

AUFSPÜREN UND KLASSIFIZIEREN RADIOAKTIVER SUBSTANZEN MIT MINIATURISIERTEN NUKLID-IDENTIFIZIERENDEN GAMMASPEKTROMETERN

DETECTION AND CLASSIFICATION OF RADIOACTIVE MATERIALS USING MINIATURIZED NUCLIDE-IDENTIFYING GAMMA RAY SPECTROMETERS

G. Pausch, J. Stein, S. Krüger, A. Kreuels, M. Kreuels, R. Lentering, F. Lück, F. Platte,
K. Römer, K. Saucke, F. Scherwinski, N. Teofilov
target systemelectronic gmbh, Kölner Str. 99, D-42651 Solingen

Zusammenfassung

In den letzten Jahren wurden von mehreren Firmen robuste Gammaskpektrometer im Format von Handmessgeräten entwickelt. Diese gestatten auch Laien das Aufspüren und Klassifizieren radioaktiver Substanzen vor Ort. Der *identiFINDER*[®] ultra ist ein solches Gerät, ein Radionuclide Identification Device (RID). Es stellt drei Grundfunktionen zur Verfügung: Anzeige der aktuellen Ortsdosisleistung, Quellensuche, Quellenklassifizierung. Dabei wird schon nach kurzer Messzeit angezeigt, welches Nuklid oder Nuklidgemisch für den erhöhten Strahlungspegel verantwortlich ist. So kann man vor Ort Informationen erhalten, die noch vor wenigen Jahren nur durch Untersuchung von Proben in gut ausgestatteten Labors gewonnen werden konnten.

Der *identiFINDER* nutzt innovative Technologien, für die mehrere Patente angemeldet wurden. Messtechnischer Kern ist ein LED-stabilisiertes NaI(Tl)-Szintillationsspektrometer mit digitaler Signalverarbeitung (DSP). Eine komplexe Software sorgt für die automatische Stabilisierung, Kalibrierung und Analyse der gemessenen Spektren. Das Gerät kann selbst sehr schwache Strahlungsquellen identifizieren und eignet sich deshalb besonders gut für Untersuchungen im Umweltbereich.

A few companies have developed and produced gamma ray spectrometers that are robust and small for optimized usage as hand held devices. Those devices are designed in a way that even non-experts can find and classify radioactive substances in the field. The *identiFINDER*[®] ultra is one of those instruments, classified as Radionuclide Identification Device (RID). It performs three main functions: display of the actual present dose rate, localization of sources, and classification of the radioactive sources (after a short period of time, the nuclide or the mixture of nuclides present will be displayed). In that way it is now possible to gather reliable information that – just a couple of years ago – would have been provided by sending samples to specialized laboratories, only.

Cutting-edge technologies (several patents pending) are realized in the *identiFINDER*. The basic parts of which are composed of an LED stabilized NaI(Tl) spectrometer and a digital signal processing (DSP) unit. Extensive software controls the automatic stabilization, calibration and analysis of the acquired gamma ray spectra. Even weakest radioactive sources can be identified making the device essential for applications in the environmental research.

1 Der identiFINDER[®] ultra – ein Radionuclide Identification Device (RID)

Der Terroranschlag auf das New Yorker World Trade Center am 11. September 2001 hat in der Öffentlichkeit und Politik den Blick für Gefahren, die sich aus einem Missbrauch radioaktiver Materialien ergeben können, dramatisch geschärft. Dadurch wurde auch die Entwicklung völlig neuer Strahlungsmessgeräte angestoßen, die nicht nur für die Terrorabwehr von Interesse sind. Unter anderem wurden so genannte Radionuclide Identification Devices (RID) entwickelt, die Strahlungsquellen aufspüren, identifizieren und klassifizieren können [1]. Für diese Geräteklasse gibt es mittlerweile bindende Standards [2][3].

Der identiFINDER[®] ultra [4] ist ein RID auf der Basis eines digitalen NaI(Tl)-Gamma-spektrometers. Abbildung 1 zeigt ein Schnittbild und die Gesamtansicht des Geräts. Der Szintillationsdetektor, bestehend aus einem $\text{Ø}38\text{mm}\times 51\text{mm}$ NaI(Tl)-Kristall und einem $1\frac{1}{4}$ "-Photomultiplier, kann Gammastrahlung bis 3 MeV sehr effektiv nachweisen. Das Energiespektrum der Gammastrahlung wird von einem Digitalen Signalprozessor (DSP) kontinuierlich gemessen und analysiert. Es dient zur Ermittlung der momentanen Ortsdosisleistung und zum Identifizieren der Strahlungsquelle.

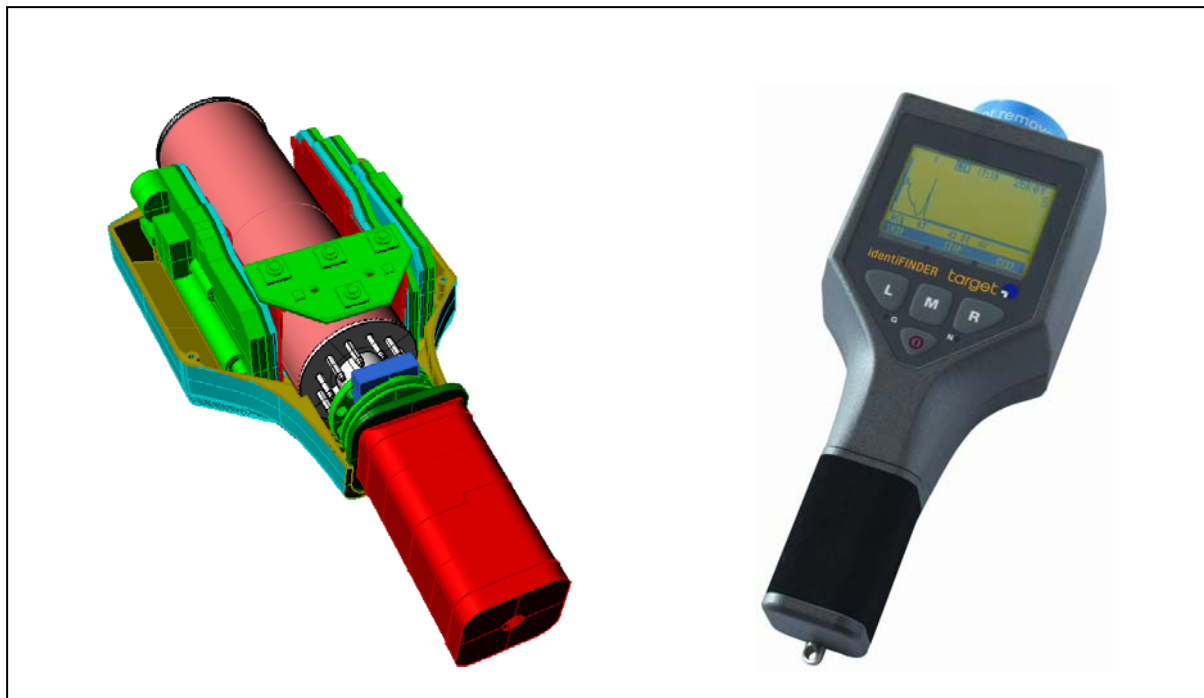


Abb. 1: Der identiFINDER[®] - Schnittbild und Ansicht des Geräts.

Der Nutzer merkt nichts von den im Hintergrund ablaufenden komplexen Prozessen. Das Gerät wird, ähnlich wie ein einfaches Dosimeter, mit nur drei Tasten bedient. Die Grundfunktionen (EASY Modes) lassen sich mit einem Tastendruck aufrufen (Abbildung 2):

- Im DOSE Mode wird die momentane Ortsdosisleistung angezeigt und in Form eines Balkens grafisch dargestellt. Beim Überschreiten vorgegebener Dosis- und/oder

Dosisleistungsgrenzwerte erfolgt zunächst eine Warnung, dann eine Alarmierung durch akustische und optische Signale sowie einen Vibrationsgeber.

- Im FINDER Mode führt der identiFINDER[®] ultra den Nutzer mit Hilfe optischer, akustischer und mechanischer (Vibrations-)Signale zur Strahlungsquelle.
- Ist die Quelle gefunden, dann kann sie im IDENT Mode analysiert, identifiziert und klassifiziert werden. Hierzu muss der Nutzer den Detektor eine Minute lang auf die Strahlungsquelle richten. Dabei wird ein Energiespektrum gemessen. Die Ausgabe der Resultate erfolgt sofort nach Abschluss der Messung in Form einer Nuklidtabelle. Das Spektrum kann für spätere Analysen und zur Dokumentation gespeichert werden.

Weitere Funktionen wie die grafische Darstellung von Spektren oder der Zugriff auf Einstellungen, zum Beispiel Alarmschwellen und Alarmindikatoren, sind passwortgeschützt und nur für qualifizierte Nutzer über ein OPTIONS Menü erreichbar (EXPERT Modes).

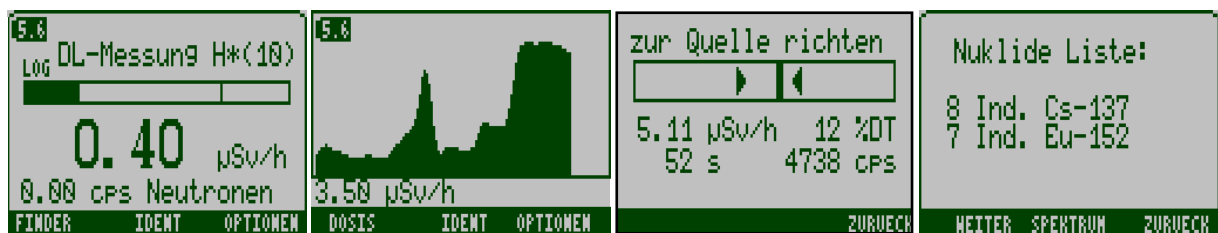


Abb. 2: Grundfunktionen des identiFINDER[®] ultra – Screen Shots vom Display (v.l.n.r.)

- DOSE Mode – Anzeige der momentanen Ortsdosisleistung
- FINDER Mode – optische und akustische Signale zur Quellenlokalisierung
- IDENT Mode – Aufnahme eines Spektrums zur Nuklidanalyse
- IDENT Mode – Anzeige der Ergebnisse (hier: eine gemischte Quelle; alle gefundenen Nuklide als „Ind.“=industriell klassifiziert)

Die wichtigsten Anwendungen sind derzeit im Bereich der Landessicherheit (Homeland Security) zu finden. Um illegalen Handel mit radioaktivem Material zu erkennen und zu verhindern, werden Zoll- und Sicherheitsbehörden zunehmend mit RID ausgestattet, die den Träger (zum Beispiel den Zollbeamten) im Falle eines erhöhten Strahlungspegels alarmieren und ihm helfen, die Strahlungsquelle zu finden und ihr Gefahrenpotenzial vor Ort einzuschätzen. Das ist notwendig, weil sich die meisten gefundenen Quellen als harmlos erweisen. So sind Patienten noch Tage nach einer nuklearmedizinischen Untersuchung oder Therapie wandelnde Strahlungsquellen. Alte Uhren oder andere Instrumente mit Leuchtanzeigen, Rauchmelder, Düngemittel, Porzellan, Schweißelektroden, farbige Gläser und andere Handelsgüter enthalten häufig natürliche radioaktive Substanzen. Würde jede Erhöhung des Strahlungspegels einen Alarm auslösen, wären Grenzübergangsstellen bald nicht mehr arbeitsfähig. Andererseits müssen Substanzen, von denen eine Gefahr ausgeht oder die im Verdacht des Mißbrauchs stehen, selbst in kleinsten Mengen sicher erkannt werden – vor allem spaltbares Material, das in Bomben eingesetzt werden könnte.

Die Geräte können aber auch im Ereignisfall wertvolle Daten liefern. Mit ihrer Hilfe wird das Einsatzpersonal in die Lage versetzt, radioaktive Kontaminationen zu finden und von natürlichen Strahlungsquellen zu unterscheiden, sie schnell zu identifizieren und mit diesem Wissen angemessen zu handeln. Je schneller fundierte Entscheidungen möglich sind, desto

effektiver werden Maßnahmen zur Schadensbegrenzung sein. Auch der routinemäßige Einsatz im Feld bietet sich an, beispielsweise bei der Erhebung von Daten zur Umweltradioaktivität. Dank innovativer, in modernen RID implementierter Technologien kann man heute vor Ort Informationen erhalten, die noch vor wenigen Jahren nur durch Untersuchung von Proben in gut ausgestatteten Labors gewonnen werden konnten.

2 Innovative Technologien im identiFINDER® ultra

2.1 Digitale Signalverarbeitung

Aus messtechnischer Sicht ist der identiFINDER® ultra ein *digitales* Gammaskpektrometer. Hier wird, im Gegensatz zum weit verbreiteten „klassischen“ (analogen) Spektrometer, das Detektorsignal nicht mit analogen elektronischen Mitteln gefiltert und geformt, sondern direkt am Detektor oder Vorverstärker mit einem Flash ADC abgetastet (digitalisiert). Mit Hilfe mathematischer Verfahren (Deconvolution [5][6], Inverse Filtering [7]) kann man aus der so gewonnenen Zahlenfolge das originale physikalische Signal, die zeitlich scharfe Energie deposition im Detektor, rekonstruieren. Auf dieses Signal werden dann digitale Filter mit einer zeitlich begrenzten Impulsantwort (Finite Impulse Response, FIR) angewandt. Damit umgeht man das bei analogen Spektrometern hinlänglich bekannte Problem einer lastabhängigen Nulllinie [7], und die Energieauflösung des Spektrometers bleibt auch bei extrem hoher Last erhalten [8].

Ein weiterer Vorteil der digitalen Signalverarbeitung besteht darin, dass mit der Zahlenfolge der Abtastergebnisse (Samples) auch der *zeitliche Verlauf* des Detektorsignals für eine Analyse zur Verfügung steht. Impulsformdiskriminierung kann per Software durchgeführt werden und erfordert keine zusätzliche Hardware. Im identiFINDER® ultra wird jedes Detektorsignal auch hinsichtlich der Impulsform analysiert. Dadurch können Signale, die durch Rauschen oder Pileup verfälscht wurden, sicher erkannt und unterdrückt werden. Die digitale Impulsbreitenanalyse (digital Pulse Width Analysis, dPWA [8]) liefert außerdem die zur Detektorstabilisierung notwendigen Messwerte der effektiven Szintillatortemperatur.

2.2 Spektrenanalyse (Template Matching)

Die Energien und Intensitätsverhältnisse der bei radioaktiven Zerfällen emittierten Gammaquanten hängen von der Kernstruktur des Tochterkerns, also von dessen Ladungs- und Massenzahl, ab. Sie sind damit nuklidspezifisch. Das gemessene Energiespektrum erlaubt deshalb eine Identifikation der Zerfallskette. Allerdings ist es nicht einfach, geeignete Algorithmen zur Auswertung der komplexen Messspektren zu entwickeln, welche auch noch wesentlich durch den Detektionsprozess und die Detektoreigenschaften beeinflusst sind.

In vielen RID wird das Spektrum analysiert, indem Peaks (Gammalinien) gesucht und deren gemessenen Energien und Intensitätsverhältnisse mit einem Linienkatalog verglichen werden. Der identiFINDER® ultra nutzt ein anderes Verfahren, das so genannte Template Matching. Dabei nimmt man an, dass das gemessene Spektrum als Linearkombination bekannter Spektren, der sogenannten Templates, darstellbar ist, und sucht mit mathematischen Verfahren nach der „besten“ Darstellung. Dieses Verfahren liefert auch bei schlechter Statistik, also kurzer Messzeit, und der für NaI(Tl)-Detektoren charakteristischen mäßigen

Energieauflösung (etwa 7% bei 662 keV) noch sehr gute Resultate. Abbildung 3 zeigt ein typisches Beispiel. Ein mit Kaliumchlorid (KCl) gefüllter Becher und ein Schlackestein wurden mit dem identiFINDER[®] ultra ausgemessen, das Messspektrum nach der üblichen Messzeit von 60 Sekunden analysiert. Das radioaktive ⁴⁰K im Kaliumchlorid konnte sicher identifiziert, eine Spur von ²²⁶Ra im Schlackestein noch nachgewiesen werden. Die (äußerst schwache) Strahlungsquelle wurde als NORM – Naturally Occuring Radioactive Material – klassifiziert.

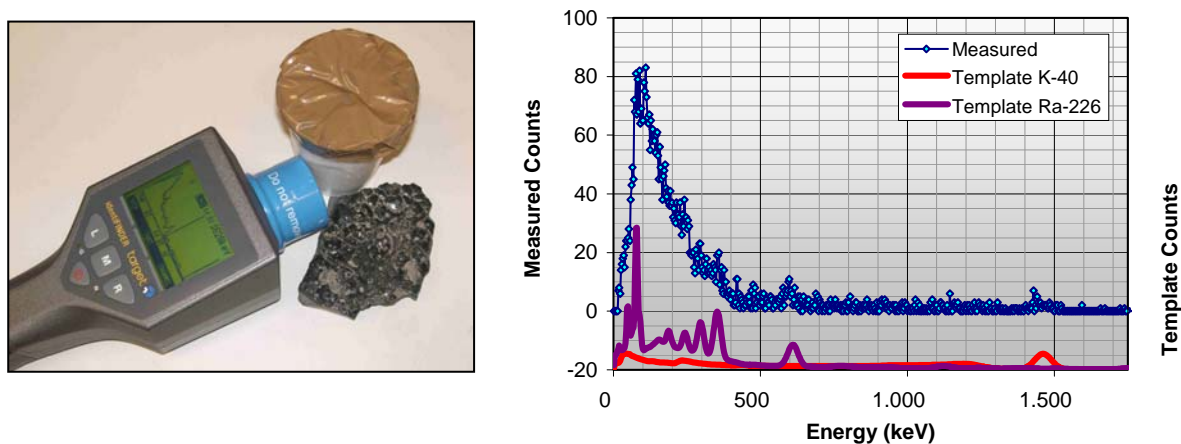


Abb. 3: Beispiel einer Nuklidanalyse – die Grafik zeigt ein mit dem identiFINDER[®] ultra gemessenes Spektrum und die Templates der im Spektrum identifizierten Nuklide

2.3 ultra-Detektorstabilisierung

Die interne Verstärkung von NaI(Tl)-Detektoren ändert sich leider stark mit Temperatur und Last (Zählrate). Zur Nuklidanalyse ist aber eine kalibrierte, stabile Energieskala des Gammaspektrums erforderlich, so dass der Detektor ausreichend gut stabilisiert werden muss. Das Stabilisierungsverfahren des identiFINDER[®] ultra kombiniert zwei innovative Techniken, die einander ergänzen:

- Der Photomultiplier wird mit Hilfe einer gepulsten Referenzlichtquelle, einer Leuchtdiode (LED), kontinuierlich stabilisiert. Die LED generiert pro Sekunde mehrere hundert Lichtblitze bekannter Helligkeit, die vom Photomultiplier parallel zu den Gammasignalen des Szintillators verarbeitet werden. Die Unterscheidung zwischen LED- und Gammasignalen erfolgt durch digitale Impulsbreitenanalyse (dPWA) [8].
- Eine numerische Korrektur sorgt für die Kompensation der Effekte, die aus der Temperaturabhängigkeit der Lichtausbeute des Szintillators resultieren. Die hierfür benötigte effektive Szintillortemperatur wird aus der Impulsform der Gammasignale [9] mit Hilfe der dPWA [8] abgeleitet.

Mit diesem durch mehrere Patentanmeldungen geschützten Verfahren lässt sich die Position eines Referenzpeaks so stabilisieren, dass selbst bei schnellen und starken Temperatur- oder Laständerungen die Driften in der Regel $\pm 1\%$ nicht übersteigen (Abbildung 4).

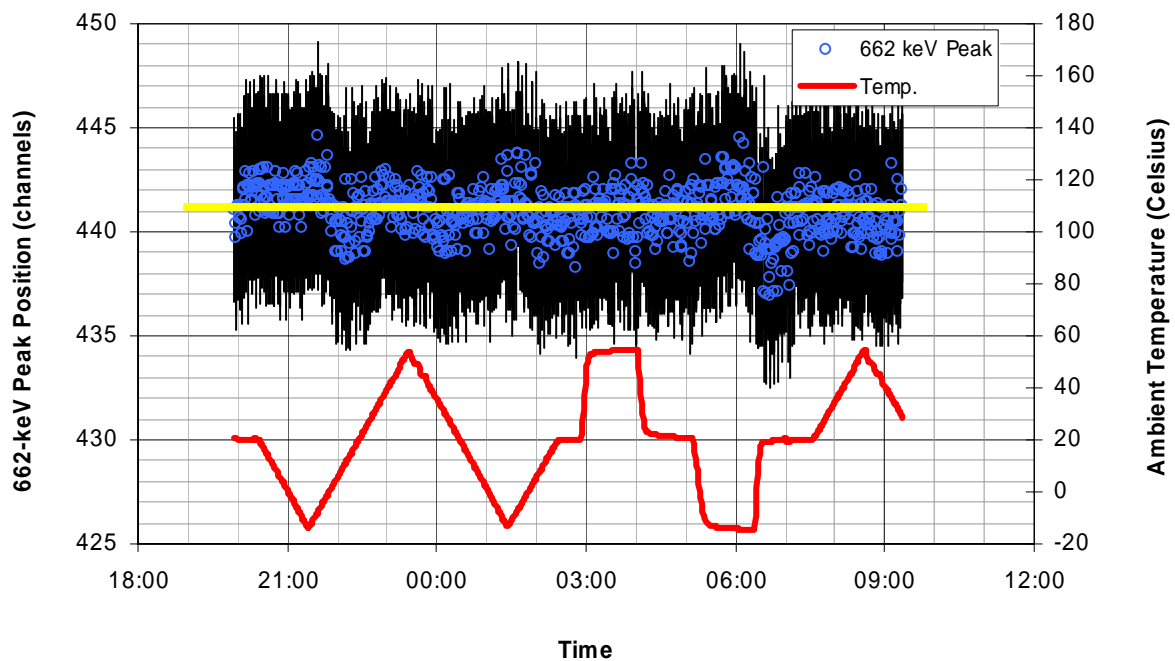


Abb.4: Ergebnisse eines Stabilisierungstests im Temperaturbereich von -15°C bis $+55^{\circ}\text{C}$.
Die eingezeichneten Fehlerbalken entsprechen einer Abweichung von $\pm 1\%$.

3 Anwendungen im Störfall und im Bereich der Umweltradioaktivität

Die implementierten innovativen Technologien widerspiegeln sich in deutlich verbesserten Gebrauchseigenschaften im Vergleich zu früheren Gerätegenerationen:

- Der identiFINDER[®] ultra ist nach dem Einschalten sofort messbereit. Eine Kalibrierung ist nicht erforderlich. Die Bedienung kann auch durch Laien erfolgen.
- Die ultra-Stabilisierung gewährleistet exzellente Stabilität in allen Last- und Temperaturbereichen.
- Die digitale Impulsbreitenanalyse (dPWA) des identiFINDER[®] ultra verbessert die Unterdrückung von Pileup- und Rauschsignalen deutlich.
- Digitale Signalverarbeitung und Pileup-Unterdrückung erlauben den Einsatz bei extrem hoher Last und ermöglichen einen Signaldurchsatz von bis zu 150 kcps.
- Die exzellente Rauschunterdrückung gestattet eine saubere Spektroskopie niederenergetischer Gammastrahlung bis < 15 keV.
- Da keine radioaktive Quelle für die Stabilisierung des Detektors benötigt wird, erhöht sich die Sensitivität gegenüber sehr schwachen Strahlungsquellen.
- Die LED-Referenzsignale mit bekannter Impulsfolgefrequenz werden zur Messung der Totzeit genutzt. Diese Methode liefert in allen Lastbereichen zuverlässige Resultate.
- Insgesamt ergibt sich eine deutlich erhöhte Zuverlässigkeit der Nukliderkennung, vor allem in den Extrembereichen (sehr schwache oder sehr starke Strahlungsquellen).

Diese Eigenschaften bedeuten in der Summe eine Kombination von Robustheit und Sensitivität, die das Gerät für Einsätze im Feld unter nicht vorherbestimmbaren Bedingungen – und damit für den Ereignisfall – besonders tauglich macht.



Abb.5: Einsatz eines identiFINDER® ultra zur Messung der Umweltradioaktivität in der Sächsischen Schweiz:



Abb.6: Tauchfähige Variante des identiFINDER® ultra, einsetzbar bis 10 m Wassertiefe

Für Messungen der Umweltradioaktivität ist die Sensitivität gegenüber schwachen Quellen und die Möglichkeit einer sofortigen Nuklidanalyse vor Ort attraktiv. Ein „Einsatz“ am Wochenende in der Sächsischen Schweiz bei Königstein bewies, dass man mit einem identiFINDER® ultra in der Tat radioaktive Stellen finden und die Strahlungsquelle identifizieren kann (Abbildung 5). Das Gerät wurde im Holster getragen und in den FINDER Mode gesetzt. Akustische Signale zeigten selbst geringfügige Schwankungen des Strahlungspegels an. Auf diese Weise wurden zwei Stellen von etwa einem Quadratmeter Fläche gefunden, an denen die Ortsdosisleistung gegenüber dem Durchschnittswert deutlich erhöht war (0,3-0,4 $\mu\text{Sv/h}$). Eine Messung im IDENT Mode an den Stellen höchster

Dosisleistung identifizierte die Aktivität jeweils als Zerfall von ^{226}Ra , teilweise mit Spuren von Uran – also das in diesem Gebiet erwartete Ergebnis.

Schließlich soll noch darauf hingewiesen werden, dass eine tauchfähige Variante des identiFINDER[®] bis 10 m Wassertiefe einsetzbar ist (Abbildung 6). Geräte dieses Typs sind unter anderem bei der American Coast Guard im Einsatz.

4 Danksagung

Die Entwicklung des identiFINDER[®] ultra wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 21617-31 gefördert.

5 Literatur

- [1] J. C. McDonald, B. M. Coursey, M. Carter, “Detecting Illicit Radioactive Sources”, *Physics Today*, November 2004, pp. 36-41.
- [2] Technical / Functional Specifications for Border Radiation Monitoring Equipment, International Atomic Energy Agency, IAEA-SVS-0X, Vienna, 2005.
- [3] American National Standard Performance Criteria for Hand-held Instruments for the Detection and Identification of Radionuclides, ANSI N42.34-2005, American National Standards Institute, published by The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE), New York, 2005.
- [4] “identiFINDER - Digital Hand Held Spectrometer and Dose Rate Meter with Nuclide Identification”, target systemelectronic gmbh, D-42651 Solingen, Germany, 2005.
- [5] J. Stein, A. Georgiev, and W. Gast, US Patent No. 5 307 299 (1994).
- [6] J. Stein, F. Scheurer, W. Gast, A. Georgiev, “X-ray detectors with digitized preamplifiers”, *Nucl. Instr. Meth. in Physics Research*, B 113 (1996), pp. 141-145.
- [7] J. Stein, G. Pausch, and A. Gueorguiev, “Inverse Filter Techniques in Digital Nuclear Signal Processing”, Paper N2-7 presented at the IEEE Nuclear Science Symposium, Wyndham El Conquistador Resort, Puerto Rico, Oct. 23-29, 2005.
- [8] G. Pausch, J. Stein, A. Kreuels, F. Lueck, and N. Teofilov, “Multifunctional Application of Pulse Width Analysis in a LED-Stabilized Digital NaI(Tl) Gamma Spectrometer”, Paper N1-7 presented at the IEEE Nuclear Science Symposium, Wyndham El Conquistador Resort, Puerto Rico, Oct. 23-29, 2005, Conference Record, pp. 19-24.
- [9] G. Pausch and J. Stein, “Stabilising Scintillation Detector Systems by Exploiting the Temperature Dependence of the Light Pulse Decay Time”, *IEEE Transact. Nucl. Sci.*, vol. 52 (2005), pp. 1849-1855.