

**KfK 4999
März 1992**

Neue Auswertemethoden für Neutronen-Messungen zur Plutoniumbestimmung in Fässern mit heterogenen und schweren Abfällen

**W. Eyrich, W.-D. Klotz, G. G. Simon
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Hauptabteilung Ingenieurtechnik
Koordinationsstelle Internationale Forschung
zur Nuklearen Entsorgung**

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Hauptabteilung Ingenieurtechnik
Koordinationsstelle Internationale Forschung zur Nuklearen Entsorgung

KfK 4999
PWA 39/91

Neue Auswertemethoden für Neutronen-Messungen
zur Plutoniumbestimmung in Fässern
mit heterogenen und schweren Abfällen

W. Eyrich
W.-D. Klotz
G.G. Simon *)

*) NUKEM GmbH
Postfach 1313
8755 Alzenau

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Kurzfassung

Im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) wurde ein Monitor-system zur Bestimmung des Plutoniumgehaltes und/oder der α -Aktivität in 220 l-Abfallfässern entwickelt. In der ersten Ausbaustufe wurden nur Fässer mit leichtbrennbaren Abfällen verwendet. Für diese Messungen wurde die vom KfK entwickelte Shiftregister-Methode eingesetzt. Das Meßsystem genügte allen betrieblichen Anforderungen, um Plutoniummengen von mehr als 1 mg zu bestimmen.

Die Shiftregister-Methode eignet sich nicht für Abfallfässer, die mit schweren Abfällen beladen sind, da zur Auswertung der Messung der Matrixinhalt sowie seine Verteilung und die Probenlage bekannt sein müssen. Um kleinere Mengen Plutonium in einem 220 l-Faß nachzuweisen, kann in diesem Falle auch nicht die TCA-Methode herangezogen werden. Daher wurden eine neue Meßmethode und ein spezielles Datenerfassungssystem entwickelt (LCA - local correlation analysis system). Dieses Meßsystem ermöglicht eine genaue Ortsbestimmung der Probenlage und darüberhinaus eine Unterscheidung zwischen einer homogen verteilten Probe und einer Probe, die sich im Faßzentrum befindet. Da zu jedem Neutronensignal sein Zeitpunkt und das betroffene Zählrohr registriert werden, bietet das Meßsystem die Möglichkeit, alle üblichen Auswertemethoden anzuwenden. Für Abfallfässer, die einen höheren Plutoniumgehalt besitzen, kann die Ansprechwahrscheinlichkeit unmittelbar und ohne Kenntnis der Matrixzusammensetzung und der Probenlage bestimmt werden.

Das Meßsystem ist so konzipiert, daß es in einen marktüblichen PC integriert werden kann. Mit diesem Meßsystem können die entsprechenden Verbesserungen auch bei der aktiven Messung erzielt werden.

New Evaluation Methods for Plutonium Assay by Passive Neutron Interrogation of Barrels with Heavy and Heterogeneous Waste

Abstract

At the Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) a monitoring system was developed to measure the plutonium content and/or α -activity in 220 liter waste drums. In the initial phase, only drums filled with combustible material were used. For these measurements the shift-register method developed at KfK was used fulfilling all requirements to detect plutonium down to 1 mg.

The shift-register method is not suitable for drums filled with heavier material since the matrix content, its distribution and the probe location have to be known. In this case the TCA method is also inadequate to detect minute quantities of plutonium in 220 liter drums. Therefore, a new method and a data analysis system were developed, the LCA (local correlation analysis system). With this, it is possible to determine the exact probe location. It has the ability to distinguish between a homogeneous Pu-distribution and a Pu-probe in the center of the container. Within each neutron signal, the time of pulse and the counter number are registered, therefore analysis methods currently in practice can utilize. For drums having a higher plutonium content the detection efficiency can be determined directly without knowledge of the matrix composition or the probe location.

The data analysis system is tailored to be used with an ordinary PC. With this system similar improvements of data analysis are possible for active neutron interrogation.

Inhalt

	Seite
1. Einleitung	1
2. Meßmethode und Meßsysteme	3
2.1 Coti-Zähler	3
2.2 Multiplizitätszähler	4
2.3 LCA-Meßsystem	7
3. Messungen	12
3.1 Kalibriermessungen	12
3.2 Nachweiswahrscheinlichkeit	14
3.3 Automatischer Meßbetrieb	15
4. Bestimmung der Probenlage und der Proben- verteilung im Abfallfaß	16
4.1 Auswertung der Einzelzählrate	16
4.2 Auswertung der Ortskorrelation für koin- zidente Ereignisse	18
4.3 Multiplettstruktur	20
5. Zusammenfassung	22
6. Zitate	24
7. Tabellen	25
8. Abbildungen	29

1. Einleitung

In der Hauptabteilung Dekontaminationsbetriebe (HDB) des Kernforschungszentrums Karlsruhe (KfK) wurde vom Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik (KfK-INR) in Zusammenarbeit mit der Hauptabteilung Ingenieurtechnik (KfK-HIT) eine Faßmeßanlage errichtet, um den Plutoniumgehalt und die α -Aktivität in 220 l-Fässern zu bestimmen. Die Erprobung der Meßanlage und die Messungen mit realen Abfallfässern waren erfolgreich /1, 2/, so daß die Anlage für den Routinebetrieb ausgerüstet wurde.

Für Fässer mit leichtbrennbarem Inhalt waren die bereits entwickelten Meßmethoden (z.B. Shiftregister) und Meßtechniken ausreichend. Aber für Fässer mit heterogener Matrixverteilung und schweren Abfällen (z.B. konditionierter Abfall) versagten diese Methoden.

Für die Auswertung der Daten nach der Shiftregistermethode ist insbesondere die genaue Bestimmung der Probenlage wichtig, denn mit Variation der Probenposition im Faß ist eine Änderung der Ansprechwahrscheinlichkeit verbunden. Dieser Effekt wird mit zunehmender Matrixdichte - insbesondere von Moderatormaterial - verstärkt.

Zur Bestimmung der Position der Probe kann in 1. Näherung der Unterschied der Zählraten der einzelnen Meßkanäle herangezogen werden. Diese Neutronenautoradiographie versagt aber bei symmetrisch verteilten Proben, insbesondere kann nicht unterschieden werden, ob sich die Probe im Zentrum befindet oder homogen im Faß verteilt ist.

Selbst bei Kenntnis der Probenlage müssen größere Fehler in der Bestimmung der Ansprechwahrscheinlichkeit angenommen werden, wenn Heterogenität der Matrixverteilung und der Matrixzusammenstellung unterstellt werden muß.

Diese Nachteile sollen durch ein neues Meß- und Auswerteverfahren behoben werden. Hierzu wurde ein neues Datenerfassungssystem (LCA) entwickelt.

Ziel der Untersuchungen war es, dieses Meßsystem zu testen und zu erproben.

2. Meßmethode und Meßsysteme

Die Faßmeßanlage der HDB des KfK basiert auf der sogenannten passiven Neutronenmessung. In 50 Detektoren, die um das auszumessende Faß angeordnet sind, werden die emittierten Neutronen gemessen. Die Neutronenstrahlung entsteht bei Spontanspaltung der meist geradzahligen Pu- und Cm-Isotope und durch (α, n) -Prozesse, d.h. aus Reaktionen der α -Teilchen mit den in Reichweite benachbarten Elementen.

Für die Datenanalyse wurden bisher zwei Datenerfassungssysteme verwendet: Coti- und Multiplizitätszähler. Um insbesondere die Probenlage besser festlegen zu können, wurde ein neues Datenerfassungssystem (LCA) eingesetzt.

2.1 Coti-Zähler

Mit dem Datenerfassungssystem Coti werden die Impulsraten, getrennt nach den einzelnen Meßkanälen, erfaßt und innerhalb einer vorgegebenen Meßzeit summiert ZR_{tot}^i . Durch Addition der Zählraten der 50 Meßkanäle wird die Gesamtzählrate ZR_{tot} bestimmt.

$$ZR_{tot} = \sum_{i=1}^{50} ZR_{tot}^i \quad 2.1$$

Der Zusammenhang zwischen der Gesamtzählrate ZR_{tot} und der Neutronenquellstärke q kann in 1. Näherung durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$ZR_{tot} = \epsilon q \quad 2.2$$

In dieser Näherung ist die Ansprechwahrscheinlichkeit ϵ der Meßanordnung für Spaltneutronen und Neutronen aus (α, n) -Reaktionen gleich.

In den Eichmessungen wird die Ansprechwahrscheinlichkeit mit einer bekannten Neutronenquelle, die an verschiedenen Positionen im Faß montiert wird, bestimmt.

Die azimutale Zählratenverteilung wird zur Bestimmung der radialen Position der Probe herangezogen. Das Verhältnis der Zählraten von den Detektoren im Deckel zu denen im Boden gibt die axiale Position der Probe an (s. Abschnitt 4).

2.2 Multiplizitätszähler

Die Neutroneneigenstrahlung des Abfallgebundes setzt sich aus Anteilen Spontanspaltung g_{sp} und (α, n) -Reaktionen $g_{\alpha n}$ zusammen.

$$g_g = g_{sp} + g_{\alpha n} \quad 2.3$$

Der (α, n) -Neutronenanteil ist von der chemischen Zusammensetzung des Abfallgebundes, von der Pu-Vermischung und von der Pu-Körnung abhängig. $g_{\alpha n}$ kann sich in schwach aktiven Abfallgebunden um bis zu einem Faktor 9 ändern.

Für eine zuverlässige Bestimmung des Pu-Gehaltes in schwach aktiven Abfallgebunden muß deshalb der (α, n) -Neutronenanteil an der Zählrate eliminiert werden. Dazu wird ausgenutzt, daß pro Spontanspaltung ν_p Neutronen nahezu gleichzeitig (innerhalb ca. 1 μ sec) emittiert werden. Die (α, n) -Neutronen sind dagegen statistisch verteilte Einzelneutronen. Eine Unterscheidung zwischen (α, n) -Neutronen und Spaltneutronen kann daher mit der Koinzidenzmethode getroffen werden.

In der konventionellen Koinzidenzlogik öffnet ein Zählimpuls (Trigger) ein Zeitfenster, dessen Breite Δt ungefähr der mittleren Verweilzeit τ der Neutronen in der Meßkavität entspricht. Die in dieser Zeit registrierten Koinzidenzereig-

nisse ZR_p beinhalten sowohl echte ZR_e als auch zufällige Koinzidenzen ZR_z .

$$ZR_p = ZR_e + ZR_z \quad 2.4$$

Die Einzelneutronen aus (α, n) -Reaktionen sind zeitunabhängig und tragen somit nur zu den zufälligen Koinzidenzen bei. Dieser Anteil kann durch eine Zusatzmessung bestimmt werden. Nach dem Triggerimpuls wird um ein ganzes Vielfaches von Δt verzögert ein zweites Zeitfenster der gleichen Breite Δt geöffnet und die zufälligen Koinzidenzen gemessen $ZR_z = ZR_v$. Die Verzögerungszeit t_v muß groß gegenüber der Verweilzeit τ sein $t_v \gg \tau$. Die Differenz der Zählraten $ZR_c = ZR_p - ZR_v$ ergibt damit die Spontanspaltungsneutronen.

In der konventionellen Koinzidenzlogik haben die Zeitfenstergeneratoren die Eigenschaft, daß im gekippten Zustand ein weiterer Impuls kein neues Zeitfenster triggern kann. Sie legen damit die Totzeit auf dem Triggerkanal zu Δt fest.

Um bei größeren Zählraten Totzeiten zu vermeiden, wird die Methode des Schieberegisters angewandt. Hierbei wird das Zeitfenster Δt in kleinere Einheiten der Länge δt unterteilt, die nacheinander geöffnet werden und die den Zählimpulsen den Weg in verschiedene Zähler freigeben. Ist der Abstand der Triggerimpulse größer als Δt , so ist die Summe der Zählerinhalte gleich dem im ursprünglichen Fall gemessenen Inhalt des einen Zählers. Gibt es aber Triggerimpulse, die dichter als Δt aufeinanderfolgen, so können nun mehrere der kleinen Fenster gleichzeitig geöffnet sein. Das entspricht einer Überlagerung von Fenstern entsprechend der Triggerfolge.

Beim Multiplizitätszähler, der von KfK-INR entwickelt wurde /3/, wird die Anzahl der Zähler auf einen reduziert, indem für jeden ankommenden Zählerimpuls die Anzahl der im Schieberegister enthaltenen Pulse bestimmt wird. Hierzu wird ein

Auf- und Ab-Zähler eingesetzt. Für jeden ankommenden Puls wird die im Schieberegister enthaltene Anzahl Pulse addiert. Damit erhält man für m Pulse innerhalb $\Delta t = N \delta t$ eine Gesamtzählrate ZR_{CC}^g von

$$ZR_{CC}^g = \binom{m}{2} = \frac{1}{2} m (m - 1) \quad 2.5$$

Nach einer Verzögerungszeit t_v wird ein zum ersten identischer Zyklus gestartet, um die zufälligen Koinzidenzen zu bestimmen.

Der Multiplizitätszähler ist so ausgelegt, daß für Zykluslängen von 10 bis 160 μsec eine Maximalfrequenz des Taktes von 10 MHz möglich ist.

Die Koinzidenzrate ist in erster Näherung mit der Anzahl der emittierten Spaltneutronen verknüpft gemäß:

$$ZR_C = \epsilon^2 \frac{\overline{V(V-1)}}{2 \bar{V}} (1 - e^{-\alpha \Delta t}) g_{sp} \quad 2.6$$

g_{sp}	Neutronenquellstärke für Spaltneutronen
ϵ	Ansprechwahrscheinlichkeit der Meßanordnung für Neutronen
$\overline{V(V-1)}/2$	mittlere Zahl der Neutronenpaare pro Spaltung
\bar{V}	mittlere Zahl der Neutronen pro Spaltung
$1/\alpha$	Verweildauer der thermischen Neutronen in der Meßanordnung
Δt	Zeitintervall innerhalb dessen der zweite Partner zum auslösenden Ereignis erwartet wird.

Die Ansprechwahrscheinlichkeit wird in Eichmessungen bestimmt.

2.3 LCA-Meßsystem

Zur Koinzidenzmessung mit dem Multiplizitätszähler werden die Impulse der einzelnen 50 Meßkreise zu einem Impulsstrom zusammengefaßt. Hierbei geht die Information "Welcher Meßkreis hat angesprochen?" verloren. Daher kann diese Meßmethode zur Bestimmung der Probenlage nicht genutzt werden.

Ausgangspunkt für die Entwicklung eines neuen Meßsystems war, die Koinzidenzmethode ebenfalls zu nutzen, um die Probenlage und/oder -verteilung besser bestimmen zu können. Insbesondere sollte es möglich sein, symmetrische Anordnungen unterscheiden zu können, z.B. eine Unterscheidung zwischen einer Probe, die im Zentrum positioniert ist, und einer homogen verteilten Probe im Faß. Diese unterschiedlichen Probenverteilungen können nicht durch den Vergleich der Zählraten der einzelnen Meßkreise unterschieden werden, da sie in dem obengenannten Fall gleiche, auf Ansprechwahrscheinlichkeit korrigierte Werte zeigen würden.

Die Einbeziehung der Koinzidenzmethode in die Bestimmung der Probenlage ging von folgender Überlegung aus:

Voraussetzung für eine Koinzidenz ist, daß zwei Detektoren innerhalb einer vorgegebenen Zeit ansprechen. Wenn die Probe im Faßzentrum positioniert ist, wird die Wahrscheinlichkeit einer Koinzidenz unabhängig von der Wahl der Detektorpaare sein, d.h. jede Kombination zweier Detektoren im Ring liefert die gleiche Koinzidenzrate. Wird die Probe vom Zentrum zum Faßrand hin verschoben, dann werden die Detektoren in der Nähe der Quelle immer mehr bevorzugt. Dieser Effekt, der auch bei dem Vergleich der totalen Zählraten jedes Meßkreises zu beobachten ist, tritt auch bei den Koinzidenzen auf.

Um eine ringförmige Probenverteilung von einer Probe im Faßzentrum unterscheiden zu können, wird nicht die absolute Position der Detektoren, die angesprochen haben, betrachtet,

sondern der Winkel, bezogen auf das Faßzentrum zwischen den beiden Detektoren, die die Koinzidenz ausgelöst haben.

Die Häufigkeitsverteilung der auftretenden Winkel zwischen den Detektoren in Koinzidenz, bezogen auf das Faßzentrum, ist für eine ringförmig verteilte Probe gleich der einer Punktprobe für die gleiche radiale Position. Somit kann bei symmetrischen Anordnungen der Probe, die keine Zählratenunterschiede der einzelnen Meßkreise zu den Detektoren im Ring aufweisen, die radiale Lage der Probe bestimmt werden.

Wird diese Methode auch für Detektoren im Deckel und Boden angewandt, so ist auch eine axiale Bestimmung der Probenlage möglich.

Um alle diese Informationen für die Anwendung der Koinzidenzmethode zur Bestimmung der Probenlage erfassen zu können, war ein spezielles Meßsystem mit entsprechender Software notwendig. Diese Aufgabe konnte durch das LCA-System gelöst werden, das als Board in einen PC installiert werden kann. Die Software wurde für einen AT-kompatiblen Rechner erstellt.

Funktionsweise des LCA-Systems:

Jeder Impuls setzt am Eingang des LCA-Meßsystems ein Flip-Flop. Der Status dieses Einganges wird permanent abgefragt und zwischengespeichert. Dann wird der Eingang wieder geöffnet. Die Taktrate wurde der Pulslänge des Diskriminators von 6 μ sec angepaßt. Wenn der Zwischenspeicher gefüllt ist, wird dieser ausgelesen. Die Ereignisse werden mit dem Vermerk der Echtzeit und der Nummer des Meßkanals versehen auf die Festplatte eines PC's gespeichert. Die Datenerfassung erfolgt so lange bis die vorgegebene Meßzeit beendet ist.

Für die Auswertung stehen mit dem Einsatz des LCA-Meßsystems alle Informationen zur Verfügung, so daß neben den bisheri-

gen angewandten Auswertemethoden noch weitere Auswertealgorithmen zur Anwendung kommen können.

Folgende Auswertealgorithmen können für die Datenanalyse verwendet werden:

a) Ortskorrelationsanalyse

Ein Ereignis öffnet ein Zeitfenster Δt . Wird in diesem Zeitintervall ein zweites Ereignis registriert, so wird der Winkel zwischen den beiden Detektorpositionen, bezogen auf das Faßzentrum, berechnet. Liegen mehrere Ereignisse innerhalb eines Zeitfensters Δt vor, so wird die Datenanalyse entsprechend der Shiftregistermethode abgearbeitet (s. Abschnitt 2.2). Anschließend wird die Häufigkeitsverteilung der auftretenden Winkel berechnet.

b) Korrelationszeit

Die Ereignisse werden zeitlich hintereinander geordnet, zu einem Impulsstrom zusammengefaßt und der zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Ereignissen bestimmt. Anschließend wird die Häufigkeitsverteilung der zeitlichen Abstände berechnet, die Meßergebnisse interpoliert und die mittlere Korrelationszeit berechnet.

c) Verweilzeit der Neutronen

Die Ereignisse werden zeitlich hintereinander geordnet, zu einem Impulsstrom zusammengefaßt und die Koinzidenzrate entsprechend der Shiftregistermethode berechnet. In erster Näherung gilt:

$$ZR_c = A (1 - e^{-\alpha/\Delta t}) \quad 2.6.a$$

- A Normierungskonstante
1/α Verweilzeit der Neutronen
Δt Zeitfensterbreite für die Koinzidenzbestimmung

Durch Variation von Δt wird die Verweilzeit 1/α berechnet. Für die Untersuchung genügt im Vergleich zur früheren Ausstattung der Faßmeßanlage nur eine Messung.

Die Werte für die Korrelationszeit und für die Verweilzeit sollten übereinstimmen.

d) Koinzidenzrate

Die Ereignisse werden zeitlich geordnet, zu einem Impulsstrom zusammengefaßt und die Koinzidenzrate entsprechend der Shiftregistermethode berechnet. Die Neutronenquellstärke kann entsprechend Formel 2.6 berechnet werden. Im Vergleich zur früheren Ausstattung der Faßmeßanlage kann das Zeitfenster Δt entsprechend der Ansprechwahrscheinlichkeit korrigiert werden.

e) Multiplettstruktur

Das LCA-Meßsystem erlaubt die Datenanalyse entsprechend der TCA-Methode /4, 5/. Die Anpassung des Zeitfensters, wie sie bei der Koinzidenzbestimmung beschrieben wird, kann auch in diesem Fall verwendet werden.

f) Ortsabhängige Multiplettstruktur

Werden sogenannte Hot Spots im Abfallgebinde entdeckt, so werden zur Multiplettstrukturbestimmung nur die Meßkreise zur Auswertung herangezogen, deren Detektoren in

unmittelbarer Nähe der Hot Spots sind. Diese Datenanalyse zur Elementbestimmung wurde bisher bei der Realisierung der TCA-Methode nicht vorgenommen.

3. Eichmessung

Um den Meßdaten die entsprechenden Neutronenquellstärken im Faß zuzuordnen, wurden Kalibriermessungen durchgeführt. Hierzu wurden Fässer mit unterschiedlichen Polyäthylenfüllungen präpariert und ein mit Beton gefülltes Faß verwendet. Die Neutronenquelle wurde an verschiedenen Positionen im Faß befestigt.

Zur Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit wurden über längere Zeiten Untergrundmessungen und Messungen mit Proben durchgeführt.

Um Erfahrungen für den automatischen Meßbetrieb zu sammeln, wurden über 100 Fässer vermessen, die einen Hinweis auf Pu und/oder α -Aktivität auf dem Begleitschein enthielten.

3.1 Kalibriermessungen

Zur Kalibrierung der Faßmeßanlage wurde eine PuO_2 -Probe verwendet (Tab. 1a). Da diese Quelle nicht jederzeit zur Verfügung stand, wurden die Messungen mit einer Cf-252-Quelle ergänzt (Tab. 1b).

Abb. 1 gibt einen Überblick über die Anordnung der Komponenten der Faßmeßanlage. Die geometrischen Daten der Meßpositionen können aus Abb. 2 entnommen werden.

Die Änderung der Zählrate in Abhängigkeit von der axialen Quellenposition zeigt Abb. 3. Das Ergebnis der Messungen mit leerem Faß (Abb. 3a) zeigt, daß entsprechend der Anordnung der Detektoren (Abb. 1) das Maximum der Zählrate in halber Faßhöhe liegen muß. Die leicht asymmetrische Form ist durch den größeren Abstand Faß zum Deckel im Vergleich zum Abstand Faß zur Bodenplatte gegeben. Der drastische Abfall der Zählrate, wenn die Quelle zur obersten Position geführt wird, wird durch die Neutronenleckage aufgrund der Polyäthylen

(PE)-Aussparung unterhalb des Deckels verursacht. Diese Aussparung dient als Platz für die Meßelektronik.

Wird die Quelle im Faßzentrum von der untersten Position zur Faßmitte hin bewegt, so ist zunächst eine Zählratenabnahme zu beobachten. Sie wird durch die wachsende Entfernung der Quelle zu den Detektoren in der Bodenplatte verursacht. Mit zunehmender Höhe der Quelle im Faß erhöht sich die Zählrate von den Ringdetektoren aufgrund der günstigeren geometrischen Lage der Quelle zu den Detektoren im Ring. Dieser Effekt ist nach ~ 10 cm dominant. Im oberen Bereich ist diese lokale Zählratenerhöhung nicht zu beobachten, da dort die Neutronenleckage überwiegt. Auch nimmt die lokale Erhöhung der Zählrate in Bodennähe mit zunehmendem Radius ab, da durch die günstigere geometrische Lage der Quelle zu den Ringdetektoren die Zählrate mit wachsendem Abstand Quelle - Bodenplatte stärker ansteigt.

Mit zunehmender Beladung des Fasses wird der lokale Effekt in der Nähe der Bodenplatte stärker ausgeprägt (Abb. 3b und 3c). Denn neben der Vergrößerung des Abstandes der Quelle zu den Detektoren in der Bodenplatte kommt noch der Neutronenverlust im Matrixmaterial hinzu. Für das Betonfaß ist dieser Absorptionseffekt so stark ausgeprägt, daß keine Zählratenerhöhung zur Faßmitte hin mehr zu beobachten ist, wenn die Quelle im Faßzentrum axial bewegt wird. Die axiale Zählratenänderung am Faßrand bleibt im Vergleich zum PE-gefüllten Faß fast unverändert, wenn nur die Detektoren in unmittelbarer Quellennähe betrachtet werden. Die Absorptionserhöhung mit zunehmender Beladung verkleinert die Zählrate insgesamt.

Zur Bestimmung der Ansprechwahrscheinlichkeit für eine homogen verteilte Probe im Faß, wurden zunächst die axialen Zählratenverteilungen durch ein Polynom interpoliert. Hierbei wurden die Endpositionen nicht berücksichtigt. Aus der axial gemittelten Zählrate, einschließlich der Endpositionen, wurde die Ansprechwahrscheinlichkeit für die einzelnen radialen Positionen berechnet. Diese Werte wurden ebenfalls mit einem

Polynom interpoliert und daraus die volumengemittelte Ansprechwahrscheinlichkeit berechnet. Typische Werte sind in Tabelle 2 angegeben.

Abb. 4 zeigt die Änderung der axial gemittelten Zählrate in Abhängigkeit der radialen Änderung der Probenposition. Die größten Änderungen liegen am Faßrand vor. In Faßmitte ($r < 15$ cm) ist die Ansprechwahrscheinlichkeit nahezu konstant.

Die Ergebnisse der Eichmessungen verdeutlichen insgesamt, daß mit wachsender Beladung eine genaue Lokalisierung der Probe immer wichtiger wird.

3.2 Nachweiswahrscheinlichkeit

Nach der Umrüstung der Faßmeßanlage wurden in der Zeit vom April 1989 bis November 1990 Messungen durchgeführt. In dieser Zeit konnten keine Störungen festgestellt werden.

Der Untergrund der totalen Zählrate (ZR_{tot}) ist für ein mit PE gefülltes Faß stets < 300 $^c/10$ min. Für Messungen in kurzen Zeitabständen (≤ 1 Tag) entspricht die Streuung der Daten der Zählstatistik $= (ZR_{tot})^{1/2}$. In Messungen über mehrere Tage können Driften bis zu 20 % festgestellt werden. Der Untergrund für die Koinzidenzrate (ZR_c) beträgt < 6 $^c/10$ min. Er stammt vornehmlich von Spallationsneutronen. Da dieser Prozeß innerhalb der Zählstatistik nicht immer konstant ist, können während eines Tages auch spontan Werte bis zu 18 $^c/10$ min. auftreten. Solche plötzlichen Überhöhungen der Koinzidenzrate können aber mit dem Meßsystem der Faßmeßanlage erkannt werden. Diese Messungen werden nicht in die Auswertung einbezogen.

Für Fässer, die mit Beton gefüllt sind, erhöht sich die Untergrundzählrate :

$$ZR_{tot} < 450 \text{ } ^c/10 \text{ min und } ZR_c < 25 \text{ } ^c/10 \text{ min.}$$

Die erzielbaren Nachweisgrenzen sind in Tabelle 3 zusammengefaßt.

3.3 Automatischer Meßbetrieb

Die Messungen mit präparierten Fässern und Abfallfässern zeigen, daß ein automatischer Meßbetrieb möglich ist. Schwierigkeiten traten in den Fällen auf, in denen die auf dem Begleitschein eingetragene Isotopenzusammensetzung nicht plausibel erklärt werden konnte. In diesen Fällen müßte eine spezielle Überprüfung des Faßinhaltes vorgenommen werden. Fässer mit signifikantem Aktivitätsinhalt ($> 10^8$ Bq) zeigen eine inhomogene Verteilung der Aktivität im Faß. Oft sind hier "hot spots" zu erkennen.

Die Resultate führen zu folgenden Schlußfolgerungen:

1. Bei vielen Fässern wird eine zu hohe α -Aktivität angegeben, und
2. In einigen Fällen ist aber auch die Aktivitätsangabe zu niedrig.

Diese Ergebnisse zeigen, daß es oft sehr schwierig ist, die Aktivität genau anzugeben. Daher sollte zur besseren Aktivitätsangabe eine Messung der α -Aktivität vorgenommen werden, insbesondere kann dadurch sichergestellt werden, daß Grenzwerte, z.B. für eine Verbrennungsanlage, besser einzuhalten sind.

4. Bestimmung der Probenlage und der Probenverteilung im Abfallfaß

Für die Bestimmung der Neutronenquellstärken aus der totalen Zählrate und/oder der Koinzidenzrate ist die Kenntnis der Ansprechwahrscheinlichkeit der Meßanordnung notwendig. Diese Größe ist sowohl von der Matrixzusammensetzung als auch von der Probenlage im Faß abhängig (s. Abschnitt 3).

Die Matrixzusammensetzung kann aus den Begleitpapieren zum Abfallfaß entnommen und so eine Abschätzung der mittleren Ansprechwahrscheinlichkeit vorgenommen werden.

Wie die Ergebnisse in Abschnitt 3 zeigen, wird eine drastische Änderung der Ansprechwahrscheinlichkeit durch Variation der Probenlage hervorgerufen. Da bei realistischen Abfallgebinden selten eine homogene Verteilung der Probe im Faß vorliegt, ist eine Bestimmung der Probenlage unumgänglich.

4.1 Auswertung der Einzelzählraten

Um aus dem Meßergebnis einer Faßmessung die Probenlage zu bestimmen, werden im Sinne einer Neutronenautoradiographie die Unterschiede der Detektorsignale analysiert. Durch den Vergleich der Zählratenprofile mit denen der Kalibriermessungen kann auf die Probenlage zurückgeschlossen werden.

Bei den Kalibriermessungen wurde eine Cf-Quelle an verschiedenen Positionen im Faß montiert und die unterschiedlichen Zählratenprofile untersucht.

Für die Quelle im Faßzentrum ($r = 0$ cm, $h = H/2$, $H =$ Faßhöhe) und bei einer homogenen Matrixverteilung im Faß (z.B. leeres Faß) erhält man eine konstante Zählratenverteilung (ZR_R) für die Detektoren im Ring. (Die Schwellenwerte der Diskriminatoren wurden so gesetzt, daß die Ansprechwahrscheinlichkeit jedes Meßkreises zu den Detektoren in Ring-

position gleich groß ist.) Die Summe der Zählraten zu den Detektoren im Deckel (ZR_D) ist gleich der Summe der Zählraten zu den Detektoren in der Bodenplatte (ZR_B). (Die Schwellenwerte der Diskriminatoren wurden so gewählt, daß diese Symmetrie für diesen Fall gegeben ist.)

Wird die Quelle im Faßzentrum von der Bodenplatte in Richtung Deckel bewegt, so bleibt die Zählratenverteilung ZR_R konstant. Die Zählrate ZR_B nimmt ab und die Zählrate ZR_D nimmt zu. Abb. 5 zeigt das Verhältnis $V_{DB} = ZR_D/ZR_B$. Mit zunehmender radialer Versetzung der Quelle prägt sich eine Zählratenerhöhung in der Ringverteilung aus (Abb. 6).

Für die Bestimmung der Probenlage werden als charakteristische Größen die Verhältnisse $V_{DB} = ZR_D/ZR_B$ zur Bestimmung der axialen Lage und $V_R = ZR_R^{max}/ZR_R^{min}$ zur Bestimmung der radialen Lage gewählt.

Die Änderung von V_{DB} (s. Abb. 7) kann in erster Näherung durch eine Exponentialfunktion beschrieben werden. Selbst bei geringer Beladung (Abb. 7a) ist eine axiale Positionsbestimmung auch bei schlechter Zählstatistik gut möglich (4 %/cm für das leere Faß). Geringfügige Abweichungen sind für die axialen Endpositionen zu sehen, insbesondere wenn die Quelle am Faßrand axial bewegt wird. Für die Lokalisierung der Probe in diesem Bereich muß der Zählratenunterschied der Einzelzählraten zu den Detektoren im Deckel bzw. in der Bodenplatte hinzugezogen werden. Unter Vernachlässigung dieses Effektes kann $V_{DB}(r) = \text{const.}$ gesetzt werden. Diese Näherung gilt auch bei höherer Beladung (Abb. 7b und 7c). Der maximale Fehler im Randbereich beträgt bei dieser Annahme ± 5 cm.

Das Verhältnis V_R für verschiedene Probenpositionen zeigt Abb. 8. Für Beladungen bis zu 58 kg Polyäthylen kann in erster Näherung $V_R(h) = \text{const.}$ angenommen werden. Die radiale Abhängigkeit des axial gemittelten Verhältnisses V_R zeigt einen exponentiellen Verlauf (Abb. 9).

Auf den ersten Blick ist diese einfache Betrachtungsweise auf das Betonfaß nicht übertragbar (Abb. 8c). Betrachtet man aber zu jeder axialen Höhenposition die radiale Änderung von V_R , so erhält man wieder einen exponentiellen Verlauf (Abb. 10). Daher kann zur Bestimmung der radialen Position der Probe die einfache Betrachtungsweise wieder angewandt werden, wenn der Bestimmung der radialen Positionierung die Bestimmung der axialen Positionierung vorangestellt wird.

Diese Untersuchungen zeigen, daß die Positionierung einer Punktprobe auf ± 5 cm genau festgelegt werden kann.

Bei Messungen an realen Abfallfässern müssen auch verschiedene Probenverteilungen unterstellt werden, z.B. Überlagerung von verschiedenen Punktproben (Hot Spots), homogene Verteilung, ringförmige Verteilungen.

Verschieden positionierte Hot Spots sind in Form von Nebenmaxima in der Zählratenverteilung zu den Detektoren im Ring zu erkennen. Für Radien $r > 20$ cm sind die Maxima so stark ausgeprägt, daß der Bezugswert des Nebenminimums zur Bestimmung der radialen Lage herangezogen werden kann.

Für symmetrische Verteilungen muß die Bestimmung der radialen Lage mit der LCA-Methode durchgeführt werden.

4.2 Auswertung der Ortskorrelation für koinzidente Ereignisse

Die Bestimmung der Probenlage und/oder Probenverteilung mit dem Auswertalgorithmus versagt, wenn eine symmetrische Verteilung unterstellt werden muß. In diesem Falle zeigen die Zählratenverteilungen zu den Detektoren im Ring und das Verhältnis der Zählraten zu den Detektoren im Deckel zu denen in der Bodenplatte keine Unterschiede.

Um diese Verteilungen unterscheiden zu können, wurden mit dem neuen Meßsystem (LCA) folgende Versuche durchgeführt:

Ein Cf-Quelle wurde radial an verschiedene Positionen im Faß montiert und das Faß gedreht. Abb. 11a - 11c zeigen für die 3 ausgewählten Faßfüllungen die Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Winkel zwischen zwei Detektoren im Ring, bezogen auf das Faßzentrum, die zu einer Koinzidenz beigetragen haben.

Wenn sich die Quelle im Faßzentrum befindet ($r = 0$ cm, $h = H/2$, $H =$ Faßhöhe) ist die Wahrscheinlichkeit eines Koinzidenzereignisses unabhängig von der Wahl der Detektorzuordnung. Mit radialer Verschiebung der Quelle zum Faßrand hin, werden benachbarte Detektoren immer mehr bevorzugt. Dieser Effekt verstärkt sich mit wachsender Beladung des Fasses /6/.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse wird in Tabelle 4 und Abb. 12 angegeben. Selbst bei niedriger Beladung ist eine Unterscheidung zwischen einer homogen verteilten Probe und einer Probe im Faßzentrum auch bei niedriger Zählrate signifikant gegeben. Mit wachsender Beladung wird die Erhöhung wesentlich verstärkt (Faktor 2: leeres Faß, Faktor 5: Betonfaß).

Die Genauigkeit in der Bestimmung der radialen Probenlage erhöht sich zum Faßrand hin. Diese radiale Abhängigkeit ist für die Anwendung dieser Methode besonders vorteilhaft, da sich die Ansprechwahrscheinlichkeit entsprechend ändert (s. Abb. 4).

Entsprechend der radialen Lage der Probe kann auch die axiale Lage der Probe bestimmt werden, wenn die Detektoren im Deckel bzw. Boden betrachtet werden. Die Auswertung der Koinzidenzraten in diesem Fall ist deshalb so wichtig, da

1. die Auswertung von dem Verhältnis der Zählraten zu den Detektoren im Deckel zu denjenigen im Boden in diesem Bereich recht ungenau ist (s. Abb. 7), selbst wenn eine punktförmige Probe unterstellt wird, und
2. eine drastische Änderung der Zählrate bei einer axialen Probenverschiebung entsteht (s. Abb. 3).

Die Genauigkeit nimmt mit wachsendem Abstand Quelle - Detektor entsprechend der radialen Positionsbestimmung ab. Sie ist aber ausreichend, um den Bereich der stärksten Ansprechwahrscheinlichkeitsänderung zu erfassen.

Eine direkte Bestimmung der Ansprechwahrscheinlichkeit ist durch die Einbeziehung der totalen Zählraten der Einzelkanäle möglich. Voraussetzung ist, daß eine punktförmige Probe sich im Abfallfaß befindet, die außerhalb des Faßzentrums positioniert ist. Hierbei wird der Ansprechwahrscheinlichkeitskoeffizient so lange variiert bis die Radienwerte übereinstimmen. Zum Test dieses Verfahrens müßten Messungen an realistischen Abfallfässern vorgenommen und einem Vergleich mit der "add-a-gram"-Methode unterzogen werden.

4.3 Multipllettstruktur

Zur Bestimmung der Multipllettstruktur wurden die Ergebnisse, die mit dem LCA-Meßsystem registriert wurden, zeitlich geordnet, zu einem Impulsstrom zusammengefaßt und die Koinzidenzen bestimmt (Fensterbreite 120 μ s).

Tabelle 5 zeigt die ermittelten Werte für die Cf-252-Quelle im Faßzentrum für verschiedene Matrixfüllungen. Die höheren Ordnungen tragen mit abnehmender Ansprechwahrscheinlichkeit ϵ immer weniger bei (Abb. 13). In erster Näherung gilt

$$P_n(\epsilon) = \sum_{v \geq n} \binom{v}{n} \epsilon^n (1-\epsilon)^{v-n} P_v(100\%) \quad (4.1)$$

In Abbildung 14 ist das Verhältnis V_{TD} der Beiträge der Tripletts und der Dubletts in Abhängigkeit der Ansprechwahrscheinlichkeit ϵ dargestellt. Dieser funktionale Zusammenhang wird bei den TCA-Methoden verwendet, um die Ansprechwahrscheinlichkeit zu bestimmen.

In erster Näherung zeigt das Ergebnis, daß die Ansprechwahrscheinlichkeit ohne Kenntnis der Matrix und der Probenlage aus dem Verhältnis zu bestimmen ist. Um diese Verallgemeinerung vornehmen zu können, sind noch weitere Experimente mit besserer Statistik an verschiedenen präparierten Fässern notwendig. Abweichungen sind bei Fässern mit einem hohen Anteil an Absorptionsmaterial zu erwarten. In diesen Fällen müßte sich auch eine größere Änderung der Verweilzeit der Neutronen ergeben. Dieser Effekt kann mit dem LCA-System ebenfalls erfaßt werden. Für die Auswertung müßte noch eine zusätzliche Korrelation der Verweilzeit und des Verhältnisses V_{TD} berücksichtigt werden.

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse zweier Faßmessungen aufgeführt. Das 1. Faß enthielt vornehmlich Plutonium, wohingegen das 2. Faß einen größeren Am-241-Anteil enthielt. Die Matrix sollte keinen unterschiedlichen Einfluß haben.

Da Am-241 kein Spontanspalter ist, sollte in 1. Näherung das Verhältnis V_{TD} dieser beiden Messungen gleich sein. Bedingt durch den Anteil der zufälligen Koinzidenzen, erhält man aber einen größeren Wert von V_{TD} .

Nach Korrektur auf die zufälligen Koinzidenzen ist dieses Verhältnis innerhalb des Meßfehlers gleich (Tabelle 6).

5. Zusammenfassung

Die Kalibriermessungen zeigen Ansprechwahrscheinlichkeitsänderungen bis zu 40 % für eine homogen verteilte Probe im mit Beton gefüllten Faß im Vergleich zu einem leeren Faß. Insbesondere ist die Ansprechwahrscheinlichkeit von der Lage der Probe im Faß abhängig. Es können Unterschiede bis zu einem Faktor 7 auftreten.

Die Ergebnisse der Kalibriermessungen verdeutlichen, daß eine genaue Bestimmung der Probenlage notwendig ist. Hierzu wurden zunächst die totalen Zählraten der Einzelkanäle im Sinne einer Neutronenautoradiographie ausgewertet. Im Vergleich zu den Messungen mit geringerer Beladung kann die axiale und radiale Lage der Probe für Fässer mit höherer Beladung nicht mehr unabhängig voneinander bestimmt werden.

Mit dem neuen Meßsystem konnten signifikante Unterschiede zwischen symmetrisch angeordneten Probenverteilungen festgestellt werden. Insbesondere erlaubt die Methode Unterscheidungen zwischen einer homogen verteilten Probe und einer Probe im Faßzentrum (Unterschiede in der Ansprechwahrscheinlichkeit für konditionierten Abfall: Faktor 4). Mit dieser Methode kann selbst bei einem Beton-Faß eine punktförmige Probe auf ± 5 cm genau lokalisiert werden.

Da alle wichtigen Informationen mit dem neuen Meßsystem zur Verfügung stehen, können neben der Bestimmung der Ortskorrelationen noch folgende Auswertungen durchgeführt werden:

- Bestimmung der Korrelationszeit
- Bestimmung der Verweilzeit der thermischen Neutronen im Meßsystem
- Koinzidenzmethode nach der Shiftregistermethode mit variablem Zeitfenster
- TCA-Methode mit variablem Zeitfenster
- TCA-Methode für ausgewählte Hot Spots.
(TCA = Time Correlation Analysis)

Für den Einsatz dieser Methoden wären noch weiterführende Untersuchungen notwendig. Auch müßte noch geprüft werden, ob die Ortskorrelationsanalyse im Zusammenspiel mit der aktiven Messung eingesetzt werden kann.

Die Messungen an realen Abfallgebinden zeigen, daß es oft sehr schwierig ist, die Aktivität im Abfallfaß genau anzugeben. Daher werden häufig zu konservative Werte auf dem Begleitschein notiert. Da eine Unterschätzung in Ausnahmefällen auch vorkommen kann, ist eine Messung der α -Aktivität notwendig, um Grenzwerte, z.B. für eine Verbrennungsanlage, besser einhalten zu können.

6. Zitate

- /1/ W. Eyrich; W.D. Klotz; H. Würz:
Zerstörungsfreie Plutoniumbestimmung in Abfallgebinden
der Eurochemic in Mol
KfK-3369, Juli 1982
- /2/ H. Würz; W. Eyrich; W.D. Klotz:
Coincidence and Pulsed Neutron Assay of Sealed α -Waste
Drums
KfK-4549, März 1989
- /3/ K. Böhnel:
Die Plutoniumbestimmung in Kernbrennstoffen mit der
Neutronenkoinzidenzmethode
KfK 2203, 1975
- /4/ L. Bondar; F. Giradi:
A Waste Instrument for Classifying of Pu-Contaminated
Waste based on Passive Neutron Assay
Proc. International Seminar on Radioactive Waste Pro-
ducts
Jülich, 10. - 13. Juni 1985, p. 133
- /5/ D.M. Cifrarelli; W. Hage:
Models for a Three Parameter Analysis of Neutron Signal
Correlation Measurements for Fissile Material Assay
Nuc. Instr. and Methods A 251, p. 550 - 563, 1986
- /6/ G.G. Simon; W. Eyrich:
Measurement System to Detect Minute Quantity of Pluto-
nium and Other Alpha-Emitter
Proc. Spectrum '90, Knoxville, USA, 30.9. - 4.10.1990,
P. 405 - 407

Tabelle 1a: PuO₂-Probe
Daten vom 24.01.1980, TU Karlsruhe

Gewicht	Pu-gesamt	15,106 g
Isotopenanteile	Pu-238	0,09 %
	Pu-239	85,30 %
	Pu-240	12,90 %
	Pu-241	1,40 %
	Pu-242	0,25 %
	Am-241/Pu	0,27 %

Tabelle 1b: Cf-252-Probe

Gewicht: 1 µg am 31.12.1968

Quellenstärke 01.11.1980

$$q_{sp} = 9,45 \times 10^4 \text{ n/sec}$$

Tabelle 2: Ansprechwahrscheinlichkeiten ε (%)

Faßinhalt	Minimum		Maximum		Mittelwert	
	total	koinz.	total	koinz.	total	koinz.
leer	13,9	14,3	20,3	20,6	18,1	18,4
PE 57,5 kg	7,6	7,3	18,0	17,8	13,6	13,2
Beton	2,0	2,0	14,2	14,3	10,8	11,0

Tabelle 3: Nachweisgrenze für Plutonium
(Pu-240 äqu. in mg)

Faßinhalt	im Faßzentrum		am Faßrand		für homogene Verteilung	
	total	koinz.	total	koinz.	total	koinz.
leer	1,2	1,0	0,9	0,6	1,0	0,7
PE 57,5 kg	2,0	3,5	1,0	0,7	1,5	1,5
Beton	35	500	3,0	10	4,0	15

Tabelle 4: Verhältnis der maximalen Koinzidenzrate für zwei Detektoren unterschiedlicher Entfernungen, bezogen auf das Faßzentrum, zur mittleren Koinzidenzrate

r (cm)	leeres Faß	PE 57,5 kg	Beton- faß
0	1,0	1,0	1,0
8,7	1,1	1,4	2,2
17,3	1,5	2,0	3,3
26,0	2,1	3,0	4,9
30,0 *	2,4	3,7	5,8
volumen- gemittelt	2,0	2,6	4,3

* extrapoliertes Wert

Tabelle 5: Beiträge der Multiplettordnung N für Cf-Quelle
in Faßmitte für verschiedene Matrixfüllungen

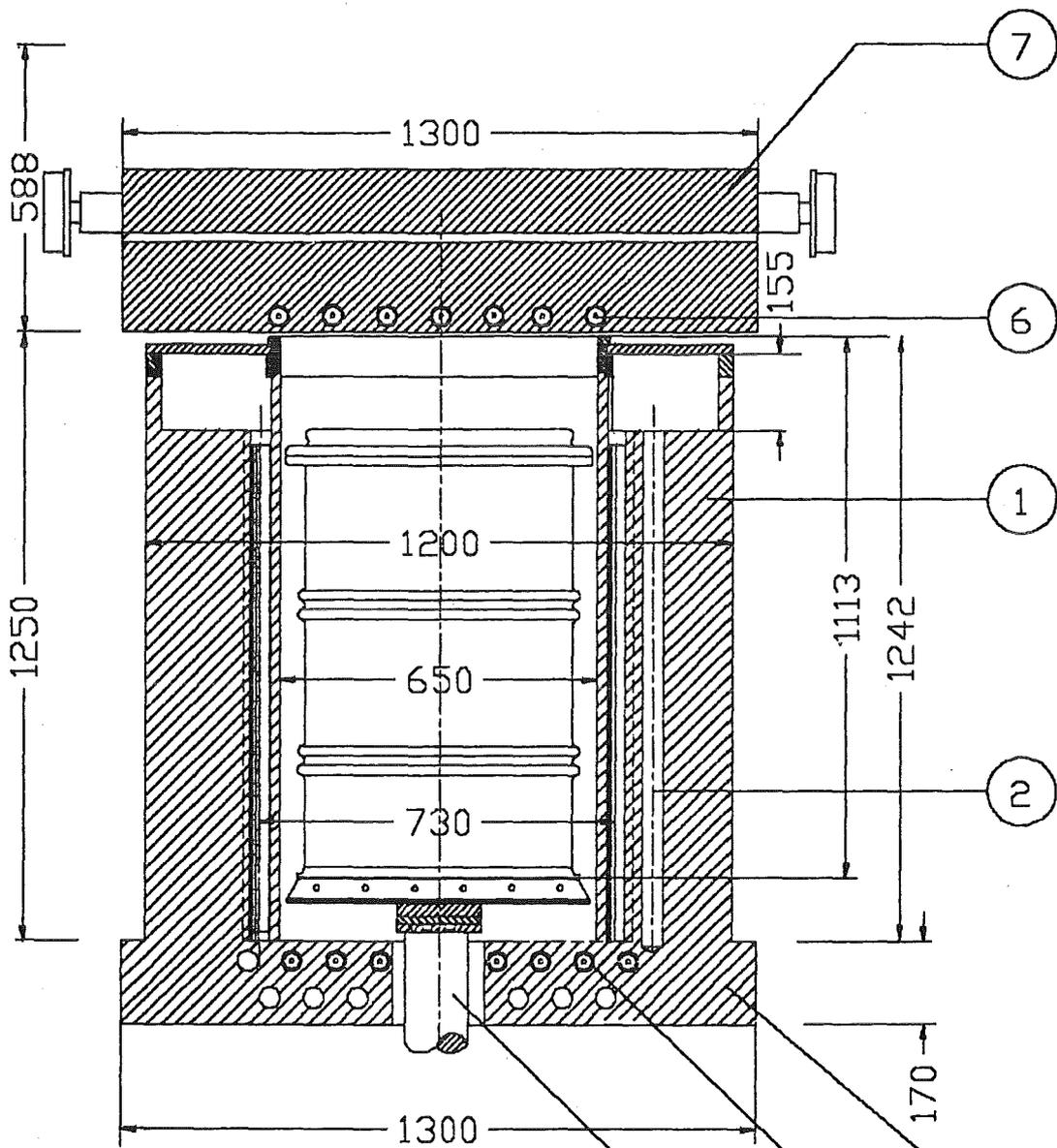
A) ohne Korrektur auf Zufallskoinzidenzen				
N	Leerfaß ε = 18,6%	Betonfaß ε = 2,0 %	PE 20 kg ε = 17,7%	PE 57,5 kg ε = 10,2 %
2	0,82	0,96	0,82	0,89
3	0,15	0,04	0,14	0,10
4	0,024	---	0,025	0,01
5	0,004	---	0,004	0,005
6	0,0005	---	---	---
B) mit Korrektur auf Zufallskoinzidenzen				
2	0,75	0,95	0,76	0,84
3	0,21	0,05	0,21	0,14
4	0,038	---	0,033	0,025
5	0,005	---	0,005	0,005
6	0,0005	---	0,0005	---

Tabelle 6: Beiträge der Multipllettordnung N für Messungen
mit Pu- und Am-kontaminierten Faßinhalten

N	ohne Korrektur auf Zufallskoinzi- denzen		mit Korrektur auf Zufallskoinzi- denzen	
	A	B	A	B
2	0,93	0,95	0,86	0,88
3	0,067	0,049	0,13	0,11
4	0,004	0,002	0,008	0,009
5	0,0005	---	0,0005	---

Faß A enthielt fast reines Pu

Faß B enthielt einen größeren Am-Anteil



- (1) Zylindrischer Behälter aus PE
- (2) Zählrohraufnahme im Zylinderring
- (3) Hydraulisch angetriebener Stempel
- (4) Zählrohraufnahme im Boden
- (5) Quadratische Bodenplatte aus PE
- (6) Zählrohraufnahme im Deckel
- (7) Verfahrbarer Deckel aus PE

Abb. 1: Faßmeßanlage HDB
Anordnung der Komponenten

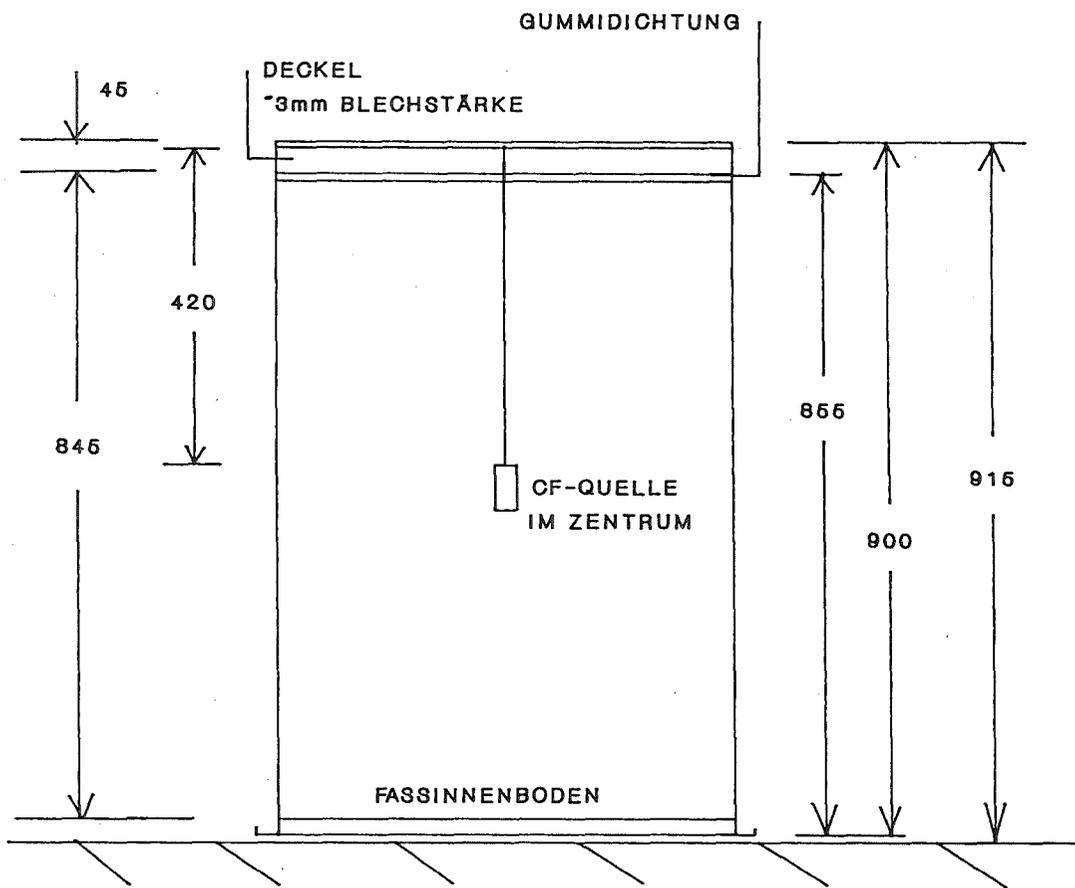


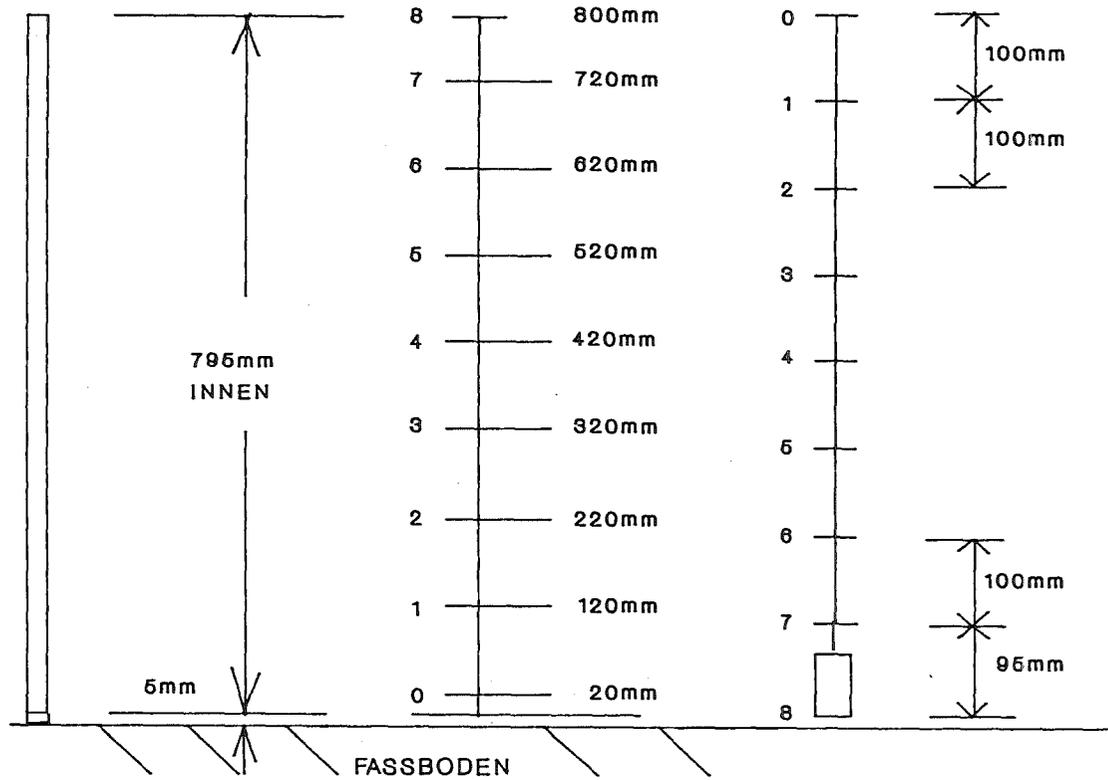
Abb. 2a
 FASSMONITOR II/HDB
 GEOMETRIE DES
 REFERENZFASSES

LÄNGE DES
ROHREINSATZES

HÖHENPOSITIONEN Z

FÜR DIE QUELLE
IM FASS

AN DER MESS-
SCHNUR



CF-QUELLE

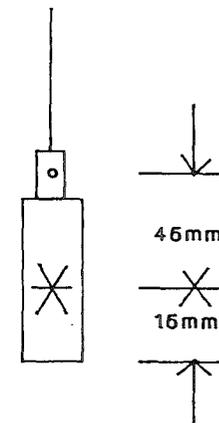
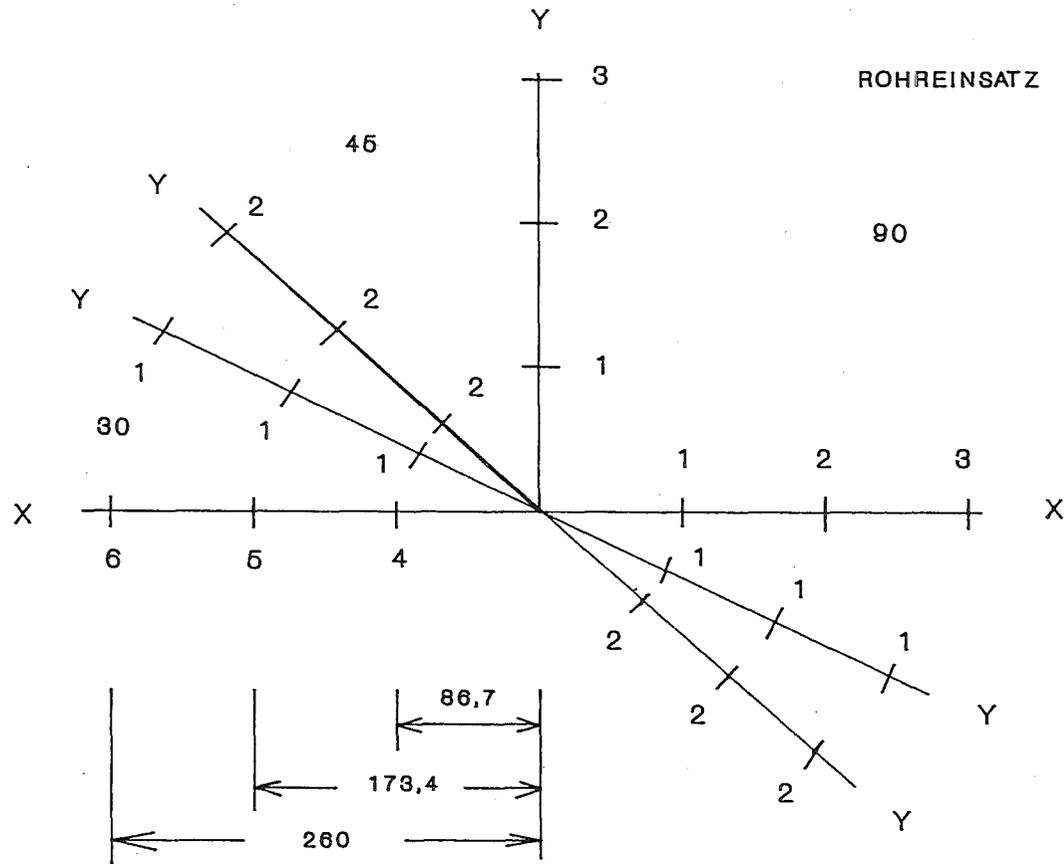


Abb. 2b

FASSMONITOR II/HDB

AXIALE KALIBRIER-
POSITIONEN



Hmax=795mm

KOORDINATEN X,Y,Z (Z=HÖHE)

Z-POS.0 = FASSBODEN

Abb. 2c

FASSMONITOR II/HDB

AZIMUTALE KALIBRIER-
POSITIONEN

QUELLENPOSITIONIERUNG
AUSSEN AM FASS

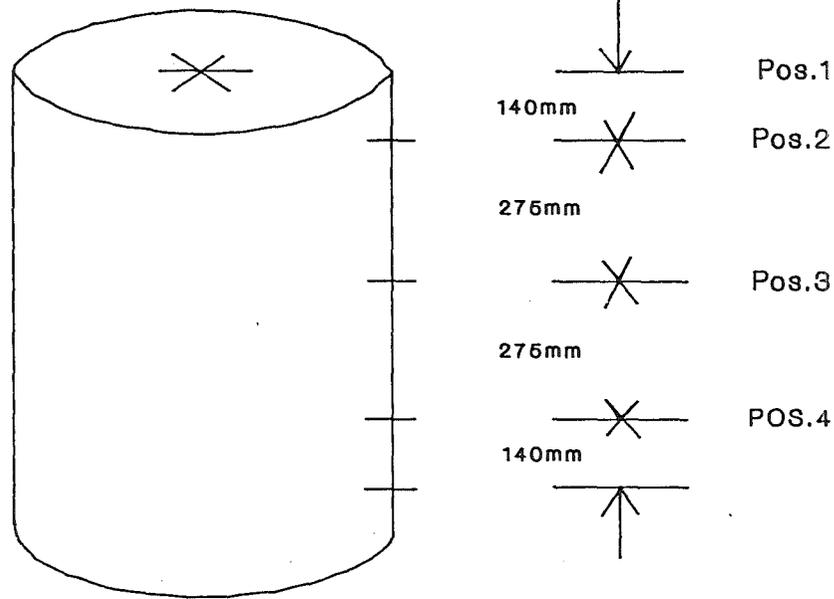


Abb. 2d

FASSMONITOR II/HDB

KALIBRIERPOSITIONEN
AUSSEN AM FASS

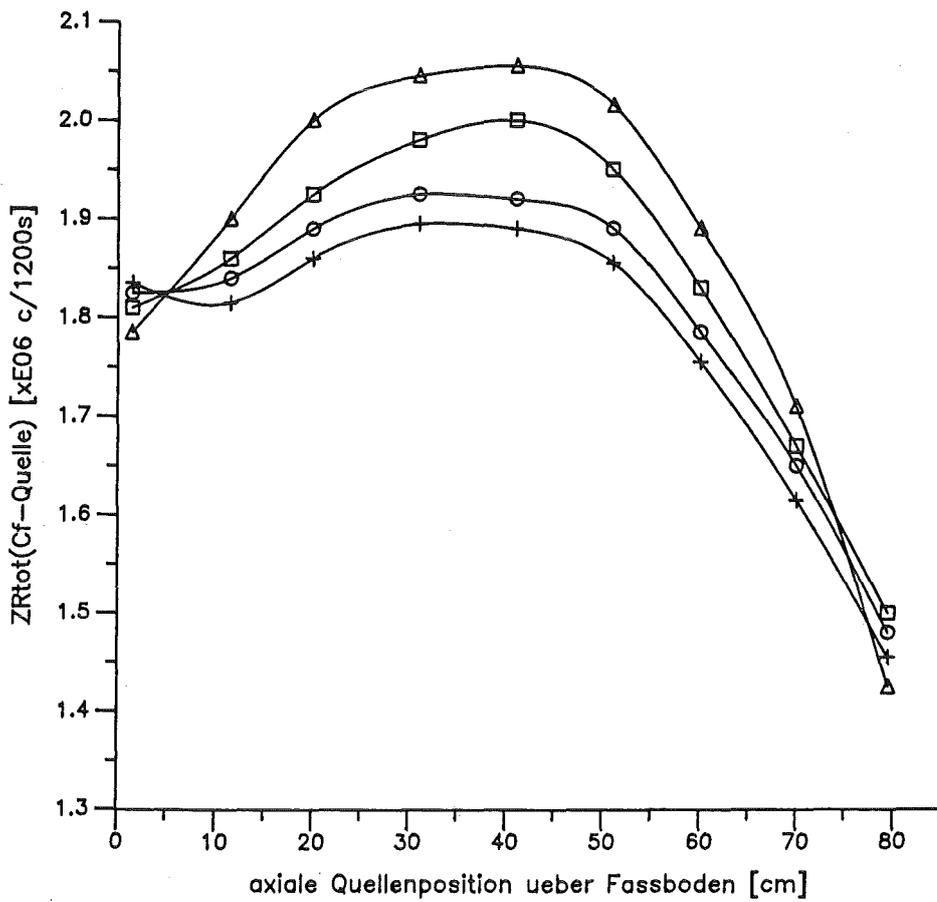


Abb. 3a

Aenderung der Zaehlraten in Abhaengigkeit von der axialen Quellenposition im leeren Fass.

+: r=0 mm
o: r=86.7 mm
□: r=173.4 mm
Δ: r=260 mm

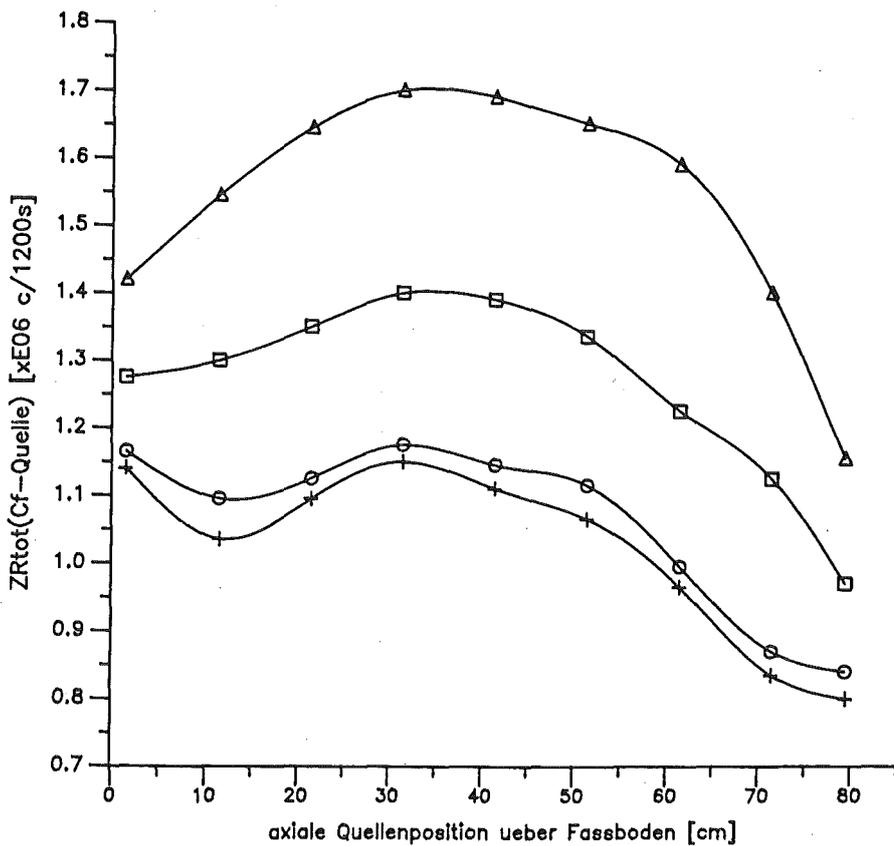


Abb. 3b

Aenderung der Zaehlraten in Abhaengigkeit von der axialen Quellenposition im gefuellten Fass.
(PE-Gehalt=57,5 kg)

+: r=0 mm
o: r=86.7 mm
□: r=173.4 mm
Δ: r=260 mm

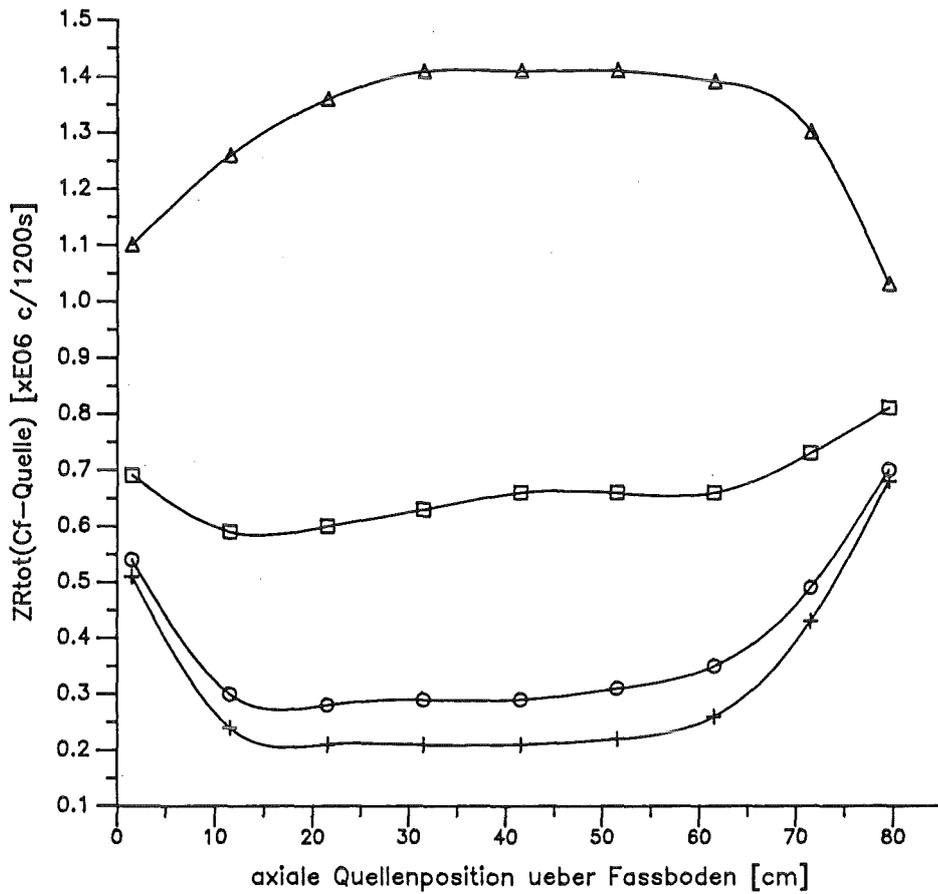


Abb. 3c

Aenderung der Zaehlraten in Abhaengigkeit von der axialen Quellenposition im Betonfass.

+ : $r=0$ mm
 o : $r=86.7$ mm
 □ : $r=173.4$ mm
 Δ : $r=260$ mm

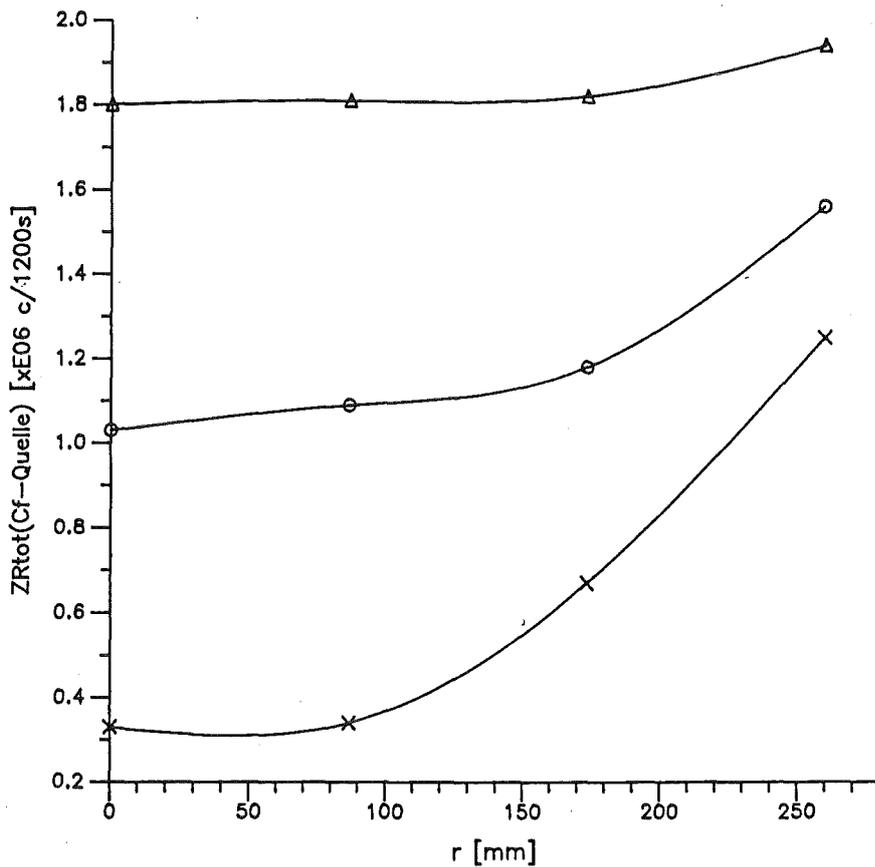


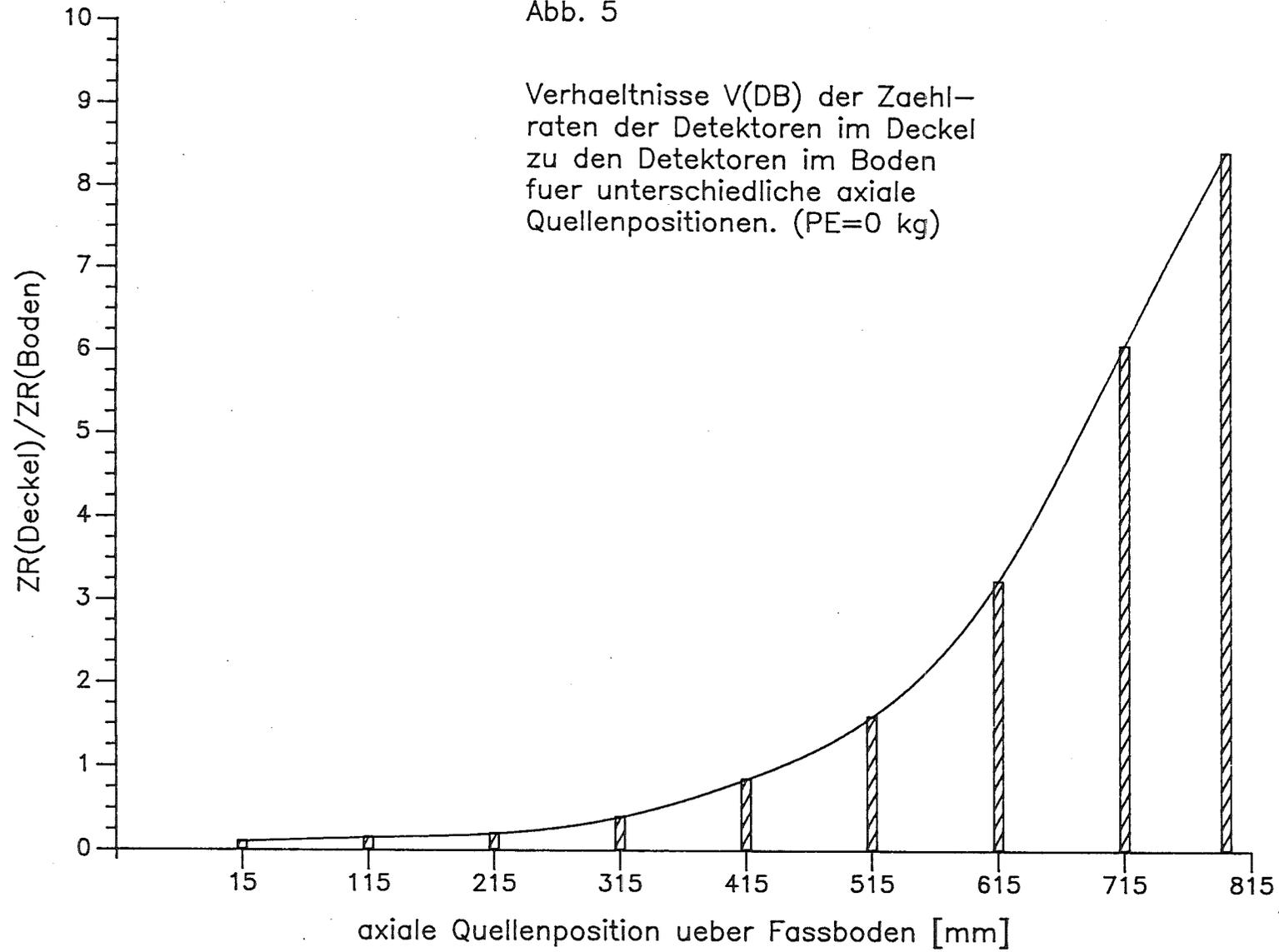
Abb. 4

Aenderung der axial gemittelten Zaehlraten in Abhaengigkeit von der radialen Quellenposition.

Δ : $PE=0$ kg
 o : $PE=57.5$ kg
 x : Beton

Abb. 5

Verhaeltnisse $V(\text{DB})$ der Zaehl-
raten der Detektoren im Deckel
zu den Detektoren im Boden
fuer unterschiedliche axiale
Quellenpositionen. ($\text{PE}=0 \text{ kg}$)



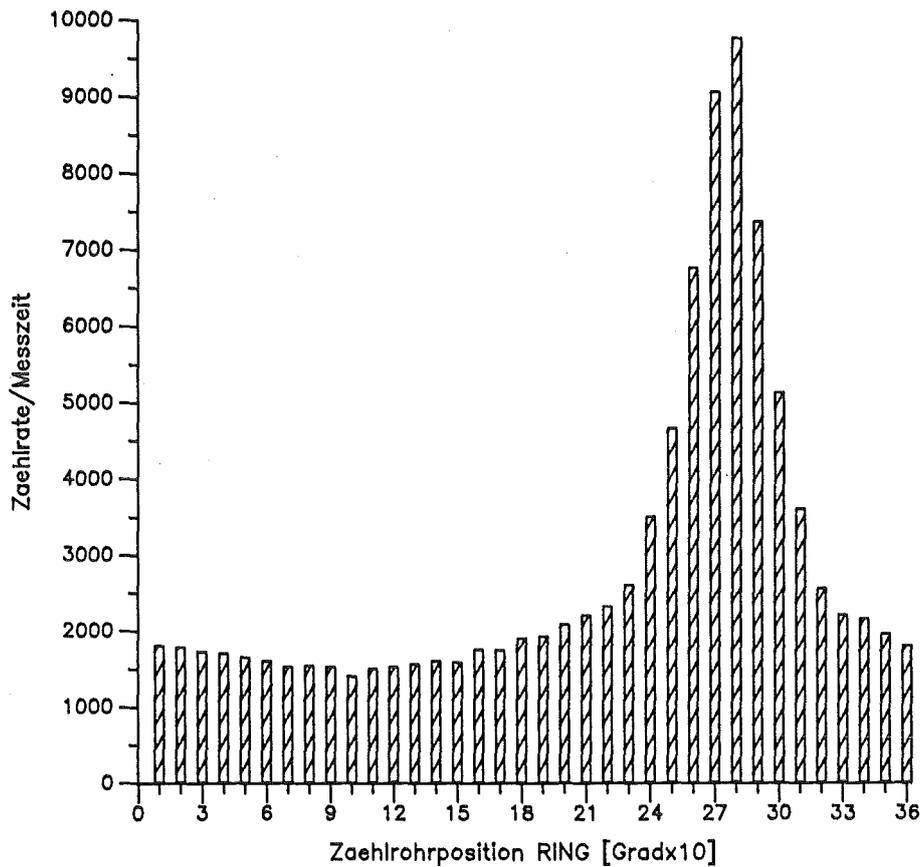


Abb. 6

Zaehratenverteilung der Detektoren im Ring bei einer Quellenpositionierung am Fassrand.

(PE-Gehalt=57.5 kg)

Quellenposition:
X=9, Y=0, Z=1

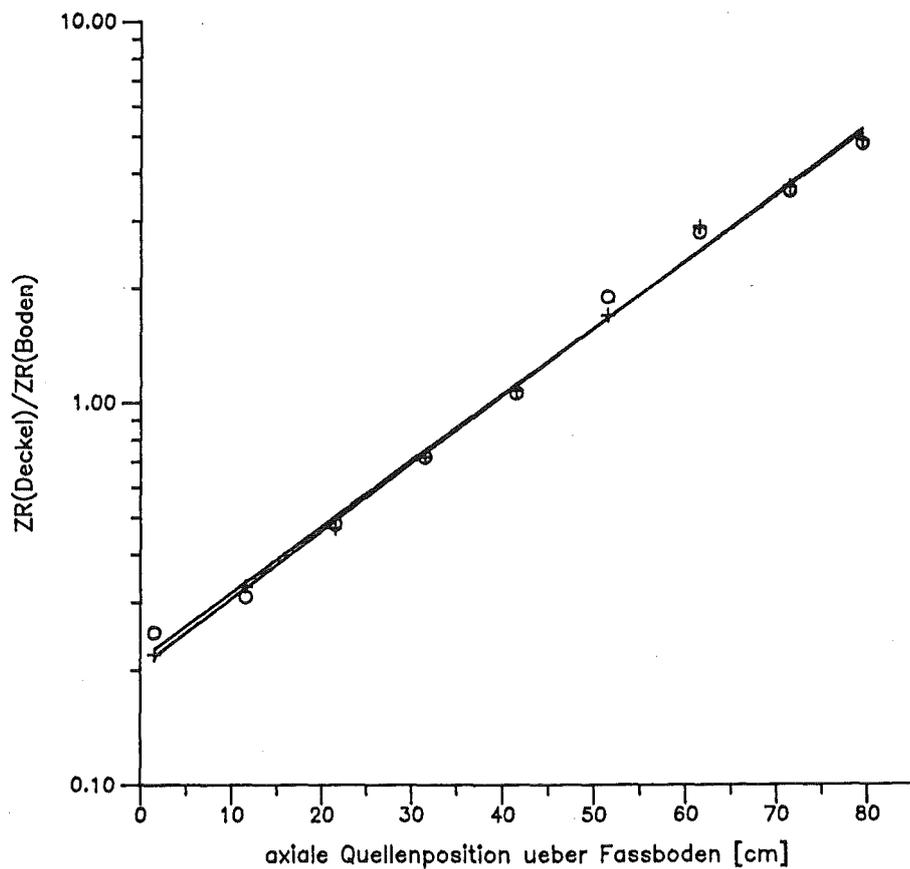


Abb. 7a

Verhaeltnis V(DB) der Zaehlraten der Detektoren im Deckel zu denen im Boden.

(PE-Gehalt= 0 kg)

+: r= 0 cm

o: r=26 cm

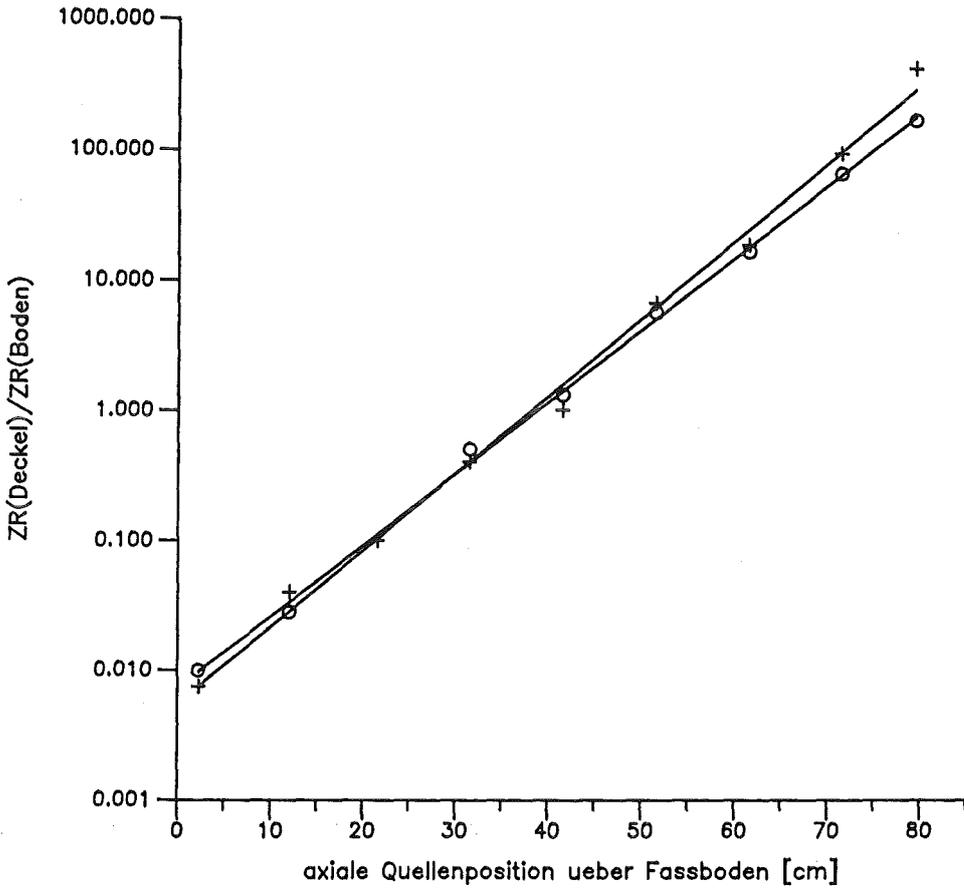


Abb. 7b

Verhaeltnis V(DB) der
Zaehlraten der Detektoren
im Deckel zu denen
im Boden.
(PE-Gehalt=57,5 kg)

+ : r= 0 cm
o : r=26 cm

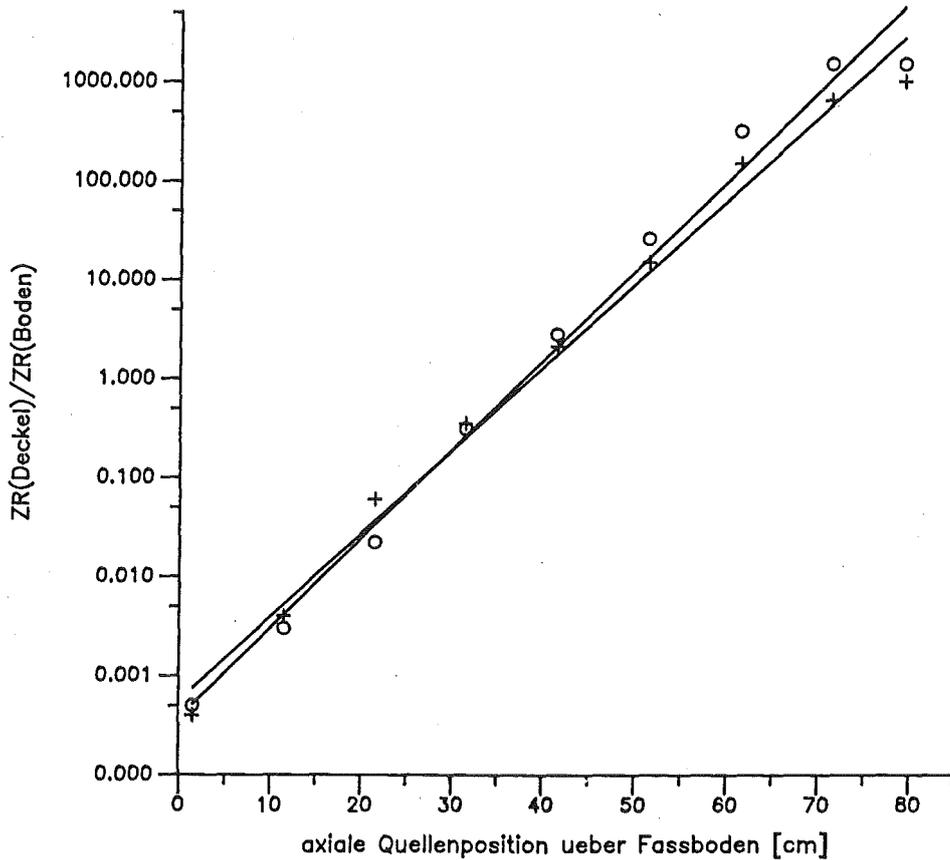


Abb. 7c

Verhaeltnis V(DB) der
Zaehlraten der Detektoren
im Deckel zu denen
im Boden (Betonfass).

+ : r= 0 cm
o : r=26 cm

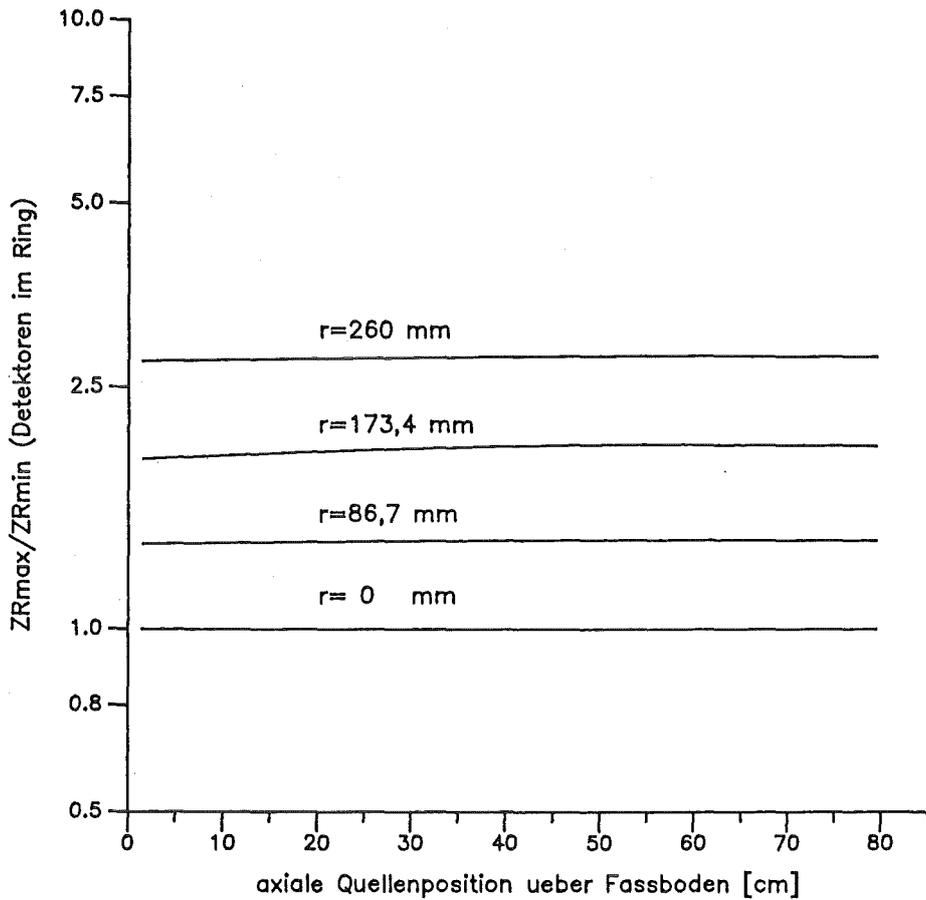


Abb. 8a

Verhaeltnis $V(R)$ der maximalen zur minimalen Zaehrate der Detektoren im Ring.
(leeres Fass)

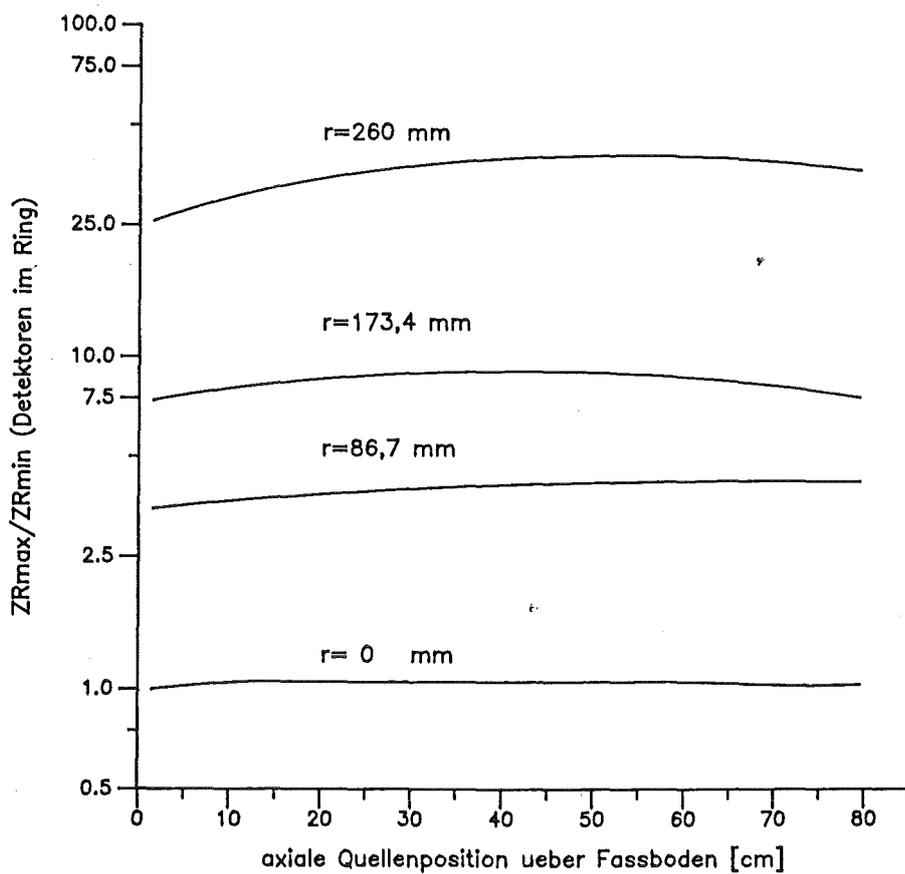


Abb. 8b

Verhaeltnis $V(R)$ der maximalen zur minimalen Zaehrate der Detektoren im Ring.
(PE-Gehalt=57.5 kg)

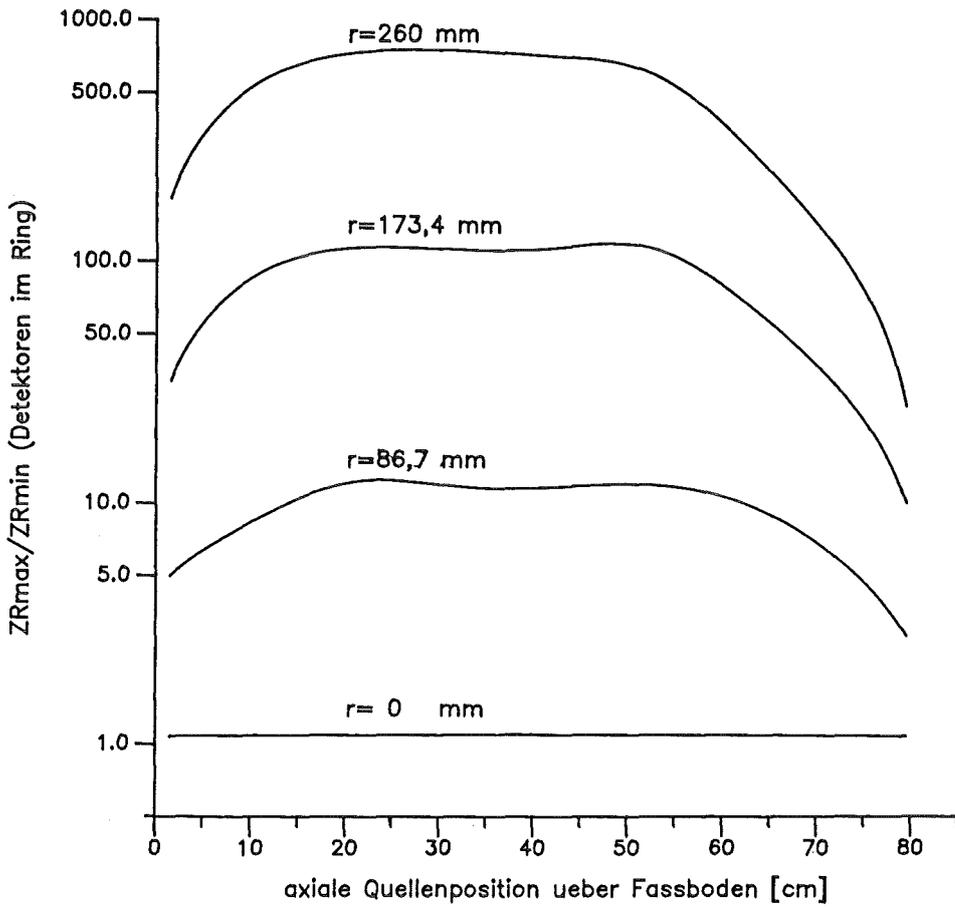


Abb. 8c

Verhaeltnis $V(R)$ der maximalen zur minimalen Zaehlrate der Detektoren im Ring.
(Betonfass)

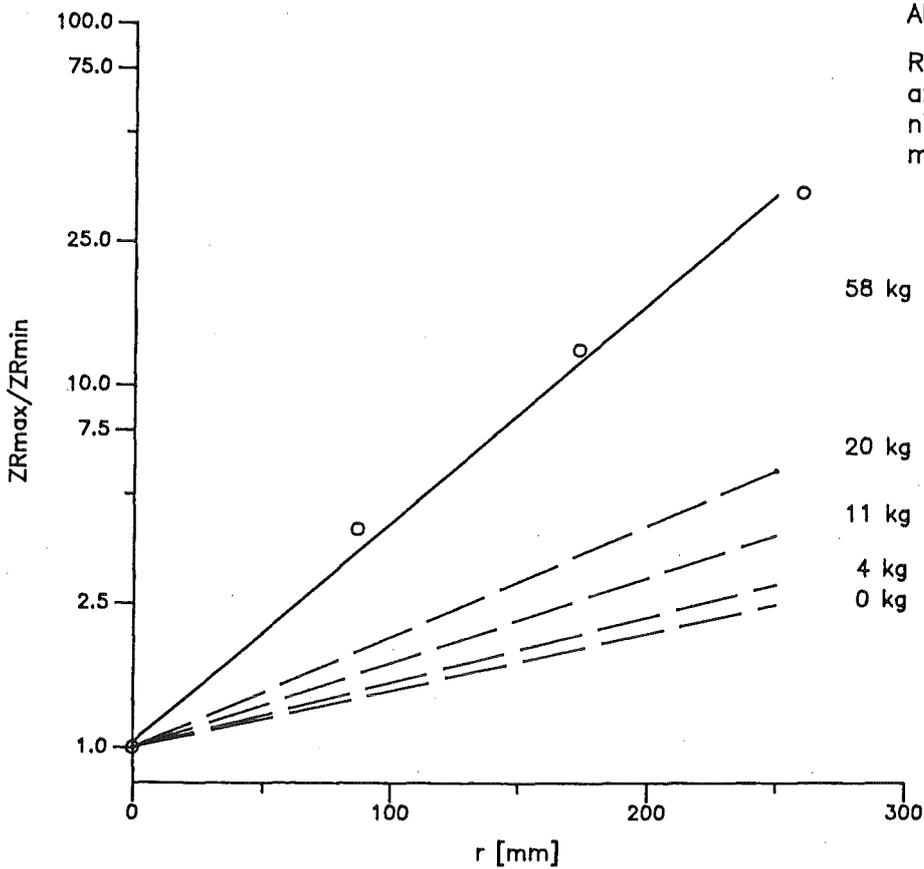


Abb. 9

Radiale Abhaengigkeit des axial gemittelten Verhaeltnisses der maximalen zur minimalen Zaehlrate.

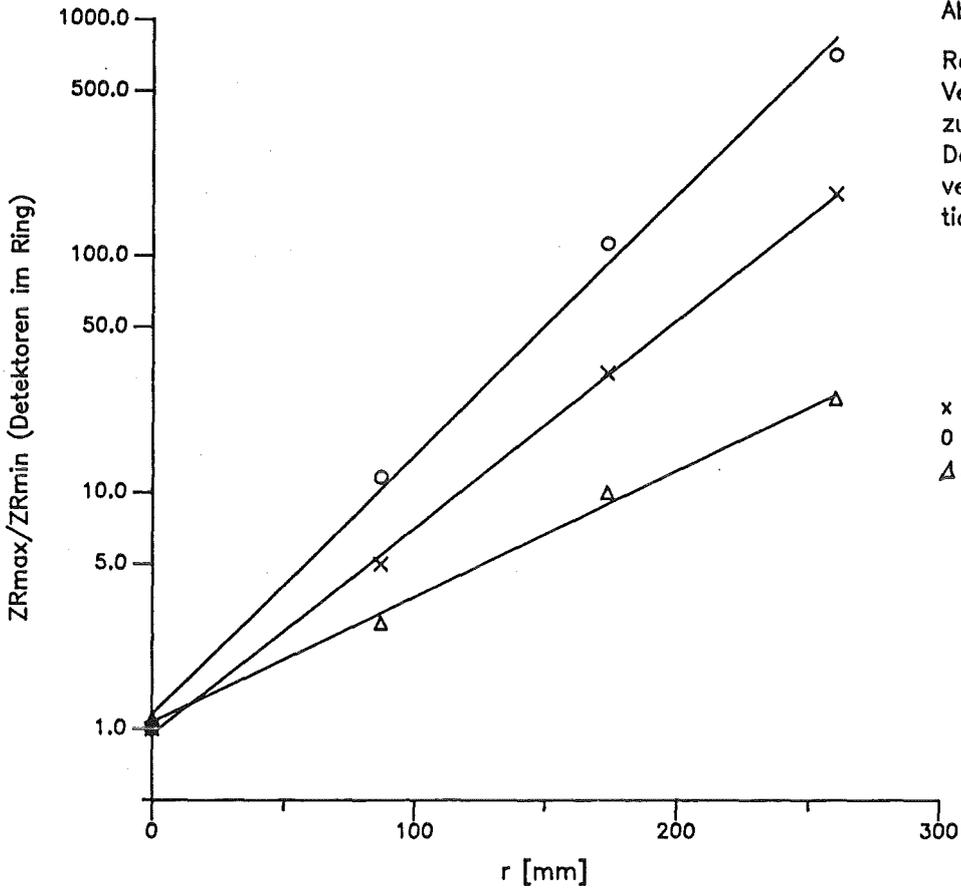


Abb. 10

Radiale Abhaengigkeit der Verhaeltnisse $V(R)$ der max. zur min. Zoehlraten der Detektoren im Ring fuer verschiedene Hoehenpositionen (Betonfass).

x : h = 1,5 cm
o : h = 41,5 cm
Δ : h = 79,5 cm

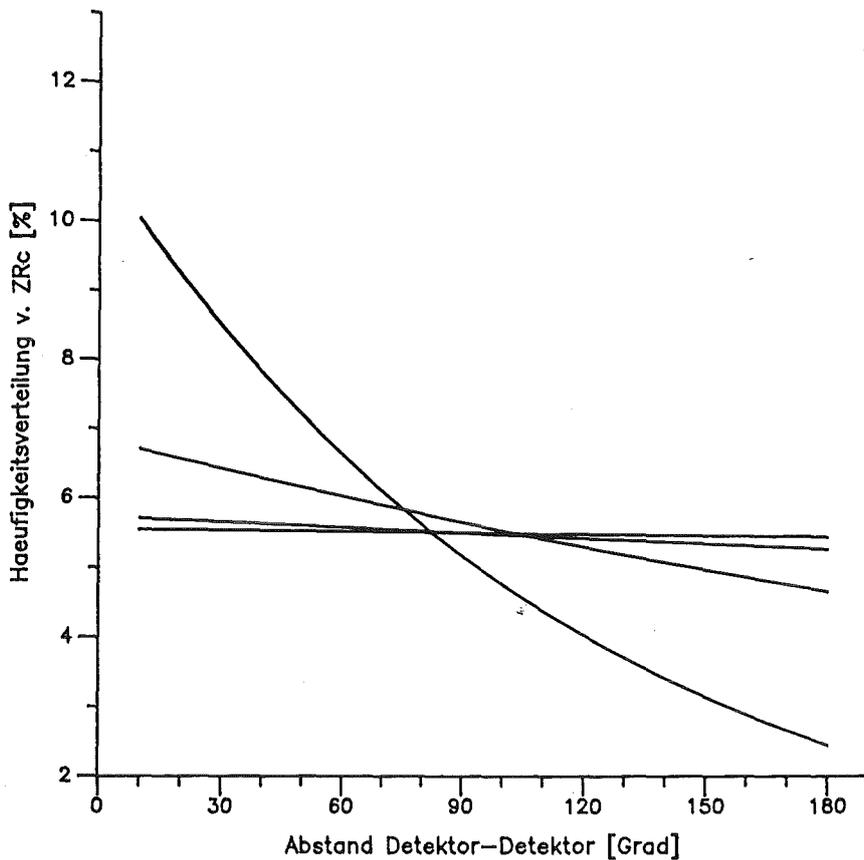


Abb. 11a

Prozentualer Anteil der Koinzidenzraten fuer zwei Detektoren unterschiedlicher Entfernung voneinander. Die Winkelangabe ist auf Fassmitte bezogen. (leeres Fass)

r = 0 mm
r = 86.7 mm
r = 173.4 mm

r = 260 mm

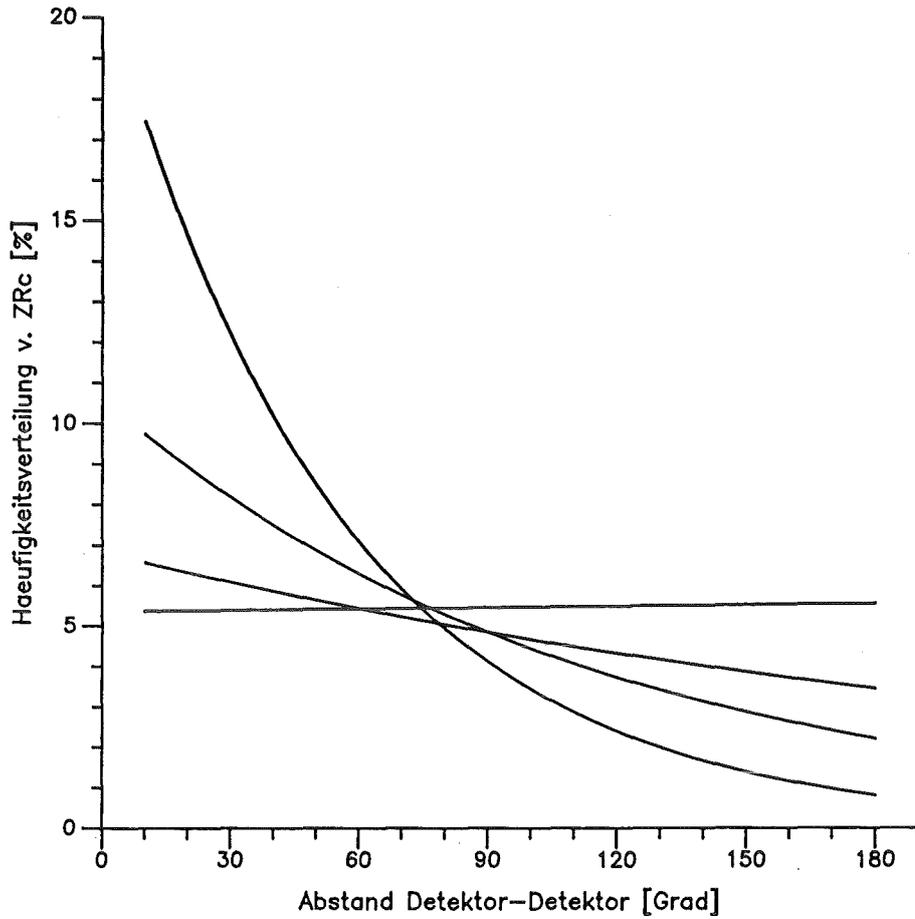


Abb. 11b

Prozentualer Anteil der
Koinzidenzraten fuer zwei
Detektoren unterschiedlicher
Entfernung voneinander.
Die Winkelangabe ist auf
Fassmitte bezogen.
(PE-Gehalt=57.5 kg)

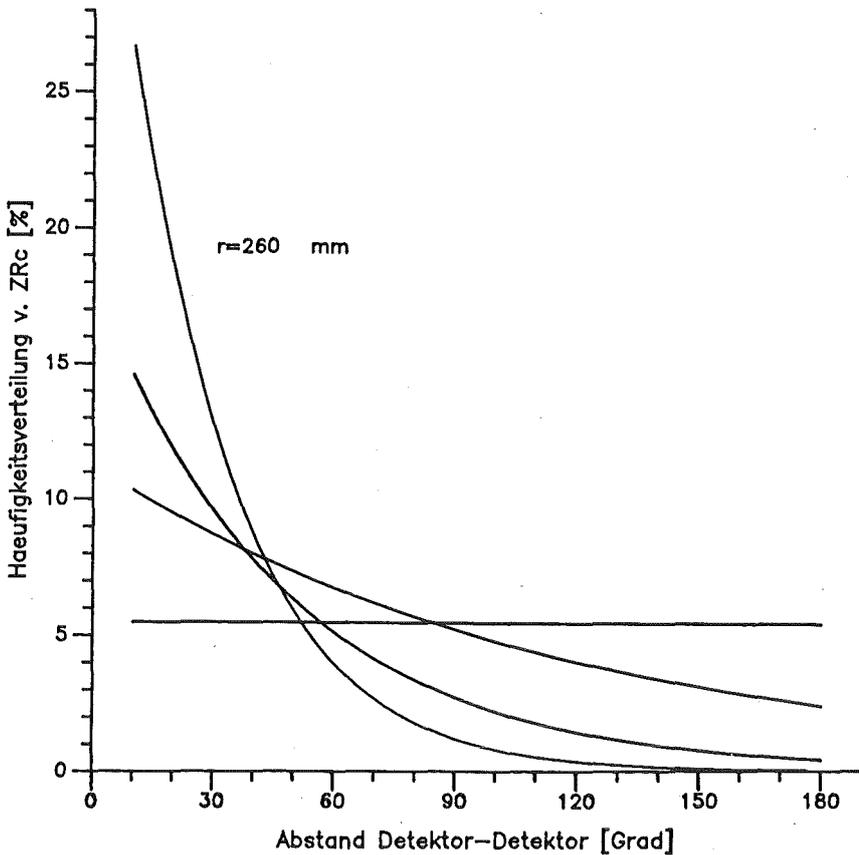


Abb. 11c

Prozentualer Anteil der
Koinzidenzraten fuer zwei
Detektoren unterschiedlicher
Entfernung voneinander.
Die Winkelangabe ist auf
Fassmitte bezogen.
(Betonfass)

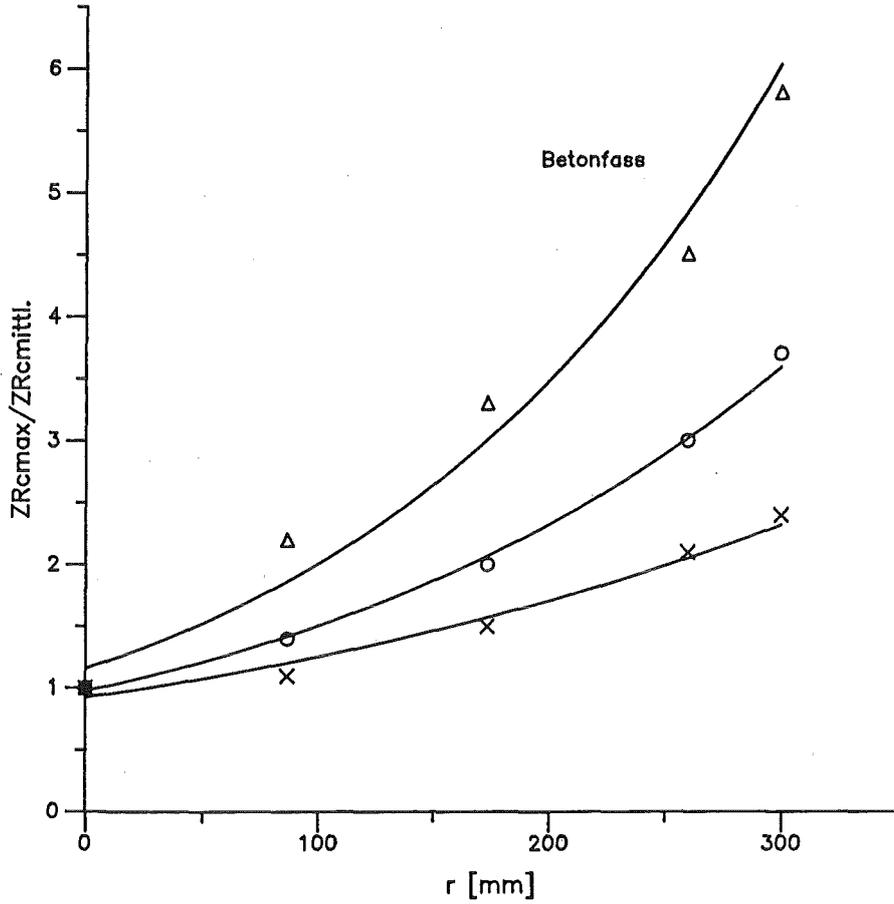


Abb. 12

Verhaeltnisse der maximalen zu den mittleren Koinzidenzraten fuer zwei Detektoren unterschiedlicher Entfernungen voneinander, bezogen auf das Fasszentrum.

PE=57.5 kg

PE= 0 kg

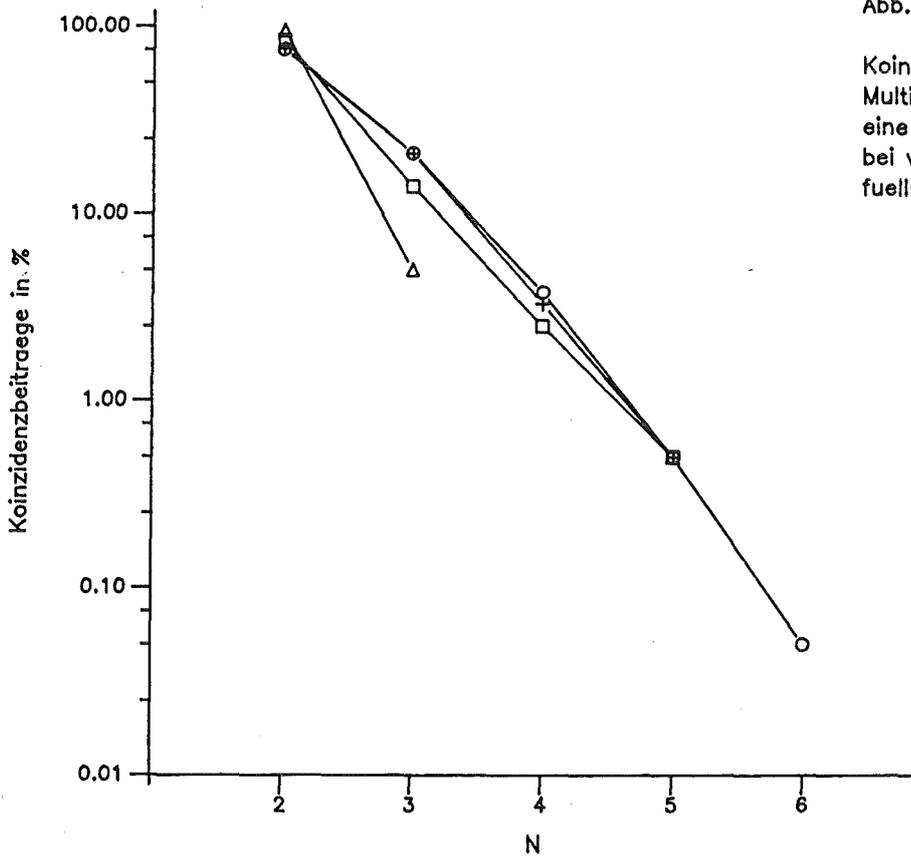
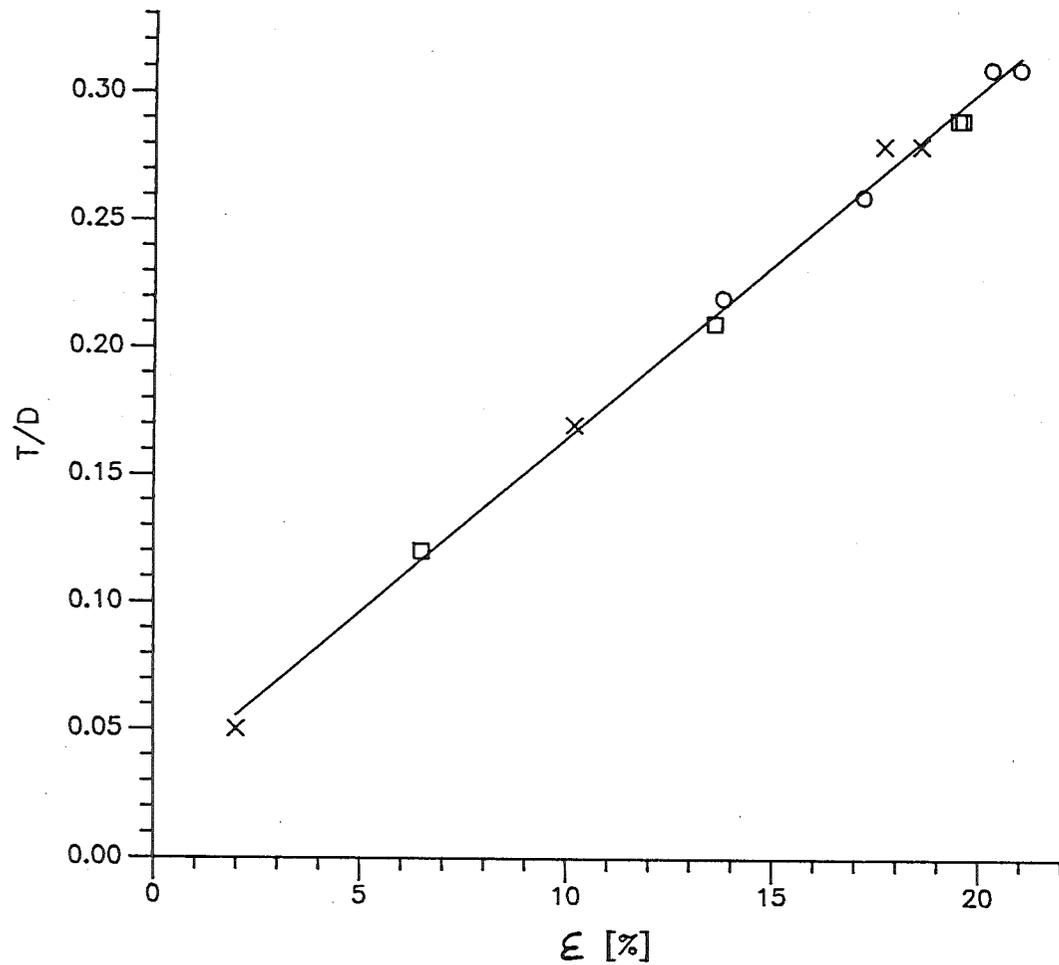


Abb. 13

Koinzidenzbeitraege der Multipliettordnung N fuer eine Cf-Quelle in Fassmitte bei verschiedenen Matrixfuellungen.

o : PE= 0 kg
 + : PE= 20 kg
 □ : PE= 57.5 kg
 △ : Beton



Cf-Quelle in halber
Fasshoehe positioniert.

x = Fasszentrum
□ : r=173.4 mm
○ : r=260 mm

Abb. 14
Verhaeltnis Triplet zu Dublett (T/D) als
Funktion der Ansprechwahrscheinlichkeit (ϵ)
fuer unterschiedliche Fassinhalte. (Leerfass,
Betonfass, PE = 20 kg, 57.5 kg)