

# 06.21

Lizenziert für Herrn Jan-Philipp Schmoldt.  
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

30. Jahrgang  
Dezember 2021  
Seiten 189 – 212

# altlasten spektrum

[www.ALTLASTENdigital.de](http://www.ALTLASTENdigital.de)

Herausgegeben vom  
Ingenieurtechnischen Verband für Altlastenmanagement  
und Flächenrecycling e.V. (ITVA)



Organ des ITVA

## Potential von Impulse-Neutron- Neutron-Logging zur Kampf- mitteldetektion

Markus Köhli, Jan-Philipp Schmoldt

## Gewährleistung der Arbeits- sicherheit bei boden- eingreifenden Maßnahmen auf kampfmittelverdächtigen Flächen

Andreas Bielke, Birgit Gruner,  
Tilmann Weber



# Potential von Impulse-Neutron-Neutron-Logging zur Kampfmitteldetektion

Markus Köhli, Jan-Philipp Schmoldt

## Zusammenfassung

Die Methode des Impulse-Neutron-Neutron (INN) wird in den Geowissenschaften und insbesondere zur Erdölexploration eingesetzt um den Gehalt von Wasserstoffen bei der Bohrlochsondierung zu messen. Neutronen einer gepulsten 14.1 MeV Deuterium-Tritium-Fusionsquelle erlauben ebenfalls eine flugzeit aufgelöste Bestimmung von Kampfmitteln im Boden aufgrund der Bestandteile von Wasserstoff, Stickstoff und Sauerstoff. Mit Hilfe der Neutronentransportsimulation URANOS konnte die Bodenfeuchte als Haupteinflussfaktor der Eindringtiefe und Intensität der Signalantwort identifiziert werden. Die Reichweite für einer typischen Bodenzusammensetzung liegt für exemplarische 100 lb- bzw. 1000 lb-Fliegerbomben zwischen 10 cm und 50 cm. Jedoch können andere Objekte wie etwa ein Stahlträger ähnliche Signaturen in der Messkonfiguration erzeugen.

## Einleitung

Auch 75 Jahre nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs geht von nicht explodierten Kampfmitteln eine große

Gefahr für Menschen, Infrastruktur und die Umwelt aus. Insbesondere als „Fliegerbomben“ bezeichnete Abwurfmunition mit sehr hoher Sprengkraft haben weiterhin hochgradig zerstörerisches Potential. Schätzung gehen davon aus, dass nach dem Ende des Zweiten Weltkrieges etwa 100.000 nicht explodierte Fliegerbomben („Blindgänger“) noch in deutschen Böden verblieben (Hampe, 1963). Diese sind jedoch kein für Deutschland spezifisches Problem; vergleichbare Probleme gibt es auch den meisten anderen Regionen in denen Kampfhandlungen stattgefunden haben. In jedem Fall ist die Detektion, Räumung und Delaborierung solcher Kampfmittel von entscheidender Bedeutung, um die öffentliche Sicherheit zu gewährleisten und belastete Flächen wiederherzustellen.

Für die Detektion von Fliegerbomben im Untergrund werden üblicherweise geophysikalische Verfahren angewandt. Derzeit werden hauptsächlich magnetische, elektromagnetische oder Radar-Messungen genutzt. (BMVg 2018; Kötter et al. 2016). Die Verfahren haben gemein, dass mit ihnen Fliegerbomben als Anomalien in den Messdaten identifiziert werden können. Sol-

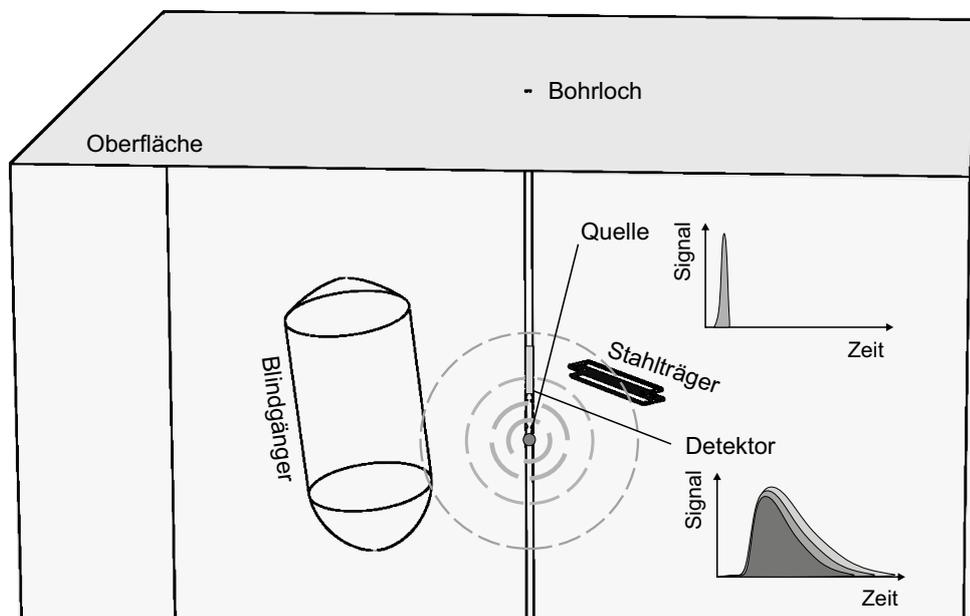


Abbildung 1: Querschnitt des Versuchsaufbaus mit einer gepulsten DT-Neutronenquelle und einem Detektor befinden sich im selben Bohrloch. Ein Neutronenpuls wird im Boden und an im Boden befindlichen Objekten gestreut und anschließend erfasst.

## Potential von Impulse-Neutron-Neutron-Logging zur Kampfmittel detektion

che Anomalien werden durch Unterschiede im Bezug auf die physikalischen Eigenschaften der Bomben im Vergleich mit dem umgebenden Material des Bodens verursacht. Im Falle von Fliegerbomben werden diese Anomalien insbesondere durch die Bombenhülle verursacht, im speziellen die ferromagnetischen, elektrisch leitenden und polarisierbaren Eigenschaften der Stahlkomponenten der Hülle. Aufgrund dieser Einschränkungen der Verfahren sind Fehlalarme nicht ungewöhnlich. Es ist, zum Beispiel, praktisch unmöglich, zwischen einer Fliegerbombe und einem Stahlfass zu unterscheiden (Billings et al. 2002). Aufgrund der gefährlichen Natur von Fliegerbomben ist es dabei nicht akzeptabel, Anomalien vorschnell als nicht relevant einzustufen. Folglich werden bei Öffnungen von Anomaliepunkten in vielen Fälle nicht relevante Objekte geborgen. Diese Öffnungen sind oftmals nicht nur kostspielig und bedeuten einen stark invasiven Eingriff in den Boden, sondern können auch weiträumige Evakuierungsvorbereitungen mit sich bringen. Aus diesen Gründen ist ein neuer Ansatz, welcher die Fehlalarmrate signifikant reduziert, sehr wünschenswert.

Für einen solchen Ansatz ist die Verwendung von Impulse Neutron-Neutron (INN) oder Impulse Neutron-Gamma (ING) Zählverfahren vorstellbar. Mit dieser Technologie sollen die Fliegerbomben als Anomalien in der chemischen Zusammensetzung des Bodens, insbesondere auch mit Hinblick auf den Sprengstoff im Inneren der Bombe, detektiert werden. Während das ING Zählverfahren auf die Detektion von durch die von Neutronenstrahlung ‚aktivierten‘ Objekte emittierten charakteristischen Spektren zielt, wird beim INN Verfahren nach Verringerungen und Verzögerungen der reflektierten Signale aufgrund der Anwesenheit eines relevanten Objekts gesucht. Solch eine zusätzliche Sensitivität auf die chemischen Komponenten des Sprengstoffs hat das Potential die Anzahl der Fehlalarme zu reduzieren. Allerdings gilt dabei, wie für alle neuen Verfahren, zuerst die Grenzen des Verfahrens auszuloten. Insbesondere müssen Fälle, bei denen eine Fliegerbombe übersehen werden könnte, unbedingt vermieden werden.

Für INN und ING Zählverfahren sind zwei grundsätzliche Ansätze vorstellbar: (a) die Sondierung, bei der weiträumige Bereiche auf das Vorhandensein von Objekten hin untersucht werden und (b) die Verifizierung, bei der Anomalien, die mit anderen Verfahren identifiziert wurden, auf ihre Relevanz überprüft werden. Beim ersten Fall ist es notwendig, dass das Verfahren einen großen Untersuchungsbereich abdeckt, damit der Einsatz dieses Verfahrens wirtschaftlich ist. Beim zweiten Fall ist der Untersuchungsbereich durch die vorangehenden Verfahren bereits stark eingegrenzt und der zu untersuchende Bereich hat nur eine geringe Entfernung von der verwendeten Neutronenquelle.

In dieser Studie untersuchen wir mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen die Möglichkeiten und Einschränkungen eines impulse-neutron-neutron-Logging Ansatzes mit einer 14,1 MeV Deuterium-Tritium (D-T) Quelle in einem Bohrloch.

kungen eines impulse-neutron-neutron-Logging Ansatzes mit einer 14,1 MeV Deuterium-Tritium (D-T) Quelle in einem Bohrloch.

### Methode

Für diese Untersuchung wird die Monte-Carlo Software URANOS (Köhli et al. 2015) verwendet, die speziell entwickelt wurde, um die Wechselwirkungen von Neutronen mit der Umwelt zu modellieren. Der simulierte Boden besteht aus 50 %<sub>vol</sub> Festkörperanteil und einer variablen Menge an H<sub>2</sub>O. Im Weiteren beziehen sich angegebene Prozentwerte stets auf Volumenanteile. Der Festanteil besteht aus (75 % SiO<sub>2</sub> und 25 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) mit einer Verbunddichte von 2,86 g/cm<sup>3</sup>. Entsprechend kann die Gesamtdichte zwischen 1,43 g/cm<sup>3</sup> und 1,93 g/cm<sup>3</sup> für 0 % bzw. 50 % Bodenfeuchte variieren. Die chemischen Zusammensetzungen verschiedener Gesteinsarten sind vernachlässigbar, wobei der Anteil an chemisch gebundenem Wasser bei wenigen Prozenten liegt. Für eine realistische Simulation des Untergrundes ist 10<sup>-5</sup> g/cm<sup>3</sup> <sup>10</sup>B hinzugefügt (Andersen et al. 2016; Jakobi et al. 2021). Die simulierten Fliegerbomben bestehen aus Trinitrotoluol (23,8 % H, 28,6 % O, 35 % C, 14,4 % N) mit einer Dichte von 1,65 g/cm<sup>3</sup> und einer 15 mm dicken Stahlhülle (8,03 g/cm<sup>3</sup> mit 68 % <sup>56</sup>Fe, 16,3 % <sup>52</sup>Cr, 2,7 % <sup>53</sup>Cr, 9 % <sup>58</sup>Ni, 2 % <sup>28</sup>Si, 2 % <sup>55</sup>Mn). Die beiden simulierten Fliegerbomben sind rechteckig mit den Abmessungen 1350 mm × 480 mm × 480 mm (1000 lb Bombe) und 740 mm × 210 mm × 210 mm (100 lb Bombe) und ein Stahlstab mit den Maßen 1400 mm × 180 mm × 5 mm. Als Detektor wurde eine zylindrische Helium-3 Röhre mit einem Durchmesser von 40 mm und einer Länge von 350 mm mit einem Partialdruck von 1,5 bar <sup>3</sup>He simuliert, die sich 300 mm von der Quelle entfernt befindet. Für die Detektion bei dieser Art von Zählrohr ist es notwendig, dass die Neutronen thermalisiert werden. Simulierte Objekte im Boden sind parallel zum Detektor und dem Bohrloch orientiert. Abstände sind im Folgenden angegeben in Bezug auf die kürzeste Distanz zwischen Außenkante des Bohrlochs und Seite eines Objekts. Neutronen mit einer Energie von 14,1 MeV werden durch die Quelle radial durch delta-Impulse emittiert (siehe Abbildung 1). Ein typischer Puls besteht aus 10<sup>8</sup> Neutronen. Die durch die kosmische Hintergrundstrahlung entstehenden Neutronen sind nicht berücksichtigt, da ihr Einfluss bei einem durchschnittlichen maximalen Fluss von etwa 100–200 m<sup>2</sup>/s an der Erdoberfläche vernachlässigbar ist (Gordon et al. 2004; Ziegler 1998).

### Ergebnisse und Diskussion

Im Boden gibt es drei dominierende Beiträge, welche für die Wechselwirkung der Neutronen verantwortlich sind: Absorption, elastische und inelastische Stöße. Letztere spielen eine untergeordnete Rolle und sind nur im MeV-Bereich relevant; die relevanteste Wechselwirkung sind elastische Stöße (Beckurts und Wirtz 1964; Wietfeld 2021). Die Streuung an Wasserstoff ist

stets vorwärts gerichtet, während andere Streuungen beliebige Richtungen haben und von der Energie und Masse des betroffenen Atoms abhängen. Sobald Neutronen thermische Energien ( $< 100$  meV) erreichen, bewegen sie sich auf zufälligen Trajektorien bis sie absorbiert werden. Absorptionswahrscheinlichkeiten sind zufällig verteilt für die Elemente des Periodensystems und Isotope. Typische Bodenanteile wie  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{28}\text{Si}$ , oder  $^{16}\text{O}$  sind vergleichsweise transparent. Manche Elemente wie z.B.  $^{10}\text{B}$  haben wiederum bereits einen signifikanten Einfluss bei einem Niveau von  $10^{-5}$ . Andere Komponenten wie eisenreiche Mineralien oder Salzwasser können einen Einfluss haben, wenn sie in überdurchschnittlicher Menge vorhanden sind. Neutronen müssen thermalisiert werden, um von einem Helium-3 Zählrohr detektiert zu werden. Typische Elemente wie Silizium verlangsamen Neutronen nicht stark genug, sie sind keine ausreichend guten „Moderatoren“. Eine Mindestmenge an Wasserstoff ist daher notwendig, um ein hinreichend gutes Signal zu erzeugen.

## Räumliche und zeitliche Pulsform

Die radiale Verteilung um die Quelle herum entspricht im Querschnitt näherungsweise einer Gauß-Kurve. Hochenergetische Neutronen können mehrere 10 cm an Boden durchdringen, wobei ihre mittlere Streulänge bei niedrigerer Energie geringer liegt. Das quadratische Mittel der Breite der Verteilungen (RMS) des Neutronenflusses im Boden liegt zwischen 55 cm (für 5 % Bodenfeuchte) und 15 cm (für 50 % Bodenfeuchte). So gut wie keine Neutronen erreichen eine Entfernung von 2 m von der Quelle. Für eine Detektion muss darüber hinaus die Weglänge zum Detektor berücksichtigt werden. Neutronen die nur in den Boden eindringen ohne am Detektor anzukommen, tragen nicht zum Signal bei. Simulationen zeigen, dass die

Verteilung der Neutronen hauptsächlich vom umgebenden Boden und dessen Eigenschaften abhängt und Fremdkörper in der Regel zu einer Verringerung der Signalantwort führen. Objekte, welche in diesem Kontext relevant sind, haben Ausdehnungen, die es unwahrscheinlich machen, dass ein einfallendes Neutronen nicht mit diesen interagiert. Bei Bomben ist überdies festzustellen, dass trotz ihrer vergleichsweise geringen Dicke von 15 mm die Stahlhülle einen signifikanten Einfluss auf das Signal hat.

Der Prozess der Thermalisierung und die Geometrie des Aufbaus führen zu einer näherungsweise exponentiellen Abnahme der Signalantwort über die Dauer von mehreren zehn Millisekunden. Die Form der Kurve wird im wesentlichen durch drei Faktoren beeinflusst: Dichte des Bodens, Feuchte des Bodens und Abstand des Objekts. Da diese Untersuchung auf eine zeitlich aufgelöste Messung abzielt, können verschiedene Messfenster definiert werden. Die Signalantwort bei verschiedenen Objekten im Boden unterscheidet sich qualitativ nicht bei unterschiedlichen Zeitindices. Quantitativ ergibt sich die beste Differenz von Testsignal und Referenzsignal bei Fokussierung auf die am spätesten ankommenden Neutronen. Außer für den Fall, dass sich die Bombe in unmittelbarer Nähe des Bohrloches befindet, sind die Kurven jedoch so gut wie nicht zu unterscheiden. Oberhalb von circa 10 % Bodenfeuchte kann eine gleichbleibende Skalierung der Intensität der Pulsantwort in Abhängigkeit des Bodenwassergehaltes beobachtet werden. Unterhalb dieses Wertes verhält sich das System deutlich nichtlinear und der Neutronenfluss wirkt zeitlich gestreckt.

## Signalstärke

Die Bodenfeuchte hat einen größeren Einfluss auf die Signalantwort als der Objektstand. Für die Interpretation der relativen Änderungen (Signalstärke)

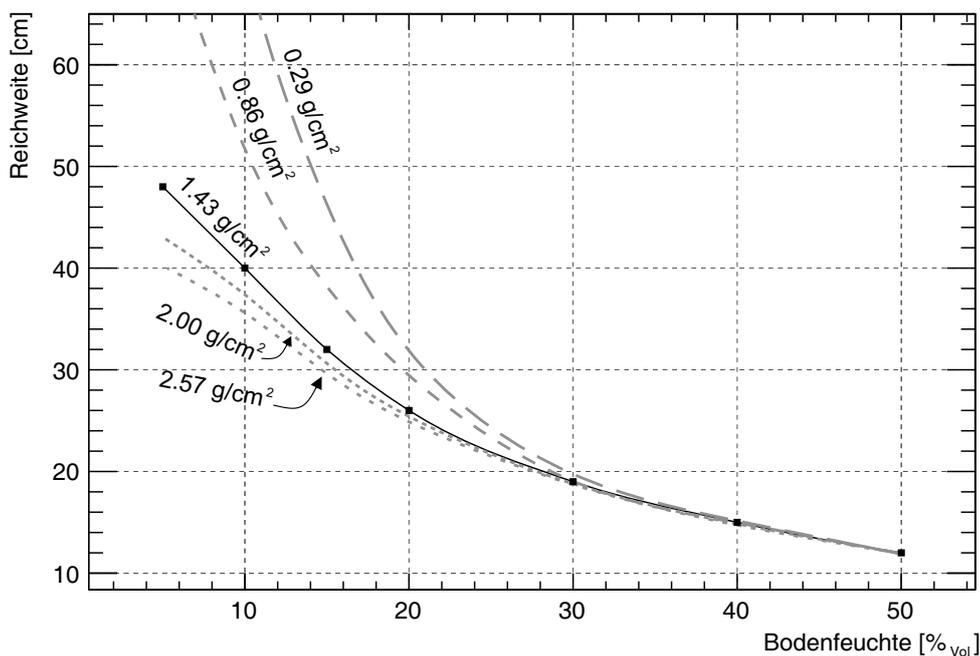


Abbildung 2: Bodenfeuchte- und bodendichteabhängige Detektionsreichweite einer 1000 lb Bombe für eine Änderung von 10 % zwischen Referenz- und Testpuls.

wird als Differenz von Referenzsignal und Testsignal definiert) wird angenommen, dass sich entweder die Bodenfeuchte im Einflussbereich nicht stark ändert, oder dass ein Referenzprofil ausreichender Güte zur Verfügung steht. Als Analyseintervall wählen wir den Bereich 16 – 60 ms, der im Vergleich zu kürzeren Zeitfenstern sensitiver auf die Einflüsse der Absorptionsprozesse ist. Für trockenere Böden ist die Detektierbarkeit von Objekten besser als für feuchtere Böden. Mit der Annahme eines Schwellenwertes von 10 % Änderung der Signalstärke in o.g. Intervall liegt die Detektionsreichweite für Böden mit einer Lagerungsdichte von  $1,43 \text{ g/cm}^3$  zwischen 10 cm und 50 cm für die 1000 lb-Bombe. Aufgrund der Geometrie des Messaufbaus führt eine Änderung der Porosität des Bodens nicht nur zu einer linearen Verschiebung der Kurven in Relation zum Objektstand und Bodenfeuchte. Für niedrige Bodenwasserhalte und geringe Bodendichten können deutlich höhere Detektionsreichweiten erreicht werden. Für größere Bodenfeuchte und niedrigere Porositäten ergeben sich kaum Änderungen. Für eine sehr niedrige Lagerungsdichte von  $0,86 \text{ g/cm}^3$  bei 5 % Wasseranteil würde sich die Reichweite mit dem oben beschriebenen Grenzwert auf circa 80 cm erhöhen. Bei  $2 \text{ g/cm}^3$  reduziert sich die Reichweite auf 40 cm beim gleichen Szenario.

Auch wenn die Größe der Bombe deutlich reduziert wird, etwa auf ein 100 lb-Modell, ist eine ähnlich messbare Abnahme des Neutronenflusses mit etwa 10-20 % reduzierter Detektionsreichweite festzustellen. Quantitativ unterscheidet sich hier die Neutronenantwort insbesondere bei sehr geringen Distanzen zum Blindgänger so dass hier die Signalstärke nur etwa halb so groß ausfällt wie bei der 1000 lb-Bombe.

Der Stahlmantel der Bombe hat einen signifikanten Einfluss auf den Neutronenpuls. Kurvenpaare in Simulationen mit und ohne Ummantelung unterscheiden sich um circa 10–20 %, abhängig von den Einstellungen der Simulationen. Für einen niedrigen Wasseranteil ist der Einfluss des Mantels stärker. Aus diesem Grund haben wir auch eine Stahlstab (ohne Sprengstoff, wie in Abbildung 1 dargestellt) als Referenzobjekt getestet. Es zeigt sich, dass solch ein Objekt eine ähnliche Abnahme der Intensität wie ein Bombenkörper verursachen kann.

Der in dieser Untersuchung verwendete Boden beinhaltet neben Sauerstoff nur Aluminium und Silizium, deren Isotope beide einen geringen Absorptionsquerschnitt haben. Aus diesem Grund wurde eine Simulation mit einem „realistischeren“ Boden mit 10 ppm Bor-10 als Absorber durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Simulationen (hier nicht gezeigt) deuten darauf hin, dass, obwohl die absolute Signalamplitude deutlich gesenkt wird, die relative Änderung in Bezug auf den Objektstand lediglich um maximal 10 % reduziert wird.

## Diskussion

Den größten Einfluss auf den von der Quelle ausgesandten Neutronenfluss hat die Bodenfeuchte und die damit verbundene Dichte des Bodens. Hierbei handelt es sich um einen gut untersuchten und verstandenen Prozess, der unter anderem bei Bohrlochsondierungsverfahren zur Lagerstättenerkundung eingesetzt wird. Bei der Kampfmittelsuche spielt dieser Effekt allerdings eine untergeordnete Rolle, da in Böden mit vergleichsweise geringer Heterogenität Referenzmessungen durchgeführt werden können. Anhand dieser Referenzmessungen können die Hintergrundwerte herausgerechnet und die Anomalien als Abweichungen von den Referenzkurven identifiziert werden. Bei einem typischerweise kleinen Untersuchungsgebiet sollte sich die Bodenfeuchte nur um wenige Prozent ändern. Obwohl eine Referenzmessung die Hintergrundeffekte größtenteils herausfiltern kann, begrenzt dieser Umstand die statistische Genauigkeit unter realistischen Bedingungen. Wir schätzen ab, dass einige wenige Prozent Abweichung vom Referenzsignal, was in etwa 10 Pulsen in dieser Untersuchung entspricht, eine Grenze für die Genauigkeit der Methode darstellt.

Der Sprengstoff in Bomben hat aufgrund des hohen Aufkommens von Wasserstoff und Stickstoff einen signifikanten Einfluss auf den Puls. Ersterer stoppt primär die Neutronen durch elastische Stöße, während letzterer die Neutronen absorbiert sobald diese thermalisiert sind. Für einen thermischen Neutronendetektor wie etwa auf Basis von Helium-3, Lithium-6, Bor-10 oder Bor-10-Trifluorid wird die absolute Amplitude des Signals gedämpft und sie fällt schneller ab. Da es in diesem Versuchsaufbau Dutzende von Wechselwirkungen zwischen Neutronen und Isotopen von Materialien des Bodens gibt bevor sie detektiert werden, kann kein deutlicher Einfluss eines Objektes in bestimmten Zeitfenstern beobachtet werden. Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass der Stahlmantel der Bombe ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Messergebnisse hat und bei der Simulation berücksichtigt werden muss. Es kann darüber hinaus z.B. eine Stahlstab einen Fehlalarm verursachen, da solch ein Objekt das Messsignal in ähnlicher Weise beeinflusst wie der Sprengstoff. Dies könnte sich als große Einschränkung der Methode erweisen, da die Detektionsreichweite der Methode vergleichsweise gering ist. Andererseits hat bereits eine vergleichsweise kleine Bombe ebenfalls einen recht starken Einfluss auf die Amplitude des Signals.

## Zusammenfassung und Ausblick

Für die Untersuchung der Anwendbarkeit von gepulsten Neutron-Neutron Verfahren zur Detektion von Kampfmitteln wurden Monte-Carlo-Studien durchgeführt. Darin wurden Modelle mit großen und kleinen Bomben sowie mit Objekten verwendet, die bei der Untersuchung mit herkömmlichen Methoden einen Fehlalarm produzieren können. Die von der 14,1 MeV D-T Quelle emittierten Neutronen ergeben ein näherungs-

weise exponentiell mit zunehmender Objektdistanz abnehmendes Differenzsignal am Detektor. Der Gesamtfluss und die Form der Kurve sind primär abhängig von der Bodenfeuchte. Unter 10 % Bodenfeuchte wird das Verhalten der Richtung der Streuung, der Abbremsung und der Absorption und die zeitliche Verteilung der Signale nicht-linear. Bomben, aber auch andere Objekte wie ein Stahlstab, reduzieren die Stärke des Neutronenflusses deutlich. Mit einem Schwellenwert für die Detektion von 10 % der relativen Abweichung zu einem Referenzpuls und einer Lagerungsdichte von  $1,43 \text{ g/cm}^3$  für den Boden, liegt die maximale Detektionsreichweite für eine 1000 lb-Bombe zwischen 10 cm und 50 cm.

### Referenzen

- Andreasen, M., Jensen, H. K., Zreda, M., Desilets, D., Bogena, H., Looms, C. M.: 2016, Modeling cosmic ray neutron field measurements. *Water Resources Research* 52, 6451–6471.
- Beckurts, K. H., Wirtz, K. W.: 1964, *Neutron Physics*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN 978-3-642-87616-5.
- Billings, S., Pasion, L., Oldenburg, D.: 2002, Inversion of magnetics for UXO discrimination and identification. In: *Proceedings of the 2002 UXO Forum*. Orlando September 3-6, 2002.
- Bundesministerium der Verteidigung (BMVg): 2018, *Baufachliche Richtlinien Kampfmittelräumung*, 2. Ed. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI), Berlin.
- Gordon, M. S., Goldhagen, P., Rodbell, K. P., Zabel, T. H., Tang, H. H.K., Clem, J. M., Bailey, P.: 2004, Measurement of the flux

and energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons on the ground. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 51, 3427–3434.

- Hampe, E.: 1963, *Der Zivile Luftschutz im Zweiten Weltkrieg*, 1. Ed. Bernard & Graefe Verlag für Wehrwesen, Frankfurt am Main.
- Jakobi, J., Huisman, J. A., Köhli, M., Rasche, D., Vereecken, H., Bogena, H. R.: 2021, The footprint characteristics of cosmic ray thermal neutrons. *Geophysical Research Letters* 48, e2021GL094281.
- Köhli, M., Schrön, M., Zreda, M., Schmidt, U., Dietrich, P., Zacharias, S.: 2015, Footprint characteristics revised for field-scale soil moisture monitoring with cosmic-ray neutrons. *Water Resources Research* 51, 5772–5790.
- Kötter, M., Schmoldt, J.-P., Winkelmann, K.: 2016, *Detektionsverfahren in der Kampfmittelräumung*. Informationsschrift des ITVA-Fachausschuss C7 'Kampfmittelräumung'.
- Wietfeldt, F. E.: 2021, Phenomenology of neutron interactions. In: *Encyclopedia of Nuclear Energy*, Elsevier, 107–116.
- Ziegler, J. F.: 1998, Terrestrial cosmic ray intensities. *IBM Journal of Research and Development* 42, 117–140.

### Autorenschaft

#### Markus Köhli

Physikalisches Institut, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg  
Physikalisches Institut,  
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn  
StyX Neutronica GmbH

#### Jan-Philipp Schmoldt

Tauber-Herklotz-Consult –  
Geowissenschaftler & Ingenieure GmbH