

Wie kann man nukleare Abrüstung in Nordkorea überprüfen?

100 Sekunden vor Mitternacht! Die im Jahr 1947 eingeführte "Doomsday Clock" des amerikanischen Bulletin of the Atomic Scientists wurde im Januar wieder umgestellt und steht nun näher vor Zwölf als je zuvor. Auch das nukleare Programm Nordkoreas wird in der Begründung des Gremiums genannt, das die Uhr stellt. Nachdem Nordkorea 2003 aus dem Atomwaffensperrvertrag (siehe Kasten) ausgestiegen ist, hat es zügig Atomwaffen entwickelt und mehrfach unterirdisch getestet.

Bis heute scheiterten alle internationalen Initiativen, Nordkorea zur Aufgabe seines Atomprogramm zu bringen. Die Bemühungen begannen schon in den 1990er Jahren, kurz nachdem das geheime Atomprogramm aufgefliegen war. In den letzten Jahren unternahm die US-Administration unter Präsident Trump einen neuen Anlauf. Bisher folgten den Gipfeltreffen in 2018 und 2019 jedoch keine konkreten Schritte.

Kernpunkt des derzeitigen Disputs ist, dass Nordkorea zunächst Sicherheitsgarantien einfordert, etwa in Form eines bilateralen Friedensvertrags, der formal den Koreakrieg (1950-53) beendet, während die USA auf überprüfbaren Fortschritten in der Denuklearisierung beharren. Beide Seiten misstrauen einander und es entsteht ein Dilemma. Aus Sicht Nordkoreas gibt jede Überprüfung Informationen zu militärischen Fähigkeiten preis, während einer einseitigen Meldung Nordkoreas über erfolgte Abrüstungsfortschritte von den USA kein Glauben geschenkt wird. Vertrauen ist gut, Kontrolle ist besser, sagt eine russische Redewendung, die durch Ronald Reagan im Nuklearbereich bekannt gemacht wurde.

Ein Ausweg aus der Sackgasse, der schon im Kalten Krieg in der Rüstungskontrolle zwischen den USA und der Sowjetunion erfolgreich war, könnten verifizierbare technische Schritte sein, mit denen sukzessive Vertrauen geschaffen wird und gleichzeitig Fortschritte bei der Abrüstung erreicht werden.¹

Was müsste verifiziert werden?

Ein erster Schritt ist der verifizierte Verzicht auf Atomwaffentests. Der Fokus nuklearer Abrüstungsverifikation in Nordkorea liegt auf den beiden für Kernwaffen relevanten spaltbaren Materialien, dem Plutonium und hochangereicherten Uran (highly enriched uranium - HEU). Es muss zunächst dafür gesorgt sein, dass die Produktion von Plutonium in Reaktoren und die Separation von Plutonium aus Brennelementen sowie die HEU Produktion eingefroren wird und anschließend die Bestände erfasst und später gesichtet werden.

Die Bestandsaufnahme reicht von den Produktionsanlagen bis hin zu den Atomwaffen selbst und erstreckt sich auch historisch auf vergangene Produktion und die Verwendung von Spaltmaterial in Nukleartests. Es muss überprüft werden, ob die Bestandsaufnahme vollständig und korrekt ist. Auf diese Elemente fokussiert sich dieser Artikel.

Darüber hinaus müssen für die Abrüstung auch die Kernwaffen demontiert werden und sämtliches waffenfähiges Spaltmaterial umgewandelt oder vernichtet werden. Schließlich muss mit Hilfe der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO) dafür gesorgt werden, dass sämtliche nuklearen Aktivitäten weiterhin zivil bleiben.

Physikalische Verifikationsmethoden sind dabei unverzichtbar. Eine Reihe an Messverfahren aus den unterschiedlichsten Fachgebieten werden heute erfolgreich für diese Aufgabenstellung angewandt. Hier können wir nur ein paar wenige neuere Ansätze vorstellen. Es besteht jedoch großer Bedarf neue Forschungsansätze und Ergebnisse der physikalischen Forschung zu identifizieren und für das Anwendungsfeld der nuklearen Abrüstungsverifikation nutzbar zu machen.



Fig. A

Quelle: North Korea's Korean Central News Agency on September 3, 2017 via Reuters

“Nordkoreas Anführer Kim Jong Un beim Besuch einer Forschungsanlage für Kerwaffen inspects a nuclear weapons research facility in this undated photo released by North Korea's Korean Central News Agency on September 3, 2017.”

INFOKASTEN Verträge:

Der Atomwaffensperrvertrag, auch Nuklearer Nichtverbreitungsvertrag (NVV), trat 1970 in Kraft und regelt, dass nur fünf Staaten Kernwaffen besitzen dürfen. Die USA, Russland, China, Frankreich und Großbritannien. Alle anderen Vertragsteilnehmer verzichten auf den Besitz von Kernwaffen. Derzeit sind alle Staaten Mitglied im NVV außer Pakistan, Indien, Israel und Nordkorea. Der Vertrag hat drei wesentliche Säulen. Im Gegenzug zum Verzicht der Nichtkernwaffenstaaten auf atomare Bewaffnung (1. Säule), verpflichten sich die Kernwaffenstaaten zur nuklearen Abrüstung (2. Säule). Es sollen in redlicher Absicht Verhandlungen über einen Vertrag zur allgemeinen und vollständigen Abrüstung unter strenger und wirksamer internationaler Kontrolle geführt werden. Den Nichtkernwaffenstaaten wird zudem ein unveräußerliches Recht auf die friedliche Nutzung nuklearer Technologien zugestanden (3. Säule). Die Überwachung der rein zivilen Nutzung nuklearer Technologien obliegt der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO). Problematisch ist bis heute, dass es bisher zu keinem vollständigen Abrüstungsvertrag gekommen ist, vielmehr ist eine Modernisierung und Ertüchtigung der Arsenale und Trägersysteme zu beobachten.

Der Kernwaffenteststopp-Vertrag (engl. Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty, CTBT) liegt seit 1996 vor und soll alle Kernwaffentests verbieten, sobald er einmal in Kraft tritt. Dies geschieht, wenn eine festgelegte Liste von 44 Staaten den Vertrag ratifiziert hat. Unter den Kernwaffenstaaten fehlen die Ratifikationen von China, USA und Israel, noch nicht unterzeichnet haben Indien, Pakistan und Nordkorea. Geistiger Vorgänger ist der Partial Nuclear Test Ban Treaty (PTBT), der seit 1963 nur noch unterirdische Nuklearexplosionen erlaubt. Der CTBT soll durch die Kernwaffenteststoppvertragsorganisation (CTBTO) überwacht werden, die bereits in Form der "Preparatory Commission for the CTBTO" aufgebaut wurde. Zum Verifikationsregime gehört ein weltweites Messnetz zur Detektion von Kernwaffenexplosionen, das bereits einsatzfähig ist und schon heute Kernwaffentests detektieren kann. Auch besteht die Möglichkeit, verdächtige Ereignisse in umfassenden Vor-Ort-

Inspektionen zu untersuchen. Obwohl der Vertrag noch nicht in Kraft ist, verzichten derzeit alle Staaten außer Nordkorea auf Kernwaffentests.

Detektion von Kernwaffentests

Nordkorea hat seit über zwei Jahren keine Kernwaffen getestet, könnte dies jedoch zukünftig wieder tun. Aus den vergangenen Tests kann abgeleitet werden, wie gut die Staatengemeinschaft auch zukünftig in der Lage wäre, Kernwaffentests zu detektieren, bzw. deren Abwesenheit zu bestätigen.

In der Tat liefert das Messnetz IMS (International Monitoring System) der Organisation des Kernwaffenteststoppvertrags (siehe Kasten) wertvolle Daten zu den Nuklearwaffenversuchen Nordkoreas. Die über 300 Stationen sind in der Lage, eine Kernwaffenexplosion auf wenige Kilometer genau zu lokalisieren. Dies gelingt über die Kombination von Seismik (unterirdische Tests), Infraschall (Tests in der Atmosphäre), Hydroakustik (Tests unter Wasser) und der Messung von Radionukliden in der Luft.

Tritt ein Ereignis auf, lässt sich durch den Vergleich der Anteile von seismischen Kompressions- und Scherwellen feststellen, ob es sich um ein Erdbeben oder eine Explosion handelt. Radionuklidmessungen erbringen den Beweis, dass eine Explosion tatsächlich durch eine Kernwaffe verursacht wurde: dabei werden als Spaltprodukte radioaktive Isotope des Edelgases Xenon freigesetzt und breiten sich in winzigen Konzentrationen der Größenordnung mBq/m^3 über große Strecken aus, bevor sie je nach Isotop mit Halbwertszeiten von 9 bis 286 Stunden zerfallen. An den Radionuklidstationen des IMS wird ständig Luft gesammelt und durch eine Aktivkohlefalle geführt, die das Xenon aus der Luft adsorbiert.

Einmal am Tag wird das gesammelte Xenon mittels Gaschromatographie extrahiert und in einen Detektor überführt, der in der Lage ist, durch eine beta-gamma Koinzidenzmessung die Isotope Xe-131m, Xe-133, Xe-133m und Xe-135 zu differenzieren. Anhand der Isotopenverhältnisse kann bestimmt werden, ob die Quelle ein Nukleartest oder ein Reaktor war. Eine Herausforderung sind dabei Anlagen, die medizinische Isotope wie Technetium-99 produzieren, indem Targets aus Uran mit Neutronen bestrahlt werden, um sie anschließend aufzulösen und die kurzlebigen Spaltprodukte zu extrahieren. Die dabei entstehenden Xenonemissionen lassen sich nur durch den Emissionsort von Kernwaffenemissionen unterscheiden.

Einen weiteren Anhaltspunkt für den Herkunftsort des gemessenen Xenons sind atmosphärische Transportrechnungen. Dabei wird auf Basis meteorologischer Daten die mögliche Quellregion einer Xenonemission bestimmt und geprüft, ob sie sich räumlich und zeitlich mit einem seismischen Ereignis deckt. [Dokumentation der CTBTO Preparatory Commission: <https://www.ctbto.org/verification-regime/>]

Tests in Nordkorea

Diesem Messnetz sind die Kernwaffentests Nordkoreas nicht verborgen geblieben. So konnte bestätigt werden, dass es sich bei dem ersten, vergleichsweise kleinen Test 2006 tatsächlich um eine Nuklearexplosion und nicht, wie von manchen vermutet, um eine größere Menge konventionellen Sprengstoffs handelte. Die Daten ermöglichten auch eine Abschätzung der stetig zunehmenden Stärke der Waffen (Fig. B), die von unter 1 kt (Kilotonne TNT Äquivalent) auf wohl über 100 kt im Jahr 2017 anwuchs (entsprechend der fünffachen Sprengkraft der Hiroshimabombe). Die Schätzungen gehen stark auseinander und reichen von 50 bis 280 kt, davon abhängig, welche geologischen Annahmen über das

Testgelände zugrunde gelegt werden [vgl. Bericht der BGR:

http://www.seismologie.bgr.de/sdac/erdbeben/kernexplosion/nkorea_20170903_deu.html].

Auch die Frage, ob es sich bei den späteren Tests wie von Nordkorea verkündet um Wasserstoffbomben handelte, ist nicht eindeutig geklärt. Aufgrund von Ausfällen und ungünstigen Wetterlagen liegen nicht für jeden Test umfassende Radionuklidaten vor. Ebenfalls besteht noch Forschungsbedarf zur Interpretation der Messdaten. Die atmosphärischen und geologischen Modelle zur Lokalisation können ebenso verbessert werden wie die Probenahme und Messtechnologien, um eine bessere Zeitauflösung der Daten zu erreichen. Die Bestimmung der Sprengkraft eines Nukleartests erlaubt ebenfalls Abschätzungen über den Verbrauch an Spaltmaterial in den Nukleartests.

Die Kernwaffenteststopporganisation ist auch in der Lage, umfassende Vor-Ort-Inspektionen durchzuführen, um verdächtige Ereignisse aufzuklären. Es wäre daher wünschenswert, wenn der Teststoppvertrag in Kraft treten und Nordkorea in das Vertragswerk eingebunden werden könnte.

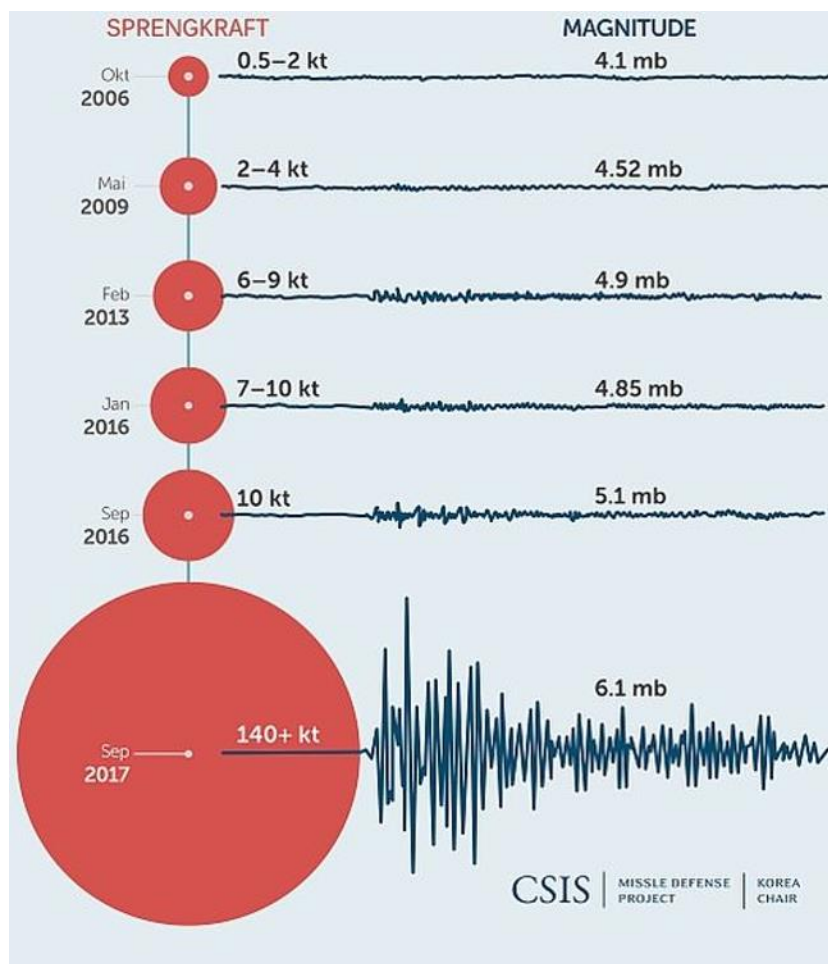


Fig. B.: Die zunehmende Stärke der durch das IMS gemessenen seismischen Ereignisse zeigt die Steigerung der Sprengwirkung der nordkoreanischen Nuklearwaffentests seit 2006 [Missile Defense Project, "North Korean Missile Launches & Nuclear Tests:

Stopp der Spaltmaterialproduktion

Ein wichtiger weiterer Schritt zur Begrenzung des nordkoreanischen Programms wäre ein Stopp der Spaltmaterialproduktion für Kernwaffen. Bereits in der Vergangenheit wurden in Nordkorea temporäre Maßnahmen durchgeführt. So zerstörte Nordkorea 2008 den Kühlturm seines Graphitreaktors, aus welchem das nordkoreanische Plutonium stammt, um erkennbar zu demonstrieren, dass die Produktion gestoppt wurde. Der Reaktorbetrieb wurde später wieder neu aufgenommen. Aber auch abseits solch drastischer Maßnahmen kann die IAEA zukünftig Produktionsstopps sowohl in Reaktoren und Wiederaufarbeitungsanlagen als auch in Uran-Anreicherungsanlagen mittels Vor-Ort-Inspektionen verifizieren. Diese drei Aspekte werden im Folgenden beleuchtet.

Die IAEA überwacht den Betrieb nukleartechnischer Anlagen routinemäßig in Nichtkernwaffenstaaten. Es gibt jedoch auch weniger intrusive Methoden, sollte Nordkorea keinen direkten regelmäßigen Zugang zu seinen Anlagen gewähren. Im Falle der Plutoniumproduktion können mittels Satellitenüberwachung zum Beispiel thermische Signaturen oder im optischen Bereich Dampfwolken erfasst werden, die auf einen Betrieb hinweisen würden. Eine weitere Möglichkeit wäre die Detektion von Antineutrinos, welche von laufenden Reaktoren emittiert werden.

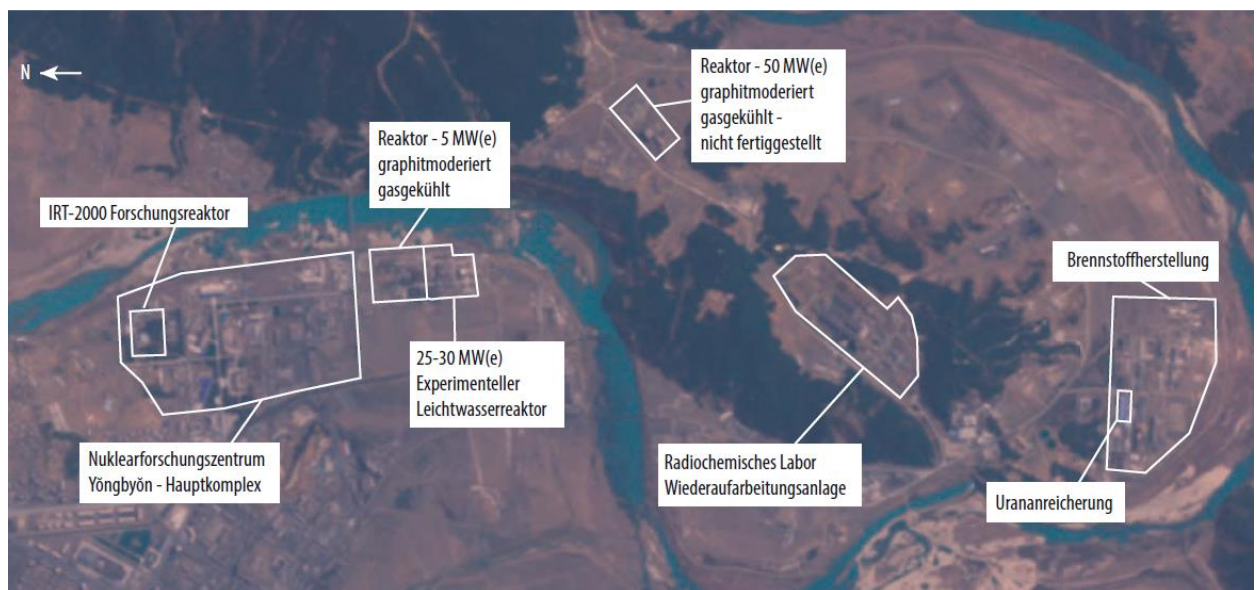


Fig. C.: Der nordkoreanische Nuklearkomplex in Yongbyon. Basierend auf Copernicus Sentinel Daten (2020).

Reaktor-Monitoring mit Antineutrinos

Bei der Kettenreaktion entstehen Spaltprodukte im Brennstoff, die durch mehrere aufeinander folgende Beta-Zerfälle Antineutrinos emittieren, bis sie einen stabilen Zustand erreicht haben. Im Durchschnitt werden pro Spaltung 6 Antineutrinos erzeugt, daher sind Kernreaktoren zurzeit die stärksten künstlichen Antineutrino-Quellen. Ein Reaktor mit einer elektrischen Leistung von 5 MW_e, was dem Graphitreaktor

entspricht, emittiert isotropisch etwa 10^{19} Antineutrinos pro Sekunde. Generell liegen die Energien der Reaktor-Antineutrinos zwischen 0 und 8 MeV, unabhängig vom Reaktortyp, wie in Abb. D dargestellt.

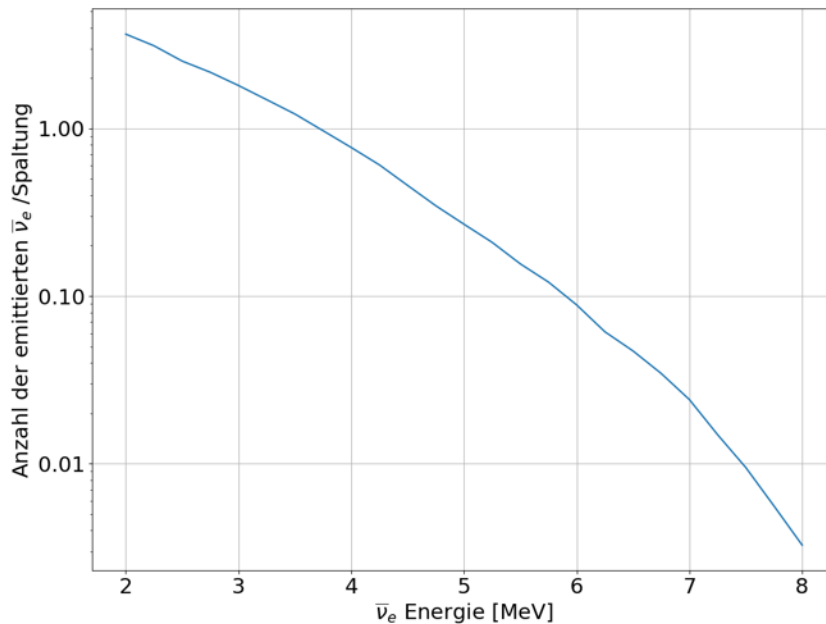


Abb. D: Ein typisches normiertes Antineutrino-Reaktorspektrum basierend auf den Berechnungen von P. Huberⁱⁱ

Jedes beta-zerfallende Element emittiert Antineutrinos mit einem spezifischen Energiespektrum und mit einer bestimmten Rate. Da jedes der spaltbaren Nuklide über eine bestimmte Reihe von Isotopen zerfällt, folgen ihre kombinierten Emissionen einem bestimmten Spektrum. Die Emissionsrate ist proportional zur Anzahl der Spaltungen und hängt somit von der Reaktorleistung ab. Wenn der Reaktor abgeschaltet wird, ist die Antineutrino-Emissionsrate durch Nachzerfall sehr gering und sinkt nach einigen Tagen unter die Messgrenze. Daher kann die Messung der Antineutrino-Emissionsrate direkte Informationen über den Betriebszustand des Reaktors erbringen.

Während des Betriebs ändert sich das Verhältnis zwischen den spaltbaren Nukliden: Die Menge des ^{235}U im Brennstoff reduziert sich (Abbrand), während ^{239}Pu durch Neutroneneinfang zunimmt: $^{238}\text{U} \xrightarrow{(n,\gamma)} ^{239}\text{U} \xrightarrow{\beta^-} ^{239}\text{Np} \xrightarrow{\beta^-} ^{239}\text{Pu}$. Diese Veränderungen haben einen direkten Einfluss auf das Antineutrinospektrum. Somit kann aus Antineutrinomessungen sogar der Abbrand und damit die Menge an Plutonium im Reaktor abgeschätzt werden.ⁱⁱⁱ

Antineutrinos interagieren mit Materie nur durch die schwache Wechselwirkung, was bedeutet, dass ihr Wirkungsquerschnitt σ_v sehr gering ist: σ_v (10^{-44} cm^2). Dies bietet einen großen Vorteil: Es gibt keine technischen Mittel, um die Antineutrino-Emissionen auf das Reaktorgebäude zu beschränken oder ihre Trajektorien umzuleiten. Das bedeutet, dass sie direkte und nicht fälschbare Informationen über den Reaktorbetrieb liefern. Gleichzeitig hat ihre hohe Durchdringungskraft erhebliche Auswirkungen auf das Detektordesign und die Detektionsraten.

Einsatz von Neutrinodetektoren in Nordkorea

Szintillatoren stellen derzeit die beste Detektortechnologie für die Reaktorüberwachung dar. Sie messen Antineutrinos mit Hilfe der inversen Beta-Zerfallsreaktion, bei der ein Antineutrino mit einem Proton im Detektor-Material interagiert: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$. Die Positronen und Neutronen werden mit Hilfe von Photomultiplikatoren (PMT) in Koinzidenz gemessen.

In Frankreich hat das Double-Chooz-Experiment mit zwei 10 Tonnen Flüssigkeitsszintillator-Detektoren bewiesen, dass es möglich ist, die Abschaltung von Reaktoren innerhalb weniger Stunden bis zu einem Tag zu beobachten, je nachdem, wie groß der Abstand zwischen dem Detektor und dem Reaktor ist. Angesichts der zunehmenden Beweise für die Umsetzbarkeit der Reaktorüberwachung mit Antineutrino-Messungen verfolgt die IAEA seit Anfang der 2000er Jahre die Entwicklung von Antineutrino-Detektionsmethoden.

In den letzten Jahren wurden mehrere Experimente mit neuen Detektordesigns wie z.B. PROSPECT^{iv} und CHANDLER^v vorgeschlagen. Diese neuen Detektoren sind in Segmente unterteilt und verwenden flüssiges bzw. festes Szintillatormaterial. Die Segmentierung ermöglicht dem Detektor eine räumliche Auflösung, die für die Reduzierung von Hintergrundereignissen sehr wichtig ist. Die neuen Detektoren könnten viel kleiner sein, z.B. 4 Tonnen im Falle von PROSPECT, und könnten nur mit minimaler Abschirmung an der Oberfläche betrieben werden.

Der Antineutrino-Fluss nimmt quadratisch mit der Entfernung ab, daher sollten die Detektoren in relativ geringem Abstand (z.B. einige Dutzend Meter) zum Reaktorgebäude platziert werden. Selbst unter diesen Umständen wäre die Überwachung des Reaktorbetriebs mit Antineutrinomessungen immer noch deutlich weniger invasiv als traditionelle Inspektionsmethoden, die einen direkten Zugang zu den Reaktorgebäuden erfordern. Dies könnte insbesondere im komplizierten diplomatischen Kontext Nordkoreas sehr hilfreich sein, um die Akzeptanz dieser Maßnahmen zu erleichtern.

Im Falle Nordkoreas könnte ein PROSPECT-ähnlicher Detektor in Reaktornähe aus praktischen Gründen wie Gelände- oder Gebäudestrukturen z.B. in einem Abstand von mindestens 20 m vom Reaktorgebäude platziert werden. Im Idealfall würde die Datenaufnahme in einer Reaktor-Auszeit beginnen, um ein gutes Verständnis des Neutrino-Hintergrunds zu erhalten. Nach jeder Inbetriebnahme des Reaktors würde der Detektor eine signifikante Erhöhung der Interaktionsrate messen. Erste Studien^{vi} haben gezeigt, dass in diesem Szenario ein unautorisierter Betrieb des Graphitreaktors innerhalb von zwei Wochen mit einem 95% Konfidenzniveau entdeckt werden könnte.

Darüber hinaus könnte eine internationale Entwicklung eines solchen Detektors unter Einbeziehung Nordkoreas Kooperationsmöglichkeiten öffnen und Vertrauen schaffen. Ein Austausch von geheimen oder waffenbezogenen Informationen wäre nicht erforderlich.

Verifizierter Wiederaufarbeitungsstopp durch Krypton-Monitoring

Neben der Überwachung von Reaktoren müsste verifiziert werden, ob Plutonium aus alten Brennelementen in Wiederaufarbeitungsanlagen abgetrennt wird. Neben Vor-Ort-Inspektionen wäre ein lokales Monitoring von Krypton-85-Emissionen möglich. Dieses Isotop wird während der Abtrennung freigesetzt und breitet sich in der Anlage und ihrer Umgebung aus.

Ein großmaschiges Messnetz nach Vorbild des oben beschriebenen Kernwaffenteststoppvertrags ist schwer zu realisieren, da Krypton-85 aufgrund seiner hohen Halbwertszeit von 10 Jahren und der im Vergleich zum anthropogenen Hintergrund sehr geringen Konzentration in der Atmosphäre schwerer zu detektieren und lokalisieren ist. Um eine ausreichend große Menge für eine radiometrische Messung der Aktivität zu erhalten, müssen mehrere Kubikmeter Luft gesammelt werden, was aufgrund der erforderlichen Pumpen und flüssigen Stickstoffs nur mit Aufwand möglich ist. Ein Vielfaches an Messtationen wäre erforderlich.

Dank neuartiger Messverfahren wie der Atomfallen-Spurenanalyse ist es jedoch möglich, auch in kleinen Luftproben von einem Liter den Krypton-85-Gehalt zu messen.^{vii} Solche kleinen Proben können im Rahmen von Inspektionen genommen oder automatisiert gesammelt und im Labor ausgewertet werden. Dort wird zunächst das Krypton aus der Luftprobe extrahiert, wobei etwa ein Mikroliter anfällt. In einer Atomfalle werden bestimmte Isotope selektiv durch Einstrahlung genau abgestimmter Kühlaser gebremst und an einem Punkt gefangen. Dabei emittieren sie Photonen, die gemessen werden können, um die Konzentration zu ermitteln.

In diesem Fall verwendet man die Isotope Kr-81 und Kr-85, um aus deren Verhältnis die Kr-85-Konzentration in der Luftprobe zu bestimmen. Um ein Isotop in der Atomfalle fangen zu können, benötigt man einen Kühlübergang mit einer Wellenlänge, für die geeignete Laser erhältlich sind. Da diese Wellenlänge für Edelgase wie Krypton im Bereich vakuum-ultravioletten Lichts liegt, ist die Laserkühlung erst mit einer Vorbehandlung möglich.

Dies wird erreicht, indem das Krypton durch eine vakuum-ultraviolette Lampe zunächst auf ein kühlabares, metastabiles Niveau angeregt wird, in dem es mit einer Halbwertszeit von 40 Sekunden verbleibt. Übersteigt die Konzentration den erwarteten Hintergrund und ist nicht durch bekannte Aufbereitungsanlagen erklärbar, kann von einer bisher nicht bekannten Plutoniumabtrennung in der näheren Umgebung ausgegangen werden.^{viii}

Überprüfung der Urananreicherung

Während im Plutoniumbereich vielversprechende Verifikationsansätze existieren, ist die Verifikation eines Produktionsstopps von hochangereichertem Uran eine besondere Herausforderung.

Urananreicherung wird heute kommerziell fast ausschließlich mit Gasultrazentrifugen durchgeführt. Bis zu mehrere Meter hohe schnell rotierende Zylinder machen sich den Massenunterschied zwischen Uran-238 und Uran-235 zunutze.

Werden die Rotoren parallel und in Serie geschaltet und die Anlage mit dem Gas Uranhexafluorid (UF₆) durchströmt, kann die natürliche Konzentration von 0,72% Uran-235 (99% Uran-238) angereichert werden. In der zivilen Kernenergie bis 3-5%, in Forschungsreaktoren bis zu 20%. Ab einer Anreicherung von 20% wird von hochangereichertem Uran gesprochen, militärisch kommen Anreicherungen über 90% zum Einsatz.

Früher wurde Uran in großen sehr energieintensiven Diffusionsanlagen angereichert, deren Flächenbedarf und thermische Signatur einfach durch optische Methoden zu detektieren war. Kleine Gaszentrifugenanlagen sind hingegen bezüglich ihrer thermischen Emittierungssignaturen vergleichbar einem mittleren Supermarkt oder einem modernen Bürogebäude.

Die Überwachung von deklarierten Zentrifugenanlagen kann sich einer Reihe etablierter Verfahren bedienen, die routinemäßig von der IAEA angewendet werden. Sollte Nordkorea etwa entscheiden, in seiner bekannten Zentrifugenanlage in Yongbyon niedrig angereichertes Uran für die zivile Nutzung zu produzieren, könnten Safeguards durch die IAEA ähnlich wie im Iran und anderen Nichtkernwaffenstaaten implementiert werden.

Auffinden geheimer Anreicherungsanlagen

Die Detektion von geheimen Anlagen ist dagegen extrem schwierig und neuartige Methoden bzw. Verbesserungen der bisherigen Methoden notwendig. Zentrifugenanlagen haben sehr niedrige Leckageraten im Grammbereich, denn um zu verhindern, dass das Gas verflüssigt, herrscht Unterdruck. Kommt doch UF₆ frei, hydrolisiert das Uran zu Uranyl-Fluorid (UO₂F₂), einem stabilen Aerosol, das sich über den Luftweg verbreiten kann. Die Verbreitung ist aber stark abhängig von den Freisetzungsbedingungen. Ein Inspektor müsste sehr nahe an oder besser in die Anlage kommen und dort Oberflächenproben mit einem Tuch („Wischproben“) nehmen, falls dies die inspizierte Partei erlaubt.

Bisher gibt es keine Methode, mit der eine Detektion aus größerer Entfernung mit ausreichender Sicherheit möglich ist. Das Standardverfahren der neutroneninduzierten Spaltspuranalyse, das bei Inspektionen der IAEA zur Analyse von Wischproben zum Einsatz kommt, ist technisch aufwändig und nicht für eine sehr große Anzahl an Proben geeignet. Gesammelte Partikel werden mit Neutronen bestrahlt und in geeigneten Detektormaterialien hinterlassen Fragmente aus der neutroneninduzierten Spaltung Trajektorien durch Gitterschäden, die es erlauben Partikel mit spaltbarem Material zu identifizieren und mit weiteren mikroskopischen und massenspektrometrischen Verfahren zu analysieren.

Andere Signaturen von Zentrifugenanlagen sind elektromagnetische Signale sowohl durch Abstrahlung aus der Anlage, als auch durch charakteristische Störungen in der Stromversorgung. Die Artefakte werden mit der doppelten Frequenz der verschiedenen Wechselstromstufen in der Stromversorgung erzeugt, wenn die Wechselspannung kurzzeitig unter die Vorspannungsschwelle von Halbleiterkomponenten fällt. Die Detektion von Abstrahlung müsste jedoch selbst im besten Fall innerhalb weniger Kilometer um die Anlage herum erfolgen und es können weitere Gegenmaßnahmen ergriffen werden, elektromagnetische Signale abzuschwächen. Ebenso kann die Stromversorgung unabhängig vom Netz durch Generatoren erfolgen.

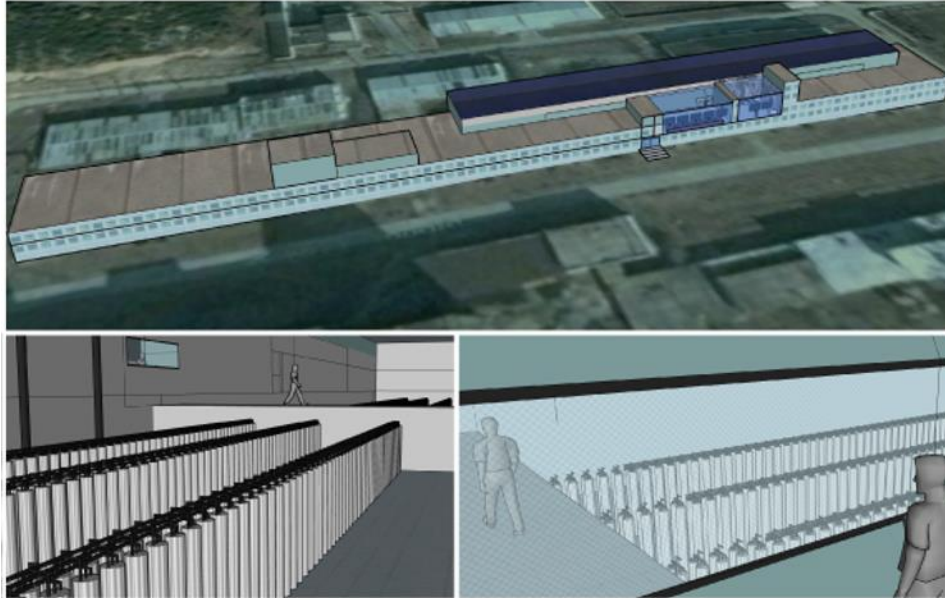


Abb. E: Vermutliches Aussehen der Zentrifugenanlage nach einer Beschreibung von Siegfried Hecker, der die Anlage 2010 besuchte (Hecker 2010). Modell von Tamara Patton. Oben: das Gebäude als Overlay über der Satellitenansicht. Unten: die Zentrifugenhalle und Blick aus dem Kontrollraum in die Halle.

[S. Hecker (2010): A Return Trip to North Korea's Yongbyon Nuclear Complex, Center for International Security and Cooperation, Stanford University, November 20, 2010.]

Auch die Überwachung von Zulieferwegen, Materialversorgung, Technikexport oder Personal ist möglich um eine geheime Anlage zu entdecken. Letztlich werden alle möglichen Informationen für eine sorgfältige Prüfung herangezogen und auf Konsistenz untersucht, angefangen von vorhandenen Deklarationen und Publikationen bis hin zu Berichten von Inspektionen. Auch nachrichtendienstliche Kenntnisse und Fernerkundung fließen in solche Bewertungen ein. Ebenso kann eine genaue Materialbilanzierung, angefangen mit Uranminen (Erzgehalte), über die Untersuchung von Bergbauabfällen und sonstigen Uranabfällen (abgereichertes Uran als Abfall der Urananreicherung), bzw. der historischen Uranproduktion sowie Uranimport und -export wertvolle Hinweise geben.

Erfassung der Gesamtbestände

Die beschriebenen Verfahren können die Verifikation des Ist-Zustands der Spaltmaterialproduktion unterstützen. Um Abrüstung zu verifizieren, müssen jedoch auch Bestände an bereits existierenden waffenfähigen Spaltmaterialien deklariert und überprüft werden. Sie befinden sich entweder in Kernwaffen, oder stehen zum Bau neuer Kernwaffen zur Verfügung. Auch die Anzahl an Kernwaffen sollte deklariert werden. Durch solche Deklarationen kann einerseits das militärische Potenzial des Nuklearprogramms eingeschätzt werden, andererseits kann so zukünftig der Fortschritt des Abrüstungsprozesses in Relation zu den Gesamtbeständen gesetzt werden.

Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass Kernwaffen zu Beginn eines Abrüstungsprozesses verifiziert werden könnten. Schließlich müsste Nordkorea dafür die bislang geheimen Orte, wo die Kernwaffen gelagert werden, bekannt geben. Deklarationen sowohl von Kernwaffen- und Spaltmaterialbeständen könnten jedoch zunächst überprüft werden, indem die Historie der Spaltmaterialproduktion sowie deren

Verbrauch nachvollzogen wird.^{ix} Daraus ergeben sich die Bestände, die heute zur Verfügung stehen sollten.

Zunächst einmal müsste Nordkorea seine detaillierte Dokumentation zur Spaltmaterialhistorie zur Verfügung stellen. Dies würde einerseits Betriebsabläufe der nuklearen Anlagen beinhalten, andererseits verfügbare Informationen zu verbrauchten Materialien. Mit Hilfe von Simulationen der Anlagen kann anhand der Daten die produzierte Menge an Spaltmaterialien überprüft werden. Allerdings kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Dokumentation zumindest teilweise gefälscht sein wird. Hier könnten Inspektoren jedoch auf Messmethoden zurückgreifen, mit welchen Teile der Produktionshistorie auch unabhängig von der Dokumentation erfasst werden können.

Zum Beispiel können Proben des Graphitmoderators Aufschluss über die Plutoniumproduktion geben:^x Wie erwähnt wird das Plutonium aus Neutroneneinfang in Uran-238 über zwei Betazerfälle erbrütet. Die Rate des produzierten Plutoniums hängt also von der Rate der Neutroneneinfangs-Reaktionen ab, integriert über den gesamten Reaktor. Dieser Wert wiederum hängt vom Neutronenfluss ϕ , dem Uran-238 Inventar sowie vom Energiespektrum der Neutronen ab.

Bei bekanntem Uran-238- Inventar (welches sich aus deklarierten Reaktor- und Brennelementdesigns ergeben) sowie bekanntem Energiespektrum (welches mittels Monte-Carlo-Simulationen des Neutronentransports berechnet werden kann) erhält man also eine Relation zwischen der Plutoniumproduktionsrate und ϕ . Die Plutoniumproduktion über die Laufzeit t des Reaktors hängt dann von der Neutronenfluenz $\int \phi dt$ ab.

Letztere lässt sich durch eine massenspektrometrische Vermessung von Isotopenverhältnissen bestimmter Elemente im Graphitmoderator, welche ebenfalls Neutronen einfangen, bestimmen. Im Gegensatz zu den Brennelementen, welche regelmäßig ausgetauscht werden, verbleibt das Graphit über die gesamte Laufzeit im Reaktor. Ein Beispiel ist Titan, wo aufgrund der Reaktion $^{48}\text{Ti} \xrightarrow{(n,\gamma)} ^{49}\text{Ti}$ das Verhältnis $^{48}\text{Ti} / ^{49}\text{Ti}$ Aufschluss gibt.

Wie geht es weiter?

Trotz jahrzehntelanger internationaler diplomatischer Bemühungen konnte Nordkorea nicht an der Entwicklung und am Test von Kernwaffen gehindert werden. Die Aussichten auf eine atomare Abrüstung und Denuklearisierung Nord-Koreas sind ungewiss. Zentral in den Bemühungen sind technische Verifikationsmethoden und entsprechende physikalische Methoden. Nur durch schrittweise Annäherung mit gleichzeitiger Verifikation kann Vertrauen hergestellt werden. Das Vertrauen beruht auf einer fragilen Balance zwischen der Herstellung von Transparenz und gesichertem Wissen einerseits und der Wahrung von Sicherheitsinteressen Nordkoreas andererseits.

Eine Reihe von physikalischen Methoden kommt dabei zum Einsatz, von denen nur eine kleine Auswahl vorgestellt werden konnte. Es besteht weiterhin großer Bedarf, neue Forschungsansätze und Ergebnisse der physikalischen Forschung zu identifizieren, ihr Potential für diese wichtigen Anwendungen auszuloten und schließlich im Anwendungskontext umzusetzen.

Quellenangaben

- ⁱ A. Glaser, Z. Mian, Science 361, 2018
- ⁱⁱ P. Huber, "Determination of antineutrino spectra from nuclear reactors", Phys. Rev. C 84 (2011): 024617
- ⁱⁱⁱ E. Christensen, P. Huber, P. Jaffke, T.E. Shea, Physics Review Letters 113, 2014
- ^{iv} J. Ashenfelter et al. (PROSPECT Collaboration), "First Search for Short-Baseline Neutrino Oscillations at HFIR with PROSPECT" Phys. Rev. Lett. 121, 251802
- ^v A. Haghighat et al. "Observation of Reactor Antineutrinos with a Rapidly-Deployable Surface-Level Detector", [arXiv:1812.02163v1](https://arxiv.org/abs/1812.02163v1) [physics.ins-det], bald in Phys. Rev. Appl.
- ^{vi} R. Carr et al. "Neutrino-Based Tools for Nuclear Verification and Diplomacy in North Korea", Science & Global Security 27 (2019): 15-28
- ^{vii} Kohler, M.; Daerr, H.; Sahling, P.; Sieveke, C.; Jerschabek, N.; Becker, C. & Sengstock, K.: *All-optical production and trapping of metastable noble gas atoms down to the single atom regime*, Europhysics Letters, 2014, 108
- ^{viii} Schoeppner, M. & Glaser, A.: *Present and future potential of krypton-85 for the detection of clandestine reprocessing plants for treaty verification*, Journal of Environmental Radioactivity, 2016, Vol. 162–163, 300–309
- ^{ix} A. Glaser, M. Götttsche, Fissile Material Stockpile Declarations and Cooperative Nuclear Archaeology, UNIDIR, 2017
- ^x C.J. Gesh, A Graphite Isotope Ratio Method Primer—A Method for Estimating Plutonium Production in Graphite Moderated Reactors, Pacific Northwest National Laboratory, PNNL-14568, 2004