

# Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz

Experimentelle und theoretische Untersuchungen zu radioaktiven Quellen und Gegenständen im Stahlschrott  
- Vorhaben 3615S52320

Band 4: Bericht zu AP2.2

Auftragnehmer:  
Brenk Systemplanung GmbH (BS)

Dr. J. de Groot  
Dr. S. Wörlen

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMU (UFOPLAN) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

**BfS-RESFOR-149/19**

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:  
**urn:nbn:de:0221-2019052818209**

Salzgitter, Mai 2019

**AP2.2 Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben:**

**Experimentelle und theoretische Untersuchungen zu  
radioaktiven Quellen und Gegenständen im  
Stahlschrott**

BS-Projekt-Nr. 1507-09  
Forschungsvorhaben: 3615S52320

erstellt im Auftrag des  
Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS)  
Neuherberg

durch die

Brenk Systemplanung GmbH (BS)  
Heider-Hof-Weg 23  
52080 Aachen

19.04.2017

**Anmerkung:**

Dieser Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers (BS) wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (BfS) übereinstimmen.

Dieser Bericht wurde von folgenden Bearbeitern erstellt:

- *Dr. Joost de Groot*
- *Dr. Stefan Wörlen*

Es wird versichert, dass dieser Bericht nach bestem Wissen und Gewissen, unparteiisch und ohne Ergebnisweisung angefertigt worden ist.

**ERSTELLUNG, PRÜFUNG UND FREIGABE**

erstellt	geprüft	freigegeben
Projektleiter	Geschäftsbereichsleiter	Geschäftsführung

<b><u>Inhaltsverzeichnis:</u></b>	Seite:
<b>1. Einleitung zum Arbeitspaket 2.2 .....</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund.....	1
1.2 Gliederung .....	2
<b>2. Umsetzung der Randbedingungen aus AP2.1 .....</b>	<b>3</b>
2.1 Erstellung eines typischen Schrottgebindes.....	3
2.1.1 Container des typischen Schrottgebindes .....	3
2.1.2 Positionierung der Prüfstrahler innerhalb des Schrottgebindes .....	4
2.1.3 Beladung des typischen Schrottgebindes.....	5
2.1.4 Vergleich des realisierten mit dem ermittelten typischen Schrottgebinde .....	7
2.2 Verwendete Prüfstrahler .....	8
2.3 Die Portalmessanlagen auf dem Firmengelände der Hofmann GmbH .....	10
<b>3. Ergebnisse der Experimentellen Untersuchungen.....</b>	<b>13</b>
3.1 Untergrundspektrum .....	13
3.1.1 Ortodosisleistung .....	13
3.1.2 Untergrundspektrum mit einem NaI-Detektor .....	14
3.2 Testmessungen mit Prüfstrahlern.....	15
3.2.1 Messungen mittels Co-60-Prüfstrahler .....	16
3.2.2 Messungen mittels Cs-137-Prüfstrahler.....	19
3.2.3 Messungen mittels Am-241-Prüfstrahler.....	21
3.3 Diskussionen und Vergleich mit den Werten aus der theoretischen Betrachtung.....	23
<b>4. Bewertung der Folgen des Einschmelzens einer Strahlenquelle.....</b>	<b>25</b>
4.1 Einschmelzen einer 2 MBq Co-60-Strahlenquelle.....	25
4.2 Einschmelzen einer 10 MBq Cs-137-Strahlenquelle .....	26
4.3 Einschmelzen einer Am-241-Strahlenquelle.....	27
4.4 Zusammenfassung der Folgen des Einschmelzens einer Strahlenquelle .....	27
<b>5. Verbesserung der Auffindbarkeit radioaktiver Quellen .....</b>	<b>29</b>
5.1 Aktueller Stand der Technik in Bezug auf Protalmonitore .....	29
5.2 Übersicht der Optimierungsmöglichkeiten in Bezug auf Portalmonitore .....	29
5.3 Bewertung der Optimierungsvorschläge.....	30
5.3.1 Vorschlag a) Erhöhung der messtechnischen Abdeckung der Schrottgebinde .....	30
5.3.2 Vorschlag b) Positionierung der Detektoren näher am Gebinde.....	31
5.3.3 Vorschlag c) Verbesserungen der Messtechnik und Auswertung in Bezug auf Portalmessanlagen .....	32
5.3.4 Vorschlag d) Maßnahmen zur Reduktion des Untergrundes .....	32
5.3.5 Vorschlag e) Erhöhung der Messhäufigkeit an Ein- und Ausgangsmonitoren .....	33
5.3.6 Vorschlag f) Erhöhung der Anzahl an Messungen bei betrieblichen Abläufen welche bereits eine Vereinzelnung von Schrott beinhalten .....	41
5.3.7 Vorschlag g) Messungen mit optimierter Beladung der Schrottgebinde .....	42
5.3.8 Vorschlag h) Sensibilisierung und Aufklärung der Mitarbeiter von Schrott- und Einschmelzbetrieben bezüglich der Erkennung und dem Umgang beim Fund von radioaktiven Quellen und Gegenständen .....	43

6.	<b>Zusammenfassung</b> .....	45
7.	<b>Literatur</b> .....	46
	<b>ANHANG A: Messprotokolle der Portalmessanlagen</b> .....	48

<b><u>Abbildungsverzeichnis:</u></b>		<b>Seite:</b>
Abbildung 2-1:	Für die experimentellen Arbeiten verwendeter Abrollcontainer.....	3
Abbildung 2-2:	Rechts: Positionen der Probenrohre zur Einbringung der Prüfstrahler in das Schrottgebäude. Links: Skizze der Positionen. An der Position 3 befindet sich sowohl eine Stahl als auch ein Aluminiumrohr. ....	4
Abbildung 2-3:	links/mitte: Probenhalter/Befestigung der Co-60- und Cs-137-Prüfstrahler; rechts: des Am-241-Prüfstrahlers .....	5
Abbildung 2-4:	Schrotthaufen mit Altschrott der Sorte 3 aus dem das Material zur Befüllung des Containers entnommen wurde .....	6
Abbildung 2-5:	Abbildungen einzelner Schritte des Füllvorgangs .....	6
Abbildung 2-6:	Bleiabschirmung (16,25 mm) montiert auf dem Probenmanipulationsstab .....	8
Abbildung 2-7:	Saphymo Portalmessanlagen auf dem Firmengelände der Hofmann GmbH.....	11
Abbildung 3-1:	Vergleich des Untergrundspektrums der experimentellen Arbeiten mit dem aus der Simulation .....	14
Abbildung 3-2:	LKW-Leermessung des mit dem typischen Schrottgebäude gemäß Kapitel 2.1 an der Eingangswaage .....	15
Abbildung 5-1:	Detektionswahrscheinlichkeit verschiedener Co-60-Aktivitäten bei zufälliger Positionierung im Gebinde, abhängig von der Anzahl der Umfüll- und Messvorgänge und der Anlagensensitivität mit einer minimal detektierbare Aktivität $A_{\max}$ von 2 MBq. Mit (2 MBq und 10 MBq) wird die Detektionswahrscheinlichkeit für einen Vorgang von zwei Messungen an unterschiedlichen Anlagen mit minimal detektierbare Aktivitäten von 2 MBq und 10 MBq dargestellt.....	35
Abbildung 5-2:	Detektionswahrscheinlichkeit verschiedener Cs-137-Aktivitäten bei zufälliger Positionierung im Gebinde, abhängig von der Anzahl der Umfüll- und Messvorgänge und der Anlagensensitivität mit einer minimal detektierbare Aktivität $A_{\max}$ von 2 MBq. Mit (10 MBq und 50 MBq) wird auch noch die Detektionswahrscheinlichkeit für einen Vorgang von zwei Messungen an unterschiedlichen Anlagen mit minimal detektierbare Aktivitäten von 2 MBq und 50 MBq dargestellt.....	37
Abbildung 5-3:	Detektionswahrscheinlichkeit verschiedener Am-241-Aktivitäten bei zufälliger Positionierung im Gebinde, abhängig von der Anzahl der Umfüll- und Messvorgänge .....	38

<b><u>Tabellenverzeichnis:</u></b>	<b>Seite:</b>
Tabelle 2-1: Vergleich zwischen den ermittelten Parametern einer typischen Schrottschüttung mit den jeweiligen Standardabweichungen und der im Experiment realisierten Schrottschüttung .....	7
Tabelle 2-2: Aktivitäten der Prüfstrahler.....	8
Tabelle 2-3: Effektive Aktivitäten $A_{\text{eff}}$ für die verwendeten Co-60 und Cs-137 Konfigurationen bei einer Bleiabschirmung, berechnet aus der modellierten ODL (10 cm Abstand).....	9
Tabelle 2-4: Effektive Aktivitäten $A_{\text{eff}}$ und äquivalente Fe-Abschirmung für die Am-241-Konfigurationen mit einer Aluminiumabschirmung, berechnet aus der modellierten ODL .....	10
Tabelle 2-5: Abstandsabhängige Dosisleistung der Co-60- und Cs-137-Prüfstrahler ohne Bleiabschirmung gemessen mit einem geeichten Messgerät (ThermoFisher FH 40 G-L10 mit Sonde FHZ 672 E-10) .....	10
Tabelle 2-6: Technische Spezifikationen der Saphymo RCVL-2 Portalmessanlage.....	11
Tabelle 3-1: Dosisleistungen an den jeweiligen Detektoren gemessen. ....	13
Tabelle 3-2: Übersicht über die Alarmer der Portalmessanlagen bei verschiedenen Versuchskonfigurationen mit dem Co-60-Prüfstrahler. Positionen der Prüfstrahler beziehen sich auf das jeweilige Rohr und die Tiefe im Gebinde (Vorne, Mitte und Hinten) gemäß Kapitel 2.1.2 .....	17
Tabelle 3-3: Ermittelte Bandbreite der minimal detektierbaren Aktivität für den Co-60-Prüfstrahler.....	19
Tabelle 3-4: Übersicht über die Alarmer der Portalmessanlagen bei verschiedenen Versuchskonfigurationen mit dem Cs-137-Prüfstrahler. Positionen der Prüfstrahler beziehen sich auf das jeweilige Rohr und die Tiefe im Gebinde (Vorne, Mitte und Hinten). ....	20
Tabelle 3-5: Ermittelte Bandbreite der minimal detektierbaren Aktivität für den Cs-137-Prüfstrahler.....	21
Tabelle 3-6: Übersicht über die Alarmer der Portalmessanlagen bei verschiedenen Versuchskonfigurationen mit dem Am-241-Prüfstrahler .....	22
Tabelle 3-7: Vergleich der theoretisch und experimentell ermittelten minimal detektierbaren Aktivitäten .....	23
Tabelle 4-1: Aktivitätsseparation beim Einschmelzen einer 2 MBq Co-60-Strahlenquelle mit 10 Mg Stahlschrott.....	25
Tabelle 4-2: Aktivitätsverteilung beim Einschmelzen einer 10 MBq Cs-137-Strahlenquelle mit 10 Mg Stahlschrott.....	26
Tabelle 5-1: 95 % Detektionswahrscheinlichkeit für die beiden unterschiedlichen Szenarien mit jeweils zwei Messungen .....	39

## **1. Einleitung zum Arbeitspaket 2.2**

### **1.1 Hintergrund**

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat die Brenk Systemplanung GmbH (BS) mit der Durchführung der Studie „Experimentelle und theoretische Untersuchungen zu radioaktiven Quellen und Gegenständen im Stahlschrott“ beauftragt.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird nach Möglichkeiten gesucht, herrenlose Strahlenquellen und radioaktive Gegenstände im Stahlschrott frühzeitig vor der Verarbeitung auf einem Werksgelände entdecken und aussortieren zu können. Um dieses zu erreichen, werden im Rahmen des Forschungsvorhabens folgende Arbeitspunkte (AP) bearbeitet:

- AP1: Repräsentative Ermittlung der Ausstattung deutscher Schrottplätze und Schmelzbetriebe mit Portalmonitoren oder ähnlichen Messeinrichtungen,
- AP2: Auffindbarkeit typischer Gammastrahler im Stahlschrott,
- AP3: Möglichkeit und Notwendigkeit der Detektion von Neutronenstrahlung und des Einsatzes von Strahlung zur Auffindung radioaktiver Quellen und Gegenstände im Schrott und
- AP4: Ideenfindung für Leitlinien und Informationsmaterial im Rahmen der neuen Euratom-Grundnormen.

Im Rahmen des AP1 [BS 16a] wurde bereits die Ausstattung deutscher Schrottplätze und Schmelzbetriebe mit Portalmonitoren oder ähnlichen Messeinrichtungen ermittelt. Bei dieser Erhebung wurden bereits die in diesem Arbeitspunkt benötigten Daten für die Definition eines typischen Schrottgebindes erhoben.

Im Rahmen des AP2 wurden sowohl theoretische als auch praktische Arbeiten mit Bezug auf die Auffindbarkeit von radioaktiven Strahlenquellen im Stahlschrott durchgeführt. Ein Ziel dieses Vorhabens war es, im Rahmen des AP2.1 [BS 16b] theoretisch, mittels Computersimulationen (Monte Carlo Simulationen), die Auffindbarkeit radioaktiver Quellen und Gegenstände im Stahlschrott zu untersuchen. Aufbauend auf den im Rahmen der Umfrage des AP1 erhobenen Parametern eines typischen Schrottgebindes, d. h. des typischen Stahlschrotts und den entsprechenden Randbedingungen (Geometrie), wurden auf Basis von Monte-Carlo-Simulationen an dem Modell eines typischen Schrottgebindes u. a. die minimal detektierbaren Aktivitäten von Co-60-, Cs-137- und Am-241-Strahlenquellen an verschiedenen Positionen innerhalb des Gebindes ermittelt. Auf Basis der hierbei erhaltenen Ergebnisse wurde diskutiert, inwiefern unterschiedliche geometrische Randbedingungen, wie Detektorabstand und Detektorposition, Einfluss auf die minimal detektierbaren Aktivitäten haben. Auf Basis der durch die Simulationen erhaltenen Ergebnisse wurde ein Arbeitsprogramm für die experimentellen Arbeiten im Rahmen des AP2.2 aufgestellt. Im Rahmen dieses Berichtes werden die folgenden beiden Themenschwerpunkte bearbeitet:

- Es werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen, welche unter realen Bedingungen an einer Portalmessanlage eines Schrottplatzes durchgeführt worden sind, präsentiert. Hierbei wurden an verschiedene Positionen innerhalb des Schrottgebindes Prüfstrahler eingebracht.

Die experimentell ermittelten minimalen detektierbaren Aktivitäten werden mit den Ergebnissen der theoretischen Berechnungen verglichen.

- Basierend auf den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen und auf Basis der theoretischen Ergebnisse des AP2.1 [BS 16b] werden mögliche Optimierungen zum Auffinden von herrenlosen Strahlenquellen erarbeitet und bewertet.

Die in dieser Arbeit erhaltenen minimal detektierbaren Aktivitäten beziehen sich immer auf eine nicht abgeschirmte Strahlenquelle.

## **1.2 Gliederung**

In Kapitel 2 wird beschrieben, wie das für die Durchführung der hier beschriebenen experimentellen Untersuchungen erforderliche typische Schrottgebäude zusammengestellt worden ist. Im Rahmen dieses Kapitels wird dargestellt, dass die in AP2.1 [BS 16b], insbesondere im Rahmen der Umfrage, ermittelten Randbedingungen und Kenngrößen mit dem für die Experimente erstellten Gebäudes umgesetzt worden sind.

Die Ergebnisse der Messungen mit Co-60-, Cs-137- und Am-241-Prüfstrahlern in dem erstellten Schrottgebäude an einer realen Portalmessanlage werden im Rahmen des Kapitels 3 präsentiert und mit den Ergebnissen aus den theoretischen Untersuchungen des AP2.1 [BS 16b] verglichen. Die experimentellen Untersuchungen wurden am 13. und 14. September 2016 auf dem Firmengelände der Hofmann GmbH durchgeführt.

In Kapitel 4 werden mögliche Folgen des versehentlichen Einschmelzens von herrenlosen Strahlenquellen, welche die minimal detektierbaren Aktivitäten aufweisen, dargestellt.

In Kapitel 5 werden Möglichkeiten zur Verbesserung der Auffindbarkeit von radioaktiven Quellen und Gegenständen im Stahlschrott aufgezeigt und bewertet. Hierzu werden u. a. zusätzliche Monte-Carlo-Simulationen präsentiert, welche die Detektionswahrscheinlichkeit verschiedener Prüfstrahler in Abhängigkeit von der Anzahl der durchgeführten Umschüttvorgänge und Messungen darstellt.

Abschließend werden die Ergebnisse dieses Berichts in Kapitel 6 zusammengefasst.

## **2. UMSETZUNG DER RANDBEDINGUNGEN AUS AP2.1**

In diesem Kapitel wird bezüglich des experimentellen Schrottgebindes beschrieben, wie dieses zusammengestellt wurde, welche Anforderungen aus den Ergebnissen des AP 2.1 [BS 16b] erfüllt werden müssen und wie überprüft wurde, dass die Randbedingungen an dem Gebinde eingehalten worden sind.

### **2.1 Erstellung eines typischen Schrottgebindes**

Im Rahmen der Umfrage, die im Rahmen des AP1 [BS 16a] dieses Forschungsvorhabens durchgeführt wurden, wurden Abmessungen und Beladungen von typischen Schrottgebinden der Schrottdindustrie abgefragt. Im Rahmen der AP2.1 [BS 16b] wurde diese Umfrage ausgewertet und ein Referenzgebinde („typisches Schrottgebinde“) definiert.

Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben die Realisierung eines entsprechenden realen Gebindes für die Durchführung der experimentellen Arbeiten. Dazu wurde ein Abrollcontainer mit Altschrott der Sorte 3 beladen. Die Schrottsorte 3 „schwerer Altschrott“ ist eine der allgemeinen Schrottsorten nach [BDSV 10], hierzu zählen Schrottteile, welche keine größeren Abmessungen haben als  $150\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ .

#### **2.1.1 Container des typischen Schrottgebindes**

Als Containertyp wurde gemäß der Umfrageergebnisse des AP1 [BS 16a] ein Standardabrollcontainer verwendet. In Abbildung 2-1 ist der für die experimentellen Arbeiten verwendete Abrollcontainer abgebildet. Dieser hatte eine Wandstärke von ca. 3,5 mm und ein Leergewicht von 3.300 kg. Die Innenmaße des verwendeten Containers betragen  $700\text{ cm} \times 240\text{ cm} \times 260\text{ cm}$  was einem maximalen Ladevolumen von ca.  $44\text{ m}^3$  entspricht.

Abbildung 2-1: Für die experimentellen Arbeiten verwendeter Abrollcontainer

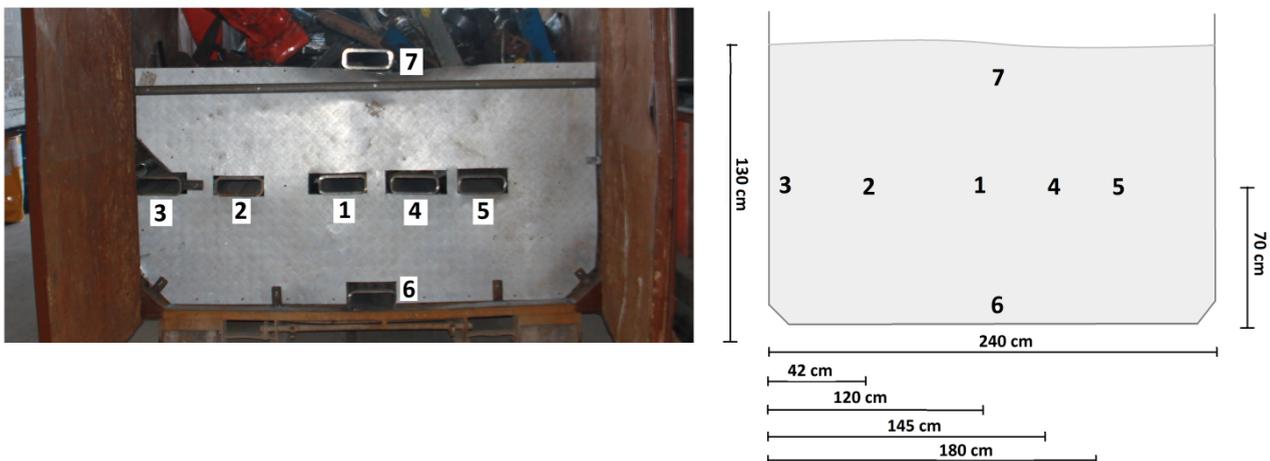


Um eine reproduzierbare und sichere Positionierung der Prüfstrahler innerhalb des Schrottgebindes zu ermöglichen wurden innerhalb des Containers auf verschiedenen Höhen waagerechte Edelstahl-

rohre mit einer Länge von 420 cm befestigt. Aus Strahlenschutzgründen wurden, um den Abstand zwischen LKW-Fahrer und Prüfstrahler möglichst groß zu gestalten, die Probenrohre im hinteren Bereich des Containers montiert. Hierdurch wurde auch bei der ungünstigsten Probenpositionierung (möglichst weit innerhalb der Probenrohre), ein großer Abstand zum Fahrerhaus gewährleistet. Abbildung 2-2 gibt einen Überblick über die Positionen der Probenrohre innerhalb des Containers.

Die Probenrohre in Abbildung 2-2 haben, aufgrund der dicken Außenwand von ca. 1 cm Stahl, eine mittlere Dichte von  $2,8 \text{ g/cm}^3$ . Diese wird definiert als Gesamtmasse durch das Gesamtvolumen der Probenrohre und ist deutlich höher als die mittlere Dichte des Schrotts. Um Artefakte durch die Abschirmung der 60 keV Am-241-Gammastrahlung durch die hohe Massenbelegung der Außenwand auszuschließen, wurde zusätzlich über dem fahrerseitigen Stahlrohr (Position 3 in Abbildung 2-2) ein 420 cm langes Aluminiumrohr mit einer Wandstärke von 3 mm an der Containerwand befestigt. Um den Verlust eines Prüfstrahlers innerhalb des Schrottgebindes zu vermeiden wurden alle Probenrohre fahrerseitig fest verschlossen.

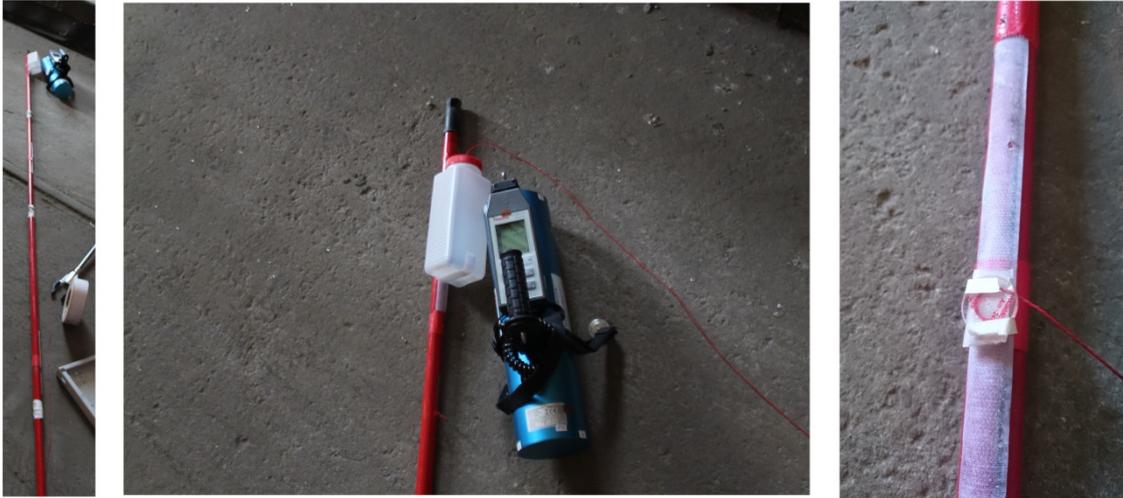
Abbildung 2-2: Rechts: Positionen der Probenrohre zur Einbringung der Prüfstrahler in das Schrottgebände. Links: Skizze der Positionen. An der Position 3 befindet sich sowohl eine Stahl als auch ein Aluminiumrohr.



### 2.1.2 Positionierung der Prüfstrahler innerhalb des Schrottgebindes

Zur Positionierung und Rückholung der Prüfstrahler innerhalb des Schrottgebindes wurden die Proben an einem ca. 400 cm langen Probenmanipulationsstab befestigt. Für die Experimente mit unabgeschirmten Prüfstrahlen erfolgte die Positionierung in einem geschlossenen PVC-Behälter (siehe Abbildung 2-3) an 3 vordefinierte Positionen bei 120 cm, 240 cm und 360 cm (Hinten, Mitte und Vorne, Tiefe von der Containerrückseite aus gemessen). Die für die Experimente mit unabgeschirmten Prüfstrahlen verwendeten Bleiabschirmungen mussten aufgrund ihres höheren Gewichts direkt mit Kabelbinder an dem Probenmanipulationsstab befestigt werden. Für beide Montagearten wurden die PVC-Behälter bzw. Bleiabschirmungen zusätzlich an einer Leine befestigt, um eine sichere Rückholung auch im Falle einer Ablösung vom Probenmanipulationsstab zu gewährleisten.

Abbildung 2-3: links/mitte: Probenhalter/Befestigung der Co-60- und Cs-137-Prüfstrahler; rechts: des Am-241-Prüfstrahlers



### 2.1.3 Beladung des typischen Schrottgebindes

Einen Eindruck von dem bei der Füllung des Containers verwendeten Altschrott der Sorte 3 geben die Fotos in Abbildung 2-4. Um eine im Vergleich zum übrigen Schrott gemäß Abbildung 2-4 zu starke Anisotropie der Schrottschüttung zu vermeiden, wurden die Wagonräder aufgrund ihrer Dicke und Flächigkeit (am unteren Rand des oberen Fotos in Abbildung 2-4 zu erkennen) nicht bei der Befüllung verwendet. Gemäß dem AP2.1 [BS 16b] ist bei dem Altschrott der Sorte 3 davon auszugehen, dass das Material u. a. eine Mindestmaterialstärke von 6 mm aufweist und die Abmessungen nicht größer als  $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 150 \text{ cm}$  sind. Bei dem in Abbildung 2-4 gelagerten Material werden diese Rahmenbedingungen eingehalten.

Abbildung 2-4: Schrotthaufen mit Altschrott der Sorte 3 aus dem das Material zur Befüllung des Containers entnommen wurde



Zur Vermeidung von unrealistischen Hohlräumen unterhalb der Probenrohre erfolgte die Befüllung des Containers in zwei separaten Schüttvorgängen. Erst wurden das unterste Probenrohr am Boden und die beiden Probenrohre (Aluminium und Stahl) an der fahrerseitigen Containerwand befestigt. Danach wurde die Schrottladung bis zur mittleren Füllhöhe von ca. 70 cm befüllt und anschließend wurde das mittlere und die obersten Probenrohre befestigt. Abschließend wurde der Container bis zur vorgegebenen Füllhöhe von ca. 130 cm (im Mittel) mit Altschrott der Sorte 3 beladen. In Abbildung 2-5 wird ein Überblick über die einzelnen Schritte des Füllvorgangs gegeben.

Abbildung 2-5: Abbildungen einzelner Schritte des Füllvorgangs



Um eine Aussage über die mittlere Dichte der Schrottladung zu bekommen wurde der LKW mit dem Container vor und nach der Beladung (inklusive Probenrohre und Gestell) gewogen. Hierbei wurden die folgenden Massen ermittelt:

- Leergewicht des LKW mit Container: 19.120 kg
- befüllter Container auf LKW: 37.920 kg
- Nettogewicht des Schrottes: 18.800 kg

Bei dem Nettogewicht des Schrottes mit 18.800 kg wurden die im Container verbauten Stahlrohre sowie die Halterungskonstruktion als Bestandteil der Schrottladung mit berücksichtigt. Die Abmessungen der Schrottschüttung lassen sich zu 600 cm × 240 cm × 130 cm abschätzen was einem Volumen von 18,72 m<sup>3</sup> entspricht. Hieraus lässt sich die mittlere Dichte der Schrottschüttung im Container mit 1,0 g/cm<sup>3</sup> berechnen.

#### 2.1.4 Vergleich des realisierten mit dem ermittelten typischen Schrottgebinde

Im AP1 [BS 16a] wurden im Rahmen der Umfrage die Parameter eines typischen Schrottgebindes abgefragt und die hierbei gesammelten Daten im Rahmen des AP2.1 [BS 16b] ausgewertet. In Tabelle 2-1 sind die Parameter des realisierten Schrottgebindes gemäß Kapitel 2.1.1 und 2.1.2 und die gemäß der Erhebung im Rahmen des AP2.1 [BS 16b] wiedergegeben.

Tabelle 2-1: Vergleich zwischen den ermittelten Parametern einer typischen Schrottschüttung mit den jeweiligen Standardabweichungen und der im Experiment realisierten Schrottschüttung

Parameter	gemäß Erhebung	Experiment
Länge:	595 ± 203 cm	600 cm
Breite:	219 ± 34 cm	240 cm
Höhe:	207 ± 53 cm	260 cm
effektive Füllhöhe	128 ± 62 cm	ca. 130 cm
Nettogewicht:	17,5 ± 8,6 Mg	18,8 Mg
Volumen:	16,72 ± 8,69 m <sup>3</sup>	18,72 m <sup>3</sup>
Dichte*):	1,05 ± 0,5 g/cm <sup>3</sup>	1,00 g/cm <sup>3</sup>
Füllung:	Altschrott Sorte 3	Altschrott Sorte 3
Typ:	Abrollcontainer	Abrollcontainer
Wandstärke:	3,5 mm	3,5 mm

\*): Die Unsicherheit bezüglich der Dichte gemäß Erhebung wurde nur aus der Unsicherheit des Nettogewichtes berechnet.

Bei einem Vergleich zwischen den Parametern des typischen Schrottgebindes aus der Erhebung und dem des Experimentes in Tabelle 2-1 ergibt sich, dass

- es leichte Abweichungen bei der Breite des Containers gibt, die aber durch die Standardabweichung bei der Erhebung abgedeckt werden. Es wird im Rahmen der Auswertung der Experimente darauf eingegangen welchen Einfluss die größere Breite auf die minimal detektierbaren Aktivitäten hat,
- die effektive Länge der Schrottschüttung mit dem der Erhebung übereinstimmt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Container, mit einer Gesamtlänge von ca. 7 m, nur über eine Länge von 6 m befüllt worden ist,

- für beide Gebinde eine effektive Füllhöhe von 130 cm erreicht wurde sowie
- die berechnete mittlere Dichte der realen Schrottschüttung gut mit der mittleren Dichte gemäß der Erhebung übereinstimmt.

Im Rahmen der Standardabweichungen wurde eine gute Übereinstimmung zwischen den in der Umfrage ermittelten Parametern einer typischen Schrottschüttung und der im Experiment realisierten Schrottschüttung erreicht.

## 2.2 Verwendete Prüfstrahler

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurde jeweils ein Co-60-, Cs-137- und Am-241-Prüfstrahler verwendet. Hierbei wurden auf Basis der Simulationen des AP2.1 [BS 16b] die Aktivitäten gemäß Tabelle 2-2 gewählt.

Tabelle 2-2: Aktivitäten der Prüfstrahler

Isotop	Aktivität zum 12.09.2016 [MBq]
Co-60	1,78
Cs-137	12,95
Am-241	0,93

Die in Tabelle 2-2 angegebenen Aktivitäten für die Co-60- und Cs-137-Prüfstrahler wurden gemäß den Ergebnissen der Simulationen des AP2.1 [BS 16b] abdeckend hoch gewählt, um auch bei einer zentralen Positionierung im Schrottgebäude mit einer Portalmeßanlage basierend auf Plastikszintillationsdetektoren erfasst zu werden.

Um für die experimentellen Studien auch Konfigurationen mit niedriger Dosisleistung durchführen zu können wurden Bleiabschirmungen mit einer Wandstärke von 5 mm, 11,25 mm und 16,25 mm verwendet. In Abbildung 2-6 ist die 16,25 mm Bleiabschirmung dargestellt. Diese Bleiabschirmungen wurden aus 1,25 mm starken und aufgerolltem Dachdeckerblei hergestellt. Hieraus ergeben sich zylinderförmige Abschirmungen mit einer Länge von 25 cm. Die Positionierung der Prüfstrahler mittig in der Abschirmung wurde durch eine Halterung sichergestellt.

Abbildung 2-6: Bleiabschirmung (16,25 mm) montiert auf dem Probenmanipulationsstab



Die Untersuchungen mit abgeschirmten Prüfstrahlern entsprechen Untersuchungen mit Prüfstrahlern, die unabgeschirmt die gleiche ODL haben, d. h. die eine niedrigere Aktivität haben. Diese niedrigere Aktivität wird im Folgenden als effektive Aktivität der abgeschirmten Konfigurationen bezeichnet. Die jeweiligen effektiven Aktivitäten  $A_{\text{eff}}$  der abgeschirmten Prüfstrahler wurden über die berechneten ODL-Werte (MicroShield ohne Buildup<sup>1</sup> für anterior-posterior-Geometrie [GRO 09]) in 10 cm Abstand zum Prüfstrahler skaliert. Die berechneten ODL und die daraus resultierenden effektiven Aktivitäten sind in Tabelle 2-3 angegeben. Die Abschirmwirkung des zylinderförmigen Abschirmbehälters nimmt zur Seite hin, aufgrund der längeren Wegstrecke durch das Material, deutlich zu. Die Abweichungen hierdurch sind, bei der hier verwendeten Positionierung des Prüfstrahlers mit Abschirmung innerhalb des Schrottgebindes, gering und können vernachlässigt werden.

Tabelle 2-3: Effektive Aktivitäten  $A_{\text{eff}}$  für die verwendeten Co-60 und Cs-137 Konfigurationen bei einer Bleiabschirmung, berechnet aus der modellierten ODL (10 cm Abstand)

Abschirmung [mm]	Co-60		Cs-137	
	ODL [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	$A_{\text{eff}}$ [MBq]	ODL [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	$A_{\text{eff}}$ [MBq]
0,0	54,00	1,78	100,9	12,95
5,0	39,30	1,30	91,7	11,81
11,25	26,17	0,86	26,38	3,40
16,25	20,60	0,68	14,58	1,88

Die in Tabelle 2-2 angegebene Aktivität des Am-241-Prüfstrahlers ist gemäß den Ergebnissen der Simulationen des AP2.1 [BS 16b] gerade hoch genug gewählt worden, um auch bei einer Positionierung hinter der Containerwand mit einer gemäß AP1 [BS 16a] typischen Portalmessanlage basierend auf Plastiksintillationsdetektoren erfasst zu werden. Um auch experimentelle Studien mit einer geringen effektiven Am-241-Aktivität durchführen zu können, wurden Aluminiumplatten unterschiedlicher Dicke als Abschirmung verwendet. Die jeweiligen effektiven Aktivitäten sind in Tabelle 2-4 über die berechneten ODL-Werte (MicroShield [GRO 09] ohne Buildup) in 10 cm Abstand zum Prüfstrahler skaliert.

Um für Am-241 auch Abschirmungen mit nicht zu hoher Abschirmwirkung praktikabel umsetzen zu können, wurde hier Aluminium (Al) als Abschirmmaterial verwendet. Um die Abschirmwirkung dieser Konfigurationen mit der Abschirmwirkung der Wand des Schrottcontainers in Relation setzen zu können, wird im Folgenden auch die rechnerisch äquivalente Dicke einer Abschirmung aus Eisen (Fe, gleicher ODL-Wert hinter Abschirmung) angegeben. Diese äquivalenten Fe-Abschirmungen werden im Rahmen der Abschätzung der minimalen Detektierbarkeit für den Am-241-Prüfstrahler im Rahmen des Kapitels 3.2.3 herangezogen. In Tabelle 2-4 werden die Ergebnisse zusammen mit den berechneten effektiven Aktivitäten der Konfigurationen aufgeführt. Hierbei wurde keine äquivalente Fe-Abschirmung für eine 0,8 mm starke Al-Abschirmung angegeben.

<sup>1</sup> Der sog. Buildup charakterisiert den Dosisleistungsbeitrag durch niederenergetische Strahlung, die bei Streuprozessen entsteht. Aufgrund der Tatsache, dass sich die abgeschirmten Prüfstrahler innerhalb des Schrottgebindes befinden ist die Berücksichtigung von quellenah entstehender Streustrahlung für die Detektion und damit für die Ableitung der effektiven Aktivität nicht relevant.

Tabelle 2-4: Effektive Aktivitäten  $A_{\text{eff}}$  und äquivalente Fe-Abschirmung für die Am-241-Konfigurationen mit einer Aluminiumabschirmung, berechnet aus der modellierten ODL

Abschirmung [mm]		Am-241	
Al	äquivalente Fe-Abschirmung	ODL für 0,93 MBq [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	$A_{\text{eff}}$ [MBq]
0,0	-	0,65	0,93
0,8	-	0,46	0,73
1,6	0,01	0,38	0,65
9,6	0,07	0,18	0,39
12	0,9	0,16	0,33
16	1,2	0,12	0,26
20	1,5	0,09	0,20

Des Weiteren werden in Tabelle 2-5 noch die im Rahmen der experimentellen Arbeiten gemessenen abstandsabhängigen ODL-Werte für den Co-60- und Cs-137-Prüfstrahler aufgezeigt und mit den Ergebnissen eines Punktstrahlers aus MicroShield-Rechnungen verglichen.

Tabelle 2-5: Abstandsabhängige Dosisleistung der Co-60- und Cs-137-Prüfstrahler ohne Bleiabschirmung gemessen mit einem geeichten Messgerät (ThermoFisher FH 40 G-L10 mit Sonde FHZ 672 E-10)

Abstand [cm]	gemessene Dosisleistung [ $\mu\text{Sv/h}$ ]		berechnete Dosisleistung [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	
	Co-60	Cs-137	Co-60	Cs-137
10	53,4	85,0	54,4	100,8
20	13,5	22,0	13,6	25,2
30	6,2	10,5	6,0	11,2
50	1,9	4,6	2,2	4,2

Aus den Ergebnissen lässt sich gut erkennen, dass die Messwerte gut durch das Strahlenfeld eines Punktstrahlers mit gleicher Aktivität beschrieben werden.

### 2.3 Die Portalmessanlagen auf dem Firmengelände der Hofmann GmbH

Auf dem Gelände der Hofmann GmbH befinden sich zwei Portalmessanlagen der Firma Saphymo Typ RCVL-2. Diese beiden Messanlagen befinden sich jeweils im Einfahrbereich der Ein- und Ausgangswaage zum Firmengelände (siehe Abbildung 2-7), welche in räumlicher Nähe zueinander sind. Jede der Portalmessanlagen besitzt zwei Portale, welche jeweils mit einem 25 Liter Polyvinyltoluol (PVT) Plastiksintillationsdetektoren ausgestattet sind. Die Portale haben einen Abstand von 355 cm zueinander und sind auf einer Höhe von ca. 120 cm über der Fahrbahn montiert. Zur Abschirmung der Untergrundstrahlung sind die Detektoren der Portale auf der fahrbahnabgewandten Seite mit einer 1 cm starken Bleiabschirmung verkleidet.

Abbildung 2-7: Saphymo Portalmeßanlagen auf dem Firmengelände der Hofmann GmbH



Die maximal zulässige Durchfahrgeschwindigkeit beträgt für beide Meßanlagen 10 km/h, diese wurde für die Durchführung der meisten praktischen Arbeiten auf den gemittelten Wert gemäß AP1 [BS 16a] von 6 km/h begrenzt. Im Rahmen der experimentellen Versuche wurde das Anlagenverhalten auch mit höheren Durchfahrgeschwindigkeiten untersucht. Bei jeder Durchfahrt wird die Durchfahrgeschwindigkeit des Fahrzeuges durch eine Lichtschranke gemessen und protokolliert. Hierbei erfolgt die Messung der Geschwindigkeit nur zum Zeitpunkt der Einfahrt in die Portalmeßanlage.

Die technischen Spezifikationen der Saphymo RCVL-2 Portalmeßanlage sind in Tabelle 2-6 zusammengefasst:

Tabelle 2-6: Technische Spezifikationen der Saphymo RCVL-2 Portalmeßanlage

technischen Spezifikation	Saphymo RCVL-2
Detektortyp	Plastik
Material	PVT
Detektierte Strahlung	Gamma
Energereich	45 keV - 3 MeV
Messzeit	100 ms
Sigma-Schwelle zur Alarmauslösung	5 $\sigma$
Unterscheidung von Radionukliden	Nein (Energiebereich spezifische Auswertung in 11 Kanälen)
Volumen eines Portaldetektors [Liter]	25
Detektorfläche je Detektor	0,5 m <sup>2</sup>
Automatische Erkennung von Fahrzeugen	ja
Geschwindigkeitsmessung	ja
Kalibrierung der Hintergrundstrahlung	automatisch
Anzahl Detektoren	2

Diese technischen Spezifikationen sind sehr gut vergleichbar mit den Annahmen des AP2.1 wobei die folgenden Unterschiede zu nennen sind:

- Die Breite der Fahrspur zwischen den Detektoren ist bei der verwendeten Anlage mit 355 cm etwas breiter als die im Rahmen der Simulationen verwendeten 310 cm. Hierdurch ist gemäß der Ergebnisse der theoretischen Berechnungen [BS 16b] eine Erhöhung der minimal detektierbaren Aktivität um ca. 50 % für Co-60- und Cs-137-Prüfstrahler zu erwarten. Diese starke Erhöhung der minimal detektierbaren Aktivität für größere Abstände wird gemäß Kapitel 4.5 des AP2.1 [BS 16b] durch die reduzierte Strahlungsdichte gemäß dem Abstandsquadratgesetz und einer Erhöhung der Untergrundzählrate aufgrund der geringeren Abschirmwirkung des Gebindes herbeigeführt.
- Die Sigma-Schwelle zur Alarmauslösung liegt bei der verwendeten Anlage mit  $5 \sigma$  unterhalb der  $7,5 \sigma$  welche im Rahmen der Simulationen verwendet wurden. Hierdurch ist eine Verringerung der minimal detektierbaren Aktivität um ca. 30 % für Co-60- und Cs-137-Prüfstrahler zu erwarten.
- Das im Rahmen der experimentellen Arbeiten verwendete Schrottgebäude ist mit einer Breite von 240 cm um ca. 20 cm breiter als das im Rahmen der theoretischen Berechnungen [BS 16b] verwendete Gebäude. Durch den größeren Weg den die Strahlung durch das Material zurücklegen muss, ist eine Vergrößerung der minimal detektierbaren Aktivität zu erwarten.
- Das im Rahmen der experimentellen Arbeiten verwendete Schrottgebäude weist gemäß Tabelle 2-1 mit  $1,0 \text{ g/cm}^3$  eine etwas geringere Dichte auf, als das im Rahmen der theoretischen Berechnungen [BS 16b] verwendete Gebäude.
- Bei der verwendeten Anlage wird im Rahmen der Auswertung das Spektrum innerhalb von 11 Kanälen ausgewertet. Im Rahmen der Simulationen wurde das gesamte Spektrum im Bereich von 20 keV bis 3 MeV als ein Kanal ausgewertet.

Es ist zu erwarten, dass der Einfluss einiger der oben genannten Punkte sich im Rahmen der experimentellen Studien ausgleicht. Der Einfluss des letzten Punktes auf die Anlagensensitivität im Vergleich zu den Simulationen lässt sich nur sehr schwierig quantifizieren. Aufgrund der energieabhängigen Auswertung innerhalb von 11 Kanälen ist aber für die experimentellen Untersuchungen mit einer gesteigerten Anlagensensitivität zu rechnen.

### **3. ERGEBNISSE DER EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNGEN**

Im Rahmen dieses Kapitels werden die Ergebnisse der Charakterisierung des Strahlungsuntergrundes auf dem Firmengelände der Hofmann GmbH und die Ergebnisse der Portalmonitormessungen, mit unterschiedlichen Positionen der Prüfstrahler im Schrottgebäude, präsentiert. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und mit den Ergebnissen der theoretischen Berechnungen des AP2.1 [BS 16b] verglichen. Die experimentellen Untersuchungen wurden am 13. und 14. September 2016 durchgeführt.

#### **3.1 Untergrundspektrum**

Um radioaktive Quellen und Gegenstände im Schrottgebäude sicher identifizieren zu können, muss das Signal der Strahlenquelle vom Signal der Untergrundstrahlung als auch dem Detektorrauschen unterschieden werden. Um die theoretischen Berechnungen des AP2.1 [BS 16b] mit den experimentellen Untersuchungen dieses Arbeitspaketes vergleichen zu können, wurde das Untergrundspektrum wie auch seine absolute Höhe im Bereich Portalmeßanlagen genau charakterisiert.

##### **3.1.1 Ortsdosisleistung**

Um eine Aussage über die Ortsdosisleistung (ODL) an den einzelnen Detektoren der Portalmeßanlagen auf dem Betriebsgelände zu erlangen, wurden an diesen, mit einem geeichten Meßgerät (ThermoFisher FH 40 G-L10 mit Sonde FHZ 672 E-10), die Untergrund ODL mittig vor den Detektoren gemessen. Hierbei ergaben sich die ODL-Werte gemäß Tabelle 3-1.

Tabelle 3-1: An den jeweiligen Detektoren gemessene Untergrund ODL

Position	Untergrund ODL [nSv/h]	
	Eingangswaage	Ausgangswaage
Fahrerseitig	45,7 ± 0,5	42,4 ± 0,4
Beifahrerseitig	45,0 ± 0,5	39,5 ± 0,4

Es zeigt sich, dass die mittleren Untergrund ODL im Bereich der Eingangswaage ca. 10 % über den mittleren Werten der Ausgangswaage liegen. Des Weiteren wurde noch die Untergrund ODL stichprobenartig auf dem restlichen Betriebsgelände gemessen, hierbei konnten für größere nicht überbaute Flächen ODL-Werte um die 100 nSv/h festgestellt werden.

Der Tagesmittelwert für die ODL ist gemäß der Umweltüberwachung des BfS für Rastatt (Messstelle in der Innenstadt ca. 2 km vom Werksgelände entfernt) im Jahr 2016 weitgehend konstant und beläuft sich auf Werte knapp unterhalb von 100 nSv/h. Für den Zeitraum der Messungen (13. und 14. September 2016) werden 94 nSv/h und 95 nSv/h als Tagesmittelwerte für die ODL angegeben. Die benachbarten ODL-Stationen im Rheintal zeigen ebenfalls vergleichbare Werte. Die ODL-Werte gemäß der Umweltüberwachung des BfS und auf dem restlichen Betriebsgelände liegen aber deutlich über den an den Detektoren gemessenen ODL-Werten gemäß Tabelle 3-1. Dieser Unterschied kann durch zwei Faktoren erklärt werden:

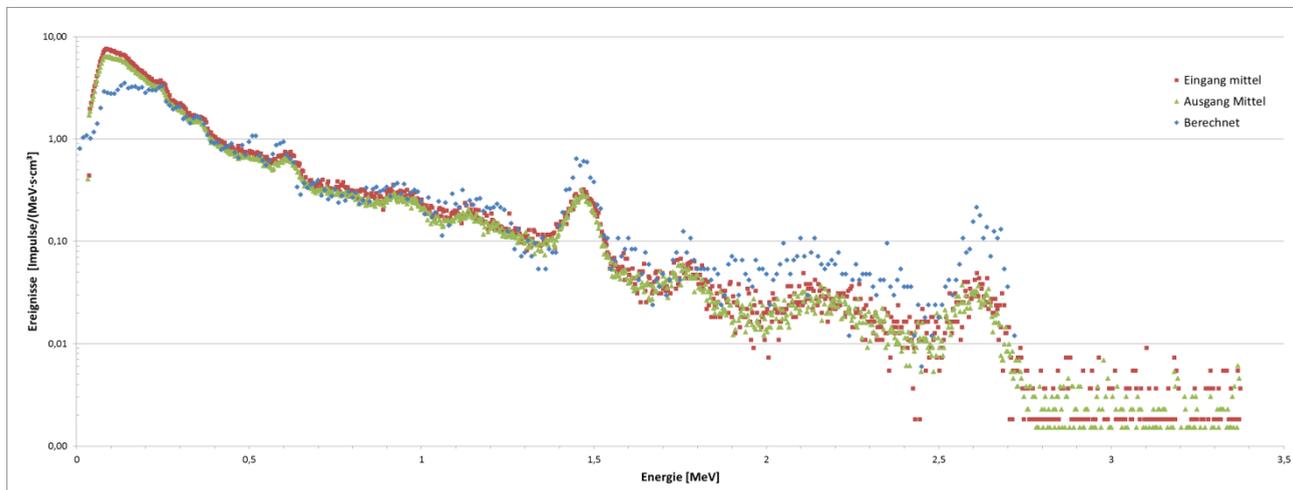
- Die Abschirmung durch das Bleigehäuse verringert die Umgebungsstrahlung.
- Durch die Installation der Waage in die Fahrbahn wurde ein erheblicher Teil des ursprünglichen Erdreiches entfernt und durch Asphalt bzw. Stahlbetonstrukturen ersetzt. Desweiteren befinden sich nun auch viele metallische Komponenten der Waage im Boden.

Die gemäß Tabelle 3-1 an den Detektoren gemessenen Untergrund ODL stimmt gut mit der ODL der Umgebungsstrahlung von 50 nSv/h, welche im Rahmen der Simulationen des AP2.1 [BS 16b] angenommen wurde, überein.

### 3.1.2 Untergrundspektrum mit einem NaI-Detektor

Zusätzlich zu den reinen ODL-Messungen in Abschnitt 3.1.1 wurde das Untergrundspektrum an den einzelnen Detektoren mittels eines NaI-Detektors (Messinstrument: InSpector-1000 mit 3" × 3" NaI Kristall der Firma Canberra) über eine Messzeit von 1.800 s aufgenommen. Die Untergrundspektren wurden ohne einen durchfahrenden LKW aufgenommen. Es wurde aus den beiden Messungen jeder Portalmessanlage jeweils ein gemitteltetes Spektrum für die Ein- und Ausgangswaage gebildet. Diese Untergrundspektren sind in Abbildung 3-1 wiedergegeben. Aufgrund ihrer räumlichen Nähe zeigen beide Portalmessanlagen über den gesamten Energiebereich einen vergleichbaren Verlauf des Spektrums. Der Bereich der Eingangswaage zeigt über den gesamten gemessenen Spektralbereich ein im Mittel um ca. 15 % stärkeres Signal, was gut mit den leicht höheren ODL-Werten an der Eingangswaage in Kapitel 3.1.1 übereinstimmt.

Abbildung 3-1: Vergleich des Untergrundspektrums der experimentellen Arbeiten mit dem aus der Simulation



Neben den experimentell gemessenen Untergrundspektren ist in Abbildung 3-1 auch noch das Untergrundspektrum gemäß der Simulation des AP2.1 [BS 16b] für einen NaI-Detektor dargestellt. Hierbei zeigen sich für die gemessenen Spektren die folgenden Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu dem simulierten Spektrum:

- Deutlich geringeres gemessenes Signal im höherenergetischen Spektrum (bis zu Faktor 3).
- Deutlich höheres gemessenes Signal im niederenergetischen Bereich (bis zu Faktor 4).
- Die Halbwertsbreiten der Gammalinien zeigen zwischen theoretischem und experimentellem Spektrum eine gute Übereinstimmung.

Aus dem Vergleich des simulierten Untergrundspektrums mit dem vor Ort gemessenen lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung des Spektrum-Verlaufs für mittlere Energiebereiche ablesen.

### 3.2 Testmessungen mit Prüfstrahlern

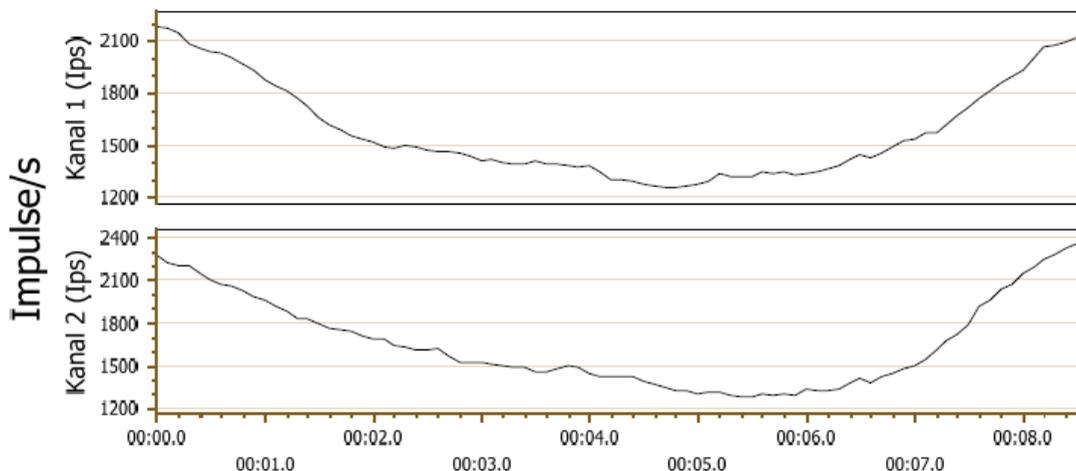
Die Testmessungen wurden gemäß Kapitel 2 immer mit dem gleichen Fahrzeug, welches mit dem typischen Schrottgebilde gemäß Kapitel 2.1 beladen war, durchgeführt. Für jede Position der Prüfstrahler wurden mindestens zwei unabhängige Messungen, eine an der Eingangswaage und eine an der Ausgangswaage, durchgeführt. Die Protokolle der Einzelmessungen befinden sich im Anhang A. In den folgenden Kapiteln sind die Ergebnisse der experimentellen Versuche mit Co-60-, Cs-137- und Am-241-Prüfstrahlern für verschiedene Positionen und Abschirmungen dargestellt. Vor Beginn der Messungen mit positionierten Prüfstrahlern wurde der LKW mit dem typischen Schrottgebilde auf beiden Messsystemen einer Leermessung unterzogen. Hierbei wurde bei keiner der beiden Portalmessanlagen ein Alarm gemeldet (Messprotokoll-ID: 155331 und 198704). Beispielhaft ist in Abbildung 3-2 für eine der Leermessungen das Messprotokoll 155331 dargestellt.

Abbildung 3-2: LKW-Leermessung des mit dem typischen Schrottgebilde gemäß Kapitel 2.1 an der Eingangswaage

#### Durchfahrts ID 155331

Durchfahrtsbeginn: Dat./Zeit 2016-09-13 10:19:15      Dauer: 9 s  
Geschw.: 4 km/h

Kanal	BGR (Ips)	Spektrum (Ips)	Alarmschwelle	Messung	Status
Kanal 1	2485	1259	1438	1259	OK
Kanal 2	2632	1273	1453	1273	OK
Kanal 1+2	5117	2575	2831	2575	OK



An der Leermessung in Abbildung 3-2 ist deutlich die Herabsetzung der Impulszählrate beim Durchfahren des LKW durch die Portalmessanlage zu erkennen. Des Weiteren wird im vorderen Bereich (zwischen 2 und 4 Sekunden Messzeit) des Containers eine höhere Impulszählrate beobachtet als für den hinteren Bereich. Für diesen Bereich ist somit eine geringere Dichte der Ladung zu erwarten.

In Abbildung 3-2 wird mit Kanal 1 und 2 das jeweilige Detektorsignal der beiden Detektoren und mit Kanal 1 + 2 der Summenkanal der beiden Detektorsignale bezeichnet. Hierbei ist nur für die erste Spalte mit dem Hintergrundwert (Background BGR) der Untergrundmessung der Summenkanal identisch mit der Addition der beiden Detektorsignale. Im Folgenden ist kurz beschrieben wie die Werte der Spalten berechnet werden.

- Hintergrundwert (BGR): Der Wert dieser Spalte ist die letzte Impulszählrate der automatischen natürlichen Hintergrunderfassung des jeweiligen Detektors, bevor durch die Lichtschranke der Anlage die Durchfahrt eines Fahrzeugs registriert wird. Für den Summenkanal entspricht der Spaltenwert der Addition beider Kanalwerte.
- Spektrum oder Referenzhintergrund: Der Referenzhintergrund ist der natürliche Hintergrundwert gemäß Spalte 1, welcher durch die abschirmende Wirkung des Fahrzeugs herabgesetzt wird. In der Regel wird durch die Auswertesoftware der niedrigste Wert der gesamten Kurve oder der niedrigste Wert, der einem relevanten Bereich der Kurve zugeordnet ist, als Referenzhintergrund gewählt. Da im Allgemeinen die Kanäle 1 und 2 nicht am gleichen Punkt der Kurve und somit der LKW-Durchfahrt ihre niedrigste Impulszählrate haben, weicht der Referenzhintergrund des Summenkanals (Minimum der addierten Werte von Kanal 1 und 2) von der Summe beider Referenzhintergründe ab; dieses ist auch für die Messung in Abbildung 3-2 der Fall.
- Alarmschwelle: Als Alarmschwelle wird die Impulszählrate bezeichnet, ab der das Vorhandensein von radioaktiver Strahlung über dem Untergrundlevel nachgewiesen werden kann. Diese Alarmschwelle wird von der Auswertesoftware unter Verwendung eines Algorithmus<sup>2</sup> berechnet, welcher für die einzelnen Energiebereiche (im Falle der hier untersuchten Anlage sind es 11 Kanäle; vergleiche Kapitel 2.3) den Verlauf der Impulszählrate beim Durchfahren des LKWs analysiert und vergleicht, welche Abweichungen für die einzelnen Energiebereiche zulässig sind.
- Messung: Diese Spalte gibt im Falle einer Detektion die Impulszählrate für den jeweiligen Alarm an.

Da die eigentliche Auswertung des Detektorsignales über den Signalverlauf und die Hintergrunderfassung der einzelnen 11 Energiekanäle erfolgt, ist anzumerken, dass die angegebenen Werte nur Kennzahlen für die jeweilige Messung darstellen.

### 3.2.1 Messungen mittels Co-60-Prüfstrahler

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden an verschiedenen Positionen innerhalb des typischen Schrottgebindes der Co-60-Prüfstrahler eingebracht. Eine Übersicht über die einzelnen Positionen mit den Ergebnissen der Messungen ist in Tabelle 3-2 wiedergegeben. Eine erfolgreiche Detektion des Prüfstrahlers im linken-, rechten- oder Summenkanal (E1, E2 und ES bzw. A1, A2 und AS) mit anschließender Alarmierung ist in Tabelle 3-2 durch einen Haken wiedergegeben. Hierbei ist der Summenkanal die Summe des Signals aus dem linken und rechten Kanal. Des Weiteren ist die Durchfahrtsgeschwindigkeit für die jeweilige Messung angegeben.

---

<sup>2</sup> Der Algorithmus zur Bestimmung der Alarmschwelle ist Eigentum der Sayphymo GmbH und kann hier daher nicht weiter beschrieben werden.

Tabelle 3-2: Übersicht über die Alarmer der Portalmessanlagen bei verschiedenen Versuchskonfigurationen mit dem Co-60-Prüfstrahler. Positionen der Prüfstrahler beziehen sich auf das jeweilige Rohr und die Tiefe im Gebinde (Vorne, Mitte und Hinten) gemäß Kapitel 2.1.2

Position	Nr.	effektive Aktivität [MBq]	Eingangswaage					Ausgangswaage				
			Mess-ID	Detektion			Gesch. [km/h]	Mess-ID	Detektion			Gesch. [km/h]
				E1	E2	ES			A1	A2	AS	
3V	1	1,78	155340	✓		✓	4	198721	✓		✓	4
3M	2	1,78	155345	✓		✓	9	198729	✓		✓	7
3H	3	1,78	155348	✓		✓	4	198733	✓		✓	6
1V	4	1,78	155356	✓	✓	✓	2	198738	✓	✓	✓	4
1M	5	1,78	155361		✓	✓	5	198746		✓	✓	4
1H	6	1,78	155363	✓		✓	7	198750	✓		✓	7
6V	7	1,78	155365	✓		✓	6	198759	✓		✓	15
6M	8	1,78	155367				4	198763				4
6M	9	1,78	155369		✓		2	198764				4
6H	10	1,78	155374				3	198768				4
4V	11	1,78	155389	✓	✓	✓	5	198794	✓	✓	✓	8
4M	12	1,78	155391		✓	✓	3	198800		✓	✓	10
4H	13	1,78	155393		✓	✓	5	198802		✓	✓	5
4 door	14	1,78	155397	✓	✓	✓	4	198806	✓	✓	✓	5
1V	15	0,86	155402	✓	✓	✓	3	198811	✓	✓	✓	6
1M	16	0,86	155411	✓			4	198819	✓		✓	5
1H	17	0,86	155417	✓		✓	4	198829	✓			10
1V	18	0,68	155602	✓		✓	4	199112	✓		✓	2
1M	19	0,68	155607				5	199117				4
1H	20	0,68	155613	✓			4	199125				7
1H	21	0,68	155615	✓			1	199126				2
1H	22	0,68	155617				2	199127	✓		✓	1
4H	23	0,68	155622			✓	3	199132				4
4H	24	0,68	155625				2	199137				5
4M	25	0,68	155630		✓	✓	3	199142		✓	✓	2
4V	26	0,68	155637	✓	✓	✓	3	199147	✓	✓	✓	2

Aus den Ergebnissen in Tabelle 3-2 lässt sich für den ungeschirmten Co-60-Prüfstrahler (Messungen 1 bis 14) erkennen, dass es

- im Rahmen der Messungen 1 bis 3 für alle Positionen des Probenrohres 3, aufgrund seiner randnahen Position, ausschließlich im fahrerseitigen und Summen-Detektorkanal zu einem Alarm kam.
- im Rahmen der Messungen 4 bis 6 für das zentrale Probenrohr 1, je nach Position des Prüfstrahlers, zu einer Detektion der Strahlung in unterschiedlichen Kanälen kam. Hierbei konnte der Prüfstrahler auch bei einer mittigen Positionierung detektiert werden. Die abwechselnde bzw. gleichzeitige Detektion des Prüfstrahlers in den unterschiedlichen Kanälen kann auf lokale Dichteschwankungen innerhalb des Gebindes zurückgeführt werden.

- im Rahmen der Messungen 7 bis 10 für das unterste Probenrohr 6 im mittleren und unteren Bereich zu einer sehr schlechten Detektion mit nur einem ausgewiesenen Alarm kam. Diese Detektion erfolgte auch nur bei einer sehr langsamen Durchfahrtsgeschwindigkeit des LKWs. Somit ist für diese Position bereits die minimale detektierbare Aktivität erreicht. Die deutlich geringere Anzahl an Detektionen beim Probenrohr 6 deutet darauf hin, dass aufgrund der zu erwartenden Gebindeanisotropie im unteren Bereich des Gebindes eine lokal höhere Dichte vorliegt.
- im Rahmen der Messungen 11 bis 13 für das Probenrohr 4 eine verstärkte Detektion im beifahrerseitigen Detektorkanal zu beobachten ist. Dieses Detektionsverhalten ist aufgrund der Nähe des Probenrohres 4 zum beifahrerseitigen Detektor auch zu erwarten.
- Des Weiteren wurde im Rahmen der Messung 14 noch eine Messung mit einer Position des Prüfstrahlers direkt hinter der Containertür durchgeführt. Hierbei kam es bei beiden Anlagen zu einem Alarm in allen Kanälen.

Für die Messungen 15 bis 17 mit einem 11,25 mm Blei abgeschirmten Co-60-Prüfstrahler (0,86 MBq) ist aus Tabelle 3-2 ersichtlich, dass es im Vergleich zum unabgeschirmten Co-60-Prüfstrahler für die Position 1 zu unterschiedlichen Detektionen kam. Dieses kann auch an einer etwas abweichenden Positionierung des Prüfstrahlers innerhalb des Gebindes liegen. Insgesamt kann aber aufgrund des fehlenden Summenkanalalarms bei den Messungen 16 und 17 für den 11,25 mm Blei abgeschirmten Co-60-Prüfstrahler von einer schwächeren Detektion im Vergleich zum unabgeschirmten Co-60-Prüfstrahler ausgegangen werden, dies ist auch aus den Messprotokollen im Anhang 1 ersichtlich.

Aus Tabelle 3-2 ist für den mit 16,25 mm Blei abgeschirmten Co-60-Prüfstrahler (0,68 MBq) ersichtlich, dass es

- im Rahmen der Messung 19 für die mittlere Position im Probenrohr 1 an beiden Anlagen zu keinem Alarm kam. Für die beiden anderen Positionen ist eine deutlich schwächere Detektion im Vergleich zum 11,25 mm Blei abgeschirmten Co-60-Prüfstrahler ersichtlich. Dieses Alarmverhalten deutet auch auf eine geringere Dichte im vorderen Bereich des Schrottgebindes hin.
- im Rahmen der Messungen 23 bis 26 für das Probenrohr 4 zu einer deutlichen Reduktion der Alarme im Vergleich zum unabgeschirmten Co-60-Prüfstrahler kam. Für die hintere Position konnte der Co-60-Prüfstrahler nur noch bei einer Durchfahrt detektiert werden.

Insgesamt konnte der mit 16,25 mm Blei abgeschirmte Co-60-Prüfstrahler (0,68 MBq) bei vielen Messungen in mittleren Probenrohren (19, 22 und 24) in keinem Kanal mehr detektiert werden.

Zur Definition der Spanne der minimal detektierbaren Aktivität eines Co-60-Prüfstrahlers wird der Bereich zwischen der niedrigsten detektierbaren Aktivität und der höchsten nicht detektierbaren Aktivität aller Messungen (H, V und M) der Probenrohre 1, 4 und 6 herangezogen. Hierbei sind diese Bereiche wie folgt definiert:

- Höchste nicht detektierte Aktivität: Gibt den höchsten Aktivitätswert für ein Probenrohr an, bei welcher es für beide Portalmessanlagen und unter Berücksichtigung aller Positionierungen (H, V und M) zu keinem Alarm gekommen ist.
- Niedrigste detektierte Aktivität: Gibt den niedrigsten Aktivitätswert für ein Probenrohr an, bei welcher es für beide Portalmessanlagen und unter Berücksichtigung aller Positionierungen (H, V und M) zu einem Alarm gekommen ist.

Die für diesen Bereich relevanten Messungen und Aktivitäten sind in Tabelle 3-3 zusammengefasst.

Tabelle 3-3: Ermittelte Bandbreite der minimal detektierbaren Aktivität für den Co-60-Prüfstrahler

Probenrohr	höchste nicht detektierte Aktivität [MBq]	niedrigste detektierte Aktivität [MBq]
1	0,68	0,86
4	0,68	1,78
6	1,78	1,78

Hieraus ergibt sich für die experimentell bestimmte minimal detektierbare Co-60-Aktivität eine Bandbreite von ca. 0,7 bis 2 MBq. Dieses Ergebnis wird im Rahmen des Kapitels 3.3 mit den theoretisch berechneten Werten des AP2.1 [BS 16b] verglichen.

### 3.2.2 Messungen mittels Cs-137-Prüfstrahler

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurde der Cs-137-Prüfstrahler an verschiedene Positionen innerhalb des typischen Schrottgebundes eingebracht. Eine Übersicht über die einzelnen Positionen mit den Ergebnissen der einzelnen Testmessungen ist in Tabelle 3-4 wiedergegeben. Eine erfolgreiche Detektion des Prüfstrahlers im linken-, rechten- oder Summenkanal (E1, E2 und ES bzw. A1, A2 und AS) mit anschließender Alarmierung ist in Tabelle 3-4 durch einen Haken wiedergegeben. Hierbei ist der Summenkanal die Summe des Signals aus dem linken und rechten Kanal. Des Weiteren ist die Durchfahrtsgeschwindigkeit für die jeweilige Durchfahrt angegeben.

Tabelle 3-4: Übersicht über die Alarmer der Portalmessanlagen bei verschiedenen Versuchskonfigurationen mit dem Cs-137-Prüfstrahler. Positionen der Prüfstrahler beziehen sich auf das jeweilige Rohr und die Tiefe im Gebinde (Vorne, Mitte und Hinten).

Position	Nr.	effektive Aktivität [MBq]	Eingangswaage					Ausgangswaage				
			Mess-ID	Detektion			Gesch. [km/h]	Mess-ID	Detektion			Gesch. [km/h]
				E1	E2	ES			A1	A2	AS	
1V	1	12,95	155437	✓	✓	✓	3	198853	✓	✓	✓	5
1V	2	12,95	155438	✓	✓	✓	4	198854	✓	✓	✓	5
1M	3	12,95	155441		✓	✓	4	198858		✓	✓	5
1H	4	12,95	155445	✓	✓	✓	4	198862	✓		✓	3
6V	5	12,95	155446	✓		✓	8	198869	✓	✓	✓	7
6M	6	12,95	155450		✓	✓	4	198873	✓	✓	✓	8
6H	7	12,95	155453	✓	✓	✓	5	198878		✓	✓	5
1V	8	3,40	155486	✓	✓	✓	2	198934	✓	✓	✓	4
1M	9	3,40	155489	✓		✓	3	198937	✓			3
1H	10	3,40	155493	✓			5	198944	✓			5
1V	11	1,88	155555	✓		✓	3	199028	✓		✓	4
1M	12	1,88	155557				3	199031				3
1M	13	1,88	155559				4	199033				2
1H	14	1,88	155560				3	199038				3
1 door	15	1,88	155561	✓		✓	5	199043	✓		✓	4
6V	16	1,88	155563	✓			4	199045	✓		✓	6
6V	17	1,88	155564	✓		✓	2	199046			✓	4
6V	18	1,88	155565	✓			3	199047			✓	4
6M	19	1,88	155573				2	199055				4
6H	20	1,88	155577				4	199063				5
4H	21	1,88	155580				6	199067				5
4M	22	1,88	155589		✓	✓	4	199076		✓	✓	4
4V	23	1,88	155597		✓	✓	5	199091	✓	✓	✓	4

Aus Tabelle 3-4 ist für den unabgeschirmten Cs-137-Prüfstrahler ersichtlich, dass es im Rahmen der Messungen 1 bis 7 für alle Positionen der beiden zentral im Gebinde befindlichen Probenrohre 1 und 6 zu Alarmen in unterschiedlichen Detektorkanälen kam. Aufgrund der beidseitigen Detektion des Cs-137-Prüfstrahlers ist somit für die Aktivität eine weitere Betrachtung von wandnahen Positionen nicht nötig.

Im Rahmen der Messungen 8 bis 10 ist aus Tabelle 3-4 ersichtlich, dass es für den mit 11,25 mm Blei abgeschirmten Cs-137-Prüfstrahler für alle Positionen zu einer Detektion im Probenrohr 1 kommt. Insgesamt kann, aufgrund des teilweise fehlenden Summenkanalalarms bei den Messungen 9 und 10 für den 11,25 mm Blei abgeschirmten Cs-137-Prüfstrahler von einer schwächeren Detektion im Vergleich zum unabgeschirmten Cs-137-Prüfstrahler ausgegangen werden. Dies ist auch aus den geringeren Impulsraten für diese Messungen anhand der Messprotokolle im Anhang 1 ersichtlich.

Aus Tabelle 3-4 ist für den mit 16,25 mm Blei abgeschirmten Cs-137-Prüfstrahler ersichtlich, dass

- im Rahmen der Messungen 12 bis 14 sowie 19 und 20 für die mittlere und hintere Position innerhalb der beiden zentralen Probenrohre 1 und 6 an beiden Anlagen kein Alarm ausgewiesen wurde.
- es im vorderen Bereich der Probenrohre 1 und 6 noch zu einer Detektion kommt. Dieses deutet auf eine geringere lokale Dichte im vorderen Bereich des Schrottgebindes hin.
- für das Probenrohr 4, aufgrund seiner geometrischen Anordnung, zu einer verstärkten Detektion im beifahrerseitigen Detektorkanal kam.

Aus den oben beschriebenen Befunden lässt sich ableiten, dass die beiden zentral im Gebinde befindlichen Probenrohre 1 und 6 für eine mittlere Positionierung unter Berücksichtigung der Bleiabschirmung gemäß Kapitel 2.2 minimal detektierbare Aktivitäten von ca. 2 MBq zeigen.

Zur Definition der Spanne der minimal detektierbaren Aktivität eines Cs-137-Prüfstrahlers wird der Bereich zwischen der niedrigsten detektierbaren Aktivitäten und der höchsten nicht detektierbaren Aktivität aller Messungen (H, V und M) der Probenrohre 1, 4 und 6 herangezogen. Die für diesen Bereich relevanten Messungen und Aktivitäten sind in Tabelle 3-7 zusammengefasst.

Tabelle 3-5: Ermittelte Bandbreite der minimal detektierbaren Aktivität für den Cs-137-Prüfstrahler

Probenrohr	höchste nicht detektierte Aktivität [MBq]	niedrigste detektierte Aktivität [MBq]
1	1,88	3,44
4	1,88	12,95
6	1,88	12,95

Hieraus ergibt sich für die experimentell bestimmte minimal detektierbare Cs-137-Aktivität eine Bandbreite von ca. 2 bis 3 MBq. Aufgrund der wenigen Durchläufe mit 3,44 MBq, kann die Unsicherheit dieser Bandbreite an der oberen Aktivitätsgrenze als relativ groß angesehen werden. Dieses Ergebnis wird in Kapitel 3.3 mit den theoretisch berechneten Werten des AP2.1 [BS 16b] verglichen.

### 3.2.3 Messungen mittels Am-241-Prüfstrahler

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurde der Am-241-Prüfstrahler an verschiedene Positionen innerhalb des typischen Schrottgebindes eingebracht. Eine Übersicht über die einzelnen Positionen mit den Ergebnissen der einzelnen Testmessungen ist in Tabelle 3-6 wiedergegeben. Eine erfolgreiche Detektion des Prüfstrahlers im linken, rechten oder Summenkanal (E1, E2 und ES bzw. A1, A2 und AS) mit anschließender Alarmierung ist in Tabelle 3-6 durch einen Haken wiedergegeben. Hierbei ist der Summenkanal die Summe des Signals aus linkem und rechtem Kanal. Des Weiteren ist die Durchfahrtsgeschwindigkeit für die jeweilige Durchfahrt angegeben.

Tabelle 3-6: Übersicht über die Alarmer der Portalmessanlagen bei verschiedenen Versuchskonfigurationen mit dem Am-241-Prüfstrahler

Position	effektive Aktivität [MBq]	Mess-ID	Eingangswaage				Gesch. [km/h]	Mess-ID	Ausgangswaage			Gesch. [km/h]
			Detektion			A1			A2	AS		
			E1	E2	ES							
1V	0,93	155497				3	198953				4	
1V	0,93	155499				1	198957				1	
Außen	0,93	155513	✓		✓	3	198970	✓		✓	4	
Außen <sup>1)</sup>	0,93	155516		✓	✓	5	198979		✓	✓	4	
Außen <sup>1)</sup>	0,93	155517		✓	✓	7	198983		✓	✓	4	
Innenwand	0,93	155537	-	-	-	-	199009				4	
Innenwand	0,93	155538				4	199012				3	
Innenwand	0,93	155540				1	-	-	-	-	-	
Außen	0,73	155641	✓		✓	3	199153	✓		✓	3	
Außen	0,65	155644	✓		✓	4	199158	✓		✓	5	
Außen	0,39	155649	✓		✓	3	199166	✓		✓	4	
Außen	0,33	155651	✓		✓	2	199175	✓		✓	3	
Außen	0,26	155654	✓		✓	3	199177	✓			3	
Außen	0,20	155655	✓		✓	2	199181				4	
Außen	0,20	155656				1	199183	✓			3	
Außen	0,20	155657	✓		✓	4	199185				4	

1) Durchfahrtrichtung geändert.

Aus Tabelle 3-6 ist für den unabschirmten Am-241-Prüfstrahler ersichtlich, dass es

- innerhalb des Aluminiumprobenrohres und innerhalb des Abrollcontainers (Position 1V und Innenwand) zu keinem Alarm in einem der Kanäle der Portalmessanlage gekommen ist sowie
- bei einer Positionierung des Prüfstrahlers außerhalb des Gebindes zu einem Alarm für den Kanal der jeweiligen Seite und des Summenkanals kommt.

Aus diesen Ergebnissen ist ersichtlich, dass die abschirmende Wirkung einer 3,5 mm starken Gebindewand aus Stahl alleine ausreichend groß ist um eine Detektion des Am-241-Strahlers zu unterdrücken.

Um Informationen über die minimale detektierbare Am-241-Aktivität zu erhalten, wurden gemäß Tabelle 3-6 Aluminiumabschirmungen verschiedener Dicke über dem an der Außenwand des Gebindes befestigten Am-241-Prüfstrahler angebracht. Für die unterschiedlichen Abschirmdicken sind gemäß Tabelle 3-6 ab einer Aluminiumstärke von 20 mm erste Unterdrückungen des Anlagenalarms zu beobachten. Dies ist ein Maß für die Anlagensensitivität auf die 60 keV Gammalinie des Am-241-Zerfalls.

Im Folgenden wird auf Basis der experimentellen Daten eine Abschätzung der minimal detektierbaren Am-241-Aktivität an der Innenwand des Gebindes durchgeführt. Gemäß Tabelle 2-4 ist für 0,93 MBq Am-241 in 10 cm Abstand bei einer Aluminiumabschirmung von 20 mm eine ODL von 0,09 µSv/h messbar. Um diese ODL bei einer 3,5 mm starken Eisenabschirmung zu erzeugen, wird basierend auf den MicroShield-Rechnungen gemäß Tabelle 2-4, eine Am-241-Aktivität von 4,5 MBq benötigt.

Diese Ergebnisse weichen von den theoretischen Berechnungen [BS 16b] der minimalen Am-241-Aktivität an der Innenwand des Gebindes ab. Diese Abweichungen könnten an unterschiedlichen Materialstärken des Detektorgehäuses liegen.

### 3.3 Diskussionen und Vergleich mit den Werten aus der theoretischen Betrachtung

Aus den experimentellen Versuchen mit einem typischen Schrottgebäude unter realen Messbedingungen wurden für die Co-60- und Cs-137-Prüfstrahler in den zentralen Positionen 1 und 6 die in Tabelle 3-7 zusammengefassten minimal detektierbaren Aktivitäten erhalten. Des Weiteren wurden die aus den experimentellen Daten extrapolierten minimal detektierbaren Aktivitäten für einen Am-241-Prüfstrahler an der Innenwand des Gebindes (Materialstärke von 3,5 mm Stahl) in Tabelle 3-7 angegeben. Die Unsicherheiten auf die durch Extrapolation bestimmte minimal detektierbare Aktivität von Am-241 kann als recht hoch angesehen werden, da Schwankungen der Materialstärke der Gebindevand und des Detektorgehäuses einen großen Einfluss auf die minimal detektierbare Am-241-Aktivität haben.

Tabelle 3-7: Vergleich der theoretisch und experimentell ermittelten minimal detektierbaren Aktivitäten

Nuklid	Minimal detektierbare Aktivitäten [MBq]	
	Experiment	Theorie [BS 16b]
Co-60	0,7 bis 2	0,76 bis 2,06
Cs-137	2 bis 3	2,76 bis 10,27
Am-241 <sup>*)</sup>	ca. 4,5 <sup>**)</sup>	0,93

<sup>\*)</sup> Position an Innenwand des Gebindes.

<sup>\*\*)</sup> Diese Aktivität wurde aus den experimentellen Daten extrapoliert.

Aus dem Vergleich der Ergebnisse der experimentellen und theoretischen Studien [BS 16b] zeigt sich eine gute Übereinstimmung für die Co-60- und Cs-137-Prüfstrahler. Für diese Radionuklide bewegt sich die experimentell minimal detektierbare Aktivität jeweils unterhalb des niedrigsten Wertes, welcher gemäß theoretischer Berechnung vorhergesagt wurde. Ein Grund für die gesteigerte Anlagensensitivität gegenüber den theoretischen Berechnungen kann an der energieabhängigen Auswertung innerhalb von 11 Kanälen der Saphymo-Portalmessanlage liegen.

Aufgrund der guten Übereinstimmung zwischen den experimentell und theoretisch berechneten minimal detektierbaren Aktivitäten für die Co-60- und Cs-137-Prüfstrahler kann davon ausgegangen werden, dass die im Rahmen der theoretische Studien [BS 16b] beobachteten Effekte wie:

- Einfluss der Untergrundstrahlung,
  - Abstandabhängige Abnahme der Anlagensensitivität,
  - Ortsaufgelöster Photonenfluss außerhalb des Schrottgebindes sowie
  - Einführung einer effektiven Dichte zur Beschreibung der Gebindeanisotropie
- auch auf das reale Gebinde übertragen werden können.

Wie bereits durch die theoretischen Untersuchungen im Arbeitspunkt AP2.1 [BS 16b] bekannt, variiert die minimal detektierbare Aktivität, aufgrund von lokalen Dichteschwankungen, deutlich mit der kleinräumigen Positionierung der Aktivität. Diese experimentellen Arbeiten zeigen, dass der Stand der Technik bei Portalmonitoren auf Basis von Plastiksintillationsdetektoren geeignet ist,

radioaktive Quellen und Gegenstände im Stahlschrott mit harten Gammastrahlen aufzufinden. Für Co-60 und Cs-137 liegen gemäß Tabelle 3-7 die sicher detektierbaren Aktivitäten bei ca. 2 MBq bzw. ca. 10 MBq. Unter günstigen Verhältnissen können auch deutlich kleinere Aktivitäten detektiert werden.

#### 4. BEWERTUNG DER FOLGEN DES EINSCHMELZENS EINER STRAHLENQUELLE

In diesem Kapitel soll bewertet werden, welche strahlenschutztechnischen und wirtschaftlichen Konsequenzen das Einschmelzen von Strahlenquellen für einen Schmelzbetrieb haben kann, wenn Aktivitäten im Grenzbereich der Detektion eingeschmolzen werden.

Gemäß § 71 Abs. 2 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) wird unter folgenden Rahmenbedingungen von einem radioaktiven Fund gesprochen: „*Wer*

*1. radioaktive Stoffe findet oder*

*2. ohne seinen Willen die tatsächliche Gewalt über radioaktive Stoffe erlangt oder*

*3. die tatsächliche Gewalt über radioaktive Stoffe erlangt hat, ohne zu wissen, dass diese Stoffe radioaktiv sind,*

*hat dies der atomrechtlichen Aufsichtsbehörde oder der für die öffentliche Sicherheit oder Ordnung zuständigen Behörde unverzüglich mitzuteilen, sobald er von der Radioaktivität dieser Stoffe Kenntnis erlangt. Satz 1 gilt nicht, wenn die Aktivität der radioaktiven Stoffe die Werte der Anlage III Tabelle 1 Spalte 2 oder 3 nicht überschreitet“.*

Im Rahmen dieser Definition von Fund und Erlangung der tatsächlichen Gewalt einer radioaktiven Strahlenquelle wird im Folgenden das versehentliche Einschmelzen einer Strahlenquelle behandelt. Konservativ wird bei diesen Berechnungen von einem Einschmelzvorgang mit insgesamt 10 Mg Stahlschrott ausgegangen.

Es konnte im Rahmen des Kapitels 3.3 gezeigt werden, dass durch eine einfache Messung auf Radioaktivität mit einer typischen Portalmessanlage an einem typischen Schrottgebilde Co-60- und Cs-137-Aktivitäten von ca. 2 MBq und 10 MBq, an der zentralen Position erfasst werden können. Diese Aktivitätsangaben beziehen sich auf die ungünstigste Aktivität aus den theoretischen Berechnungen gemäß Tabelle 3-7.

##### 4.1 Einschmelzen einer 2 MBq Co-60-Strahlenquelle

Bei dem unbeabsichtigten Einschmelzen einer 2 MBq Co-60-Strahlenquelle ist gemäß [RP 117] davon auszugehen, dass nahezu 100 % der Ausgangsaktivität in der Schmelze, 1 % in die Schlacke und 5 % in den Filterstaub verbleiben. Hieraus ergibt sich die in Tabelle 4-1 präsentierte Aktivitätspartitionierung in unterschiedliche Fraktionen.

Tabelle 4-1: Aktivitätsseparation beim Einschmelzen einer 2 MBq Co-60-Strahlenquelle mit 10 Mg Stahlschrott

Fraktion	Gesamtaktivität [MBq]	spezifische Aktivität bei 10 Mg [Bq/g]
Schmelze	2,0	0,2
Schlacke	0,02	0,10 *)
Filterstaub	0,010	0,66 *)

\*) Hierbei wurde gemäß [RP 117] eine Bildungsrate von 1,5 kg/Mg für Filterstaub und 20 kg/Mg für Schlacke verwendet

Gemäß § 71 Abs. 2 StrlSchV handelt es sich, bezogen auf die spezifische- und Gesamtaktivität in der Schlacke und dem Staub unter Berücksichtigung der Freigrenze gemäß Anlage III Tabelle 1 Spalte 2 und Spalte 3 StrlSchV, um keinen Fund eines radioaktiven Stoffes.

Die Gesamtaktivität in der Schmelze überschreitet zwar die Freigrenze gemäß Anlage III Tabelle 1 Spalte 2 StrlSchV für Co-60 von 100 kBq, die Freigrenze für die spezifische Aktivität gemäß Anlage III Tabelle 1 Spalte 3 StrlSchV von 10 Bq/g für Co-60 wird aber unterschritten. Daher führt das Einschmelzen einer 2 MBq-Strahlenquelle mit den oben angegebenen Rahmenbedingung nicht zu einem Fund gemäß § 71 Abs. 2 StrlSchV.

Auch wenn es sich um keinen Fund gemäß § 71 Abs. 2 StrlSchV handelt, ist davon auszugehen, dass dem betroffenen Unternehmen Kosten entstehen, insbesondere da ein Verkauf des Stahls mit einer spezifischen Co-60 Aktivität von 0,2 Bq/g durch privatwirtschaftliche Regelungen praktisch unmöglich gemacht wird (vgl. AP1 [BS 16a]). Weitere Kosten können insbesondere durch Strahlenschutzmaßnahmen, wie der Dekontamination der Anlage, Entsorgungskosten und Ausfallzeiten entstehen. Es ist aber auch für kleinere Betriebe nicht zu erwarten, dass die Kosten eine existenzgefährdende Höhe erreichen. In dem Fall, dass das unbeabsichtigte Einschmelzen nicht bemerkt wird, ist von einer Exposition von Personen der allgemeinen Bevölkerung auszugehen. Da es für jedes Material entweder die Freigrenze gemäß Anlage III Tabelle 1 Spalte 2 StrlSchV oder die Freigrenze gemäß Anlage III Tabelle 1 Spalte 3 StrlSchV unterschritten werden, ist von einer Gefährdung der Gesundheit dieser Personen nicht auszugehen.

#### **4.2 Einschmelzen einer 10 MBq Cs-137-Strahlenquelle**

Beim unbeabsichtigten Einschmelzen einer 10 MBq Cs-137-Strahlenquelle ist gemäß [RP 117] davon auszugehen, dass 1 ‰ der Ausgangsaktivität in der Schmelze, 1 % in die Schlacke und nahezu 100 % in dem Filterstaub verbleiben. Hieraus ergibt sich die in Tabelle 4-2 präsentierte Aktivitätspartitionierung in unterschiedliche Fraktionen.

Tabelle 4-2: Aktivitätsverteilung beim Einschmelzen einer 10 MBq Cs-137-Strahlenquelle mit 10 Mg Stahlschrott

<b>Fraktion</b>	<b>Gesamtaktivität [MBq]</b>	<b>spezifische Aktivität bei 10 Mg [Bq/g]</b>
Schmelze	0,010	0,001
Schlacke	0,10	0,5 *)
Filterstaub	10,0	666,6 *)

\*) Hierbei wurde gemäß [RP 117] eine Bildungsrate von 1,5 kg/Mg für Filterstaub und 20 kg/Mg für Schlacke verwendet

Gemäß § 71 Abs. 2 StrlSchV handelt es sich, bezogen auf die spezifische- und Gesamtaktivität in der Schmelze unter Berücksichtigung der Freigrenze gemäß Anlage III Tabelle 1 Spalte 2 und Spalte 3 StrlSchV [SSV 16] von 10 kBq bzw. 10 Bq/g für Cs-137, um keinen Fund eines radioaktiven Stoffes. Die Gesamtaktivität in der Schlacke überschreitet die Cs-137-Freigrenze, die Freigrenze für die spezifische Aktivität gemäß Anlage III Tabelle 1 Spalte 3 StrlSchV [SSV 16] von 10 Bq/g für Cs-137 wird aber unterschritten. Diese Fraktionen sind daher nicht als Fund gemäß § 71 Abs. 2 StrlSchV zu betrachten.

Für den Filterstaub führt dieses Szenario zu einer Überschreitung gemäß Anlage III Tabelle 1 Spalte 2 und Spalte 3 StrlSchV, daher sind diese Materialien gemäß § 71 Abs. 2 StrlSchV der Behörde als Fund zu melden und entsprechend zu entsorgen. In diesem Szenario wurde rechnerisch der bei einem Einschmelzvorgang entstandene Filterstaub, d. h. 15 kg betrachtet. In der Realität ist von einer (unbeabsichtigten) Vermischung mit Filterstaub von früheren Einschmelzvorgängen auszugehen. Unterstellt man hier eine (unbeabsichtigte) Vermischung mit 1 Mg Filterstaub (z. B. in einem Sammelbehälter), so wird die Anlage III Tabelle 1 Spalte 3 StrlSchV gerade erreicht. Unabhängig von einer unbeabsichtigten Vermischung ist die Masse von 1 Mg für die Anwendung der Freigrenzen gemäß Anlage III Tabelle 1 Spalte 3 StrlSchV als sinnvolle Mittelungsmasse zu betrachten.

Wie im Fall des Einschmelzens einer Co-60-Strahlenquelle ist von erheblichen Kosten für den betroffenen Betrieb auszugehen. Es ist auch für kleinere Betriebe nicht zu erwarten, dass die Kosten eine existenzgefährdende Höhe erreichen.

In dem Fall, dass das unbeabsichtigte Einschmelzen nicht bemerkt wird, ist von einer Exposition von Personen der allgemeinen Bevölkerung auszugehen. Da es für jedes Material entweder die Freigrenze gemäß Anlage III Tabelle 1 Spalte 2 StrlSchV oder die Freigrenze gemäß Anlage III Tabelle 1 Spalte 3 StrlSchV unterschritten bzw. auf einer angemessenen Mittelungsmasse gerade erreicht wird, ist von einer Gefährdung der Gesundheit dieser Personen nicht auszugehen.

### **4.3 Einschmelzen einer Am-241-Strahlenquelle**

Gemäß den Ergebnissen der MicroShield-Berechnungen für ein homogenes Schrottgebilde der Dichte  $1,09 \text{ g/cm}^3$  wurde bei den theoretischen Berechnungen des AP2.1 (vergleiche Kapitel 4.4.6 in [BS 16b]) für eine Am-241-Strahlenquelle in zentraler Position mit einer Aktivität von ca. 7 TBq eine Detektionswahrscheinlichkeit von 100 % bei einer einmaligen Messung hergeleitet. Eine unbeabsichtigt eingeschmolzene Strahlenquelle in dieser Größenordnung ist in jedem Fall als Fund nach § 71 Abs. 2 StrlSchV anzusehen. Diese genannte Detektionsgrenze ist aber nur für eine nicht abgeschirmte Strahlenquelle gültig, so dass in der Praxis mit deutlich höheren Aktivitäten gerechnet werden muss.

Die Detektion einer Am-241-Strahlenquelle ist aufgrund der niederenergetischen Gammastrahlung im Rahmen einer nur auf der Detektion von Gammastrahlung basierenden Überwachung des Schrottstroms grundsätzlich problematisch [MERK 13]. Das versehentliche Einschmelzen einer solchen Strahlenquelle kann grundsätzlich durch die Überwachung der Schlacke nachgewiesen werden, worin sich Am-241 gemäß [RP 117] zu 100 % separiert.

Da mit dem Messprinzip passive Detektion von Gammastrahlung mit einer LKW-Portalmessanlage eine Verhinderung von Funden nach § 71 Abs. 2 StrlSchV technisch nicht möglich ist, wird in Bezug auf die Verbesserung der Detektion vom Am-241 auf die Diskussion alternativer Messprinzipien in AP3, insbesondere auf die Detektion von Neutronenstrahlen verwiesen.

### **4.4 Zusammenfassung der Folgen des Einschmelzens einer Strahlenquelle**

Aus den obigen Betrachtungen zeigt sich, dass bei einem Einschmelzvorgang von insgesamt 10 Mg Stahlschrott das versehentliche Einschmelzen eines Co-60- und Cs-137-Prüfstrahlers, welche eine Aktivität von jeweils 2 MBq und 10 MBq aufweisen, je nach Nuklid unterschiedliche Konsequenzen

zen hat. Wie in diesem Kapitel gezeigt, stellt das unbeabsichtigte Einschmelzen einer Strahlenquelle im Bereich der o. g. detektierbaren Aktivitäten zwar keine Gefährdung der Gesundheit von Personen der allgemeinen Bevölkerung aber doch eine Strahlenexposition dar, die vermieden werden sollte, wenn dies mit verhältnismäßigen Maßnahmen möglich ist. Ebenso stellt der hier diskutierte Fall für die betroffenen Betriebe zwar keine existenzgefährdende Situation aber immer noch eine erhebliche finanzielle Belastung dar. Im folgenden Kapitel 5 sollen Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie die Auffindbarkeit radioaktiver Quellen und Gegenstände im Stahlschrott verbessert werden kann.

Wie oben dargestellt, wird in Bezug auf die Verbesserung der Detektion von Am-241-Quellen auf die Diskussion alternativer Messprinzipien in AP3, insbesondere auf die Detektion von Neutronenstrahlen, verwiesen.

## **5. VERBESSERUNG DER AUFFINDBARKEIT RADIOAKTIVER QUELLEN**

### **5.1 Aktueller Stand der Technik in Bezug auf Portalmonitore**

Im Rahmen der Umfrage des AP1 [BS 16a] wurde die Ausstattung der deutschen Schrottplätze und Schmelzbetriebe mit Portalmonitoren oder ähnlichen Messeinrichtungen erhoben. Hierbei wurde u. a. ermittelt, dass Portalmonitore der deutschen Schrott- und Schmelzbetrieben ein mittleres Detektorvolumen von 2,1 Liter (auf Basis von NaI) und 50 Liter (auf Basis von Plastik) aufweisen. Der Detektorabstand beider Portale beträgt typisch ca. 310 cm für eine Straßenzufahrt. Dieser aktuelle Stand der Messtechnik ist, gemäß den Ergebnissen des AP1 [BS 16a], vergleichbar mit den vorgeschriebenen technischen Anforderungen in anderen europäischen Ländern wie Belgien und den Niederlanden. Dieser Stand wird im Folgenden als „Stand der Technik“ bezeichnet.

Wie in Kapitel 3 gezeigt, ist der Stand der Technik geeignet, radioaktiven Quellen und Gegenständen mit Nukliden, die harte Gammastrahlen aussenden, im Stahlschrott aufzufinden. Für Co-60 und Cs-137 liegen die sicher detektierbaren Aktivitäten bei ca. 2 MBq bzw. ca. 10 MBq. Unter günstigen Verhältnissen können auch deutlich kleinere Aktivitäten detektiert werden.

Wie in Kapitel 3 ebenfalls gezeigt, ist es bei der Detektion von Nukliden ohne harte Gammalinien, wie z. B. Am-241, nicht möglich alle radioaktiven Quellen und Gegenstände im Stahlschrott zu detektieren, die im Falle eines unbeabsichtigten Einschmelzens zu Funden gemäß § 71 Abs. 2 StrlSchV führen können. Aufgrund des Messprinzips sind hier die Optimierungsmöglichkeiten begrenzt. In Bezug auf die Optimierung wird daher auf die Diskussion alternativer Messprinzipien in AP3 verwiesen und die Diskussion im Folgenden auf die Auffindbarkeit von Co-60 und Cs-137 fokussiert.

Wie in Kapitel 4 gezeigt, stellt das unbeabsichtigte Einschmelzen einer Strahlenquelle im Bereich der o. g. detektierbaren Aktivitäten zwar keine Gefährdung der Gesundheit von Personen der allgemeinen Bevölkerung aber doch eine Strahlenexposition dar, die vermieden werden sollte, wenn dies mit verhältnismäßigen Maßnahmen möglich ist. Desweiteren stellt der hier diskutierte Fall für die betroffenen Betriebe zwar keine existenzgefährdende Situation dar aber dennoch eine erhebliche finanzielle Belastung.

### **5.2 Übersicht der Optimierungsmöglichkeiten in Bezug auf Portalmonitore**

Es wurden im Rahmen einer Vortrages des BfS [MERK 13] technische und organisatorische Möglichkeiten zur Verbesserung der Auffindbarkeit von radioaktiven Quellen und Gegenständen im Stahlschrott aufgezeigt. Zudem wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens im AP2.1 [BS 16b] zusätzliche technische und organisatorische Möglichkeiten zur Verbesserung der Auffindbarkeit von radioaktiven Quellen und Gegenständen im Stahlschrott aufgezeigt. Diese Optimierungsvorschläge werden zuerst in diesem Kapitel mit anderen Verbesserungsvorschlägen gesammelt und anschließend in den folgenden Kapiteln diskutiert und bewertet. Im Folgenden sind mögliche Optimierungsvorschläge nach technischen und organisatorischen Themen gegliedert.

### **Technische Optimierungsvorschläge**

- a) Erhöhung der messtechnischen Abdeckung der Schrottgebände,
- b) Positionierung der Detektoren näher am Gebinde,
- c) Verbesserungen der Messtechnik und Auswertung in Bezug auf Portalmessanlagen sowie
- d) Maßnahmen zur Reduktion des Untergrundes.

### **Organisatorische Optimierungsvorschläge**

- e) Erhöhung der Messhäufigkeit an Ein- und Ausgangsmonitoren,
- f) Erhöhung der Anzahl an Messungen bei betrieblichen Abläufen welche bereits eine Vereinzelnung von Schrott beinhalten,
- g) Messungen mit optimierter Beladung der Schrottgebände sowie
- h) Sensibilisierung und Aufklärung der Mitarbeiter von Schrott- und Einschmelzbetrieben bezüglich der Erkennung und dem Umgang bei Fund von radioaktiven Quellen und Gegenständen.

Diese Optimierungsvorschläge werden im Folgenden bewertet, ob sie mit verhältnismäßigem Aufwand zu einer Verbesserung der Auffindbarkeit von radioaktiven Quellen und Gegenständen im Stahlschrott führen. Dabei wird nicht danach unterschieden, für welchen Beteiligten die Kosten auftreten und welcher Beteiligter von der Maßnahme profitiert. Es wird ebenfalls nicht betrachtet, ob (und wenn ja an welcher Stelle) zur Umsetzung der Optimierungsvorschläge die Änderung oder Erweiterung gesetzlichen oder untergesetzlichen Regelwerks sinnvoll ist.

## **5.3 Bewertung der Optimierungsvorschläge**

### **5.3.1 Vorschlag a) Erhöhung der messtechnischen Abdeckung der Schrottgebände**

#### **Beschreibung der Maßnahmen**

Im Rahmen der theoretischen Arbeiten des AP2.1 [BS 16b] wurde festgestellt, dass aus einem Gebinde mit realer Anisotropie, die radioaktive Strahlung der Strahlenquelle nicht homogen über die Außenflächen des Gebindes austritt, sondern dass lokal begrenzte Bereiche einen deutlich erhöhten Photonenfluss aufweisen. Der Bereich, in dem die effizienteste Detektion möglich ist, ist dabei nicht notwendigerweise der Bereich, der der Strahlenquelle am nächsten ist. Eine Erhöhung der messtechnischen Abdeckung der Außenflächen erhöht daher die Wahrscheinlichkeit, den Bereich, in dem die effizienteste Detektion möglich ist, mit abzudecken und verringert damit die minimal detektierbare Aktivität.

#### **Bewertung der Maßnahmen**

Diese Maßnahme sollte in dem Rahmen umgesetzt werden, wie sie auch technisch sinnvoll zu realisieren ist. So sind z. B. Messungen unterhalb des Transportgebindes technisch nur schwer durchführbar und aufgrund der höheren Abschirmung durch Teile des Fahrzeugs ineffizient. Im Rahmen des AP2.1 [BS 16b] konnte ferner gezeigt werden, dass Messungen mit Plastiksintillationsdetektor die oberhalb des Messgebindes durchgeführt werden, aufgrund der höheren Untergrundzählrate, eine geringere Sensitivität aufweisen. Ebenso ist hier eine Positionierung des Detektors nahe am Messgut nur schwer zu realisieren.

Die Kosten für solch eine Maßnahme sind je nach verwendetem Detektormaterial und dem Zeitpunkt der Umsetzung sehr unterschiedlich:

- Es ist zu erwarten, dass für einen Plastiksintillationsdetektor, der gemäß aktuellem Stand der Technik ein Detektorvolumen je Portal von 25 Liter und einer Oberfläche von 0,5 m<sup>2</sup> besitzt, eine sehr gute Abdeckung des Messgutes allein schon durch eine vertikale Ausrichtung des Messpaneels erreicht werden kann (vgl. Abbildung 2-7).
- Für Portalmonitore auf NaI-Basis ist zur Erreichung einer ausreichenden messtechnischen Abdeckung, aufgrund der jeweils geringeren Detektorvolumen, eine Erhöhung der Anzahl von Detektoren zu erwarten. Die Mehrkosten hierfür skalieren im Wesentlichen mit der Anzahl an benötigten Detektoren.

Da ein Auswechseln der Detektoren in den meisten Fällen nicht mit vertretbarem Aufwand möglich ist, muss diese Maßnahme bereits bei der Installation einer Portalmessanlage berücksichtigt werden.

Aus messtechnischer Sicht wäre eine geringe Abdeckung unter der Unterkante des Schrottgebundes als auch oberhalb der Oberkante des Füllstands durch Detektormaterial wünschenswert. Im Fall eines typischen Schrottgebundes würde dies eine Gesamthöhe des Detektors von ca. 2 m und im Vergleich zu den aktuell üblichen Portalmonitoren eine Verdopplung der Gesamthöhe bedeuten. Aufgrund der lokal begrenzten Bereiche mit erhöhtem Photonenfluss würde eine segmentierte Ausführung der Detektoren die Anlagensensitivität erheblich steigern, allerdings würden aufgrund der zusätzlichen erforderlichen Hardware wie Photomultiplier die Kosten erheblich steigen.

### **Empfehlung**

Im Fall einer ohnehin notwendigen Neuanschaffung einer Anlage sehen wir die Mehrkosten für Detektoren mit einer geeigneten Abdeckung des typischen Füllstands als verhältnismäßig an. Detektoren ober- und unterhalb des Schrottgebundes sind im Allgemeinen nicht sinnvoll.

Da der Stand der Technik bereits eine gute Auffindbarkeit gewährleistet, sehen wir einen Austausch von Anlagen nach dem aktuellen Stand der Technik im Allgemeinen nicht als notwendig an.

### **5.3.2 Vorschlag b) Positionierung der Detektoren näher am Gebinde**

#### **Beschreibung der Maßnahmen**

Im Rahmen der theoretischen Arbeiten des AP2.1 konnte gezeigt werden, dass die Platzierung der Detektoren näher am Gebinde die Effizienz der Detektion (Abstandsquadratgesetz und bessere Abschirmung des Detektors durch das Schrottgebäude) erhöht und damit die minimal detektierbare Aktivität von radioaktiven Quellen und Gegenständen im Stahlschrott verringert.

#### **Bewertung der Maßnahmen**

Diese Maßnahme kann bei der Neuanschaffung einer Portalmessanlage einfach umgesetzt werden, hierbei sind praktisch keine Mehrkosten zu erwarten. Dabei sind insbesondere Beschränkungen durch den Arbeitsschutz (wie z. B. Quetschschutz) zu berücksichtigen.

Bei bestehenden Anlagen sind deutlich höhere Kosten aufgrund anfallender Umbaumaßnahmen zu erwarten.

### **Empfehlung**

Im Fall einer Neuanschaffung einer Anlage sollten die Detektorpositionen der Anlage so nah wie möglich, insbesondere unter Berücksichtigung des Arbeitsschutzes, am Gebinde realisiert werden.

Einen Umbau von Anlagen nach dem aktuellen Stand der Technik sehen wir nicht als notwendig an.

### **5.3.3 Vorschlag c) Verbesserungen der Messtechnik und Auswertung in Bezug auf Portal-messanlagen**

#### **Beschreibung möglicher Maßnahmen**

Im Rahmen dieser Studie wurde gezeigt, dass die Detektion von radioaktiven Quellen und Gegenständen mit Nukliden mit harten Gammastrahlern im Stahlschrott mit Portalmessanlagen nach dem Stand der Technik auch bei ungünstigen Ausgangsbedingungen, d. h. zentraler Position im Gebinde, möglich ist.

Grundsätzlich kann durch Wahl anderer Detektormaterialien (z. B. Germanium-Halbleiterdetektor), Detektionsverfahren (z. B. Detektion von Neutronen), Bauprinzipien (z. B. segmentierte Detektoren) oder Auswerteverfahren (z. B. Optimierung der Alarmkriterien) eine verbesserte Detektion erreicht werden.

#### **Bewertung möglicher Maßnahmen**

Eine Verbesserung der aktuellen Messtechnik durch andere Detektionsmaterialien oder Bauprinzipien über den aktuellen Stand der Messtechnik hinaus ist zur Zeit für industrielle Anwendungen nur mit erheblichen Mehrkosten (um mindestens eine Größenordnung) erreichbar. Diese Möglichkeiten sind daher zur Zeit nicht verhältnismäßig. Die Bewertung anderer Detektionsverfahren erfolgt in diesem Forschungsvorhaben im Rahmen des AP3.

Im Allgemeinen ist es bei der Neuanschaffung einer Anlage als verhältnismäßig anzusehen, Anlagen mit dem Stand der Technik in Bezug auf die Auswerteverfahren zu beschaffen.

### **Empfehlung**

Da der Stand der Technik bereits eine gute Auffindbarkeit gewährleistet, sehen wir für die Detektion von Nukliden mit harter Gammastrahlung die Verwendung von Portalmonitoren auf dem jetzigen Stand der Technik als angemessen an.

Diese Einschätzung sollte jedoch grundsätzlich überprüft werden, wenn sich der Stand der Messtechnik oder die Kosten für alternative Messverfahren deutlich geändert haben.

### **5.3.4 Vorschlag d) Maßnahmen zur Reduktion des Untergrundes**

#### **Beschreibung der Maßnahmen**

Im Rahmen der theoretischen Arbeiten des AP2.1 [BS 16b] konnte gezeigt werden, dass die Anlagensensitivität bei Portalmessanlagen durch eine erhöhte Untergrundstrahlung stark reduziert wird. Zur Reduzierung der Untergrundstrahlung am Detektor werden hier daher zwei verschiedenen Maßnahmen diskutiert:

- Abschirmung der Untergrundstrahlung durch Bleiabschirmungen o. ä. an den Detektoren oder

- Austausch von Erdreich im Bereich der Portalmessanlage durch Material mit geringer Aktivität (insbesondere in Regionen mit erhöhter terrestrischer Untergrundstrahlung oder bei vorhandenen Materialien mit erhöhten Aktivitäten natürlicher Nuklide).

Diese Untergrundreduktion kann sowohl für Plastik- als auch NaI-Portalmessanlagen zu einer verbesserten Anlagensensitivität führen.

### **Bewertung der Maßnahmen**

Für Portalmessanlagen, die noch nicht mit einer Bleiabschirmung o. ä. ausgestattet sind ist eine Nachrüstung im Allgemeinen als einfach durchführbar und die Kosten hierfür sind als gering zu bewerten. Insbesondere führt es bereits zu einer deutlichen Reduktion des Untergrunds, im Rückraum der Portalmessanlage ein 1 bis 2 cm starkes Stahlblech zu montieren. Diese Maßnahme ist sowohl für Portalmessanlagen auf Basis von Plastik- als auch NaI-Detektormaterial empfehlenswert.

Um eine deutliche Reduktion des Untergrunds zu erreichen ist ein Austausch von ca. 10 - 30 cm Bodenmaterial erforderlich. Die Auffüllung kann z. B. aus Recyclingmaterial geringer Untergrundstrahlung und einer Asphaltdecke bestehen.

Der Austausch des Erdreiches im Bereich der Portalmessanlage ist aufgrund der umfangreichen Erdarbeiten mit erheblichen Kosten verbunden. Daher ist diese Maßnahme nur für die Installation von Neuanlagen und für Betriebe in denen Erdarbeiten im Bereich der Portalmessanlage anstehen (z. B. Austausch der LKW-Waage) empfehlenswert.

### **Empfehlung**

Portalmessanlagen sollten mit einer Abschirmung zur Untergrundreduktion versehen sein. Hier ist, wenn dieses technisch möglich ist, auch eine Nachrüstung bestehender Anlagen zu empfehlen.

Ein Austausch von Untergrundmaterial bei Bestandsanlagen wird nicht als verhältnismäßig angesehen. Bei der Neuinstallation oder dem Umbau von Anlagen ist im Einzelfall zu prüfen, ob hier Maßnahmen verhältnismäßig sind.

## **5.3.5 Vorschlag e) Erhöhung der Messhäufigkeit an Ein- und Ausgangsmonitoren**

### **5.3.5.1 Beschreibung der Maßnahmen**

Im Rahmen der theoretischen Arbeiten des AP2.1 [BS 16b] wurde festgestellt, dass für das typische Schrottgebäude eine Co-60-Strahlenquelle mit ca. 2 MBq in zentraler Position minimal detektiert werden kann. Für Positionen weiter vom Zentrum entfernt ist eine exponentielle Abnahme der minimal detektierbaren Aktivität bis zu ca. 9 kBq für wandnahe Positionen zu beobachten.

Die Wahrscheinlichkeit der Detektion von radioaktiven Quellen und Gegenständen im Stahlschrott steigt mit der Anzahl von Umfüll- und Messvorgängen und kann theoretisch gemäß der Ergebnisse des AP2.1 [BS 16b], durch eine unendliche Anzahl von Messungen, auf 9 kBq für Co-60- und 18 kBq für Cs-137-Strahlenquellen gesenkt werden. In diesem Abschnitt wird daher abgeschätzt, wie sich Maßnahmen zur Erhöhung der Anzahl der Messungen nach einem Umfüllvorgang auf die integrale minimale Detektierbarkeit einer herrenlosen Strahlenquelle im Stahlschrott auswirken.

### 5.3.5.2 Bewertung der Maßnahmen

Zur Berechnung der Detektionswahrscheinlichkeit verschiedener Quellstärken im typischen Schrottgebäude, welche eine beliebige Quellenposition bei mehreren Umfüll- und Messvorgängen berücksichtigt, wird das typische Schrottgebäude (mittlere Dichte 1,05 g/cm<sup>3</sup>) gemäß den Ergebnissen des AP2.1 [BS 16b] als homogenes Schrottgebäude mittels einer von der jeweiligen Photonenenergie der Strahlenquelle abhängigen effektiven Dichte  $\rho_{\text{eff}}$  beschrieben.

Es wird zusätzlich angenommen, dass die Strahlenquelle sich nach jedem Umfüllvorgang an einer willkürlichen Quellenposition mittig entlang der halben Breite des Gebäudes befindet. Im Rahmen der MCNP-Simulationen des AP2.1 [BS 16b] wurde berechnet, dass im Zentrum des typischen Schrottgebäudes minimale Co-60- und Cs-137-Aktivitäten  $A_{\text{max}}$  von jeweils ca. 2 MBq bzw. 10 MBq mit einem Plastiksintillationsdetektor noch detektierbar sind.

Um Aussagen über die minimal detektierbare Aktivität  $A_i(t)$  bei einer zufälligen Quellenpositionierung entlang der Breite des Gebäudes zu bekommen, wurde angenommen, dass an der Detektorposition der gleiche Photonenfluss wie bei der minimal detektierbaren Aktivitäten  $A_{\text{max}}$  im Zentrum des typischen Schrottgebäudes vorliegt. Dieser Sachverhalt wird durch die Gleichung (G 5-1) wiedergegeben:

$$A_i(t) \cdot \frac{e^{-\rho_{\text{eff}} \cdot \mu \cdot (1-t) \cdot r_0}}{((1-t) \cdot r_0 + r_a)^2} = A_{\text{max}} \cdot \frac{e^{-\rho_{\text{eff}} \cdot \mu \cdot r_0}}{(r_0 + r_a)^2} \quad (\text{G 5-1})$$

In der obigen Gleichung entspricht  $t$  einer Zufallszahl zwischen 0 und 1, welche die relative Quellenposition entlang der Breite des Gebäudes zu einer Seite angibt,  $r_0$  entspricht den 110 cm zwischen zentraler Quellenposition und der Gebäudewand und  $r_a$  den 45 cm Abstand zwischen Gebäudewand und Detektorposition. Die Massenschwächungskoeffizienten  $\mu$  wurden für die Co-60-, Cs-137- und Am-241-Strahlung mit 0,0535, 0,077 und 1,25 cm<sup>2</sup>/g gemäß [NIST 04] verwendet. Gleichung (G 5-2) aufgelöst nach  $A_i(t)$  ergibt eine Abschätzung für die minimal detektierbare Aktivität für beliebige Quellenposition in einem typischen Schrottgebäude:

$$A_i(t) = A_{\text{max}} \cdot e^{-\rho_{\text{eff}} \cdot \mu \cdot t \cdot r_0} \cdot \left(1 - t \cdot \frac{r_0}{r_0 + r_a}\right)^2 \quad (\text{G 5-2})$$

Als effektive Dichte  $\rho_{\text{eff}}$  des typischen Schrottgebäudes wurde im Rahmen des AP2.1 [BS 16b] für die Co-60- und Cs-137-Gammastrahlung Werte von 0,61 bzw. 0,49 g/cm<sup>3</sup> ermittelt. Für unterschiedliche Gammastrahler berücksichtigt diese von 1,05 g/cm<sup>3</sup> abweichende Dichte, das unterschiedliche Absorptionsverhalten bei einer anisotropen realen Dichteverteilung. Bei der Berechnung gemäß (G 5-3) wird die Ausdehnung des Detektors im Raum und die Länge des Containers vernachlässigt.

Um Aussagen über die Wahrscheinlichkeitsverteilung der detektierbaren Aktivitäten in einem typischen Gebäude in Abhängigkeit von der Anzahl der Umfüll- und Messvorgänge zu bekommen, wurde für 25.000 Gebäude der (Mehrfach-)Umfüllvorgang simuliert. Hierbei wurde für jeden der einzelnen Umfüllvorgänge die relative Quellenposition  $t$  per Zufallsvariable neu bestimmt und hierfür die jeweilige minimal detektierbare Aktivität  $A_i(t)$  berechnet. Bei Mehrfachmessungen entspricht die minimal detektierbare Quellstärke im Gebäude dem kleinsten Wert für  $A_i(t)$  aus einer entsprechenden Anzahl an simulierten Umfüllvorgängen. Aus der Gesamtheit der 25.000 Simulati-

onen lässt sich, über die kumulierte Häufigkeitsverteilung der Simulationsergebnisse, die Detektionswahrscheinlichkeit für verschiedene Quellstärken bei beliebiger Positionierung im Gebäude bestimmen.

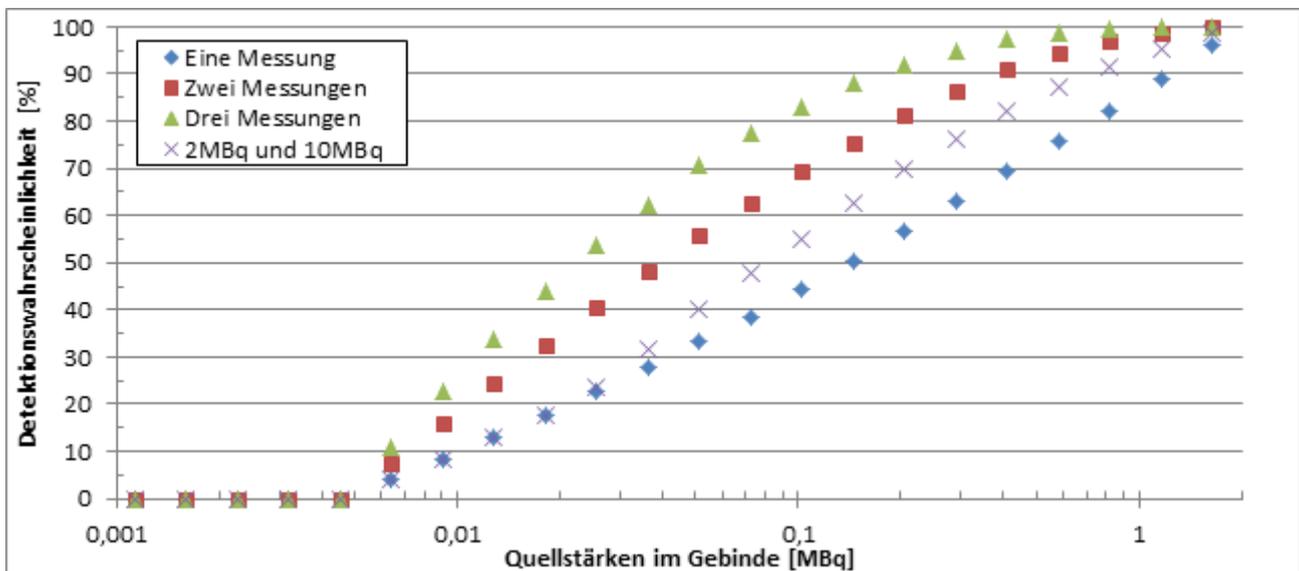
Bei diesen Simulationen wird ausschließlich auf die Ergebnisse aus den theoretischen Berechnungen des AP2.1 [BS 16b] zurückgegriffen. Ein Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen gemäß Kapitel 3 wird bei der Interpretation der Simulationsergebnisse (s. Kapitel 5.3.5.4) durchgeführt.

### 5.3.5.3 Simulationsergebnisse

#### 5.3.5.3.1 Detektion einer Co-60-Strahlenquelle

In Abbildung 5-1 ist die kumulierte Häufigkeit für die Detektionswahrscheinlichkeit verschiedener Co-60-Aktivitäten dargestellt. Sofern nicht anders angegeben, wurde gemäß den Ergebnissen des AP2.1 [BS 16b] für die Co-60-Strahlenquelle eine minimal detektierbare Aktivität  $A_{\max}$  von 2 MBq bei einer einmaligen Messung angenommen. Dies bedeutet, dass solch eine Strahlenquelle mit einer Detektionswahrscheinlichkeit von 100 % (auch zentral im Gebäude) gefunden wird.

Abbildung 5-1: Detektionswahrscheinlichkeit verschiedener Co-60-Aktivitäten bei zufälliger Positionierung im Gebäude, abhängig von der Anzahl der Umfüll- und Messvorgänge und der Anlagensensitivität mit einer minimal detektierbaren Aktivität  $A_{\max}$  von 2 MBq. Mit (2 MBq und 10 MBq) wird die Detektionswahrscheinlichkeit für einen Vorgang von zwei Messungen an unterschiedlichen Anlagen mit minimal detektierbaren Aktivitäten von 2 MBq und 10 MBq dargestellt.



Aus Abbildung 5-1 ist ersichtlich, dass durch das mehrmalige Umschütten und Messen des Stahlschrottes eine deutliche Verbesserung der Detektionswahrscheinlichkeit einer Co-60-Strahlenquelle erreicht werden kann. Bei einer einmaligen Messung liegt die 95 % Detektionswahrscheinlichkeit bei ca. 1,6 MBq. Diese verbessert sich durch ein oder zwei weitere Umfüllvorgänge mit jeweiliger Neumessung auf ca. 0,6 bzw. 0,3 MBq. Aufgrund der geometrischen Randbedingungen, welche durch den Abstand des Detektors zum Gebäude bestimmt werden, ist gemäß Gleichung (G 5-4) bei

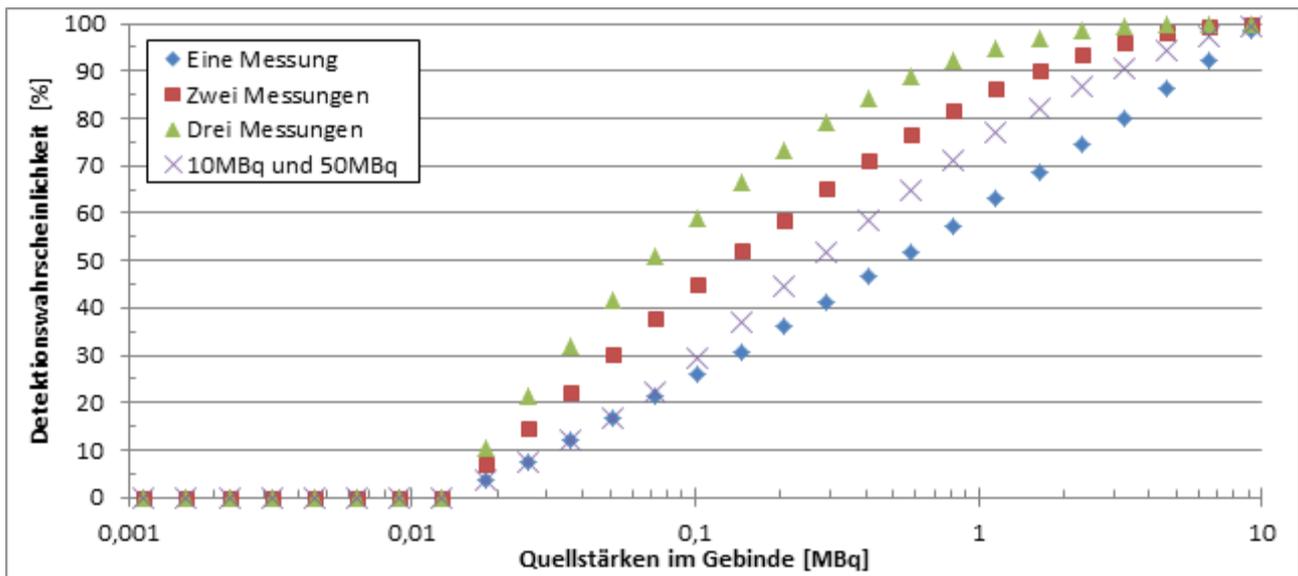
Wiederholungsmessungen keine Verbesserung der Detektion unterhalb einer Aktivitätsschwelle von ca. 6 kBq möglich. Im Rahmen der theoretischen Berechnungen des AP2.1 [BS 16b] wurde, für die wandnahe Position im Rahmen der MCNP-Simulationen, eine minimal detektierbare Co-60-Aktivität von ca. 9 kBq bestimmt. Diese beiden Werte zeigen eine gute Übereinstimmung.

Unter realen Bedingungen kann nicht davon ausgegangen werden, dass alle Portalmessanlagen mit der gleichen Co-60-Anlagensensitivität von 2 MBq arbeiten. In Abbildung 5-1 ist daher die Detektionswahrscheinlichkeit für zwei Messungen an unterschiedlichen Anlagen, die eine minimal detektierbare Aktivität  $A_{\max}$  für die Co-60-Strahlenquelle von jeweils 2 MBq und 10 MBq (5-mal der minimalen Detektionsgrenze) aufweisen, dargestellt. Für solch ein Messszenario liegt die 95 % Detektionswahrscheinlichkeit bei ca. 1,1 MBq. Dieser Wert ist im Vergleich zu den 0,6 MBq bei zwei optimalen Portalmessanlagen etwas höher, er zeigt aber im Vergleich zu einer durchgeführten Messung mit 2 MBq immer noch eine deutliche Reduktion der 95 % Detektionswahrscheinlichkeit für eine Co-60-Strahlenquelle. Hierbei ist für solch eine Messkonfiguration gegenüber der einfachen Messung (vergleiche Abbildung 5-1) eine Verbesserung der Detektionswahrscheinlichkeit für Strahlenquellen höherer Aktivität zu beobachten.

#### 5.3.5.3.2 Detektion einer Cs-137-Strahlenquelle

In Abbildung 5-2 ist die kumulierte Häufigkeit für die Detektionswahrscheinlichkeit verschiedener Cs-137-Aktivitäten dargestellt. Sofern nicht anders angegeben, wurde gemäß den Ergebnissen des AP2.1 [BS 16b] für eine Cs-137-Strahlenquellen eine minimal detektierbare Aktivität  $A_{\max}$  von 10 MBq bei einer einmaligen Messung angenommen. Diese bedeutet, dass solch eine Strahlenquelle mit einer Detektionswahrscheinlichkeit von 100 % (auch zentral im Gebinde) gefunden wird.

Abbildung 5-2: Detektionswahrscheinlichkeit verschiedener Cs-137-Aktivitäten bei zufälliger Positionierung im Gebinde, abhängig von der Anzahl der Umfüll- und Messvorgänge und der Anlagensensitivität mit einer minimal detektierbare Aktivität  $A_{\max}$  von 10 MBq. Mit (10 MBq und 50 MBq) wird auch noch die Detektionswahrscheinlichkeit für einen Vorgang von zwei Messungen an unterschiedlichen Anlagen mit minimal detektierbaren Aktivitäten von 10 MBq und 50 MBq dargestellt.



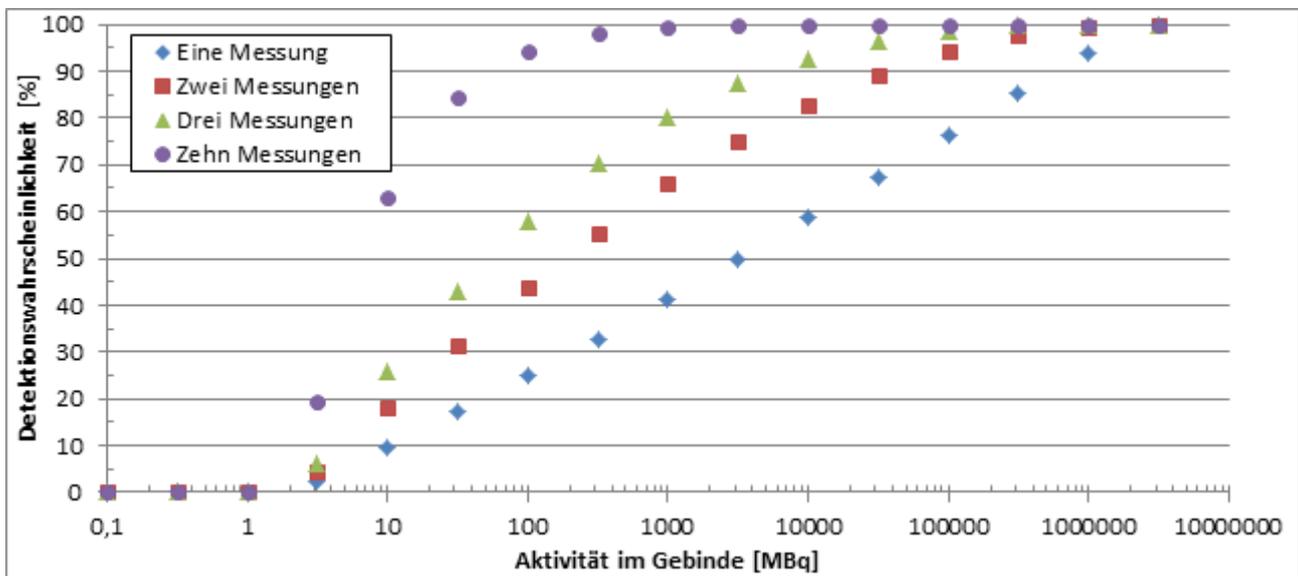
Aus Abbildung 5-2 ist ersichtlich, dass analog zu den Ergebnissen der Co-60-Strahlenquelle, durch ein mehrmaliges Umfüllen und Messen des Stahlschrottes eine deutliche Verbesserung der Detektionswahrscheinlichkeit für Cs-137-Strahlenquellen erreicht werden kann. Bei einer einmaligen Messung liegt die 95 % Detektionswahrscheinlichkeit bei ca. 5 MBq. Diese verbessert sich durch ein oder zwei weitere Umfüllvorgänge mit jeweiliger Neumessung auf ca. 2 bzw. 0,8 MBq. Aufgrund der geometrischen Randbedingungen, welche durch den Abstand des Detektors zum Gebinde bestimmt werden, ist gemäß Gleichung (G 5-2) bei Wiederholungsmessungen keine Verbesserung der Detektion unterhalb einer Aktivitätsschwelle von ca. 13 kBq möglich. Im Rahmen der theoretischen Berechnungen des AP2.1 [BS 16b] wurde, für die wandnahe Position im Rahmen der MCNP-Simulationen, eine minimal detektierbare Cs-137-Aktivität von ca. 18 kBq bestimmt. Diese beiden Werte zeigen eine gute Übereinstimmung.

Unter realen Bedingungen kann nicht davon ausgegangen werden, dass alle Portalmessanlagen mit der gleichen Cs-137-Anlagensensitivität von 10 MBq arbeiten. In Abbildung 5-2 ist daher die Detektionswahrscheinlichkeit für zwei Messungen an unterschiedlichen Anlagen mit einer minimal detektierbaren Aktivität  $A_{\max}$  für die Cs-137-Aktivitäten von jeweils 10 MBq und 50 MBq (5-mal der minimalen Detektionsgrenze) dargestellt. Bei diesen Messvorgängen liegt die 95 % Detektionswahrscheinlichkeit bei ca. 3,5 MBq für eine Cs-137-Strahlenquelle. Hierbei ist für solch eine Messkonfiguration gegenüber der einfachen Messung (vergleiche Abbildung 5-2) eine Verbesserung der Detektionswahrscheinlichkeit für Strahlenquellen höherer Aktivität zu beobachten.

### 5.3.5.3.3 Detektion einer Am-241-Strahlenquelle

In Abbildung 5-3 ist die kumulierte Häufigkeit für die Detektionswahrscheinlichkeit verschiedener Am-241-Aktivitäten dargestellt. Gemäß den Ergebnissen der MicroShield-Berechnungen für ein homogenes Schrottgebilde der Dichte  $1,09 \text{ g/cm}^3$  wurde bei den theoretischen Berechnungen des AP2.1 (vergleiche Kapitel 4.4.6 in [BS 16b]) für eine Am-241-Strahlenquelle in zentraler Position mit einer Aktivität von ca. 7 TBq eine Detektionswahrscheinlichkeit von 100 % bei einer einmaligen Messung hergeleitet. Bei der Berechnung der kumulierten Häufigkeit wurde eine effektive Dichte  $\rho_{\text{eff}}$  des typischen Schrottgebildes für die Am-241-Gammastrahlung (60 keV) von  $0,0825 \text{ g/cm}^3$  angenommen (vergleiche Kapitel 4.4.8 in [BS 16b]). Die sehr geringe effektive Dichte für die Am-241-Gammastrahlung ist auf die Anisotropie der Schrottschüttung innerhalb des realen Gebindes zurückzuführen. Durch die hohe Absorption der Am-241-Gammastrahlung werden in [BS 16b] bei der Berechnung der effektiven Dichte lokale Bereiche mit geringer Dichte deutlich stärker gewichtet.

Abbildung 5-3: Detektionswahrscheinlichkeit verschiedener Am-241-Aktivitäten bei zufälliger Positionierung im Gebinde, abhängig von der Anzahl der Umfüll- und Messvorgänge



Aus Abbildung 5-3 ist ersichtlich, dass durch ein mehrmaliges Umfüllen und Messen des Stahlschrottes eine deutliche Verbesserung der Detektionswahrscheinlichkeit von Am-241-Strahlenquelle erreicht werden kann. Bei einer einmaligen Messung liegt die 95 % Detektionswahrscheinlichkeit bei  $> 1 \text{ TBq}$ . Diese verbessert sich durch ein, zwei oder zehn weitere Umschüttvorgänge mit jeweiliger Neumessung auf ca. 100 GBq, 10 GBq oder 100 MBq.

Trotz der auf homogenen MicroShield-Berechnungen basierenden Eingangsparameter ist eine gute Übereinstimmung mit den MCNP-Simulationen des AP2.1 [BS 16b] erreicht worden; bei beiden Modellen wird eine Detektion direkt an der Containerwand ab einer Aktivität von ca. 1 MBq vorausgesagt. Dieser Wert für die wandnahe Position konnte ebenfalls durch die Testmessungen im Kapitel 3.2.3 verifiziert werden.

#### 5.3.5.4 Bewertung der Simulationsergebnisse für Mehrfachmessungen

Aus den in Kapitel 5.3.5.3.1 bis 5.3.5.3.3 präsentierten Ergebnissen wurde deutlich, dass

- eine Erhöhung der Anzahl der Umfüllvorgänge mit anschließender Messung zu einer deutlichen Verbesserung der Detektionswahrscheinlichkeit für Co-60- und Cs-137-Strahlenquellen führt,
- auch bei einer Erhöhung der Anzahl der Messungen eine Detektion von Am-241-Strahlenquellen mit Aktivitäten < 1 GBq sehr schwierig ist sowie
- die Verwendung von Messtechnik mit unterschiedlicher Anlagensensitivität im Rahmen von Mehrfachmessungen für Co-60- und Cs-137-Strahlenquellen zu einer besseren Detektionswahrscheinlichkeit für höhere Aktivitäten gegenüber einer einfachen Messung führt. Hierbei wurde berücksichtigt, dass unter realen Bedingungen nicht davon ausgegangen werden kann, dass alle Portalmessanlagen mit der gleichen Anlagensensitivität arbeiten. Es wurde bei einer der beiden Messungen eine deutlich schlechtere Anlagensensitivität angenommen (5-mal der minimalen Detektionsgrenze).

Die integrale Detektionswahrscheinlichkeit von radioaktiven Quellen und Gegenständen im Stahlschrott hängt gemäß dem obigen Abschnitt stark von der Anzahl der durchgeführten Messungen und Umfüllvorgänge ab. Um eine Abschätzung des Gefährdungspotenzials durch radioaktive Quellen und Gegenstände für den industriellen Endverbraucher von Stahlschrott (Hochöfen und Gießereien) durchzuführen wird die minimale Anzahl von unabhängigen Messungen in der Schrottindustrie abgeschätzt. Hierbei wird von den folgenden Randbedingungen ausgegangen:

- Bei der Belieferung der Endverbraucher von Stahlschrott ist davon auszugehen, dass diese nur durch Schrottplätze mit einem Jahresschrotturnsatz von > 20.000 Mg beliefert werden.
- Bei diesen Schrottplätzen mit > 20.000 Mg Jahresdurchsatz ist gemäß den Ergebnissen aus der Umfrage des AP1 [BS 16a] eine gute Abdeckung mit Portalmonitoren gegeben.
- Es kann davon ausgegangen werden, dass Schrottplätze auch ihre einkommenden Warenströme auf radioaktive Quellen und Gegenstände im Stahlschrott untersuchen.

Hierdurch ergibt sich, dass eine minimale Anzahl von zwei unabhängigen Messungen mit Umfüllvorgänge auf radioaktive Quellen und Gegenstände im Stahlschrott bis zum Einschmelzen gewährleistet ist. Gemäß den obigen Kapiteln ergeben sich die in Tabelle 5-1 zusammengefassten 95 % Detektionswahrscheinlichkeiten.

Tabelle 5-1: 95 % Detektionswahrscheinlichkeit für die beiden unterschiedlichen Szenarien mit jeweils zwei Messungen

Nuklid	95 % Detektionswahrscheinlichkeit [MBq]	
	zwei gleiche Messungen	Unterschiedliche Messungen (NWG und 5x NWG)
Co-60	0,6	1,1
Cs-137	2,0	3,5
Am-241	100.000	nicht betrachtet

Die oben ausgewiesenen Werte zeigen im Vergleich zu den zentralen Quellenpositionen des AP2.1 [BS 16b] bereits eine deutliche Reduktion der minimal detektierbaren Quellaktivitäten.

Aus den folgenden Gründen ist zudem davon auszugehen, dass die in Tabelle 5-1 ausgewiesenen Werte als konservative Abschätzung dienen:

- Es wurde keine Verwendung anderer Messeinrichtungen wie Greifmesser und Förderbandmessungen in den jeweiligen Betrieben unterstellt (s. hierzu Kapitel 5.3.6).
- Unter Berücksichtigung der experimentellen Ergebnisse des Kapitels 3.3 kann für reale Portalmessanlagen von einer besseren Anlagensensitivität für Co-60- und Cs-137-Strahlenquellen ausgegangen werden, was zu einer Herabsetzung der 95 % Detektionswahrscheinlichkeit führen wird.

Die in Tabelle 5-1 dargestellten Ergebnisse sind für den industriellen Endverbraucher von Stahlschrott relevant, eine Gefährdungsbeurteilung für den Mitarbeiter eines kleinen Schrottplatzes am Anfang des Recyclingprozesses kann hieraus aber nicht erfolgen. Mögliche technische Verbesserungen hinsichtlich der Detektion von herrenlosen Strahlenquellen und dem Schutz der Mitarbeiter vor Ort werden im Rahmen der Empfehlungen g) und i) (siehe Kapitel 5.3.7 und 5.3.8) gegeben.

Aufgrund der hohen Investitionskosten für die Neuanschaffung einer Portalmessanlage ist diese Maßnahme nur für mittlere bis große Schrottplätze empfehlenswert. Ein mechanisches Wenden des angelieferten Schrottes, zum Zweck einer zeitnahen Zweitmessung kann, aufgrund der hohen Personal und Investitionskosten (z. B. Bagger mit Greifer), als nicht verhältnismäßig angesehen werden.

Es ist darauf hinzuweisen, dass durch Erschütterungen während eines längeren Transports eine Strahlenquelle in einen anderen Teil der Ladung gelangen kann. Dieser kann grundsätzlich eine bessere oder schlechtere Detektionsempfindlichkeit aufweisen. Es erhöht daher insgesamt die Detektionsempfindlichkeit, eine Messung mit einer Portalmessanlage vor und nach einem längeren Transport durchzuführen.

#### 5.3.5.5 Empfehlung

Es ist grundsätzlich zu empfehlen, dass Schrottplätze und andere Betriebe, die Stahlschrott verarbeiten (z. B. Gießereien) mit Portalmonitoren ausgestattet sind. In allen Betrieben, bei denen eine Umladung stattfindet, ist es grundsätzlich als verhältnismäßig anzusehen, dass sowohl der Eingang als auch der Ausgang von Schrottgebinden überwacht wird.

Als Ausnahmen von dieser allgemeinen Aussage sind zu sehen:

- Betriebe, die nur mit Schrott umgehen, der gemäß Kapitel 5.3.6 im Rahmen einer Vereinzelnung gemessen wurden. Hier ist die Detektionsempfindlichkeit im Rahmen einer Vereinzelnung so niedrig, dass die zusätzliche Messung in einer Portalmessanlage keine Verbesserung darstellt.
- Betriebe, die Primärsammlung von Schrott durchführen und den gesammelten Schrott in Kleinbinden (z. B. mit Fahrzeugen mit einem zulässigen Gesamtgewicht bis 3,5 Mg) an einen größeren Schrotthändler abgeben, der den Wareneingang mit Portalmonitoren überwacht. Hier ist die Eingangsmessung bei der Abgabe als ausreichend anzusehen (siehe auch Kapitel 5.3.7). Da die hier betrachteten Betriebe nur einen kleinen Durchsatz aufweisen, wären die Investitionskosten für eine Portalmessanlage als unverhältnismäßig für den Nutzen anzusehen.

### **5.3.6 Vorschlag f) Erhöhung der Anzahl an Messungen bei betrieblichen Abläufen welche bereits eine Vereinzelung von Schrott beinhalten**

#### **Beschreibung der Maßnahmen**

Neben den bei der An- und Ablieferung von Metallschrott durchgeführten Messungen mittels Portalmonitoren kann, durch zusätzliche Messungen bei gewissen betrieblichen Abläufen, die Detektionswahrscheinlichkeit erhöht werden.

Zu diesen betrieblichen Abläufen gehören Schritte bei denen eine Vereinzelung des Schrotts im Rahmen der durchgeführten Prozesse notwendig ist. Hierzu zählen gemäß [BDSV 12] die folgenden Bearbeitungseinrichtungen für Schrott:

- Schredderanlagen (Mühlen, Kondiratoren und Zerdiratoren) und
- Scherenanlagen

Neben diesen Bearbeitungseinrichtungen werden häufig Transportbänder für den innerbetrieblichen Schrotttransport verwendet.

#### **Bewertung der Maßnahmen**

Die unbeabsichtigte Bearbeitung von radioaktiven Quellen und Gegenstände im Stahlschrott kann durch eine frühzeitige Detektion bei Anlieferung und Vereinzelung an Anlagen unterbunden werden. Gemäß [BDSV 12] ist die Überwachung des angelieferten Schreddervormaterials auf radioaktive Quellen und Gegenstände im Stahlschrott vor dem Schredder zwingend erforderlich. In [BDSV 12] wird aber nur auf Detektionsmöglichkeiten im Anlieferungsbereich (Portalmonitore, Greifer und Umschlaggeräte) verwiesen. Auch für die im Rahmen der experimentellen und theoretischen Betrachtungen hergeleiteten minimal detektierbaren Aktivitäten für Co-60-, Cs-137- und Am-241-Prüfstrahler (vergleiche Tabelle 3-7) für Portalmonitore ist für die vor Ort tätigen Mitarbeiter immer noch von einem erheblichen Gefährdungspotenzial, bei einer Freisetzung dieser Aktivitätsmenge, auszugehen.

Die oben aufgeführten Bearbeitungsschritte erfordern oftmals, im Rahmen der Materialzugabe, eine Vereinzelung. Bei dieser Vereinzelung ist eine der Bearbeitung vorgeschaltete Messung auf radioaktive Quellen und Gegenstände im Stahlschrott zielführend. Hierdurch können die minimal detektierbaren Aktivitäten gemäß Kapitel 3.3, aufgrund der lokal geringen Massenbelegung, noch deutlich weiter verringert werden.

Bei den oben aufgeführten Prozessen kommt es zu einer mechanischen Bearbeitung des Schrottes, dies kann bei der versehentlichen Bearbeitung einer herrenlosen Strahlenquelle eine Zerstörung der Umhausung und somit eine Freisetzung von offener Radioaktivität auf dem Gelände des Schrottplatzes nicht ausgeschlossen werden. Bei solch einer Freisetzung ist das Gefährdungspotenzial für die Mitarbeiter, aufgrund einer möglichen Inkorporation, deutlich erhöht. Auch die Gefahrenabwehr und Dekontaminationsprozesse gestalten sich aufgrund möglicher Kontaminationsverschleppung und Aktivitätsausbreitung deutlich schwieriger. Im Falle einer Freisetzung aus einer radioaktiven Quelle ist ebenfalls mit einer größeren Menge radioaktiv kontaminierten Materials, das eventuell als radioaktiver Abfall zu entsorgen ist, zu rechnen.

Die Kosten für eine messtechnische Überwachung des Schrottstromes sind vergleichbar mit der Neuanschaffung eines Portalmonitors anzusehen. Durch diese Anlagen lassen sich aber deutlich geringere minimal detektierbare Aktivitäten als mittels Portalmonitoren erzielen. Daher ist für au-

tomatisierte betriebliche Abläufe eine Überwachung des Schrottstromes, für Anlagen bei denen ein hoher jährlicher Massenfluss realisiert wird, zu empfehlen.

### **Empfehlung**

Automatisierte betriebliche Abläufe, welche bereits eine Vereinzelnung von Schrott beinhalten und einen großen Massenfluss an Schrott aufweisen, sollten messtechnisch auf radioaktive Quellen und Gegenstände im Stahlschrott überwacht werden.

### **5.3.7 Vorschlag g) Messungen mit optimierter Beladung der Schrottgebinde**

#### **Beschreibung der Maßnahmen**

Bei der messtechnischen Erfassung von radioaktiven Quellen und Gegenständen im Stahlschrott kann die Beladung des Containers mit Schrott einen großen Einfluss auf die minimal detektierbare Aktivität haben. Hierbei sind insbesondere die folgenden charakteristischen Größen eines Schrottgebindes zu betrachten:

- Anisotropie der Ladung,
- Dichte der Ladung
- Breite des Schrottgebindes und
- Kompaktierungsgrad des Schrottes.

Die minimal detektierbare Aktivität kann verringert werden, wenn optimiert geladener Schrott gemessen wird.

#### **Bewertung der Maßnahmen**

Bezüglich der Anisotropie der Ladung ergibt sich aus den Simulationsergebnissen des AP2.1 [BS 16b], dass gerade aufgrund der lokalen Anisotropie der Schrottladung eine Reduktion der effektiven Dichte  $\rho_{\text{eff}}$  zu beobachten ist. Diese reduzierte effektive Dichte führt zu einer deutlich verbesserten Detektierbarkeit von radioaktiver Strahlung aus dem Inneren des Gebindes.

Bezüglich des Kompaktierungsgrad des Schrottes ergab sich, bei der Auswertung der Umfrage im Rahmen des AP2.1 [BS 16a], für das typische Gebinde ein mittlerer Füllstand von 62 %. Dies bedeutet, dass bei der Beladung von Schrottgebinden das Gesamtgewicht und nicht das Volumen der begrenzende Faktor ist. Somit ist im Allgemeinen eine Nachkompaktierung von Schrott im Rahmen der Beladung von Gebinden der Schrottindustrie nicht zu erwarten. Die Bearbeitung von Schrott (u. a. Schreddern, Zuschneiden) zu verschiedenen Schrottsorten kann als indirekte Kompaktierung des Stahlschrottes angesehen werden. Hierbei ist anzunehmen, dass das Ausgangsmaterial vor der Bearbeitung eine geringere Dichte aufweist als das fertige Produkt. Daher sind bei Betrieben, welche große Mengen an Schrott bearbeiten, Eingangskontrollen auf radioaktiven Quellen und Gegenständen im Stahlschrott durchzuführen.

Im Allgemeinen stellt die gezielt für die Messung optimierte Beladung von Schrottgebinden für die Betriebe einen erheblichen Mehraufwand dar, der nicht als verhältnismäßig anzusehen ist. Schritte in der Lieferkette, die für die Messung günstige Schrottgebinde aufweisen, sollten jedoch bevorzugt mit Portalmonitoren überwacht werden. Dabei sind insbesondere die Sammlung von Schrotten vor der Sortierung zu nennen.

## **Empfehlung**

Es sollte sichergestellt sein, dass bei der Anlieferung von Schrottplätzen, bei denen eine Bearbeitung und Sortierung von Schrott stattfindet, eine messtechnische Erfassung des eingehenden Warenstroms stattfindet. Wie oben dargestellt, sollten Betriebe ausgenommen sein, die die Primärsammlung von Schrott durchführen und den gesammelten Schrott in Kleingebinden (z. B. mit Fahrzeugen mit einem zulässigen Gesamtgewicht bis 3,5 Mg) an einen größeren Schrotthändler abgeben, der den Wareneingang mit Portalmonitoren überwacht.

### **5.3.8 Vorschlag h) Sensibilisierung und Aufklärung der Mitarbeiter von Schrott- und Einschmelzbetrieben bezüglich der Erkennung und dem Umgang beim Fund von radioaktiven Quellen und Gegenständen**

#### **Beschreibung der Maßnahmen**

Neben der messtechnischen Erkennung von radioaktiven Quellen und Gegenständen im Stahlschrott, durch installierte Detektionshardware, kann die Sensibilisierung und Aufklärung der Mitarbeiter von Schrott- und Einschmelzbetrieben bezüglich der Erkennung von herrenlosen Strahlenquellen ein wichtiger Beitrag zur Gefahrenabwehr sein. Hierzu sollten den Mitarbeitern von Betrieben, die für das mögliche Auftreten von u. a. herrenloser Strahlenquellen gefährdet sind, adäquat informiert und vorbereitet werden. Dies kann im Rahmen von Informationsbroschüren oder Schulungen erfolgen.

#### **Bewertung der Maßnahme**

Eine stärkere Sensibilisierung der Mitarbeiter der Schrott- und Einschmelzbetriebe bezüglich der Erkennung und dem Verhalten bei einem möglichen Fund von herrenlosen Strahlenquellen sind ein wichtiger Beitrag zur Verbesserung des Arbeits- als auch des Strahlenschutzes der Arbeitskräfte und sind ebenfalls für den Strahlenschutz und die Gefahrenabwehr für die Bevölkerung relevant. Informationsmaterial welches den Mitarbeitern zur Verfügung gestellt wird, sollte primär zwei verschiedene Personengruppen berücksichtigen:

- Personen, die normalerweise keine Handlungen ausüben, für die Strahlenschutzanforderungen gelten, d. h. Nichtfachleute sowie
- Personen, die bereits mindestens eine allgemeine Einweisung in Strahlenschutzanforderungen erhalten haben, z. B. Mitarbeiter von schrottverarbeitenden Betrieben.

Bei der Erstellung des Informationsmaterials ist darauf zu achten, dass das Material für Nichtfachleute verständlich ist und die vermittelten Informationen für diesen Personenkreis in der Praxis ziel führend anwendbar sind. Es sollte dem Personenkreis welche eine allgemeine Einweisung in den Strahlenschutzanforderungen erhalten haben, zur besseren Entscheidungsfindung bei Neuanschaffung, technische Informationen bezüglich des aktuellen Stands der Technik von Portalmessanlagen vermittelt werden.

## **Empfehlung**

Ideenfindung für Leitlinien und Informationsmaterial im Rahmen der neuen Euratom-Grundnormen werden im Rahmen des AP4 dieses Forschungsvorhabens definiert. Gemäß Artikel 92 Absatz 3 der Richtlinie 2013/59/Euratom [EU 14] sollen „Personen, die das Vorhandensein einer herrenlosen Strahlenquelle vermuten und die normalerweise keine Handlungen ausüben, für die Strahlenschutzanforderungen gelten, unverzüglich eine spezialisierte technische Beratung und Hilfe erhalten. De-

ren vorrangiges Ziel ist der Strahlenschutz der Arbeitskräfte und von Einzelpersonen der Bevölkerung und die Sicherheit der Strahlenquelle“.

## **6. ZUSAMMENFASSUNG**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Experimentelle und theoretische Untersuchungen zu radioaktiven Quellen und Gegenständen im Stahlschrott“ wurde mittels Altschrott der Sorte 3 ein für die Schrottindustrie typisches Schrottgebilde erstellt. Das real erstellte Gebinde zeigt bezüglich der Parameter wie Dichte, Füllstand, Gesamtgewicht und Volumen eine sehr gute Übereinstimmung mit den innerhalb der theoretischen Berechnungen zugrunde gelegten Werten, welche im Rahmen einer Umfrage ermittelt worden sind.

Auf Basis dieses experimentellen Gebindes wurden, auf dem Firmengelände eines Schrottplatzes, Messungen mittels Co-60-, Cs-137- und Am-241-Prüfstrahler an verschiedenen Positionen innerhalb des Schrottcontainers durchgeführt. Diese Messungen wurden zur Bestimmung der minimal detektierbaren Aktivität unter realen Bedingungen mittels für den deutschen Schrottmarkt typischer Portalmonitore durchgeführt. Hierbei konnten die im Rahmen der theoretischen Studien bestimmten Wertebereiche für die minimalen detektierbaren Aktivitäten der Nuklide Co-60 und Cs-137 sehr gut reproduziert werden. Die durch Extrapolation aus dem Experiment bestimmten minimal detektierbaren Aktivitäten für Am-241 liegen über den Ergebnissen der theoretischen Studie. Dies ist aufgrund der hohen Sensitivität der Ergebnisse auf kleine Abweichungen der Messgeometrie und zusätzlich vorhandene abschirmende Materialien zurückzuführen.

Abschließend wurden, u. a. auf Basis der theoretischen und experimentellen Studien, Empfehlungen zur Optimierung der Auffindbarkeit von radioaktiven Quellen und Gegenständen im Stahlschrott abgeleitet und bewertet.

## 7. LITERATUR

- [BDSV 10] BUNDESVEREINIGUNG DEUTSCHER STAHLRECYCLING UND ENTSORGUNGSUNTERNEHMEN E.V.  
Stahlschrottsortenliste, Fassung vom 01. Januar 2010
- [BDSV 12] BUNDESVEREINIGUNG DEUTSCHER STAHLRECYCLING UND ENTSORGUNGSUNTERNEHMEN E.V.  
BREF für Großschredderanlagen – Standpunkt der deutschen Schredderwirtschaft – , Fassung vom Dezember 2012
- [BS 16A] BRENK SYSTEMPLANUNG GMBH  
Experimentelle und theoretische Untersuchungen zu radioaktiven Quellen und Gegenständen im Stahlschrott  
Bericht zu AP1 des BfS-Forschungsvorhabens 3615S52320, Aachen, 29.07.2016
- [BS 16B] BRENK SYSTEMPLANUNG GMBH  
Experimentelle und theoretische Untersuchungen zu radioaktiven Quellen und Gegenständen im Stahlschrott  
Bericht zu AP2.1 des BfS-Forschungsvorhabens 3615S52320, Aachen, 20.04.2017
- [EU 14] EUROPÄISCHE UNION  
Amtsblatt der Europäischen Union 17.04.2014, RICHTLINIE 2013/59/EURATOM DES RATES vom 5. Dezember.
- [GRO 09] GROVE ENGINEERING  
MicroShield – Software zu Berechnung von Dosen durch externe Bestrahlung mit Photonen (8.03, 2009)
- [MERK 13] R. MERK, L. EDELHÄUSER-HORNUNG  
„Monte Carlo Simulationen zu Cobalt-60 kontaminiertem Stahl und radioaktiven Quellen im Stahlschrott“, BfS. Vortrag gehalten beim Fachgespräch über radioaktiv kontaminierte Waren am 23.10.2013 beim BMUB Bonn.
- [NIST 04] J. H. HUBBELL UND S. M. SELTZER  
„Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest“, NIST Standard Reference Database 126, Last update: July 2004

- [RP 117] EUROPEAN COMMISSION  
„Radiation protection 117- Methodology and models used to calculate individual and collective doses from the recycling of metals from the dismantling of nuclear installations” , S.F. Mobbs and M.P. Harvey; National Radiological Protection Board
- [SSV 16] STRAHLENSCHUTZVERORDNUNG (STRLSCHV)  
Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV)  
Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2011 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), die durch Artikel 8 des Gesetzes vom 26. Juli 2016 (BGBl. I S. 1843) geändert worden ist

**ANHANG A: MESSPROTOKOLLE DER PORTALMESSANLAGEN**

Anhang A-1: Messprotokolle der Eingangswage

Anhang A-2: Messprotokolle der Ausgangswage

# | Verantwortung für Mensch und Umwelt |

**Kontakt:**

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 30 18333 - 0

Telefax: + 49 30 18333 - 1885

Internet: [www.bfs.de](http://www.bfs.de)

E-Mail: [ePost@bfs.de](mailto:ePost@bfs.de)

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Bundesamt für Strahlenschutz