

## SGSreco – Radiologische Charakterisierung von Abfallfässern durch Segmentierte $\gamma$ -Scan Messungen

Thomas Heinrich Krings

Forschungszentrum Jülich GmbH  
Institut für Energie- und Klimaforschung  
Nukleare Entsorgung und Reaktorsicherheit (IEK-6)

# **SGSreco – Radiologische Charakterisierung von Abfallfässern durch Segmentierte $\gamma$ -Scan Messungen**

Thomas Heinrich Krings

Schriften des Forschungszentrums Jülich  
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 208

---

ISSN 1866-1793

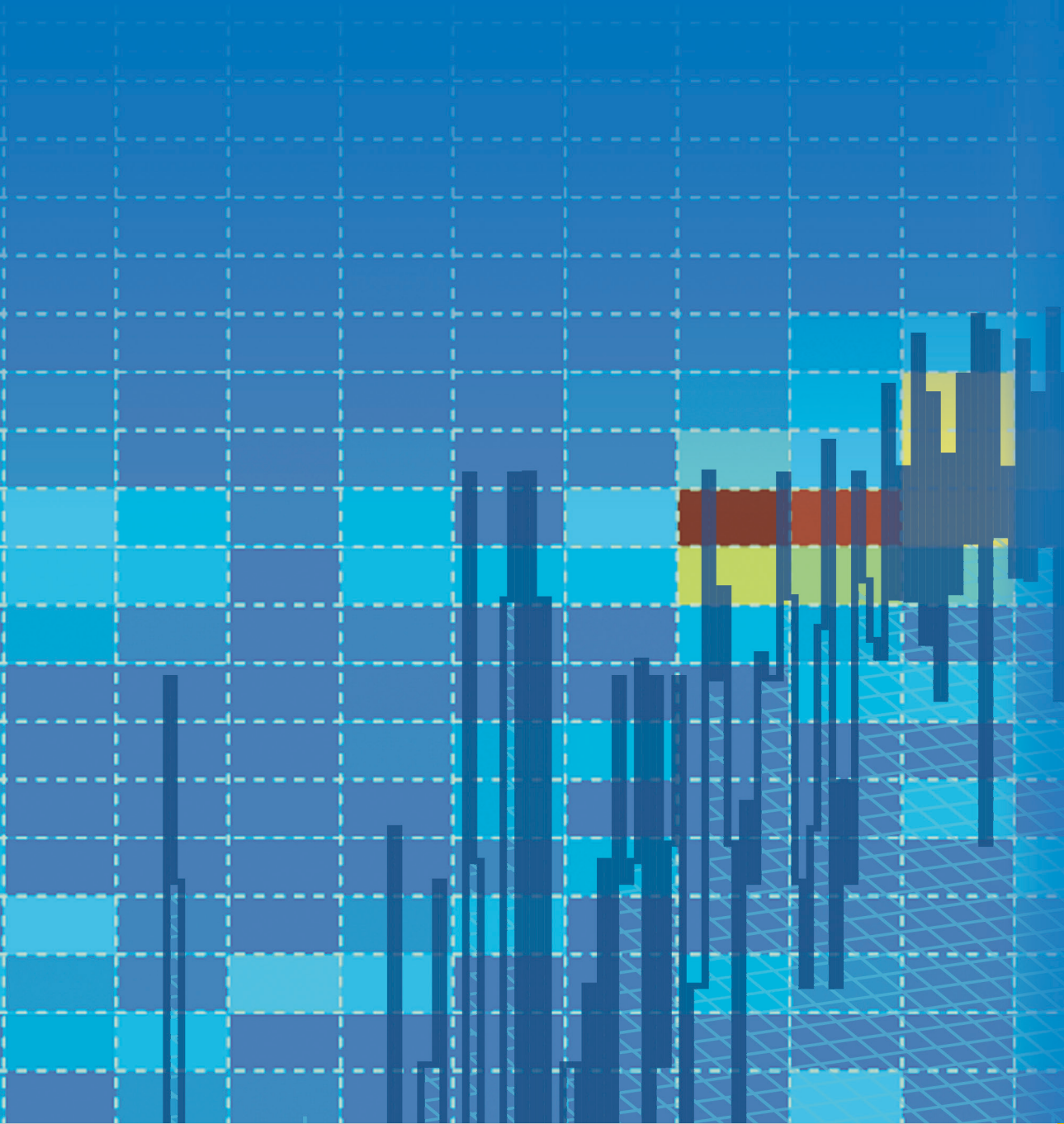
ISBN 978-3-89336-945-4

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Kurzzusammenfassung</b>	<b>iv</b>
	<b>Abstract</b>	<b>v</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>1</b>	<b>Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland</b>	<b>1</b>
	1.1 Ziele der Endlagerung	2
	1.2 Klassifizierung von radioaktiven Abfällen	3
	1.3 Stand der Endlagerung weltweit	3
	1.4 Bestand und Prognosen für konditionierte Abfälle	4
	1.5 Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle	6
	1.6 Endlagerung vernachlässigbar wärmeentwickelnder Abfälle	8
<b>2</b>	<b>Radiologische Anforderung an Abfälle für das Endlager Konrad</b>	<b>11</b>
	2.1 Konditionierung radioaktiver Abfälle	12
	2.2 Anforderungen aus den Endlagerungsbedingungen	12
	2.3 Produktkontrolle von radiologischen Anforderungen	15
	2.4 Notwendigkeit der experimentellen radiologischen Charakterisierung	16
<b>3</b>	<b>Grundlagen der zerstörungsfreien Charakterisierung von Abfallfässern</b>	<b>19</b>
	3.1 Zerstörende und zerstörungsfreie Messverfahren	20
	3.2 Reichweite von $\alpha$ - und $\beta$ -Strahlung in Materie	22
	3.3 Wechselwirkung von $\gamma$ -Strahlung in Materie	23
	3.4 Abschwächung von $\gamma$ -Strahlung	28
	3.5 $\gamma$ -spektrometrische Messsysteme	30
	3.6 Schlüsselnuklide und Skalierungsverfahren	34
<b>4</b>	<b>Stand von Wissenschaft und Technik bei <math>\gamma</math>-Scan Messverfahren</b>	<b>37</b>
	4.1 Ziele von $\gamma$ -Scan Messungen	38
	4.2 Integrale $\gamma$ -Scan Messungsverfahren (IGS)	38
	4.3 Segmentierte $\gamma$ -Scan Messverfahren (SGS)	40
	4.4 Kalibrationsbedingungen und Aktivitätsrekonstruktion beim SGS	43
	4.5 Korrekturmethode bei Abweichungen von den Kalibrationsbedingungen	47

<b>5</b>	<b><math>\gamma</math>-spektrometrische Simulationen mit Geant4</b>	<b>51</b>
5.1	Notwendigkeit $\gamma$ -spektrometrischer Simulationen	52
5.2	Monte Carlo Methoden	52
5.3	Das Geant4-Framework	53
5.4	Livermore-Modelle für Photonen und Elektronen	54
5.5	Applikation für $\gamma$ -spektrometrische Simulationen	56
<b>6</b>	<b>Segmentiertes <math>\gamma</math>-Scan Messungen am Forschungszentrum Jülich</b>	<b>59</b>
6.1	Das SGS-Messsystem Gernod II	60
6.2	Routineeinstellungen für SGS-Messungen von konditionierten Abfällen	62
6.3	Effizienzkalibration des Detektionssystems	62
6.4	Detektorimplementation und Simulation von SGS-Messungen in Geant4	64
6.5	Quantifizierung der Einhaltung von Kalibrationsbedingungen	66
<b>7</b>	<b>SGSreco</b>	<b>69</b>
7.1	Motivation, Konzept und Kalibrationsbedingungen	70
7.2	Input und Datenbanken	71
7.3	Berechnung von Zählratenverteilungen	74
7.3.1	<i>Numerische Berechnung des effektiven Raumwinkels</i>	76
7.3.2	<i>Analytische Berechnung des effektiven Raumwinkels</i>	79
7.3.3	<i>Implementation in SGSreco</i>	83
7.3.4	<i>Modellvalidierung</i>	84
7.3.5	<i>Gittergröße für die numerische Berechnung des effektiven Raumwinkels</i>	89
7.4	Aktivitätsberechnung bei homogenen Radionuklidinventaren	90
7.5	Rekonstruktionsalgorithmus	91
7.6	Statistische und systematische Unsicherheiten	95
7.7	Nachweisgrenzen - Maximal nicht-detektierbare Aktivitäten	96
<b>8</b>	<b>Rekonstruktion homogener Radionuklidinventare</b>	<b>101</b>
8.1	Parameter- und Benchmarkstudie anhand von Simulationen	102
8.1.1	<i>Simulationssets</i>	102
8.1.2	<i>Integrationsgrenzen</i>	103
8.1.3	<i>Optimale Gittergröße und Rechenzeit</i>	105
8.1.4	<i>Benchmarkstudie</i>	108
8.2	Validierung anhand eines konditionierten Referenzfassens	108
<b>9</b>	<b>Rekonstruktion heterogener Radionuklidinventare - Simulationsstudie</b>	<b>111</b>
9.1	Zielsetzung	112
9.2	Simulationssets	112
9.3	Anzahl an erforderlichen $\chi^2$ -Iterationen	114
9.4	Benchmarkberechnungen bei einer Punktquelle	115
9.5	Systematikstudie zum Einfluss des Scanmodus	120
9.6	Modellwahl, statistische Unsicherheiten und Rechenzeiten	123
9.7	Benchmarkberechnung bei unbekanntem Matrixdichten	127

9.8	Benchmarkberechnung bei Ensembles aus mehreren Punktquellen	128
9.9	Evaluation eines Gütekriteriums	132
9.10	Systematikstudie für ausgedehnte Quellen	133
9.11	Maximal nicht-detektierbare Aktivitäten	136
<b>10</b>	<b>Rekonstruktion heterogener Radionuklidinventare - Messstudie</b>	<b>139</b>
10.1	Testfassabschnitt und Prüfstrahler	140
10.2	Rekonstruktion von einzelnen Quellen	142
10.3	Vergleiche zwischen Standard- und Alternativscanmodus	144
10.4	Rekonstruktion von Ensembles zweier Quellen	145
10.5	Rekonstruktion von abgeschirmten Quellen	147
10.6	Anwendung bei konditionierten Abfallfässern	150
<b>11</b>	<b>Entwicklungspotential für <math>\gamma</math>-spektrometrische Messverfahren</b>	<b>153</b>
11.1	LaBr <sub>3</sub> -Detektoren in SGS-Messsystemen	154
11.2	Transmissionskorrigierte SGS-Messungen	155
<b>12</b>	<b>Zusammenfassung - Leistungsfähigkeit von SGSreco</b>	<b>157</b>
<b>A</b>	<b>Deklarationspflichtige Radionuklide für das Endlager Konrad</b>	<b>161</b>
<b>B</b>	<b>Ergebnisse aus der Reanalyse von realen Abfallfässern mit SGSreco</b>	<b>167</b>
	Abbildungsverzeichnis	I
	Tabellenverzeichnis	V
	Literaturverzeichnis	VII
	Danksagung	XIII



**Energie & Umwelt / Energy & Environment**  
**Band / Volume 208**  
**ISBN 978-3-89336-945-4**

