweise mit Aktivität gefüllt (Modell D).

Beispielhaft sind in Abb. 6.16 die am vorliegenden Untersuchungsobjekt gemessene Impulsverteilung und die auf der Basis des Objektmodells D2b simulierte Verteilung in Falschfarben-Darstellung gegenübergestellt.<sup>(12)</sup>

<sup>(12)</sup>Diese Darstellung entspricht der Möglichkeit, im Analyse-Programm Ergebnisse (sowohl abgespeicherte gemessene als auch simulierte) zu visualisieren.

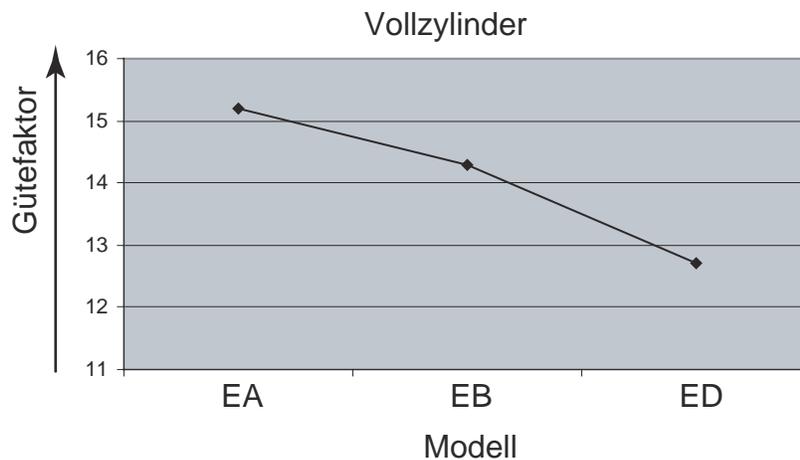


**Abbildung 6.16:** In Falschfarben dargestellte Impulsverteilungen für die Energielinie 1332,50 keV des Radionuklids  $^{60}\text{Co}$ ; die hier nicht erkennbare Höhenachse ragt in die Bildebene hinein; an der Impulsachse sind nur "beliebige Einheiten" aufgetragen, weil erst in einer weiteren Routine – der Aktivitätsbestimmung – den virtuellen aktivitätstragenden Objekten gemäß der durch Simulation erzeugten Impulsverteilung ein Aktivitätswert zugeteilt wird, sodass eine größtmögliche Übereinstimmung zwischen gemessener und simulierter Verteilung erzielt wird.

Oben: gemessene Originalverteilung und unten: simulierte Impulsverteilung auf der Basis von Objektmodell D2b.

### Modell E: Vollzylinder

Die zweite hier zu betrachtende Möglichkeit für das identifizierte 3. Objekt (grau markierter Körper in Abb. 6.8) stellt der homogene Vollzylinder dar, der im Weiteren mit Modell E bezeichnet wird. Ihm wird entsprechend des durch Approximation ermittelten Wertes für den Schwächungskoeffizienten ( $\mu_{\text{innen}} = 0,32 \text{ cm}^{-1}$ ) das Material Eisen mit der Dichte  $\rho = 6,0 \text{ g/cm}^3$  zugeteilt. Die drei im Folgenden aufgeführten Varianten des Grundmodells E orientieren sich an den unterschiedlichen Objektmodellen für den Fall des Behälters für das 3. Objekt (Modell A, B sowie D). Der Modellname für einen Vollzylinder setzt sich dementsprechend aus dem Buchstaben E (für einen Vollzylinder aus Eisen) und einem weiteren Buchstaben, der für die Position bzw. den Grad der Befüllung im Zylinder steht, zusammen.



**Abbildung 6.17:** Gütefaktor für das Modell E, ein Vollzylinder aus Eisen, aufgetragen für drei unterschiedliche Varianten, die sich an den Objektmodellen für den Behälter anlehnen.

1. Modell EA

Analog dem Grundmodell des Behälters (Modell A) wird der Vollzylinder nur in  $y$ -Richtung aus dem Zentrum des Hauptobjekts verschoben; die Koordinaten seines Mittelpunkts sind:  $x = 0$  und  $y = \frac{n_{01} - n_{03}}{\Delta_{\text{horizontal}}}$ . Die Aktivität ist homogen im gesamten Zylinder verteilt.

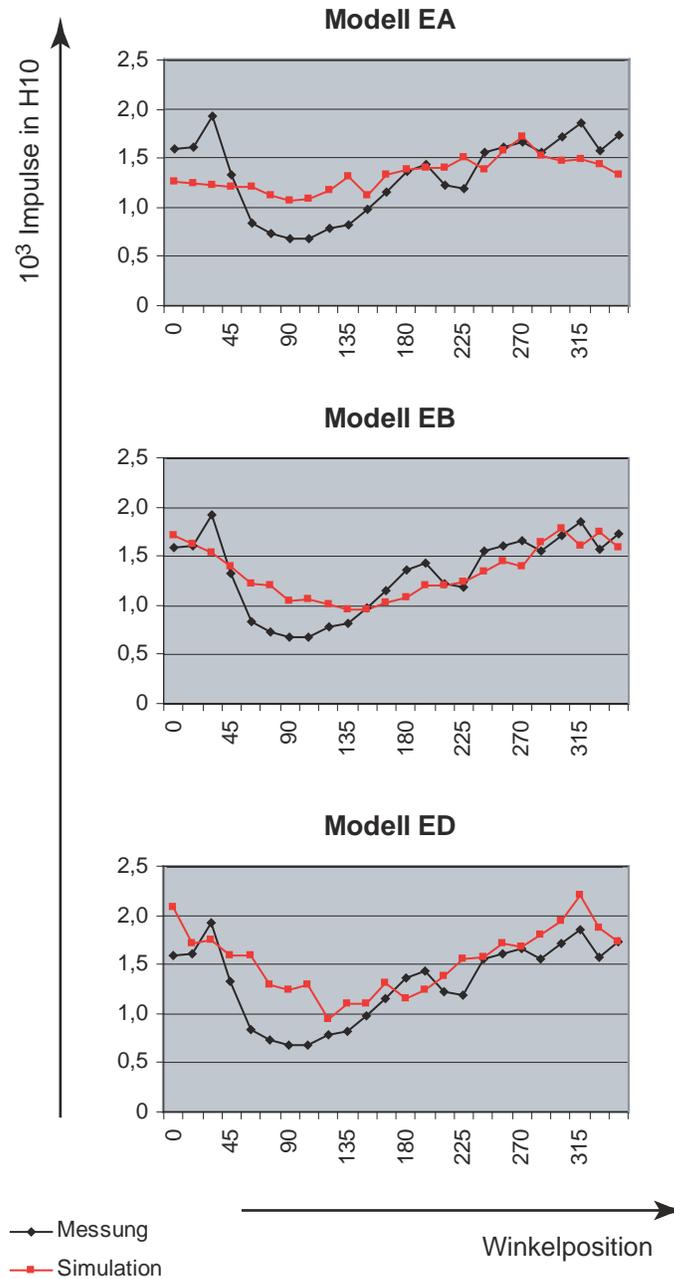
2. Modell EB

Analog dem verschobenen Behälter (Modell B) wird der Vollzylinder zusätzlich noch in  $x$ -Richtung bezüglich des Nullpunkts verschoben; die Koordinaten seines Mittelpunkts sind dann:  $x = +15 \text{ mm}$  und  $y = \frac{n_{01} - n_{03}}{\Delta_{\text{horizontal}}}$ . Die Aktivität ist homogen im gesamten Zylinder verteilt.

3. Modell ED

Der Vollzylinder wird ebenso positioniert wie im Modell EB, also in  $x$ - und  $y$ -Richtung bezüglich des Nullpunkts verschoben. Der homogene Zylinder wird allerdings analog zu Modell D nur im unteren Bereich mit Aktivität besetzt.

Für diese drei Varianten des Grundmodells E sind in Abb. 6.18 die Ergebnisse, d. h. jeweils die simulierte Impulsverteilung in der Höhe H10, graphisch dargestellt. Sie zeigen im Wesentlichen die gleiche Winkelabhängigkeit wie der jeweils entsprechende homogen befüllte Behälter. Zusätzlich kann die Verbesserung des Gütefaktors beim Übergang der Objektmodelle von EA zu EB und ED in Abb. 6.17 nachvollzogen werden.



**Abbildung 6.18:** Impulsverteilungen in der Höhe H10 für die verschiedenen Varianten des homogenen Vollzylinders (Fall E):

Oben: Mittelpunkt des Zylinders nur um die durch Approximation ermittelte Verschiebung entlang der  $y$ -Achse bezüglich des Nullpunkts verschoben, d. h. Mittelpunkt bei:  $x = 0$  und  $y = \frac{n_{01} - n_{03}}{\Delta_{\text{horizontal}}}$ .

Mitte: zusätzlich noch Verschiebung in  $x$ -Richtung.

Unten: nur ein Teil des Vollzylinders ist mit Aktivität belegt.

### Modell F: Aktivität außerhalb des 3. Objekts

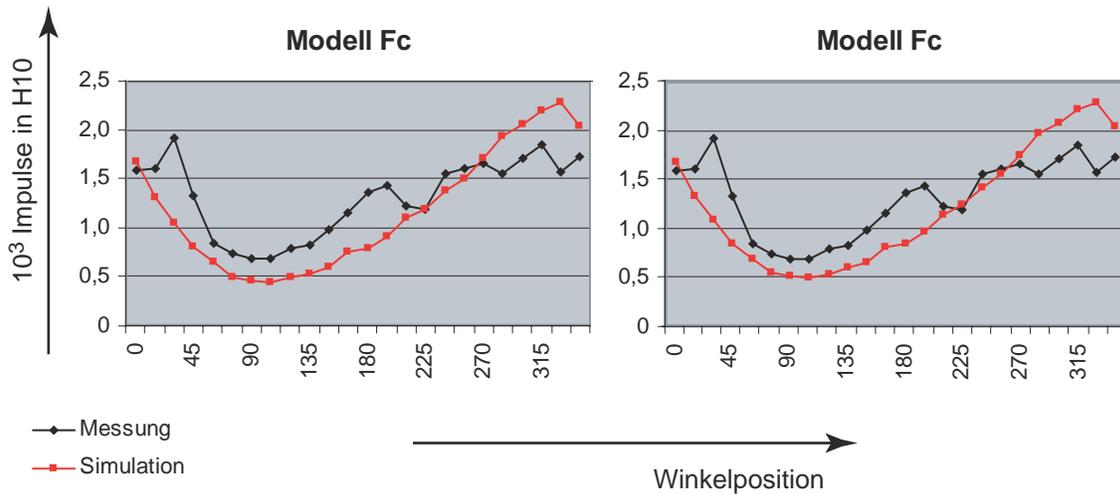
Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass der im Inneren der Zementmatrix im Untersuchungsobjekt identifizierte Zylinder mit dem größten aller hier auftretenden Schwächungskoeffizienten  $\mu_{\text{Matrix}_3}$  mit großer Wahrscheinlichkeit einen zusätzlichen Abschirmbehälter für Radioaktivität darstellt, und dass das Vorkommen der identifizierten Radionuklide auf dessen Inneres beschränkt ist. Trotzdem wird der unwahrscheinliche, aber theoretisch nicht auszuschließende Fall, dass Radionuklide auch außerhalb dieses Zylinders vorliegen, ebenfalls betrachtet und im Weiteren mit Modell F bezeichnet. Die Grundlage dieses Objektmodells stellt dabei der unter Modell EA beschriebene homogene Vollzylinder aus Eisen dar, der ebenfalls mit Aktivität gefüllt sein kann. Zusätzlich dazu werden außerhalb des Vollzylinders die Radionuklide in Form von Kugeln entsprechend ihrer ermittelten Winkelpositionen (siehe Tab. 6.6) verteilt. Die Kugeln seien dabei jeweils aus dem selben Material wie die Matrix, in der sie eingebettet sind. Für die radiale Position  $r$  und den Radius  $R_Q$  jeder Kugel kann nur jeweils eine theoretisch mögliche Bandbreite angegeben werden. Die Kombination beider Parameter unter Berücksichtigung von  $r + R_Q \leq R_3$  ergibt die theoretischen Möglichkeiten für den Aufbau des virtuellen Untersuchungsobjekts. Die beiden hier betrachteten Varianten werden folgendermaßen bezeichnet:

- Modell Fc  
Aktivität liegt nur außerhalb des Zylinders (3. Objekt) in Form von Kugeln vor.
- Modell Fd  
Zusätzlich zu den Kugeln befindet sich Aktivität auch (homogen verteilt) im Zylinder (3. Objekt).

Für beide Fälle ist in Abb. 6.19 jeweils die simulierte Impulsverteilung in der Höhe analog zu allen anderen Modellen aufgeführt. Eingesetzt wurden dazu jeweils Kugel-Quellen mit dem Radius  $R_Q = 10$  mm, die im Abstand 70 mm vom Zentrum des Hauptobjekts entfernt positioniert waren.<sup>(13)</sup> Für beide Objektmodelle (Fc und Fd) zeigt sowohl der Vergleich mit der gemessenen Impulsverteilung als auch der Gütefaktor (siehe dazu Tab. 6.10) eine gute Übereinstimmung zwischen gemessener und simulierter Impulsverteilung. Auch wenn dieses Objektmodell für die Praxis eher unwahrscheinlich zu sein scheint, ist es doch mit den vorhandenen Informationen verträglich und wird deswegen mit in die Liste der gültigen Modelle aufgenommen. Der damit errechnete Aktivitätswert ist somit auch Element des Aktivitätsintervalls.

---

<sup>(13)</sup>Für größere radiale Abstände der Kugeln vom Zentrum des Hauptobjekts wurden wesentlich schlechtere Ergebnisse gewonnen.



**Abbildung 6.19:** Impulsverteilungen in der Höhe H10. Für beide Fälle befindet sich ein homogener Vollzylinder aus Eisen (gemäß Modell EA) im Untersuchungsobjekt.

Links: Aktivität liegt nur außerhalb des Vollzylinders als lokale Aktivitätskonzentrationen (in Form von Kugeln) vor (Modell Fc).

Rechts: Zusätzlich zu den lokalen Aktivitätskonzentrationen außerhalb ist die Aktivität auch innerhalb des Vollzylinders homogen verteilt (Modell Fd).

### Zusammenfassung der Ergebnisse

In Tab. 6.10 sind für alle diskutierten Modelle der jeweils ermittelte Aktivitätswert zusammengestellt. Das Aktivitätsintervall zum vorliegenden Untersuchungsobjekt setzt sich im Allgemeinen aus den Werten aller akzeptierter Modelle zusammen, die durch den Vergleich von simulierten und gemessenen Impulszahlen für jede Messposition bestimmt werden (siehe dazu Abschnitt 5.1.3). Die hier vorliegenden Modelle zum Untersuchungsobjekt wurden allerdings erzeugt, indem aus der theoretischen Bandbreite der nicht vollständig bestimmten Parameter jeweils wahrscheinliche Werte (hinsichtlich gewünschter Änderungen der Impulsverteilung sowie hinsichtlich Erfahrungen aus der Praxis) gewählt wurden, um nur an einer kleinen Zahl<sup>(14)</sup> an Modellen die iterative Prozedur, ein oder mehrere Modelle für ein Untersuchungsobjekt zu variieren, zu demonstrieren. Würde jeweils die komplette Bandbreite der vorliegenden zu variierenden Parameter ausgenutzt, so würden sich auch Modelle ergeben, die nicht akzeptiert würden und deren Aktivitätswerte nicht im Ergebnisintervall aufgenommen würden. Die hier diskutierten Modelle sind alle mit den vorliegenden Informationen verträglich und zeigen eine schrittweise Verbesserung der Übereinstimmung von Modell und tat-

<sup>(14)</sup>Zu diesem Zeitpunkt stehen noch nicht alle Teile der Auswertung in einem automatischen Modus zur Verfügung; einzelne Auswertungsschritte müssen noch manuell durchgeführt werden.

sächlichem Untersuchungsobjekt auf. Zur objektiven Beurteilung der Übereinstimmung wurde jeweils die Summe der relativen Abweichungen von simulierten zu gemessenen Impulsen in den Höhen, die sich innerhalb des 3. Objekts befinden, berechnet. Dieser Gütefaktor ist ebenfalls für alle diskutierten Modelle in Tab. 6.10 aufgeführt. Ein Modell soll hier als akzeptiert gelten, wenn der Gütefaktor den Wert 16,0 nicht überschreitet.

### 6.2.5 Auswertung nach Filß

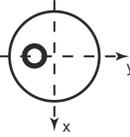
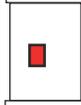
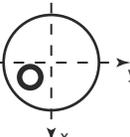
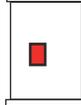
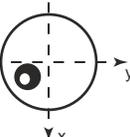
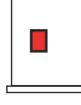
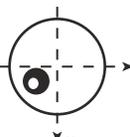
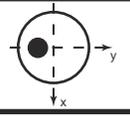
Die "traditionelle" Auswertung nach Filß [6] unter der Annahme einer weitgehend homogenen Verteilung der Aktivität sowie der inaktiven Matrix im gesamten Untersuchungsobjekt (siehe Gl. 2.8 in Kapitel 2) liefert für die  $^{60}\text{Co}$ -Aktivität den Wert  $7,5 \cdot 10^7$  Bq (Bezugsdatum: 25.08.1998). Bei dieser Auswertung wird für die Matrix eine mittlere Dichte aus der Masse des Untersuchungsobjekts und seinem befüllbaren Volumen berechnet: dabei ergibt sich der Wert  $\bar{\rho} = 0,014 \text{ g/cm}^3$ , ein um den Faktor 170 zu kleiner Wert im Vergleich zur Dichte, die aus der Approximation an die DR-Daten ermittelt wurde. Für ein Modell wie es den Annahmen für die Auswertung nach Filß entspricht, d. h. homogene Verteilung einer Matrix mit der errechneten Dichte ( $0,014 \text{ g/cm}^3$ ) sowie des Radionuklids  $^{60}\text{Co}$  im gesamten Objekt, wird die Impulsverteilung durch Simulation erzeugt. Für den Gütefaktor (berechnet nur aus Messpositionen in den Höhen H9 und H10) ergibt sich für diesen Fall der Wert 37,1; er ist zum Vergleich ebenfalls in Tab. 6.10 mit aufgenommen und zeigt das hohe Maß an Unverträglichkeit dieses Objektmodells mit den vorhandenen Informationen zum Untersuchungsobjekt. Die für dieses Modell berechnete Aktivität wird nicht im Ergebnisintervall mit aufgenommen.

### 6.2.6 Vergleich und Bewertung der Ergebnisse

Der Inhalt des hier betrachteten 280 L-Gebindes wurde am Institut für Radiochemie außer auf der Basis von zerstörungsfreien Messmethoden zusätzlich noch mittels zerstörender Maßnahmen charakterisiert (siehe dazu die Photos in Abb. 6.20 [27]). Dabei wurde durch gezielte Bohrungen<sup>(15)</sup> in die Zementmatrix im Innenfass der in der DR erkennbare Innenzylinder (siehe Abb. 6.5) freigelegt. Innerhalb dieses Bleibehälters wurden zwei schraubenähnliche Gebilde gefunden, die in der gleichen Zementmatrix eingebettet waren, wie sie außerhalb des Bleibehälters vorlag. Die Gamma-Messungen an den entnommenen beiden Körpern mittels eines mobilen Germanium-Detektors ergaben in der Summe eine  $^{60}\text{Co}$ -Aktivität von  $1,12 \cdot 10^8$  Bq (Bezugsdatum: 25.08.1998).

---

<sup>(15)</sup>auf der Basis der Ergebnisse von Transmissions-Computer-Tomographie-Messungen

Modell	Güte <sup>1</sup>	Aktivität <sup>2</sup> in Bq	Geometrie des 3. Objekts	Material außen	Material innen	Aktivitäts- verteilung <sup>3</sup>
A1	15,3	$9,47 \cdot 10^7$		Blei	Luft	
A2	15,4	$9,00 \cdot 10^7$		Blei	Zement	
A3	16,0	$8,38 \cdot 10^7$		Grauguss	Luft	
A4	14,9	$8,53 \cdot 10^7$		Grauguss	Zement	
EA *	15,2	$6,89 \cdot 10^7$		Eisen		
B1	14,7	$9,38 \cdot 10^7$		Blei	Luft	
B2	14,3	$9,02 \cdot 10^7$		Blei	Zement	
B3	15,1	$8,33 \cdot 10^7$		Grauguss	Luft	
B4	14,9	$8,42 \cdot 10^7$		Grauguss	Zement	
EB *	14,3	$6,90 \cdot 10^7$		Eisen		
C1	15,0	$8,50 \cdot 10^7$		Blei	Luft	
C2	15,0	$8,14 \cdot 10^7$		Blei	Zement	
C3	14,9	$8,23 \cdot 10^7$		Grauguss	Luft	
C4	14,5	$8,18 \cdot 10^7$		Grauguss	Zement	
D1	10,2	$1,00 \cdot 10^8$		Blei	Luft	
D2a	10,3	$9,55 \cdot 10^7$		Blei	Zement + Luft	
D2b	10,3	$9,52 \cdot 10^7$		Blei	Zement	
D3	12,6	$9,12 \cdot 10^7$		Grauguss	Luft	
D4a	11,7	$9,14 \cdot 10^7$		Grauguss	Zement + Luft	
D4b	11,5	$9,26 \cdot 10^7$		Grauguss	Zement	
ED *	12,7	$7,96 \cdot 10^7$		Eisen		
Fc	12,2	$4,56 \cdot 10^7$		Eisen		
Fd	11,3	$4,79 \cdot 10^7$		Eisen		
FILSS	37,1	$3,58 \cdot 10^6$		"Zement" (siehe Abschnitt 6.2.5)		

<sup>1</sup> Summe der relativen Abweichungen in den Höhen H9 und H10.

<sup>2</sup> Das Bezugsdatum aller Aktivitätswerte ist das Datum der tatsächlichen Gamma-Scannmessung (25.08.1998).

<sup>3</sup> Der jeweils rot markierte Bereich kennzeichnet die Lage der Radionuklide.

\* Im Falle des Vollzylinders (Modell E) ist die Abbildung in der Spalte "Geometrie" nur als Positionsangabe des zylindrischen 3. Objekts zu verstehen.

**Tabelle 6.10:** Zusammenfassung der Ergebnisse für alle diskutierten Modelle für das virtuelle Untersuchungsobjekt.

In Tab. 6.11 sind die für das Untersuchungsobjekt auf drei unterschiedliche Weisen ermittelten Aktivitätswerte zusammengestellt:

1. Auswertung nach Filß, wobei eine homogene Verteilung von Aktivität und inaktiver Matrix zugrunde gelegt wurde, die der Realität nicht entspricht.
2. Ergebnis der Gamma-Messung direkt an den vorliegenden Quellen nach einer zerstörenden Analyse des Untersuchungsobjekts.
3. Aktivitätsintervall, das aufgrund der zur Verfügung stehenden Ergebnisse des Vielfachscheiben-Scans und der DR-Messung ermittelt wurde. Dabei wurden alle diskutierten Modelle, die auch in Tab. 6.10 aufgeführt sind (außer das Modell nach Filß, letzte Zeile in der Tabelle), in die Berechnung des Erwartungswerts der Gesamtaktivität mit einbezogen.<sup>(16)</sup>

**Tabelle 6.11:** Ergebnisse der drei unterschiedlichen Auswertemethoden.

Methode	Aktivität <sup>a</sup> in Bq
Berechnung nach Filß	$7,5 \cdot 10^7$
direkte Messung an den Quellen	$1,12 \cdot 10^8$
neue Auswertung	$(8,3^{+1,7}_{-3,8}) \cdot 10^7$

<sup>a</sup>Bezugsdatum jeweils: 25.08.1998

Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung aller drei Aktivitätswerte. Das neue Auswerteverfahren bietet als einzige zerstörungsfreie Methode die Möglichkeit, einen fundierten Vertrauensbereich für die Aktivität des Untersuchungsobjekts anzugeben, der auf der Unvollständigkeit der Informationen, die zur Beschreibung des Objekts zur Verfügung stehen, beruht.

Die sehr gute Übereinstimmung des mit der Methode nach Filß bestimmten Aktivitätswertes in diesem speziellen Fall darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass er auf völlig falschen Annahmen beruht (keine homogene Aktivitätsverteilung und Matrix, deren mittlere Dichte viel zu niedrig ist) und das gute Ergebnis somit eher zufällig erzielt wurde. Dies wurde in der Vergangenheit am Institut für Radiochemie in der Praxis an verschiedenen Abfallgebinden nach zerstörender Probennahme bestätigt. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass mit dieser Methode keine fundierte Aussage über den

<sup>(16)</sup>Bei einer wirklichen automatischen Auswertung könnten wesentlich mehr verschiedene Kombinationen von Parameterwerten zu einem Objektmodell in der Simulation berücksichtigt werden; unter Umständen hätte dies ein größeres Aktivitätsintervall zur Folge.

Vertrauensbereich gemacht werden kann, der ermittelte Wert folglich hinsichtlich seiner Richtigkeit und Genauigkeit nicht bewertet werden kann.



**Abbildung 6.20:** Photos des Untersuchungsobjekts (280L-Fass) und seines Inhalts.  
oben links: geöffnetes Fass mit Bohrloch in der Zementmatrix  
oben rechts: eines der beiden im Bleibehälter vorgelegenen Objekte; in diesen schraubenähnlichen Gebilden aus Edelstahl war die Aktivität umschlossen.  
unten: der in der Zementmatrix eingebettete Bleibehälter mit Deckel

# Kapitel 7

## Zusammenfassung und Ausblick

Wie in Kapitel 3 dargelegt, werden bisher in der Praxis der Charakterisierung von radioaktiven Abfällen Mess- und vor allem Auswerteverfahren eingesetzt, die nicht in jedem Fall ein genaues und richtiges Ergebnis für das nuklidspezifische Aktivitätsinventar eines Untersuchungsobjekts liefern. Dies basiert im Wesentlichen auf fehlenden Informationen durch falsch ausgelegte<sup>(1)</sup> Messsysteme bzw. auf einer unzureichenden Berücksichtigung der tatsächlich vorhandenen Informationen bei der Auswertung aufgrund eines fehlenden universellen Auswerteverfahrens.

Im Rahmen eines vom BMBF<sup>(2)</sup> geförderten Gemeinschaftsprojekts zwischen dem Institut für Radiochemie (Technische Universität München) und dem Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik (Forschungszentrum Jülich GmbH) wurde ein Analyse- und Auswerteverfahren entwickelt, das unabhängig vom eingesetzten Messsystem das Gamma-emittierende Aktivitätsinventar eines großvolumigen Untersuchungsobjekts und die zugehörigen Vertrauensbereiche auf der Grundlage aller zur Verfügung stehender Informationen quantitativ bestimmt. Das entwickelte Verfahren wurde in einem umfassenden, modular aufgebauten Software-Programm verwirklicht und ermöglicht bisher die Berücksichtigung von Messdaten aus Wägung, segmentiertem Gamma-Scanning (SGS) und Gamma-Transmissionsmessungen, insbesondere der Digitalen Radiographie (DR). Durch die zum Teil sehr aufwändige, automatische Analyse der verfügbaren Messdaten und ihrer Verknüpfung mit weiteren zum Teil zwingend erforderlichen Informationen, wie den eingesetzten Detektorsystemen, Behälterabmessungen, etc. werden mögliche Zusammensetzungen des Untersuchungsobjekts bestimmt. Eine Zusammensetzung bezieht sich hierbei auf den geometrischen Aufbau, die Materialverteilung sowie die Verteilung der Radionuklide. Fehlende oder unzureichende Informationen können in einer großen Anzahl an prinzipiell möglichen Zusammensetzungen

---

<sup>(1)</sup>Ein geeignetes Messsystem liefert alle für eine korrekte Auswertung erforderliche Messdaten.

<sup>(2)</sup>Bundesministerium für Bildung und Forschung

(Objektmodelle) resultieren. In Simulationsrechnungen werden für alle Modelle die entsprechenden Messungen nachvollzogen und durch Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messdaten eine Aussage über die Akzeptanz jedes Modells getroffen. Ein akzeptiertes Modell ist somit mit allen verfügbaren Informationen konsistent und stellt eine Möglichkeit dar, den Aufbau des tatsächlichen Objekts zu beschreiben. Aus allen akzeptierten Lösungen wird abschließend der Erwartungswert für das nuklidspezifische Aktivitätsinventar im Untersuchungsobjekt und der jeweils zugehörige Vertrauensbereich bestimmt. Routinen, die der Analyse und Kombination von Informationen, sowie der Aktivitätsbestimmung zugrunde liegen, wurden im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und in den Kapiteln 4 und 5 detailliert beschrieben.

Für die erfolgreiche Umsetzung des Konzepts des Analyse- und Auswerteverfahrens, sowie der Integration der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Routinen wurden externe, professionelle Software-Entwickler<sup>(3)</sup> in das Projekt eingebunden mit der Zielsetzung der Beratung

- bei der Spezifikation der Software, unter der das Gesamtprogramm entwickelt werden sollte,
- bei der Auswahl geeigneter Methoden und der Art der Integration von einzelnen Routinen in das Gesamtprogramm
- und bei der Definition der Schnittstellen zwischen verschiedenen Modulen des Gesamtprogramms,

sowie der Übernahme wesentlicher Bestandteile der Realisierung des Programms, speziell der Datenverwaltung und der Implementierung der Schnittstellen zwischen Anwender und Programm einerseits und dem Programm und den einzelnen Modulen andererseits. Bei der Entwicklung des gesamten Programms wurde und wird stets auf eine benutzerfreundliche und praxisgerechte Realisierung Wert gelegt.

Das gesamte Programm ist als Microsoft Windows-Software ausgelegt und wurde in C++ entsprechend des objektorientierten Software-Standards entwickelt. Für die Eingabe der im Programm benötigten externen Daten (z. B. Messwerte aus dem SGS) wurden entsprechende Importfunktionen implementiert. Die Simulations-, Analyse- und Auswerterroutinen, die von den beiden Projektpartnern unabhängig entwickelt und getestet wurden, werden entweder direkt im Programm implementiert oder werden in Form von dynamischen Bibliotheken (DLLs – Dynamic Link Libraries) eingebunden. Letzteres erlaubt Arbeiten an den Routinen ohne der Notwendigkeit einer Neukompilierung des gesamten Programms. Dies war speziell in der Entwicklungsphase

---

<sup>(3)</sup>Fa. Ingenieurbüro Herwig Marschelke, Reichenau.

von großem Vorteil. Die Visualisierung unterschiedlicher Daten (z. B. Eingangsdaten wie Messergebnisse, Modelle für Untersuchungsobjekte sowie Analyseergebnisse) wird durch graphische Module gewährleistet. Um den momentanen Stand des Gesamtprogramms zu verdeutlichen sei auf den Anhang C verwiesen, in dem beispielhaft einige Module aufgeführt sind.

Die im Weiteren geplanten und zum Teil schon in Realisation befindlichen Arbeiten an dem neuen Analyse- und Auswerteverfahren sehen vor, die einzeln entwickelten und getesteten Routinen – soweit noch nicht geschehen – in das Gesamtprogramm zu integrieren. Erst dann kann sinnvoll eine vollständige, zeitlich sehr aufwändige Analyse aller verfügbarer Informationen zu einem Untersuchungsobjekt erfolgen.<sup>(4)</sup> Langfristig soll das entwickelte Gesamtprogramm von Personen, die im Bereich der radioaktiven Abfallentsorgung bzw. Aktivitätsbestimmung großvolumiger Objekte tätig sind, genutzt werden können. Als Vorstufe dazu wird es am Institut für Radiochemie in dem vorhandenen Gamma-Scan-Messsystem integriert und im Routinebetrieb eingesetzt werden. Im Rahmen der damit verbundenen erforderlichen Umbaumaßnahmen wird das vorhandene Gamma-Scan-Messsystem um die Einrichtung eines Einfachen Transmissionsmesssystems erweitert.

Der modulare Aufbau des Auswerteverfahrens erlaubt die Einbindung weiterer Informationsquellen, die im Programm berücksichtigt werden sollen. So ist geplant, Ergebnisse aus Transmissions-Computer-Tomographiemessungen ebenfalls automatisch aufzubereiten und daraus weitere Informationen über die Matrixverteilung in einem Untersuchungsobjekt zu erfahren und für den Aufbau potentieller Objektmodelle zu nutzen. Eine weitere Möglichkeit, über die Verteilung von Radionukliden in einem vorliegenden Untersuchungsobjekt Aussagen zu treffen, ist die Ausnutzung von Zerfallsreihen: aufgrund von identifizierten Nukliden können eventuell auch Angaben für nicht direkt identifizierte Nuklide gemacht werden, wenn für diese Nuklide ein radioaktives Gleichgewicht mit einem identifizierten Radionuklid unterstellt werden kann. Für Radionuklide mit mehreren Energielinien empfiehlt sich die unabhängige Auswertung verschiedener Energielinien und der anschließende Vergleich der ermittelten Ergebnisse, also der möglichen Modelle, die das Untersuchungsobjekt beschreiben sollen. Die unabhängig voneinander erstellten Modelle auf der Basis unterschiedlicher Energielinien des selben Radionuklids dürfen sich nicht gegenseitig ausschließen oder widersprechen. Nur Modelle, die sich innerhalb eines erlaubten Toleranzbereichs entsprechen, stellen

---

<sup>(4)</sup>Im Rahmen dieser Arbeit mussten noch viele Ergebnisse einzelner Routine manuell kombiniert werden; deswegen wurde oft nur der prinzipielle Weg der Datenanalyse sowie -kombination aufgezeigt, aber nicht konsequent bis zum Endergebnis durchgeführt.

ein mit allen vorhandenen Informationen verträgliches Ergebnis dar und liefern das Aktivitätsintervall dieses Radionuklids im gesamten Untersuchungsobjekt.

# Anhang A

## Liste der verwendeten Abkürzungen

Innerhalb der Arbeit werden die folgenden Abkürzungen verwendet:

IGS	integrales Gamma-Scanning oder integraler Gamma-Scan
SGS	segmentiertes Gamma-Scanning oder segmentierter Gamma-Scan
DR	Digitale Radiographie
TCT	Transmissions-Computer-Tomographie
ECT	Emissions-Computer-Tomographie

Die verwendeten Abkürzungen beschränken sich auf die oben aufgeführten, in der Fachwelt etablierten Bezeichnungen. Es wurde bewusst darauf verzichtet, andere längere Begriffe wie z. B. *Oberflächenzählratenverteilung* oder *Vielfachscheiben-Scan* – auch wenn sie in der Arbeit häufig gebraucht wurden – durch Abkürzungen zu ersetzen, um den Lesefluss nicht unnötig zu erschweren.



# Anhang B

## Führende europäische Messzentren

Im Folgenden sind die führenden europäischen Messzentren auf dem Gebiet der Produktkontrolle radioaktiver Abfälle in alphabetischer Reihenfolge aufgeführt.

CEA	CEA Cadarache, St.-Paul-lez-Durance, Frankreich.
ENEA	ENEA-ERG-SAL-LAB, Maria di Galeria (Rom), Italien.
FZJ	Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik, Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, Deutschland.
ITN	CIEMAT-DFN, Madrid, Spanien.
KEMA	KEMA N. V., Arnhem, Niederlande.
LOVI	Imatran Voima Oy, Loviisa NPP, Loviisa, Finnland.
NNC	Waste Quality Checking Laboratory, Winfried Technology Centre, Dorset, Großbritannien.
NUCL	Societa per l'Ecoingegneria Nucleare, Maria di Galeria (Rom), Italien.
RCM	Institut für Radiochemie, Technische Universität München, München, Deutschland.
SCK	SCK · CEN, Boeretang, Mol, Belgien.
TVO	Teollisuuden Voima Oy, Olkiluoto NPP, Olkiluoto, Finnland.



# Anhang C

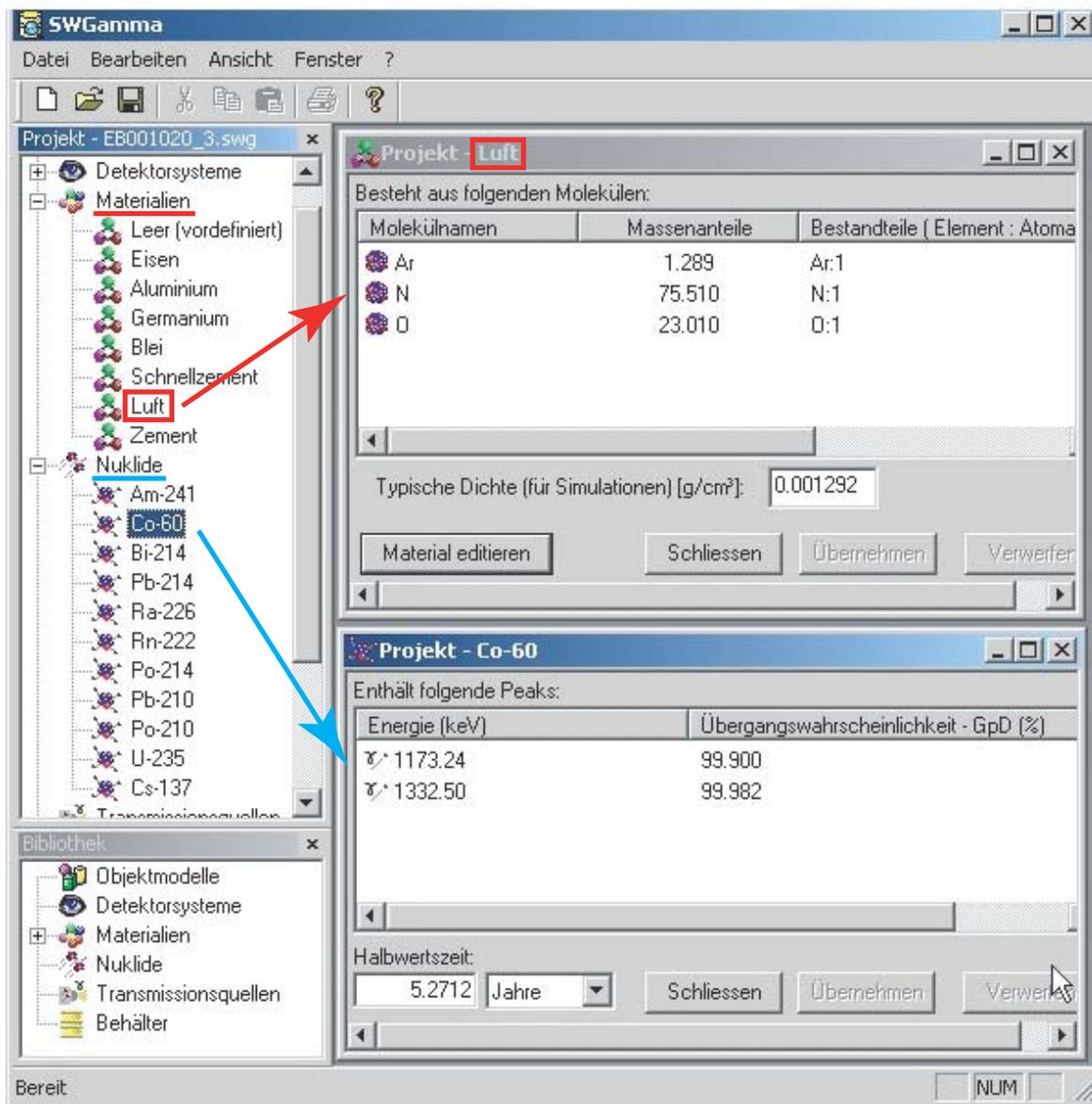
## Das Programm SWGamma

Das Programm *SWGamma* stellt die technische Realisierung des im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten neuen Analyse- und Auswerteverfahrens dar. Im Folgenden wird kurz der bisher zur Verfügung stehende Umfang von *SWGamma* vorgestellt. Zur Beschreibung der einzelnen aufgeführten Routinen sei auf die jeweiligen Unterschriften der Abbildungen verwiesen. Detaillierte Ausführungen zum gesamten Programm, sowie zu einzelnen Routinen des Programms sind in [15] nachzulesen.

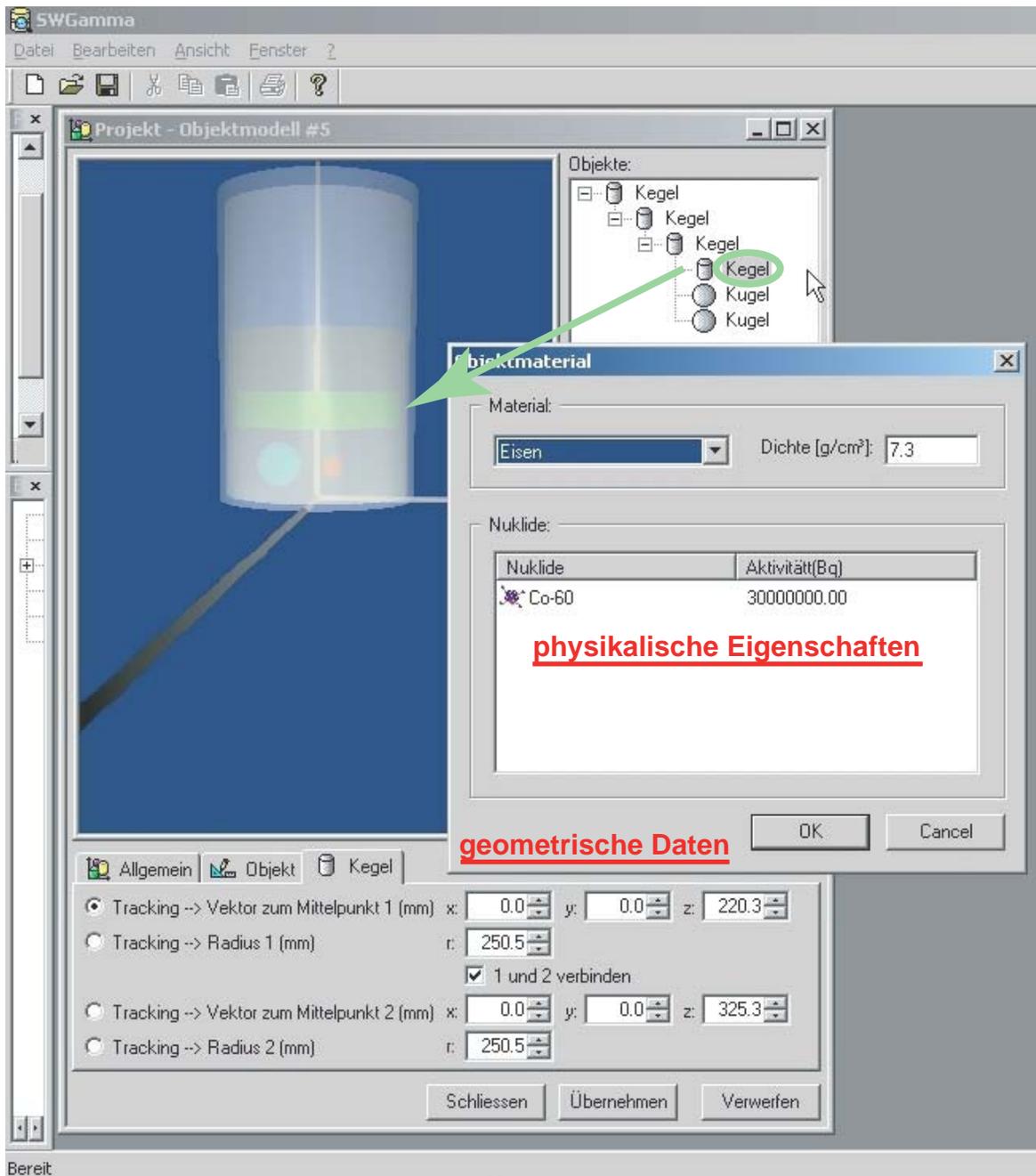
Abb. C.1 zeigt ein Bildschirmfoto des Programms, in dem die Module zur Eingabe von Nuklidinformationen sowie von Materialinformationen dargestellt sind. Auf diese Informationen kann sowohl zur Simulation eines Detektorsystems als auch zur Erzeugung von Objektmodellen zugegriffen werden. Die Routine, die Messergebnisse aus segmentierten Gamma-Scan-Messungen (SGS-Messungen) analysiert und daraus Parametersätze generiert, mit denen die Verteilung von Radionukliden in einem virtuellen Untersuchungsobjekt nachgebildet werden kann, ist bereits im Programm eingebunden. Die automatische Erstellung von Parametersätzen aus den Messergebnissen einer Digitalen Radiographie-Messung sowie die automatische Erzeugung von unterschiedlichen Objektmodellen auf der Basis aller dieser Parametersätze liegt noch nicht vollständig vor; deswegen wurden im Rahmen dieser Arbeit die einzelnen virtuellen Untersuchungsobjekte manuell erzeugt. Beispielhaft ist das Ergebnis einer derartigen Objekterzeugung in Abb. C.2 dargestellt. Auch das Modul zur Simulation eines Detektorsystems steht in *SWGamma* bereits zur Verfügung und schafft die Möglichkeit jede tatsächlich durchgeführte Messung auch virtuell zu erzeugen. In Abb. C.3 sind die Eingabemasken für ein Detektorsystem gezeigt. Für die Simulation einer Messung wird ein vorhandenes virtuelles Detektorsystem und ein erstelltes Objektmodell (virtuelles Untersuchungsobjekt) ausgewählt. Abb. C.4 zeigt das Eingabefenster für die Messparameter, die entsprechend einer tatsächlich vorliegenden Messung eingegeben werden müssen, damit die Struktur der simulierten Messergebnisse (z. B. das zweidimensionale Feld von Zähl-

raten bei der SGS-Messung) der Struktur der realen Messergebnisse entspricht. Die Routine, die durch den Vergleich der simulierten Ergebnisse mit dem Messergebnis die nuklidspezifischen Aktivitäten für ein Objektmodell liefert, kann im Programm schon genutzt werden. Die Implementierung der Bewertung eines Objektmodells muss noch durchgeführt werden. Die Visualisierung von gespeicherten Messergebnissen sowie von Simulationsergebnissen in *SWGGamma* ist in Abb. C.5 gezeigt.

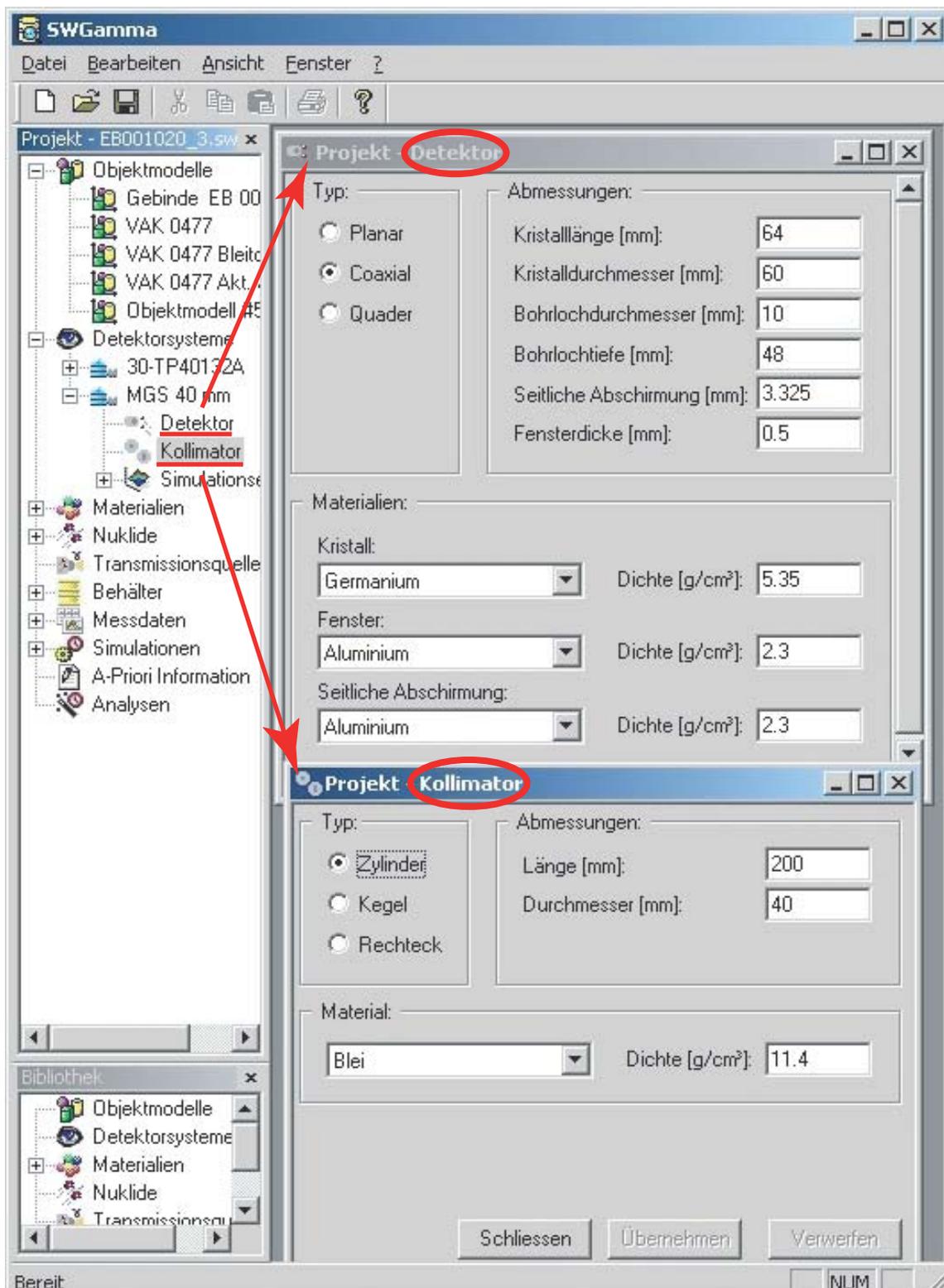
Bedingt durch seinen modularen Aufbau, deckt *SWGGamma* neben der quantitativen Auswertung von Daten zur Aktivitätsbestimmung noch weitere Anwendungsbereiche ab. Einer der wichtigsten ist die Bestimmung der energie- und ortsabhängigen Effizienzwerte für ein (kollimiertes) Detektorsystem. Dies erlaubt eine Verifizierung experimentell durchgeführter Kalibrationsmessungen einerseits, die Durchführung einer numerischen Kalibration eines Detektorsystems andererseits. Mit dem Simulationsmodul kann die Eignung eines existierenden Messsystems für eine spezielle Fragestellung überprüft und gegebenenfalls erforderliche Ergänzungen oder Erweiterungen bestimmt werden.



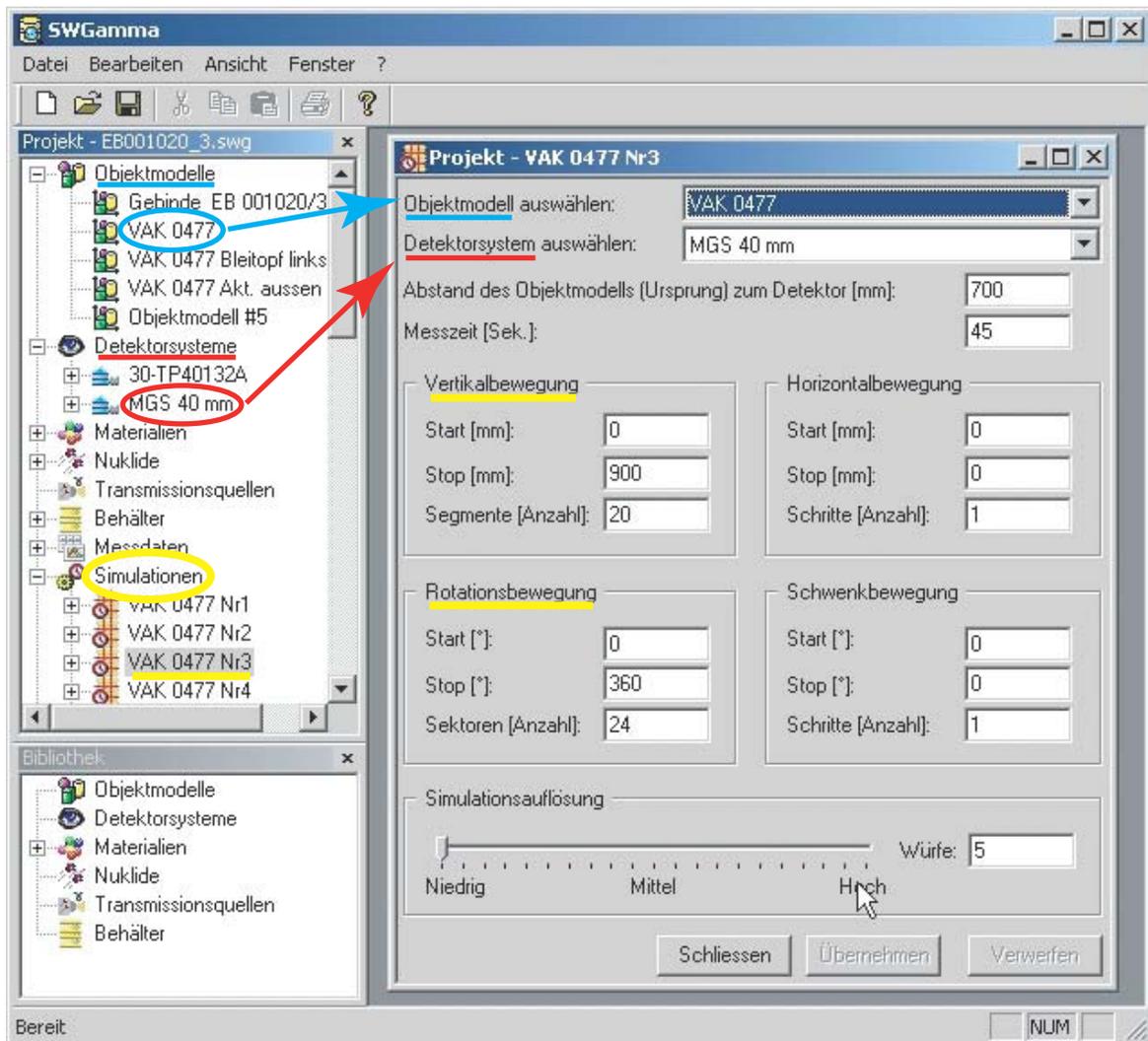
**Abbildung C.1:** Bildschirmfoto der Eingabemaske für Materialien (oben rechts) und für Nuklide (unten rechts). Die Materialdatenbank des Programms kann beliebige Materialzusammensetzungen unter Angabe der jeweiligen Massenanteile berücksichtigen; zusätzlich muss die zugehörige Dichte für ein Material angegeben werden. In der Nukliddatenbank werden unter der jeweiligen Isotopenbezeichnung (z. B.  $^{60}\text{Co}$ ) die zugehörige Halbwertszeit sowie eine beliebige Anzahl an Emissionslinien unter Angabe der Energie in keV und der jeweiligen Übergangswahrscheinlichkeit in % gespeichert.



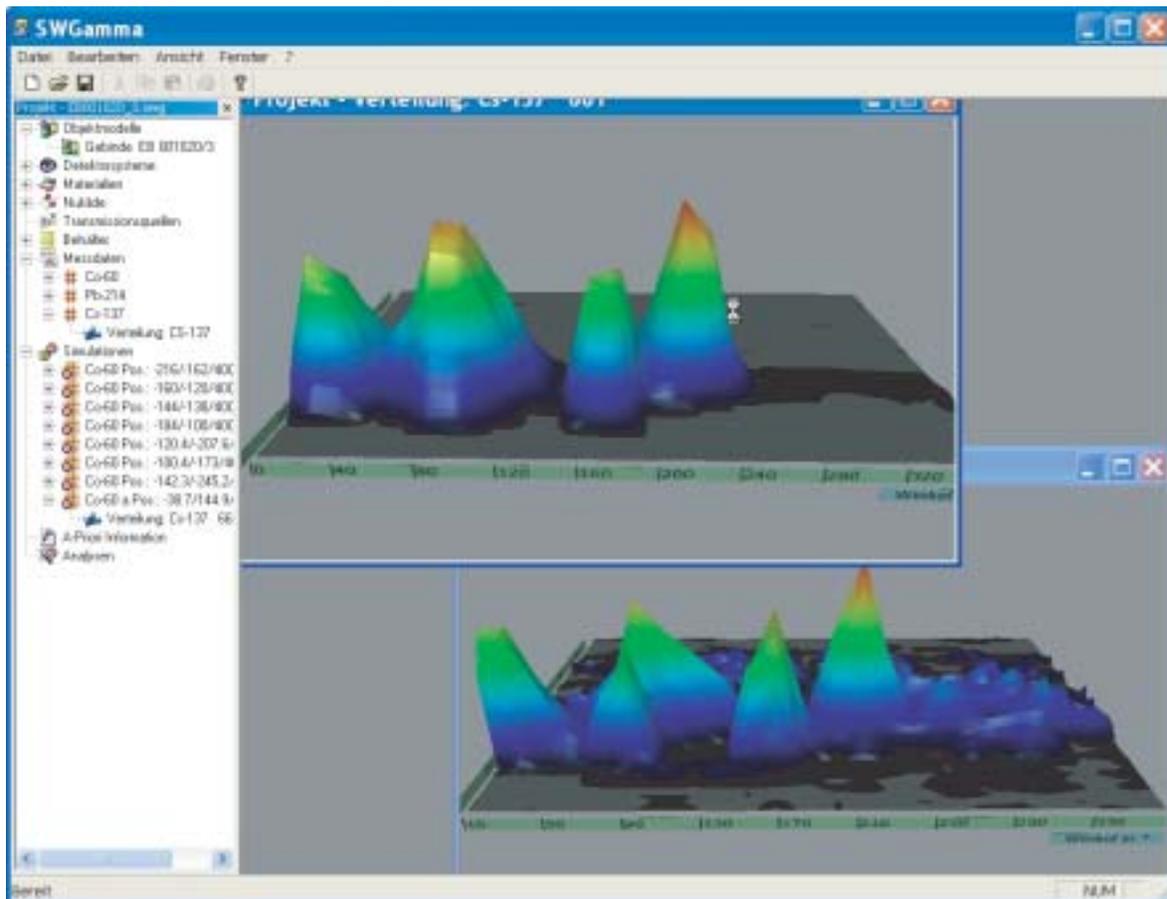
**Abbildung C.2:** Beispiel für ein manuell erzeugtes Objektmodell. Dieses virtuelle Untersuchungsobjekt ist aus Zylindern und Kugeln aufgebaut (in SWGamma sind außerdem Kegel(-stumpf), Ellipsoide und Quader möglich). Jedem dieser Körper ist ein Material aus der Materialdatenbank zugeordnet. Ein Körper kann Radionuklide beinhalten, die mit ihrem Namen (entsprechend der Bezeichnung in der Nukliddatenbank) und einem Aktivitätswert in der Maske "physikalische Eigenschaften" (siehe kleines geöffnetes Fenster rechts im Bild) eingetragen werden. Die im unteren Teil des großen Fensters sichtbare Maske erlaubt die Eingabe von geometrischen Daten wie die Lage im Raum oder die geometrischen Abmessungen eines Körpers (hier für einen Kegel). Die Beschreibung des kompletten Objekts erfolgt als so genannte verkettete Liste, d. h. ein Körper (Mutterobjekt) kann beliebige weitere Körper (Tochterobjekte) enthalten, die sich nicht schneiden, d. h. überlappen, dürfen.



**Abbildung C.3:** Bildschirmfoto der Eingabemasken für ein Detektorsystem. Diese Modul bietet die Möglichkeit, das vierdimensionale Effizienzfeld (Position im Raum sowie Energie) eines Germanium-Detektors in planarer, koaxialer oder quaderförmiger Geometrie zu simulieren. Zusätzlich werden gegebenenfalls vorhandene Abschirmungsstrukturen (siehe oberes Fenster) und Kollimatoren (siehe unteres Fenster) mit ihren Abmessungen und Materialien berücksichtigt.



**Abbildung C.4:** Bildschirmfoto der Eingabemaske für die Simulation einer SGS-Messung. Durch Eingabe eines entsprechenden Satzes an Messparametern kann unter folgenden Messmodi gewählt werden: Vertikal-, Horizontal-, Winkel- und Vielfachscheiben-Scan, sowie Schwenk [3]; dabei werden für eine Bewegung des Detektors (Translations- oder Schwenkbewegung) jeweils die Start- und die Endposition, sowie die Anzahl der Schritte benötigt. Zur Simulation einer Transmissionsmessung wird zusätzlich zum virtuellen Untersuchungsobjekt ein weiteres aktivitätstragendes Objekt – die Transmissionsquelle – erstellt. Mit der Anzahl der Würfe (siehe unterer Teil des Eingabefensters) wird die Simulationsauflösung bestimmt, d. h. die Anzahl der statistisch verteilten Startpunkte von Photonen in einem aktivitätstragenden Körper pro  $\text{cm}^3$  seines Gesamtvolumens.



**Abbildung C.5:** Vergleich der gemessenen Zählratenverteilung für  $^{137}\text{Cs}$  (unten) mit der entsprechenden simulierten Zählratenverteilung (oben) unter Verwendung eines Objektmodells. In der gezeigten Simulation wurden nur die fünf größten lokalen Maxima berücksichtigt.



# Anhang D

## Singulärwertzerlegung

Im Folgenden wird die Methode der Singulärwertzerlegung zur Lösung eines linearen Gleichungssystems kurz erläutert [23].

Für ein allgemeines Gleichungssystem der Form

$$\hat{A} \vec{x} = \vec{b} \quad \Leftrightarrow \quad \hat{A} \vec{x} - \vec{b} = \vec{0} \quad (\text{D.1})$$

berechnet sich der Lösungsvektor  $\vec{x}$  nach Gl. D.2.

$$\vec{x} = \hat{A}^{-1} \cdot \vec{b} \quad (\text{D.2})$$

Ist  $\hat{A}$  eine singuläre Matrix, dann ist sie nicht invertierbar, d. h. ihre Inverse  $\hat{A}^{-1}$  existiert nicht. Für diesen Fall liefert die *Singulärwertzerlegung* (SVD – singular value decomposition) eine Näherungslösung, für die die Abweichungsquadrate zwischen der linken und der rechten Seite des Gleichungssystems (siehe Gl. D.1) minimal wird.

$$\left( \hat{A} \vec{x} - \vec{b} \right)^2 = \min$$

Dazu wird die  $(m \times n)$ -Matrix  $\hat{A}$  in das Produkt dreier Matrizen, die sich einzeln alle leicht invertieren lassen, zerlegt (siehe Gl. D.3).

$$\hat{A} = \hat{U} \hat{S} \hat{V}^T \quad (\text{D.3})$$

Dabei gilt Folgendes:

Die  $(m \times m)$ -Matrix  $\hat{U}$  und die  $(n \times n)$ -Matrix  $\hat{V}$  sind beide orthogonal, d. h. sie erfüllen:

$$\begin{aligned} \hat{U} \hat{U}^T &= \hat{U}^T \hat{U} = \hat{E} \quad \text{und} \\ \hat{V} \hat{V}^T &= \hat{V}^T \hat{V} = \hat{E} \end{aligned}$$

$\hat{E}$  ist dabei die Einheitsmatrix.

Die  $(m \times n)$ -Matrix  $\hat{S}$  ist eine Diagonalmatrix mit folgender Struktur:

$$\hat{S} = \begin{pmatrix} s_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & s_2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_r & \dots & 0 \\ \vdots & & & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{wobei: } s_1 \geq s_2 \geq \dots \geq s_r > 0$$

Die Zahlen  $s_i$  nennt man die *Singulärwerte* der Matrix  $\hat{A}$ ; sie berechnen sich zu:

$$s_i = \sqrt{\lambda_i} \quad , \quad \text{wobei } \lambda_i \text{ die Eigenwerte zu } \hat{A}^T \cdot \hat{A} \text{ sind.}$$

$r$  ist der Rang der Matrix  $\hat{A}$ .

Durch Inversion des Matrizenprodukts gemäß Gl. D.4 erhält man die *Pseudoinverse*  $\hat{A}^+$ .

$$\hat{A}^+ = (\hat{U} \hat{S} \hat{V}^T)^{-1} = (\hat{V}^T)^{-1} \hat{S}^{-1} \hat{U}^{-1} = \hat{V} \hat{S}(1/s_i) \hat{U}^T \quad (\text{D.4})$$

Mit der Pseudoinversen  $\hat{A}^+$  kann Gl. D.2 in folgender Form geschrieben werden:

$$\vec{x}' = \hat{A}^+ \vec{b} \quad (\text{D.5})$$

Gl. D.5 stellt die allgemein gültige Lösung nach der Methode der SVD für ein lineares Gleichungssystem dar. Ist die Matrix  $\hat{A}$  regulär, so ist Gl. D.1 ein exakt bestimmtes Gleichungssystem, für dessen Lösung die SVD die exakte Inverse  $\hat{A}^{-1}$  der Matrix  $\hat{A}$  liefert, mit der der exakte Lösungsvektor  $\vec{x}$  gemäß Gl. D.6 berechnet wird.

$$\vec{x} = \vec{x}' = \hat{A}^+ \vec{b} = \hat{A}^{-1} \vec{b} \quad (\text{D.6})$$

Ist die Matrix  $\hat{A}$  singulär, weil das Gleichungssystem (Gl. D.1) nicht exakt bestimmt ist (d. h. unter- oder überbestimmt), oder weil die Matrix interne lineare Abhängigkeiten beinhaltet, dann liefert die SVD eine Pseudoinverse  $\hat{A}^+$  zurück, mit der der Lösungsvektor  $\vec{x}'$  gemäß Gl. D.7 im Sinne der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt wird.

$$\vec{x}' = \hat{A}^+ \vec{b} = \hat{V} \hat{S}^{-1} \hat{U}^T \vec{b} \quad (\text{D.7})$$

# Literaturverzeichnis

- [1] *Übersicht über Behälter für die Entsorgung über die Landessammelstelle Bayern*, GRB – Sammelstelle Bayern für radioaktive Stoffe GmbH, München.
- [2] *MOSAİK – Transport- und Lagerbehälter für radioaktive Abfälle*, GNS Gesellschaft für Nuklear-Service mbH, Essen.
- [3] T. Bücherl, E. Kaciniel, Ch. Lierse, *Synopsis of Gamma Scanning Systems, Comparison of Gamma Determining Systems and Measuring Procedures for Radioactive Waste Packages*, Report WG-A-01, European Network of Testing Facilities for the Quality Checking of Radioactive Waste Packages, 1998.
- [4] B.-R. Martens, P. Filß, *Determination of the Radionuclide inventory for Waste Packages using Gamma-Ray-Detectors of Low Beam Widths*, Proceedings of a topical meeting organised by the Commission of the European Communities, Directorate General, Cadarache, France (1989), edited by C. Eid and P. Bernard.
- [5] P. Filß, *Relation Between the Activity of a High-Density Waste Drum and its Gamma Count Rate Measured with an Unshielded Ge-detector*, Appl. Radiat. Isot. **468** (1995) 805.
- [6] P. Filß, *Specific activity of large-volume sources determined by a collimated external gamma detector*, Kerntechnik **543** (1989) 198.
- [7] B. Chabaliier, *Non-Destructive Determination of Activity*, Special Issue of Nuclear Technology **7** (1994).
- [8] Ch. Lierse, H. Göbel, E. Kaciniel, Th. Bücherl, H. Krebs, *Application of Digital Radiography for the non-destructive characterization of radioactive waste packages*, Proceeding of the Fifth International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, Berlin (1995) 897, ISBN: 0-7918-1219-7.
- [9] H. Stöcker (Hrsg.), *Taschenbuch der Physik*, Harri Deutsch, Frankfurt, 2000.

- [10] *PHOTKOEK* (*Routine zur Berechnung von Schwächungskoeffizienten*), 1996, AIC Software, [www.photkoef.com](http://www.photkoef.com).
- [11] G. T. Herman, *Image Reconstruction from Projections – The fundamentals of computerized tomography*, Academic Press, New York, 1980.
- [12] H.-J. Sanden, G. Caspary, M. Bruggeman, L. van Velzen, A. Lewis, G. Pina, C. Vicini, R. Remetti, T. Bücherl, *Optimisation of Gamma Assay Techniques for the Standard Quality Cecking of Nuclear Waste Packages and Samples*, Final Report EUR 19127 EN, European Commission, Euratom, 1999.
- [13] H.-J. Sanden, *Program to fit data from gamma scanning transmission measurements*, User Guide 3.1, Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik, Forschungszentrum Jülich GmbH, 1999.
- [14] L. van Velzen et al., *Round robin test for the non-destructive assay of 220 litre radioactive waste packages*, Final Report EUR 19779 EN, European Commission, Euratom, 2001.
- [15] T. Bücherl, A. Elhardt, G. Caspary, *Verbesserung von Richtigkeit und Genauigkeit bei der Bestimmung des Nuklidinventars für die Deklaration und Freimessung von Reststoffen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen*, Fachlicher Schlussbericht RCM-00405, Institut für Radiochemie, Technische Universität München, 2005.
- [16] G. Caspary, *Bestimmung des Ansprechvermögens von HPGe-Detektoren für die numerische Kalibrierung von zerstörungsfreien Messsystemen zur nuklid-spezifischen Ermittlung des Aktivitätsinventars radioaktiver Abfälle*, Fachlicher Schlussbericht SWG02, Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik, Forschungszentrum Jülich GmbH, 2005.
- [17] P. Haberäcker, *Digitale Bildverarbeitung: Grundlagen und Anwendungen*, Carl Hanser Verlag, München, 1989.
- [18] H. W. Schüssler, *Digitale Systeme zur Signalverarbeitung*, Springer-Verlag, Berlin, 1973.
- [19] L. R. Rabiner, B. Gold, *Theory and Applications of Digital Signal Processing*, Inc. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1975.
- [20] A. Rosenfeld, A. C. Kak, *Digital Picture Processing*, Academic Press, New York, 1976.

- [21] K. Levenberg, *Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares*, Quart. Appl. Math. **2** (1944) 164.
- [22] D. Marquardt, *An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters*, SIAM J. Appl. Math. **11** (1963) 431.
- [23] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, *Numerical Recipes in Pascal; The Art of Scientific Computing*, University Press, Cambridge, 1989.
- [24] OC Projects GbRmbH Heimwerker-Fachbegriffe,  
[www.heimwerker-fachbegriffe.de/S/Sc/Schwerbeton/](http://www.heimwerker-fachbegriffe.de/S/Sc/Schwerbeton/).
- [25] OC Projects GbRmbH Heimwerker-Fachbegriffe,  
[www.heimwerker-fachbegriffe.de/G/Gr/Grauguss/](http://www.heimwerker-fachbegriffe.de/G/Gr/Grauguss/).
- [26] Schreier Metall GmbH, [www.schreier-metall.de/de/lief-underscore-10.html](http://www.schreier-metall.de/de/lief-underscore-10.html).
- [27] F. Baumgärtner, *Untersuchung von zwei Gebinden mit betoniertem Abfall aus dem Versuchatomkraftwerk Kahl (VAK)*, Abschlussbericht RCM-BGT-VAK-7-02/99, Institut für Radiochemie, Technische Universität München, 1999.



# Danksagung

Nachdem meine Arbeit jetzt sowieso schon Überlänge hat, würde es wahrscheinlich auch nicht auffallen, wenn ich meine Danksagung so lange gestalten würde wie es ganz viele Leute verdient haben, die mich in der letzten Zeit unterstützt haben, aber irgendwann muss einfach Schluss sein, deswegen zu Beginn ein ganz aufrichtiges und herzliches DANKE an viele um mich herum! Einige möchte ich aber doch auch namentlich erwähnen:

Herrn Prof. Andi Türler danke ich für die freundliche Aufnahme an seinem Institut und sein geduldiges Interesse an meiner Arbeit. Danke, dass ich stets die gesamte Infrastruktur des Instituts nutzen konnte!

Herrn Prof. Peter Böni danke ich für die kurzfristige Übernahme meiner Promotion und das Interesse, das er für meine Arbeit aufgebracht hat. Seine freundliche und beruhigende Art hat mir am Schluss sehr geholfen.

Vielen, vielen Dank an Herrn Dr. Thomas Bücherl für seine unendliche Geduld mit mir und meiner Arbeit! Er ist einer der Begründer der hier vorgestellten neuen Auswertesoftware, hat mit wesentlichen Teilen dazu auch meine Arbeit erheblich vereinfacht und war immer offen für Diskussionen über meine Routinen. Mit seinem Überblick hat er mich so manches Mal aus meinem geistigen Chaos wieder herausgeführt. Mit seiner ruhigen und besonnenen Art hat er mich immer wieder aufgebaut und doch bin ich ihm besonders für den immer größeren Termindruck gegen Ende hin dankbar! Besonders schön waren auch viele Konferenzen, Projekt-Treffen, ..., die er mir ermöglicht hat, und bei denen er bewiesen hat, dass es auch ein Leben außerhalb der Arbeit gibt.

Herrn Dr. Guido Caspary danke ich für seinen Teil bei unserem gemeinsamen Projekt: z. B. seine Routinen zur Simulation von Detektorsystemen und seine vielen, vielen Ideen für das Projekt waren auch für meine Arbeit ein großer Gewinn! Außerdem war es nach Feierabend immer sehr lustig mit ihm, sobald er es irgendwann geschafft hatte, dienstlich abzuschalten.

Vielen Dank auch an das gesamte Ingenieurbüro Herwig Marschelke um seinen Chef Herwig herum für die so schöne Umsetzung unserer Ideen und Wünsche. Das Ergebnis

ziert nun meinen Anhang! Vielen Dank auch für die in vieler Hinsicht erfolgreichen Projekt-Treffen auf der schönen Insel Reichenau.

Vielen Dank an Herrn Dr. Christoph Lierse für seine Diskussionen und Kritiken rund um meine Arbeit. Oft haben mich Gespräche mit ihm wieder aufgebaut oder zu so manchem Nachdenken angeregt. Danke für alle tatkräftige Unterstützung in vielen persönlichen Belangen!

Vielen Dank auch an Frau Susi Runde für Hilfen bei kleinen und großen Problemen, für das Lösen vieler organisatorischer Probleme und für nette Pausen zwischendurch!

Vielen Dank an alle meine momentanen und ehemaligen Weggenossen, mit denen ich das Zimmer teilen durfte, mit denen ich zum Mittagessen gehen konnte, die einfach da waren. Besonders danke ich dabei Ari Remmert, Rainer Lindner und Horst Ernt! Vielen Dank Horst, für die Unterstützung in der Siemenshalle, Dein Wissen um das Geheimnis mancher Systeme und die Erfüllung meiner Wünsche bezüglich spezieller Messungen, Bildern, Photos ... gerade jetzt am Schluss!

Vielen Dank an die Werkstatt des Instituts rund um ihren Chef Herrn Herbert Größlhuber für einfach alles, wegen dem ich zu Euch kommen konnte!

Vielen Dank an Herrn Dr. Hansi Zott, dass er mit seinem guten Zureden und Hand-auflegen dafür gesorgt hat, dass mein Rechner bis zum Schluss durchgehalten hat und mir stets treu gedient hat.

Ein Grund, warum ich so lange promoviert habe, ist bestimmt, dass es mir am Institut so gut gefällt und daran sind alle meine Kolleginnen und Kollegen schuld. Nur Euer steter Drang nach einer baldigen Doktorfeier hat mich doch noch zu einem Ende geführt. Vielen Dank an alle für die gute Atmosphäre hier und es wird natürlich eine Feier geben!

Vielen Dank an alle meine Freunde, die sich immer noch zu diesen zählen, auch wenn ich es ihnen in den letzten Monaten nicht immer leicht gemacht habe. Ich glaube fest an ein Leben nach der Promotion und da habe ich auch wieder Zeit!

Vielen Dank auch in die Ferne, an Patrick, der nun nachdem ein Ende meiner Promotion in Sicht ist, endlich seinen Rückflug von Australien buchen konnte. Danke für die Einführung in LATEX und die prompte Online-Hilfe zu manchen verzwickten Layout-Problemen.

Und zu guter Letzt: Danke an meine Eltern und Geschwister! Danke besonders an Mama und Papa, dass Ihr so lange an mich geglaubt habt und mich in jeder Hinsicht über die lange Zeit unterstützt habt. Nun, da ich wohl den familiären Rekord für überdurchschnittlich lange Promotionen gebrochen habe, kann ich getrost zu einem Ende kommen!