



**MIRION**  
TECHNOLOGIES

# Neue Entwicklungen in Freimeßanlagen mit Plastik Szintillatoren

---

*Dr. Matthias Richter*

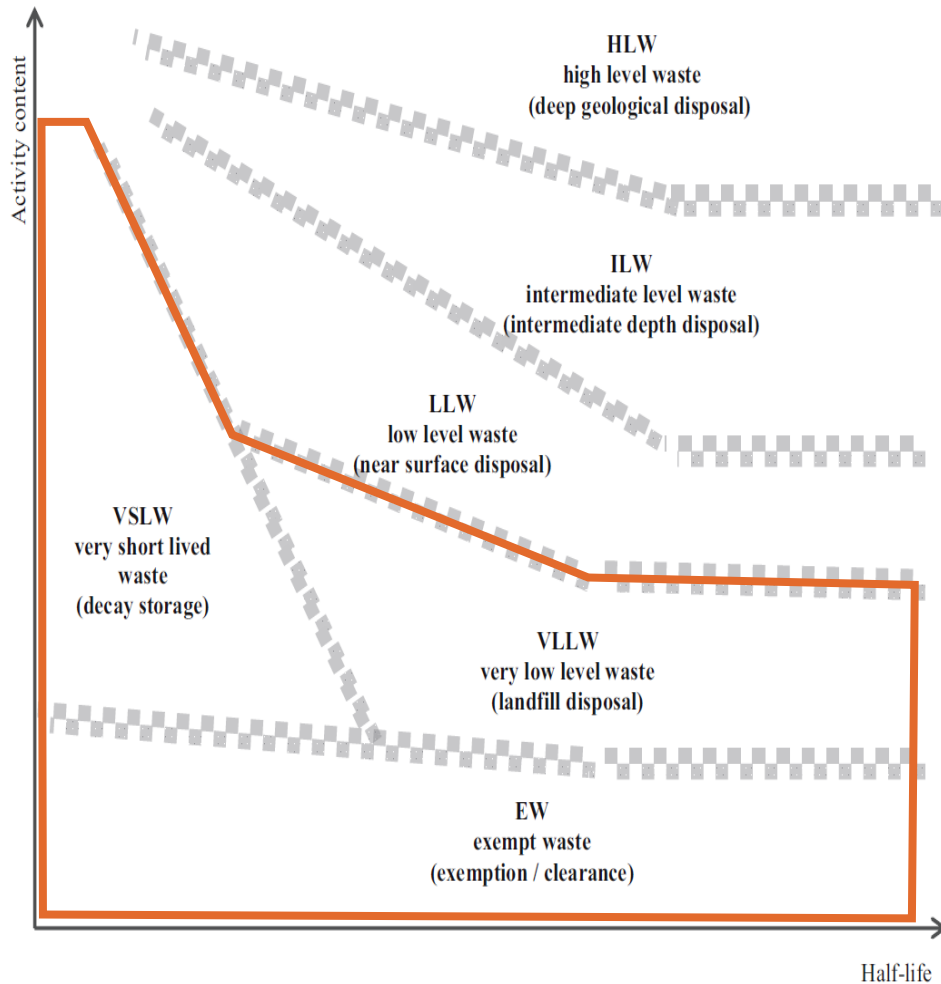


**MIRION**  
TECHNOLOGIES

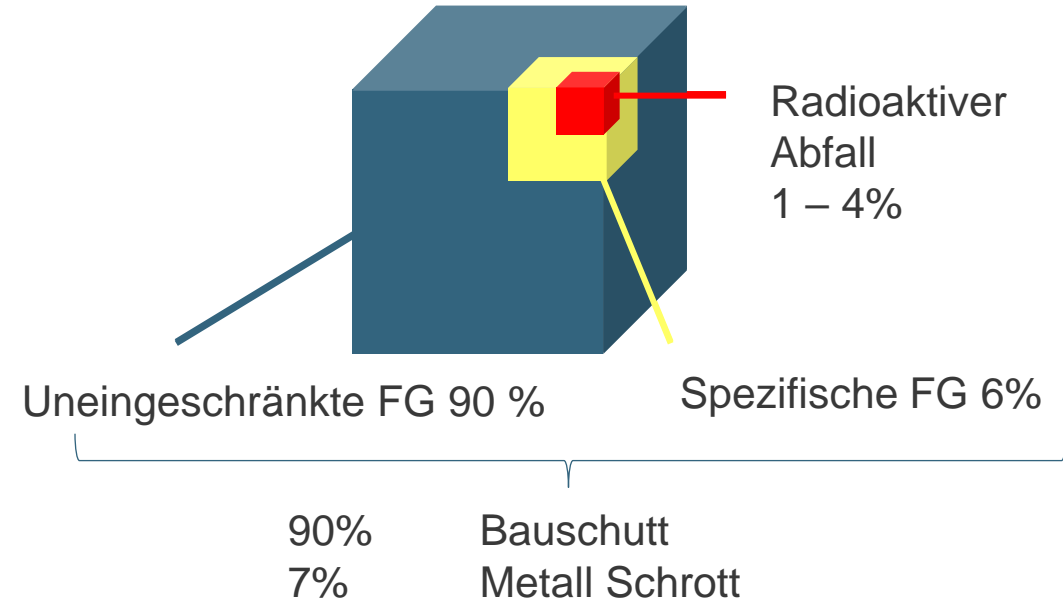
# Agenda

- ❑ **Freigabemessung – Methoden und Geräte**
- ❑ Gamma Spektrometrie mit Plastik Szintillatoren
- ❑ Entwurf von Freimessanlagen mittels Monte Carlo Simulation
  - Objektmodelle
  - Kalibrierung
  - Inhomogenitätskorrektur
- ❑ Neue Mirion Freimessanlagen

# Ziel der Freigabe



2009 IAEA SAFETY STANDARDS SERIES No. GSG-1



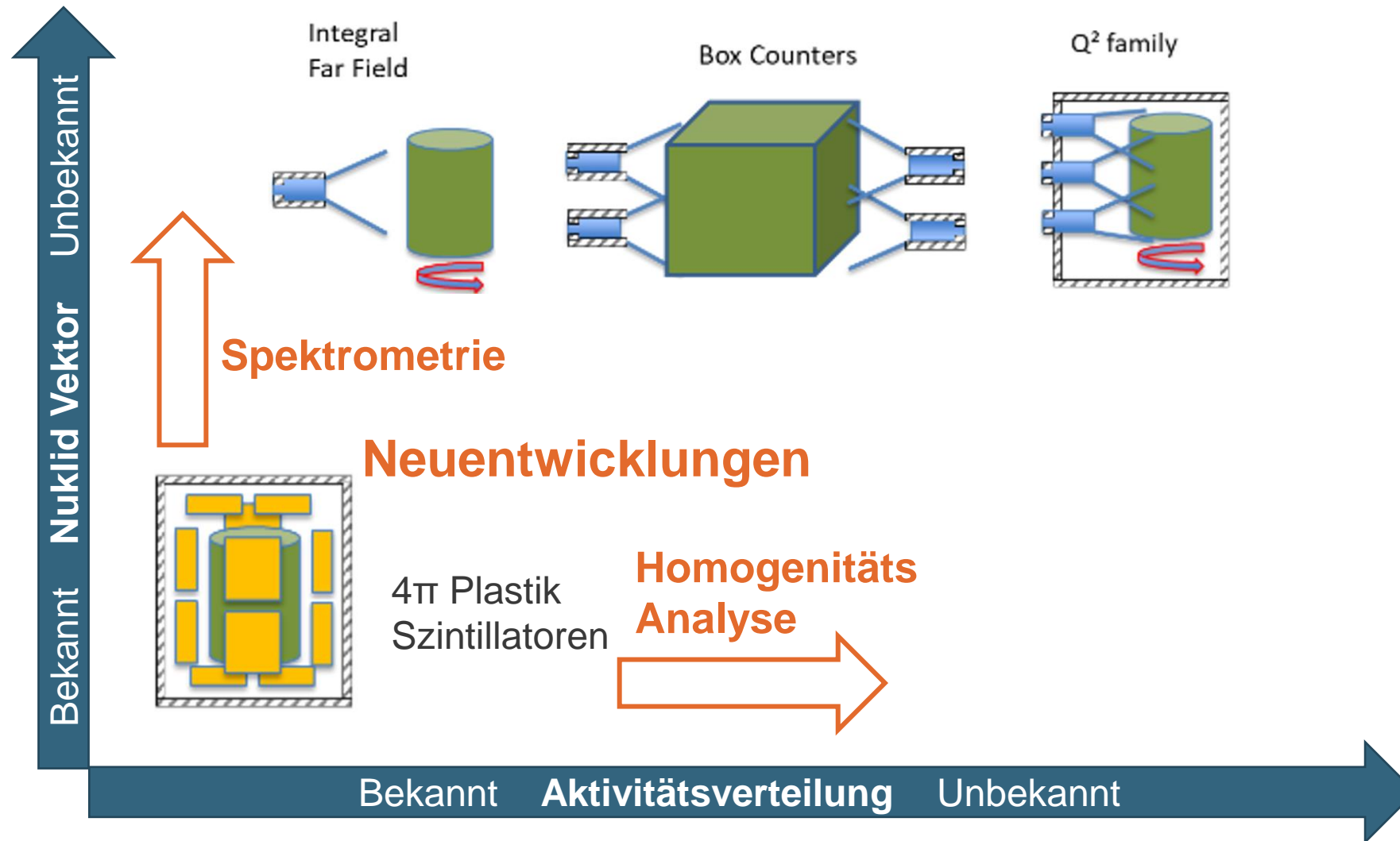
**Freigabemessung bedeutet die Überprüfung des zu 96% wiederverwendbaren Materials mit DURCHSATZ, PRÄZISION und SICHERHEIT.**

# Freimessung: 4 $\pi$ Plastik oder Spektrometrie ?

	4 $\pi$ Plastik Szintillatoren	HPGe Spektrometrie
<b>Prinzip</b>	Bekannter Nuklidvektor - Konversion von Cps in Bq unter Verwendung der LNC Methode	Vorherige Analyse gammaspektrometrisch nicht messbarer Nuklide – Genauere Angaben zu Einzelnukliden
<b>Typ. Instrumente</b>	CGO, RTM6xx Linie	ISOCS, Q <sup>2</sup> , Box Counter, ASGS
<b>Methode</b>	Zählmodus & niedrig auflösende Spektrometrie	Nuklid spezifisch
<b>Vorteil</b>	4 $\pi$ High sensitivity	Direkte Ergebnisse in Bq/g
<b>Empfindlichkeit (MDA)</b>	+/- 55 Bq Co-60 zentriert Typisch <0.05 Bq/g	< 0,01 Bq/g Co-60 (Q <sup>2</sup> )
<b>Messzeit</b>	Typisch 10...30 s	Typisch > 30min
<b>Anwendung</b>	Sortierung oder Freigabe von Material und Schleuse oder große Mengen Kurze Messzeiten / hoher Durchsatz NORM Kompensierung möglich	In-situ Freigabe, große Teile und Behälter Mittlere Mengen < 100 t Mittlere / lange Messzeit tolerierbar Ideal for complexe Spectren (z.B. NORM, Eu152, etc.) und Nuklide mit niedrigen Energien



# Methoden der Freimessung



# Unsicherheiten vs. sichere Freigabe - State-of-the-art

Große Sicherheitsreserven

oder

Kleinere Unsicherheiten  
durch **Technologie**

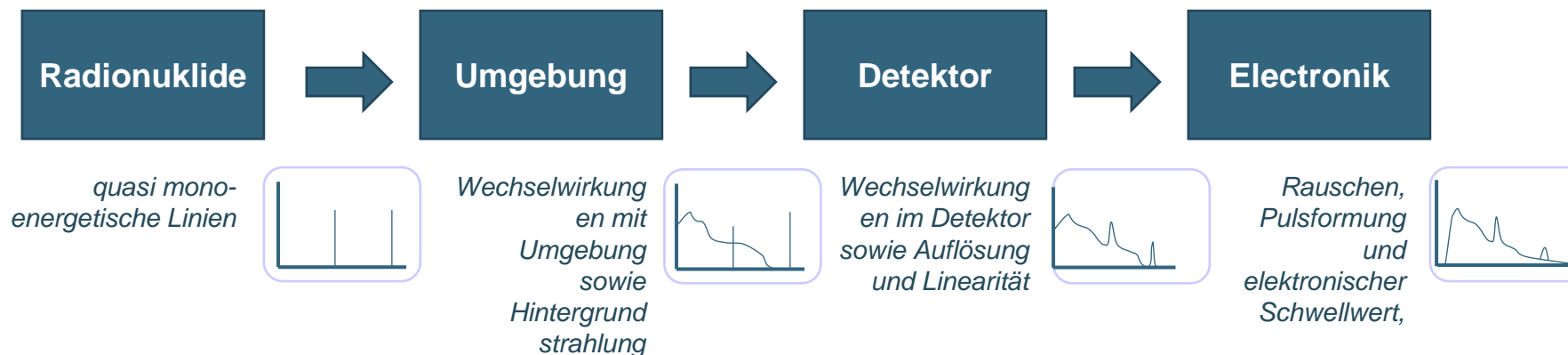
Quellen der Unsicherheiten	Standard Monitor	Mirion Lösung
Zählstatistik	Angepasster Algorithmus	
Meßempfindlichkeit	Häufige und komplexe Überprüfung und Kalibrierung	Automatische Effizienzstabilisierung, Vereinfachter Test und Kalibrierung
Wechselnde Nuklid Vektoren	Sicherheitsreserven	Spektroskopie in Verbindung mit der Überprüfung des Nuklidvektors
Inhomogene Materialdichte	Beschränkung des maximalen Meß- und Mittelungsgewichts	<b><u>Zukünftig</u></b> Analysis der räumlichen Verteilung von Dichte und Aktivität – Optimierung des verwendeten Objektmodells
Inhomogene Aktivitätsverteilung	Homogenitätstest	

# Agenda

- ❑ Freigabemessung – Methoden und Geräte
- ❑ **Gamma Spektrometrie mit Plastik Szintillatoren**
- ❑ Entwurf von Freimessanlagen mittels Monte Carlo Simulation
  - Objektmodelle
  - Kalibrierung
  - Inhomogenitätskorrektur
- ❑ Neue Mirion Freimessanlagen

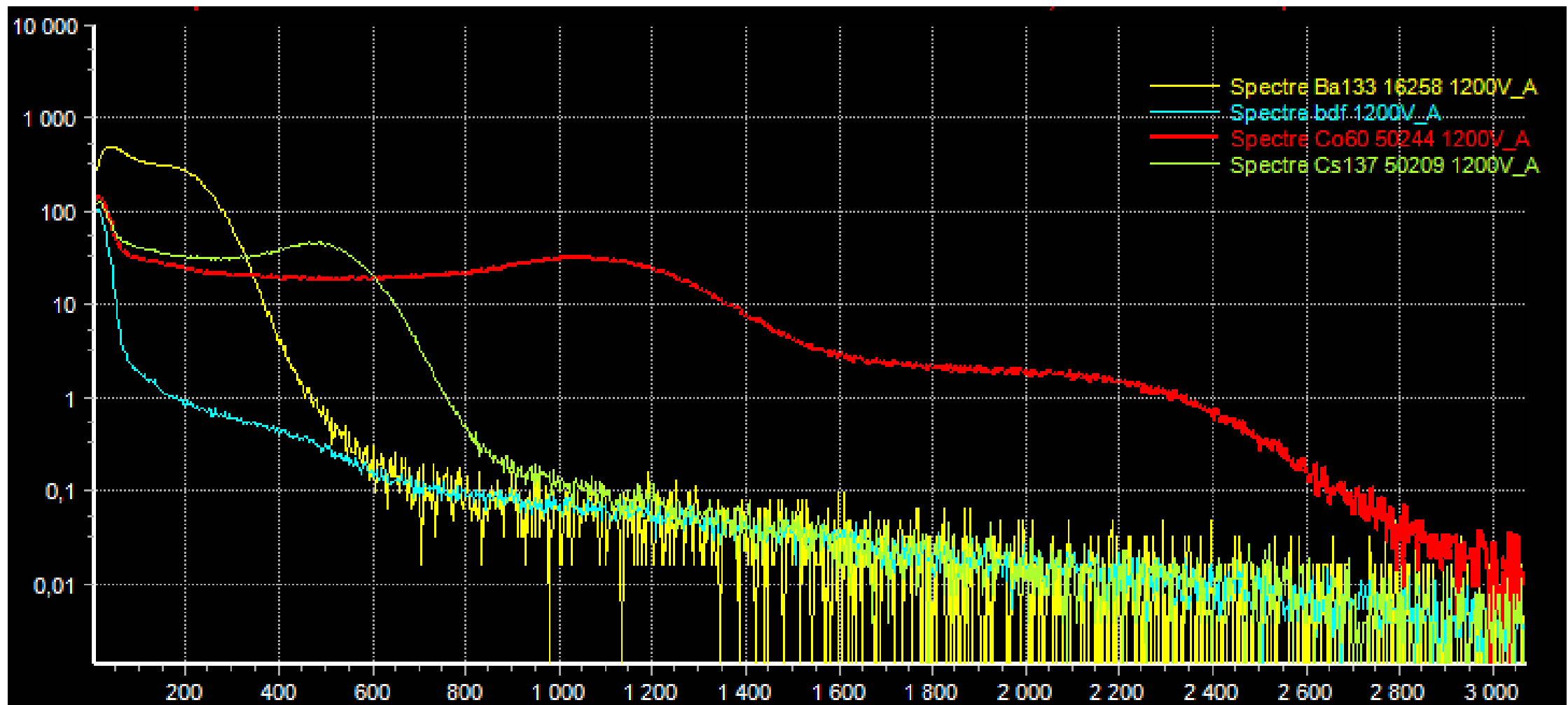
# EINFÜHRUNG IN GAMMA SPEKTROSKOPIE

- Ein Strahlungsspektrum ist ein Histogramm der absorbierten Energie im Detektor
- Für die meisten Detektorarten ist die kreierte elektrische Ladung im Wesentlichen proportional zur absorbierten Energie
- Für jedes Ereignis im Detektor wird die Ladungsmenge gemessen und der entsprechende Kanal im Histogramm inkrementiert
- Das Spektrum drückt die Anzahl der Interaktionen pro Zeiteinheit und deren Verteilung der absorbierten Energie.
- Das Energiespektrum informiert damit über vorhandenen Radionuklide und die komplexen Wechselwirkungen der Gamma Photonen mit der Umgebung und dem Detektor



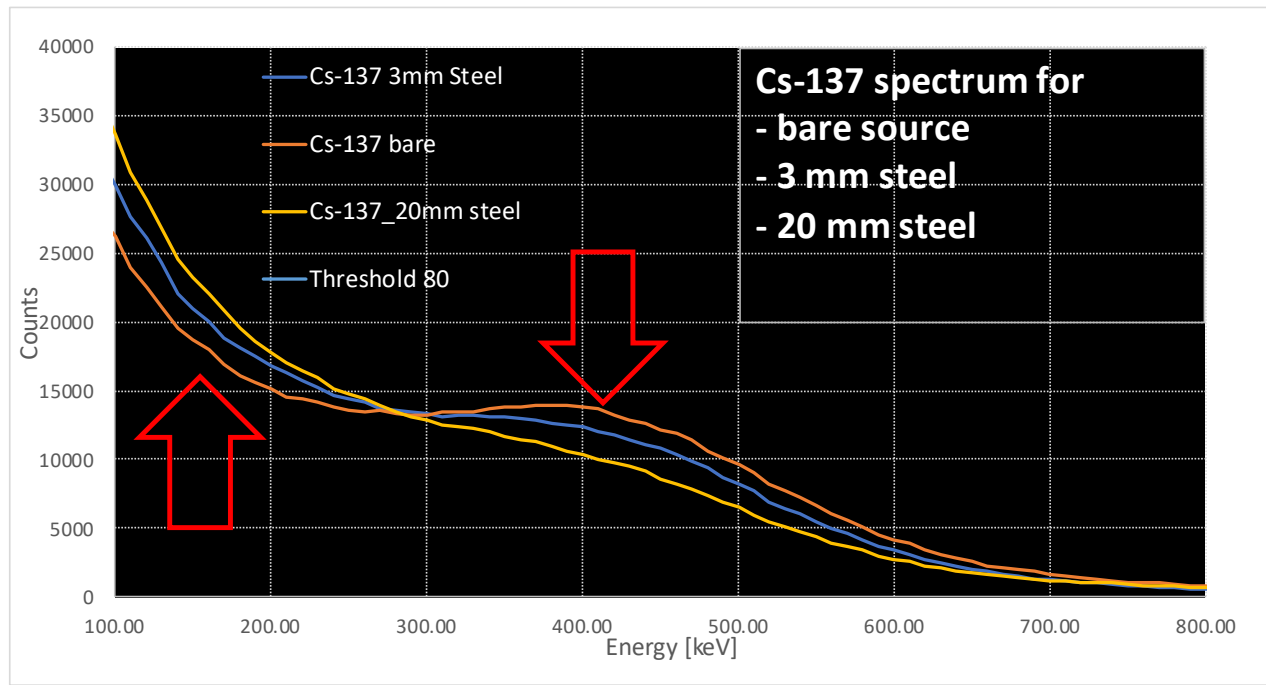


# Plastik Szintillatoren - Beispiel Spektren



*Hintergrund, Ba-133, Cs-137, Co-60 Spektren Beispiele  
( 450\*350\*50mm Plastik Detektor mit 50mm Blei Abschirmung)*

# Spektrometrie mit Plastiksintillatoren - Anwendungen 1/3



## **Beispiel 1: Gewichtskorrektur von LNC-Faktoren**

Die Spektrumsform ändert sich mit der Objektdichte und -geometrie.

Durch Streuung werden die Zählwerte in Richtung niedrigerer Energien nahe der Schwelle neu verteilt. Einzelschwellen-Zählsysteme benötigen eine nahezu perfekte Verstärkungsstabilität.

Dies ist umso kritisch für niederenergetische Gammastrahler wie Ba-133!

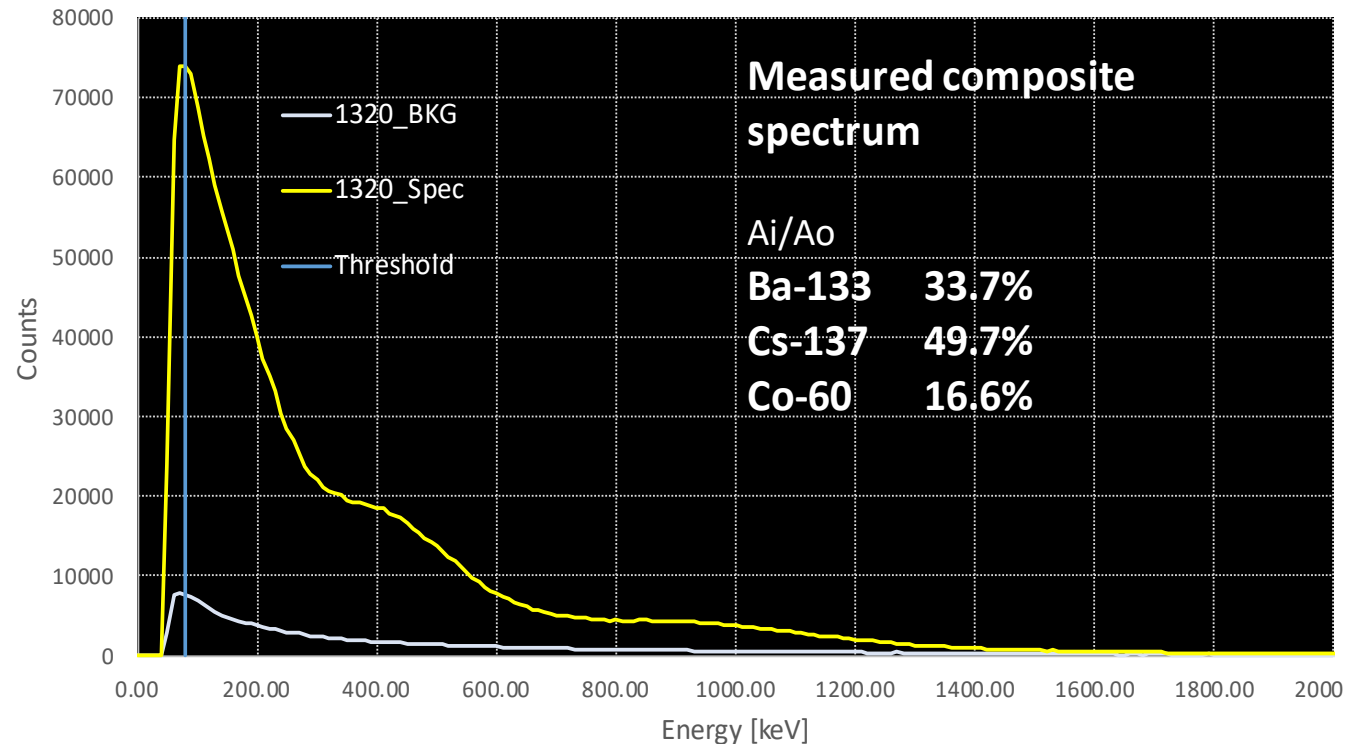
**Die Spektralanalyse erhöht die Robustheit der Gewichtskorrektur der LNC-Faktoren.**

*Gemessene, normierte Cs-137 Spektren für unterschiedliche Objekt Dichten*

## **Die Spektralanalyse an Kunststoff-Szintillationsdetektoren ermöglicht oder erleichtert:**

- Die Gewichtskorrektur der Detektionseffizienz,
- Die Kompensation der dichteinduzierten Verformung des Nuklidspektrums (LNC-Faktoren =  $f(\text{Gewicht})$ ),
- Aktivitätsmessungen von leichten Objekten mit geringer Konservativität.

# Spektrometrie mit Plastiksintillatoren - Anwendungen 2/3



## Beispiel 2: Verifizierung des deklarierten NucVec

Ein gemischtes Spektrum ist die lineare Überlagerung des Hintergrunds und der Elementarspektren.

Die NucVec-Verifikation besteht im Vergleich des gemessenen Nettospektrums mit einer simulierten Verteilung mit dem deklarierten Nuklidvektor.

**Richtiger NucVec deklariert → Freimessung**

**Falscher NucVec deklariert → Warnung**

(35% Co-60, 30% Ba-133, 35% Cs-137)

## Korrekturvorschlag für den Nuklidvektor:

28.56%	Ba-133	53.87%	Cs-137
17.58%	Co-60		

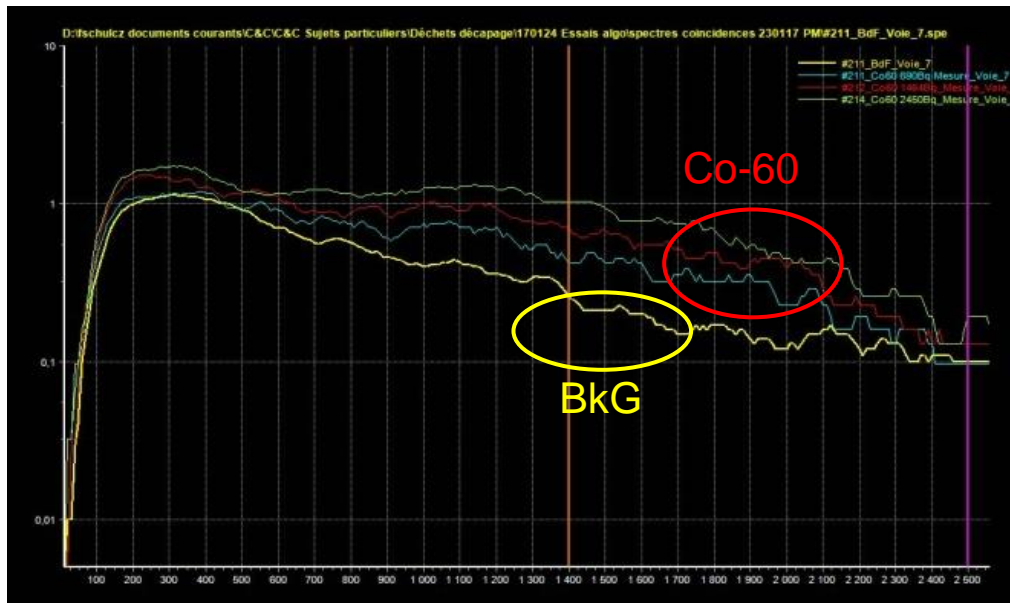
**Die Spektralanalyse ermöglicht eine Echtzeit-Plausibilitätsprüfung des deklarierten Nuklidvektors.**

**Diese Funktion ist besonders hilfreich für die Überprüfung des Co-60 / Cs-137-Verhältnisses.**

- Alle Nuklide sind im deklarierten NucVec enthalten - Vorschlag für einen verbesserten Vektor [Ci]
- Wenn Hauptnuklide im realen Spektrum fehlen – Mögliche Erkennung aber keine Korrektur möglich,
- Die Plausibilitätsprüfung ersetzt keine HPGe-Detektoren, hilft aber, Fehler zu erkennen...

# Spektrometrie mit Plastiksintillatoren - Anwendungen

3/3

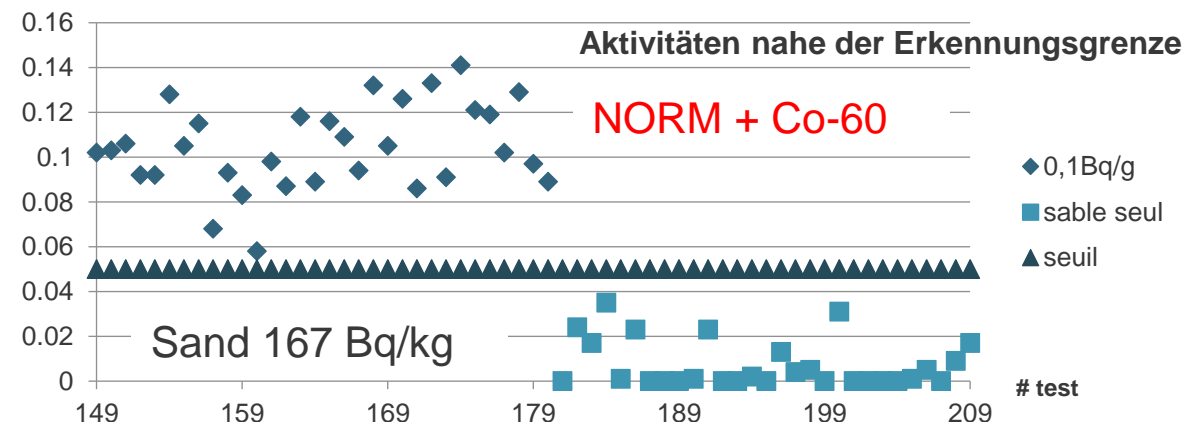


Koinzidenzspektren von NORM with Co-60 Spuren

Die **Spektralanalyse** in Kombination mit **Koinzidenz** ermöglicht den Nachweis von **Co-60** Spuren in hochaktivem **NORM**-Material.

## Beispiel 3: Co-60-Detektion in NORM

Beton hat häufig eine NORM-Aktivität nahe oder über 0,1 Bq / g. Die Compton-Kanten von K-40 und Co-60 liegen sehr dicht beieinander (für Plastik Szintillatoren ...). Koinzidenzmessung in einer 4 $\pi$ -Geometrie in Kombination mit Spektralanalyse ermöglicht die Co-60-Aktivität in NORM-Material unabhängig von seinem Spektrum und dem BkG zu bestimmen, inklusive der Berechnung von Unsicherheit und Überdeckungsintervall. Zusätzliche Analysen passen das Rechenmodell an die tatsächliche NORM-Zusammensetzung und ermöglichen es, verdächtige Spektren zu kennzeichnen.



# Vergleich von Spektrometrie mit Zählmodus

1/2

Item	Spektrometrie Modus		Zählmodus	
<b>NORM Kompensierung</b>	Bessere Genauigkeit der LNC-Faktoren und automatische Korrektur der Autoabsorption für alle internen Quellen, inklusive NORM.	+	Höhere Unsicherheiten, Berechnung der NORM Autoabsorption schwieriger.	-
<b>Energiekorrektur der Effizienz (LNC)</b>	Höheres Signal-Rausch-Verhältnis zur Effizienzkorrektur und erhöhte Robustheit gegenüber Verstärkungsinstabilitäten.	++	Die Energiekorrektur auf LNC-Basis erfordert eine hervorragende Stabilität der Energieverstärkung.	-
<b>Koinzidenz</b>	Koinzidenz + spektrale Analyse bei Co-60 Messungen in NORM Material.	+++	Nicht machbar	---
<b>Nuklid Vektor Überprüfung</b>	NucVec Überprüfung von Cs-137 / Co-60 Mischungen → Reduzierte Überschätzung	+++	Nicht machbar	---
<b>Wartung und Effizienzstabilität</b>	Automatische Stabilisierung der Detektorverstärkung. Die Spektrenanzeige erleichtert die Kalibrierung und Wartung	+++	Eine automatische Verstärkungsstabilisierung ist nicht möglich. Notwendigkeit einer reproduzierbaren Testgeometrie	---
<b>Gewichts-kompensierte LNC Faktoren</b>	Automatische Gewichtskorrektur der LNC-Faktoren und Kalibrierung basierend auf Simulationsmodellen	++	Langwierige Kalibrierungsverfahren mit Dummy-Objekten führen zu übermäßigen Konservativitäten	-
<b>Kalibrierung der Energieverstärkung</b>	Einfacher Wartungsvorgang, nur eine Quelle des Referenznuklides nötig.	+++	Iteratives Verfahren mit mehreren Quellen unter Verwendung von spezifischen Quellenhaltern (Stahlbox).	-

# Vergleich von Spektrometrie mit Zählmodus

2/2

Freimessanlagen arbeiten seit mehr als 20 Jahren im Zählmodus und zeigen sehr gute Stabilität und Reproduzierbarkeit.

**Der Hauptzweck der Einführung der Spektrometrie mit Kunststoff-Szintillatoren besteht darin, die Robustheit zu verbessern und Unsicherheiten zu verringern, die eine Freimessung ermöglichen, die näher an den gesetzlichen Freigabegrenzen liegt.**

In Kombination mit dem simulationsbasierten Monitordesign erleichtert es auch die Kalibrierung während der Wartung, ermöglicht neue Funktionen und verbessert die Rückverfolgbarkeit.



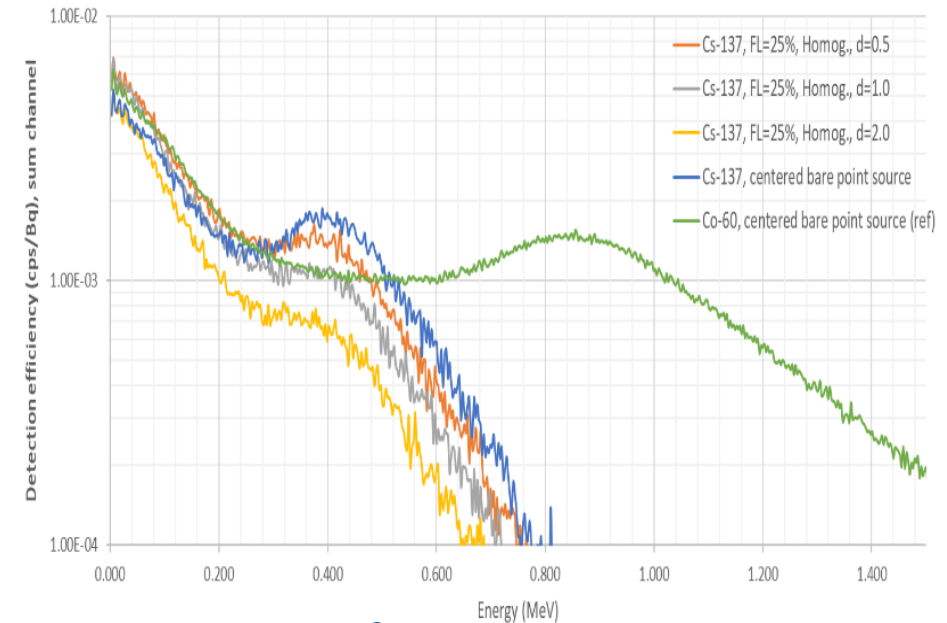
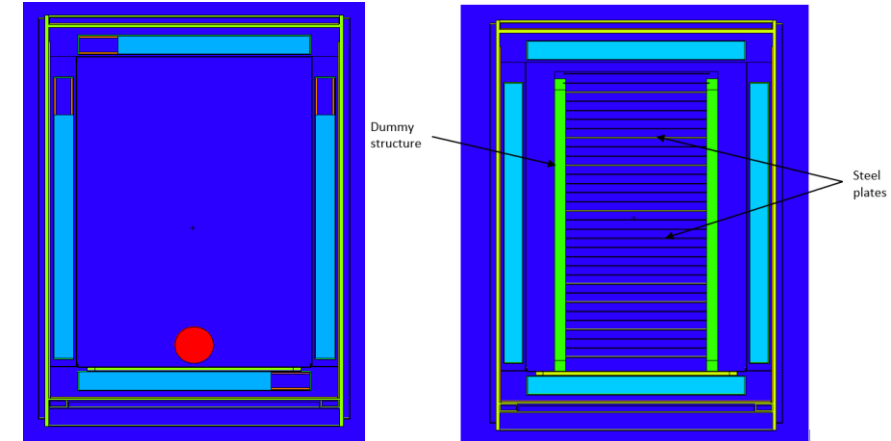
# Agenda

- ❑ Freigabemessung – Methoden und Geräte
- ❑ Gamma Spektrometrie mit Plastik Szintillatoren
- ❑ **Entwurf von Freimessanlagen mittels Monte Carlo Simulation**
  - Objektmodelle
  - Kalibrierung
  - Inhomogenitätskorrektur
- ❑ Neue Mirion Freimessanlagen

# Monte Carlo – was ist das?

- Eine gegebene Geometrie wird durch Zellen beschrieben, die jeweils mit einem Material einer definierten Dichte und Zusammensetzung gefüllt sind.
- Ausgewählte Zellen emittieren (in rot), in unserem Fall Photonen mit einer bestimmten Energieverteilung.
- Die Wechselwirkungen jedes emittierten Photons innerhalb der Grenzen der definierten Geometrie werden einzeln bis zu seiner Absorption oder seinem Austritt berechnet.
- Sekundäreffekte wie die Lichtsammeleffizienz eines Szintillators werden durch Korrekturverteilungen berücksichtigt - keine gekoppelte Simulation.
- Das Ergebnis ist die Überlagerung einer Vielzahl von Einzelereignissen, die beispielsweise ein Gammaspektrum ergeben.

**Mirion Technologies benutzt MCNP6.**



# Monte Carlo Modellierung - Ziele

- **Geringere Meßunsicherheiten**

- Wirklichkeitsnahe Geometriemodelle – Relativ einfache Anpassung an kundenspezifische Ladungen und Container und damit verbesserte Genauigkeit,
- Modelle für spezifische Dichte und Aktivitätsverteilungen.

- **Vereinfachter Kalibrierungs- und Zertifizierungsprozesse**

- Keine Notwendigkeit für einen Kalibrier-Dummy, nur ein weiteres, unwahrscheinliches Objekt
- Leicht reproduzierbare Referenzbedingungen: zentrierte Punktquelle, typischerweise Co-60,
- Keine Softwareänderungen - nur die Geometriemodelle werden an unterschiedliche Kammerabmessungen angepaßt
- Verbesserte Rückverfolgbarkeit – die Ergebnisdatei enthält auch die Spektren – eine Neuberechnung ist möglich,

- **Entwicklung neuer Meßmethoden**

- Analyse der Dichte- und Aktivitätsmatrizen,
- Anpassung an anisotrope Untergrund Bedingungen usw.

**Umfangreiche Nutzung von MC-Simulationen während der Produktentwicklung von CGO-Smart LNC und RTM644 Smart LNC.**

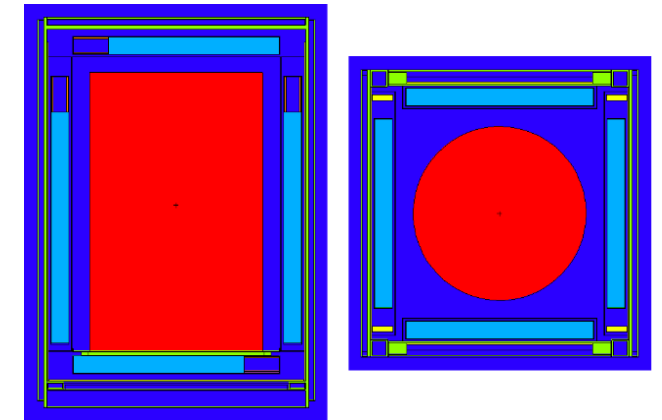
# Geometrie Modelle – Paradigmen Wechsel

- Dummy-Kalibrierung

- Ein Dummy-Objekt wird als repräsentativ für reelle Objekte angesehen aber, ein Dummy ist ein Dummy und damit nur ein anderes, unwahrscheinliches Objekt...
- Kalibrierungen sind aufwendig und schwierig zu überprüfen,
- Dies führt häufig zu großen Sicherheitsmargen, üblicherweise > 30%.

- Geometriemodelle

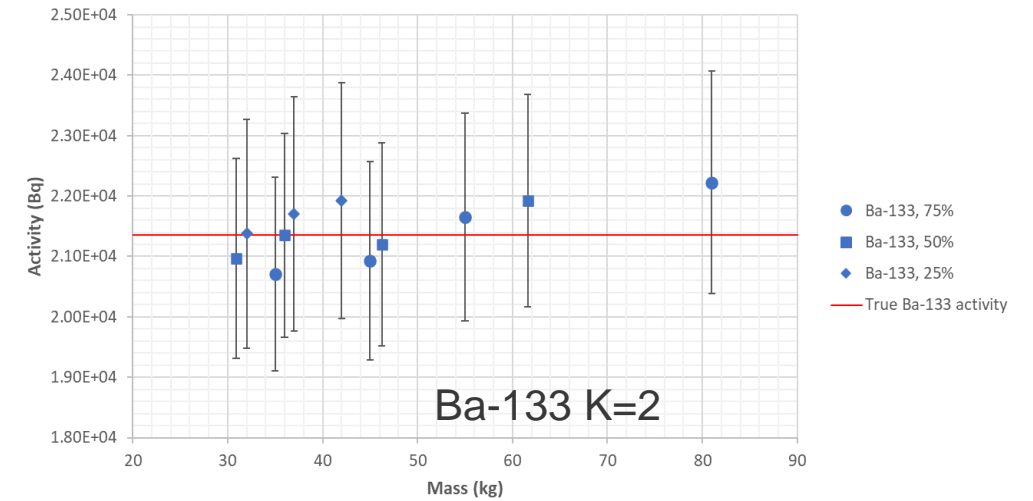
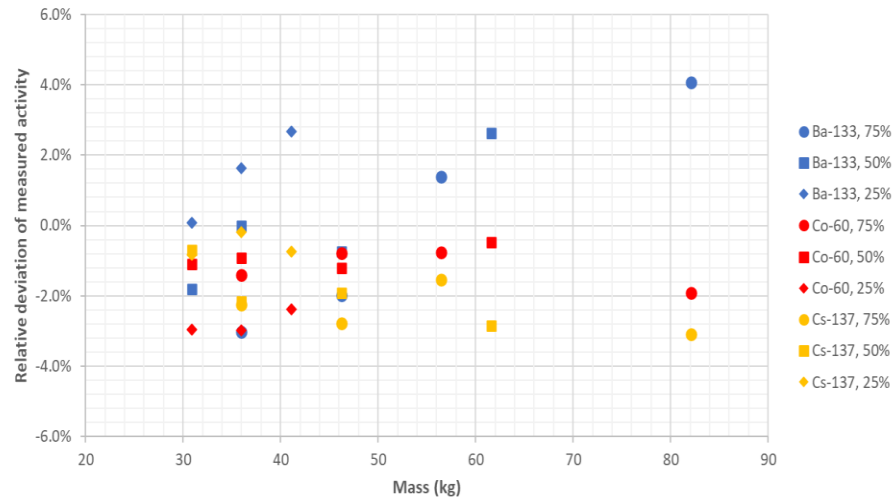
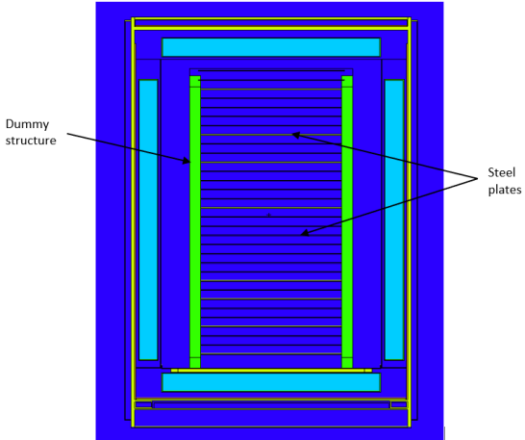
- **Ziel:** Verbesserte Präzision, geringere Konservativität
- MonteCarlo Simulationsmodell eines reellen Objekts,
- Ähnlicher Ansatz wie für ISOCS – Benutzung von gemessenen Kalibrierdaten zur Modellerstellung
- Einfache Kalibrierung und Überprüfung mit wirklichen Objekten,



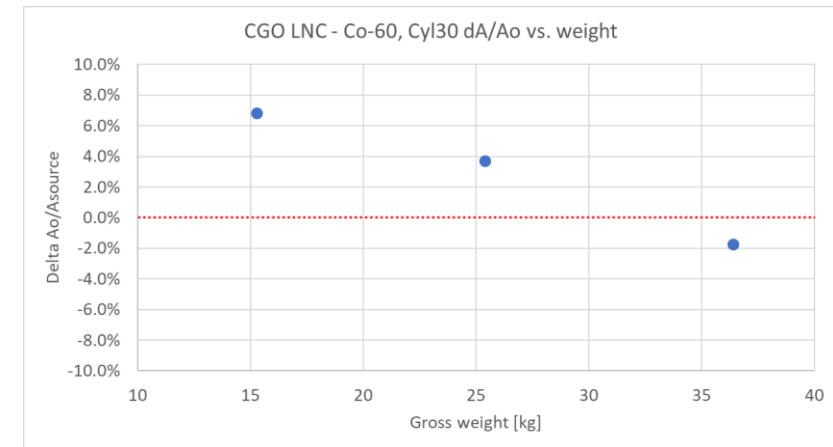
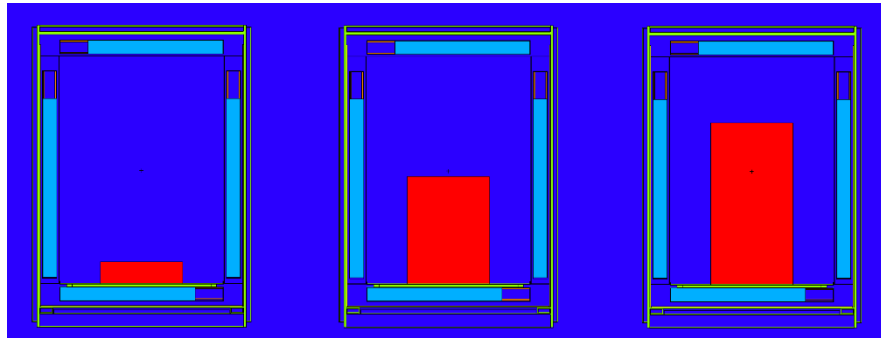
**Die Kalibrierung der Energieverstärkung ist von größter Bedeutung.**

# Objektmodell Überprüfung

Dummy

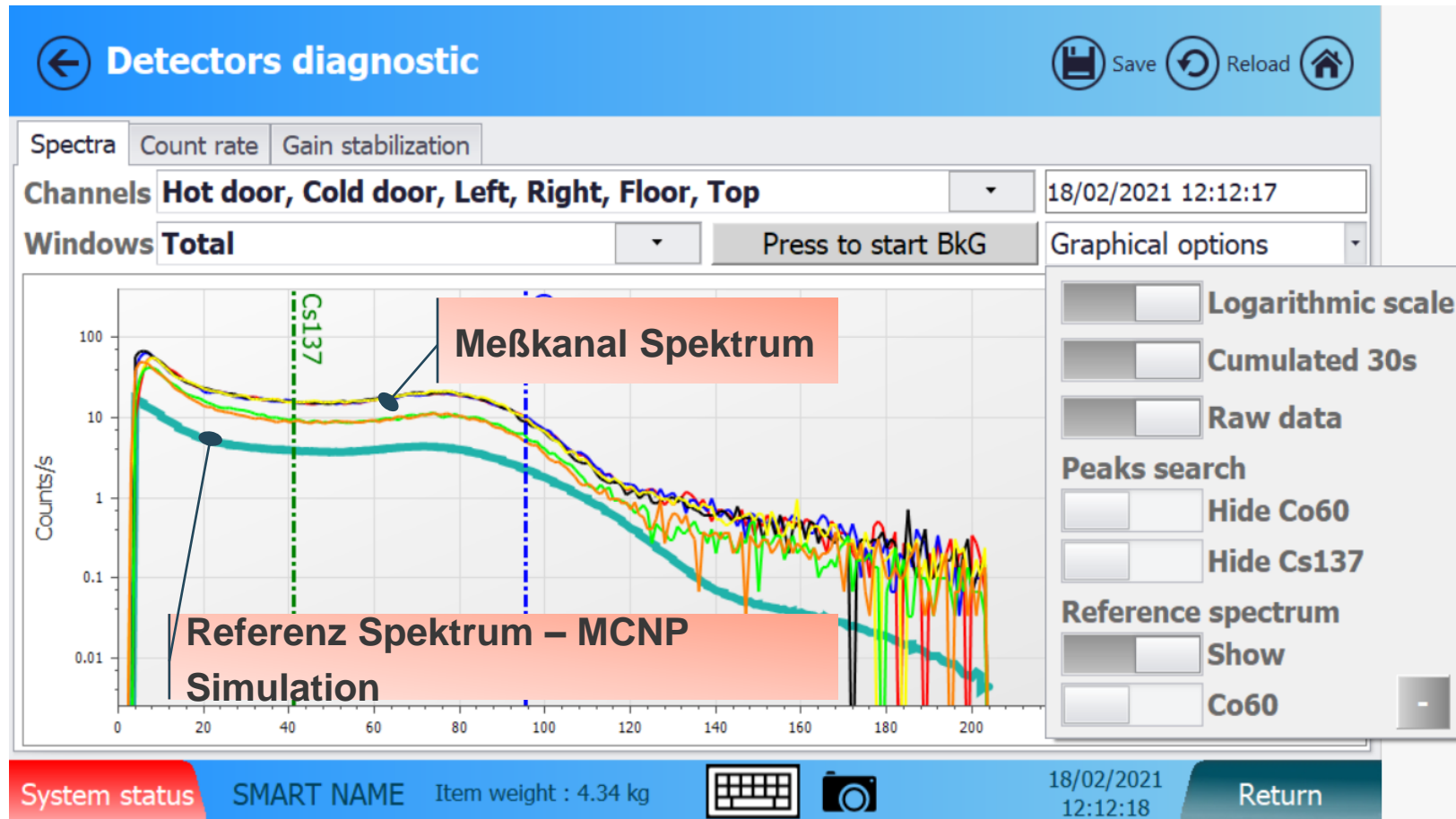


Zylinder 30 cm



Automatische Gewichts- und Füllhöhenkorrekturen:  $y >$  nahe der wahren Aktivität

# Kalibrierung der Energieverstärkung



- Der CGO-Smart LNC arbeitet im Spektrometrie -Modus
- Mit definierten Energiefenstern werden sowohl die Referenz Effizienz als auch die LNC-Faktoren direkt durch die Energieverstärkung definiert.
- Referenzgeometrie: zentrierte Punktquelle,
- Co-60 (1200 keV) für beste Genauigkeit der unteren Schwellspannung

**Kalibrierung = Überlagerung der gemessenen Spektren mit der Simulation**

**HV- und / oder Verstärkungs-Reglung wenn nötig**



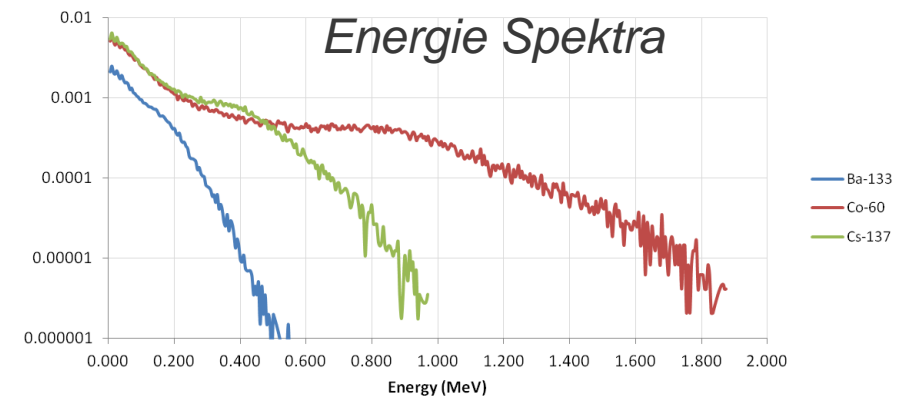
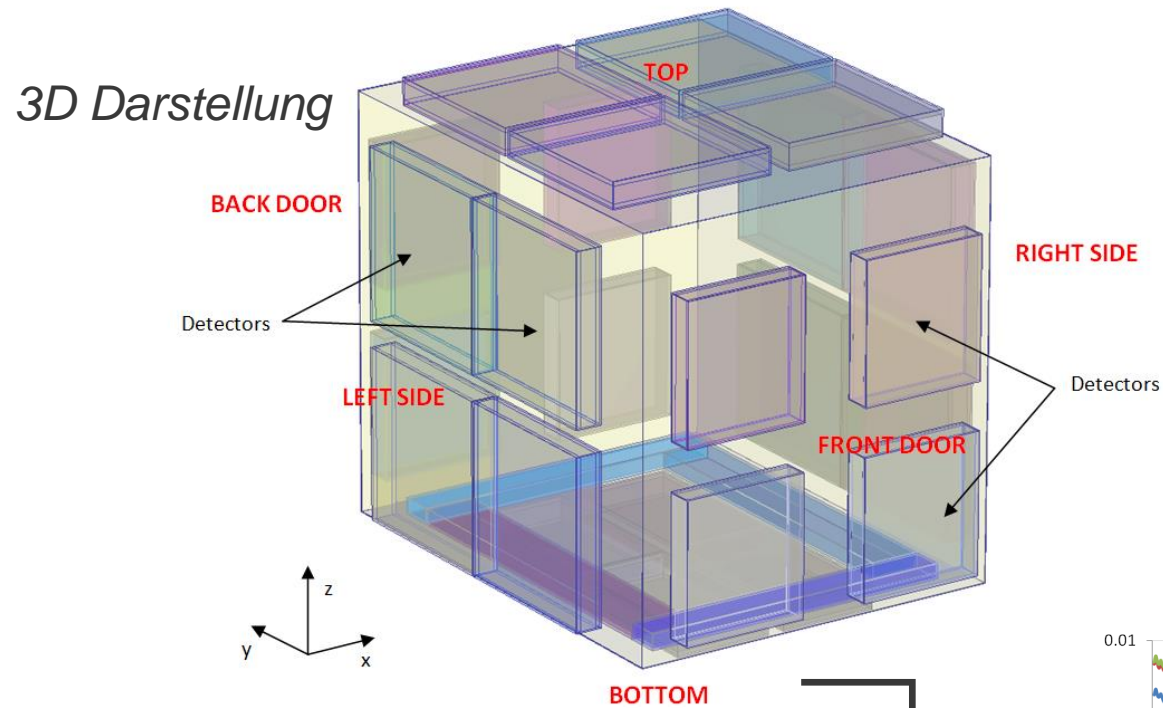
# Inhomogenitäten



**Eine weitere Ursache für Unsicherheiten für Aktivitätsmessungen in  $4\pi$  Freimessanlagen sind Inhomogenitäten in Aktivität und Dichte im Meßobjekt.**

Eine der heutigen Grundbedingungen für Freimessungen ist die Erfüllung des Homogenitätskriteriums. Konsequenzen sind zum Teil aufwendige Materialzerkleinerung und / oder verringerte Mittelungsmassen. Zusätzlich wird ein Homogenitätstest während der Messung durchgeführt.

# Modellierung der Freimessanlage RTM644



# Inhomogenitäten

Homogenitätskriterium & verringerte  
Mittelungsmassen

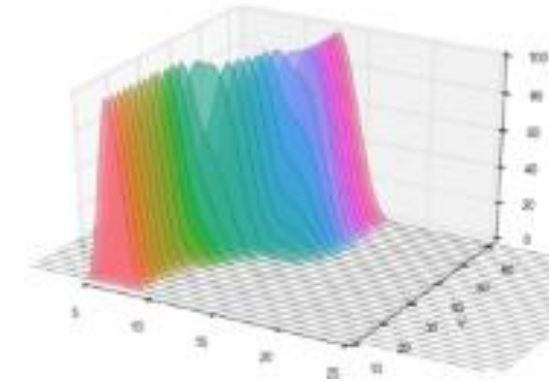


Verbesserte Homogenitätsanalyse und  
Modell-Anpassung

- Bekannte Behälterabmessungen, Füllhöhe und durchschnittliche Dichte
- Die Verwendung der **Tomographie in Kombination mit Spektrometrie** sowie MC-Simulations- und Optimierungsalgorithmen ermöglicht eine Abschätzungen sowohl der Dichte als auch der Kontaminationsverteilung in den Containersubvolumina (Voxel).
- Neuberechnung der globalen Aktivität anhand der verbesserten Geometriebeschreibung

Verfügbar Q1 / 22

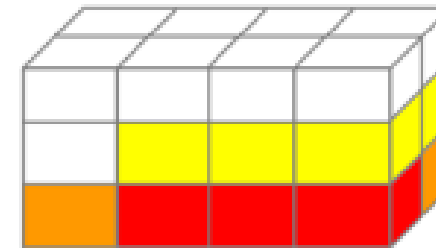
Eingabe: Spektren Matrix  
( $n$  Detektoren  $\times$   $m$  Energiekanäle)



Optimierungs-  
Algorithm



MC  
Modell  
NucVec



Aktivität & Dichte / Voxel



Ergebnis: Korrigierte Gesamtaktivität

# Agenda

- ❑ Freigabemessung – Methoden und Geräte
- ❑ Gamma Spektrometrie mit Plastik Szintillatoren
- ❑ Entwurf von Freimessanlagen mittels Monte Carlo Simulation
  - Objektmodelle
  - Kalibrierung
  - Inhomogenitätskorrektur
- ❑ **Neue Mirion Freimessanlagen**

# CGO-Smart™ LNC

Universaler, Gamma-Strahlungs-Monitor für **Kontaminations- und Freimessung**



CGO – 307 L

Compliant to  
ISO11929-2019  
and DIN 25457

- **Messung von oberflächen – und massebezogener Aktivität,**
- **Detektion of 150 Bq Co-60 in 10 s Messzeit bei 300 nSv/h UGnd**
- **6 Plastik Detektoren, 85% Deckungsgrad – spektrometrische Auslese**

## **Merkmale**

- LNC Effizienzkorrektur mit automatischer Gewichtskompensation,
- NORM und Untergrund Kompensation mittels Spektrometrie,
- Nuklid Tabelle und frei konfigurable Nuklid Vektoren,
- Konfigurierbare Objekt- und Materialbibliothek mit NORM,
- Nutzerspezifische Entsorgungspfade und zugehörige Freigabewerte,
- Abschirmung 25 mm Pb (50 mm Q2/2021), Waage, Kamera,
- Betriebssystem Windows10 IOT, Schnittstelle zu Waste Mgt. Systemen.

## **Spezial**

- **Koinzidenz Messung von Co-60 Spuren in NORM Material**
- **Nuklid Vektor Plausibilitäts Check und Korrekturvorschlag**
- **Objekt Modelle auf Simulation basierend – keine Dummies**
- **Homogenitäts Check für Freigabemessung**



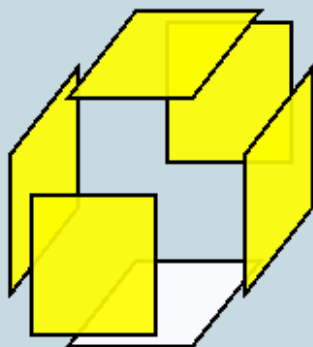
# Alarm Level Exceeded



Vector : **NV3**

Object Id. : **TEST-11223344**

Campaign Id. : -



Neutral with all filling levels

Measured Activity $y$ :	<b>44 958 Bq</b>	Uncertainty $u(y)$ :	<b>2 250 Bq</b>
Best estimator $y^{\wedge}$ :	<b>44 958 Bq</b>	Uncertainty $u(y^{\wedge})$ :	<b>2 250 Bq</b>
Detection limit $y_{\#}$ :	<b>76.1 Bq</b>	Decision threshold $y^*$ :	<b>34.6 Bq</b>
Total Equiv. Activity Limit :	<b>300 Bq</b>	Upper Conf. Range Limit $y_{\blacktriangleright}$ :	<b>49 400 Bq</b>
Mass Act. Limit :	<b>0.1 Bq/g</b> (Avg: 3.11 kg)	Activity $y_{\blacktriangleright}$ / Mass :	<b>15.873 Bq/g</b>
Surface Act. Limit :	<b>1 Bq/cm<sup>2</sup></b> (Avg: 300 cm <sup>2</sup> )	Activity $y_{\blacktriangleright}$ / Surface :	<b>164.55 Bq/cm<sup>2</sup></b>

**Display details**

**Inhomogeneity Error**

**Valid Nuclide Vector**

System status

CGO-19017317 Item weight : 3.11 kg



24/11/2020  
00:16:12

Administrator

**Deutsche Benutzeroberfläche verfügbar.**



# Neue Mirion Freimessanlagen



▶ **CGO-Smart LNC**

*Volume: 307 L*

**Verfügbar**



▶ **CPO-Smart LNC**

*Volume: 36 L*

**Verfügbar auf  
Projektbasis**



▶ **RTM661-Smart LNC**

*Volume: 440 L*

▶ **Verfügbar auf  
Projektbasis Q4/2021**

▶ **Serie: Q1/2022**

- Komplettes Angebot von modernen Freimessanlagen
- Gleiche Hardware- und Softwareplattform: Spektroskopie und Windows IoT



▶ **RTM644-Smart LNC**

*Volume: 1870 L*

▶ **Serie Q1/2022**

# RTM644-Smart™ LNC

- **Alle Funktionen des CGO-Smart LNC**

- Win10 IoT-Software
- Spektroskopie
- NORM-Kompensation und Verifizierung von Nuklidvektoren
- Modellbasierte Geometriekalibrierung
- Vereinfachte Wartung
- ...

- **Plus**

- Verbesserte Genauigkeit durch innovative Homogenitätsanalyse,
- Lernmodus für Hintergrundkompensierung,
- Traditionelle Dummy-Kalibrierung verfügbar für Rückwärtskompatibilität,
- Kontaminationstest Modus mit automatischer Gamma-Energie Korrektur.

**Verfügbar Q1 / 2022**

# Merci

Dr. Matthias Richter  
marichter@mirion.com