Bearbeitung kontaminierter Tatorte wurden getestet. Verbesserungen und Weiterentwicklungen werden anhand der gezogenen Schlussfolgerungen vorgenommen.

- Nachbereitung durchgeführter Übungen, auch mit den nicht teilnehmenden Behörden, ist genauso wichtig wie die Vorbereitung vor der Übung.
- Regelmäßige gemeinsame Übungen zwischen den Polizeibehörden und den Strahlenschützern sind ein essenzieller Bestandteil der Einsatzvorbereitung und eine Triebkraft der Weiterentwicklung der Fähigkeiten.

Jens-Tarek Eisheh, Emily Alice Kröger, Martin Baron, Eike Gericke, Alexander Rupp, Britta Lange, Julius Vogt ❑

Nukleare Forensik Schweiz

Das Labor Spiez ist aufgrund des Schweizer Commitments zur „Global Initiative To Counter Nuclear Terrorism (GICNT)" dazu angehalten, Arbeiten und Forschung auf dem Gebiet der nuklearen Forensik zu betreiben. Dazu gehören die Prozesse der Probenahme am radioaktiven Tatort – zusammen mit dem Forensischen Institut Zürich – sowie die laboranalytischen Methoden und Auswerteverfahren und die klassischen forensischen Techniken. Die analytische Umsetzung der nuklearen Forensik im Labor Spiez bettet sich in den „Nationalen Aktionsplan Nukleare Forensik" ein, der das Zusammenspiel der Schweizer Behörden in so einem Fall definiert.

Umsetzung der Analytik im Labor Spiez

Um den analytischen Teil regelmäßig zu üben, organisiert die International Technical Working Group (ITWG, siehe Kasten) alle 2 Jahre sogenannte „Collaborative Material Exercises (CMXs)".

ITWG Nuclear Forensics

Die ITWG ist ein internationales Forum für die Zusammenarbeit von nationalen Behörden, die ein gemeinsames Betätigungsfeld im Verhindern und Aufklären von gesetzeswidrigem Handel und Umgang mit radioaktivem und nuklearem Material haben.

Diese Gemeinschaft aus Wissenschaftlern, Strafverfolgungsbehörden und Regulatoren entwickelt zusammen „best practices" zur nuklearen Forensik. Dies wird primär durch die Organisation einer Serie von sogenannten „Collaborative material exercises (CMXs)" erreicht.

Im Gegensatz zu den Ringversuchen steht hier nicht die individuelle Leistung der Labore im Vordergrund, sondern die Weiterentwicklung der weltweiten Laborkapazität als Ganzes.

Die CMX-Organisatoren der ITWG setzen sich momentan aus Spezialisten des

- Pacific Northwest National Laboratory (PNNL, USA),
- Atomic Weapons Establishment (AWE, UK),
- Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS, D) sowie
- Federal Bureau of Investigation (FBI, USA) zusammen.

Die CMXs verfolgen folgende Ziele:

- Beste Praxis für Probenhandling, (Sub-)Probenahme und Untersuchung von radioaktiven Proben fördern.
  Dabei sollen die Bedürfnisse einer angeordneten Untersuchung mit den Vorgaben der Strahlenschutzverordnung sowie deren Optimierungsgrundsatz (Dosis und Risiko der Kontamination von Personen, Aus- und Einrichtung) kompatibel sein.
- Optimale Analysenmethoden finden und priorisieren, um beschlagnahmtes nukleares oder radiologisches Material charakterisieren und kategorisieren zu können.
- Weiterentwicklung der analytischen Techniken zur Quantifizierung von Prüfgrößen in obigem Material
- Einsatz von Realproben anstelle von zertifiziertem Referenzmaterial. Heterogenität soll bewusst ein analytisches Problem darstellen.

Nukleares oder radiologisches Material

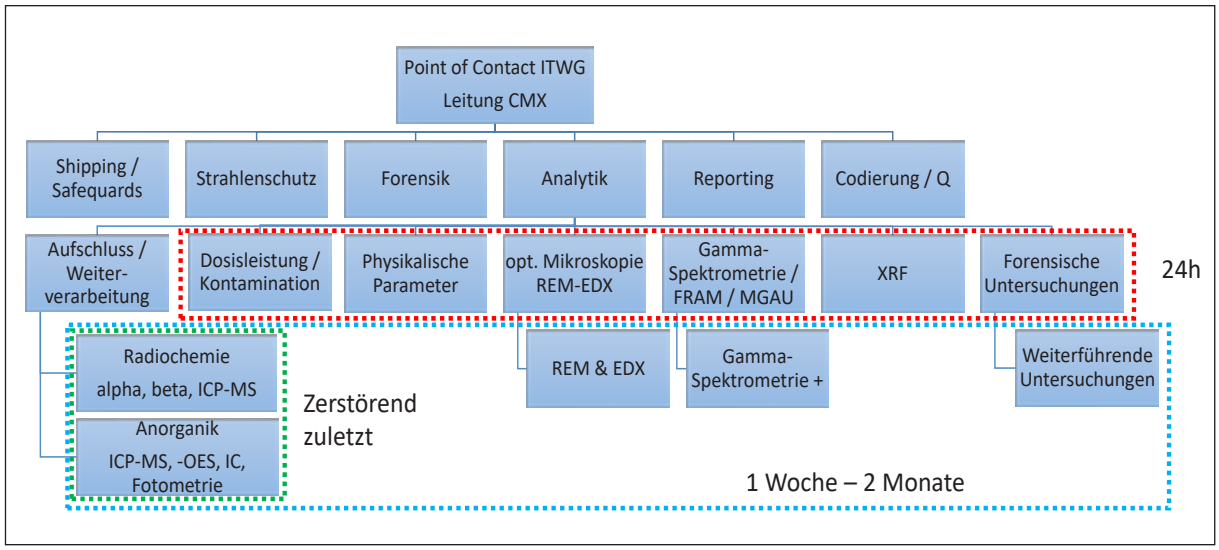


Abb. 1: Organisation des Fachbereiches „Nuklearchemie“

- Üben der gängigen Zeitvorgaben der Strafverfolgungsbehörden (24 h, 1 Woche, 2 Monate).
- Aufkommende Analysenmethoden erkennen und in Gemeinschaft einführen.

Collaborative Material Exercises CMX-7

Wie alle CMX wurde auch die 7. CMX als Rollenspiel („Project Hebenon“) anhand eines definierten Drehbuchs durchgespielt. Vorgängig wurde das Kernmaterial aus den USA in die Teilnehmerstaaten verschickt und das Paket zu einem definierten Zeitpunkt geöffnet.

Ab dem Zeitpunkt des Öffnens startete die Übung. Diese bedingt den Einsatz aller Messgruppen der akkreditierten Prüfstelle STS 0028 des Labor Spiez sowie den Einbezug aller Spezialisten für den Umgang mit Kernmaterial/Strahlenschutz sowie für die Auswertung. Bild 3 zeigt die Organisation des Fachbereiches „Nuklearchemie“ zur Durchführung eines solchen Versuches.

Rollenspiel „Project Hebenon“

Das Szenario für CMX-7 präsentiert sich Ihnen wie folgt:

- Die Ermittlungsbehörde ist mit einem Untersuchungsauftrag für die nukleare Forensik an Sie herangetreten.
- Sie haben 4 radioaktive Proben zur Untersuchung erhalten.
- Die Polizei hat bei der Ermittlung wegen eines Drogendeliktes in einem Wohnheim einer Universität festgestellt, dass radioaktive Substanzen in einer Wohnung präsent sind. 2 verdächtige Substanzen wurden aus der Wohnung beschlagnahmt (ES-1 und ES-2).
- Die mit der Untersuchung beauftragte Behörde hat 3 „persons of interest“ (POIs) identifiziert, die mit der Wohnung zu tun haben.
  - Niels, Mieter der Wohnung
  - Lise, Eigentümerin der Wohnung
  - Otto, Eigentümer der Wohnung

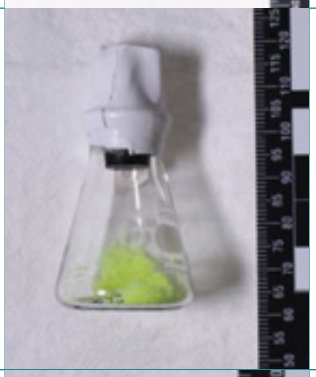
Diesen Erkenntnissen folgend hat die Behörde eine weitere radioaktive Substanz im Chemielabor an der Universität gefunden, wo Niels arbeitet. Diese Substanz (ES-3) wurde außerhalb des Strahlenschutz-Kontrollbereichs gefunden.

Von einem Institut der Universität, das mit Beschleunigern arbeitet und als einziges auf dem Campus eine Umgangsbewilligung für radioaktive Substanzen besitzt, haben sie eine Vergleichssubstanz erhalten (ES-4). Lise und Otto arbeiten im Institut mit Beschleunigern und hätten Zugang zu ES-4 gehabt. Für alle Proben sind Gamma-Spektren der Einsatz-Equipe für R/N-Fälle beigelegt. Den 3 POIs wurden Fingerabdrücke abgenommen. Eine Übersicht aller erhobenen Proben ist in der Tabelle 1 auf Seite 18 ersichtlich.

Der Ermittlungsleiter erteilt Ihnen folgenden Auftrag:

- Inventarisieren aller Proben und Beweise und Initiieren einer Kontrollkette für die weitere Bearbeitung und Codierung der Proben
- Zusammenstellen eines umfassenden Prüfplans zur Unterstützung der Untersuchung mit zerstörungsfreien und zerstörenden Techniken mit dem Ziel, Zuordnungen respektive Nichtzuordnungen oder Herkunftsbestimmungen machen zu können.
- Bestimmen der grundlegenden physikalischen Parameter und aller zerstörungsfrei zugänglichen Informationen in den ersten 24 Stunden. Spuren für die Forensik dürfen nicht verändert werden.
- Quantitative Analyse und Charakterisierung der 4 radioaktiven Proben mit einem fortlaufend anzupassenden Prüfplan gemäß den in der Schweiz geltenden Rapportierungszeiträumen.

Zerstörungsfrei zugängliche Informationen

Bezeichnung	Abbildung	Erläuterung
ES-1		Radioaktives Pulver in Scintillationsvial aus der Wohnung
ES-2		Radioaktives Metall in Glasbehälter aus der Wohnung
ES-3		Radioaktives Pulver in einem Erlenmeyer aus Niels' Labor
ES-4		Radioaktives Metall als Vergleichsstück aus dem Beschleuniger-Institut der Universität, wo Lise und Otto arbeiten

Tab. 1: Zusammenfassung der erhobenen Proben

Insbesondere ist von Interesse:

- Können die 2 Proben aus der Wohnung miteinander analytisch und/oder forensisch in Verbindung gebracht werden?
- Können die 2 Proben aus der Wohnung mit der Probe in Niels' Labor analytisch und/oder forensisch in Verbindung gebracht werden?
- Kann eine der beschlagnahmten radioaktiven Substanzen mit der Vergleichsprobe analytisch und/oder forensisch in Verbindung gebracht werden?
- Mit welcher Konfidenz treffen Sie obige Aussagen?
  Benutzen Sie das Graded Decision Framework „GDF" (siehe Kasten). Ohne statistischen Beleg werden Ihre Aussagen als unvollständig betrachtet.
- Bestimmen Sie die chemische Form/Zusammensetzung.
- Gibt es weitere Charakteristika, die eine Verbindung zwischen den Proben ermöglichen?
- Gibt es Charakteristika, die auf eine Verbindung zu Material außerhalb des Ermittlungsrahmens hindeuten?

Das „Graded Decision Framework GDF" deutsch: abgestufter Entscheidungsrahmen *(Quelle: ITWG)*

Zuverlässige und konsistente nuklearforensische Schlussfolgerungen sind nur möglich, wenn die Terminologie und die Kriterien für Entscheidungen auf der Grundlage der Probencharakterisierung klar kommuniziert und verstanden werden.
Zu den Beispielen, bei denen abgestufte Entscheidungen nützlich sind, gehören

(a) Vergleiche von Probenmerkmalen mit einer externen Norm oder Spezifikation und
(b) die Bewertung des Grades der Konsistenz und Inkonsistenz zwischen Probenmaterialien in Bezug auf eine bestimmte forensische Frage.

Das GDF empfiehlt einen Rahmen und eine Sprache für die Beschreibung von abgestuften Entscheidungen, die von Nuklearforensikern auf der Grundlage von Probenmerkmalen getroffen werden.

Dieses Vorgehen soll den Vergleich von Ergebnissen und Techniken zwischen Laboratorien und zwischen Nationen erleichtern, insbesondere bei vergleichenden Übungen.
Es kann auch als Grundlage für die Vermittlung des Vertrauens in nuklearforensische Schlussfolgerungen verwendet werden, die als Beweismittel in Gerichtsverfahren oder als Ermittlungshinweise dienen.

Die wichtigsten Schritte in diesem Rahmen sind:

1. Festlegen der Fragen
2. Auswahl der zu messenden Merkmale und der zu erstellenden Vergleiche
3. Erzeugen der p-Werte
4. Durchführen einer der folgenden Arten von Vergleichen:
   (a) Vergleich mit Referenz oder Norm
   (b) einfacher oder univariater Vergleich
   (c) mehrfache oder multivariate Vergleiche

Obwohl sich dieser Ansatz als nützlich erwiesen hat, sollen die Ergebnisse aus der Anwendung des abgestuften Entscheidungsrahmens nicht die auf Expertenurteilen basierenden Interpretationen ersetzen.
Der Leitfaden ist in keiner Weise verbindlich, sondern als Beitrag zum Instrumentarium der Nuklearforensiker gedacht, der in erster Linie bei ITWG-Übungen zum Einsatz kommen soll.

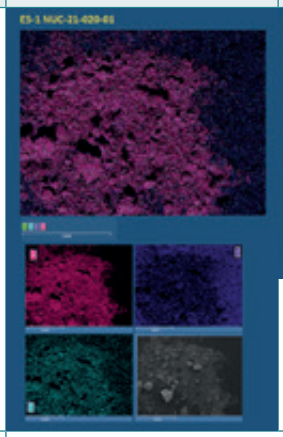
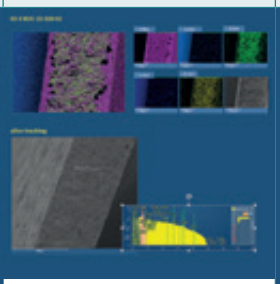
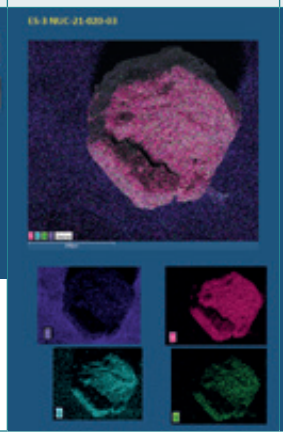
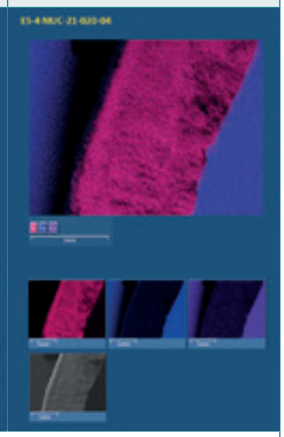
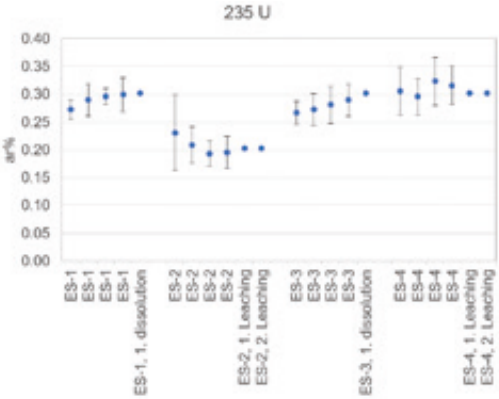
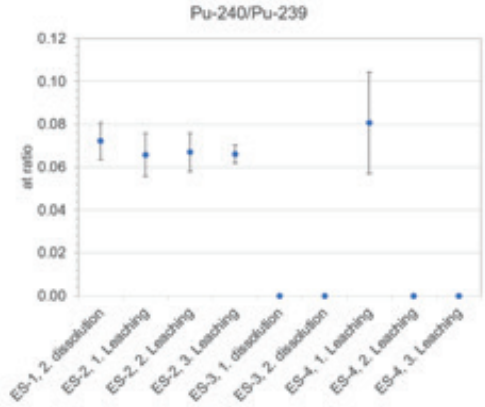
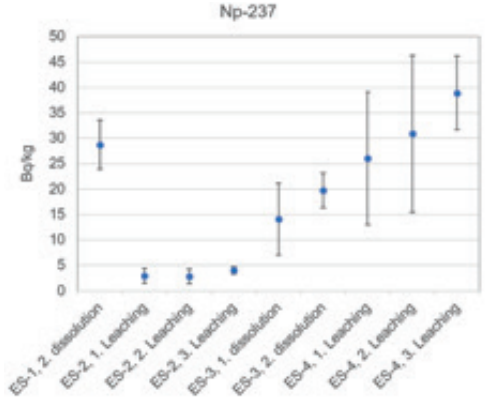
	ES-1	ES-2	ES-3	ES-4
Aspekt (Mikroskop)	Am 1. Tag noch nicht möglich		Am 1. Tag noch nicht möglich	
UV-Reaktion 366 nm				
Dichte		15 gcm^{-3} geschätzt		21,5 gcm^{-3} geschätzt
Dosis-leistung AD-6	360 $nSvh^{-1}$ Kontakt	270 $nSvh^{-1}$ Kontakt	240 $nSvh^{-1}$ Kontakt	150 $nSvh^{-1}$ Kontakt
Spaltbar? MGAU/ FRAM	abgereichertes Uran, Abreicherungsgrad passt zu ES-3/-4	abgereichertes Uran, Abreicherungsgrad passt zu keiner Probe	abgereichertes Uran, Abreicherungsgrad passt zu ES-1/-4	abgereichertes Uran, Abreicherungsgrad passt zu ES-1/-3
A (U-238) Gamma	$9 \cdot 10^{-7}$ Ci	$4 \cdot 10^{-7}$ Ci	$1{,}4 \cdot 10^{-7}$ Ci	$8 \cdot 10^{-7}$ Ci
Hypothese	Uran-Salz, farblich könnte Yellowcake oder ein Korrosionsprodukt von Uran passen (bspw. Schöpit)	Uran, metallisch, Werkzeugspuren; Dichte lässt weiteren Legierungsbestandteil vermuten	Uran-Salz, UV-Reaktion könnte auf Uranylnitrat deuten	Uran, metallisch, Oberfläche zeigt keine Werkzeugspuren; Dichte deutet auf sehr hohen Massenanteil von Uran hin

Tab. 2: Beispiele der Analysen der 24-h-Phase

Praktische Durchführung der Untersuchungen

Aufgrund der Daten aus dem beschriebenen Szenario und der beschlagnahmten Materialien wurden unter Strahlenschutzbedingungen am ersten Tag möglichst viele analytische Informationen gesammelt, ohne die Proben zu zerstören.
Beispielhaft werden nachfolgend in Tabelle 2 einige Analysen der 24-h-Phase aufgezeigt, bei der erste scheinbare Inkonsistenzen bereits optisch auffallen.
Im weiteren Verlauf wurden während 2 Monate immer detailliertere Analysen vorgenommen, Unsicherheiten gesenkt, die Hypothesen geprüft und mittels GDF konfidenzbasierte Aussagen zu den gestellten Fragen gemacht.

Beispiele dazu sind in den Tabellen 3 und 4 ersichtlich:

	ES-1	ES-2	ES-3	ES-4
REM-EDX				
Atomic Ratio Uran-235 MC-ICP-MS				
Plutoniumverhältnisse SF-ICP-MS				
Aktivitätskonzentration Neptunium-237 SF-ICP-MS				

	ES-1	ES-2	ES-3	ES-4
Verunreinigungen (stabil) Q-ICP-MS	Mg: 16 ppm Al: 83 ppm Si: 31 ppm Fe: 50 ppm Ni: 18 ppm	V: 2090 ppm Cu: 77 ppm Mo: < 3,3 ppm	Mg: < 0,02 ppm Al: < 0,02 ppm Si: < 0,02 ppm Fe: 13 ppm Ni: 8 ppm	V: < 2,8 ppm Cu: 14,1 ppm Mo: 30 ppm
Uran-Alter (U-234/Th-230) SF-ICP-MS	35,2 ± 1,8 a	17,2 ± 0,9 a	29,5 ± 1,5 a	35,5 ± 1,8 a
Nitrat Nachweisreaktion & EDX (als N)	nicht nachgewiesen	nicht nachgewiesen	nachgewiesen	nicht nachgewiesen

Tab. 3: Beispiele der Analysen der Phasen 1 Woche und 2 Monate

Uranium isotope composition										
Original Code 1 week report	Technic	NUC-Code	U-234		U-235		U-236		U-238	
				±2σ		±2σ		±2σ		±2σ
			at%	at%	at%	at%	at%	at%	at%	at%
ES-1	MC-ICP-MS	NUC-21-020-001-05 100 ppb	0.001673	0.000003	0.30175	0.00010	0.01054	0.00006	99.6860	0.0001
ES-4, 1. Leaching	MC-ICP-MS	NUC-21-020-004-05 100 ppb	0.001670	0.000003	0.30163	0.00012	0.01051	0.00007	99.6862	0.0001
ES-1	MC-ICP-MS	Zeta-Scores	–1.6		–1.6		–0.8		1.8	
ES-4, 1. Leaching	MC-ICP-MS	p	1.2E-01		1.1E-01		4.2E-01		7.0E-02	
			Con-sistent		Con-sistent		Con-sistent		Con-sistent	
ES-2, 2. Leaching	MC-ICP-MS	NUC-21-020-002-06 100 ppb	0.000711	0.000002	0.20248	0.00009	0.00168	0.00001	99.7951	0.0001
ES-4, 2. Leaching	MC-ICP-MS	NUC-21-020-004-06 100 ppb	0.001670	0.000003	0.30162	0.00012	0.01049	0.00007	99.6862	0.0001
ES-2, 2. Leaching	MC-ICP-MS	Zeta-Scores	561.8		1344.1		248.9		–1327.9	
ES-4, 2. Leaching	MC-ICP-MS	p	0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00		0.0E+00	
			Incon-sistent with High Con-fidence		Incon-sistent with High Con-fidence		Incon-sistent with High Con-fidence		Incon-sistent with High Con-fidence	
ES-3	MC-ICP-MS	NUC-21-020-003-05 1 100 ppb	0.001672	0.000003	0.30163	0.00010	0.01053	0.00006	99.68616	0.00012
ES-4, 2. Leaching	MC-ICP-MS	NUC-21-020-004-06 100 ppb	0.001670	0.000003	0.30162	0.00012	0.01049	0.00007	99.6862	0.0001
ES-3	MC-ICP-MS	Zeta-Scores	–0.9		–0.1		–0.8		0.5	
ES-4, 2. Leaching	MC-ICP-MS	p	3.8E-01		9.4E-01		4.1E-01		6.1E-01	
			Con-sistent		Con-sistent		Con-sistent		Con-sistent	

Tab. 4: Beispiel einer Aussage nach GDF

Auswertung der Ergebnisse

Nach Abschluss der laboranalytischen Untersuchungen wurden der durch etliche Verfahren und Kombinationen von Prüfgrößen (REM-EDX, optischer Mikroskopie, Röntgenfluoreszenz, physikalischen Eigenschaften, Oberflächenanalysen, Totalaufschlüssen, radiochemischen Trennungen, Isotopenverhältnisanalysen, Totalgehalten stabiler Elemente und Spuren, Fotometrie, Ionenchromatografie, Altersbestimmung, Aktivitätskonzentrationen U-, Np-, Pu-, Am-Isotope, ...) erzeugte Datensatz und Antworten auf die von der Ermittlungsbehörde gestellten Fragen an die Übungsleitung übermittelt.

Aktivitätskonzentrationen U-, Np-, Pu-, Am-Isotope

Im späteren Verlauf hat die Übungsleitung des CMX-7 die Daten aller 25 teilnehmenden Labore ausgewertet und anschließend zur Auswertung eingeladen. Dabei ging es primär darum, die Lösungswege einer solchen Aufgabe zu vergleichen und den Laboren die Möglichkeit zu geben, von der Nuklearforensik-Gemeinschaft zu lernen.

Fazit und zukünftige Planung

Für das Labor Spiez sind solche Versuche wichtig, um als Speziallaboratorium des Bundes in der Schweiz für einen solchen Fall vorbereitet zu sein. Die Erkenntnisse aus der CMX-Serie sind auch für die Weiterentwicklung der Radioanalytik in anderen Gebieten von Bedeutung, da bspw. auch für die Umweltradioaktivität ähnliche Instrumente und Verfahren angewandt werden.

Ein weiteres wichtiges Gebiet, das das Labor Spiez verstärken will, ist die ortsaufgelöste, zerstörungsfreie Analyse.

In der nuklearen Forensik sind häufig Schlüsselinformationen in Partikel vorhanden, die sich auf dem eigentlichen Probenmaterial befinden. Dazu plant das Labor Spiez neben der bereits vorhandenen Rasterelektronen-Mikroskopie mit Elementinformationen auch die Beschaffung eines Systems zur ortsaufgelösten nuklidspezifischen Analytik mittels Laserablation gekoppelt mit einem ICP-Massenspektrometer.

Eine weitere wichtige Funktion für die nukleare Forensik hat die anorganische Analytik inne, indem sie wichtige Informationen über die stabilen Elemente und Isotope zum Vergleich mit GDF liefert und damit Aussagen und Hypothesen überprüfen kann. Zum Beispiel lässt sich die Vermutung aus der 24-h-Phase, dass ES-2 nicht nur aus Uran besteht, via dem Vanadium-Nachweis und der Quantifizierung mittels massenspektrometrischer Analyse stützen. Die Ionenchromatografie sowie die Fotometrie liefern zudem wichtige Daten zur Charakterisierung einer Substanz und stützen Vermutungen, die zuvor nur auf gravimetrischen Daten und stöchiometrischen Überlegungen basierten.

Forschungspartnerschaft mit dem Paul Scherrer Institut

Seit 2022 hat das Labor Spiez zudem den Bereich der nuklearen Forensik verstärkt, indem es mit dem Paul Scherrer Institut, Laboratory of Radiochemistry (LRC) eine langfristige Forschungspartnerschaft im Rahmen einer Doktorarbeit eingegangen ist. Damit trägt das Labor Spiez auch dazu bei, dem Mangel an Radiochemie-Fachleuten in der Schweiz entgegenzuwirken.

Weitere Links:

- Weissbuch Radiochemie Schweiz (scnat.ch)
- Radiochemistry at ETH Zurich | LRC | Paul Scherrer Institut (PSI)
- CHIMIA: Radiochemistry in Switzerland | LRC | Paul Scherrer Institut (PSI)

Marc Stauffer ❑

Die Fachbeiträge zum Schwerpunktthema in SSP 1/1995:

„Nuklear-Kriminalität: Wie gefährlich ist vagabundierendes Plutonium?“

- Handel mit Kernbrennstoffen
- Nuklearkriminalität in der BRD: Erfahrungen und Konsequenzen
- Konzepte und Maßnahmen zur Gefahrenabwehr
- Messtechnische Methoden und Einrichtungen bei der Abwehr von Nuklearkriminalität
- Plutonium: Herkunft und Zusammensetzung
- Wie gefährlich ist Plutonium?
- Möglichkeiten und Maßnahmen
- Nuklearkriminalität – eine Bedrohung?
- Nuklearer Fingerabdruck von Kernbrennstoffen