



Deutsche  
Stiftung  
Friedensforschung  
german foundation for peace research

**Verifikation nuklearer Abrüstung:  
Herausforderungen, Lösungsansätze und Grenzen  
der Kernwaffenauthentifizierung**

Malte Göttsche, Frederik Postelt, Gerald Kirchner

**Forschung DSF № 46**

Kontakt:

Deutsche Stiftung Friedensforschung (DSF)  
Am Ledenhof 3-5  
D-49074 Osnabrück  
Fon: +49 541 60035-42  
Fax: +49 541 60079039  
[www.bundesstiftung-friedensforschung.de](http://www.bundesstiftung-friedensforschung.de)  
[info@bundesstiftung-friedensforschung.de](mailto:info@bundesstiftung-friedensforschung.de)

Malte Götttsche  
RWTH Aachen  
Schinkelstr. 2a  
52062 Aachen

Frederik Postelt  
Universität Hamburg  
Carl Friedrich von Weizsäcker-Zentrum für  
Naturwissenschaft und Friedensforschung (ZNF)  
Beim Schlump 83  
20144 Hamburg, Germany

Gerald Kirchner  
Universität Hamburg  
Carl Friedrich von Weizsäcker-Zentrum für  
Naturwissenschaft und Friedensforschung (ZNF)  
Beim Schlump 83  
20144 Hamburg, Germany

© 2019 Deutsche Stiftung Friedensforschung  
Gestaltung, Satz und Herstellung: bvw werbeagentur

Alle Rechte vorbehalten.

Spendenkonto der Deutschen Stiftung Friedensforschung:  
Sparkasse Osnabrück, IBAN DE77 2655 0105 000 0012 30

ISSN 2193-794X

# Inhalt

<b>Zusammenfassung</b> .....	5
<b>Abstract</b> .....	7
<b>Einführung</b> .....	9
<b>Herausforderungen und Lösungsansätze für Abrüstungsverifikation</b> .....	10
Forschungsentwicklung.....	11
Notwendigkeit der Abrüstungsverifikation.....	13
Informationsbarrieren.....	16
Attributauswahl.....	17
Herausforderungen für Messungen.....	19
Freigabe essentieller Informationen.....	20
Gemeinsame Entwicklung von Informationsbarrieren.....	21
Authentifizierung bei der Zerlegung von Kernwaffen.....	22
Wenn das Licht rot oder ein grünes Licht falsch ist... ..	23
Seminar Abrüstungsverifikation.....	25
<b>Bewertung einzelner Messmethoden zur Attributbestimmung</b> .....	26
Passive Gammamessungen.....	26
Aktive Gammamessungen.....	27
Passive Neutronenmessungen.....	28
Aktive Neutronenmessungen.....	29
Einfluss der Konfiguration der Objekte.....	29
Evaluierung der Messtechniken.....	30
<b>Die International Partnership on Nuclear Disarmament Verification</b> .....	36
<b>Zusammenfassung und Implikationen</b> .....	37
<b>Projektpublikationen</b> .....	39

*Forschung-DSF* is published irregularly.

The authors alone are responsible for the content of the publications.

# **Verifikation nuklearer Abrüstung: Herausforderungen, Lösungsansätze und Grenzen der Kernwaffenauthentifizierung**

**Malte Götttsche<sup>1</sup>, Frederik Postelt <sup>2</sup>, Gerald Kirchner<sup>2</sup>**

---

<sup>1</sup> Inzwischen Princeton University, USA

<sup>2</sup> Universität Hamburg, Carl Friedrich von Weizsäcker-Zentrum für Naturwissenschaft und Friedensforschung (ZNF), Beim Schlump 83, 20144 Hamburg, Germany

## Zusammenfassung

Heutzutage beschränkt sich die Verifikation nuklearer Rüstungskontrollverträge zwischen den USA und Russland auf Trägersysteme. Sprengköpfe selbst bzw. waffenfähige Spaltmaterialien unterliegen keiner verpflichtenden Kontrolle in den Kernwaffenstaaten. Vertrauen in weitgehende nukleare Abrüstung hin zu einer kernwaffenfreien Welt erfordert intrusive Verifikation. Ein mögliches Verfahren ist, dass ein Kernwaffenstaat die Gesamtbestände seiner Sprengköpfe und Sprengkopfkomponenten deklariert und diese durch Inspektionen verifizieren lässt. Inventaränderungen, insbesondere die Zerlegung von Sprengköpfen, würden ebenfalls deklariert und verifiziert werden.

Auf technischer Ebene müssen entsprechende Verifikationsmaßnahmen drei Voraussetzungen erfüllen, um Vertrauen aufbauen zu können. Erstens muss jeder Sprengkopf eindeutig identifiziert werden, damit keiner doppelt gezählt wird oder durch eine Attrappe ersetzt werden kann. Zweitens muss Wissen über die Sprengköpfe in Form eines nicht unterbrochenen Beweisfadens zeitlich während aller Prozesse erhalten bleiben. So wird verhindert, dass Sprengköpfe der Überwachung entzogen werden können und damit ein Inventar versteckter Sprengköpfe aufgebaut werden kann. Drittens muss nachgewiesen werden, ob ein als Sprengkopf deklariertes Objekt tatsächlich ein solcher ist (Authentifizierung).

Aufgrund des Nichtverbreitungsvertrags und nationaler Sicherheitsinteressen erhalten inspezierende Staaten nur begrenzte Informationen und sind bei Messungen während der Inspektionen stark eingeschränkt. Ähnliche Einschränkungen sind zu erwarten, falls diese Aufgabe einer internationalen Organisation – beispielsweise der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO) – übertragen werden sollte. Für die Authentifizierung können Informationsbarrieren verwendet werden, die das Resultat der Überprüfung anzeigen, aber keine detaillierten

Messergebnisse. Eine Möglichkeit wäre, Attribute zu definieren, die einen Sprengkopf charakterisieren, und diese durch Messungen überprüfen zu lassen. Mögliche Attribute wären das Vorhandensein von Plutonium oder Uran, das Isotopenverhältnis Plutonium-239 zu Plutonium-240 oder Uran-235 zu Uran-238 und Informationen bezüglich der Masse von Plutonium oder Uran. Die konkrete Auswahl von Attributen sollte sich an folgenden Kriterien orientieren: Werden sensitive Informationen erfolgreich geheim gehalten? Minimieren die ausgewählten Attribute die Möglichkeit, das Verifikationsverfahren zu hintergehen? Ist die Komplexität der Auswertung gering?

Zusätzlich müssen robuste Messverfahren zur Verfügung stehen, die Ergebnisse mit hoher Genauigkeit produzieren. Messverfahren zur Authentifizierung unterliegen speziellen Herausforderungen: Das Wissen hinsichtlich der Beschaffenheit der Sprengköpfe (z.B. deren Geometrie) ist sehr beschränkt. Viele Messtechniken benötigen eine Kalibrierung basierend auf bekannten Objekten, die eine weitgehende Ähnlichkeit mit den später zu vermessenden Objekten aufweisen müssen. Dies kann aufgrund des fehlenden Wissens nicht gewährleistet sein. Es sollten Messverfahren ausgewählt werden, bei denen möglichst wenige Annahmen bezüglich der Beschaffenheit der Sprengköpfe getroffen werden müssen, um zuverlässige und belastbare Ergebnisse zu erhalten. Die Eignung von Messverfahren kann durch die Bestimmung der Unsicherheiten ihrer Ergebnisse überprüft werden, die aus den fehlenden Informationen resultiert. Dies geschieht durch die Untersuchung der Unterschiede zwischen Messergebnissen und den tatsächlichen Werten bei plausibler Variation der Geometrien und anderer Eigenschaften inklusive möglicher Abschirmung.

Wir haben verschiedene nukleare Messverfahren, die zur Attributbestimmung dienen könnten, hinsichtlich dieser Anforderungen über-

prüft. Messungen von Gammastrahlung können insbesondere geeignet sein, das Vorhandensein von Plutonium und das Isotopenverhältnis bei Plutonium zu bestimmen. Passive Gammastrahlung kann besonders einfach abgeschirmt werden, deshalb werden auch aktive Gammamessungen hinsichtlich ihrer Eignung für Abrüstungsverifikation untersucht. Neutronenmessungen können durch verschiedene Materialien beeinflusst werden, ihre völlige Abschirmung ist jedoch deutlich schwieriger zu realisieren. Mit Hilfe von Neutronenmultiplizitätsmessungen kann die Plutoniummasse untersucht werden. Hierbei kann die gemessene Masse jedoch aufgrund geometrischer Effekte um etwa 10 Prozent unterschätzt werden. Diese Abweichung kann mit Hilfe von erstmals von uns vorgeschlagenen Korrekturmaßnahmen reduziert werden.

Uran emittiert deutlich weniger Strahlung, so dass aktive Messverfahren verwendet werden müssen. Dabei werden Neutronen aus einer Quelle auf das Spaltmaterial geschossen, um in diesen Reaktionen zu induzieren. Dabei werden Gammastrahlung und Neutronen emittiert, die als Nachweis dienen. Das Vorhandensein von Uran, seine Isotopenzusammensetzung und Masse können mittels aktiver Neutronenmultiplizitätsmessungen bestimmt werden. Die Unsicherheiten sind hier jedoch größer als bei Plutonium.

Insgesamt ist keine der Messtechniken ohne weitere Entwicklung einsetzbar. Neben technischen Weiterentwicklungen könnte die Problematik entschärft werden durch die Freigabe einiger bislang geheimer Informationen und der entsprechenden Verringerung der Messunsicherheit, solange dies im Einklang mit dem Nichtverbreitungsvertrag steht.

## Abstract

Verification of nuclear arms control agreements between the US and Russia is nowadays limited to delivery systems. Warheads and military fissile materials are not subject to mandatory verification in nuclear weapon states. Confidence in deep cuts in arsenals on the road to a world without nuclear weapons requires intrusive verification. A possible procedure is a nuclear weapon state's declaration of all warhead and warhead component stocks and subsequent verification of this declaration. Inventory changes, in particular the dismantlement of warheads, would also be declared and verified.

On a technical level, verification measures must fulfil three requirements to be able to build confidence. First, every warhead must be uniquely identified, so that none are counted twice or are replaced by dummies. Second, a continuity of knowledge must be preserved throughout time and all processes. This prevents that warheads could be withdrawn to build up an undeclared inventory. Third, it must be assessed whether an object declared to be a warhead in fact is the declared item (authentication).

Due to Non-Proliferation Treaty commitments and national security interests, inspecting states will only receive limited information and be very restricted in terms of possible measurements. Similar constraints are to be expected if an international organization – for example the International Atomic Energy Agency (IAEA) – should become responsible for verification. For the authentication, information barriers can be used which display the results of the analysis, without providing detailed measurement results. An option would be the definition of attributes that characterize a nuclear warhead, and to evaluate these attributes by measurements. Possible attributes are the presence of plutonium or uranium, the isotopic ratio of plutonium-239 to plutonium-240 or uranium-235 to uranium-238 and information regarding the plutonium or uranium mass. The choice of at-

tributes should be based on the following criteria: Are sensitive information successfully kept secret? Do the attributes minimize the possibility of circumventing verification procedures? Is the complexity of the analysis low?

Additionally, robust measurement systems must be available, that produce accurate results. Measurement systems for authentication are subject to special challenges: Knowledge regarding the configuration of warheads (e.g. their geometry) is very limited. Many measurement techniques require a calibration based on known objects that must be similar to those measured later. This cannot be guaranteed due to the limited knowledge. Measurement techniques should be preferred that require a minimum of assumptions regarding warhead configuration to produce accurate and reliable results. The feasibility of measurement techniques can be tested by assessing the uncertainties of the results resulting from unknown information. This can be done by evaluating the differences between measurement results and the actual values as a result of varying geometries and other properties including shielding.

We tested various nuclear measurement techniques, which could be suited for attribute determination, concerning these requirements. Gamma radiation measurements could be used to determine the presence of plutonium and its isotopic ratio. Passive gamma radiation can easily be shielded. Therefore, passive and active gamma radiation measurements are investigated with respect to their suitability for dismantlement verification. Neutron multiplicity measurements are suited to determine plutonium mass. Due to geometrical effects, the mass can be underestimated by around 10 percent. Correction measures we developed can reduce this uncertainty.

Uranium emits less radiation and therefore requires active measurement techniques. This

means that a source injects neutrons to induce reactions in the fissile material. As a result, gamma and neutron radiation is emitted and can be examined. The presence of uranium, its isotopic ratio and mass can be determined by active neutron multiplicity measurements. The uncertainties are, however, larger compared to plutonium assessments.

None of the measurement methods can be used without further development. Besides further technical achievements, the problems can be eased by declassifying some information and thereby reducing measurement uncertainties, as far as this is in agreement with the Non-Proliferation Treaty.



## Einführung

Dieser Bericht beschreibt die Ergebnisse der von der Deutschen Stiftung Friedensforschung geförderten Forschungsprojekte „Kernwaffenauthentifizierung mit Hilfe einer Attribut-Informationsbarriere: Eine Durchführbarkeitsstudie“ und „Machbarkeitsstudie zur Identifizierbarkeit von nuklearen Sprengköpfen mit Gamma-Quanten mit einer Attribut-Informationsbarriere“. Aufgrund der Beobachtung, dass Forschung zur Verifikation nuklearer Abrüstung mit wenigen Ausnahmen nur in Kernwaffenstaaten stattfindet, widmeten sich die Projekte der Thematik explizit aus Sicht eines Nichtkernwaffenstaates.

Forschung zur Verifikation nuklearer Abrüstung erfordert eine transdisziplinäre Bearbeitungsweise. Die überragende Fragestellung lautet dabei „Wie kann Vertrauen entstehen, dass Kernwaffen abgerüstet werden?“<sup>3</sup> Diese Frage hat unter anderem eine rüstungskontrollpolitische Dimension, da Vertrauen in diesem Sinne stark von politischen Gegebenheiten abhängig ist. Die Methoden, um Vertrauen aufzubauen, sind hingegen oft naturwissenschaftlicher Art. Es geht hierbei um Messtechniken und Überwachungsmaßnahmen. Hieraus ergab sich für die Forschungsprojekte die besondere Herausforderung, Lösungen oder mindestens Lösungsansätze zu entwickeln, die aus beiden Blickwinkeln sinnig sind. Entsprechend besteht diese Studie aus zwei Hauptkapiteln, die konzeptuelle und physikalisch-technische Aspekte beinhalten.

Im Rahmen der konzeptuellen Aspekte wurde Abrüstungsverifikation im Kontext möglicher politischer Randbedingungen untersucht. Forschungsergebnisse werden in dieser Studie im nachfolgenden Kapitel „Herausforderungen und Lösungsansätze für Abrüstungsverifikation“ dargestellt. Es wird eingeführt, welche Elemente für effektive Abrüstungsverifikation notwendig sind. Im Fokus beschäftigt sich das Kapi-

tel dann mit einem dieser Elemente, der Authentifizierung von Sprengköpfen mit Hilfe von Attribut-Informationsbarrieren. Durch das Verständnis des Zusammenspiels der verschiedenen Verifikationselemente, insbesondere der Bedeutung der Authentifizierung im gesamten Verifikationskontext, kann ein Verifikations- und Authentifizierungskonzept vorgeschlagen werden, das politische Randbedingungen berücksichtigt. Die zentrale Frage ist dabei, wie ein politisch umsetzbares Konzept aussehen sollte um geeignet zu sein, Vertrauen zu schaffen. Dementsprechend widmet sich das Kapitel der Frage, wie durch Verifikation Vertrauen aufgebaut werden kann vor dem Hintergrund, dass viele relevante Informationen aus Gründen der Nichtverbreitung und nationalen Sicherheit geheim sind und Inspektoren nicht zur Verfügung stehen werden. Die präsentierten Ergebnisse beruhen auf einer umfangreichen Literaturrecherche, einer Vielzahl von Gesprächen mit internationalen Experten sowie eigenen logischen Überlegungen.

Im zweiten Kapitel werden existierende Messtechniken bewertet in Hinblick auf ihre Relevanz für Abrüstungsverifikation. Auch wenn diese Messtechniken teilweise schon in anderen Kontexten im Einsatz sind, ergeben sich für den Kontext Abrüstungsverifikation spezifische Anforderungen, die zum großen Teil Weiterentwicklungen erforderlich machen. Niedrige Fehlerraten sind essentiell, da Messergebnisse nur geringe Unsicherheiten haben sollten. Messungen müssen gegebenenfalls direkt an Sprengköpfen durchgeführt werden, und Inspektoren – vor allem aus Nichtkernwaffenstaaten – werden wenige Informationen zur Beschaffenheit dieser Sprengköpfe haben. Daraus ergibt sich die Herausforderung, Messtechniken zu entwickeln, ohne im Detail zu wissen, was exakt sie zuverlässig messen können müssen. Für diese Forschung wurden eigenständige Experimente

---

<sup>3</sup> Diese Fragestellung behandelt das durch diese Forschungsprojekte ermöglichte Seminar Abrüstungsverifikation, siehe Seite 27.

durchgeführt mit sehr geringen Mengen waffenfähigen Materials. Zusätzlich wurden Computersimulationen durchgeführt, in denen Messaufbauten und entsprechende Proben virtuell dargestellt werden können und die resul-

tierenden Messergebnisse berechnet werden. Diese Arbeiten wurden zum Verständnis des derzeitigen Forschungsstands durch eine Literaturrecherche ergänzt.

## Herausforderungen und Lösungsansätze für Abrüstungsverifikation

Heutzutage beschränkt sich die Verifikation von Rüstungskontrollverträgen auf Trägersysteme. Dies ist beispielsweise der Fall beim New START Vertrag zwischen Russland und den USA.<sup>4</sup> Dieser Vertrag beschränkt unter anderem die Anzahl der Sprengköpfe auf strategischen Waffen. Im Gegensatz zu den Vorgängerverträgen kann die Anzahl der Sprengköpfe auf den individuellen Trägersystemen verifiziert werden. Sobald ein Sprengkopf allerdings vom Trägersystem entfernt wird, befindet er sich außerhalb des Verifikationsregimes. Zusätzlich werden keine Maßnahmen unternommen um verifizieren zu können, ob es sich bei den Sprengköpfen tatsächlich um echte Sprengköpfe handelt. Um den erneuten Einsatz von Sprengköpfen zu verhindern, erfordert irreversible Abrüstung die physische Zerlegung der Sprengköpfe.

Zusätzlich zu den stationierten Sprengköpfen, die bereits verifiziert werden, besteht das gesamte Inventar aus nicht stationierten Sprengköpfen und Sprengkopfkomponenten<sup>5</sup> an verschiedenen Orten sowie denen, die gerade transportiert werden oder gewartet werden.<sup>6</sup> Einzelne Sprengköpfe rotieren zwischen diesen Gruppen. Sprengköpfe, die sich in der Reserve befinden, werden weiterhin verwendet um Sprengköpfe zu ersetzen, die gewartet werden müssen. Allgemein wird ein einzelner Sprengkopf regelmäßig innerhalb von und zwischen Einrichtungen transportiert.<sup>7</sup>

Zur physischen Zerlegung werden Sprengköpfe in eine Abrüstungseinrichtung transportiert. In den USA zum Beispiel ist dies Pantex – eine Fabrik, die ebenfalls für den Bau von Sprengköpfen verantwortlich ist. Das Ergebnis des Zerlegungsprozesses sind nicht-nukleare Komponenten und das spaltbare Material in Form der Sprengkopfkomponenten (siehe Abbildung 1). Im Vergleich zu der Dauer der Stationierung ursprünglich nicht stationierter Sprengköpfe ist die Zeit, die benötigt wird, um aus Sprengkopfkomponenten neue Sprengköpfe zu bauen und diese zu stationieren, deutlich länger. Da dies aber dennoch möglich ist, muss im Rahmen irreversibler Abrüstung das Spaltmaterial aus den Sprengkopfkomponenten gewonnen werden und entweder endgelagert oder so konvertiert werden, dass es ausschließlich für zivile Zwecke verwendet werden kann.

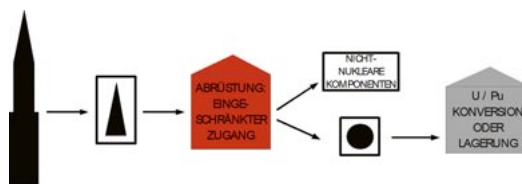


Abbildung 1: Abrüstungsprozess einer Kernwaffe

Zusätzlich zu den spaltbaren Materialien, die aus Kernwaffen stammen, gibt es weitere militärische Materialien, die einer gewissen Geheimhaltung und bisher keiner Verifikation unterlie-

<sup>4</sup> Russische Föderation und Vereinigte Staaten von Amerika, New START Vertrag, Prag, 8.4.2010.

<sup>5</sup> Für die Zwecke dieser Publikation bezieht sich der Begriff der „Sprengkopfkomponente“ auf den Teil eines nuklearen Sprengkopfes, der aus Spaltmaterial besteht.

<sup>6</sup> J. Fuller et al., Innovating Verification: New Tools & New Actors to Reduce Nuclear Risks, Verifying Baseline Declarations of Nuclear Materials and Warheads, ed. Nuclear Threat Initiative, 2014, S. 21.

<sup>7</sup> Ibid.

gen, insbesondere Brennstoff zum Betreiben von Unterwasserbooten in Form hochangereicherter Urans. Zuletzt kommen die Spaltmaterialien aus den zivilen Brennstoffkreisläufen der Kernwaffenstaaten hinzu. Dieser unterliegen bereits teilweise der multilateralen Verifikation im Rahmen der freiwilligen Voluntary Offer Agreements der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEO). Dies sind Verträge, bei denen Kernwaffenstaaten freiwillig Anlagen der Verifikation übergeben. Da der zivile Brennstoffkreislauf keiner Form der Geheimhaltung vergleichbar mit dem militärischen Kreislauf unterliegt, wäre es für die IAEO prinzipiell technisch möglich, den kompletten zivilen Brennstoffkreislauf aller Kernwaffenstaaten zu überwachen und damit auch Spaltstoffe aus abgerüsteten Sprengköpfen, sobald diese von dem betreffenden Staat als zivil deklariert worden sind.

Bezüglich der längerfristigen Zukunft nuklearer Rüstungskontrolle und Abrüstung gibt es eine breite Übereinkunft, dass die soeben beschriebenen Prozesse direkt verifiziert werden müssen. Dies würde Staaten erlauben, die Anzahl vorhandener Sprengköpfe zu kennen und – im Gegensatz zur heutigen Situation – das gesamte nukleare militärische Potenzial einschätzen zu können. Nachdem die Gesamtbestände der nuklearen Sprengköpfe und Komponenten erfasst und mit dem Inkrafttreten einer Vereinbarung deklariert wurden, würden Inspektoren eingeladen werden um zu überprüfen, ob die Deklarationen fehlerfrei sind. Zukünftige Änderungen im Inventar müssten ebenfalls deklariert und verifiziert werden. Dies trifft insbesondere auf die Zerlegung der Sprengköpfe zu. Zusätzlich ist die Verifikation der Produktion von Spaltmaterial sowie deren Bestände notwendig um Vertrauen aufzubauen, dass keine neuen Sprengköpfe aus neu produziertem oder aus dem Zerlegungsprozess erhaltenem Spaltmate-

rial produziert werden. Entsprechende Vertragsvorkehrungen sind relevant für einen Vertrag über ein Verbot der Herstellung von spaltbarem Material für Waffenzwecke (FMCT). Die Verifikation von Spaltmaterial liegt jedoch außerhalb der Fokussierung dieser Publikation, die sich auf die Verifikation von Sprengköpfen und Sprengkopfkomponenten bezieht.<sup>8</sup>

## Forschungsentwicklung

Frühzeitig wurde erkannt, dass die Verifikation von Trägersystemen vermutlich nicht ausreichen würde. Erste Forschung zur Verifikation von Sprengköpfen und deren Abrüstungsprozess fanden in den USA bereits ab 1963 statt im Rahmen des Projekts Cloudgap.<sup>9</sup> In drei Übungen wurde die Verifikation der Zerlegung von Sprengköpfen geübt, wobei die den Inspektoren zur Verfügung stehenden Informationen in den Übungen variierten. Ziel des Projekts war es herauszufinden, inwiefern Inspektoren sensitive Informationen erhalten.

Die Forschung wurde insbesondere nach dem Zusammenbruch der Sowjetunion deutlich intensiviert. Eine technische Kooperation zwischen dem US-amerikanischen Energieministerium und dem russischen Atomenergieministerium mündete Ende der neunziger Jahre in dem US-russischen Warhead Safety and Security Exchange.<sup>10</sup> Teil dieses Programms waren gemeinsame hypothetische Studien zu Technologien und Methoden für Vor-Ort-Inspektionen bei der Zerlegung von Sprengköpfen. Die technischen Arbeiten wurden von den einschlägigen nuklearen Forschungslaboren durchgeführt, wodurch der technische Austausch auch als „lab-to-lab“ Kooperation bekannt wurde. Im Rahmen eines solchen technischen Austauschs wurden russische Wissenschaftler in die USA eingeladen

<sup>8</sup> Weiterführende Informationen zum FMCT und seiner Verifikation finden sich in: International Panel on Fissile Materials, Global Fissile Material Report 2013: Scope and Verification of a Fissile Material (Cutoff) Treaty, 2008.

<sup>9</sup> United States Arms Control and Disarmament Agency, Final Report – Field Test 34: Demonstrated Destruction of Nuclear Weapons (U), Januar 1969, freigegeben 1999, verfügbar unter [www.fas.org/nuke/guide/usa/cloudgap/index.html](http://www.fas.org/nuke/guide/usa/cloudgap/index.html).

<sup>10</sup> International Panel on Fissile Materials, Global Fissile Material Report 2013: Increasing Transparency of Nuclear Warhead and Fissile Material Stocks as a Step towards Disarmament, 2013.

und US-amerikanische nach Russland, um als Beobachter an Demonstrationen von Verifikationstechnologien an echten Sprengköpfen teilzunehmen.<sup>11</sup>

Eine spezifische Übung, die Fissile Material Transparency Technology Demonstration, fand beispielsweise im Jahr 2000 im Los Alamos National Laboratory statt.<sup>12</sup> Gleichzeitig wurde konkret an Verifikationstechnologien gearbeitet. Ein Beispiel ist die AVNG (Attribute Verification with Neutrons and Gamma Rays), deren Ergebnisse in gemeinsamen Publikationen auf Tagungen des Institute for Nuclear Materials Management veröffentlicht wurden.<sup>13</sup> Inzwischen wurde dieser bilaterale lab-to-lab Kooperationsmechanismus eingestellt.

Auf höherer politischer Ebene fand zwischen 1996 und 2002 die Trilateral Initiative unter Beteiligung der USA, Russlands sowie der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEO) statt. Ziel der Initiative war zu untersuchen, ob die IAEO aus Sprengköpfen stammendes spaltbares Material verifizieren würde. Unter anderem fanden auch im Rahmen dieser Initiative Technologieentwicklung sowie verschiedene Übungen statt, unter anderem am europäischen Joint Research Centre in Italien.<sup>14</sup> Während die Überprüfungskonferenz des Nichtverbreitungsvertrags im Jahr 2000 weitere Aktivitäten hin zur Fertigstellung und Implementierung der Initiative forderte, entschieden sich die neuen Führungen der USA und Russlands zu ihrem Abbruch.<sup>15</sup> Neben den US-russischen Kooperationen findet

insbesondere in den USA ausführliche Forschung zu Abrüstungsverifikation statt. Ein Beispiel ist die Entwicklung des Third Generation Attributes Measurement Systems (3G-AMS).<sup>16</sup> Innerhalb der USA gibt es seit 2014 mit dem Consortium for Verification Technology eine Kooperation zwischen 13 Universitäten und 9 nationalen Laboratorien, um Verifikationstechnologien für Rüstungskontrollzwecke zu entwickeln.<sup>17</sup>

Forschungsaktivitäten finden nicht nur in den USA und Russland statt. Insbesondere hervorzuheben ist die UK-Norway-Initiative zwischen dem Vereinigten Königreich und Norwegen. Dies ist die erste entsprechende Zusammenarbeit eines Kernwaffenstaats mit einem Nichtkernwaffenstaat. Nachdem das Vereinigte Königreich auf der Überprüfungskonferenz 2005 das Interesse bekundet hatte, mit anderen Staaten an Abrüstungsverifikation zu arbeiten, gab es 2006 den ersten Kontakt mit Norwegen. Seitdem arbeiten die beiden Staaten zusammen an der Entwicklung relevanter Messsysteme, an Protokollfragen sowie an dem Problem, wie spezifische Verifikationsmaßnahmen geeignet sind, Vertrauen zu schaffen.<sup>18</sup> Unter anderem diskutiert die Initiative die Bedeutung und Herausforderung bei der Beteiligung von Nichtkernwaffenstaaten. 2011 fand eine dreitägige Arbeitstagung zu dieser Thematik statt, an dem 12 Nichtkernwaffenstaaten teilnahmen.<sup>19</sup> Zusätzlich unterhält das Vereinigte Königreich seit 2000 eine Forschungsk Kooperation mit den USA.<sup>20</sup>

<sup>11</sup> Ibid.

<sup>12</sup> Siehe detaillierte Informationen und einige weiterführende Publikationen unter [http://www.lanl.gov/orgs/n/n1/FMTTD/index\\_main.htm](http://www.lanl.gov/orgs/n/n1/FMTTD/index_main.htm).

<sup>13</sup> Insbesondere fand eine Special Session auf der Tagung 2010 statt, beispielsweise mit folgenden Publikationen:

D. MacArthur, D. Langner, A. Livke, S.J. Luke, M. Smith, J. Thron, S. Razinkov, The Attribute Measurement Technique, Institute of Nuclear Materials Management Annual Meeting, 2010.

S. Razinkov, M. Bulatov, S. Kondratov, A. Livke, M. Leplyavkina, D. MacArthur, D. Sivachev, J. Thron, S. Tsybryaev, A. V'yushin, AVNG System Objectives and Concept, Institute of Nuclear Materials Management Annual Meeting, 2010.

S.J. Luke, AVNG as a Test Case for Cooperative Design, Institute of Nuclear Materials Management Annual Meeting, 2010.

<sup>14</sup> T.E. Shea, The Trilateral Initiative: IAEA Verification of Weapon-Origin Plutonium in the Russian Federation and the United States, IAEA Symposium on International Safeguards, 2014.

<sup>15</sup> Ibid.

<sup>16</sup> Siehe beispielsweise J. Thron, P. Karpus, P. Santi, M. Smith, D. Vo, R. Williams, Designing a 3rd Generation, Authenticatable Attribute Measurement System, Institute of Nuclear Materials Management Annual Meeting, 2009.

<sup>17</sup> Siehe <http://cvt.engin.umich.edu/>.

<sup>18</sup> Siehe beispielweise Vereinigtes Königreich, Norwegen, The United Kingdom-Norway Initiative: Research into the verification of nuclear warhead dismantlement, Arbeitspapier der Überprüfungskonferenz NPT/CONF.2010/WP.41, 2010.

<sup>19</sup> The UK-Norway Initiative, Report on the UKNI Non-Nuclear Weapon States Workshop (7-9 December 2011), siehe <https://www.gov.uk/government/publications/uk-norway-initiative-on-nuclear-warhead-dismantlement-verification-2>

<sup>20</sup> International Panel on Fissile Materials, Global Fissile Material Report 2013: Increasing Transparency of Nuclear Warhead and Fissile Material Stocks as a Step towards Disarmament, 2013.

Insgesamt leistet der europäische Raum einen eher geringen Beitrag zu entsprechender Forschung und Entwicklung. Neben der UK-Norway-Initiative gibt es eine Arbeitsgruppe innerhalb der European Safeguards Research and Development Association (ESARDA). In Deutschland hat sich 2012 das Netzwerk Abrüstungsverifikation gebildet. Angestoßen durch deren Diskussionen wurde eine Studie verfasst, die sich mit der Fragestellung beschäftigt, ob Europa bzw. die Europäische Union sich verstärkt an der Abrüstungsverifikationsdebatte beteiligen sollten.<sup>21</sup> Folgende Vorteile eines größeren Engagements wurden identifiziert:

- Aufgrund gegenseitigen Vertrauens wäre eine Kooperation zwischen Nichtkernwaffen- und Kernwaffenstaaten der EU voraussichtlich sehr konstruktiv
- Aufgrund ziviler Nuklearprogramme gibt es in vielen europäischen Staaten Expertise, die relevant für Abrüstungsverifikation ist, so dass ein hochwertiger Forschungsbeitrag möglich wäre. Hervorzuheben ist hier die Gemeinsame Forschungsstelle der EU und ihr Institut für Transurane.
- EURATOM führt Überprüfungsmaßnahmen in allen zivilen Anlagen durch, ebenfalls in Großbritannien und in Frankreich. Dies schließt Anlagen ein, die ehemals militärischen Zwecken gedient haben. Dadurch verfügt EURATOM über einzigartige relevante Verifikationserfahrungen.

Kurz- bis mittelfristig könnte die Europäische Union untersuchen, welche Aktivitäten der Gemeinsamen Forschungsstelle im Abrüstungskontext relevant sind und welche Lehren aus der Verifikation durch EURATOM gezogen werden können. Forschungsmittel könnten zukünftig zur Verfügung gestellt werden. Die Studie schlägt zudem vor, einen einjährigen Analyse-

prozess zu beginnen unter Beteiligung aller relevanten nationalen und europäischen Institutionen, Forschungsgruppen, und Verbände mit dem Ziel, eine multilaterale Abrüstungsverifikationskapazität zu begründen. Längerfristig würde die Gründung eines EU-Zentrums für Abrüstungsverifikation die Effektivität der Forschung maximieren.

## **Notwendigkeit der Abrüstungsverifikation**

Das Vertrauen, das durch Verifikationstätigkeiten im Rahmen von Deklarationen von Sprengkopfbeständen und deren Abrüstung gewonnen wird, kann eine entscheidende Rolle zur zukünftigen Beibehaltung von Sicherheit und Stabilität spielen. Es ist höchstwahrscheinlich Voraussetzung, damit sich Vertragsparteien auf massive Reduzierungen ihrer nuklearen Arsenale („deep cuts“) einlassen werden: Es ist unwahrscheinlich, dass solche Verringerungen in russischen und US-amerikanischen Beständen sowie denen anderer Kernwaffenstaaten möglich werden, bevor alle Beteiligten großes Vertrauen haben, dass vereinbarte Reduzierungen gleichzeitig und reziprok stattfinden. Heutzutage können geringe Unsicherheiten noch eher tolerierbar sein: Auch nach den bisherigen Reduktionen sind die Arsenale weiter groß genug, dass die Nichteinhaltung von Verträgen in geringem Maße keinen dramatischen Einfluss auf die Stabilität hätte. Zusätzlich mögen Kernwaffenstaaten glauben, dass ihre derzeitigen Nukleardoktrinen vor der vollständigen Umgehung von Vereinbarungen abschrecken. Wenn hingegen zukünftig Staaten eine Politik mit dem Ziel einer kernwaffenfreien Welt verfolgen und weitere Schritte in Richtung dieses Zieles angehen, werden die Kernwaffenbestände zu einem späteren Zeitpunkt so gering, dass geringe Vertragsverletzungen in der Wahrnehmung anderer Kernwaffenstaaten die Stabilität gefährden. Als Re-

---

<sup>21</sup> M. Götsche, M. Kütt, G. Neuneck, I. Niemeyer, Advancing Disarmament Verification Tools: A Task for Europe? EU Non-Proliferation Paper 47, Oktober 2015

sultat reduzierter militärischer Kapazitäten müssen derzeitige Abschreckungsdoktrinen angepasst werden zu Formen, die möglicherweise als weniger effektiv angesehen werden. Vertragsverletzungen würden dann weitaus größere Besorgnis erregen, sodass es unwahrscheinlich ist, dass weitere Reduktionen ohne einen klaren Pfad zu hocheffektiver Verifikation unternommen würden.

Artikel VI des Nichtverbreitungsvertrags ruft unter anderem auf, „in redlicher Absicht Verhandlungen zu führen [...] zur nuklearen Abrüstung sowie über einen Vertrag zur allgemeinen und vollständigen Abrüstung unter strenger und wirksamer internationaler Kontrolle.“ Einige Nichtkernwaffenstaaten haben ihre Erwartungen größeren Fortschritts deutlich geäußert. Da nukleare Abrüstung nur mit direkten Inspektionen von Sprengköpfen und ihrer Zerlegung umfassend verifiziert werden kann, erscheint dies eine notwendige Voraussetzung zu sein, um wie in Artikel VI gefordert eine „strenge und wirksame internationale Kontrolle“ zu ermöglichen<sup>22</sup>. Der Vertragstext deutet auch darauf hin, dass Nichtkernwaffenstaaten in einem Verifikationsregime involviert sein sollten. Durch angemessene Verifikationsmöglichkeiten könnten Kernwaffenstaaten der internationalen Gemeinschaft demonstrieren, dass sie ihre Abrüstungsverpflichtungen erfüllen. Zusätzlich ist derartige Verifikation auch relevant für Staaten, die außerhalb des Nichtverbreitungsvertrages Kernwaffen besitzen. Sollten sie entscheiden, ihre Arsenale zu verringern, könnte entsprechende Verifikation das Vertrauen der internationalen Gemeinschaft, inklusive Staaten in der Region, ebenfalls deutlich erhöhen.

Aus globaler Perspektive ist es aufgrund ihrer enormen Bestände die Verantwortung Russlands und der USA, einen Prozess signifikanter Reduktionen einzuleiten. In Hinblick auf eine kernwaffenfreie Welt müssten ab einem gewis-

sen Zeitpunkt sich alle weiteren Kernwaffenstaaten anschließen. Während bilaterale Vereinbarungen zwischen Russland und den USA weiterhin eine Grundlage nuklearer Abrüstung sein können, müssen zukünftige Vereinbarungen neben den fünf vom Nichtverbreitungsvertrag anerkannten auch die nicht anerkannten Kernwaffenstaaten einbeziehen. Neben der Berücksichtigung von Artikel VI ist die direkte Einbeziehung von Nichtkernwaffenstaaten in Verifikationsaktivitäten der effektivste und vermutlich einzig mögliche Weg, dass sie Vertrauen in die Reduktion der Bestände aufbauen. In dieser Hinsicht könnte die Internationale Atomenergiebehörde aufgrund ihrer Expertise auf dem Feld der Verifikation nuklearer Nichtverbreitung ein möglicher Akteur sein. Bei der Beteiligung von Nichtkernwaffenstaaten müssen besondere Herausforderungen berücksichtigt werden: Der Nichtverbreitungsvertrag verbietet erstens Nichtkernwaffenstaaten die Entwicklung und den Bau von Kernwaffen und zweitens Kernwaffenstaaten, ersteren dabei zu helfen. Dadurch kann der Vertrag zu erheblichen Einschränkungen bei solchen Verifikationstätigkeiten führen, die direkt die Sprengköpfe betreffen: Inspektoren aus Nichtkernwaffenstaaten könnten schließlich während der Verifikationstätigkeiten Informationen erhalten, die ihnen beim Bau eigener Sprengköpfe hilfreich sein könnten. Um multilaterale Verifikation unter Beteiligung von Nichtkernwaffenstaaten zu ermöglichen, müssen diese besonderen Herausforderungen verstanden und gelöst werden.

Unabhängig davon, welche Parteien in der Verifikation involviert sein werden, gibt es drei grundsätzliche technische Voraussetzungen bei der Verifikation von Inventardeklarationen und der Sprengkopferlegung:

1. Jeder Sprengkopf und jede Sprengkopfkomponente müssen eindeutig identifiziert

<sup>22</sup> Siehe Vertragstext des NPT, z.B. auf: [http://www.un.org/disarmament/WMD/Nuclear/pdf/NPTEnglish\\_Text.pdf](http://www.un.org/disarmament/WMD/Nuclear/pdf/NPTEnglish_Text.pdf) und in deutscher Übersetzung auf [http://www.atomwaffena-z.info/fileadmin/user\\_upload/pdf/NPT-Vertrag.pdf](http://www.atomwaffena-z.info/fileadmin/user_upload/pdf/NPT-Vertrag.pdf)

werden, sodass sie niemals doppelt gezählt oder durch eine Attrappe ersetzt werden können. Zusätzlich können sie so durch eine Umgebung verfolgt werden, in der Inspektoren nur stark eingeschränkten Zugang haben. Der regelmäßige Standortwechsel von Sprengköpfen erhöht die Wichtigkeit der eindeutigen Identifizierung. Zwei unterschiedliche Möglichkeiten, einen Sprengkopf oder eine Sprengkopfkomponente sicher zu identifizieren, sind die Aufnahme einer intrinsischen fälschungssicheren Signatur des Objekt vergleichbar zu einem Fingerabdruck und die Anbringung einer Kennzeichnung (engl. „tag“), die ebenfalls fälschungssicher sein muss.

2. Eine lückenlose Verfolgung (engl. „continuity of knowledge“ oder „chain of custody“) der sich im Inventar befindlichen Sprengköpfe und Sprengkopfkomponenten muss zu allen Zeiten, inklusive der physischen Zerlegung gewährleistet sein. Das bedeutet, dass Wissen über die Sprengköpfe und Sprengkopfkomponenten in Form eines nicht unterbrochenen Beweisfadens zeitlich erhalten bleiben muss. Andernfalls bestünde die Gefahr, dass Sprengköpfe der Überwachung entzogen werden und über die Zeit so ein Inventar versteckter Sprengköpfe aufgebaut wird. Generell muss die lückenlose Verfolgung durch eine Kombination von Prozeduren und Techniken erfolgen. Verwendbare Techniken sind Verfahren der Eingrenzung/ Versiegelung und Überwachung (engl. „containment and surveillance“) wie beispielsweise Kameras und Siegel. Prozeduren basieren auf zu verhandelnden Verifikationsprotokollen, in denen der Zugang und die Befugnisse von Inspektoren geregelt sind. Sie müssen derart sein, dass Inspektoren Informationen erhalten, auf deren

Grundlage belastbare Einschätzungen möglich sind.

Ein erster Schritt sind häufige Verifikationsmaßnahmen, bei denen deklarierte Inventare mit den tatsächlich aufzufindenden Sprengköpfen und ihrer eindeutigen Identifikation verglichen werden. Transporte könnten verifiziert werden, indem Sprengköpfe oder andere Objekte beim Verlassen einer Einrichtung versiegelt werden und das Siegel bei der Ankunft in der neuen Einrichtung gebrochen wird. Bei der lückenlosen Verfolgung von Prozessen innerhalb einer Einrichtung, zum Beispiel bei der Zerlegung, sind die Herausforderungen erheblich: Zugang innerhalb der Einrichtung wird äußerst strikt reglementiert sein und u.a. durch Sicherheitspersonal verhindert werden. Große Teile von Einrichtungen werden für den Inspektor nicht erreichbar oder zumindest verdeckt sein. Die erlaubte technische Ausrüstung wird hohe Anforderungen erfüllen müssen, Kapazitäten wie das Speichern von Daten könnten stark beschränkt oder verboten sein.<sup>23</sup>

3. Es muss nachgewiesen werden, ob ein als Sprengkopf oder Sprengkopfkomponente deklariertes Objekt dies tatsächlich ist. Der entsprechende Nachweis der Identität eines Objekts wird Authentifizierung genannt.<sup>24</sup> Die in dieser Studie beschriebenen Ergebnisse fokussieren sich auf diese Herausforderung. Vermutlich wäre es zu aufwendig, nach der ersten umfassenden Bestandsdeklaration sämtliche vorhandene Sprengköpfe zu authentifizieren. Eine Methode ist die Überprüfung von Stichproben. Hierbei würde eine Deklaration als wahr angesehen werden, wenn bei einer genügend großen Anzahl an Stichproben keine einzige von ihrer Deklaration abweicht.<sup>25</sup> Mit fortschreitender Zeit

<sup>23</sup> J. Fuller et al., *Innovating Verification: New Tools & New Actors to Reduce Nuclear Risks, Verifying Baseline Declarations of Nuclear Materials and Warheads*, ed. Nuclear Threat Initiative, 2014, S. 26.

<sup>24</sup> Das Konzept der Authentifizierung ist nicht nur für Sprengköpfe und Sprengkopfkomponenten relevant. Genauso kann es zukünftig sein, dass weitere militärische Materialien wie z.B. der nukleare Brennstoff für Unterwasserboote authentifiziert werden müssen. Die damit assoziierten technischen Herausforderungen sind zum Teil sehr ähnlich zu denen der Sprengköpfe.

<sup>25</sup> J. Fuller et al., *Innovating Verification: New Tools & New Actors to Reduce Nuclear Risks, Verifying Baseline Declarations of Nuclear Materials and Warheads*, ed. Nuclear Threat Initiative, 2014, S. 28.

könnten ggf. mehr und mehr Objekte authentifiziert werden, spätestens im Rahmen ihrer physischen Zerlegung.

## Informationsbarrieren

Staaten, die ihre Waffenarsenale deklarieren, werden höchstwahrscheinlich keine Inspektionen zulassen, wenn diese Informationen über ihre Sprengköpfe und Sprengkopfkomponenten offenlegen, welche der Kernwaffenstaat als sensitiv einstuft. Der Nichtverbreitungsvertrag setzt Grenzen für die Beteiligung von Nichtkernwaffenstaaten bei Inspektionen. Aufgrund nationaler Sicherheitsinteressen könnten Inspektoren aus anderen Kernwaffenstaaten jedoch nicht wesentlich mehr Zugang zu sensitiven Informationen erhalten.<sup>26</sup> Für den Fall, dass Verifikationsmaßnahmen im kooperativen Verfahren festgelegt werden, kann eine Einigung über zulässige Verfahren zur Sprengkopfauthentifizierung nur dann erreicht werden, falls der inspizierte Kernwaffenstaat sicher ist, dass seine sensitiven Informationen geschützt bleiben. Da das Ziel der inspizierenden Partei ist, durch Verifikation maximales Vertrauen in die Echtheit von Sprengköpfen zu gewinnen, wird sie intrusive und umfassende Verifikationsmaßnahmen bevorzugen. Das gemeinsame Ziel ist dementsprechend die Entwicklung eines Systems der Sprengkopfauthentifizierung, welches geeignet ist Vertrauen aufzubauen, während es gleichzeitig verhindert, dass Informationen zugänglich gemacht werden, die der inspizierte Staat entweder nicht teilen möchte oder juristisch gesehen nicht teilen darf. Die gleichzeitige Verwirklichung beider Ziele wirkt zunächst widersprüchlich.

Eine Lösung ist ein System, das intrusive Messungen durchführt, die sensitive Informationen aufnehmen, und anschließend diese Informa-

tionen automatisiert mittels eines Algorithmus so verarbeitet, dass die Ausgabe, die der Inspektor sieht, nur nicht-sensitive Informationen beinhaltet (zum Beispiel ein grünes, gelbes und rotes Licht für „spezifizierter Sprengkopf“, „nicht eindeutiges Ergebnis“ und „nicht spezifizierter Sprengkopf“). Die Zurückhaltung sensitiver Informationen wäre die Aufgabe einer sogenannten Informationsbarriere.

Zwei Arten von Authentifizierungssystemen werden hauptsächlich diskutiert. Für die Referenzsignaturvariante („template“, siehe Abbildung 2) wird zunächst eine die Sprengkopfart eindeutig charakterisierende Signatur gemessen (zum Beispiel ein Energiespektrum der emittierten Gammastrahlung). Diese Messung wird bei einem Objekt durchgeführt, bei dem ausreichendes Vertrauen besteht, dass es sich um einen echten Sprengkopf handelt. Bei der Authentifizierung weiterer als Sprengkopf deklarierter Objekte wird ebenfalls die entsprechende Signatur gemessen und mit der ursprünglichen Referenzsignatur verglichen. Das Objekt gilt als erfolgreich authentifiziert, wenn beide Signaturen übereinstimmen. Das schwierig zu lösende Hauptproblem ist die benötigte Sicherheit, dass das Referenzprojekt ein geeigneter Sprengkopf ist. Ein erster Ansatz können sogenannte Schlüsselindikatoren sein. Sie können eine Authentifizierung nicht ersetzen, aber Hinweise zur Echtheit geben. Unter New START zum Beispiel werden Sprengköpfe gezählt, die auf Trägersystemen angebracht sind. Es wird dabei angenommen, dass diese Sprengköpfe echt sind. Der Schlüsselindikator ist in diesem Fall das Trägersystem selbst. Schlüsselindikatoren bei gelagerten Sprengköpfen könnten beispielsweise der Verwahrungsort, die sichtbare Konfiguration oder sichtbare Sicherungsmaßnahmen sein.<sup>27</sup> Das Verfahren über Schlüsselindikatoren müsste sicherlich durch andere Prozeduren ergänzt werden, um ausreichend

<sup>26</sup> J. Fuller et al., *Innovating Verification: New Tools & New Actors to Reduce Nuclear Risks, Verifying Baseline Declarations of Nuclear Materials and Warheads*, ed. Nuclear Threat Initiative, 2014, S. 38.

<sup>27</sup> J. Fuller et al., *Innovating Verification: New Tools & New Actors to Reduce Nuclear Risks, Verifying Baseline Declarations of Nuclear Materials and Warheads*, ed. Nuclear Threat Initiative, 2014, S. 29.



Vertrauen in die Echtheit des Referenzsprengkopfes zu bekommen.



Abbildung 2: Das Template-Verfahren

Unsere Arbeiten nutzen das alternativ diskutierte Konzept, nämlich das Attributverfahren (Abbildung 3): Bei dieser Variante deklariert der inspizierte Staat Attribute, die den zu authentifizierenden Sprengkopf beschreiben. Notwendigerweise enthalten diese Attribute keine sensitiven Informationen. Um maximales Vertrauen zu ermöglichen, sollten diese Attribute die Möglichkeit des Betrügens minimieren. Idealerweise sollten Attribute derart gewählt werden, dass nur echte spezifizierte Sprengköpfe die Attribute erfüllen und alle anderen Objekte zurückgewiesen werden. In der Realität könnte es jedoch sein, dass dieses idealistische Konzept nicht erfüllbar ist: Fehler erster und zweiter Art könnten möglich sein, aufgrund derer ein in Wirklichkeit echter Sprengkopf als unecht charakterisiert oder dass ein in Wirklichkeit unechter Sprengkopf als echt charakterisiert wird.

Die Herausforderung ist also die Festlegung von Attributen und Auswerteverfahren auf eine solche Art und Weise, dass die Wahrscheinlichkeit von Fehlern erster und zweiter Art begrenzt bleibt und so das Vertrauen in die Ergebnisse maximiert wird. Wie zuverlässig eine Attribut-

Informationsbarriere sein muss, oder gleichbedeutend welches Niveau an Unsicherheiten akzeptabel ist, ist eine politische Fragestellung. Es lässt sich feststellen, dass der Wert einer solchen Informationsbarriere bestimmt wird von der Attributauswahl, dem Algorithmus sowie von der Zuverlässigkeit der Messverfahren.

## Attributauswahl

Attribute können qualitativer oder quantitativer Natur sein. Quantitative Attribute könnten beispielsweise gewisse Grenzwerte sein, sodass die möglicherweise sensitiven exakten Werte nicht deklariert werden müssten. Wenn die angegebenen Grenzwerte jedoch zu sehr von den wahren Werten abweichen, könnten möglicherweise auch andere Objekte ein solches Attribut erfüllen und so die Fehlerrate erhöhen. Entsprechend wäre das Vertrauen reduziert. Tabelle 1 zeigt Beispiele publizierter Attribute für Sprengköpfe und Sprengkopfkomponenten. Die Liste bedeutet allerdings nicht zwangsläufig, dass die angegebenen Attribute die einzig möglichen oder die am besten geeigneten sind.

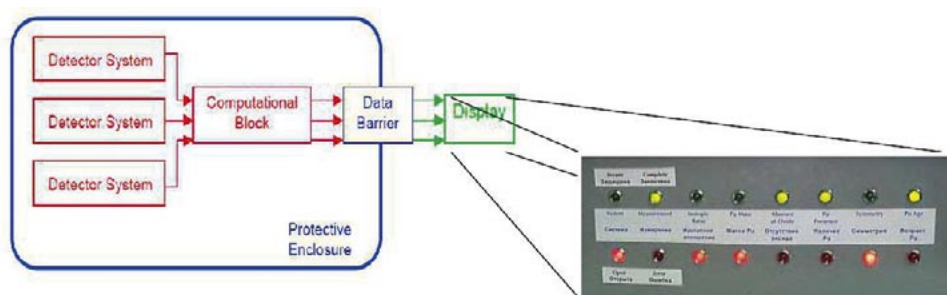


Abbildung 3: Das Attribut-Verfahren

Attribut	Vorgeschlagen von
Vorhandensein von Plutonium	Trilateral Initiative, AVNG, FMTTD, 3G-AMS
Isotopenverhältnis Pu-239 zu Pu-240	Trilateral Initiative, AVNG, FMTTD, 3G-AMS
Mindestmasse Plutonium	Trilateral Initiative, AVNG, FMTTD, 3G-AMS
Dauer seit Plutoniumabtrennung	FMTTD
Abwesenheit von Oxid	FMTTD
Objektsymmetrie	FMTTD
Vorhandensein von U-235	3G-AMS
Anreicherungsgrad vom Uran	3G-AMS
Mindestmasse Uran-235	3G-AMS
Masse des konventionellen Explosivstoffs	3G-AMS

**Tabelle 1: Mögliche Attribute und die Initiativen, die sie vorgeschlagen haben** <sup>28, 29, 30, 31</sup>

Die Bedeutung einer sorgfältigen Auswahl von Attributen wird deutlich durch die Überlegung, dass staatlichen Akteuren außerordentlich große Ressourcen zur Verfügung stehen um Vereinbarungen zu hintergehen. Es ist also wichtig, Schlupflöcher zu minimieren bzw. auszuschließen. Der inspizierende Staat stößt hier allerdings auf ein Dilemma: Er soll bewerten, wie sinnvoll die vom inspizierten Staat vorgeschlagen Attribute sind, also inwiefern sie an das oben beschriebene idealistische Konzept herankommen und alle Objekte korrekt einordnen. Dabei weiß er aber nicht im Detail, wie diese Objekte genau aussehen. Dies trifft insbesondere zu, wenn an der Verifikation ein Nichtkernwaffenstaat beteiligt ist.

Dieses Dilemma kann nicht vollständig aufgelöst werden. Unabhängig davon, wie sorgfältig der Prozess der Attributauswahl verläuft, könnten Zweifel derart bleiben, dass vermutlich aus diesem einen Verifikationswerkzeug nicht ausreichend Vertrauen entstehen kann. Eine Attributinformationsbarriere muss also mit anderen

Verifikationsaktivitäten kombiniert werden. Bei der Attributauswahl kann klare Kommunikation von großem Vorteil sein: Insbesondere wenn der inspizierte Staat Gründe angeben kann, warum welche Attribute sinnvoll sind und andere nicht, kann die inspizierende Partei überlegen, inwiefern diese Gründe nachvollziehbar, glaubwürdig und stichhaltig sind. Im Rahmen der durch die Natur der sensitiven Informationen beschränkten Möglichkeiten sollte der Diskussionsprozess mit maximaler Offenheit geführt werden. Dies liegt insbesondere auch im Eigeninteresse des inspizierten Staates, da dieser der internationalen Gemeinschaft zeigen möchte, dass er seinen Abrüstungsverpflichtungen nachkommt. Daher sollte er dem inspizierenden Staat ermöglichen, zu aussagekräftigen Schlussfolgerungen zu kommen.

Wenig ist bekannt über die Gründe, aufgrund derer die USA und Russland in der Vergangenheit gewisse Attribute vorgeschlagen haben. Ein wesentlicher Grund scheint jedoch die Verfügbarkeit entsprechender Messtechniken zu

<sup>28</sup> G. Warren, D.E. Archer, M. Cunningham, S. McConchie, J. Thron, Concepts for the Measurements Subsystems of the Third Generation Attributes Measurement System, Institute of Nuclear Materials Management 53rd Annual Meeting, Orlando, 2012.

<sup>29</sup> D.G. Langner, S.T. Hsue, D. MacArthur, N.J. Nicholas, R. Whiteson, T.B. Gosnell, Z. Koenig, J. Wolford, M. Aparo, I. Kulikov, J. Puckett, J. Whicello, S. Razinkov, A. Livke, V.J. Poplavki, Attribute Verification Systems with Information Barriers for Classified Forms of Plutonium in the Trilateral Initiative, International Atomic Energy Agency Symposium on International Safeguards: Verification and Nuclear Material Security, IAEA-SM-367/17/02, Vienna, 2001.

<sup>30</sup> Fissile Material Transparency Technology Demonstration, Technical Overview of Fissile Material Transparency Technology Demonstration, Executive Summary, [http://www.lanl.gov/orgs/n/n1/FMTTD/presentations/pdf\\_docs/exec\\_sum.pdf](http://www.lanl.gov/orgs/n/n1/FMTTD/presentations/pdf_docs/exec_sum.pdf).

<sup>31</sup> S. Razinkov, M. Bulatov, S. Kondratov, A. Livke, M. Leplyavkina, D. MacArthur, D. Sivachev, J. Thron, S. Tsybryaev and A. V'yushin, AVNG System Objectives and Concept, Institute of Nuclear Materials Management 51st Annual Meeting, Baltimore, 2010.

sein und die Berücksichtigung der Existenz von Materialien zwischen Spaltmaterial und Detektor (z.B. Container). Dies kann anhand eines Beispiels skizziert werden: In einer Initiative wurde als Attribut eine Plutonium-Mindestmasse von 500 g eingeführt.<sup>32</sup> Dieser Wert könnte so ausgewählt worden sein, weil das damit assoziierte Messverfahren und die entsprechende Analyse eine Masse angeben würde, die garantiert über 500 g liegen würde, allerdings nicht zwangsläufig viel höher. Auch wenn die tatsächliche spaltbare Masse des Sprengkopfes signifikant höher sein dürfte, könnte die Messmethode aufgrund vorhandener Abschirmung einen niedrigeren Wert ermitteln, der jedoch weiterhin über 500 g liegen würde. Die Notwendigkeit zu solcher Spekulation deutet auf eine ausbaufähige Transparenz der USA und Russlands hin.

Auch verschiedene Ausgabeoptionen einer Informationsbarriere müssen sorgfältig reflektiert werden. Bisherige Diskussionen beziehen sich auf eine binäre Ausgabe („spezifizierter Sprengkopf“ und „nicht spezifizierter Sprengkopf“). Die Verwendung von drei Ausgabeoptionen wie oben vorgeschlagen hätte den Vorteil, der physikalischen Realität besser zu entsprechen, in der es zu jedem Ergebnis eine assoziierte Unsicherheit gibt, so dass Ergebnisse nicht so eindeutig sind, wie eine binäre Ausgabe es suggeriert. Weitere Ausgabeoptionen könnten jedoch auch über diesen Vorschlag hinausgehen, um dem Inspektor mehr Informationen zu geben. So könnte mehr Vertrauen erreicht werden. Ein deutlich weitergehender Vorschlag wäre, einen Vertrauensindex als Ausgabe zu wählen, der anzeigt, wie wahrscheinlich es ist, dass ein Objekt seiner Deklaration entspricht. Verschiedene Attribute oder andere Verfahren könnten je nach Auswertung den Index nach oben oder unten verschieben. Im Prinzip ist jede Ausgabe möglich, solange sie keine sensitiven Informationen preisgibt.

Wir schlagen ein systematisches Vorgehen bei der Suche nach Attributen und Auswerteverfahren vor, die den folgenden Fragestellungen Rechnung trägt:

- Sensitive Informationen: Verhindert die Ausgabe die Offenlegung sensitiver Informationen, die nicht mit dem inspizierenden Staat geteilt werden dürfen?
- Relevanz: Minimieren die ausgewählten Attribute und die Analyse die Möglichkeit das Verifikationsregime zu hintergehen und sind sie geeignet, um maximales Vertrauen beim inspizierenden Staat zu erzeugen?
- Robustheit: Wie abhängig ist das Ergebnis der Analyse, basierend auf Messungen, von nicht genau bekannten Eigenschaften der Sprengköpfe wie z.B. deren Geometrie (siehe Diskussion unten)?
- Komplexität der Analyse und Messverfahren: Sind Analyse und Messverfahren ggf. zu komplex, so dass ein gesteigertes Risiko von Fehlern vorhanden ist?

## Herausforderungen für Messungen

Neben der Festlegung der Attribute müssen Möglichkeiten und Grenzen der ausgewählten Messmethoden, sprich deren Robustheit, sorgfältig begutachtet werden. Das Authentifizierungssystem muss eine äußerst hohe Zuverlässigkeit aufweisen, da Inspektoren bei bestehenden Zweifeln das Zustandekommen eines Ergebnisses nicht überprüfen können, wenn sie keinen Zugang zu den direkten Messergebnissen haben. Im Gegensatz zu anderen Situationen, in denen radioaktive Materialien vermessen und charakterisiert werden, ist das Wissen hinsichtlich der Beschaffenheit der Objekte (z.B.

---

<sup>32</sup> Fissile Material Transparency Technology Demonstration, Technical Overview of Fissile Material Transparency Technology Demonstration, Executive Summary, [http://www.lanl.gov/orgs/n/n1/FMTTD/presentations/pdf\\_docs/exec\\_sum.pdf](http://www.lanl.gov/orgs/n/n1/FMTTD/presentations/pdf_docs/exec_sum.pdf).

deren Geometrie) sehr beschränkt. Viele Mess-techniken benötigen eine Kalibrierung des Systems basierend auf Kalibrierungsstandards, die eine weitgehende Ähnlichkeit aufweisen müssen mit den Objekten, die später charakterisiert werden sollen. Wenn also die Beschaffenheit der Sprengköpfe unbekannt ist, kann nicht garantiert sein, dass die Kalibrierungsstandards hinreichend ähnlich sind. Generell sollten daher solche Messverfahren ausgewählt werden, bei denen möglichst wenige Annahmen bezüglich der Beschaffenheit der Sprengköpfe bzw. Sprengkopfkomponenten getroffen werden müssen, um zuverlässige und belastbare Messergebnisse zu erhalten. Zum Beispiel sind Messverfahren vorteilhaft, die zuverlässige Messergebnisse auch dann produzieren, wenn die Kalibrierung mit Materialien durchgeführt wurde, die Sprengköpfen nicht besonders ähnlich sind. Vor allem dann, wenn mehrere Messmethoden für die Bestimmung des gleichen Attributs zur Verfügung stehen, ist dies ein wichtiges Kriterium für die Priorisierung der Messverfahren.

Neben der Auswahl solcher Messverfahren, die möglichst wenig Informationen zu den Sprengköpfen erfordern, ist es auch dienlich, bei Messmethoden mit relevanter Abhängigkeit zu erforschen, ob diese -beispielsweise durch empirische Korrekturverfahren- reduziert werden kann und so die Genauigkeit potenzieller Messverfahren erhöht wird, sodass diese somit besser geeignet sind für den Einsatz bei der Sprengkopfauthentifizierung. Durch die Reduktion der Abhängigkeit von der Objektbeschaffenheit könnten als Attribute Grenzwerte festgelegt werden, die näher an den tatsächlichen Werten sind, um so das Vertrauen in das System zu erhöhen.

Das möglicherweise nicht deklarierte Vorhandensein von Materialien zwischen Spaltmaterial und Detektor ist Teil dieser Herausforderung. Im Fall vollständig montierter Sprengköpfe ist dies

mindestens der konventionelle Explosivstoff, der das Spaltmaterial umgibt. Zusätzlich werden Sprengköpfe und Sprengkopfkomponenten in der Regel in entsprechenden Sicherheitscontainern gelagert.<sup>33</sup> Solche Materialien können einen Einfluss auf die Messergebnisse und dementsprechend auf die Ausgabe der Informationsbarriere haben. Es ist wichtig, solche Effekte zu untersuchen und falls möglich Messsysteme dahingehend weiterzuentwickeln oder zu kombinieren, dass die Abhängigkeit solcher Materialien auf die Messergebnisse reduziert wird.

Durch die Untersuchung der Unterschiede zwischen Messergebnissen und den tatsächlichen Werten (systematische Unsicherheiten) bei Variation der Geometrien und anderer Eigenschaften, inklusive der Berücksichtigung weiterer Materialien, kann die Unsicherheit einer Messmethode bestimmt werden, die aus fehlendem Wissen der Probenkonfiguration resultiert.

## **Freigabe essentieller Informationen**

Falls die zu erwartenden Unsicherheiten nicht akzeptabel sind und nicht weiter reduziert werden können, ist die einzige Lösung zur Ermöglichung effektiver Verifikation mit dem Attributverfahren, dass der inspizierte Staat weitere Informationen deklariert. Dies müsste selbstverständlich im Einklang mit Art. I/II des Nichtverbreitungsvertrags sein, es dürfen also keine Informationen weitergegeben werden, die der Proliferation dienlich wären. Nicht alle in diesem Zusammenhang relevanten Informationen sind aus Proliferationsgründen geheim. Kernwaffenstaaten sollten untersuchen, inwiefern das Interesse an der Ermöglichung zuverlässiger Verifikationsmaßnahmen das Interesse an der Geheimhaltung bestimmter Informationen über-

---

<sup>33</sup> J. Fuller et al., *Innovating Verification: New Tools & New Actors to Reduce Nuclear Risks, Verifying Baseline Declarations of Nuclear Materials and Warheads*, ed. Nuclear Threat Initiative, 2014, S. 33.

wiegt und diese entsprechend freigegeben werden können. Zu diesem Schluss kommt eine Studie der Nuclear Threat Initiative, an der unter anderem ein Vertreter der US-amerikanischen National Nuclear Security Administration teilgenommen hat.<sup>34,35</sup>

Dies betrifft beispielsweise die Sicherheitscontainer, in denen Sprengköpfe oder Sprengkopfkomponenten gelagert sind. Insbesondere sollte eine Freigabe von Informationen möglich sein, die es den Inspektoren zumindest erlaubt, den Einfluss des Containers auf die Messergebnisse einschätzen zu können. Es ist hilfreich zu prüfen, welche derartigen Informationen unter Beachtung des Nichtverbreitungsvertrags auch für die Sprengköpfe selbst gegeben werden können.

## **Gemeinsame Entwicklung von Informationsbarrieren**

Wie kann möglichst effektiv ermöglicht werden, dass ein inspizierender Staat, insbesondere ein Nichtkernwaffenstaat mit geringerem Informationszugang, Vertrauen in Authentifizierungssysteme und andere Verifikationstechniken bekommt? Vielleicht ist der einzige zielführende Weg, dass die beteiligten Staaten die Systeme gemeinschaftlich entwickeln. Ein solcher Rahmen wäre hilfreich, um Bedingungen und Ziele sowie Stärken und Schwächen oder Grenzen eines Systems zu analysieren. So könnte besser nachvollzogen werden, weshalb eine Partei gewisse Funktionen einbauen möchte oder nicht. Das ideale System würde den Interessen der beteiligten Parteien gleichermaßen gerecht werden. Durch gegenseitiges Verständnis bei der gemeinsamen Entwicklung kann bereits Vertrauen aufgebaut werden. Tatsächlich kam auch die Überprüfungskonferenz 2010 zu dem Schluss, dass Kapazitäten zu Abrüstungsverfi-

kation gemeinschaftlich entwickelt werden müssen unter Einbeziehung mehrerer Akteure: „All States agree on the importance of supporting cooperation among Governments, the United Nations, other international and regional organizations and civil society aimed at increasing confidence, improving transparency and developing efficient verification capabilities related to nuclear disarmament.“<sup>36</sup>

Alleine die gemeinsame Entwicklung und eine gute Vertrauensbasis zwischen den Entwicklern werden jedoch nicht ausreichen, um den Systemen vollständig zu vertrauen. Es bleibt die Möglichkeit, getäuscht worden zu sein. Zusätzliches Vertrauen bringt eine erfolgreiche Authentifizierung und Zertifizierung. Die Authentifizierung der Informationsbarriere (nicht Sprengkopfauthentifizierung) meint die Überprüfung des inspizierenden Staates, ob die Informationsbarriere Messungen korrekt durchführt und ob der Algorithmus zuverlässig funktioniert. Insbesondere muss sichergestellt werden, dass der inspizierte Staat keine Funktionen eingebaut hat, die zu Fälschungen der Ergebnisse führen. Auf der anderen Seite muss eine Informationsbarriere vom inspizierten Staat zertifiziert werden – hier verstanden als die Überprüfung und Sicherstellung, dass aus der Informationsbarriere tatsächlich keine sensitiven Informationen herausgegeben werden können. Sowohl bei der Authentifizierung als auch bei der Zertifizierung sind aufwendige Untersuchungen notwendig, zu denen Systeme auseinandergelassen und teils gar zerstört werden müssen, um die Komponenten näher zu inspizieren. Wenn jetzt der eine Staat eine Informationsbarriere entsprechend untersucht hat, wie weiß dann der andere Staat, dass dabei keine weitere Funktion eingebaut wurde? Ein Vorschlag ist, dass der inspizierte Staat mehrere Kopien eines gemeinsam mit dem inspizierenden Staat entwickelten Systems zertifiziert. Von diesen wählt der inspizierende

---

<sup>34</sup> J. Fuller et al., *Innovating Verification: New Tools & New Actors to Reduce Nuclear Risks, Verifying Baseline Declarations of Nuclear Materials and Warheads*, ed. Nuclear Threat Initiative, 2014, S. 6

<sup>35</sup> Das ZNF war ebenfalls an der Studie beteiligt.

<sup>36</sup> 2010 Nonproliferation Treaty Review Conference, Final Document NPT/CONF.2010/50, New York, 2010, S. 24 (Action 19).

Staat eine aus, die zur Verifikation verwendet werden soll, und eine weitere, die authentifiziert wird.<sup>37</sup>

## Authentifizierung bei der Zerlegung von Kernwaffen

Im Hinblick auf unbekannte Eigenschaften der zu authentifizierenden Objekte stellen vollständig montierte Sprengköpfe die größere Herausforderung dar als Sprengkopfkomponenten. Wie kann Vertrauen entstehen, wenn Unsicherheiten groß bleiben? Abbildung 4 zeigt die Komplexität und damit einhergehend große Unsicherheiten bei fehlender Kenntnis des Waffendesigns am Beispiel der US-amerikanischen Kernwaffe B-61, einmal vollständig montiert und einmal in die einzelnen Bestandteile zerlegt. Eine Option ist, diese Problematik von den Sprengköpfen zu den Sprengkopfkomponenten zu verschieben. Wie oben argumentiert kann eine sinnvolle Vorgehensweise darin bestehen, Informationen zu den Sicherheitscontainern zu erhalten. Im Fall von Sprengstoffkomponenten wäre dann das fehlende Wissen hinsichtlich weiterer vorhandener Materialien minimal. Falls keine Informationen zu den Containern deklariert werden können, wäre eine weitere Möglichkeit, die Detektorkalibrierung (Bestimmung der Effizienz) mit dem Container durchzuführen, so dass Effekte des Containers bei anschließenden Messungen berücksichtigt werden, auch wenn die Containerdesigns selbst nicht im Detail bekannt sind. In jedem Fall gäbe es weniger Unsicherheit insgesamt, da Materialien wie der konventionelle Sprengstoff der Sprengköpfe nicht vorhanden wären.



Abbildung 4: B-61 zerlegt in die einzelnen Komponenten<sup>38</sup>

Aus diesem Grund hätte ein Konzept, bei dem Authentifizierungsmessungen nach der Zerlegung von Sprengköpfen durchgeführt würde, Vorteile. Dies löst jedoch nicht alle Probleme, sondern verschiebt sie teilweise von der Authentifizierung in Richtung der lückenlosen Verfolgung der Prozesse: Es muss Sicherheit darin bestehen, dass erstens die authentifizierte Sprengkopfkomponente zu dem ursprünglichen Sprengkopf gehört, dass zweitens während der Zerlegung der Sprengköpfe kein spaltbares Material ein- oder abgeführt wurde. Aufgrund der Sensitivität des Zerlegungsprozesses dürfen die Inspektoren diesem höchstwahrscheinlich nicht beiwohnen. Theoretisch wäre die Authentifizierung nach der Sprengkopfzerlegung bei funktionierender lückenloser Verfolgung ausreichend, da in diesem Fall eine erfolgreiche Authentifizierung der Sprengkopfkomponente gleichbedeutend wäre mit der Authentifizierung des Sprengkopfes vor dessen Zerlegung. Forschungsergebnisse zu den Vor- und Nachteilen der Authentifizierung an verschiedenen Punkten des Abrüstungsprozesses gibt es von MacArthur et al.<sup>39</sup> Weitere Forschung ist nötig, um die Belastbarkeit von Einschätzungen zu erhöhen, wann die Authentifizierung am sinnvollsten ist und welche Implikationen diese Entscheidung auf den gesamten Verifikationsprozess hat.

<sup>37</sup> D. MacArthur, D. Hauck, J. Thron, Simultaneous Authentication and Certification of Arms-Control Measurement Systems, Institute of Nuclear Materials Management 53rd Annual Meeting, Orlando, 2012.

<sup>38</sup> C. Hansen, The Swords of Armageddon: U.S. Nuclear Weapons Development Since 1945, Chukelea Publications, Sunnyvale, 1995.

<sup>39</sup> D. MacArthur, D. Hauck, M. Smith, Confirmation of Nuclear Treaty Limited Items: Pre-dismantlement vs. post-dismantlement, ESARDA Bulletin 50, 2013.

Zusätzlich zu den technischen müssen politische Überlegungen angestrengt werden. Es ist unklar, wie viel Zeit zwischen einer Deklaration der Gesamtbestände und der tatsächlichen Zerlegung der Kernwaffen vergehen würde. Bestandsdeklarationen können auch unabhängig von Abrüstungsabsichten im Rahmen von Transparenzmaßnahmen gegeben werden. Die Authentifizierung zum Zeitpunkt der Abgabe der Bestandsdeklarationen wäre sehr hilfreich, um Vertrauen in diese zu gewinnen. Politische Überlegungen könnten zu anderen Schlussfolgerungen führen als technische. Durch eine Kombination von Verfahren könnten solche Unterschiede jedoch überbrückt werden. Ein Vorschlag, der beide Sichtweisen einbezieht, wäre aus unserer Sicht:

1. Eine Authentifizierung der vollständig montierten Sprengköpfe wird zum Zeitpunkt der Deklaration der Gesamtbestände durchgeführt um ein erstes, wenn auch begrenztes, Niveau des Vertrauens zu bekommen
2. Eine weitere Authentifizierung wird mit den Sprengkopfkomponenten der authentifizierten Sprengköpfe nach dessen Zerlegung durchgeführt. Somit kann voraussichtlich ein deutlich höheres Vertrauensniveau erreicht werden als bei der ersten Authentifizierung
3. Zusätzlich zu vorgesehenen Verifikationsmaßnahmen im Rahmen der lückenlosen Verfolgung könnten die Messergebnisse der beiden Authentifizierungen verglichen werden. Da Inspektoren diese nicht sehen, müsste dies hinter der Informationsbarriere automatisiert geschehen. Es muss berücksichtigt werden, dass die beiden Messkonfigurationen voneinander abweichen.<sup>40</sup>

Diese Vorgehensweise würde einerseits zeitna-

he und gleichzeitig zuverlässige Verifikation ermöglichen. Andererseits wäre sie auch geeignet, das Umgehen von Abrüstungsverträgen zu detektieren. Ein inspizierter Staat würde bei entsprechender Absicht vermutlich bereits bei den Bestandsdeklarationen ein Abkommen hintergehen, da die Verifikationsmaßnahmen zu diesem Zeitpunkt schwächer sind und die Wahrscheinlichkeit steigt, dass die Verletzung unentdeckt bleibt. Mit der vorgeschlagenen Prozedur wäre es jedoch realistisch, dass eine ursprünglich nicht detektierte Vertragsverletzung nach der Abrüstung entdeckt wird, da die spätere Authentifizierung zuverlässiger ist. Dementsprechend sollte ein Kernwaffenstaat durch diese Prozedur schon von Anfang an abgeschreckt werden.

### **Wenn das Licht rot oder ein grünes Licht falsch ist...**

Was geschieht, wenn die Informationsbarriere als Ergebnis anzeigt, dass ein Objekt, das als Sprengkopf oder eine Sprengkopfkomponente deklariert ist, tatsächlich etwas Anderes ist? Bei einem roten Licht gibt es zwei Optionen: Entweder ist das Ergebnis der Informationsbarriere zutreffend und der Staat war nicht ehrlich. Es wurde aber oben diskutiert, dass die Messung oder Analyse der Messergebnisse mit Unsicherheiten behaftet ist und eine Informationsbarriere auch ein falsches Resultat ausgeben könnte, dass es sich also bei dem Objekt doch um einen Sprengkopf oder eine Sprengkopfkomponente handelt. Und wie kann ein Inspektor sicher sein, dass ein grünes Licht tatsächlich das Resultat einer robusten Messung und kein Messfehler vorhanden ist?

Wenn man sich das gewaltige Zerstörungspotenzial einer einzelnen Kernwaffe vor Augen führt, wird deutlich, von welchem Gewicht die Sprengkopfauthentifizierung ist. Es sollte also

---

<sup>40</sup> Es wäre in diesem Kontext hilfreich zu untersuchen, wie groß die Ähnlichkeit zwischen beiden Messungen sein müsste und ob ein Vergleich als Hinweis hinzugezogen werden kann, dass die authentifizierte Sprengkopfkomponente aus dem vorher authentifizierten Sprengkopf stammt bzw. zumindest aus einem Sprengkopf des gleichen Typs.

eine absolute Priorität sein, ein robustes Authentifizierungssystem zu entwickeln, bei dem die Genauigkeit groß und entsprechend Fehler selten sind. Die beiden folgenden Absätze diskutieren die Bedeutung falscher Resultate:

Fall 1: Bei der Verifikation von Bestandsdeklarationen wird ein fälschlicherweise als Sprengkopf authentifiziertes Objekt zu einer falschen Einschätzung der militärischen Kapazität bzw. des Abschreckungspotenzials kommen. Eine Informationsbarriere könnte zum Beispiel auch eingesetzt werden um nachzuweisen, dass die Deklaration, ein sensibles Objekt sei kein Sprengkopf, wahr ist. Da bei einem falschen Ergebnis mehr Sprengköpfe angenommen werden als tatsächlich vorhanden sind, könnte ein anderer Staat entscheiden, seine Waffenbestände zu vergrößern. Wenn die Authentifizierung mit dem Zerlegungsprozess verbunden ist, wäre die entsprechende falsche Schlussfolgerung, dass tatsächlich Sprengköpfe abgerüstet werden.

Fall 2: Bei der Verifikation von Bestandsdeklarationen wird ein echter Sprengkopf fälschlicherweise als Täuschung erachtet. Dies hätte insbesondere diplomatische und politische Implikationen. So stünde ein in Wirklichkeit ehrlicher Staat unter dem Verdacht, falsche Angaben zu machen.

Es ist festzustellen, dass ein Inspektor nicht weiß, ob ein Ergebnis richtig oder falsch ist. Folgende Optionen können behilflich sein, um die Situation aufzulösen:

- Wiederholte Messungen:  
Falsche Ergebnisse der Authentifizierung können das Ergebnis statistischer Unsicherheiten sein, die durch zufällige Abweichungen beim Messen entstehen. Zum Beispiel

wird die statistische Unsicherheit einer Messung in der Regel mit steigender Messdauer kleiner. Da sie zufällig ist, ist sie nicht das Ergebnis von Vertragshintergehung. Für den Inspektor ist zunächst nicht erkennbar, ob ein negatives Ergebnis („rotes Licht“) durch eine inkorrekte Deklaration oder durch die statistische Unsicherheit bedingt ist. Vorschläge existieren für eine Strategie für die Wiederholung von Messungen unter den gleichen Umständen, die die Wahrscheinlichkeiten von Fehlern reduzieren.<sup>41</sup> Dadurch wird allerdings nur die statistische Unsicherheit reduziert, nicht aber potenzielle systematische Unsicherheiten des Messverfahrens.

- Wiederholte Authentifizierungsmessungen, die jedoch auf andere/komplementäre Messverfahren oder Analysen zurückgreifen: Wiederholte Messungen mit identischen Verfahren lösen keine systematischen Unsicherheiten, da diese ihre Ursache direkt im Messverfahren haben. Solange Messungen mit dem gleichen System wiederholt werden, wird der gleiche Fehler weiterhin auftreten.<sup>42</sup> Auch hier ist für den Inspektor nicht erkennbar, ob die Aussage der Informationsbarriere richtig oder falsch ist. Durch die Verwendung von Messverfahren, die sich unterscheiden und idealerweise gar auf anderen physikalischen Prozessen beruhen, können Fehler, die das Ergebnis systematischer Unsicherheiten sind, aufgedeckt werden. Es wäre auch hilfreich, unterschiedliche Authentifizierungskonzepte zu verwenden. Neben dem Attributverfahren könnte das Template-Verfahren eingesetzt werden um überprüfen zu können, ob beide Ergebnisse konsistent sind.

- Gelbes Licht / Wahrscheinlichkeitsaussage:

<sup>41</sup> M. Kütt, S. Philippe, B. Barak, A. Glaser, R.J. Goldston, Authenticating Warheads with High Confidence, Institute of Nuclear Materials Management 55th Annual Meeting, Atlanta, 2014.

<sup>42</sup> Ein Beispiel ist hier unsere Forschung zu Neutronenmultiplizitätsmessungen. Diese Messmethode kann zur Bestimmung der Plutoniummasse verwendet werden. Bei hohen Plutoniummassen wird diese durch das Messverfahren systematisch, also bei allen Messungen, um bis zu 10 Prozent unterschätzt, siehe M. Götsche, G. Kirchner, Neutron Multiplicity Counting for Future Verification Missions: Bias When the Sample Configuration Remains Unknown, IAEA Safeguards Symposium, Wien, 20.-24.10.2014.



Sowohl statistische als auch systematische Unsicherheiten können reduziert werden. Die beiden obigen Verfahren unterstützen in der Reduktion der Unsicherheiten, können sie jedoch nicht beseitigen. Wir erachten aus diesem Grunde ein gelbes Licht als sinnvoll. Ein solches Ergebnis würde bedeuten, dass Messungen nicht eindeutig waren und die verbleibenden Unsicherheiten derart sind, dass keine eindeutige zuverlässige Aussage (grünes oder rotes Licht) getroffen werden kann.

- Konsultation mit dem inspizierten Staat:  
Wenn ein Sprengkopf fälschlicherweise als Attrappe charakterisiert wird, sollte es im Interesse des inspizierten Staates liegen, die Problematik aufzuklären. Eventuell kann der inspizierte Staat überzeugende Erklärungen abgeben und begründen, warum das Ergebnis falsch ist und es sich stattdessen um einen echten Sprengkopf oder eine echte Sprengkopfkomponente handelt. Entsprechende Angaben werden sicherlich sehr kritisch begutachtet werden um zu verhindern, falschen Erklärungen zu vertrauen. Diese Situation ist äußerst komplex und hängt vom größeren politischen Kontext ab. Insbesondere sollte evaluiert werden, welche Motivation der inspizierte Staat haben könnte, ein Abkommen zu hintergehen.

Alle vorgeschlagenen Maßnahmen ergänzen sich gegenseitig, und die größte Entscheidungssicherheit ist gewährleistet, wenn alle Maßnahmen umgesetzt würden. Von den vorgeschlagenen Maßnahmen ist der Forschungsbedarf bei den komplementären Messungen am größten. Hier ist es erforderlich, mehr als ein funktionierendes Verfahren zu haben. Daher schlagen wir vor, zukünftige Forschungspriorität auf diesen Aspekt zu setzen.

## Seminar Abrüstungsverifikation

Diese Fragestellung behandelt ein durch dieses Forschungsprojekt ermöglichtes Seminar, das seit 2012 jährlich in Kooperation mit dem Institut for Energiteknikk (IfE), Oslo; dem Kings College, London und der Universität Hamburg angeboten wird.<sup>43</sup> Dabei besucht eine interdisziplinäre Gruppe Studierender der Universität Hamburg das Institut for Energiteknikk, um in simulierten Verhandlungen selbst ein Abrüstungsverifikationsprotokoll zu verhandeln. In einem zweiten Schritt verifizieren die Studierenden in einer Laborübung gemäß dem zuvor verhandelten Protokoll eine oder mehrere „Kernwaffe(n)“ und deren ordnungsgemäße Abrüstung. Diese Übung ist an das große Vorbild der UK/Norway Initiative (UKNI)<sup>44</sup> angelehnt, es werden dieselben Räumlichkeiten und dieselbe „Kernwaffe“ benutzt. Neben der Ausbildung von Nachwuchswissenschaftlern ist bei den Seminaren auch der Aspekt der Forschung selbst immer mehr in den Mittelpunkt gerückt. So wurden die konkreten Ausführungen der Seminare nach und nach auch an die Bedürfnisse der Wissenschaft angepasst, um das Verhalten von Inspektoren in Abrüstungsszenarien untersuchen zu können.<sup>45</sup>

<sup>43</sup> F. Postelt, H. Elbahtimy, O. Reistad, T. Ramsøy, M. Götttsche, H. Foy, I. Said, M. Moran, I. Anstey, P. Tishakov, P. Nunez, G. Kirchner, Student simulation of verified nuclear warhead dismantlement, Special Issue of Homo Oeconomicus "Gaming, Simulation & Simulated Gamification", eingereicht im August 2015.

<sup>44</sup> Siehe zum Beispiel die Homepage der Britischen Regierung (in englischer Sprache): <https://www.gov.uk/government/publications/uk-norway-initiative-on-nuclear-warhead-dismantlement-verification-2>

<sup>45</sup> H. Elbahtimy, "Exploring the role of trust in verifying nuclear warhead dismantlement", Annual Conference of the International Nuclear Materials Management, June 2014.

# Bewertung einzelner Messmethoden zur Attributbestimmung

In diesem Kapitel werden die physikalisch-technischen Ergebnisse der Forschungsprojekte präsentiert. Aufbauend auf die im ersten Kapitel formulierte Bedingung, dass die Zuverlässigkeit von Messtechniken im Rahmen des Attributverfahrens ausreichend gegeben sein muss, werden hier verschiedene Messtechniken systematisch auf die Erfüllung dieses Kriteriums hin überprüft.

Messtechniken werden untersucht in Hinblick auf die Bestimmung der folgenden Attribute, die wir als essentiell ansehen:

- Vorhandensein von Plutonium
- Isotopenverhältnis Plutonium-239 zu Plutonium-240
- Mindestmasse Plutonium
- Vorhandensein von Uran-235
- Anreicherungsgrad vom Uran
- Mindestmasse Uran-235

Die Evaluierung ist beschränkt auf die Detektion von Gammastrahlung und Neutronen, weil diese Messverfahren zielführend erscheinen. Es gibt auch eine Reihe möglicherweise geeigneter nicht-nuklearer Messmethoden, siehe zum Beispiel Kouzes und Geelhood.<sup>46</sup> Im Folgenden wird ein allgemeiner Überblick über Vor- und Nachteile der jeweiligen Messverfahren gegeben; Details können unserer Fachveröffentlichung entnommen werden.<sup>47</sup> Zunächst führt dieses Kapitel in die Gamma- und Neutronenmessungen ein. Danach wird erläutert, inwiefern die unbekannte Konfiguration der Messobjekte problematisch sein kann. Im Anschluss folgt die Evaluierung der Messtechniken.

## Passive Gammamessungen

Die verschiedenen Isotope von Plutonium und Uran (unter anderem Plutonium-239, Plutonium-240, Uran-235 und Uran-238) zerfallen unter Aussendung von Gammastrahlung. Dabei emittiert jedes Isotop Gammastrahlung bei spezifischen Energien. Durch die Messung des Energiespektrums der Gammastrahlung (Gamma-spektrometrie) wird so ein „Fingerabdruck“ abgebildet, durch den unter gewissen Voraussetzungen nicht nur die Anwesenheit der Isotope überprüft werden kann, sondern auch die Zusammensetzung der verschiedenen Isotope. Es gibt mehrere zur Gammastreumetrie geeignete Messverfahren. Germaniumdetektoren haben dabei die beste Energieauflösung und sind dadurch am besten geeignet, die Gammastrahlung den verschiedenen Isotopen zuzuordnen.

Passive Gammastrahlung kann jedoch effizient abgeschirmt werden, sodass deutlich weniger Strahlung im Detektor ankommt. Dies geschieht durch Materialien, die sich auf dem Weg der Gammastrahlung vom Ort der Emission zum Detektor befinden. Geeignete Materialien absorbieren die Strahlung (beispielsweise Blei). Teilweise emittieren diese Materialien im Anschluss selbst Gammastrahlung, jedoch in der Regel mit anderen Energien, sodass eine Zuordnung zu den spezifischen Isotopen nicht mehr erfolgen kann.

Tabelle 2 zeigt, wie viel Material zur Abschirmung der Strahlung notwendig ist. Die Daten geben die Materialdicken an, bei der die Intensität der Gammastrahlung um die Hälfte reduziert wird. Während diese Halbwertsdicken bei leichten Materialien recht groß sind (zum Beispiel bei Polyethylen, das aus Wasserstoff und

<sup>46</sup> R.T. Kouzes, B.D. Geelhood, Composite Signatures of Nuclear and Non-Nuclear Technologies for Weapons Material and Component Measurements, PNNL-13861, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, 2002.

<sup>47</sup> M. Götttsche, G. Kirchner, Measurement Techniques for Warhead Authentication with Attributes: Advantages and Limitations, Science & Global Security 22: 83-110, 2014.

Gammaenergie	Blei	Uran	Plutonium
150 keV	0.3 mm	0.1 mm	0.1 mm
600 keV	5.2 mm	2.6 mm	2.4 mm
4000 keV	14.7 mm	8.3 mm	7.9 mm

**Tabelle 2: Halbwertsdicken für Gammastrahlung bei verschiedenen Energien<sup>48</sup>**

Kohlenstoff besteht), liegen sie bei schweren Elementen wie Blei, Uran und Plutonium im Millimeterbereich. Bei Abschirmung durch das Messobjekt selbst spricht man von Selbstabsorption. Aus der Tabelle wird eine Energieabhängigkeit ersichtlich: Strahlung mit höheren Energien wird nicht so stark abgeschirmt wie Strahlung mit niedrigeren Energien.

Da die Energie der Gammastrahlung eine Rolle bei der Abschirmung spielt, ist es auch relevant zu betrachten, welche Energien die Gammastrahlung der verschiedenen Isotope haben: Während Plutonium-239 Gammastrahlung in den meisten Energieregionen emittiert, emittiert Plutonium-240 ausreichend intensive Strahlung nur bei 104 keV, 160 keV und 642 keV. Uran-235 emittiert intensive Strahlung bei geringen Energien (144 keV, 163 keV, 186 keV und 205 keV), Uran-238 kann insbesondere über Gammastrahlung bei 1001 keV identifiziert werden. Bei nieder-energetischer Gammastrahlung ist die Selbstabsorption stark und es dringt nur die Gammastrahlung aus dem Material nahe der Oberfläche nach außen.

## Aktive Gammamessungen

Werden Plutonium und Uran mit externen Strahlungsquellen bestrahlt, werden zusätzlich zu den passiven Emissionen, die sowieso immer vorkommen, noch weitere Gammaemissionen induziert, die teilweise sehr hohe Energien haben.

Als externe Strahlungsquelle bieten sich insbesondere schnelle Neutronen an, da für diese die Selbstabschirmung in Spaltmaterial um Größenordnungen kleiner ist als für die Gammas. Dadurch kann das Spaltmaterial vergleichsweise homogen mit Neutronen bestrahlt werden. Ein Teil der Neutronen wird in dem Spaltmaterial eingefangen und gibt die überschüssige Energie in Form von Gammastrahlung wieder ab. Diese Reaktion nennt man strahlender Neutroneneinfang.

Die induzierte Gammastrahlung hat Energien bis zu 10.000 keV und wird entsprechend weniger stark (selbst-) abgeschirmt als die passive. Dadurch kann man weiter in das Spaltmaterial „hineinschauen“, und ist auch unempfindlicher gegen externe Abschirmung wie zum Beispiel durch Blei oder andere Sprengkopfkomponenten. Diese hoch-energetischen Gammas werden sehr schnell emittiert, weshalb man von prompter Gamma Aktivierungsanalyse spricht.

Die Intensität der induzierten Gammastrahlung hängt von der Anzahl eingestrahelter Neutronen und deren Energie, den Einfangswahrscheinlichkeiten im Spaltmaterial und den Übergangswahrscheinlichkeiten für die jeweiligen Gammalinien ab. Letztere sind für die hoch-energetischen Gammas sehr niedrig, weshalb man starke Neutronenquellen braucht. Es ist eine Fragestellung unserer aktuellen Forschung, ob existierende tragbare Neutronenquellen dafür ausreichend sind.

<sup>48</sup> Die Halbwertsdicken wurden berechnet mit Daten aus E. Storm, H.I. Israel, Photon Cross Sections from 0.001 to 100 MeV for Elements 1 through 100, LA-3753, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, 1967.

## Passive Neutronenmessungen

Die vier relevantesten Uran- und Plutonium-Isotope emittieren auch Neutronen. Daher sind Neutronenmessungen geeignet, um entsprechende Objekte zu charakterisieren. Die emittierten Neutronen stammen hauptsächlich aus zwei Prozessen, der spontanen und der induzierten Spaltung. Plutonium-240 emittiert pro Sekunde und Gramm etwa 1000 Neutronen. Bei Plutonium-239, Uran-235 und Uran-238 sind es deutlich weniger, so dass Spontanspaltung für Neutronenmessungen an diesen drei Isotopen meist keine Rolle spielt. Induzierte Spaltung erfordert die Absorption eines Neutrons, um den Spaltprozess zu initiieren. Dieses Neutron kann beispielsweise aus einer Spontanspaltung stammen. Während bei allen vier Isotopen induzierte Spaltung relevant ist, ist ihre Wahrscheinlichkeit insbesondere bei Plutonium-239 und Uran-235 sehr hoch. Bei allen Spaltungen werden in der Regel mehr als ein Neutron emittiert. Die Wahrscheinlichkeit, dass 1, 2, 3, 4, etc. Neutronen emittiert werden, wird durch die sogenannte Multiplizitätsverteilung wiedergegeben.

Blei, Uran und Plutonium haben nur einen geringen Einfluss auf Neutronen. In leichten Materialien hingegen finden Reaktionen mit Neutronen statt. Hier ist insbesondere Wasserstoff hervorzuheben, das Neutronen absorbiert. An allen leichten Elementen (also zum Beispiel auch Kohlenstoff) findet elastische Streuung von Neutronen statt. Dabei wird die Energie der Neutronen verändert. Dies wiederum hat einen Einfluss auf deren Detektion, weil die Wahrscheinlichkeit, dass Neutronen in einem Detektor erkannt werden, von deren Energie abhängt.

Bei den gängigen Detektionsverfahren wird nur die Zahl der Neutronen bestimmt, nicht aber ihre Energie. Aus der Neutronenzahl können zum

Beispiel Informationen zur Masse verschiedener Isotope gewonnen werden. Für präzise Informationen reicht jedoch nicht die reine Messung der Neutronenzahl aus. Hilfreicher sind Multiplizitäts- bzw. Korrelationsmessungen. Hier spielt neben der Anzahl der insgesamt detektierten Neutronen auch deren zeitliche Abfolge eine Rolle. Mit diesen Messmethoden wird angestrebt, zwischen Neutronen aus spontaner und induzierter Spaltung zu unterscheiden. Durch das Wissen, wie viel spontane Spaltung auftritt, kann bei bekannter Isotopenzusammensetzung die gesamte spaltbare Masse berechnet werden. Ohne Separierung von induzierter und spontaner Spaltung wäre dies nicht ohne weitere Informationen möglich.

Mögliche Neutronendetektoren sind unter anderem Helium-3 Detektoren und Szintillatoren. Multiplizitätsmessungen mit Helium-3 Detektoren sind etabliert und werden unter anderem für Safeguards verwendet. Es konnte für diese Detektoren eine entsprechende Theorie entwickelt werden, mit der der Beitrag von Neutronen aus induzierter Spaltung und separat der Beitrag von Neutronen aus spontaner Spaltung automatisch berechnet werden kann, so dass die Masse des analysierten Spaltmaterials berechnet werden kann.

Bei Szintillatoren konnte eine entsprechende Theorie bislang nicht entwickelt werden, auch wenn derzeit daran geforscht wird.<sup>49</sup> Bisher existiert für Szintillatoren die Methode der Korrelationsmessungen, die jedoch nicht einer rein analytisch formulierten Theorie unterliegen. Stattdessen müssen vorher Ergebnisse vorliegen von Messungen mit ähnlichen bekannten Proben, mit denen dann die Messung einer unbekannt Probe verglichen wird.<sup>50, 51</sup>

<sup>49</sup> A.D. Laviates, R. Plenteda, N. Mascarenhas, L.M. Cronholm, M. Aspinall, M. Joyce, A. Tomanin, P. Peerani, Liquid Scintillator-Based Neutron Detector Development, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Anaheim, 27.10.-3.11.2012.

<sup>50</sup> J.K. Mattingly, J.S. Neal, J.T. Mihalcz, NMIS Passive Time-Dependent Coincidence Measurements for Plutonium Mass and Multiplication, 43rd INMM Annual Meeting, Orlando, 23.-27.7.2002.

<sup>51</sup> J.T. Mihalcz, J.K. Mattingly, J.A. Mullens, J.S. Neal, NMIS with Gamma Spectrometry for Attributes of Pu and HEU, Explosives and Chemical Agents, Y/LB-16,123 Rev. 1, Y-12 National Security Complex, Oak Ridge, 2002.

## Aktive Neutronenmessungen

Bei Plutonium gibt es genügend Neutronen aus Spontanspaltung, um eine ausreichende Intensität der Neutronen zu erreichen. Es muss also keine zusätzliche Neutronenquelle verwendet werden, die Neutronen in Richtung des zu vermessenden Objekts emittiert, um über mehr induzierte Spaltung zu Ergebnissen zu kommen. Da allerdings weder Uran-235 noch Uran-238 genügend Neutronen aus Spontanspaltung emittieren, muss hier eine zusätzliche Neutronenquelle verwendet werden, um weitere Neutronenemissionen im Spaltmaterial zu induzieren. Man spricht in diesem Fall von aktiven Neutronenmessungen.

Da bei allen vier Isotopen die Wahrscheinlichkeit induzierter Spaltung groß genug zur ausreichenden Detektion ist, können mit einer Neutronenquelle alle diese Isotope untersucht werden. Bei dieser Messmethode treten im Vergleich zu der passiven Variante zusätzliche Herausforderungen auf: Je nach Position der Quelle treten die Neutronen aus einer Vorzugsrichtung in das zu vermessende Objekt ein. Von dort aus werden Neutronen aus dem Strahl absorbiert, so dass die Intensität auf der anderen Seite des Objekts in der Regel schwächer ist. Dadurch wird je nach Position auch in unterschiedlichem Maße induzierte Spaltung ausgelöst. Ohne Kenntnis der Konfiguration des Objekts ist es nicht ohne weiteres möglich zu bestimmen, wie aus den im Detektor registrierten Neutronen analytisch ein Rückschluss auf die spaltbare Masse möglich ist. Bei den passiven Messungen ist dies möglich, da die Zahl der Spontanspaltungen örtlich homogen ist und die Anzahl der Spaltungen pro Masse bekannt ist. Bei den aktiven Messungen wird für die Berechnung eine komplizierte Funktion der Intensität der Neutronenquelle, der Energieverteilung der Neutronen und der Konfiguration des zu vermessenden Objekts benötigt.

## Einfluss der Konfiguration der Objekte

Die Konfiguration nuklearer Sprengköpfe enthält eine Vielzahl von Unbekannten. Zur Vereinfachung betrachten wir keine thermonuklearen Sprengköpfe, sondern beschränken uns auf Spaltwaffen. Die Legitimierung dieser Vorgehensweise liegt darin, dass auch thermonukleare Waffen über einen Spaltteil verfügen und dieser somit in jedem Falle zur Authentifizierung verwendet werden kann. Die zusätzlichen Komponenten in thermonuklearen Sprengköpfen sind größtenteils vergleichsweise wenig spezifisch nur für den Einsatz in solchen Waffen.

Bei Spaltwaffen besteht die erste Unbekannte aus dem Spaltmaterial selbst. Seine Masse, Isotopenzusammensetzung, Dichte und vor allem Geometrie werden bei der Authentifizierung voraussichtlich unbekannt bleiben. Sowohl Uran als auch Plutonium schirmen Gammastrahlung effizient ab, so dass abhängig von der Geometrie möglicherweise wenig Strahlung aus dem Inneren die Oberfläche des Spaltmaterials verlässt (Selbstabsorption). Die Konfiguration des Spaltmaterials hat auch Einflüsse auf Gamma- und Neutronenmessungen, zum Beispiel wegen auftretender Neutronenreaktionen, deren Häufigkeit und entsprechend Relevanz von der Konfiguration abhängt.<sup>52</sup>

Wenig belastbare Informationen sind verfügbar bezüglich weiterer Materialien in vollständig montierten Sprengköpfen. Es ist nicht auszuschließen, dass weitere Materialien mit hoher Absorptionswahrscheinlichkeit für Gammastrahlung vorhanden sind. Dies würde Gamma Messungen zusätzlich erheblich erschweren. In Bezug auf Neutronen ist es wahrscheinlich, dass Materialien vorhanden sind, die Neutronen zurück in Richtung des Spaltmaterials reflektieren. Zumindest gibt es den konventionellen Sprengstoff, der aus Atomen mit geringer Massenzahl

---

<sup>52</sup> Reaktionen im Spaltmaterial, zum Beispiel inelastische Streuung, können Einfluss nehmen auf das Energiespektrum der Neutronen. Diese wiederum haben einen Einfluss auf die Detektionswahrscheinlichkeit.

besteht. Sowohl Neutronenreflektoren als auch der konventionelle Sprengstoff ändern das Energiespektrum und die Richtung der Neutronen und können sie teilweise absorbieren. Neutronen, die in Richtung des Spaltmaterials zurückreflektiert werden, können dort zusätzliche Reaktionen verursachen, die die Messergebnisse beeinflussen.

Die Sicherheitscontainer, in denen die meisten Sprengköpfe und in jedem Fall die Sprengkopfkomponenten gelagert sind, enthalten aller Voraussicht nach Materialien mit den im obigen Absatz beschriebenen neutronenphysikalischen Effekten.<sup>53</sup> Zusätzlich kann Abschirmung für Gammastrahlung nicht ausgeschlossen werden. In der folgenden Evaluierung der Messtechniken werden alle Materialien außerhalb des Spaltmaterials im Falle von Gammamessungen als „externe Abschirmung“ und im Fall von Neutronenmessungen als „externe Materialien“ bezeichnet.

## Evaluierung der Messtechniken

Tabelle 3 enthält die Zusammenfassung unserer Analysen. Sie berücksichtigt Messtechniken, die bereits in anderen Kontexten eingesetzt werden und somit einen gewissen Entwicklungsstand aufweisen. Neuartige Technologien sind aufgrund ihres frühen Entwicklungsstands hier nicht aufgezählt. Eine Ausnahme stellt die aktive Gammaskopimetrie dar, die Teil unserer aktuellen Forschungsprojekte ist. Aufgrund des messtechnisch anspruchsvollen Kontexts der Authentifizierung sind ansonsten etablierte Messtechniken nicht direkt verwendbar zur Authentifizierung. Einige der für diesen Verwendungszweck identifizierten Grenzen können durch weitere Forschung wahrscheinlich redu-

ziert oder gar aufgehoben werden. Vorteile werden in der Tabelle bei einer Messtechnik nur dann aufgezählt, wenn sie nicht oder weniger anfällig ist für Probleme, die bei anderen Messtechniken auftauchen. Sind keine Grenzen aufgeführt, erfüllt die Messtechnik die aufgestellten Kriterien. Im Folgenden werden die Vorteile und Grenzen näher erläutert.<sup>54</sup>

### - Vorhandensein von Plutonium

Die Anwesenheit von Plutonium kann über die Identifizierung der zu Plutonium gehörenden Gammastrahlung (des „Fingerabdrucks“) erfolgen. Bei Anwesenheit schwerer Materialien -wie beispielsweise Blei oder Uran- als externe Abschirmung kann durch Absorption die Intensität der Gammastrahlung aus dem Plutonium soweit reduziert werden, dass sie aufgrund des ebenfalls vorhandenen Strahlungsuntergrundes nicht mehr eindeutig identifiziert werden kann. Im Rahmen der geförderten Projekte wurden passive Gammamessungen am Joint Research Centre in Ispra, Italien und aktive Messungen am Budapest Neutron Centre, Ungarn durchgeführt (siehe Abbildung 5).<sup>55</sup> Die Probe der passiven („PM1“) bestand aus 12,5 g waffenfähigen Plutoniums in metallischer Form. Es wurde eine Messung ohne Abschirmung durchgeführt, eine mit 2 mm Blei und eine mit einem Container (AT400), der zur Lagerung radioaktiven Materials zugelassen ist. Bei den aktiven Messungen am Forschungsreaktor des Budapest Neutron Centre wurden 350 µg reines Plutonium-239 in metallischer Form mit  $2 \cdot 10^7$  Neutronen pro Quadratzentimeter pro Sekunde bestrahlt. In Abbildung 5 (rechts) ist die Gammastrahlung in Richtung des Detektors mit einem roten Pfeil angedeutet, der im Plutonium beginnt. Der Neutronenstrahl ist mit

<sup>53</sup> L. Hansen, A Comparison of the Shielding Performances of the AT-400A, Model FL and Model AL-R8 Containers, UCRL-JC-120849, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, 1995.

<sup>54</sup> Alle hier beschriebenen Ergebnisse beruhen auf physikalischen Analysen, die in Fachartikeln veröffentlicht wurden, siehe M. Göttsche, G. Kirchner, Measurement Techniques for Warhead Authentication with Attributes: Advantages and Limitations, Journal of Science and Global Security 22, 83-110, 2014 und F. Postelt, F. Zeiser, G. Kirchner, Analytical estimate of high energy gamma-ray emissions from neutron induced reactions in U-235, U-238, Pu-239 and Pu-240, ESARDA bulletin No. 52, Juni 2015.

<sup>55</sup> Die Messungen wurden im Rahmen einer Diplomarbeit am ZNF durchgeführt: Martin Weil, Abrüstungsverifikation: Gammaskopimetrie für Informationsbarrieren, Diplomarbeit, Universität Hamburg, 2013.

Attribute	Messtechnik	Vorteile	Grenzen
Vorhandensein von Plutonium	Passive Gammaskpektrometrie		Nicht funktionsfähig bei starker externer Abschirmung
	Aktive Gammaskpektrometrie	Vergleichsweise schwache Abschirmung	Niedrige Intensitäten
Isotopenverhältnis Pu-239 zu Pu-240	Passive Gammaskpektrometrie		Nicht funktionsfähig bei starker externer Abschirmung setzt homogene Isotopenzusammensetzung voraus
	Aktive Gammaskpektrometrie	Vergleichsweise schwache Abschirmung	Niedrige Intensitäten
Mindestmasse Plutonium	Passive Neutronenmultiplizitätsmessungen bei bekannter Isotopenzusammensetzung	Kalibrierung erfordert keine repräsentativen Quellen	Externe Materialien können Einfluss haben
	Neutronenkorrelationsmessungen mit Szintillatoren bei bekannter Isotopenzusammensetzung		Externe Materialien können Einfluss haben Kalibrierung erfordert repräsentative Quellen
	Passive Gammaskpektrometrie (Schätzung der Minimalmasse)		physikalisch begrenzt durch Selbstabsorption
Vorhandensein von U-235	Passive Gammaskpektrometrie		Schon bei geringer Abschirmung nicht funktionsfähig
	Aktive Gammaskpektrometrie	vergleichsweise schwache Abschirmung	Niedrige Intensitäten
	Aktive Neutronenmultiplizitätsmessungen	Bis zu gewissem Grad funktionsfähig bei externen Materialien	
	Aktive Neutronenkorrelationsmessungen mit Szintillatoren und Messungen der Neutronenflugzeit	Bis zu gewissem Grad funktionsfähig bei externen Materialien	
Anreicherungsgrad von Uran	Passive Gammaskpektrometrie		Schon bei geringer Abschirmung nicht funktionsfähig
	Aktive Gammaskpektrometrie	vergleichsweise schwache Abschirmung	Niedrige Intensitäten
	Aktive Neutronenmultiplizitätsmessungen	Bis zu gewissem Grad funktionsfähig bei externen Materialien	Externe Materialien können Einfluss haben Kalibrierung erfordert repräsentative Quellen
	Aktive Neutronenkorrelationsmessungen mit Szintillatoren	Bis zu gewissem Grad funktionsfähig bei externen Materialien	Externe Materialien können Einfluss haben Kalibrierung erfordert repräsentative Quellen
Mindestmasse von Uran-235	Aktive Neutronenmultiplizitätsmessungen		Externe Materialien können Einfluss haben Kalibrierung erfordert repräsentative Quellen
	Aktive Neutronenkorrelationsmessungen mit Szintillatoren		Externe Materialien können Einfluss haben Kalibrierung erfordert repräsentative Quellen

**Tabelle 3: Auswahl an Messtechniken, die zur Attributbestimmung geeignet sein könnten.**

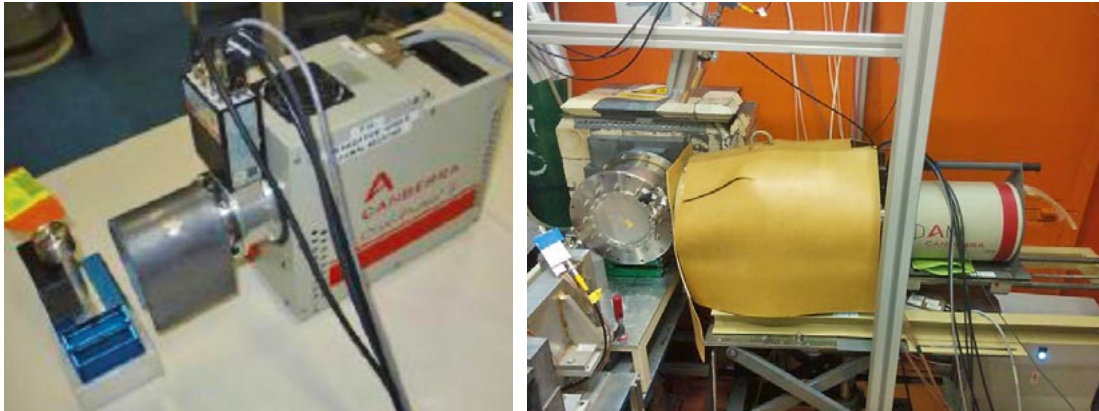


Abbildung 5: Versuchsaufbau der passiven Gammamessungen am Joint Research Centre (links) und der aktiven Messungen am Budapest Neutron Centre (rechts).

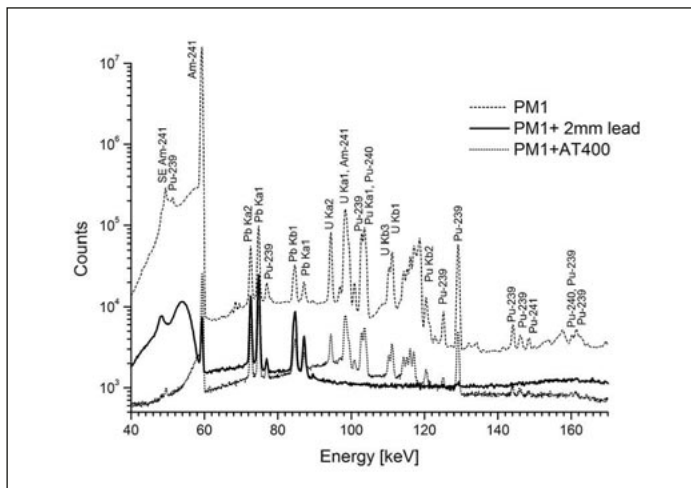


Abbildung 6: Passive Gamma-spektrometriemessungen von Plutoniumproben mit und ohne Abschirmung

einem gelb gestrichelten Pfeil eingezeichnet. Die Ergebnisse der passiven Messungen (Abbildung 6) zeigen deutlich die Reduktion der Gammastrahlungsintensität im niedrigen Energiebereich. Es ist sichtbar, dass die passive Gammastrahlung der Plutoniumisotope bei der Abschirmung teilweise gegenüber dem Strahlungsuntergrund nicht mehr erkennbar ist.

#### - Isotopenverhältnis Plutonium-239 zu Plutonium-240

Das Isotopenverhältnis von Plutonium kann aus dem Vergleich der Intensität der Gam-

mastrahlung bei verschiedenen Energien gewonnen werden. Dies gilt sowohl für passive als auch für aktive Gammamessungen. Dazu sollte aus physikalischen Gründen Strahlung bei ähnlichen Energien verwendet werden.<sup>56</sup> Im Fall von passiver Gammastrahlung von Plutonium könnte hierfür die Energieregion um 640 keV gewählt werden. Diese Region hätte den Vorteil einer geringeren Abschirmung durch externe Materialien als bei niedrigeren Energien, siehe Tabelle 2. Abbildung 7 zeigt, dass die isotopenspezifische Strahlung bei 2 mm Bleiabschirmung noch sichtbar ist. Für die Bestimmung

<sup>56</sup> Der Grund ist die energieabhängige Absorption der Gammastrahlung. Bei gleicher Abschirmung wird die Intensität bei verschiedenen Energien unterschiedlich stark reduziert, so dass ein direkter Vergleich der Intensitäten ohne Berücksichtigung dieses Effekts in einer falschen Berechnung des Isotopenverhältnisses resultieren würde.



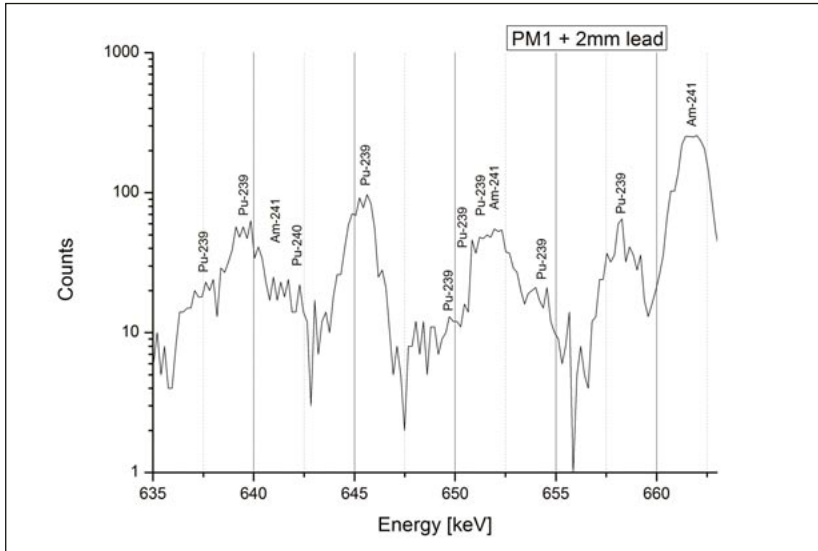


Abbildung 7: Gamma-messung einer Plutoniumquelle mit Bleiabschirmung

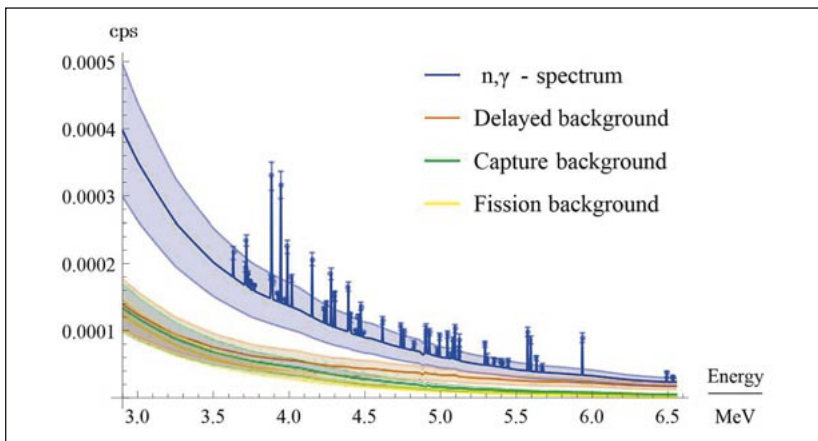


Abbildung 8: Simulationsergebnisse für ein Gramm Plutonium, das mit Neutronen aus einer moderierten Americium-Beryllium Quelle bestrahlt wird

des Isotopenverhältnisses mit Gammastrahlung gelten dennoch die gleichen Einschränkungen wie bei der Bestimmung des Vorhandenseins. Zusätzlich muss jedoch die Selbstabsorption von Strahlung durch das Plutonium selbst berücksichtigt werden. Aufgrund dieses Effekts stammt der Großteil der detektierten Strahlung aus der Nähe der Plutoniumoberfläche. Dies wäre problematisch, falls die Isotopenzusammensetzung nicht homogen über das Volumen verteilt wäre, also zum Beispiel nahe der Oberfläche eine andere wäre als im Inneren. Aktive Gammamessungen reduzieren diese Problematik. Abbildung 8 zeigt die Abschätzung für ein Gramm waffengrädiges Plutonium, das mit  $5 \cdot 10^5$  Neutronen pro Quadratzen-

meter pro Sekunde aus einer moderierten Americium-Beryllium Quelle bestrahlt wird. Aufgetragen ist die Zählrate pro Sekunde (counts-per-second, cps) gegen die Gammaenergie. Das zu erwartende Gammaspektrum ist blau, zusätzlich sind die Beiträge durch die verschiedenen Arten von Untergrund angegeben.

#### - Masse des Plutoniums

Bei bekannter Isotopenzusammensetzung (z.B. durch Gammaskopimetrie) kann durch Neutronenmultiplizitätsmessungen die Plutoniummasse bestimmt werden. Unsere eigenen Messungen am Joint Research Centre in Ispra, Italien, haben demonstriert, dass diese Messmethode für einige Gramm

Plutonium und ohne weitere externe Materialien zuverlässig funktioniert. Bei Plutoniummassen im Kilogramm Bereich hingegen wird die Masse mit dieser Messtechnik systematisch um bis zu 10 Prozent unterschätzt. Diese Abweichung kann mit Hilfe von Korrekturmaßnahmen reduziert werden. Die Korrektur hängt von der Konfiguration der Probe ab. Somit ist physikalisch exakt ausgedrückt eine Kalibrierung mit repräsentativen Materialien notwendig. Da durch die Korrekturmaßnahmen auch ohne genaue Kenntnis der Konfiguration die Genauigkeit der Massenabschätzung möglicherweise ausreichend erhöht werden kann, ist die Kalibrierung mit repräsentativen Materialien nicht zwangsweise essentiell.<sup>57</sup> Weitere externe Materialien wie zum Beispiel Polyäthylen beeinflussen ebenfalls das Ergebnis.<sup>58</sup> Hier dominieren in der Regel das veränderte Energiespektrum und weitere Reaktionen durch reflektierte Neutronen im Spaltmaterial. Obwohl Neutronen auch absorbiert werden können, ist die Reduktion der Intensität bei den meisten Materialien nicht so stark, dass eine Messung unmöglich wäre, beeinflusst aber die Berechnung der analysierten Masse. Bei unbekannter Abschirmung muss also eine entsprechende systematische Unsicherheit berücksichtigt werden.

Ein weiteres Messverfahren sind Korrelationsmessungen mit Szintillatoren. Aufgrund der bisher fehlenden analytischen Beschreibung der physikalischen Prozesse ist der Abgleich von Messergebnissen mit Kalibrierungskurven notwendig, die mit ähnlichen Materialien erstellt wurden.

Gammamessungen könnten dann zur Massenbestimmung verwendet werden, wenn keinerlei Selbstabsorption vorliegen würde. Aufgrund der starken Absorption von Plutonium sind Gammamessungen aber nur zur Bestimmung einer minimalen Masse geeig-

net; die wahre Masse könnte deutlich größer sein.

#### - Vorhandensein von Uran-235

Da Uran-235 passive Gammastrahlung im leicht abschirmbaren niedrigen Energiebereich emittiert, ist die Überprüfung des Vorhandenseins schon bei geringer Abschirmung deutlich erschwert oder gar unmöglich.

Aktive Gammamessungen und aktive Neutronenmultiplizitätsmessungen können verwendet werden, um die Anwesenheit von Uran-235 zu bestimmen. Zunächst würde dabei eine passive Messung durchgeführt werden als Nachweis, dass Plutonium nicht vorhanden ist, welches ebenfalls bei aktiven Messungen zu einem Gamma- bzw. Neutronensignal führen würde. Daraufhin gilt eine erhöhte Gamma- bzw. Neutronenzählrate als Nachweis, dass Uran-235 vorhanden ist, da diese durch induzierte Spaltung bedingt wären. Wie im passiven Fall ist die Reduktion der Intensität bei den meisten plausiblen externen Materialien nicht so stark, dass eine Messung unmöglich wäre; dennoch können Einschränkungen nicht ausgeschlossen werden. Analog kann dieses Verfahren auch mit Szintillatoren durchgeführt werden. Eine solche Messung ist in Abbildung 9 dargestellt.



**Abbildung 9: Aktive Neutronenmessungen mit Szintillatoren an einem Sprengkopf<sup>59</sup>**

<sup>57</sup> M. Götttsche, G. Kirchner, Improving neutron multiplicity counting for the spatial dependence of multiplication: Results for spherical plutonium samples, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 798, 99–106, 2015.

<sup>58</sup> M. Götttsche, G. Kirchner, Neutron Multiplicity Counting for Future Verification Missions: Bias When the Sample Configuration Remains Unknown, IAEA Safeguards Symposium, Wien, 20.-24.10.2014.

<sup>59</sup> U.S. Department of Energy, Technology R&D for Arms Control, ed. David Spears, 2001.

#### - Anreicherungsgrad von Uran

Passive Gammaskpektrometrie zur Bestimmung des Anreicherungsgrads ist wie bei der Bestimmung der Präsenz von Uran aufgrund der starken Absorption bei Abschirmung problematisch.

Es sind wiederum aktive Messungen notwendig. Es ist noch nicht erforscht, ob diese auch unter den in der Abrüstungsverifikation gegebenen Bedingungen hinreichend robuste Ergebnisse produzieren können. Die Intensitäten der aktiven Gammalinien sind deutlich niedriger als für Plutonium und es muss in Experimenten getestet werden, ob diese Technik für die Bestimmung der Anreicherung von Uran geeignet ist.

Aktive Neutronenmultiplizitätsmessungen könnten mit zwei verschiedenen Neutronenquellen durchgeführt werden, die Neutronen mit unterschiedlichen Energien emittieren. Induzierte Spaltung von Uran-238 erfordert Neutronen mit einer gewissen Mindestenergie. Uran-235 wird bei allen Neutronenenergien gespalten. Bei einer niederenergetischen Neutronenquelle wird also nur Uran-235 gespalten, bei einer höherenergetischen Neutronenquelle sowohl Uran-235 als auch Uran-238. Damit kann die Isotopenzusammensetzung prinzipiell berechnet werden.<sup>60</sup>

Die Unsicherheiten und Grenzen der passiven Neutronenmultiplizitätsmessungen zur Bestimmung der Plutoniummasse treffen auch auf diese aktiven Messungen für Uran zu. Bereits erläutert wurde die Problematik bei aktiven Messungen, dass die Probenkonfigurationen einen erheblichen Einfluss darauf hat, in welchem Maße an welcher Stelle innerhalb des Spaltmaterials induzierte Spaltung auftritt. Daher sind Informationen zur Probenbeschaffenheit notwendig, oder eine Kalibrierung mit repräsentativen Materialien muss durchgeführt werden. Der Einfluss einer Abschirmung wurde unter „Vorhandensein von Uran-235“ diskutiert. Solche

Messungen könnten auch mit Szintillatoren durchgeführt werden.

#### - Masse des Uran-235

Die Messung der Masse des Spaltmaterials erfolgt analog zu der Messung des Anreicherungsgrads: Zur Bestimmung der Masse von Uran-235 würde ein Neutronenmultiplizitätsmessung mit einer niederenergetischen Neutronenquellen durchgeführt werden, da so keine Spaltung in Uran-238 induziert wird. Die Unsicherheiten bei diesem Verfahren entsprechen den Unsicherheiten der Bestimmung des Anreicherungsgrads. Solche Messungen könnten auch mit Szintillatoren durchgeführt werden.

---

<sup>60</sup> D. Rothmaier, Neutroneninduzierte Neutronen in U-235 und U-238, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, 2015.

## Die International Partnership on Nuclear Disarmament Verification

Die Vielzahl der angesprochenen offenen Forschungs- und Entwicklungsfragen sind nicht zuletzt dadurch bis heute nicht gelöst worden, dass keine bi- oder multilateralen Verträge existieren, in denen sich Staaten zur Vernichtung ihrer nuklearen Sprengköpfe verpflichten – und damit bisher keine Notwendigkeit bestand, die zur Kontrolle eines derartigen Vertrags erforderlichen Verifikationstechniken zu entwickeln. Diese Lücke soll die auf Initiative der USA 2014 ins Leben gerufene International Partnership on Nuclear Disarmament Verification schließen. In diesem Rahmen diskutieren die Vertreter von etwa 25 Staaten über Konzepte, technische Verfahren und prozedurale Aspekte potentieller Vor-Ort-Inspektionen für eine Abrüstung der existierenden nuklearen Sprengköpfe<sup>61</sup>. Nicht zuletzt die wissenschaftlichen Ergebnisse, die durch die Förderung seitens der Deutschen Stiftung Friedensforschung zu dieser Thematik im ZNF erzielt werden konnten, hatten zur Folge, dass sein wissenschaftlicher Leiter, Prof. Dr. Gerald Kirchner, vom Auswärtigen Amt als deutscher Experte für die Arbeitsgruppe „Technical Challenges and Solutions“ der *International Partnership for Nuclear Disarmament Verification* nominiert wurde.

Die Phase I der International Partnership for Nuclear Disarmament Verification, in der die grundlegenden Konzepte entwickelt wurden, wurde Ende 2017 erfolgreich abgeschlossen. Schon seit Frühjahr 2017 wurde der Wunsch fast aller Staaten deutlich, diesen Rahmen für eine Fortsetzung der Arbeiten zu nutzen. Entsprechende diplomatische Verhandlungen haben zu einer Verlängerung des Mandats zunächst bis Ende 2019 geführt. Allerdings beteiligen sich die Russische Föderation und die Volksrepublik China nicht mehr. Frühzeitig wurde deutlich, dass ein Schwerpunkt der Phase II die praktische Erprobung der Konzepte im Rahmen ge-

eigneter Übungen sein soll. Dies hat das Auswärtige Amt zum Anlass genommen, seit November 2017 ein Drittmittelprojekt des ZNF zu fördern, das der Vorbereitung und Durchführung einer solchen Übung gewidmet ist. Diese wird als gemeinsame Initiative Frankreichs und Deutschlands in enger Zusammenarbeit mit einem parallelen Projekt des Forschungszentrums Jülich im Herbst 2019 umgesetzt werden.

---

<sup>61</sup> Ausführliche Informationen finden sich unter <https://www.ipndv.org/>

## Zusammenfassung und Implikationen

Die Motivation dieser Forschungsprojekte war die Erkenntnis, dass wenig Wissen zu Verifikationsverfahren existiert, das auf die Fragestellung ausgerichtet ist, wie Vertrauen in die Abrüstung nuklearer Sprengköpfe entstehen kann. In diesem Bericht wurde diese Problematik aus zwei Blickwinkeln beleuchtet. Erstens wurde Abrüstungsverifikation im Kontext möglicher politischer Randbedingungen untersucht: Aus welchen verschiedenen Komponenten könnte ein Verifikationsregime zusammengesetzt sein, das politische Randbedingungen berücksichtigt und geeignet ist, Vertrauen in die Vertragseinhaltung aufzubauen? Zweitens wurden physikalisch-technische Aspekte untersucht: Wie sind existierende Messtechniken einzuordnen bezüglich ihrer Relevanz und Einsetzbarkeit für Zwecke der Abrüstungsverifikation?

Der Bericht schlägt die Kombination dreier Verifikationselemente vor: Erstens sollte jeder Sprengkopf eindeutig identifiziert werden, so dass keiner durch eine Attrappe ersetzt werden kann oder doppelt gezählt wird. Zweitens muss eine lückenlose Verfolgung gewährleistet werden, die die physische Zerlegung des Sprengkopfes einbezieht. So soll verhindert werden, dass ein Sprengkopf der Überwachung entzogen werden kann und ein Inventar versteckter Sprengköpfe aufgebaut wird. Drittens muss nachgewiesen werden, dass ein deklariertes Sprengkopf tatsächlich ein echter Sprengkopf ist (Sprengkopfauthentifizierung).

Politische und rechtliche Randbedingungen limitieren die Informationen, die ein inspizierter Staat Inspektoren zur Verfügung stellen würde. Der Zugang der Inspektoren zu Einrichtungen und Tätigkeiten wäre begrenzt, ebenso mögliche Messungen. Entsprechend könnte die Sprengkopfauthentifizierung mit Informationsbarrieren durchgeführt werden.

Damit die Authentifizierung zuverlässig funktionieren kann, müssen die verwendeten Messver-

fahren mit hoher Genauigkeit arbeiten, um Fehlalarme zu reduzieren. Der physikalisch-technische Teil der Studie hat verdeutlicht, dass es bisher keine Messtechnik gibt, die für eine Attributbestimmung robust genug ist; die Quellen von Unsicherheiten wurden aufgezählt. Die Messverfahren für Plutonium sind weiter fortgeschritten als für Uran.

Zum Teil können Probleme der Messverfahren durch weitere Forschung und Weiterentwicklung reduziert oder gar behoben werden. Ein Großteil der Probleme ist darin begründet, dass wenige Informationen zu den Konfigurationen der Sprengköpfe oder Sprengkopfkomponenten vorhanden sind. Weiterentwicklungen von Messverfahren sollten also darauf abzielen, sie weniger abhängig von fehlenden Informationen zu machen. Die Probleme können reduziert werden, wenn genauere Spezifikationen zu den zu vermessenden Objekten vorliegen. Informationen zu möglicherweise vorhandener Abschirmung oder zu Materialien zwischen Spaltmaterial und Detektor können beispielsweise benutzt werden, um deren Einfluss auf das Messergebnis herauszurechnen. Es wäre die Möglichkeit zu prüfen, entsprechende Informationen einem inspizierenden Staat in Einklang mit Artikel I und II des Nichtverbreitungsvertrags zur Verfügung zu stellen. Hilfreiche quantitative oder qualitative Spezifikationen müssen und werden vermutlich nicht derart sein, dass daraus direkte Rückschlüsse auf Sprengkopfdesigns möglich wären.

Aufgrund der Beschränkungen durch den Nichtverbreitungsvertrag werden die verfügbaren Informationen jedoch in jedem Fall begrenzt bleiben. Auch bei deutlicher Weiterentwicklung der Messverfahren ist daher immer mit Unsicherheiten und Fehlalarmen zu rechnen. Es sei jedoch in diesem Zusammenhang an das gesamte Verifikationskonzept erinnert, das ebenfalls die eindeutige Identifizierung und die lückenlose Verfolgung umfasst. Es wurden kon-

krete Verfahren vorgeschlagen, mit Unsicherheiten bei der Attributbestimmung umzugehen und Fehlalarme aufzudecken. Der entscheidende Faktor, der einer Bewertung der Verfahren zugrunde gelegt werden muss, ist das Vertrauen, das sich aus allen Verifikationsaktivitäten insgesamt ergibt. Eine intelligente Kombination von Messverfahren und Verifikationselementen kann Unsicherheiten einzelner Aktivitäten bis zu einem gewissen Grad kompensieren. Man stelle sich beispielhaft vor, dass ein einem Sprengkopf ähnlich sehendes Objekt sich auf einem Trägersystem befindet und eindeutig identifiziert wurde. Während des Transports dieses Objekts zu einer Abrüstungseinrichtung konnte die lückenlose Verfolgung gewährleistet werden. Das Wissen, dass dieses Objekt auf einem Trägersystem stationiert war, erlaubt bereits ein gewisses Niveau an Vertrauen, dass es sich um einen solchen handelt, noch bevor es authentifiziert wurde. Wenn das Objekt erfolgreich als Sprengkopf authentifiziert wird, besteht vermutlich Vertrauen, dass es sich um einen Sprengkopf handelt, auch wenn gewisse Unsicherheiten des Authentifizierungssystems bekannt sind. Sofern alle verfügbaren Informationen ein kohärentes Bild zeichnen und keine Anomalien entdeckt wurden, kann der inspizierende Staat vermutlich beschließen, dass sich der inspizierte Staat an ein Abkommen hält. Probleme entstehen dann, wenn Anomalien auftauchen bzw. Ergebnisse keine eindeutigen Resultate hervorbringen. In solchen Fällen werden Verfahren und Foren benötigt, um Problemfälle zu diskutieren.

Eine solche Kombination von technischen Verfahren und rüstungskontrollpolitischen Einschätzungen ist unserer Ansicht nach zwingend notwendig, um der Herausforderung zur Vertrauensbildung in zukünftige Abrüstungsprozesse gerecht zu werden. Unsere Forschungsprojekte konnten Lösungsentwürfe anbieten. Insbesondere die Bewertung der Messtechniken vor dem Hintergrund der Genauigkeit und Vertrauensbildung ist neuartig. Es verbleiben jedoch weitere Fragen und ein damit verbunde-

ner erheblicher Forschungsaufwand. Offene Fragen bestehen sowohl bei der Entwicklung technischer Verfahren als auch bei der Diskussion von Prozeduren. Diese Fragen können vorzugsweise durch internationale Kooperationen unter Beteiligung von Nichtkernwaffenstaaten beantwortet werden. Die Fortsetzung und Ausweitung der in diesen Projekten durchgeführten Arbeiten wird notwendig sein, um Lösungen zu den Verifikationsfragen dann anbieten zu können, wenn signifikante Abrüstungsprozesse politisch möglich sind. Tatsächlich ist eine weitreichende Abrüstung bis hin zu einer kernwaffenfreien Welt schwer vorstellbar oder unmöglich, wenn entsprechende Verifikationsmechanismen nicht effektiv sind.

# Projektpublikationen

## Begutachtete Zeitschriftenartikel

**Malte Göttsche, Gerald Kirchner**, Measurement Techniques for Warhead Authentication with Attributes: Advantages and Limitations, *Journal of Science and Global Security* 22, 83-110, 2014

**Malte Göttsche, Gerald Kirchner**, Improving neutron multiplicity counting for the spatial dependence of multiplication: Results for spherical plutonium samples, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 798, 99–106, 2015

**Frederik Postelt, Fabio Zeiser, Gerald Kirchner**, Analytical estimate of high energy gamma-ray emissions from neutron induced reactions in U-235, U-238, Pu-239 and Pu-240, *ESARDA bulletin* No. 52, Juni 2015

**Frederik Postelt, Hassan Elbahtimy, Ole Reistad, Tore Ramsøy, Malte Göttsche, Hubert Foy, Ibrahim Said, Matthew Moran, Isabelle Anstey, Pavel Tishakov, Paula Nunez, Gerald Kirchner**, Student simulation of verified nuclear warhead dismantlement, *Special Issue of Homo Oeconomicus "Gaming, Simulation & Simulated Gamification"* (eingereicht im August 2015)

## Studien und Berichte

**Malte Göttsche, Götz Neuneck**, Panel Discussion: Disarmament Verification – a Dialogue on Technical and Transparency Issues, *ESARDA Bulletin* No. 50, Dezember 2013

**James Fuller, John Carlson, Kelsey Hartigan, Mona Dreicer, Leesa Duckworth, Malte Göttsche, Corey Hinderstein, Steinar Høibråten, David Keir, D. Burgess Laird, Martin Williamson, Matthew Bunn, Anatoli Diakov, Ramamurti Rajaraman, Therese Renis, Elise Rowan, Jonas Siegel, Morag Smith, Lars van Dassen, Thomas Wood**, *Innovating Verification: New Tools & New Actors to Reduce Nuclear Risks, Verifying Baseline Declarations of Nuclear Materials and Warheads*, ed. Nuclear Threat Initiative, 2014

**Malte Göttsche, Moritz Kütt, Götz Neuneck, Irmgard Niemeyer**, Advancing disarmament verification tools: a task for Europe?, *Non-proliferation and disarmament studies* 47, 1-18, special issue: „Non-Proliferation Papers“, Oktober 2015

## Abschlussarbeiten

**Martin Weil**, Abrüstungsverifikation: Gamma-spektrometrie für Informationsbarrieren, Diplomarbeit, Universität Hamburg, 2013

**Fabio Zeiser**, Theory of Fission Neutron Multiplicities and Implementation in MCNPX-PoliMi, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, 2013

**Arne Schmüser**, Monte Carlo Simulation der Gammaspektren von Plutonium und ihre systematische Untersuchung als Funktion der Isotopenzusammensetzung, Diplomarbeit, Universität Hamburg, 2014.

**Malte Götttsche**, Reducing Neutron Multiplicity Counting Bias for Plutonium Warhead Authentication, Dissertation, Universität Hamburg, 2015

**David Rothmaier**, Neutroneninduzierte Neutronen in U-235 und U-238, Bachelorarbeit, Universität Hamburg, 2015

**Frederik Postelt**, Machbarkeitsstudie zur Identifizierbarkeit von nuklearen Sprengköpfen mit Gamma-Quanten mit einer Attribut-Informationsbarriere, Dissertation, Universität Hamburg (in Vorbereitung)

## Konferenzbeiträge

**Malte Götttsche, Martin B. Kalinowski, Götz Neuneck, Frederik Postelt**, Attribute Information Barrier: Technical issues arising from a multi-national approach and dependence on transparency, UK Norway Workshop, London 7-9.12.2011

**Malte Götttsche, Paolo Peerani, Gerald Kirchner**, Concepts for dismantlement verification and neutron multiplicity measurements for plutonium mass attribute determination, 35th ESARDA Annual Meeting, Brügge, 27-30.5.2013

**Gerald Kirchner, Malte Götttsche, Martin Weil**, Potential und Grenzen von Gammaspektrometrie und Neutronenmessungen als Verifikationsinstrumente bei der nuklearen Abrüstung, 6. Symposium „Nukleare und radiologische Waffen - Technologische Urteilsfähigkeit und nukleare Sicherheit in Deutschland“, Fraunhofer Institut Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen, Euskirchen 24-26.9.2013

**Malte Götttsche, Gerald Kirchner**, Simulationskapazität von Neutronenmultiplizitäten mit MCNP PoliMi unter Verwendung thermischer Wirkungsquerschnitte, 78. Jahrestagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Berlin, 17-21.3.2014

**Arne Schmüser, Gerald Kirchner**, Systematische Simulation der Gammaspektren von Plutonium als Funktion seiner Isotopenzusammensetzung, 78. Jahrestagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Berlin, 17-21.3.2014

**Frederik Postelt, Fabio Zeiser, Malte Götttsche, Gerald Kirchner**: Plutonium characterisation with  $(n,\gamma)$  measurements for dismantlement verification, presentation at the ESARDA Novel Approaches / Novel Technologies Workshop in Oxford, 27-28.03.2014



**Malte Götttsche, Gerald Kirchner**, MCNPX-Poli-Mi Simulation Capacity Using Thermal Neutron Cross-sections to Assess the Reliability of the Neutron Multiplicity Mass Analysis Where Shielding is Unknown, 55th INMM Annual Meeting, Atlanta, 20-24.7.2014

**Frederik Postelt**: Plutonium characterisation with  $(n,\gamma)$  measurements for dismantlement verification, FONAS-Herbsttagung, Hamburg, 24-26.09.2014

**Malte Götttsche, Gerald Kirchner**, Neutron Multiplicity Counting for Future Verification Missions: Bias When the Sample Configuration Remains Unknown, IAEA Safeguards Symposium, Wien, 20-24.10.2014

**Frederik Postelt**: Verifizierte Abrüstung nuklearer Sprengköpfe am Beispiel einer Simulation durch Studierende, 6. Workshop Wege aus der Gewalt, Hamburg 13.02.2015

**Frederik Postelt, Gerald Kirchner**, Plutonium characterisation with prompt high energy gamma-rays from  $(n,\gamma)$  reactions for nuclear warhead dismantlement verification, 79. Jahrestagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Berlin, 16-20.3.2015

**Malte Götttsche**, Overcoming Challenges of Non-Nuclear Weapon States Involvement in Disarmament Verification, Symposium on the Non-Proliferation Treaty, Nuclear Disarmament, Non-proliferation, and Energy: Fresh Ideas for the Future, New York, 28.4.2015

**Frederik Postelt, Fabio Zeiser, Gerald Kirchner**, Analytical estimate of high energy gamma-ray emissions from neutron induced reactions in U-235, U-238, Pu-239 and Pu-240, 37th ESARDA Annual Meeting, Manchester, 18-21.5.2015

**Malte Götttsche, Gerald Kirchner**, Neutron Multiplicity Counting for Warhead Authentication: Bias reduction and quantification, 37th ESARDA Annual Meeting, Manchester, 18-21.5.2015

**Gerald Kirchner, Götz Neuneck**, Stand und Herausforderungen der nuklearen Abrüstungsverifikation – Eine akademische Perspektive, 7. Symposium Nukleare und radiologische Waffen — Technologische Urteilsfähigkeit und nukleare Sicherheit in Deutschland, Fraunhofer Institut Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen, Euskirchen, 9-10.9.2015

**Frederik Postelt, Olaf Schumann, Theo Köble, Gerald Kirchner**, Neutroneninduzierte hochenergetische Gammasignaturen von U-235, U-238, Pu-239 und Pu-240, 7. Symposium Nukleare und radiologische Waffen — Technologische Urteilsfähigkeit und nukleare Sicherheit in Deutschland, Fraunhofer Institut Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen, Euskirchen, 9-10.9.2015

## Kurzbios der Autoren

### **Malte Göttsche**

leitet seit 2017 als Juniorprofessor die Nachwuchsgruppe Nukleare Verifikation und Abrüstung an der Graduiertenschule AICES sowie dem III. Physikalischen Institut B der RWTH Aachen. Zuvor war er zwei Jahre Wissenschaftler im Program on Science and Global Security, Princeton University (2015-2017). Er promovierte als Physiker am Carl Friedrich von Weizsäcker-Zentrum für Naturwissenschaft und Friedensforschung an der Universität Hamburg (2012-2015). Herr Göttsche beschäftigt sich im Rahmen seiner interdisziplinären Forschung mit der Entwicklung verschiedener Verifikationstechniken, die für zukünftige Rüstungskontroll- und Abrüstungsverträge von Bedeutung sein werden.

### **Frederik Postelt**

hat 2012 bis 2017 am Carl Friedrich von Weizsäcker-Zentrum für Naturwissenschaft und Friedensforschung an der Universität Hamburg zum Thema Verifizierte Abrüstung von Kernwaffen mit Neutronen-induzierten prompten Gamma-Signaturen promoviert. Von 2007 bis 2016 hat er Seminare an der Universität Hamburg mit Exkursionen zu internationalen Konferenzen und Forschungseinrichtungen rund um die Themen naturwissenschaftliche Friedens- und Konfliktforschung geleitet. Seit 2015 ist er Dozent an der Technischen Universität Harburg, wo er Seminare zu Naturwissenschaft, Ethik und Politik anbietet und seit 2018 Physik- und Mathematik-Lehrer an der Integrierten Gesamtschule Buchholz, wo er auch einen Kurs zu Natur, Technik und Ethik unterrichtet.

### **Prof. Dr. Gerald Kirchner**

leitet das Carl-Friedrich-von-Weizsäcker Zentrum für Naturwissenschaft und Friedensforschung der Universität Hamburg. Nach dem Physikstudium an der Universität Münster und der Promotion an der Universität Bremen habilitierte er sich in Bremen mit Forschungen zum Umweltverhalten radioaktiver Spurenstoffe. Von 2001 bis 2012 war er als Fachbereichsleiter im Bundesamt für Strahlenschutz tätig. Kirchner war Mitglied der Deutschen Strahlenschutzkommission, des United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation und der Expertenkommission zur Frage der Gefährdung durch Strahlung in früheren Radareinrichtungen der Bundeswehr und der NVA des Deutschen Bundestages („Radarkommission“). An der Universität Hamburg befasst er sich mit Forschungen zur Weiterentwicklung naturwissenschaftlicher Verfahren zur Verifikation multilateraler Rüstungskontrollverträge. Vom Auswärtigen Amt wurde er 2015 für die International Partnership on Verification of Nuclear Disarmament benannt. Dort vertritt er Deutschland in der Arbeitsgruppe „Technologies for Verification“.



DSF  
Am Ledenhof 3-5  
D-49074 Osnabrück  
Fon: +49 541 60035-42  
Fax: +49 541 60079039  
[www.bundesstiftung-friedensforschung.de](http://www.bundesstiftung-friedensforschung.de)  
[info@bundesstiftung-friedensforschung.de](mailto:info@bundesstiftung-friedensforschung.de)  
ISSN 2193-794X