



KERNPHYSIK

Sicherheit durch Verifikation

Wie ließe sich nukleare Abrüstung in Nordkorea überprüfen?

Malte Götsche, Matthias Englert, Madalina Wittel und Simon Hebel

Trotz jahrzehntelanger Bemühungen gibt es bis heute nur bedingt Fortschritte bei der nuklearen Abrüstung, welche derzeit in akuter Gefahr sind. Dennoch verzichten alle Staaten auf Kernwaffentests – bis auf Nordkorea, wo bis 2017 Tests stattfanden. Während bedeutende Abrüstungsmaßnahmen auf nordkoreanischer Seite ohne belastbare Sicherheitsgarantien für das Regime unwahrscheinlich sind, beharren die USA und weitere Länder auf überprüfbaren Fortschritten in der Denuklearisierung. Das Dilemma besteht im Misstrauen beider Staaten zueinander. Naturwissenschaftlich-technische Verifikationsverfahren können Vertrauen schaffen und müssen bereitstehen, falls zukünftig eine Abrüstungsinitiative möglich erscheint.

Es ist 100 Sekunden vor Zwölf! Die im Jahr 1947 eingeführte „Doomsday Clock“ des amerikanischen Magazins „Bulletin of the Atomic Scientists“ steht seit

Januar näher vor Mitternacht als je zuvor – unter anderem aufgrund des nuklearen Programms Nordkoreas. Nachdem dieses Land 2003 aus dem Atomwaffensperrvertrag (**Infokasten**) ausgestiegen ist, hat es zügig Atomwaffen entwickelt und mehrfach unterirdisch getestet.

Bis heute scheiterten alle internationalen Initiativen, Nordkorea zur Aufgabe seines Atomprogramms zu bringen. In den letzten Jahren unternahm die US-Administration unter Präsident Trump einen neuen Anlauf. Doch den Gipfeltreffen 2018 und 2019 folgten keine konkreten Schritte. Nordkorea fordert zunächst Sicherheitsgarantien, etwa in Form eines bilateralen Friedensvertrags, der formal den Koreakrieg (1950 bis 1953) beendet. Die USA beharren auf überprüfbaren Fortschritten in der Denuklearisierung. Das gegenseitige Misstrauen ist tief verwurzelt.

Ein Ausweg aus der Sackgasse, der auch im Kalten Krieg in der Rüstungskontrolle zwischen den USA und der Sowjetunion erfolgreich war, könnten verifizierbare technische

◀ Nordkoreas „Oberster Führer“ Kim Jong-un lässt sich beim Besuch einer Forschungsanlage für Kernwaffen den möglicherweise thermonuklearen Sprengkopf erklären, der beim vorzeitig letzten und mit Abstand stärksten Test im September 2017 zum Einsatz kam. Obwohl die Erdnussform einen Spalt- und Fusionsteil andeutet, könnte es sich auch um eine Attrappe handeln.

Schritte sein, welche die Abrüstung überprüfen und gleichzeitig Vertrauen schaffen können [1].

Was gilt es zu verifizieren?

Ein erster Schritt ist der verifizierte Verzicht auf Atomwaffentests. Der Fokus nuklearer Abrüstungsverifikation in Nordkorea liegt dann auf den beiden spaltbaren Materialien, die für Kernwaffen relevant sind: Plutonium und hochangereichertes Uran (Highly Enriched Uranium, HEU). Zunächst muss sichergestellt sein, dass kein Plutonium mehr in Reaktoren produziert oder aus Brennelementen separiert wird und keine HEU-Produktion mehr stattfindet. Anschließend gilt es, die Bestände zu erfassen und zu sichten. Die Bestandsaufnahme reicht von den Produktionsanlagen bis zu den Atomwaffen selbst und erstreckt sich auch auf vergangene Produktion und auf Spaltmaterial aus Nukleartests. Dafür ist zu überprüfen, ob die Bestandsaufnahme vollständig und korrekt ist. Auf diese Elemente fokussiert sich dieser Artikel.

Schließlich ist es für die Abrüstung notwendig, die Kernwaffen zu demontieren und sämtliches waffenfähiges Spaltmaterial umzuwandeln oder zu vernichten. Letztlich muss die Internationale Atomenergieorganisation (IAEO) dafür sorgen, dass sämtliche nuklearen Aktivitäten weiterhin zivil bleiben. Physikalische Verifikationsmethoden sind dabei unverzichtbar. Eine Reihe an Messverfahren aus Laser-, Teilchen- und Geophysik sowie Kerntechnik könnte hier zur Anwendung kommen, von denen wir nur einige wenige

vorstellen wollen. Nach wie vor besteht großer Bedarf, neue Forschungsansätze zu identifizieren und für die Verifikation der nuklearen Abrüstung nutzbar zu machen.

Detektion von Kernwaffentests

Nordkorea hat seit über zwei Jahren keine Kernwaffen getestet, könnte dies jedoch wieder tun. Die vergangenen nordkoreanischen Tests erlauben zu beurteilen, wie gut die Staatengemeinschaft zukünftig in der Lage wäre, Kernwaffentests zu detektieren bzw. deren Abwesenheit zu bestätigen. So liefert das International Monitoring System (IMS) der Organisation des Kernwaffenteststoppvertrags (**Infokasten**) wertvolle Daten zu den Nuklearwaffenversuchen Nordkoreas. Die über 300 Stationen helfen, 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 die 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 tatsächlich eine Kernwaffe explodiert ist: Denn dabei werden als Spaltprodukte radioaktive Isotope des Edelgases Xenon freigesetzt, die sich über große Strecken ausbreiten, bevor sie je nach Isotop mit Halbwertszeiten von 9 bis 286 Stunden zerfallen. Die Aktivitätskonzentrationen liegen in der Größenordnung mBq/m^3 und sind verglichen mit der sonstigen atmosphärischen Radioaktivität winzig.

Die Aufgabe der Radionuklidstationen des IMS besteht darin, ständig Luft zu sammeln und durch eine Aktivkohle-falle zu führen, die das Xenon aus der Luft adsorbiert. Einmal am Tag wird das gesammelte Xenon mittels Gaschromatographie extrahiert und in einen Detektor überführt, der durch eine Beta-Gamma-Koinzidenzmessung die Isotope Xe-131m, Xe-133, Xe-133m und Xe-135 differenzieren

Verträge zur nuklearen Abrüstung

Der **Atomwaffensperrvertrag**, auch Nuklearer Nichtverbreitungsvertrag (NVV), trat 1970 in Kraft und regelt, dass nur fünf Staaten Kernwaffen besitzen dürfen, nämlich USA, Russland, China, Frankreich und Großbritannien. Alle anderen Vertragsteilnehmer verzichten auf Kernwaffen. Derzeit sind alle Staaten Mitglied im NVV außer Pakistan, Indien, Israel und Nordkorea.

Der Vertrag hat drei Säulen: Im Gegenzug zum Verzicht der Nichtkernwaffenstaaten auf atomare Bewaffnung (1. Säule) verpflichten sich die Kernwaffenstaaten zur nuklearen Abrüstung (2. Säule). In redlicher Absicht sollen Verhandlungen über einen Vertrag zur allgemeinen und vollständigen Abrüstung unter strenger und wirksamer internationaler Kontrolle geführt werden. Die Nichtkernwaffen-

staaten haben ein unveräußerliches Recht auf die friedliche Nutzung nuklearer Technologien (3. Säule). Die Überwachung der rein zivilen Nutzung nuklearer Technologien obliegt der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO). Allerdings gibt es bisher keinen vollständigen Abrüstungsvertrag, dem die Kernwaffenstaaten beigetreten sind. Vielmehr ist eine Modernisierung und Ertüchtigung der Arsenale und Trägersysteme zu beobachten.

Der **Kernwaffenteststopp-Vertrag** (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty, CTBT) von 1996 soll alle Kernwaffentests verbieten, sobald er in Kraft tritt. Dies geschieht, wenn eine festgelegte Liste von 44 Staaten den Vertrag ratifiziert hat. Unter den Kernwaffenstaaten fehlen die Ratifika-

tionen von China, USA und Israel, noch nicht unterzeichnet haben zudem Indien, Pakistan und Nordkorea. Konzeptioneller Vorgänger ist der **Partial Nuclear Test Ban Treaty**, der seit 1963 nur noch unterirdische Nuklear-explosionen erlaubt.

Die Kernwaffenteststoppvertragsorganisation (CTBTO), die in Form der „Preparatory Commission for the CTBTO“ bereits besteht, soll den CTBT überwachen. Zum Verifikationsregime gehört ein bereits einsatzfähiges weltweites Messnetz, das 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.

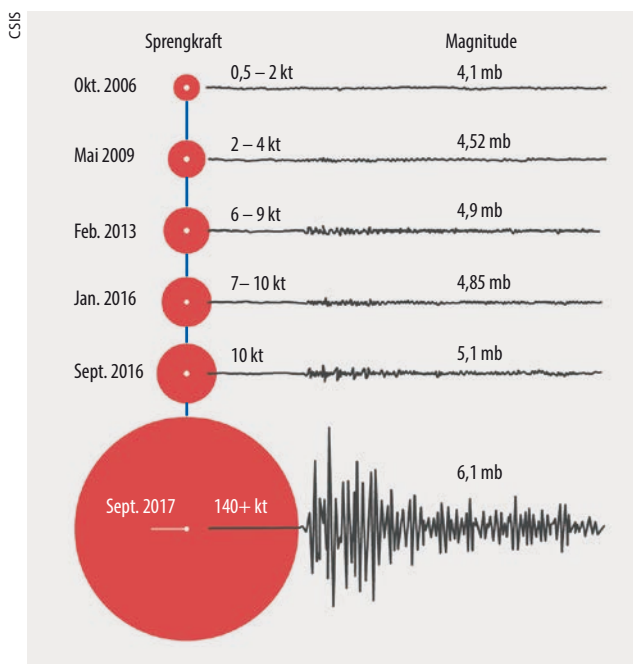


Abb. 1 Die zunehmende Stärke der durch das IMS gemessenen seismischen Ereignisse zeigt die ansteigende Sprengwirkung der nordkoreanischen Nukleartests seit 2006.

kann. Aus den Isotopenverhältnissen leitet sich ab, ob die Quelle ein Nukleartest oder eine zivile Nuklearanlage war. Durch atmosphärische Transportrechnungen kann schließlich überprüft werden, ob die mögliche Quellregion der Emission mit einem seismischen Ereignis korreliert.

Eine Herausforderung stellen dabei Anlagen dar, die medizinische Isotope wie Technetium-99 produzieren. Dort werden Targets aus Uran mit Neutronen bestrahlt, um sie anschließend aufzulösen und die kurzlebigen Spaltprodukte zu extrahieren. Die dabei entstehenden Xenon-Emissionen sind nur durch den Herkunftsort von Kernwaffenemissionen zu unterscheiden.¹⁾ Als weiteres aussichtsreiches Isotop für die Detektion von Nukleartests gilt inzwischen Argon-37, dessen Messung zivile Emissionen nicht nennenswert stören [2].

Nachweis der Nukleartests

Mithilfe des International Monitoring Systems gelang es zu bestätigen, dass es sich bei dem ersten, vergleichsweise kleinen Test in Nordkorea 2006 tatsächlich um eine Nuklearexplosion und nicht etwa um eine größere Menge konventionellen Sprengstoffs handelte. Die Daten zeigten auch, dass die Stärke der Waffen von unter 1 kt (Kilotonne TNT Äquivalent) auf wohl über 100 kt (entsprechend der fünffachen Sprengkraft der Hiroshimabombe) im Jahr 2017 stetig zunahm (**Abb. 1**).²⁾ Die Schätzungen gehen stark auseinander und reichen von 50 bis 280 kt – abhängig von den zugrundeliegenden geologischen Annahmen über das Testgelände [3].

1) Dokumentation der CTBTO Preparatory Commission: ctbto.org/verification-regime
 2) Missile Defense Project, „North Korean Missile Launches & Nuclear Tests: 1984-Present“, Missile Threat, Center for Strategic and International Studies, bit.ly/2XbKMvz.

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 Radionuklid-Daten vor. Zudem besteht noch Forschungsbedarf, um die Messdaten zu interpretieren: Die atmosphärischen und geologischen Modelle zur Lokalisation sind ebenso zu verbessern wie die Probenahme und Messtechnologien, um die Zeitauflösung der Daten zu erhöhen. Die Bestimmung der Sprengkraft eines Nukleartests erlaubt es, den Verbrauch an Spaltmaterial in den Nukleartests abzuschätzen.

Die Kernwaffenteststopporganisation kann auch umfassende Vor-Ort-Inspektionen durchführen, um verdächtige Ereignisse aufzuklären. Daher wäre es wünschenswert, wenn der Teststoppvertrag in Kraft treten und Nordkorea in das Vertragswerk eingebunden werden könnte.

Gestoppte Produktion

Ein weiterer wichtiger Schritt wäre ein Stopp der Spaltmaterialproduktion für Kernwaffen in Nordkorea. Bereits in der Vergangenheit gab es dort temporäre Maßnahmen: So zerstörte Nordkorea 2008 den Kühlturm seines Graphitreaktors (**Abb. 2**), aus dem das Plutonium stammt, um den Produktionsstopp zu demonstrieren. Der Reaktorbetrieb wurde später wieder aufgenommen. Auch abseits solcher drastischer Maßnahmen kann die IAEA Produktionsstopps in Reaktoren und Wiederaufarbeitungsanlagen sowie in Uran-Anreicherungsanlagen vor Ort überprüfen.

Die IAEA überwacht den Betrieb nukleartechnischer Anlagen routinemäßig in Nichtkernwaffenstaaten. Sollte Nordkorea keinen direkten regelmäßigen Zugang zu seinen Anlagen gewähren, gäbe es auch weniger intrusive Methoden. Bei der Plutoniumproduktion in Reaktoren lassen sich mittels Satelliten zum Beispiel thermische Signaturen oder im optischen Bereich Dampf Wolken erfassen, die auf einen Betrieb hinweisen. Eine weitere Möglichkeit, welche die IAEA derzeit noch nicht routinemäßig einsetzt, besteht darin, Antineutrinos zu detektieren, die aus laufenden Reaktoren stammen.

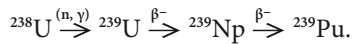
Reaktor-Monitoring mit Antineutrinos

Bei der Kettenreaktion entstehen Spaltprodukte im Brennstoff, die durch mehrere aufeinanderfolgende Beta-Zerfälle Antineutrinos emittieren, bis sie einen stabilen Zustand erreichen. Im Durchschnitt entstehen pro Spaltung sechs Antineutrinos. Daher sind Kernreaktoren zurzeit die stärksten künstlichen Quellen von Antineutrinos. Ein Reaktor wie der Graphitreaktor mit einer elektrischen Leistung von 5 MWe emittiert isotrop etwa 10^{19} Antineutrinos pro Sekunde. Unabhängig vom Reaktortyp liegen die Energien der zugehörigen Antineutrinos zwischen 0 und 8 MeV (**Abb. 3**).

Beim Beta-Zerfall emittiert ein Element Antineutrinos mit einem spezifischen Energiespektrum und einer gewissen Rate. Da jedes spaltbare Nuklid über eine bestimmte Reihe von Isotopen zerfällt, folgen ihre kombinierten Emissionen einem charakteristischen Spektrum. Die Emissionen

onsrate ist proportional zur Anzahl der Spaltungen und hängt somit von der Reaktorleistung ab. Nach der Reaktorabschaltung sinkt die Emissionsrate der Antineutrinos durch Nachzerfall nach wenigen Tagen unter die Messgrenze. Daher liefert ihre Messung direkte Informationen über den Betriebszustand des Reaktors.

Während des Betriebs reduziert sich die Menge von ^{235}U im Brennstoff durch Abbrand, während ^{239}Pu durch Neutroneneinfang entsteht:

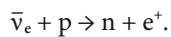


Diese Veränderungen beeinflussen direkt das Antineutrinospektrum. Somit lässt sich aus Antineutrino-Messungen sogar der Abbrand und damit die Menge an Plutonium im Reaktor abschätzen [4].

Antineutrinos wechselwirken nur schwach mit Materie und besitzen einen sehr geringen Wirkungsquerschnitt σ , niedriger als 10^{-41} cm^2 . Dadurch gibt es keine technischen Mittel, um die Antineutrino-Emissionen auf das Reaktorgebäude zu beschränken oder ihre Trajektorien umzuleiten. Sie liefern also direkte und fälschungssichere Informationen über den Reaktorbetrieb. Gleichzeitig wirkt sich ihre hohe Durchdringungskraft jedoch erheblich auf das Detektordesign und die Detektionsraten aus.

Neutrinodetektoren in Nordkorea

Szintillatoren sind derzeit die beste Methode, um Reaktoren zu überwachen. Sie messen Antineutrinos mithilfe der inversen Beta-Zerfallsreaktion, bei der ein Antineutrino mit einem Proton im Detektormaterial interagiert:



Photomultiplier registrieren die Positronen und Neutronen in Koinzidenz.

In Frankreich gelang es dem Double-Chooz-Experiment mit zwei 10-Tonnen-Flüssigkeitsszintillator-Detektoren, die Abschaltung von Reaktoren innerhalb weniger Stunden bis zu einem Tag zu beobachten – je nach Abstand zwischen Detektor und Reaktor. Angesichts der zunehmenden Beweise, dass Antineutrino-Messungen dazu dienen können, Reaktoren zu überwachen, verfolgt die IAEA seit knapp 20 Jahren die Entwicklung entsprechender Detektionsmethoden.

In den letzten Jahren wurden mehrere Experimente mit neuen Detektordesigns wie PROSPECT [5] und CHANDLER [6] vorgeschlagen. Diese neuen Detektoren sind in Segmente unterteilt und verwenden flüssiges bzw. festes Szintillatormaterial. Die Segmentierung ermöglicht eine hohe räumliche Auflösung, die sehr wichtig ist, um Hintergrundereignisse zu reduzieren. Die neuen Detektoren könnten viel leichter und damit kleiner sein – vier Tonnen im Falle von PROSPECT – und erfordern nur eine minimale Abschirmung an der Oberfläche.

Da der Antineutrino-Fluss quadratisch mit der Entfernung sinkt, sollten die Detektoren möglichst nah am Reaktorgebäude stehen, bestenfalls nur einige Dutzend Meter entfernt. Dennoch wäre die Überwachung des Reaktorbetriebs auf diese Weise deutlich weniger invasiv als traditionelle Inspektionen, die einen direkten Zugang zu den Reaktorgebäuden erfordern. Dies könnte im komplizierten diplomatischen Kontext Nordkoreas sehr hilfreich sein, um die Akzeptanz dieser Maßnahmen zu erleichtern.

Ein PROSPECT-ähnlicher Detektor könnte in Nordkorea rund zwanzig Meter vom Reaktorgebäude entfernt stehen. Im Idealfall würde die Datenaufnahme in einer Auszeit des Reaktors beginnen, um ein gutes Verständnis des Neutrino-Hintergrunds zu erlangen. Nach jeder Inbetriebnahme des Reaktors erhöht sich die Interaktionsrate messbar. Laut ersten Studien ließe sich in diesem Szenario ein unautorisierter Betrieb des Graphitreaktors inner-

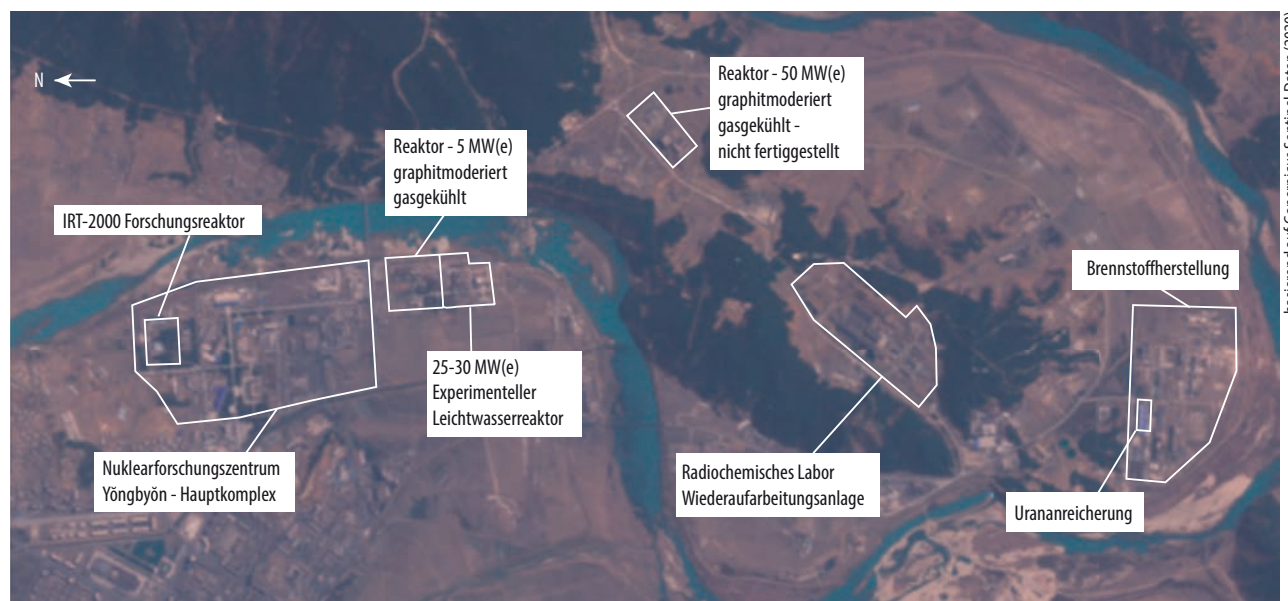


Abb. 2 Die Satellitenaufnahme mit 10 m maximaler Auflösung zeigt wesentliche Anlagen des nordkoreanischen Nuklearkomplexes in Nyongbyön. Die Aufnahme entstand am 15. April 2020 mit dem Sentinel-2B-Satelliten des Copernicus-Programms der Europäischen Union.

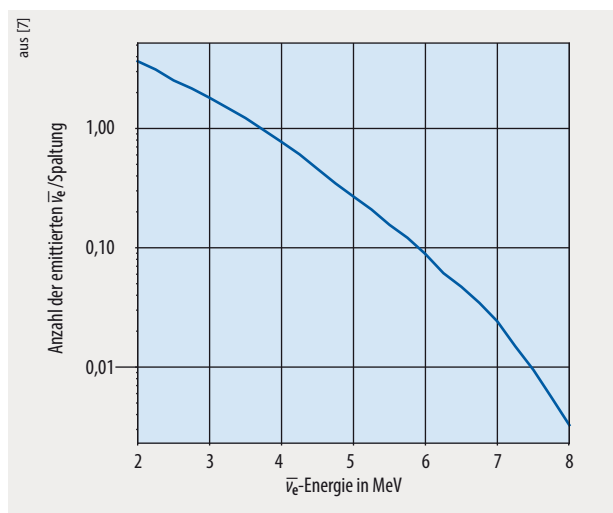


Abb. 3 Ein typisches normiertes Antineutrino-Reaktorspektrum fällt mit steigender Energie ab.

halb von zwei Wochen mit einem Konfidenzniveau von 95 Prozent entdecken [8]. Zudem könnte die internationale Entwicklung eines solchen Detektors unter Einbeziehung Nordkoreas Kooperationsmöglichkeiten öffnen und Vertrauen schaffen, da es nicht erforderlich wäre, geheime oder waffenbezogene Informationen auszutauschen [8].

Monitoring mit Krypton

Darüber hinaus gilt es zu überprüfen, ob Plutonium aus alten Brennelementen in Wiederaufarbeitungsanlagen abgetrennt wird. Neben Vor-Ort-Inspektionen eignet sich hierzu ein lokales Monitoring von Krypton-85-Emissionen. Dieses Isotop wird während der Abtrennung freigesetzt und breitet sich in der Anlage und ihrer Umgebung aus.

Ein großmaschiges Messnetz nach Vorbild des Kernwaffenteststoppvertrags ist schwer umzusetzen, da Krypton-85 aufgrund seiner hohen Halbwertszeit von zehn Jahren und der hohen anthropogenen Hintergrundkonzentration von $1,4 \text{ Bq/m}^3$ in der Atmosphäre schwerer zu detektieren und zu lokalisieren ist. Ein Vielfaches an Messstationen wäre notwendig. Eine radiometrische Messung der Aktivität würde mehrere Kubikmeter Luft erfordern, was aufgrund der Pumpen und des flüssigen Stickstoffs einen hohen Aufwand bedeutet.

Neuartige Messverfahren wie die Atomfallen-Spurenanalyse ermöglichen es, auch in kleinen Luftproben von einem Liter den Gehalt von Krypton-85 zu messen [9]. Solche kleinen Proben lassen sich bei Inspektionen nehmen oder automatisiert sammeln und im Labor auswerten. 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 Kühllaser gebremst und gefangen. Dabei emittieren sie Photonen, über deren Messung auf die Konzentration zu schließen ist.

In diesem Fall verwendet man die Isotope Kr-81 und Kr-85, um aus deren Verhältnis die Konzentration von Kr-85 in der Luftprobe zu bestimmen. Um ein Isotop in

der Atomfalle zu fangen, ist ein Kühlübergang mit einer Wellenlänge erforderlich, für den Laser erhältlich sind. Da diese Wellenlänge für den Grundzustand von Krypton im Bereich vakuum-ultravioletten Lichts liegt, ist die Laserkühlung erst mit einer Vorbehandlung möglich. Bei dieser wird das Krypton durch eine vakuum-ultraviolette Lampe zunächst auf ein kühlabares, metastabiles Niveau angeregt, in dem es mit einer Halbwertszeit von 40 Sekunden verbleibt, die für Einfang und Messung ausreicht. Übersteigt die Konzentration von Kr-85 den erwarteten Hintergrund und ist nicht durch bekannte Wiederaufarbeitungsanlagen erklärbar, ist von einer bisher nicht bekannten Plutoniumabtrennung in der näheren Umgebung auszugehen [10].

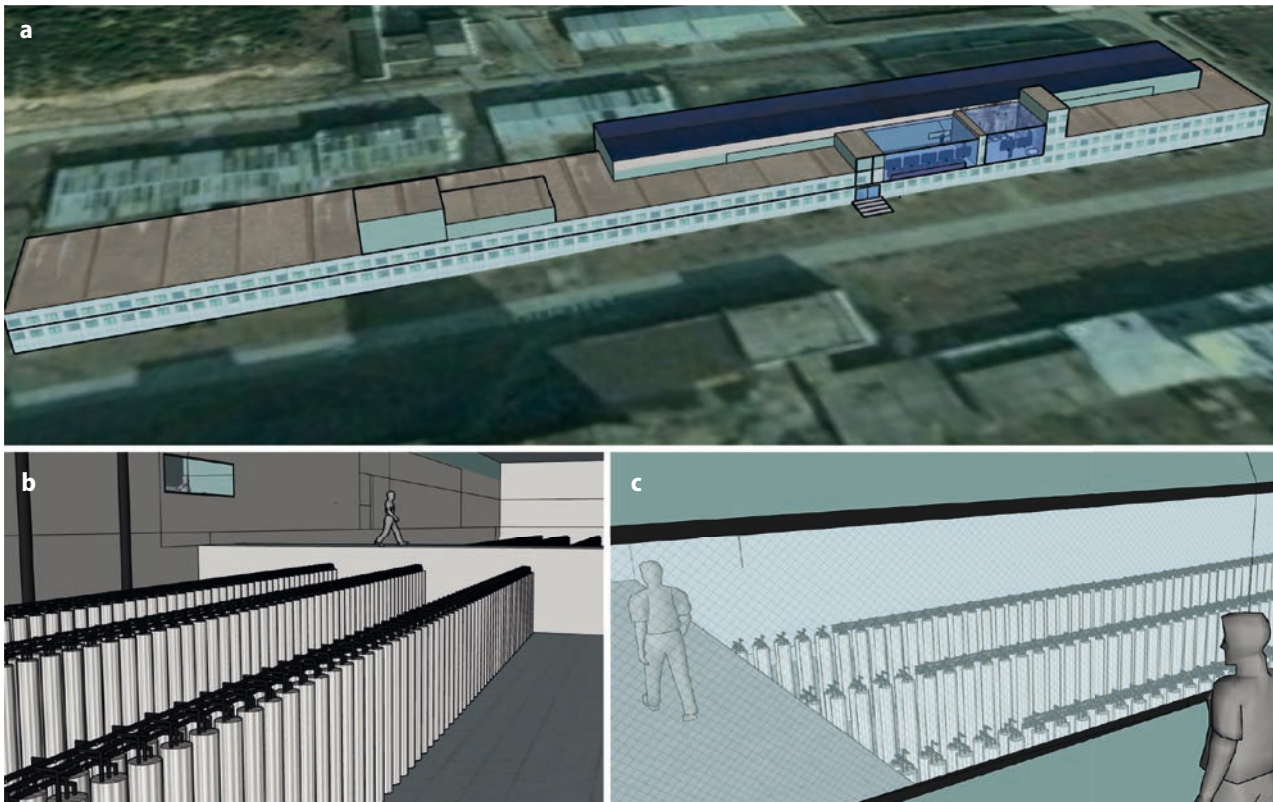
Überprüfung der Urananreicherung

Während für Plutonium vielversprechende Verifikationsansätze existieren, ist es deutlich schwieriger, den Produktionsstopp von hochangereichertem Uran zu verifizieren. Urananreicherung erfolgt heute kommerziell fast ausschließlich mit Gasultrazentrifugen (**Abb. 4**). Bis zu mehrere Meter hohe schnell rotierende Zylinder nutzen den Massenunterschied zwischen Uran-238 und Uran-235 aus. Werden die Rotoren parallel und in Serie geschaltet und die Anlage mit dem Gas Uranhexafluorid (UF_6) durchströmt, kann die Konzentration, die natürlicherweise bei 0,7 Prozent Uran-235 (99,3 Prozent Uran-238) liegt, ansteigen: in der zivilen Kernenergie auf drei bis fünf Prozent, in Forschungsreaktoren auf bis zu 20 Prozent. Ab einer solchen Anreicherung gilt Uran als hochangereichert, militärisch kommen Anreicherungen über 90 Prozent zum Einsatz.

Früher wurde Uran in großen, energieintensiven Diffusionsanlagen angereichert, die dank ihres Flächenbedarfs und der thermischen Signatur einfach optisch zu detektieren waren. Kleine Gaszentrifugenanlagen sind hingegen bezüglich ihrer thermischen Emissionen vergleichbar einem mittleren Supermarkt oder einem modernen Bürogebäude. Die Überwachung deklarerer Zentrifugenanlagen kann sich etablierter Verfahren bedienen. Sollte Nordkorea etwa entscheiden, in seiner Zentrifugenanlage in Nyöngbyön niedrig angereichertes Uran für die zivile Nutzung zu produzieren, könnte die IAEO ähnlich wie im Iran und anderen Nichtkernwaffenstaaten Schutzmaßnahmen implementieren.

Auffinden geheimer Anreicherungsanlagen

Die Detektion geheimer Anlagen ist extrem schwierig und erfordert neuartige Methoden bzw. Verbesserungen der existierenden Verfahren. Zentrifugenanlagen arbeiten mit Unterdruck und haben daher sehr niedrige Leckageraten im Grammbereich. Wird dennoch UF_6 frei, hydrolysiert das Uran zu Uranyl-Fluorid (UO_2F_2). Dieses stabile Aerosol kann sich über den Luftweg verbreiten. Dieser Vorgang hängt aber stark von den Freisetzungsbedingungen ab. Ein Inspektor müsste sehr nahe an oder besser in eine verdächtige Anlage kommen und dort Oberflächenproben mit einem Tuch („Wischproben“) nehmen, falls dies die inspezierte Partei erlaubt.



aus [11] / Modell von T. Patton

Abb. 4 So soll die Zentrifugenanlage in Nyöngbyön laut dem US-amerikanischen Atomwaffenexperten Siegfried Hecker aussehen, der die Anlage 2010 besuchte: Gebäude als Overlay in der Satellitenansicht (a), Zentrifugenhalle (b) und Blick aus dem Kontrollraum in die Halle (c).

Bisher existiert keine Methode, die eine Detektion aus größerer Entfernung mit ausreichender Sicherheit ermöglicht. Das Standardverfahren der neutroneninduzierten Spalturananalyse, das bei Inspektionen der IAEA zur Analyse von Wischproben dient, ist technisch aufwändig und daher nicht für eine sehr große Anzahl an Proben geeignet. Gesammelte Partikel werden mit Neutronen bestrahlt. In den Detektormaterialien hinterlassen Fragmente aus der neutroneninduzierten Spaltung Trajektorien durch Gitterschäden. Diese erlauben es, Partikel mit spaltbarem Material zu identifizieren und mit weiteren mikroskopischen und massenspektrometrischen Verfahren zu analysieren.

Darüber hinaus lassen sich Zentrifugenanlagen anhand elektromagnetischer Signale durch Abstrahlung aus der Anlage entdecken. Dies müsste bestenfalls im Abstand weniger Kilometer erfolgen. Eine weitere Möglichkeit wäre die Detektion charakteristischer Störungen in der Stromversorgung. Die Artefakte entstehen mit der doppelten Frequenz der verschiedenen Wechselstromstufen, wenn die Wechselspannung kurzzeitig unter die Vorspannungsschwelle von Halbleiterkomponenten fällt. Allerdings sind Gegenmaßnahmen denkbar, um elektromagnetische Signale nach außen abzuschwächen. Ebenso können Generatoren die Stromversorgung unabhängig vom Netz sicherstellen.

Auch die Überwachung von Zulieferwegen, Materialversorgung, Technikexport oder Personal kann helfen, eine geheime Anlage zu entdecken. Letztlich gilt es, alle möglichen Informationen für eine sorgfältige Prüfung heranzuziehen und auf Konsistenz zu untersuchen. Dazu zählen vorhandene Deklarationen und Publikationen oder

Berichte 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

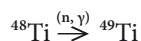
Diese Verfahren können helfen, den Ist-Zustand der Spaltmaterialproduktion zu prüfen. Um Abrüstung zu verifizieren, ist es zudem notwendig, Bestände an bereits existierenden waffenfähigen Spaltmaterialien zu deklarieren und zu überprüfen. Sie befinden sich entweder in Kernwaffen oder stehen zum Bau neuer Kernwaffen zur Verfügung. Auch deren Anzahl sollte deklariert werden, um das militärische Potenzial des Nuklearprogramms einschätzen und den Fortschritt der Abrüstung in Relation zu den Gesamtbeständen setzen zu können.

Allerdings ist es unwahrscheinlich, dass sich eine Kernwaffendeklaration zu Beginn der Abrüstung verifizieren lässt. Schließlich müsste Nordkorea dafür die bislang geheimen Orte bekannt geben, an denen die Kernwaffen lagern. Deklarationen von Kernwaffen- und Spaltmaterialbeständen wären überprüfbar, indem man die Historie der Spaltmaterialproduktion sowie deren Verbrauch etwa in Nukleartests nachvollzieht [12]. Daraus ergeben sich die heutigen Bestände.

Zunächst müsste Nordkorea seine Dokumentation zur Spaltmaterialhistorie zur Verfügung stellen. Dies würde die Betriebsabläufe der nuklearen Anlagen beinhalten sowie verfügbare Informationen zu verbrauchten Materialien. Simulationen der Anlagen erlauben es, anhand der Daten die produzierte Menge an Spaltmaterialien zu überprüfen. Allerdings ist nicht auszuschließen, dass die Dokumentation zumindest teilweise gefälscht ist. Hier könnten Inspektoren auf Messmethoden zurückgreifen, die Teile der Produktionshistorie auch unabhängig von der Dokumentation erfassen.

So können Proben des Graphitmoderators Aufschluss über die Plutoniumproduktion geben [13]: Denn das Plutonium wird aus Neutroneneinfang in Uran-238 über zwei Betazerfälle erbrütet. Die Rate des produzierten Plutoniums hängt daher von der Rate der Neutroneneinfangs-Reaktionen ab, integriert über den gesamten Reaktor. Dieser Wert wiederum hängt vom Neutronenfluss ϕ , dem Uran-238-Inventar und vom Energiespektrum der Neutronen ab.

Bei bekanntem Uran-238-Inventar sowie bekanntem Energiespektrum resultiert also eine Relation zwischen der Plutoniumproduktionsrate und ϕ . Die Plutoniumproduktion über die Laufzeit t des Reaktors hängt von der Neutronenfluenz $\int \phi dt$ ab. Letztere lässt sich durch eine massenspektrometrische Vermessung von Isotopenverhältnissen bestimmter Spurenelemente im Graphitmoderator ermitteln. Im Gegensatz zu den Brennelementen, die regelmäßig ausgetauscht werden, verbleibt das Graphit über die gesamte Laufzeit im Reaktor. Ein Beispiel ist Titan, wo aufgrund der Reaktion



das Verhältnis $^{48}\text{Ti} / ^{49}\text{Ti}$ Aufschluss über die Plutoniumproduktion des Reaktors gibt.

Wie geht es weiter?

Trotz jahrzehntelanger internationaler diplomatischer Bemühungen gelang es nicht, Nordkorea an der Entwicklung und am Test von Kernwaffen zu hindern. Die Aussichten auf eine atomare Abrüstung und Denuklearisierung Nordkoreas sind ungewiss. Zentral in den Bemühungen sind technische Verifikationsmethoden und entsprechende physikalische Verfahren. Nur durch schrittweise Annäherung mit gleichzeitiger Verifikation kann Vertrauen entstehen, das auf einer fragilen Balance beruht zwischen der Herstellung von Transparenz und gesichertem Wissen sowie der Berücksichtigung der nordkoreanischen Sicherheitsinteressen.

Eine Reihe physikalischer Methoden kommt dabei zum Einsatz. Weiterhin besteht großer Bedarf, neue Forschungsansätze und Ergebnisse der physikalischen Forschung zu identifizieren, ihr Potenzial für diese wichtigen Anwendungen auszuloten und schließlich konkret umzusetzen.

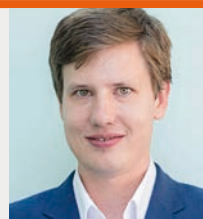
*

Malte Götsche, Matthias Englert, Madalina Wittel und Simon Hebel sind in der Arbeitsgruppe Physik und Abrüstung (AGA) der DPG aktiv.

Literatur

- [1] A. Glaser und Z. Mian, *Science* **361** (2018)
- [2] G. Kirchner et al., arXiv:2006.02823 (2020)
- [3] vgl. den Bericht der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, bit.ly/2AIY8YB
- [4] E. Christensen et al., *Phys. Rev. Lett.* **113**, 042503 (2014)
- [5] J. Ashenfelter et al. (PROSPECT Coll.), *Phys. Rev. Lett.* **121**, 251802 (2018)
- [6] A. Haghighat et al., *Phys. Rev. Applied* **13**, 034028 (2020)
- [7] P. Huber, *Phys. Rev. C* **84**, 024617 (2011)
- [8] R. Carr et al., *Science & Global Security* **27**, 15 (2019)
- [9] M. Kohler et al., *EPL* **108**, 13001 (2014)
- [10] M. Schoepfner und A. Glaser, *J. Environ. Radioact.* **162**, 300 (2016)
- [11] S. Hecker, A Return Trip to North Korea's Yongbyon Nuclear Complex, Center for International Security and Cooperation, Stanford University, November 20 (2010), vgl. bit.ly/3d6zFKR
- [12] A. Glaser und M. Götsche, *Fissile Material Stockpile Declarations and Cooperative Nuclear Archaeology*, UNIDIR (2017)
- [13] C. J. Gesh, Pacific Northwest National Laboratory, PNNL-14568 (2004)

Die Autoren



Malte Götsche (FV Hadronen und Kerne, FV Physik sozio-ökonomischer Systeme) leitet als Juniorprofessor an der RWTH Aachen die Nuclear Verification and Disarmament Group am III. Physikalischen Institut B. Er ist Freigeist Fellow der VolkswagenStiftung und forscht seit zehn Jahren zur Verifikation nuklearer Abrüstung, u. a. an der Princeton University und der U Hamburg.

Matthias Englert ist Senior Researcher am Fachbereich Nukleartechnik & Anlagensicherheit des Öko-Instituts e.V. Er forscht seit über 20 Jahren zu physikalisch-technischen und politischen Aspekten der nuklearen Abrüstung, unter anderem an der Stanford University und der TU Darmstadt.



Madalina Wittel ist Teilchenphysikerin und interessiert sich besonders für Neutrinophysik. Nach ihrer Masterarbeit zur „ultra-high-energy Neutrinophysik“ am IceCube Observatory forschte sie zur Hochenergiephysik mit Lepton-Collidern am DESY und promovierte an der Universität Hamburg. Sie ist derzeit Postdotorandin in der Nuclear Verification and Disarmament Group an der RWTH Aachen.



Simon Hebel ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für Naturwissenschaft und Friedensforschung der Universität Hamburg. Er forscht seit zwölf Jahren zu nuklearer Rüstungskontrolle mit den Schwerpunkten Abrüstungsverifikation und Edelgasmessungen zur Verifikation von Rüstungskontrollverträgen.



Prof. Dr. Malte Götsche, RWTH Aachen, Graduiertenschule AICES, Schinkelstr. 2, 52062 Aachen; **Dr. Matthias Englert**, Öko-Institut e.V., Rheinstraße 95, 64295 Darmstadt; **Dr. Madalina Wittel**, RWTH Aachen, Graduiertenschule AICES, Schinkelstr. 2, 52062 Aachen; **Dr. Simon Hebel**, Universität Hamburg, ZNF, Beim Schlump 83, 20144 Hamburg