

# Ein Fall für die nukleare Forensik

Woher stammt die Wolke aus Ruthenium-106, die sich im Oktober 2017 über Europa ausbreitete?

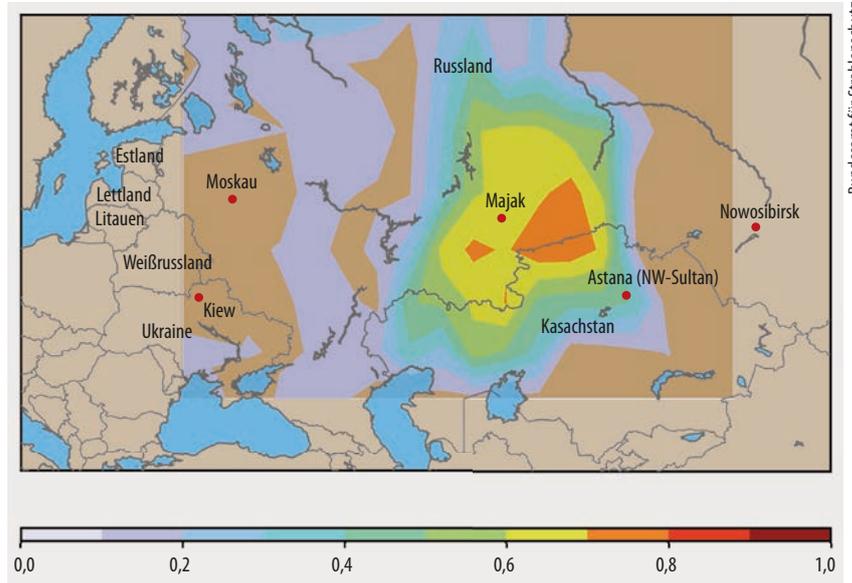
Matthias Zähringer

Die Detektion von Spuren anthropogener Radionuklide, genauer gesagt Spalt- oder Aktivierungsprodukte, in der Atmosphäre ist keine Seltenheit. Im Rahmen ihrer Umweltüberwachungsprogramme nutzen die meisten europäischen Staaten Spurenanalysen atmosphärischer Luftproben, deren Nachweisgrenze unter einem Mikrobecquerel pro Kubikmeter ( $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ ) liegt. Im globalen Maßstab betreibt die Organisation des Vertrags über das umfassende Verbot von Nuklearversuchen (CTBTO) ein weltweites Messnetz mit zurzeit siebzig Stationen, um Spuren radioaktiver Spaltprodukte nachzuweisen.<sup>#)</sup>

Am 2. Oktober 2017 registrierten italienische Radiochemiker Spuren des radioaktiven Isotops  $^{106}\text{Ru}$  in Luftproben, die aus Mailand und Bergamo stammten. Beim Zerfall von  $^{106}\text{Ru}$  mit einer Halbwertszeit von 372 Tagen entstehen Beta- und Gamma-Strahlung. Die gemessene Konzentration von  $3 \text{ mBq}/\text{m}^3$  ist für die Gesundheit unbedenklich. Dennoch könnte es sich um einen meldepflichtigen Vorgang handeln. Ein internationales Team von Wissenschaftlern versucht daher zu klären, woher das  $^{106}\text{Ru}$  stammt [1].

In den Tagen nach dem ersten Nachweis von  $^{106}\text{Ru}$  trat das Isotop auch in Mittel- und Südosteuropa sowie in Skandinavien auf. Der höchste in Deutschland gemessene Wert betrug  $4,9 \text{ mBq}/\text{m}^3$  an der Messstation des Deutschen Wetterdienstes in Görlitz. Weil stets mit  $^{106}\text{Ru}$  nur ein einzelnes Radionuklid gemessen wurde, konnte es sich bei der Quelle nicht um einen Reaktorunfall handeln, denn die Brennelemente aus Kernreaktoren enthalten ein sehr charakteristisches Gemisch aus Spaltprodukten. Allerdings lässt sich bei der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente  $^{106}\text{Ru}$  für industrielle und medizi-

#) [www.ctbto.org](http://www.ctbto.org)



**Abb. 1** Adjungierte Ausbreitungsrechnungen ergeben ein Maß für die Wahrscheinlichkeit (Farbskala), ob die Emission des Isotops  $^{106}\text{Ru}$  in einem bestimmten Gebiet erfolgte.

nische Anwendungen abtrennen und in chemisch reiner Form weiterverarbeiten – ein erster Hinweis auf eine mögliche Quelle.

Im nächsten Schritt galt es, die Herkunft der kontaminierten Luftmassen durch atmosphärische Rückwärtsmodellierungen zu klären. Im einfachsten Fall zeichnet man dazu eine Kurve vom Probenahmeort entlang der invertierten Windvektoren, die sich aus globalen Wettermodellen ergeben. Rechnerisch aufwändiger ist es, aus der Gesamtheit aller Daten mit Hilfe adjungierter Ausbreitungsrechnungen für jeden potenziellen Freisetzungsort im Einzugsgebiet der Proben ein Wahrscheinlichkeitsmaß zu berechnen [2 – 4]. Dieses erhält man aus der Korrelation der gemessenen Aktivitätskonzentrationen mit den für einen variablen Freisetzungsort modellierten Werten. Mehrere Institutionen haben solche Rechnungen durchgeführt, auch das deutsche Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Jedes neu eingehende Messresultat verdichtete das Bild, dass die Emission wahrscheinlich aus einem Gebiet um den

Südrural stammt (**Abb. 1**). In dieser Gegend befindet sich die russische Nuklearanlage Majak, eine grundsätzlich plausible Quelle für eine Freisetzung von  $^{106}\text{Ru}$ . Die Anlage entstand in den 1950er-Jahren für die sowjetische atomare Aufrüstung. Dort ereignete sich am 29. September 1957 ein folgenschwerer Unfall, der über 10 000 Menschen zur Umsiedlung zwang und der nach Tschernobyl und Fukushima als die dritt schwerste nukleare Katastrophe der Geschichte gilt.

Unfälle in nuklearen Anlagen, insbesondere wenn sie sich über Landesgrenzen hinweg strahlenschutzfachlich auswirken, sind an die Internationale Atomenergieagentur (IAEA) zu melden. Auf deren Nachfragen am 3. Oktober 2017 meldete aber kein Mitgliedsstaat einen Unfall, auch nicht die Russische Föderation. Ein Unfall in der Anlage in Majak wurde sogar explizit ausgeschlossen. Allerdings rief die Russische Akademie der Wissenschaften eine internationale Untersuchungskommission mit Experten aus Deutschland, Frankreich, Finnland, Schweden und Norwegen ins Leben,

um die Herkunft des radioaktiven Materials zu klären. Die Kommission tagte zweimal, brachte aber nur einen geringen Erkenntnisgewinn.

Die Analyse der atmosphärischen Ausbreitung liefert neben der Herkunftsregion auch eine grobe Abschätzung der insgesamt freigesetzten Radioaktivität. Obwohl die in Europa gemessenen Konzentrationen relativ gering waren, ergibt sich für die ursprüngliche Freisetzung eine Aktivität von mindestens 100 TBq. Das entspricht etwa 0,01 Prozent des Inventars von  $^{106}\text{Ru}$  im Reaktor eines Kernkraftwerks. Damit war klar, dass eine Strahlenquelle aus der Strahlentherapie nicht Ursache des freigesetzten  $^{106}\text{Ru}$  war. Die Aktivität solcher Quellen ist um mindestens sechs Größenordnungen geringer.

Um zu klären, was vor dem 2. Oktober 2017 wirklich passiert ist, liefern Indizien eine mögliche und plausible Erklärung. Das Neutrinoexperiment SOX-Borexino, das Neutrinooszillationen auf kurzer Wegstrecke im Untergrundlabor Gran Sasso in Italien untersuchen soll, benötigt eine große Menge von  $^{144}\text{Ce}$  als Antineutrinoquelle. Eine solche Quelle bietet nur die Wiederaufarbeitungsanlage in Majak an. Diese hatte die Lieferung zugesagt, trat aber im November 2017 vom Vertrag zurück. Daher gab es schon 2018 Spekulationen über einen Zusammenhang mit dem Nachweis des  $^{106}\text{Ru}$  [5, 6]. Die Antineutrinoquelle sollte besonders rein und von hoher spezifischer Aktivität sein, also eine möglichst geringe Menge stabilen Cers enthalten. Darum muss man von den etablierten Aufarbeitungsverfahren abweichen. Normalerweise klingen die Brennelemente fünf bis zehn Jahre lang ab, um Probleme im Umgang mit der Zerfallswärme und der immer noch sehr hohen Restaktivität zu vermeiden. Das ist aber für ein eher kurzlebiges Isotop wie  $^{144}\text{Ce}$  ( $T_{1/2} = 285$  Tage) nicht zielführend. Die Quelle des  $^{106}\text{Ru}$  könnte ein Unfall bei der Aufarbeitung von besonders jungen und aktiven Brennelementen sein. Dazu passt der Nachweis einer kleinen, aber messbaren Beimengung von  $^{103}\text{Ru}$  ( $T_{1/2} = 39$  Tage) in den Filterproben mit  $^{106}\text{Ru}$ . Demnach stammt das freigesetzte Material aus

einer Aufarbeitung, die weniger als zwei Jahre nach Entnahme der Probe aus einem Reaktor stattfand. Eine Wiederaufarbeitung erklärt auch die chemische Reinheit des Rutheniums: Bei der chemischen Abtrennung fällt auch die sehr reaktive und flüchtige Verbindung  $\text{RuO}_4$  an. Eine andere aktuelle Publikation erhärtet den Verdacht eines Unfalls während der Wiederaufarbeitung [7]. Ein Vergleich der Ausbreitungsmodellierungen mit Bodenmessungen im Raum Majak lässt darauf schließen, dass im Lauf von sieben Tagen eine Aktivität von 40 TBq pro Tag freigesetzt wurde.

Chemische Analysen der Filter, die  $^{106}\text{Ru}$  enthielten, zeigten, dass das Ruthenium nicht oder nicht ausschließlich in seiner flüchtigsten Form freigesetzt wurde [1]. Neben  $\text{RuO}_4$ , das bereits bei 40 °C verdampft, waren auch andere chemische Verbindungen nachweisbar. Die Freisetzung könnte demnach bei höheren Temperaturen erfolgt sein als bisher angenommen, beispielsweise als Folge eines Brands oder einer Explosion.

Eine Freisetzung von mehr als 100 TBq  $^{106}\text{Ru}$  wäre ein schwerwiegender Unfall, der als Stufe 5 „Ernster Unfall – Accident with wider consequences“ auf der siebenstufigen Internationalen Bewertungsskala für nukleare und radiologische Ereignisse einzustufen ist. Zu dieser Kategorie gehören auch die Unfälle in Wind-

scale/Sellafield 1957 und Harrisburg/Three Mile Island 1979. Beim vorliegenden Fall haben die internationalen Meldeverpflichtungen nicht gegriffen – auch weil die Mitgliedstaaten aktiv die Fälle melden müssen und die Kriterien dafür nicht klar genug definiert sind. Der Nuklearkomplex in Majak unterliegt heute noch teilweise der Geheimhaltung und einer restriktiven Zugangsbeschränkung. Solange keine weiteren Informationen vorliegen, beispielsweise aus einer flächendeckenden Suche nach dem Maximum der Kontamination des Bodens mit  $^{106}\text{Ru}$  im Verdachtsgebiet, muss offen bleiben, wo und was genau Ende September 2017 passiert ist.

- [1] O. Masson et al., PNAS **116**, 16750 (2019)
- [2] A. Baklanov et al., Atmospheric Pollution Research **2**, 400 (2011)
- [3] M. Hutchinson et al., Information Fusion **36**, 130 (2017)
- [4] J. H. Sørensen, Journal of Environmental Radioactivity **189**, 221 (2018)
- [5] Report on the IRSN's investigations following the widespread detection of  $^{106}\text{Ru}$  in Europe early October 2017, Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), 2018 (<https://bit.ly/2ZBskM8>)
- [6] E. Cartledge, Science **359**, 729 (2018)
- [7] V. Shershakov und R. Borodin, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. **487**, 012002 (2019)

## Autor

**Dr. Matthias Zähringer**, Bundesamt für Strahlenschutz, Rosastr. 9, 79098 Freiburg

## Kurzgefasst

### Papyrus im Röntgenlicht

Mit der Synchrotronstrahlungsquelle BESSY II ist es einem interdisziplinären Forscherteam gelungen, einen vor 100 Jahren ausgegrabenen Papyrus zu analysieren. Das brillante Röntgenlicht erlaubte einen Blick ins Innere des empfindlichen Artefakts, ohne es aufzurollen. Die Zusammensetzung der Tinte ermittelten die Forscher mit Hilfe der Röntgenfluoreszenz, geschriebene Zeichen im Inneren der Rolle machten sie mit einer Röntgen-Radiographie sichtbar. An einer leeren Stelle gelang es, Blei-Carboxylat nachzuweisen, ein Abbauprodukt von leuchtend-rottem Blei-Mennige.

T. Arlt et al., J. Cult. Her. **39**, 13 (2019) und H.-E. Mahnke et al., J. Cult. Her. (2019), DOI: 10.1016/j.culher.2019.07.007

### Verschränkt über 50 Kilometer

Physiker der U Innsbruck konnten erstmals ein Photon durch ein 50 km langes Glasfaserkabel schicken, dessen Quantenzustand mit dem eines Kalziumions verschränkt war. Das Teilchen befand sich in einer Ionenfalle und emittierte nach einer gezielten Anregung das Photon. Die Information über den Quantenzustand des Ions steckte in der Polarisation des Photons. Für den Transport mussten die Physiker die Wellenlänge des Photons mit einem nichtlinearen Kristall von 854 auf 1550 nm verschieben. Die Rekordstrecke von 50 km ist zwei Größenordnungen länger als zuvor und macht regionale Quantennetze möglich.

V. Krutyanskiy et al., npj Quantum Information **5**, 72 (2019)