

# Weissbuch Radiochemie Schweiz

Chemie radioaktiver Substanzen zum Nutzen der Gesellschaft:  
Ein interdisziplinäres Forschungsgebiet mit Zukunft



## IMPRESSUM

### Herausgeberin und Kontakt

Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT) • Plattform Chemie  
Haus der Akademien • Laupenstrasse 7 • Postfach • 3001 Bern • Schweiz  
+41 31 306 93 30 • chemistry@scnat.ch • chem.scnat.ch

### Zitiervorschlag

Alberto R, Burger M, Gäggeler H (2020)  
Weissbuch Radiochemie Schweiz. Swiss Academies Reports 15 (4).

### Autoren

Prof. Dr. Roger Alberto, Universität Zürich • Dr. Mario Burger, Labor Spiez  
Prof. em. Dr. Heinz Gäggeler, Universität Bern / Paul Scherrer Institut

### Beitragende

Prof. Dr. Sergey Churakov, Universität Bern / Paul Scherrer Institut • Dr. Robert Eichler, Paul Scherrer Institut  
Dr. Pascal Froidevaux, CHUV Lausanne • PD Dr. Cristina Müller, Paul Scherrer Institut • Prof. Dr. Roger Schibli, Paul Scherrer Institut / ETH Zürich • Dr. Dorothea Schumann, Paul Scherrer Institut • Dr. Marietta Straub, CHUV Lausanne  
Prof. Dr. Sönke Szidat, Universität Bern • Prof. Dr. Andreas Türler, Universität Bern • Dr. Nicholas P. van der Meulen, Paul Scherrer Institut

### Lektorat

Adrian Heuss (advocacy) • Dr. Leo Merz (SCNAT)

### Auftraggeber

Präsidium der Plattform Chemie  
Prof. Dr. Christophe Copéret, ETH Zürich • Prof. Dr. Christian Bochet, Universität Freiburg • Prof. Dr. Thomas Bürgi, Universität Genf • Prof. Dr. Catherine Housecroft, Universität Basel • Dr. Klemens Koch, PH Bern  
Prof. Dr. Laura Nyström, ETH Zürich • Prof. Dr. Shana Sturla, ETH Zürich • Prof. Dr. Oliver Wenger, Universität Basel

### Layout

Sandra Schwab, Bern

### Titelfoto

Roger Schibli

Dieser Bericht kann gratis bei der Plattform Chemie bezogen (solange vorrätig)  
oder unter [chem.scnat.ch/Radiochemie](http://chem.scnat.ch/Radiochemie) heruntergeladen werden.

1. Auflage, 2020

ISSN (print): 2297-1564  
ISSN (online): 2297-1572

DOI: 10.5281/zenodo.4147524

Das vorliegende Weissbuch richtet sich an wissenschaftspolitische Gremien wie das Staatssekretariat für Bildung, Forschung und Innovation (SBFI), den Schweizerischen Nationalfonds (SNF), swissuniversities und den ETH-Rat, sowie die Direktorien von Chemieinstituten resp. Departementen und naturwissenschaftlichen Fakultäten an schweizerischen Hochschulen. Einen detaillierteren Überblick für Fachpersonen wird die geplante Ausgabe 12/2020 zu «Radio- und Nuklearchemie» des Fachjournals *Chimia* bieten ([www.chimia.ch](http://www.chimia.ch)).



# **Weissbuch Radiochemie Schweiz**

**Chemie radioaktiver Substanzen zum Nutzen der Gesellschaft:  
Ein interdisziplinäres Forschungsgebiet mit Zukunft**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	3
<b>Zusammenfassung</b> .....	4
<b>Radiochemieausbildung in der Schweiz: Vom Ist- zum Soll-Zustand</b> .....	7
Ist-Zustand: Radiochemie in der Schweiz vor ungewisser Zukunft.....	8
Soll-Zustand: Spitzenforschung erhalten, künftigen Bedarf an Fachkräften abdecken.....	9
Optionen, um den Soll-Zustand zu erreichen.....	10
<b>Radiochemische Forschung in der Schweiz</b> .....	13
Geschichte der Radiochemie in der Schweiz.....	14
Laufende radiochemische Forschungsaktivitäten in der Schweiz.....	15
<b>Radiochemische Grundlagenforschung mit schwersten Elementen des Periodensystems</b> .....	16
<b>Radioanalytik</b> .....	18
Radioanalytik in den Ämtern der Eidgenossenschaft (Bund).....	18
Radioanalytik am Paul Scherrer Institut (PSI).....	22
Radiochemische Analysen, Radioökologie und Langzeitüberwachungen der Umwelt (GRE) des Instituts de Radiophysique (IRA).....	24
Radioanalytik mittels Beschleunigermassenspektrometrie.....	25
<b>Radiopharmazie</b> .....	26
Konzepte der Radiopharmazeutischen Forschung.....	26
Produktion und Anwendungen von Radionukliden in der Nuklearmedizin.....	28
Koordinationschemische und organometallische Grundlagenforschung mit Radionukliden.....	28
Radiopharmazeutische Forschung.....	30
Weitere ausgewählte Beispiele radiopharmazeutischer Forschung am PSI.....	32
Radioanalytische Analysen im Bereich der Radiopharmazie und Radiotoxikologie (GCR) am Institut de Radiophysique (IRA).....	33
Aufnahme von radioaktiven Stoffen: Radiotoxikologie.....	33
<b>Forschung zur sicheren Entsorgung von Radionukliden</b> .....	34
Geologische Tiefenlagerung.....	34
Tiefenlager Radiochemie.....	35
Kompetenzzentren in der Schweiz.....	35
<b>Hauptautoren</b> .....	36
<b>Weitere Autorinnen und Autoren</b> .....	37
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	39

## Vorwort

Seit ihrer Entdeckung verursachen radioaktive Elemente (Radioelemente), ob natürliche oder synthetische, eine ständige Debatte über «Nukleares» in unserer Gesellschaft. Die Radiochemie, das Teilgebiet der Chemie, das sich mit der Analyse und Anwendung dieser radioaktiven Elemente beschäftigt, hat in der Schweiz starke und international anerkannte Kompetenzen entwickelt. Bundesrat und Parlament haben zwar entschieden, langfristig aus der Kernenergie auszusteigen und die Kernenergie nicht im Rahmen des Energiewandels zu nutzen. Nichtsdestotrotz befinden wir uns in einem nuklearen Zeitalter. Die instabilen, radioaktiven Elemente zeigen durch ihre Radioaktivität sowohl schädliche Eigenschaften für Mensch und Umwelt, aber auch zahllose Möglichkeiten, bildgebende Verfahren und medizinische Behandlungen zu entwickeln, die unsere Gesundheit verbessern. Es ist daher unerlässlich, dass die Schweiz auch in Zukunft starke Kompetenzen in der Radiochemie sowohl in der Lehre als auch in der Forschung besitzt und zielorientiert weiterentwickelt.

Der vorliegende Bericht gibt einen Überblick über die bestehende Expertise in der Schweiz auf diesem Gebiet. Er zeigt die Stärken auf, etwa auf dem Gebiet der Entwicklung von Analyseverfahren zur Detektion und Überwachung von Radioelementen in der Umwelt, der Synthese und Trennung neuer Radioelemente im Rahmen der Grundlagenforschung, aber auch für angewandte Zwecke wie beispielsweise diagnostische und therapeutische Medizin. Der Bericht weist weiter auf zukünftige Herausforderungen hin, insbesondere auf die Tatsache, dass wir auch in Zukunft radiochemische Kompetenzen benötigen, um die gesellschaftlichen Herausforderungen zu bewältigen, sei es im Bereich der Energie, der Umwelt oder der Gesundheit.

*Christophe Copéret*  
*Präsident der Plattform Chemie/ETH Zürich*

## Zusammenfassung

Radiochemie ist ein Spezialgebiet der Chemie, das sich mit den Grundlagen und den Anwendungen radioaktiver Nuklide, sowie deren chemischen Verbindungen befasst. Isotope sind Atome eines Elements gleicher Protonenzahl, aber mit unterschiedlicher Neutronenzahl im Atomkern. Rund ein Drittel der momentan 118 bekannten Elemente kommen ausschliesslich in Form radioaktiver Isotope vor und alle in der Natur vorkommenden stabilen Elemente besitzen auch radioaktive Isotope. Aufgabe der Radiochemie ist es, derartige Isotope zu produzieren, ihr chemisches Verhalten zu verstehen und sie auch analytisch in geringsten Mengen nachzuweisen. Ein Beispiel aktueller radiochemischer Spitzenforschung ist das Studium sogenannter superschwerer Elemente, bei denen relativistische Effekte zunehmend die Grundregeln des Periodensystems beeinflussen.

Die Radiochemie ist aber auch Basis für zahlreiche Anwendungen von radioaktiven Isotopen. Hier sind einerseits Themen mit Bezug zur Nuklearenergie zu nennen, insbesondere unumgängliche Aufgaben nach Schliessung der schweizerischen Kernkraftwerke wie Rückbau und Entsorgung radioaktiver Abfälle. Andererseits gewinnen Themen wie die Herstellung, Abtrennung, Verwendung und Entsorgung radioaktiver Nuklide für die Radiopharmazie, Nuklearmedizin und die Industrie massiv an Bedeutung. Radioaktive Isotope spielen in den Umweltwissenschaften, insbesondere in der Klimaforschung eine nicht sofort offensichtliche, aber entscheidende Rolle. Andererseits ist für die Einhaltung der Strahlenschutzverordnung (StSV) zum Schutz der schweizerischen Bevölkerung eine durchgehende Kontrolle der radioaktiven Isotope in der Umwelt notwendig – auch dazu braucht es entsprechende Expertise.

Das Arbeiten mit radioaktiven Substanzen bedarf spezieller Sicherheitsanforderungen, um die Dosis gering zu halten. Entsprechend sieht die Strahlenschutzverordnung verschiedene Typen von Laboren vor, die es erlauben, mit Proben unterschiedlichster Aktivitäten zu arbeiten. Solche Labore sind an verschiedenen schweizerischen Universitäten etabliert, insbesondere am Paul Scherrer Institut (PSI), das zum ETH-Bereich gehört. Das PSI beherbergt eine breite Infrastruktur dieser Art und bietet mit dem so-

genannten Hotlabor die schweizweit einzige Einrichtung, in der hochradioaktive Proben wie bestrahlte Brennstäbe von Kernkraftwerken in «heissen Zellen» mit Manipulatoren untersucht werden können. Das PSI ist auch das einzige Institut der Schweiz, das eine Vielzahl von Beschleunigern betreibt, mit denen radioaktive Nuklide hergestellt werden können. Daher ist das PSI zentral für die Radiochemie in der Schweiz. Verschiedene andere Institute betreiben kleinere Beschleuniger, meist Zyklotrone, mit denen Radionuklide für nuklearmedizinische und radiopharmazeutische Zwecke produziert werden können.

Radiochemieausbildungen werden momentan an verschiedenen Hochschulen angeboten. Gut abgedeckt ist die Ausbildung in Radiopharmazie (ETHZ, Universitäten Bern, Basel, Zürich und Lausanne). Spezifische Ausbildungsblöcke, meist auf Masterniveau, bieten die Universität Zürich (hauptsächlich Grundlagenchemie mit Radionukliden wie Technetium) sowie die Universität Bern (Entsorgung, Umwelt, Eigenschaften exotischer Elemente, Radiopharmazie). Allerdings sind etliche dieser Studiengänge nach Emeritierungen nicht mehr gesichert.

Damit akzentuiert sich ein Problem, das sich seit längerem abzeichnet: Die Ausbildung einer ausreichenden Anzahl an Fachleuten in Radiochemie in der Schweiz ist nicht sichergestellt, der Bedarf an entsprechenden Fachleuten kann in Zukunft nicht mehr durch eigene Ausbildung abgedeckt werden. Dazu kommt, dass etliche der momentan laufenden radiochemischen Tätigkeiten der Schweiz durch Fachpersonen im fortgeschrittenen Berufsleben geleitet werden. Es stellt sich deshalb die Frage, wer diese Fachpersonen kurz- resp. mittelfristig ersetzen soll. Da sich in Nachbarländern eine ähnliche Situation abzeichnet, könnte es schwierig werden, auf ausländische Studienabgängerinnen und -abgänger zurückzugreifen. Ausserdem darf z. B. das zum VBS gehörende Labor Spiez nur eingeschränkt ausländische Spezialistinnen bzw. Spezialisten rekrutieren.

Das Problem wird dadurch verschärft, dass eine nationale Sicht dazu fehlt. Die verschiedenen Hochschulen und Fachinstitutionen sind in Bezug auf die Ausbildung untereinander wenig koordiniert. Eine kritische minimale Grösse

kann aber nur mit genügend Lehrstühlen und Kooperationen erreicht werden.

Diese sich abzeichnende Lücke, die daraus entstehenden Konsequenzen und wie ihnen begegnet werden könnte, sind Gründe für das vorliegende Weissbuch. Der Bericht fokussiert einerseits auf den künftigen Bedarf an ausgebildeten Spezialistinnen und Spezialisten, andererseits auf verschiedene Optionen, wo diese in Zukunft ausgebildet werden könnten. Der Bericht dient somit auch der Evaluation von Radiochemieprofessuren an schweizerischen Universitäten resp. den beiden ETHs.

Im ersten Teil des Berichts werden vier Optionen dargestellt: Es handelt sich dabei um Kooperationsmöglichkeiten des PSI mit vier verschiedenen Schweizer Hochschulen. Zudem wird darauf hingewiesen, dass auch ein übergeordnetes, nationales oder internationales Ausbildungscurriculum wünschenswert wäre.

In einem zweiten Teil des Berichts werden die momentan laufenden Forschungsprojekte in Radiochemie und angewandter Radiochemie zusammengefasst, um aufzuzeigen, dass nebst der Grundlagenforschung ein reichhaltiges Anwendungsspektrum existiert.





## Radiochemieausbildung in der Schweiz: Vom Ist- zum Soll-Zustand

In diesem Kapitel wird der Ist-Zustand im Bereich der Radiochemieausbildung in der Schweiz analysiert. Dies mit Blick auf die bestehenden Angebote und Kompetenzen an den verschiedenen Universitäten in der Deutschschweiz und der Romandie, auf ETHZ und EPFL sowie mit einem besonderen Fokus auf das PSI.

Weiter geht es darum, den künftigen Bedarf an Spezialistinnen und Spezialisten in diesem wichtigen Forschungsgebiet zu erörtern, um auch in Zukunft in Forschung wie auch in der Anwendung an der Spitze bleiben zu können. Am Schluss werden verschiedene Optionen vorgestellt, wie die Ausbildung auf dem Gebiet der Radiochemie in Zukunft aussehen könnte.

## Ist-Zustand: Radiochemie in der Schweiz vor ungewisser Zukunft

### *Das Paul Scherrer Institut als Knotenpunkt für die Radiochemie Schweiz*

Das Paul Scherrer Institut (PSI) mit heute nahezu 2000 Mitarbeitenden baut und betreibt Grossforschungsanlagen zum Nutzen der wissenschaftlichen Forschung der schweizerischen, aber auch der internationalen Forschungsgemeinde. In diesem Sinne ist das PSI ein User Lab. Die zurzeit betriebenen Grossanlagen umfassen:

- 600 MeV Protonenbeschleuniger mit weltweit höchsten Strahlintensitäten
- durch Protonenbeschleuniger betriebene Spallationsquelle SINQ für die Produktion von Neutronenstrahlen
- durch den Protonenbeschleuniger betriebene, weltweit stärkste Myonenquelle und einer Quelle von ultrakalten Neutronen UCN
- dedizierter 240 MeV Protonenbeschleuniger für die nuklearmedizinische Strahlentherapie
- Synchrotronstrahlenquelle SLS der dritten Generation
- Free Electron Laser SWISSFEL
- 70 MeV Injektorzyklotron II (für den 600 MeV Protonenbeschleuniger) für die Produktion von Radionukliden
- Hotlabor für Arbeiten mit hochradioaktiven Proben (z.B. Brennstäbe von Kernkraftwerken)

Um für diese hervorragende Infrastruktur die Funktionalität sicherzustellen, sind grössere Aufwendungen und Verbesserungen unabdingbar. Tatsache ist, dass das Philips Zyklotron abgeschaltet wurde und für die Isotopenproduktion am Injektor II kaum Gelder investiert werden. Auch die Spallationsquelle SINQ ist üblicherweise während Monaten ausser Betrieb und ein Upgrade der SINQ wäre dringend wünschenswert. Der Bau einer neuen Beamline für diese Zwecke ist in Planung und wird womöglich in die Schweizer Forschungsinfrastruktur-Roadmap aufgenommen.

Unter der neuen PSI-Führung werden aktuell Verbesserungen in Angriff genommen.

Um den hohen wissenschaftlichen Ansprüchen eines modernen User Labs gerecht zu werden, betreibt das PSI auch interne Forschung auf den Gebieten:

- Materie und Materialien
- Mensch und Gesundheit
- Energie und Umwelt

Zudem deckt das PSI zahlreiche Dienstleistungsaufgaben der Eidgenossenschaft ab, z.B.:

- Radioanalytik für öffentliche Ämter (z.B. Überwachung der Umweltradioaktivität)
- Eichlabor für Messgeräte zur Radioaktivitätsmessung

- Ausbildungsstätte für den Umgang mit radioaktiven Proben (Strahlenschutzschule)
- Ausbildungsstätte für den Betrieb von Kernkraftwerken (Reaktorschule).

Es bildet zudem ca. 100 Lernende in verschiedenen Berufsrichtungen aus. Verschiedene Gruppierungen am PSI besitzen die Genehmigung und die dazu erforderliche Infrastruktur für die Handhabung von radioaktiven Substanzen – und zwar in allen Aktivitätsbereichen (Labore der Typen A, B, und C). Speziell zu erwähnen ist das Hotlabor, die einzige Einrichtung in der Schweiz, in der hochradioaktive Materialien wie z.B. bestrahlte Brennstäbe aus Kernkraftwerken in heissen Zellen, die mit Manipulatoren ausgestattet sind, aufgearbeitet und analysiert werden können. Einige radiopharmazeutische und nuklearmedizinische Tätigkeiten erfolgen in GMP-zertifizierten Laboren. Diese Infrastruktur zusammen mit den Grossforschungsanlagen machen das PSI zu einer wichtigen Institution für radiochemische Forschung, sowohl im Bereich Grundlagen wie auch für Anwendungen. Allerdings kann das PSI als Forschungsinstitut keine akademischen Abschlüsse wie Bachelor, Master oder Dokortitel vergeben, dies ist ausschliesslich Fachhochschulen (Bachelor und Master) sowie den Universitäten und den beiden ETHs vorbehalten.

## Ausbildungsangebote in der Deutschschweiz

An der **Universität Bern** wird eine breit ausgerichtete Radiochemieausbildung angeboten. Sie umfasst Ausbildungsblöcke sowohl auf Bachelor- wie auch auf Masterstufe. Im Masterausbildungsgang für Chemiker wird zudem ein Fokus auf Radiopharmazie gelegt (im Hinblick auf den Betrieb eines medizinischen Zyklotrons am Inselspital für die Produktion von Radionukliden für die Nuklearmedizin und für die radiopharmazeutische Forschung). Eine assoziierte Professur auf Dozentenlevel betreibt an der Universität Bern einen Beschleunigermassenspektrometer (MICADAS) zwecks Anwendung von Radiokohlenstoff in der Umweltforschung und der Überwachung der Umweltradioaktivität.

An der **Universität Zürich** bestehen eine Professur mit Spezialisierung auf Technetiumchemie sowie eine Assistenzprofessur mit Fokus auf bildgebende Verfahren, hauptsächlich mit PET-Radionukliden. Das Forschungsgebiet Technetium demonstriert eindrücklich, wie Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung zu einer erfolgreichen Anwendung (in diesem Fall in der Radiopharmazie) führen können. Angeboten wird auf der Masterstufe eine zweisemestrige Wahlpflichtvorlesung in radio- und kernchemischen Grundlagen sowie die Anwendung von Radionukliden in verschiedensten Gebieten der Naturwissenschaften. Ein radiopharmazeutisches /-chemisches

Praktikum deckt zudem Teile der experimentellen Arbeit mit Radionukliden ab.

An der ETHZ wird grosser Wert auf die Radiopharmazieausbildung gelegt. So ist beispielsweise die Radiopharmazie ein fester Bestandteil des Bachelorstudiums für angehende Pharmazeutinnen. Die ETHZ führt im Zweijahresrhythmus einen CAS-Nachdiplomstudiengang in radiopharmazeutischer Chemie/Radiopharmazie durch, zusammen mit den Universitäten Ljubljana und Leipzig ([www.radiochem.pharma.ethz.ch/](http://www.radiochem.pharma.ethz.ch/)). Dieser CAS ist von der Europäischen Gesellschaft für Nuklearmedizin ([www.eanm.org](http://www.eanm.org)) akkreditiert und qualifiziert Absolventen als Qualified Persons. Das Zertifikat ist in der Schweiz zwingend für Personen, die Radiopharmaka zur Anwendung am Menschen herstellen wollen.

### Ausbildung in der Romandie

Die IRA-GCR-Gruppe am **Universitätsspital Lausanne (CHUV)** ist in der theoretischen und praktischen Ausbildung auf dem Gebiet der ionisierenden Strahlung tätig, insbesondere in den Bereichen Strahlenschutz, Qualitätskontrolle von Radiopharmaka und Umgang mit offenen radioaktiven Quellen. Sie befasst sich mit der Ausbildung von Strahlenschutzexpertinnen und Strahlenschutzexperten, der Graduiertenausbildung sowie der Aus- und Weiterbildung von medizinischem und technischem Personal in der Nuklearmedizin.

Die IRA-GRE-Gruppe bietet einen Lehrgang «Radioaktivität in der Nahrungskette» im Rahmen des Masterstudiengangs Umwelt an der Fakultät für Umweltgeowissenschaften der Universität Genf an. Zudem unterhält die Gruppe drei Lehrmodule an der Doktorandenschule der Fakultät für Biologie und Medizin der Universität Lausanne (radiometrische Methoden in den forensischen Wissenschaften; Radioaktivität in Lebensmitteln; Radioanalyse: von der Probenahme bis zur Messung).

### Angebote im Bereich der nuklearen Entsorgung

Die Ausbildungsmöglichkeiten auf dem Gebiet der nuklearen Entsorgung sind relativ begrenzt. Zurzeit werden in der Schweiz nur einzelne Vorlesungen auf Masterstufe zum Thema Endlagerung angeboten: Im Rahmen des «Master of Science in Nuclear Engineering» (ETHZ-EPFL-PSI) wird ein Einführungskurs zum Thema Endlagerung und Brennstoffzyklus angeboten. Die Studierenden haben die Möglichkeit, an endlagerrelevanten Masterprojekten zu arbeiten. Die vergangenen Jahre zeigten allerdings, dass die Studierenden dieses Masterprogrammes über geringe radiochemische Kenntnisse verfügen.

Das Institut für Geologie an der **Universität Bern** bietet eine Mastervorlesung «Geological Disposal of Radioactive Waste» im Rahmen des Bern-Fribourg Mastermoduls «Ressourcen und Umwelt Geochemie» an. Dort werden auch Masterprojekte und Dissertationen zu endlagerrelevanten Themen angeboten und durchgeführt.

### Labore

Für die Ausbildung in Radiochemie ist die Verfügbarkeit von Radioaktivitätslaboren unerlässlich – inklusive der dazugehörigen Strahlenschutzvorkehrungen. Untenstehende Tabelle fasst die momentane Situation zusammen. Nicht aufgeführt sind die zahlreichen Radiolabore an nichtuniversitären Forschungszentren (z.B. PSI, Labor Spiez etc.). Das PSI ist der einzige Standort der Schweiz mit Laboren der Aktivitätsstufe A.

Radiochemielabore an schweizerischen Hochschulstandorten

Hochschule	Labor Typ B	Labor Typ C
UZH (Chemie)	4*	2*
UZH (Biochemie)	*	2*
ETHZ (D-CHAB)	3	3
UniBE	1	3
UniBE (Inselspitalkomplex)	3	9
CHUV&Unil	1	7
EPFL (Nuclear Engineering)	2	3

\* Im Neubau UZ-5 der Universität Zürich (Eröffnung 2021) sind 3 grosse Labore der Stufe B geplant.

### Soll-Zustand: Spitzenforschung erhalten, künftigen Bedarf an Fachkräften abdecken

Um das Curriculum einer Radiochemieausbildung kurz zu skizzieren, sei auf die Situation am Departement für Chemie und Biochemie der Universität Bern hingewiesen: Alle Chemie-, Biochemie- und Pharmaziestudierenden erhalten während der Bachelorausbildung in der Vorlesung Allgemeine Chemie eine einwöchige Einführung in Radioaktivität resp. Radiochemie. Anschliessend folgt im weiteren Bachelorausbildungsgang im Teil Physikalische Chemie eine Vorlesung über die Grundlagen der Radiochemie. Diese Vorlesung wird durch diejenigen Studierenden besucht, die sich für die Richtung Chemie und Molekulare Wissenschaften entschieden haben. Zudem ist ein Teil der Vorlesung Instrumentalanalytik den radioanalytischen Verfahren gewidmet. Ebenfalls wird ein Praktikumsversuch in Radioanalytik durchgeführt. Die Masterausbildung beinhaltet zudem in englischer Sprache die Vorlesungen Nuclear/Radiochemistry mit einer vertieften Einführung zu den Themen Nuclear Energy and Heavy Ele-

ments, Environmental Radionuclides and Nuclear Dating, sowie Introduction to Radiopharmaceutical Chemistry.

## Ausbildung

Es ist dringend notwendig, mindestens eine breit ausgerichtete, gemeinsame Professur zwischen dem PSI und einer schweizerischen Hochschule zu etablieren, gegebenenfalls mit Integration weiterer nationaler Fachinstitute. Eine derartige Zusammenarbeit erzeugt eine Win-win Situation: Die Hochschule profitiert vom Zugang zu einer Institution mit einem breiten Angebot an Beschleunigern zur Produktion von Radionukliden sowie vom Zugang zu hochspezialisierten und somit teuren Analysegeräten. Das PSI wiederum profitiert von hochmotivierten jungen Forscherinnen und Forschern, die im Rahmen ihrer Masterarbeiten und Dissertationen Einblick ins PSI erhalten. Da die Radiochemieausbildung für vielerlei Bereiche der Chemie, Biochemie, Biologie und Physik essentiell ist, bieten sich entsprechend der Spezialisierung der Labore weitere Interaktionen an (z. B. im Rahmen von Forschungsprojekten).

Eine solche «Radiochemieschule» sollte sich in der Spitzenforschung profilieren, denn es ist hinlänglich bekannt, dass nur Spitzenforschung Basis sein kann für eine kompetente und technologisch den Bedürfnissen der heutigen Zeit genügenden Ausbildung.

## Bedarf an Fachleuten

Die Gesamtzahl der gegenwärtig in der Schweiz tätigen Radiochemiespezialistinnen und -spezialisten mit akademischer Ausbildung (Master und/oder Doktorat) wird auf etwa 50-100 geschätzt. Dies beinhaltet alle in diesem Bericht aufgeführten Bereiche. Experten gehen davon aus, dass mit dem Rückbau schweizerischer Kernkraftwerke der Bedarf an zusätzlichen Radiochemikerinnen resp. Radiochemikern erheblich zunehmen wird, dies insbesondere beim Labor Spiez, beim BAG (Strahlenschutz) sowie am PSI. Zudem hat die Erfahrung gezeigt, dass zahlreiche Absolventinnen und Absolventen dank ihrer breiten chemietechnologischen und analytischen Kompetenz oft problemlos eine Stelle in einem fachfremden Gebiet finden. Die Radiochemie-Ausbildung bildet eine sehr solide naturwissenschaftliche Basis und öffnet den Absolventinnen und Absolventen viele verschiedene berufliche Wege. Dies zeigt das Beispiel CERN: Die zahlreichen Dissertationen in Teilchenphysik führen eben oft nicht zu zukünftigen beruflichen Lebensläufen in diesem Fachgebiet. Es ist die breite naturwissenschaftliche Fachkompetenz, die auf dem Arbeitsmarkt gefragt ist. Es ist daher nicht verwunderlich, dass das Interesse der Wirtschaft an Radiochemie-Fachleuten gross ist.

Zudem hat sich die Einstellung der Gesellschaft zu Radioaktivität in den letzten Jahren stark gewandelt: Heute stehen vermehrt auch die positiven Aspekte der Radioaktivität (z. B. Therapien) im Vordergrund.

## Optionen, um den Soll-Zustand zu erreichen

Der Soll-Zustand umfasst zwei wichtige Punkte: Einerseits geht es darum, den künftigen Bedarf an Radiochemie-Spezialistinnen und -Spezialisten sicherzustellen. Andererseits darf man auch den Anschluss an dieses wichtige Forschungsgebiet im Rahmen internationaler Projekte nicht verlieren. Um diesen Soll-Zustand zu erreichen, braucht es genügend Ressourcen in Lehre und Forschung. Unsere Analyse ergibt einen Bedarf von 1–2 Professuren – vorzugsweise mit einer Anbindung ans PSI.

### Option A: Gemeinsame Professur ETHZ und PSI

Am Departement Chemie und angewandte Biowissenschaften (CHAB) der ETHZ existiert bereits eine Radiopharmazieprofessur (Prof. R. Schibli), die gemeinsam mit dem PSI alimentiert ist. Mit einer Tandem-Professur in Radiochemie (Grundlagen) und Radiopharmazie (angewandte Radiochemie) würden attraktive Synergien entstehen. Allerdings existiert am CHAB der ETHZ keine Laborinfrastruktur für radiochemische Forschung (sondern nur eine Laborinfrastruktur für Radiopharmazie). Die Idee hinter diesem Modell wäre eine enge Zusammenarbeit mit dem relativ nahe gelegenen PSI. Studierende würden entsprechende Laborexperimente im Rahmen ihrer Bachelor- oder Masterausbildung in Villigen durchführen.

### Option B: Gemeinsame Professur Universität Zürich und PSI

Die Laborinfrastruktur an der Universität Zürich ist hervorragend für radiochemische Forschung geeignet. Weiter hat die UZH entschieden, die radiochemischen Laborkapazitäten auch im Neubau des Chemiegebäudes (Eröffnung 2021) einzuplanen. Die ETHZ und die Universität Zürich sind am nächsten zum PSI gelegen und bieten somit kürzeste Reisewege für Forschende.

### Option C: Gemeinsame Professur Universität Bern und PSI

In Bern existiert eine umfassende Infrastruktur mit Radiochemielaboren der Aktivitätsklassen B und C. Zudem ermöglicht eine  $^{252}\text{Cf}$ -Quelle die Durchführung radiochemischer Experimente mit kurzlebigen Spaltprodukten bis in den Halbwertszeitbereich von Sekunden unter Verwendung eines Gas-Jet-Transportsystems. Der Tandem-Massenbeschleuniger MICADAS erlaubt zudem die Analyse geringster Mengen an Radiokohlenstoff im Rahmen von Umweltforschungsprojekten. Auch am Inselspital in Bern existieren mehrere B-Labore sowie ein Protonenzyklotron zur Produktion von diversen Radionukliden mit Anwendungspotential in Radiopharmazie.

Zudem sollte das Eidgenössische Institut für Metrologie METAS in Wabern erwähnt werden, das eine Anlage zur Produktion hochenergetischer  $\gamma$ -Strahlen besitzt. Mit diesen Strahlen können photonukleare Prozesse studiert und zur Produktion von Radionukliden verwendet werden. In diesem Sinne besitzt die Universität Bern die schweizweit beste universitäre Infrastruktur zur Durchführung radiochemischer Forschung.

### Option D: Gemeinsame Professur EPFL und PSI

Die EPFL ist als Standort für eine Radiochemieprofessur gut geeignet. Dies dank ihrer starken und schweizweit gut vernetzten nukleartechnologischen Abteilung, die von Prof. A. Pautz gemeinsam mit dem Bereich Nukleare Energie und Sicherheit am PSI geleitet wird. Das Portfolio des Ausbildungsganges «Nuclear Engineering Master» (ETHZ-PSI-EPFL) könnte durch eine Verknüpfung mit einer Radiochemieprofessur an der EPFL um einen wichtigen Aspekt erweitert werden. Zudem existiert in Lausanne eine attraktive Infrastruktur mit Laboren auf dem Aktivitätslevel B, die momentan nicht genutzt wird. Ein Nachteil dieser Option ist die (Reise-)distanz zwischen EPFL und PSI.

### Nationales (eventuell international eingebundenes) Masterprogramm

Interessant wäre auch der Aufbau eines nationalen oder gar internationalen Masterprogramms. Das PSI und mehrere Schweizer Universitäten würden Ausbildungsblöcke beisteuern, vergleichbar mit dem europäischen CINCH-Programm (um Prag, Helsinki und Oslo). Das Programm würde schweizweit koordiniert, wäre aber delokalisiert. Allenfalls wäre auch eine enge Beteiligung am CINCH zu prüfen, um die Nachfrage an Schweizer Fachkräften zu befriedigen.

### Option Fachhochschule

Unseres Wissens wird Radiochemie in der Schweiz – im Gegensatz zu Deutschland – auf Fachhochschulstufe nicht angeboten. Angesichts der zahlreichen (wie in diesem Weissbuch aufgeführt) sehr anwendungsorientierten Themenbereiche der Radiochemie (z.B. Rückbau von Kernkraftwerken, Entsorgung etc.) wäre es wünschenswert, die Option einer Professur auf FH Stufe zu evaluieren.



## Radiochemische Forschung in der Schweiz

In radiochemischen Studien werden Verfahren der Chemie so adaptiert, dass sie mit radiometrischen Bestimmungsmessungen gekoppelt werden können. Wegen der radioaktiven Strahlung sind spezielle Sicherheitsmassnahmen (z.B. Strahlenschutz) notwendig.

Radiochemische Studien können oft mit nur wenigen Atomen resp. Molekülen durchgeführt werden, insbesondere bei Radionukliden mit kurzer Halbwertszeit. Wenn nötig, kann mittels radioaktiver Markierung auch mit klassischen makroskopischen Mengen gearbeitet werden. Die Markierungsisotope verhalten sich im Allgemeinen chemisch nahezu identisch wie die stabilen Isotope. Die Bilanzierung der chemischen Prozesse kann dann leicht mittels radioanalytischer Messverfahren erfolgen. Zusätzlicher Vorteil ist das Vorhandensein einer systemischen Uhr, die über den radioaktiven Zerfall und seine Halbwertszeit bestimmt ist und somit die Möglichkeit bietet, direkt chemische Reaktionsgeschwindigkeiten zu bestimmen, die in der klassischen Chemie nur schwer zugänglich sind.

Moderne radiochemische oder radiopharmazeutische Forschung wird meist an Beschleunigern oder Forschungsreaktoren mit automatisierten, computerkontrollierten Apparaten durchgeführt, nicht zuletzt auch, um die Strahlenbelastung der involvierten Personen zu minimieren. Als Beispiel sei die PET (Positronen-Emissions-Tomographie) an Spitälern erwähnt, die mit kurzlebigen Radionukliden (z.B.  $^{11}\text{C}$  mit einer Halbwertszeit von 20 min) durchgeführt wird.

Radiochemische Grundlagenforschung ist meist interdisziplinär (Chemie, Physik, Biologie). So wurden beispielsweise etliche kernphysikalische Studien mittels radiochemischer Verfahren durchgeführt, da kernphysikalische Prozesse oft mit Elementumwandlung einhergehen.

## Geschichte der Radiochemie in der Schweiz

Die Radioaktivität wurde durch Henry Becquerel im Jahre 1896 entdeckt. 1903 erhielt er zusammen mit Pierre und Marie Curie den Nobelpreis in Physik für Untersuchungen zu diesem neuen Phänomen. Historisch gesehen wurde der Begriff Radiochemie von Marie Curie eingeführt und für die Chemie der Elemente der Uran- und Thorium-Zerfallsreihen verwendet, also der Elemente zwischen Uran und Blei. Sie selbst hatte daraus Polonium und Radium abgetrennt, wofür sie 1911 den Chemienobelpreis erhielt. Radiochemie bezeichnet die Chemie radioaktiver Elemente. Weiter wird unter dem Begriff Radiochemie auch die Chemie von Radioisotopen ansonsten stabiler Elemente subsummiert.

Das berühmteste Beispiel ist wohl die Untersuchung der durch Enrico Fermi in den 1930er-Jahren postulierte Synthese von Transuranelementen beim Beschuss von Uran mit Neutronen. Dafür erhielt er 1938 den Nobelpreis für Physik. Die Radiochemiker Otto Hahn und Fritz Strassmann konnten Ende 1938 jedoch mit chemischen Methoden nachweisen, dass diese neuen Elemente nicht Transurane waren wie von Fermi behauptet, sondern Produkte aus der Kernspaltung! Die kernphysikalische Deutung erfolgte durch Lise Meitner. Mit anderen Worten: Radiochemische Analysen führten zur Entdeckung des kernphysikalischen Prozesses der Kernspaltung. Dafür erhielt Otto Hahn 1944 den Chemie Nobelpreis.

In der Schweiz wurde radiochemische und übrigens auch kernphysikalische Forschung stark angetrieben durch die «United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy» (besser bekannt als «Atoms for Peace») in Genf (1955). Dabei haben die USA am Konferenzort einen Schwimmbadreaktor aufgebaut, um zu demonstrieren, dass Nukleartechnologie auch zum Nutzen der Menschheit eingesetzt werden kann und nicht nur zum Bau von Atombomben! Dieser Forschungsreaktor wurde dann der Eidgenossenschaft geschenkt und hat als SAPHIR-Reaktor am Eidgenössischen Institut für Reaktorforschung (EIR) über viele Jahre für Forschung in Kerntechnologie, Kernphysik, Radiochemie, sowie der Neutronenstreuung (Festkörperforschung und Materialforschung) gedient. Er war von 1957 bis 1994 in Betrieb.

Geschichte des EIR resp. PSI und der dortigen Radiochemie: 1955 gründen Paul Scherrer und Walter Boveri die Reaktor AG, zwecks Bau und Betrieb eines schweizerischen Kernreaktors. Dieser Reaktor, DIORIT, wurde ab 1960 mit Natururan und Schwerwasser betrieben und war bis 1977 in Betrieb. 1956 wurde mit PD Dr. Peter Bärtschi (Isotopenspezialist der Universität Basel) ein erster Leiter einer Chemieabteilung angestellt sowie mit Dr. Peter Graf (Radiochemiker der Universität Bern) ein Verantwortlicher für den Bau und Betrieb eines Hotlabors. Nach Pensionierung von PD Dr. P. Bärtschi (1984) übernahm Dr. Heinz W. Gäggeler die Leitung der Chemieabteilung. Nach der am 1.1.1988 erfolgten Gründung des Paul Scherrer Instituts aus den vormaligen Instituten EIR (jetzt PSI Ost) und SIN (1968 gegründet als Grundlagenforschungsinstitut für Kern- und Teilchenphysik, jetzt PSI West) wurde die Abteilung umbenannt in Labor für Radiochemie. Nach Pensionierung von Prof. Dr. H. W. Gäggeler

(2009) wurden bis 2017 Prof. Dr. Andreas Türler und seither Dr. Robert Eichler Leiter dieses Labors. Zudem wurde der Bereich «Umweltforschung» des vormaligen Labors für Radio- und Umweltchemie ab 2016 als neues Labor für Umweltchemie, geleitet durch Prof. Dr. Margit Schwikowski, gegründet.

Deshalb hat der ETH-Rat (damals Schulrat) schon 1992 darauf hingewiesen, dass das PSI eine zentrale Rolle übernehmen soll auf dem Gebiet der Ausbildung sowie als nationales Kompetenzzentrum in Radiochemie und zwar durch Unterstützung einer ordentlichen Professur auf diesem Gebiet mit einer schweizerischen Hochschule. Eine solche Zusammenarbeit existierte mit der Universität Bern bis 2017. Seitdem wird die dortige Radiochemieprofessur nicht mehr vom PSI unterstützt.

Nach der bereits erwähnten «Atoms for Peace» Konferenz 1955 in Genf haben verschiedene Hochschulen begonnen, Radiochemie in ihr Ausbildungsprofil aufzunehmen (dasselbe gilt übrigens auch für Kernphysik). Allerdings haben nur die EPFL und die Universität Bern ordentliche Radiochemieprofessuren installiert (Proffs. P. Lerch und H.R. von Gunten). Zu erwähnen ist auch die Universität Zürich mit einer ordentlichen Professur in anorganischer Chemie, die sich auf Technetium-Verbindungen spezialisierte, also eigentlich ein radiochemisches Forschungsgebiet. Andere Hochschulen wie die ETHZ, die Universitäten Basel, Lausanne und Genf haben Radiochemie auf dem Dozentenlevel offeriert (PD oder Tit. Prof.). Da die EPFL 1992 die ordentliche Radiochemieprofessur nach Emeritierung von Prof. P. Lerch nicht weiterführte, wurde die Universität Bern zur einzigen Hochschule mit einer vollen Professur in Radiochemie im klassischen Sinn. Es war deshalb nachvollziehbar, dass nach dem erwähnten ETH-Ratsbeschluss von 1992 das PSI gemeinsam mit der Universität Bern die Gründung einer gemeinsamen Radiochemieeinheit beschloss. Dies beinhaltete Forschungsaktivitäten an beiden Orten, sowie freien Zugang zur PSI-Infrastruktur, insbesondere auch für Studierende und Doktorierende. Dieses Modell hat sich über viele Jahre für beide Seiten sehr bewährt. Die Universität Bern hatte Zugang zur Infrastruktur des PSI mit seinen Grossanlagen, Laboren und oft exklusiven analytischen Geräten, während das PSI davon profitierte, dass junge Studierende am PSI die Forschung massgeblich mitgestalteten. Eine Eigenheit dieser Radiochemieeinheit war die zusätzliche Ausrichtung auf Umweltforschung, meist unter Verwendung radioaktiver Nuklide in der Umwelt. Später wurde durch Prof. A. Türler Radiopharmazie als neues Forschungsthema aufgenommen. Dadurch entstand eine für das PSI grundsätzlich attraktive neue Konstellation: Eine bereits existierende gemeinsame Professur mit der ETHZ in Radiopharmazie, mit Schwerpunkt pharmazeutische Forschung, wurde erweitert durch die Kompetenz in nuklearer Radiopharmazie, also dem Teilaspekt, der sich mit der Produktion von Radionukliden befasst.

## Laufende radiochemische Forschungsaktivitäten in der Schweiz

In diesem Kapitel werden laufende radiochemische, radioanalytische und radiopharmazeutische Forschungsaktivitäten der Schweiz präsentiert. Die Beiträge wurden durch leitende Wissenschaftlerinnen resp. Wissenschaftler der ETHZ, den Universitäten Zürich, Bern und Lausanne, des Paul Scherrer Instituts sowie des Labors Spiez verfasst. Für die Inhalte zeichnen die entsprechenden Autorinnen und Autoren verantwortlich. Für einen detaillierteren Überblick über die radiochemischen Forschungsinhalte in der Schweiz verweisen wir auf die Ausgabe 12/2020 des Fachjournals *Chimia* ([www.chimia.ch](http://www.chimia.ch)).

## Radiochemische Grundlagenforschung mit schwersten Elementen des Periodensystems

Die Erforschung chemischer Eigenschaften von schwersten Elementen am Ende des Periodensystems ist ein spektakuläres und attraktives Wissenschaftsgebiet, weil relativistische Effekte zunehmend die Grundregeln des Periodensystems beeinflussen. Zudem ist nicht bekannt, wie viele Elemente das Periodensystem besitzt. Forschung auf diesem Gebiet ist sehr interdisziplinär und bedarf des Einsatzes von chemischer Hochtechnologie, gekoppelt mit modernsten Datenerfassungssystemen. Ergebnisse dieser Forschung finden üblicherweise direkten Zugang in Chemielehrbücher. Die Schweiz ist weltweit führend auf diesem Gebiet.

*Robert Eichler, Labor für Radiochemie,  
Paul Scherrer Institut*

Das multidisziplinäre Grundlagenforschungsgebiet zur chemischen Untersuchung von Transactinoiden, die häufig auch als «Superschwere Elemente» bezeichnet werden und am Ende des heute bekannten Periodensystems positioniert sind (siehe Abbildung) ist historisch ein Schwerpunktthema radiochemischer Forschung. Schweizer Radiochemikerinnen und Radiochemiker waren führend bei der erstmaligen chemischen Untersuchung von fünf superschweren Elementen (Seaborgium, Bohrium, Hassium, Copernicium und Flerovium).

Die chemische Untersuchung der superschweren Elemente ist wohl die fundamentalste Validierung der Gesetzmässigkeiten des Periodensystems. Sie trägt zum generellen Erkenntnisprozess der uns umgebenden Materie bei. Die Resultate halten deshalb Einzug in die Chemielehrbücher. Superschwere Elemente wurden bisher nicht in der Natur nachgewiesen. Deshalb müssen sie in Beschleunigerexperimenten durch Kernfusionsreaktionen künstlich hergestellt werden. Die Herausforderungen bei der Untersuchung ihrer Eigenschaften sind zum einen die niedrigen Produktionsraten von Einzelatomen pro Minute bis Einzelatomen pro Monat und zum anderen die kurzen Halbwertszeiten von Millisekunden bis Minuten, in selten Fällen bis zu einigen Stunden. Die Kenntnis von produktionsrelevanten kernphysikalischen Zusammenhängen ist für die Planung und Durchführung von Experimenten mit Transactinoiden von grosser Bedeutung. Geeignete Beschleunigersysteme stehen z.B. in Dubna (Russland), Darmstadt (Deutschland), bei RIKEN (Japan) und in Berkeley (USA) zur Verfügung. Bis 1994 existierte auch am PSI ein Beschleuniger, mit dem superschwere Elemente hergestellt werden konnten.

Experimente mit superschweren Elementen werden vorwiegend in internationalen Kollaborationen durchgeführt. Eine Herausforderung stellt dabei die Untersuchung che-

mischer Eigenschaften auf der Basis von Einzelatomen dar. Dabei werden die exotischen Elemente mehrstufigen chemischen Gleichgewichtseinstellungen unterworfen. So können Konzentrationen durch Wahrscheinlichkeiten ausgetauscht werden, das Atom in dem einen oder einem anderen chemischen Zustand zu beobachten. Chromatographische Systeme mit Gas- oder Flüssigphasen als mobile Phasen erfüllen grundsätzlich diese Anforderungen.

Mit innovativen Weiterentwicklungen dieser Methoden war es möglich, in den letzten 25 Jahren vorherige Messungen von chemischen Eigenschaften der superschweren Elemente Rf (Rutherfordium) und Db (Dubnium) zu bestätigen, zu verbessern und erstmals die Elemente Sg (Seaborgium), Bh (Bohrium), Hs (Hassium), Cn (Copernicium), Nh (Nihonium) und Fl (Flerovium) chemisch zu charakterisieren. In enger Zusammenarbeit mit dem Forschungsgebiet der theoretischen Chemie konnten die gewonnenen Ergebnisse in moderne relativistische Rechnungen einfließen und dienten als Benchmark für unser Verständnis der Auswirkung der hohen Kernladungszahlen dieser Atome auf die chemischen Eigenschaften der Elemente durch sog. relativistische Effekte. Dies führte unter anderen zu Publikationen in hochrangigen wissenschaftlichen Journalen wie Science und Nature. Unter Benützung der Grossforschungsanlagen des Paul Scherrer Instituts z.B. der SINQ Neutronenbestrahlungsanlagen und der Isotopenproduktion am Injektor II Zyklotron (70 MeV Protonen) zur Herstellung von Modellnukliden der leichteren Homologen der superschweren Elemente wurden diese Experimente intensiv vorbereitet.

An dieser Stelle sei auf die beobachtete sehr hohe Flüchtigkeit der schwersten bisher untersuchten Elemente (Cn, Nh, Fl) sowie zur thermochemischen Stabilität von flüchtigen Carbonylkomplexen von Übergangsmetallen der Gruppen 6-9 hingewiesen, zu denen die superschweren Elemente Sg, Bh, Hs und Mt gehören. Innovative gaschromatographische Systeme erlauben massive Erhöhungen der chemischen Untersuchungsgeschwindigkeiten bis in

den Sekundenbereich und eindeutige Identifizierungen von Einzelatomen durch den Nachweis ihrer spezifischen Zerfallsmuster.

Allein die Aufzählung der vielen Aspekte dieser Forschung zeigt ihr innovatives Potenzial, welches für die Ausbildung von Radiochemikern attraktiv ist. Die Ausbildungsbreite erlaubt den Absolventinnen und Absolventen, Aufgaben in verschiedensten Bereichen der industriellen Isotopenproduktion, deren chemischer Aufbereitung und Anwendung (z.B. für radiopharmazeutische Zwecke), der Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, und nicht zuletzt des Rückbaus von Kernanlagen sowie der Konzeption und Umsetzung der Endlagerung radioaktiver Abfälle zu übernehmen. Andererseits besteht auch weiterhin spannendes akademisches Forschungspotenzial, da etliche der superschweren Elemente bisher chemisch noch nicht untersucht worden sind.

**Periodensystem der Elemente**

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Ln*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	An°	Transactinoide / Superschwere Elemente														
			Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og
*Lanthanoide	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
°Actinoide	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

Abb. 1: Periodensystem mit Elementsymbolen nach IUPAC Nomenklatur. Die acht farbigen superschweren Elemente (Rf-Hs und Cn-Fl) inklusive ihrer Gruppenvertreter sind bisher chemisch untersucht worden.

## Radioanalytik

Radioanalytik umfasst die quantitative Bestimmung radioaktiver Spezies, basierend auf der Verwendung radiometrischer ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -Spektrometrie) oder massenspektrometrischer Verfahren. Dabei steht zunehmend nicht nur die Quantifizierung des radioaktiven Isotops, sondern auch die Bestimmung der chemischen Form, in dem dieses Radionuklid vorkommt, im Vordergrund, z.B. mittels Synchrotronstrahlung (SLS am PSI).

Die Thematik Radioanalytik wird in vier Beiträgen zusammengefasst. Diese beinhalten i) die Aktivitäten an öffentlichen Institutionen der Eidgenossenschaft, ii) die umfangreichen radioanalytischen Aufgaben am Paul Scherrer Institut, iii) die hauptsächlich radioökologisch ausgerichteten Aufgaben am IRA in Lausanne, sowie, iv) die Anwendung höchstempfindlicher Beschleunigermassenspektrometrie an der Universität Bern für den Nachweis langlebiger Radionuklide.

### Radioanalytik in den Ämtern der Eidgenossenschaft (Bund)

*Mario Burger, Labor Spiez*

Radioanalytik wird auf Bundesebene in verschiedenen Instituten der Eidgenossenschaft betrieben. Sie wird angewendet in der Forschung, in der Umweltüberwachung, in der Überwachung von Kernanlagen, im Rückbau von Kernanlagen, im Umfeld der Lagerung von radioaktiven Abfällen, in der radiologischen Ereignisbewältigung, im Umfeld der Inneren Sicherheit und in der Kooperation mit internationalen Partnerinstituten und Organisationen.

Bundesseitig in der Forschung tätig sind primär spezifische Gruppen und Institute der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH Zürich), des Paul Scherrer Instituts (PSI) und des Eidgenössischen Wasserforschungsinstituts (Eawag). Angewandte Forschung in Radioanalytik wird neben dem ETH-Bereich auch im Labor Spiez des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz betrieben. Die Aktivitäten und Forschungsschwerpunkte der Stellen sind in den jeweiligen Jahresberichten publiziert.

Die Strahlenschutzverordnung (StSV) überträgt im Artikel 191 dem Bundesamt für Gesundheit (BAG) die Verantwortung für die Überwachung der ionisierenden Strahlung und der Radioaktivität in der Umwelt.

Das angewandte Überwachungsprogramm besteht aus mehreren Teilen. Ziel ist einerseits der schnelle Nachweis

jeder zusätzlichen radioaktiven Belastung künstlichen Ursprungs, die schwerwiegende Auswirkungen auf die Gesundheit der Bevölkerung haben kann (Strahlenunfall). Mit dem Überwachungsprogramm sollen andererseits auch die Referenzwerte für die Umweltradioaktivität in der Schweiz und deren Schwankungen bestimmt werden, damit die Strahlendosen für die Schweizer Bevölkerung ermittelt werden können. Diese allgemeine Überwachung umfasst auch heute noch die Messung der Kontaminationen infolge der oberirdischen Kernwaffenversuche der USA und der Sowjetunion in den 50er- und 60er-Jahren sowie des Reaktorunfalls von Tschernobyl.

Mit der Überwachung müssen sich ausserdem die effektiven Auswirkungen auf die Umwelt und die Bevölkerung in der Umgebung von Kernanlagen, Forschungszentren und Unternehmen, die radioaktive Substanzen einsetzen, feststellen lassen. Diese spezifische Überwachung der Anlagen, welche über eine streng beschränkte Bewilligung zur Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Umwelt verfügen, erfolgt in Zusammenarbeit mit den betreffenden Aufsichtsbehörden, das heisst mit dem eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) für die Kernkraftwerke und der Suva für die Industriebetriebe. Sie beginnt mit der Überwachung der Emissionen (effektive Freisetzung von radioaktiven Stoffen) dieser Unternehmen und setzt sich mit der Kontrolle der Immissionen (effektiv gemessene Konzentrationen) in der Umwelt fort. Um allen diesen Zielen nachzukommen, erstellt das BAG jährlich ein Probenahme- und Messprogramm in Zusammenarbeit mit dem ENSI, der Suva und den Kantonen. Es koordiniert dieses Überwachungsprogramm, an dem auch die Laboratorien des Bundes und verschiedene Hochschulinstitute beteiligt sind.

Im Rahmen der Überwachung von Kernanlagen betreibt das Eidgenössische Nuklear Sicherheitsinspektorat (ENSI) ein kleines Laboratorium, das hauptsächlich zerstörungsfreie Messtechnik anwendet. Weitere Überwachungen sind mit dem Umweltüberwachungsprogramm abgedeckt.

Im Rahmen des Rückbaus von Kernkraftwerken, wo demnächst das KKW Mühleberg den Rückbau beginnen wird, sind einerseits das ENSI (zerstörungsfrei) und andererseits das PSI und Labor Spiez (LS) basierend auf umfassenden radioanalytischen Methoden (radiochemisch und zerstörungsfrei) aktiv. Das LS verfügt in seiner nach ISO/EN 17025 akkreditierten Prüfstelle STS 0028 über die erforderliche Radioanalytik und entwickelt diese stetig weiter. Es bringt diese auch als Kompetenzzentrum der IAEA mit Schwergewicht im IAEA ALMERA Labornetzwerk ein und entwickelt in Zusammenarbeit mit zwei anderen Kompetenzzentren Methoden, die im Netzwerk und den beteiligten Staaten angewendet werden können und eine gute Qualität der Resultate versprechen. Das PSI deckt im Umfeld des Rückbaus von KKW mehr die Routineanalytik in Zusammenarbeit mit dem ENSI ab.

Im Umfeld der Lagerung von radioaktiven Abfällen ist für die Tiefenlagerung die NAGRA aktiv. Für das nationale Zwischenlager ZWILAG ist das PSI zuständig. Im Überwachungsprogramm zur bevorstehenden Tiefenlagerung können das PSI und LS integriert werden. Beide Institute verfügen über eine umfassende Radioanalytik.

In der radiologischen Ereignisbewältigung sind die Bundeslabore und deren operative Mittel in der Probenahme- und Messorganisation des Bundes bei erhöhter Radioaktivität (kurz MO) organisiert. Unter der Führung der Nationalen Alarmzentrale kommen diese in der Akutphase in den Einsatz. Neben Messungen vor Ort werden durch die MO Umweltproben verschiedenen Typs erhoben. Die Proben werden umfassend radioanalytisch und ereignisbezogen untersucht. Die grösste Kapazität hat das Labor Spiez, da bei radiologischen Ereignissen oder grossem Probenanfall das Armeelabor ABC Abwehr Labor 1, die A-Spezialisten dieser Formation, in die radioanalytische Bewältigung des Ereignisses integriert werden kann. Es handelt sich um eine Formation mit hoher Bereitschaft, d. h. sie steht am zweiten Tag nach Aufgebot im Labor. Rund 60 A-Spezialistinnen und Spezialisten sind an den meisten Messmitteln im Labor und den mobilen Messmitteln ausgebildet. Die meisten Milizspezialisten sind zivil aktiv im naturwissenschaftlichen Studium, an Hochschulen, kantonalen Laboratorien und der chemischen Industrie. Es werden jährlich zwei Wiederholungskurse durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Messmethoden beherrscht werden. Das LS ist als einziges Bundeslabor vorbereitet auch Lebensmittel umfassend zu analysieren. Weitere Radioanalytik für den Ereignisfall ist bundesseitig beim PSI und reduziert im BAG und der Eawag zu finden. In diesem Zusammenhang muss auch die Armee erwähnt werden, die in den ABC-Abwehrformationen, neben dem oben erwähnten ABC Abw Lab 1, in der ABC-Einsatzkompanie und im ABC Abwehr Bataillon 10 mobile Messmittel und mobile Labore subsidiär oder im

Krieg in den Einsatz bringen kann, die neben umfassenden Probenahmen nach NATO und nationalen Standards bereits vor Ort in den mobilen Laboren limitierte Radioanalytik durchführen können.

Im Rahmen der Inneren Sicherheit geht es darum, den Schmuggel von radioaktivem Material durch die Schweiz – und den illegalen Besitz oder die Manipulation von radioaktivem Material durch terrorverdächtige Personen/Organisationen zu verhindern, sowie herrenloses radioaktives Material in Kehrlichtverbrennungsanlagen, Stahlwerken, Sortierwerken etc. aufzufinden sowie gestohlenen radioaktives Material wieder zu finden. Zwischen dem BAG und Labor Spiez werden die planbaren jährlichen Schwerpunktkontrollen Radioaktivität an Zollstellen, Flughäfen, Strassen, etc. geplant und mit Portalmonitoren und mobilen Messsystem im Bereich von 50-tägigen Messkampagnen durchgeführt. Mit dem Auffinden von herrenlosem radioaktivem Material oder Diebstahl ist erstinstanzlich die Bewilligungs- und Aufsichtsbehörde BAG mit der Suva die zentrale Stelle. Sie informiert die NAZ, die Einsatzzentrale Fedpol, diese die Bundesanwaltschaft über den Fund. Anhand der Beurteilung durch die Aufsichtsbehörde wird die Weiche gestellt, ob das Ermittlungsverfahren durch die Bundesanwaltschaft mit der Bundeskriminalpolizei und im Nebenprozess die Nukleare Forensik Schweiz (NF CH) bearbeitet wird. Die NF CH ist das operative Mittel (Einsatzequipe Nuklear des VBS, A-EEVBS) aus dem Labor Spiez gekoppelt mit dem Forensischen Dienst Zürich (FOR), das vor Ort die ermittlungsrelevanten, technisch-wissenschaftlichen Daten erhebt und das radioaktive Material für die konventionelle und nuklearforensischen Untersuchungen im LS und FOR birgt und in das LS verschiebt.

Das Labor Spiez ist das national designierte Laboratorium für die Nukleare Forensik. Es verfügt über die umfassende Radioanalytik in diesem Gebiet. Es muss erwähnt werden, dass national in diesem Bereich unter der nuklearen Forensik nicht nur die Bearbeitung von Nuklearmaterial, sondern radioaktivem Material generell, mit einer forensischen Relevanz verstanden wird. Mit der Etablierung der Nuklearen Forensik im LS hat die schweizerische Aussenpolitik die Verpflichtung, unterzeichnet in den Nuclear Security Summits und anderen Vertragswerken, seit einigen Jahren erfüllt. Das LS ist auf dem Gebiet der Nuklearen Forensik aktiv beteiligt in Arbeitsgruppen der IAEA, der Global Initiative to Combat Nuclear Terrorism (GICNT) und der internationalen technischen Arbeitsgruppe zur Nuklearen Forensik (ITWG). Daneben pflegt es die Zusammenarbeit mit dem Joint Research Center (JRC) der EU in Karlsruhe, Livermore National Laboratory und Los Alamos National Laboratory, beide USA. Mit der im LS angewendeten Radioanalytik kann Kernmaterial umfassend analysiert werden. Spezifische Verunreinigungen

lassen auf den Ursprung des Materials schliessen, diverse Isotopenverhältnisse erlauben Rückschlüsse auf die Geschichte des Materials, etc.

Die hier aufgezeigten Institute des Bundes, die radioanalytisch tätig sind, verfügen über die Kontakte mit nationalen und internationalen Partnerinstituten. Im ausserpolitischen Kontext sind das BAG, BFE, ENSI und LS das EDA technisch-wissenschaftlich begleitend im Gesundheits-, Nuclear Security und Abrüstungsbereich. In diesem Kontext ist die Universität Bern, Physikalisches Institut, im Bundesauftrag mit Edelgasmessungen im Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty (CTBT) neben dem LS in anderen Fragestellungen aktiv.

Die Bundeslabore, die Radioanalytik anwenden, und ausserhalb des Hochschulbereiches stehen, haben die Problematik des Nachwuchses an Radio- respektive Nuklearchemikern seit längerer Zeit erkannt. Zusätzlich zum erwarteten Mehrbedarf steht ein Generationswechsel an, bedingt durch das hohe Durchschnittsalter der gegenwärtigen Belegschaft in dem Bereich. Eine grobe Schätzung lässt erwarten, dass in wenigen Jahren ein Bedarf von 4 neuen Radiochemikerinnen bzw. Radiochemikern pro Jahr für über ein Jahrzehnt ansteht. Im Gegensatz zum Hochschulbereich ist die Anstellung eines Nicht-Schweizerbürgers, einer Nicht-Schweizerbürgerin in den hier angesprochenen Bereichen des Bundes kaum zu realisieren.

### Beteiligte Laboratorien im Überwachungsprogramm

<b>BAG SRR</b>	Radiologische Risiken, Bundesamt für Gesundheit	Bern
<b>BAG FANM</b>	Forschungsanlagen und Nuklearmedizin, Bundesamt für Gesundheit	Bern
<b>BAG URA</b>	Umweltradioaktivität, Bundesamt für Gesundheit	Bern
<b>BfS</b>	Bundesamt für Strahlenschutz	Freiburg im Breisgau/D
<b>BAFU</b>	Abteilung Hydrogeologie, Bundesamt für Umwelt	Bern
<b>CERN</b>	CERN, Occupational Health & Safety and Environmental Protection (HSE) unit	Genève
<b>EAWAG</b>	Wasserressourcen & Trinkwasser	Dübendorf
<b>ENSI</b>	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat	Brugg/AG
<b>ETHZ</b>	Institut für Geophysik ETHZ	Zürich
<b>HUG</b>	Division de médecine nucléaire, Hôpital Cantonal	Genève
<b>IFAF</b>	Département F.-A-Forel, Université de Genève	Versoix
<b>IRA</b>	Institut de Radiophysique, CHUV	Lausanne
<b>LS</b>	LABOR SPIEZ, Bundesamt für Bevölkerungsschutz des VBS	Spiez/BE
<b>LUBW</b>	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Baden-Württemberg	Karlsruhe/D
<b>NAZ</b>	Nationale Alarmzentrale, Bundesamt für Bevölkerungsschutz des VBS	Zürich
<b>PSI</b>	Abteilung für Strahlenschutz und Sicherheit, Paul Scherrer Institut	Villigen/AG
<b>Suva</b>	Bereich Physik, Abt. Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz	Luzern
<b>Uni-BE</b>	Physikalisches Institut, Abt. Klima- und Umweltphysik, Universität Bern	Bern
	Departement für Chemie, Universität Bern	Bern

## Überwachungsprogramme im Überblick

Expositionspfade	Probenahmestellen	Proben und Messungen
Ortsdosen (externe Gamma-Strahlung)	Automatische Überwachung der Ortsdosen: landesweit mit NADAM und in der Umgebung der KKW mit MADUK. TLD in der Nahumgebung von KKW und Forschungsanlagen (PSI und CERN)	NADAM: 71 Stellen, Betrieb durch die Nationale Alarmzentrale NAZ (landesweites Dosis-Warnnetz) MADUK: je 12-17 Stellen, Betrieb durch das ENSI TLD ( $\gamma$ -Komponente) und n-Dosis (PSI, CERN)
In-situ Messung	Umgebung der Kernanlagen Ganze Schweiz nach speziellem Programm	Direkte vor-Ort-Messung des $\gamma$ -Spektrums Bestimmung des Radionuklidgehaltes des Bodens und deren Beiträge zur Ortsdosis
Luft	6 High-Volume-Sampler: ca. 500-1000 m <sup>3</sup> /h 1 Digital-Aerosolsammler Jungfraujoch  URAnet: Aerosolwarnnetz 15 Stellen online-Messung mit Datenfernübertragung <sup>85</sup> Kr-Messungen an Luftproben vom Jungfraujoch	Aerosolsammler und High-Volume-Sampler: kontinuierliche Sammlung auf Aerosolfiltern mit $\gamma$ -Spektrometrie im Labor: Nachweisgrenze für <sup>137</sup> Cs: 1 $\mu$ Bq/m <sup>3</sup> bzw. 0.1 $\mu$ Bq/m <sup>3</sup>  RADAIR: $\alpha/\beta$ -Messung (FHT-59S) Ende 2017 eingestellt, 4 Stellen mit Jod-Monitor (FHT-1700); URAnet: 15 Stationen nuklidspezifischer Monitor (FHT-59N1)
Niederschläge	Regensammlerstationen, ganze Schweiz inkl. Umgebung der KKW, sowie Forschungsanlagen und Industrien	10 Regensammler mit Trichtern von 1 m <sup>2</sup> Fläche, wöchentlich $\gamma$ -Spektrometrie der Rückstände; Nachweisgrenze für <sup>137</sup> Cs: 10 $\mu$ Bq/l (monatliche Probe) An 14 Stellen Sammlung der Niederschläge für die Tritiumbestimmung; eine Stelle: Bestimmung des Tritiumgehaltes in der Luftfeuchte.
Aquatisches Milieu	Kontinuierlich gesammelte Wochenproben aus Rhein, Rhone, Ticino und Doubs sowie oberhalb und unterhalb der KKW (Aare)  Bei den KKW auch Grundwasser, Sedimente, Fische, Wasserpflanzen, URAnet: 5 automatische Messstationen in Aare und Rhein	$\gamma$ - und $\alpha$ -Spektrometrie Tritium-Messung URAnet: Gammaskpektrometrie mit NaI-Detektoren
Erde	30 Stellen in den Alpen, dem Mittelland, dem Jura, auf der Alpensüdseite inkl. Umgebung der KKW, PSI, CERN	Erdschicht 0-5 cm für <sup>90</sup> Sr-Bestimmung und $\gamma$ -Spektrometrie und z.T. $\alpha$ -Spektrometrie
Bewuchs (Gras, Pflanzen)	Gleiche Stellen wie Erdboden Baumblätter aus Umgebung KKW, Industrieverbrennungsanlage Basel (RSMVA) und Referenzstationen	Gras zweimal jährlich; $\gamma$ -Spektrometrie und <sup>90</sup> Sr Bäumblätter: <sup>14</sup> C-Bestimmung (jährlich)
Milch	Gleiche Regionen wie Erde und Gras Milchzentralen und Grossverteiler	$\gamma$ -Spektrometrie und <sup>90</sup> Sr-Messung Einzel- und Sammelmilchproben, z.T. Tritium-Messungen
Andere Lebensmittel	Getreide-Mischproben aus verschiedenen Regionen und Umgebung KKW Weitere Proben nach Bedarf, z.B. Gemüse Umgebung KKW, Mineralwässer, Wildpilze, Importproben etc.	$\gamma$ -Spektrometrie <sup>90</sup> Sr-Bestimmung
Menschlicher Körper	Schulklassen Genf Mitarbeiter PSI Zahnärzte, Schulzahnkliniken und pathologische Institute aus verschiedenen Gegenden	Ganzkörpermessungen in Genf (HUG) und am PSI <sup>90</sup> Sr-Bestimmungen an Wirbelknochen und Milchzähnen
Emissionen von KKW Betrieben ect.	Kernanlagen, Forschungsanlagen, etc. Kläranlagen der Agglomerationen Sickerwässer von Deponien	Abluftfilter, Abgas etc. Abwässer aus Spitälern, Deponien, Kehrlichtverbrennungsanlagen, Abwasserreinigungsanlagen $\gamma$ -, $\alpha$ - und <sup>90</sup> Sr-Messung

## Radioanalytik am Paul Scherrer Institut (PSI)

*Dorothea Schumann, Labor für Radiochemie,  
Paul Scherrer Institut*

Das PSI verfügt über verschiedene nukleare Installationen (Beschleuniger, Neutronenquelle SINQ, SLS, Swiss-FEL, Hotlabor, Protonentherapie, Radiopharmazeutisches Zentrum, Bundeszwischenlager etc.) und eine Vielzahl von Labors, in denen mit Radioaktivität in offener oder geschlossener Form umgegangen wird. Die Sicherstellung entsprechender Radioanalytik zur Überwachung von Personal, Anlagen und Umwelt sowie die Charakterisierung zu entsorgender radioaktiver Stoffe, Komponenten und Bauteile ist eine Grundvoraussetzung für die Durchführung jedweder Forschungsarbeit mit radioaktiven Materialien entsprechend der gesetzlichen und behördlichen Vorschriften. Das PSI unterhält für die Routineaufgaben ein akkreditiertes Labor. Gleichzeitig aber sind eine Vielzahl der für die radioanalytischen Routinearbeiten verwendeten Messmethoden und Geräte auch Bestandteil der Forschungsarbeiten zu kernphysikalischen und radiochemischen Aufgabenstellungen, wie z.B. der Bestimmung von Wirkungsquerschnitten von Kernreaktionen, der Entwicklung von Radiopharmaka oder der Forschung auf dem Gebiet der superschweren Elemente. Umgekehrt führen die in diesen Forschungsgebieten erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse zu Verbesserungen analytischer Messmethoden, die später routinemässige Anwendung finden.

## Messmethoden und Ausrüstung

Die radioanalytisch und radiochemisch arbeitenden Arbeitsgruppen am PSI verfügen über die gängigen Geräte zur Messung ionisierender Strahlung (Detektoren für  $\alpha$ - und  $\gamma$ -Strahlung, Liquid Scintillation Counting (LSC) für  $\beta$ -Strahlung) sowie die entsprechend eingerichteten überwachten Labors (A-, B- und C-Level).

Inductively-coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) wird zur Analyse von Lösungen bestrahlter Kernbrennstoffe im Hotlabor verwendet, wobei die Methoden – insbesondere in Hinblick auf die Reduktion von Probenvolumen zur Abfallreduktion – ständig verbessert und weiterentwickelt werden.

Für die Bestimmung einiger langlebiger Radionuklide mit schwierig zu messender Strahlung ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ , etc.), die in sehr geringen Konzentrationen vorkommen, kommt Beschleunigermassenspektrometrie zum Einsatz (Zusammenarbeit mit dem Labor für Ionenstrahlphysik der ETHZ).

## Serviceanalytik

Die Routineanalytik am PSI mit mehr als 5000 Probemessungen jährlich umfasst Emissions-, Immissions- und Inkorporationsüberwachung sowie Freigabemessungen, zu ca. 80% als PSI interne Aufträge zur Sicherstellung des Betriebs und zu 20% als Dienstleistungen für externe Partner (KKWs, Industrie, NAGRA, BAG, ENSI). Das PSI unterstützt dabei aktiv die Rückbauvorhaben der Schweizer Kernkraftwerke.

Neben der zerstörungsfreien  $\gamma$ -Spektrometrie müssen für viele Proben vorgängige radiochemische Trennungen durchgeführt werden, um das zu bestimmende Radionuklid in eine messbare Form zu bringen. Dafür wurden standardisierter Routinetrennungsgänge entwickelt. Zur Qualitätssicherung nimmt die Radioanalytik des PSI regelmässig an Ringversuchen teil.

## Forschung und Entwicklung

### Analyse von Beschleunigerabfällen

Das PSI betreibt einen der weltweit leistungsstärksten Protonenbeschleuniger. Entsprechend hoch aktiviert sind die Bauteile in der Umgebung der Anlagen, die zur Demontage und Entsorgung vorgesehen sind. Das Radionuklidinventar solcher Abfälle unterscheidet sich wesentlich von dem in abgebrannten Brennelementen aus Kernkraftwerken, wobei insbesondere langlebige Nuklide im Fokus stehen. Um die Forderungen der Behörden zu erfüllen, wurden neue Trenn- und Messverfahren entwickelt, viele davon im Rahmen wissenschaftlicher Arbeiten. Neben der Erfüllung behördlicher Auflagen tragen diese Arbeiten entscheidend dazu bei, Modelle für die theoretische Berechnung von Produktionsraten aus Kernreaktionen an Beschleunigern (sog. Spallationsreaktionen) zu verbessern. Die Erkenntnisse solcher «Benchmark»-Analysen haben einen erheblichen Einfluss auf die Weiterentwicklung der routinemässig verwendeten Analysenmethoden und sind wertvolle Parameter für das Design neuer nuklearer Installationen.

### Radioanalytische Forschungsarbeiten

In Zusammenarbeit mit dem ENSI laufen Forschungsaufgaben zur Entwicklung effizienterer Aufschlussmethoden für Betonproben und Entwicklung neuer Trennsysteme sowie zu Methoden zwecks direkter Bestimmung binärer Gemische von  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlern. Im Bereich der Radio-Geochemie werden Untersuchungen der Eigenschaften von mit Uran angereicherten Torfschichten aus dem westlichen Schweizer Mittelland durchgeführt. Zur Etablierung neuer Radionuklide zwecks Altersbestimmung von Umweltproben läuft ein Sinergia Projekt zur Bestimmung der Halbwertszeit von  $^{32}\text{Si}$ . Zusammen mit der

NAGRA werden im Felslabor Grimsel Studien zur Langzeitdiffusion durch Analyse verschiedener Bohrwässer durchgeführt.

### Perspektiven

Mit der Einführung der neuen Strahlenschutzverordnung 2018 sowie dem Ausstieg der Schweiz aus der Kernenergie werden radioanalytische Arbeiten in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Die Absenkung der Grenzwerte für viele Radionuklide wird stark erhöhten Messaufwand mit sich bringen, der sich nicht nur im Rahmen des Rück-

baus der KKW's auswirken wird, sondern auch die Radioanalytik in Forschungsinstituten vor neue Herausforderungen stellt. Der Entwicklung neuer Messverfahren, um auch schwer zu messende Radionuklide bestimmen zu können, wird grössere Bedeutung zukommen. In Zusammenarbeit mit allen involvierten Labors am PSI und mit den Partnern (ENSI, NAGRA; KKW's, BAG, ZWILAG, IRA, Fachverband Strahlenschutz e.V., ETHZ, Labor Spiez) müssen diese Entwicklungsarbeiten geplant, koordiniert, finanziert und vorangetrieben werden, wobei ein enges Zusammenspiel zwischen Forschung, Entwicklung und Service die Grundvoraussetzung für die Erfüllung der anspruchsvollen zukünftigen Aufgaben ist.

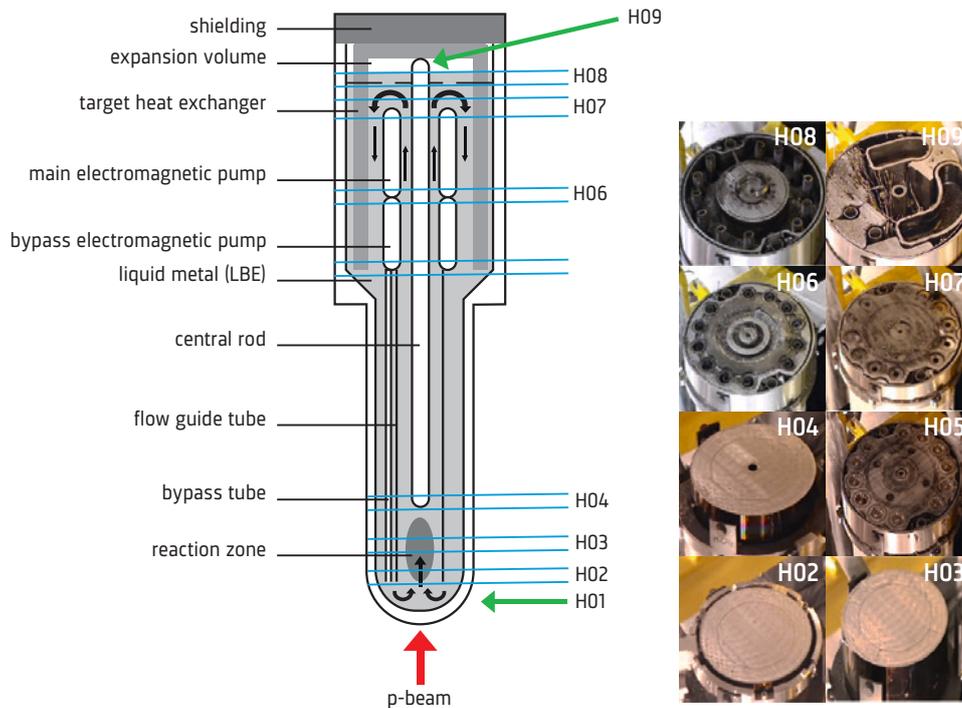


Abb. 2: MEGAPIE, ein Flüssigmetalltarget am 600 MeV Hochintensitätsprotonenstrahl, war ein typisches Projekt am PSI bei dem Radioanalytik eine entscheidende Rolle spielte. (Grafik: Bernadette Hammer)

## Radiochemische Analysen, Radioökologie und Langzeitüberwachungen der Umwelt (GRE) des Instituts de Radiophysique (IRA)

*Pascal Froidevaux, groupe GRE, Institut de Radiophysique Appliquée IRA, CHUV Lausanne*

Die Arbeitsgruppe Radioökologie des Instituts für Radiophysik (IRA-GRE) des CHUV arbeitet auf dem Gebiet der Radioökologie und Umweltüberwachung. Sie beteiligt sich aktiv im Auftrag des BAG an den Spezialmessungen von Pu, Am, U, Th,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ , etc. im Rahmen des nationalen Radioaktivitätsüberwachungsprogramms.

Sie entwickelt Forschungsprojekte zur Migration und Bioverfügbarkeit von Radioelementen in der natürlichen Umwelt und zur Entwicklung radiochemischer Analysemethoden. Drei ihrer Projekte wurden oder werden vom SNF unterstützt. Als Ergebnis dieser Projekte haben wir beispielsweise gezeigt, dass Plutonium signifikant an den kolloidalen Anteil der Bodenflüssigkeiten von verschiedenen Arten alpiner Böden gebunden ist und somit die Migrationsrate in der Tiefe und im Grundwasser beeinflusst. In einer anschließenden Studie haben wir mit der Filmdiffusionstechnik (DGT) den bioverfügbaren Anteil von Plutonium in zwei Flüssen im Jurabogen bestimmt, d.h. wir haben gezeigt, dass die DGT-Technik in der Lage war, den freien Anteil von Pu zu messen und die Intensität der Interaktion zwischen Pu und gelöster organischer Substanz zu bestimmen. Die Ergebnisse zeigten, dass Pu einen labilen Komplex mit gelöster organischer Substanz ( $0,2 < \xi < 0,4$ ;  $k_{\text{diss}} \approx 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) bildete, der in der Lage war, sich während der Diffusionszeit im Gel (DGT) zu dissoziieren und so den Fluss des bioverfügbaren Pu zu erhöhen. Wir konnten auch mit Hilfe der DGT-Technik mittels Messung durch Beschleunigermassenspektrometrie das Vorhandensein von Pu(V) als Carbonatkomplexe in einem Fluss mit einer geringen Konzentration an gelöstem organischem Material in der Calcitfraktion der in der Nähe der Quelle entnommenen Proben bestimmen. Diese Ergebnisse gelten als sehr innovativ, da Pu bisher als eine Spezies mit sehr eingeschränkter Mobilität und Bioverfügbarkeit angesehen wurde. In dieser Studie entwickelte das IRA-GRE-Labor in enger Zusammenarbeit mit dem ETHZ-Labor für Ionenstrahlphysik eine Bestimmung von Pu durch AMS. Diese Zusammenarbeit wird in einem SNF-Projekt fortgesetzt zwecks Bestimmung von Pu, U und Am im Meer um das Wiederaufarbeitungszentrum für radioaktive Abfälle in Sellafield, in Zusammenarbeit mit dem National Oceanographic Centre an der University of Southampton.

Um ihre Ziele in der Radioökologie zu erreichen, entwickelt die IRA-GRE-Gruppe aktiv neue Methoden der

radiochemischen Analyse. In Zusammenarbeit mit der EPFL haben wir ein spezielles Harz für die Yttrium-Extraktion (für die Messung von  $^{90}\text{Sr}$ ) nach dem ionenbedruckten Konzept entwickelt. Dieses Projekt wurde von der Kommission für Technologie und Innovation wegen seines industriellen Potenzials finanziert. Mit diesem Harz konnten wir die Menge der  $^{90}\text{Sr}$ -Analyse, die jährlich im Auftrag des BAG bei konstanter Mitarbeiterzahl durchgeführt wurde, verdoppeln. Dieses Projekt wird zur Synthese von Harzen für die Analyse von  $^{55}\text{Fe}$  und  $^{63}\text{Ni}$  im Rahmen des geplanten Rückbaus der Schweizer Kernkraftwerke durch die Entwicklung neuer spezifischer Liganden fortgesetzt.

Für der Bestimmung der Radioaktivität im Menschen wurden mehrere Studien durchgeführt wie beispielsweise die Bestimmung von Plutonium in Knochen- und Milchzahnproben mittels Massenspektrometrie, um die biologische Periode von Pu im menschlichen Körper zu bestimmen. Sie kam zum Schluss, dass Pu die Plazentabariere während der Schwangerschaft nicht passiert hat. Die GRE-IRA-Gruppe hat auch eine fruchtbare Zusammenarbeit mit dem Centre universitaire romand de médecine légale (CURML) und der ETHZ bei der Anwendung der Beschleunigermassenspektrometrie und anderer radiometrischer Verfahren ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ) zur Bestimmung des post-mortem Zeitintervalls entwickelt, wenn nur menschliche Knochen gefunden wurden. Diese Zusammenarbeit führte zur Entdeckung abnormaler Aktivitätsniveaus an  $^{210}\text{Po}$  in Proben persönlicher Gegenstände des ehemaligen Präsidenten Jassir Arafat. Unsere Implikation in diesen Studien veranlasste Frau Souha Arafat und die Palästinensische Behörde, das IRA-GRE als Referenzlabor während der Exhumierung der Überreste von Präsident Arafat zu wählen.

## Radioanalytik mittels Beschleunigermassenspektrometrie

*Sönke Szidat, Labor für Radio- und Umweltchemie, Departement für Chemie und Biochemie, Universität Bern*

Beschleunigermassenspektrometrie (englische Abkürzung AMS) ist eine Methode zur Messung von langlebigen Radionukliden. Sie wurde vor 40 Jahren als revolutionäre analytische Technik erfunden und seitdem beständig weiterentwickelt. Grundsätzlich ist zwar die auf Kernstrahlungsmessungen (d.h. Bestimmung der Aktivität durch  $\alpha$ -  $\beta$ - oder  $\gamma$ -Spektrometrie) beruhende Radioanalytik (Radiometrie) sehr messempfindlich. Für langlebige Radionuklide ab einer Halbwertszeit von Jahrhunderten werden jedoch radiometrische Messmethoden zunehmend ineffizient, weil die Zahl der detektierbaren Zerfälle innerhalb einer nützlichen Messdauer immer geringer wird. In der Massenspektrometrie wird nicht die Radioaktivität (also die Zahl der zerfallenden Atome), sondern die Zahl der existierenden Atome gezählt, womit die Effizienz unabhängig von der Halbwertszeit wird. Das bei Weitem wichtigste Radioisotop, welches mit AMS analysiert wird, ist Radiokohlenstoff ( $^{14}\text{C}$ ,  $t_{1/2} = 5730$  a) und zwar oft für Altersbestimmungen. Radiokarbondatierungen werden heute fast ausschliesslich mit AMS durchgeführt. Damit können  $^{14}\text{C}$  Bestimmungen mit mg- oder gar  $\mu\text{g}$ -Mengen an Kohlenstoff durchgeführt werden. Dies erlaubt nebst Datierung wichtiger archäologischer Funde zahlreiche Anwendungen in Umwelt- und Klimaforschung. Neben  $^{14}\text{C}$  werden heute aber noch eine Reihe andere interessante langlebige Radionukliden mit AMS gemessen, wie z.B.  $^{10}\text{Be}$  ( $t_{1/2} = 1.39 \cdot 10^6$  a),  $^{26}\text{Al}$  ( $t_{1/2} = 7.16 \cdot 10^5$  a),  $^{36}\text{Cl}$  ( $t_{1/2} = 3.01 \cdot 10^5$  a),  $^{41}\text{Ca}$  ( $t_{1/2} = 1.03 \cdot 10^5$  a),  $^{129}\text{I}$  ( $t_{1/2} = 1.61 \cdot 10^7$  a),  $^{238}\text{U}$  ( $t_{1/2} = 2.34 \cdot 10^7$  a),  $^{239}\text{Pu}$  ( $t_{1/2} = 2.41 \cdot 10^4$  a) und weitere Transuranisotope. Die Anwendungen dieser Radioisotope liegen z.B. in der Geologie, Biomedizin, Astrophysik und Radioökologie.

AMS ist die empfindlichste massenspektrometrische Methode. Sie wurde pionierhaft in der Schweiz (mit)entwickelt. Am Labor für Ionenstrahlphysik (LIP) der ETH Zürich wurde zu Beginn der 1980er-Jahre unter der Leitung von Prof. Willy Wölfli und unter Mitwirkung der Klima- und Umweltpophysik der Universität Bern (Prof. Hans Oeschger) eine der ersten AMS-Anlagen in Europa aufgebaut. Seit dieser Zeit gehört die Ionenstrahlphysik der ETH zu den weltweit führenden Forschungsgruppen, in denen AMS instrumentell weiterentwickelt wird. Insbesondere ist der Aufbau von kleinen AMS-Anlagen zu nennen. Instrumentelle Entwicklungen unter Mitarbeit von (radiochemisch orientierten) analytischen Chemikerinnen und Chemikern konzentrieren sich heute vor allem auf Kopplungen von Geräten zur Probenvorbereitung oder Stofftrennung zur Online- $^{14}\text{C}$ -Messung. Ziele dieser

Forschung sind verbesserte Stofftrennungen, Reduktionen von Kontaminationen in der Ultrapurenanalytik, Miniaturisierungen von Probenaufbereitungssystemen und die Erhöhung des Probendurchsatzes für messintensive Projekte. Solche Arbeiten finden in der Schweiz an den Standorten statt, welche über AMS-Anlagen verfügen. Dies sind das LIP der ETH Zürich und das Labor zur Analyse von Radiokohlenstoff (LARA) der Universität Bern. In Zürich arbeitet man heute z.B. an einem Laser-Ablation-System zur kontinuierlichen  $^{14}\text{C}$ -Messungen von Carbonaten in Stalagmiten, einem vereinfachten Interface für pharmakokinetische Studien oder einem Online-System für die substanzspezifische  $^{14}\text{C}$ -Analyse (engl. compound-specific radiocarbon analysis, CSRA). In Bern konzentriert man sich z.B. auf die Kopplung des kommerziellen Sunset OC/EC Analyzers für die Zuordnung von Emissionsquellen von organischem Feinstaub oder die Zuführung von  $^{14}\text{C}$ -angereicherten Proben aus radioaktivem Abfall.

Radiochemische und analytisch-chemische Kompetenzen sind im Zusammenhang mit der Beschleunigermassenspektrometrie vor allem bei der Probenvorbereitung wichtig. Dies betrifft zum einen die Extraktion von seltenen Radionukliden aus z.T. grossen Mengen an verschiedenen Matrices wie Gestein, Boden, Wasser, Luft, biologischem Material oder auch technischen Werkstoffen. Des weiteren ist ein fundierter chemischer Background nötig für die Separation von chemischen Spezies wie spezifischen organischen Substanzen oder Oxidationszuständen von anorganischen Elementen, wie auch die chemische Präparation von geeigneten Targets für die Messung. Dies verlangt oftmals eine hochwertige analytisch-chemische oder geochemische Ausbildung und in manchen Fällen auch ein radiochemisches Studium mit einer soliden Laborerfahrung.

In der Radiochemie findet die Analyse von langlebigen Radionukliden mit AMS Anwendung in verschiedenen Bereichen der Radioökologie, welche die Verteilung und die Auswirkungen von Radioisotopen in der Umwelt erforscht. Der radiologische Aspekt wird für die Schweiz im Auftrag der Sektion Umweltradioaktivität des Bundesamtes für Gesundheit (BAG) durchgeführt (siehe Beitrag von M. Burger, S. 18). In der Erforschung von Tiefenlagern für die nukleare Entsorgung in der Schweiz kommen langlebige Radionuklide und AMS-Messungen an verschiedenen Punkten zum Einsatz. Zum einen werden die Stabilität geologischer Formationen – z.B. gegenüber Erdbeben und Felsstürzen – durch Messung von  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{26}\text{Al}$  und  $^{36}\text{Cl}$  sedimentologisch untersucht. Dies geschieht in Zusammenarbeit mit der NAGRA und dem ENSI z.B. am Institut für Geologie der Universität Bern (siehe Beitrag von S. Churakov, S. 34) und den Instituten für Geologie sowie Geochemie und Petrologie der ETH.

## Radiopharmazie

Die Verwendung radiochemischer Verfahren in den Lebenswissenschaften, insbesondere der Radiopharmazie und Nuklearmedizin, hat in den letzten Jahrzehnten stark an Bedeutung gewonnen. Sie spielen eine grundlegende Rolle in der Diagnose und zunehmend auch in der Therapie von Krebserkrankungen. Das Prinzip basiert auf der radioaktiven Markierung von Biomolekülen, welche sich im Tumorgewebe gezielt anreichert. Je nach Zerfallseigenschaften des Radionuklids können Patientinnen bzw. Patienten individuell diagnostiziert und anschliessend therapiert werden. Dieses Konzept entspricht einer personalisierten Behandlung, die auch «Theranostik» genannt wird. Radiopharmazie kann grundsätzlich auf drei Pfeiler abgestützt werden: Erstens die Produktion von Radionukliden mit nuklearen Verfahren, zweitens die Entwicklung und Optimierung der tumoraffinen Moleküle sowie deren Markierung mit diesen Radionukliden und, drittens die präklinische Untersuchung resp. klinische Anwendung (Translation) zwecks Abklärung der Eignung der synthetisierten Radiopharmaka.

Die teure Infrastruktur und das hochspezialisierte und komplexe Know-how in Radiochemie und Strahlenschutz legen es nahe, dass radiopharmazeutische Forschung in der Schweiz im universitären Umfeld stattfindet. Ferner sprechen die z.T. kurzen Halbwertszeiten der eingesetzten Radionuklide für eine physische Nähe der Anlagen und der Forschung zur Klinik und zu den Patientinnen und Patienten.

In der Schweiz findet translationale («bench-to bedside») – also von der Produktion der meist kurzlebigen Radionuklide bis zur Applikation an Patientinnen und Patienten) radiopharmazeutische Forschung und Entwicklung an der Klinik für Radiologie und Nuklearmedizin des Universitätsspital Basel ([www.unispital-basel.ch](http://www.unispital-basel.ch)), dem Department für Biomedizinische Forschung am Inselspital Bern ([www.dbmr.unibe.ch](http://www.dbmr.unibe.ch)), dem Universitätsspital Lausanne (CHUV) und dem Zentrum für Radiopharmazeutische Wissenschaften, einem Gemeinschaftsprojekt der ETH Zürich, dem Paul Scherrer Institut und der Klinik für Nuklearmedizin des Universitätsspital Zürich ([www.psi.ch/zrw/](http://www.psi.ch/zrw/)) statt. Es gibt momentan sieben radiopharmazeutische Professuren resp. radiopharmazeutisch ausgerichtete Chemieprofessuren: An der Uni Basel (Prof. M. Fani) und der ETH Zürich (Prof. R. Schibli, Prof. S. Ametamey). Eine vierte Professur am CHUV in Lausanne wurde kürzlich mit Prof. M. Schottelius besetzt. Ferner gibt es an der Schnittstelle Radiochemie-Radiopharmazie eine Professur an der Uni Bern (Prof. A. Türler; [www.dcb.unibe.ch/](http://www.dcb.unibe.ch/)) und an der Schnittstelle anorganische/bioanorganische Chemie-Radiopharmazie zwei Professuren an der Uni Zürich (Prof. R. Alberto und Prof. J. Holland). Diesen Professuren sind meist weitere Senior Wissenschaftler (Privatdozierende bzw. Forschungsgruppenleiterinnen und -leiter) angeschlossen.

In der Privatwirtschaft zeigt beispielsweise die Übernahme der Firmen AAA und Endocyte für 3,9 bzw. 2,1 Mil-

liarden CHF durch Novartis in 2018 – beide spezialisiert auf Radioligandentherapie – die rasante Entwicklung auf diesem Gebiet. Die wichtigsten derzeit verwendeten therapeutischen Radionuklide werden an Forschungsreaktoren hergestellt (z.B.  $^{177}\text{Lu}$  oder  $^{131}\text{I}$ ). Ebenfalls stammt das meistverwendete diagnostische Radionuklid  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  aus Forschungsreaktoren. Die Schweiz betreibt seit 1994 keinen Forschungsreaktor zur Isotopenproduktion mehr und ist somit auf Importe angewiesen.

Das Prinzip der Radiopharmazie wird zusammenfassend dargelegt und die Thematik exemplarisch in einigen Beiträgen zusammengefasst. Die letzten beiden Kapitel beschreiben die Tätigkeiten auf dem radiopharmazeutischen Gebiet am IRA/CHUV (Institut de Radiophysique Appliquée du Centre Hospitalier Universitaire Vaudois). Dieses Institut ist verantwortlich für die radiopharmazeutischen Bedürfnisse der französischen Schweiz.

### Konzepte der Radiopharmazeutischen Forschung

**Nukleare Bildgebung und Radionuklid Therapie.** Biochemische Prozesse auf molekularer Ebene im lebenden Organismus zu verstehen, ist ein zentrales Anliegen im Zeitalter der personalisierten Medizin. Die nicht-invasiven, bildgebenden Verfahren SPECT («Single Photon Emission Computed Tomography») und PET («Positron Emission Tomography»), die routinemässig in der Nuklearmedizin eingesetzt werden, eignen sich wegen der hohen Sensitivität für die funktionelle Darstellung biologischer bzw. pathologischer Prozesse. Sie komplementieren die morphologischen Verfahren CT und MRI. Ein entscheidendes Element der nuklearen Bildgebung sind maßgeschneiderte, radioaktiv markierte Substanzen (sogenannte Radiopharmaka oder Radiotracer) die selektiv an molekularen Strukturen und mit hoher Affinität binden. Radiopharmaka bestehen meist aus einer biologisch aktiven Kom-

ponente und einem Radionuklid, welche die Selektivität und die Spezifität bestimmt. Die physikalischen Zerfalleigenschaften definieren auch den Einsatz der Radiopharmaka zur PET, SPECT oder zur Tumortherapie. Da Radiopharmaka meist in sub-mikromolaren Mengen eingesetzt werden, sind keine direkten pharmakologischen (Neben)Wirkungen zu erwarten. Neben dem Einsatz von Radiopharmaka zur Diagnose erlebt deren Verwendung in der Krebstherapie momentan grosse Beachtung. Die erfolgreiche Verwendung neuer subtypspezifischer Somatostatin-Rezeptor-Liganden für die Peptidrezeptor-spezifische Diagnose (z.B. mit  $^{68}\text{Ga}$ ) und Endoradiotherapie (mit  $^{177}\text{Lu}$ ) oder die Entwicklung von Liganden gegen das Prostata-spezifische Membran Antigen (PSMA) zeigen das Potenzial von Radiopharmaka in der «Theranostik» der Kombination von Diagnostik und Tumortherapie durch einen «einfachen» Austausch dieser beiden Radionuklids.

**Produktion von Radionukliden.** Um optimale Radiopharmaka herzustellen, sind neue Radionuklide mit geeigneten Zerfalleigenschaften und chemischen Eigenschaften unerlässlich. Anlagen zur Herstellung solcher Produkte erfordern komplexe Infrastrukturen (geeignete nukleare Produktionsanlagen sowie Radiochemielabors inkl. Strahlenschutz). An verschiedenen Spitälern der Schweiz (Zürich, Bern und Genf) wurden medizinische Zyklotrone zur Produktion von kurzlebigen Radionukliden wie  $^{18}\text{F}$  installiert.  $^{18}\text{F}$  ist ein Positronenemitter, welcher in Form von  $^{18}\text{F}$ -Fluor-Deoxy-Glucose (FDG) den am meisten eingesetzten PET Tracer in der diagnostischen Nuklearmedizin ist.

**Strategien zur Markierung von Biomolekülen mit metallischen Radionukliden.** Interessante Übergangs- oder Hauptgruppenmetalle wie Technetium ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ), Kupfer ( $^{64/67}\text{Cu}$ ), Zirkonium ( $^{89}\text{Zr}$ ), Indium ( $^{111}\text{In}$ ), Gallium ( $^{68}\text{Ga}$ ) Lutetium ( $^{177}\text{Lu}$ ) etc. müssen durch multidentate Liganden (mehrere Andockstellen) so stabilisiert werden, dass sie auch in vivo mit ihrem Trägermolekül (d.h. Biomolekül) verbunden bleiben. Das Design von entsprechenden Liganden ist eine Herausforderung an die Chemikerin /den Chemiker, auch weil die Beeinflussung der biologischen Eigenschaften des Trägermoleküls berücksichtigt werden muss. Der Ligand muss zudem mit dem gewählten Radionuklid quantitativ markierbar und mit den Eigenschaften des Biomoleküls kompatibel sein. Man spricht dann von einem bifunktionellen Liganden. Nicht zuletzt muss er auch synthetisierbar sein, ein Aspekt, der oft grosse Ansprüche an den organisch-synthetischen Chemiker/Chemikerin stellt.

**Entwicklung und Optimierung von tumoraffinen Biomolekülen.** Es werden chemische und biologische Leitstrukturen, die eine hohe Affinität und Selektivität für die entsprechen-

den Zielstrukturen auf dem Tumorgewebe aufweisen, gesucht. Diese Leitstrukturen werden gezielt modifiziert um die entsprechenden Radionuklide einzubauen ohne die pharmakokinetischen Eigenschaften negativ zu verändern. Dabei kann zum Beispiel die Einheit, welche den Chelator und das Biomolekül verbinden, chemisch modifiziert werden, um die Lipophilie/Hydrophilie zu verändern. Des weiteren können Leitstrukturen mit zusätzlichen Einheiten versehen werden (z.B. albuminbindende Moleküle), welche die Zirkulationszeit des Radiopharmakons im Blut verlängern oder dessen Ausscheidung durch die Nieren beschleunigen. Die pharmakokinetischen Eigenschaften der Radiopharmaka, werden anschliessend in detaillierten in-vitro und präklinischen in-vivo Experimenten charakterisiert, einschließlich nicht-invasiver nuklearer Kleintierbildgebung.

**Klinische Translation: «From Bench-to-Bedside».** Ziel der radiopharmazeutischen Forschung ist es, basierend auf den Bedürfnissen der Kliniker eine Entwicklungskette von der Produktionsanlage zur Laborbank sowie zum Einsatz am Patienten effektiv umzusetzen und klinisch zu etablieren. Um dieses Ziel zu erreichen, ist ein multidisziplinärer Ansatz unter Zuhilfenahme des Fachwissens in den Bereichen Kernphysik, Radiochemie, anorganische, organische Chemie und Biochemie sowie Pharmakologie, Pharmazie, Biologie, Radiobiologie und Medizin erforderlich. Die Forschungsstrategie beinhaltet die Identifizierung potenzieller und klinisch relevanter Zielstrukturen in enger Zusammenarbeit mit dem klinischen Partner und der Pharmaindustrie. Vielversprechende Radiotracer werden nach toxikologischen Tests, Etablierung der Radiosynthese und Analytik nach den Regeln der Good Manufacturing Practice (GMP) für eine Erprobung in der Klinik weiterentwickelt.

## Produktion und Anwendungen von Radionukliden in der Nuklearmedizin

*Andreas Türler, Labor für Radio- und Umweltchemie, Departement für Chemie und Biochemie, Universität Bern*

Neben Standard Radionukliden, welche in der klinischen Praxis routinemässig eingesetzt werden, fokussieren diverse Forschungsprojekte auf die Entwicklung neuer Radionuklide, welche potentiell für die Diagnose und Therapie geeignet sind.

Wie das Beispiel in Bern zeigt, kann ein medizinisches Zyklotron so ausgebaut werden, dass es zur Produktion von neuen, diagnostischen Radionukliden eingesetzt werden kann. So wurde im Rahmen eines Ende 2018 abgeschlossenen, interdisziplinären SNF (Schweizerischer Nationalfonds) Projekts, am 18 MeV Protonenzyklotron eine sogenannte Fest-Target Station installiert und die Produktion von  $^{43,44}\text{Sc}$ ,  $^{68}\text{Ga}$ , und  $^{64}\text{Cu}$  demonstriert. Dabei stützte sich insbesondere die Produktion von  $^{43,44}\text{Sc}$  auf die am Forschungszyklotron des Paul Scherrer Instituts zuvor entwickelten Produktionsprozesse. In Bern bestehen GMP-zertifizierte radiopharmazeutische Laboratorien, welche für die Produktion von Radiopharmaka für eine klinische Anwendung unerlässlich sind. In der Radiopharmazie Bern sind bisher weit über 1000 Patientendosen von diagnostischen Radiotraceren, wie  $^{68}\text{Ga}$ -PSMA-11,  $^{68}\text{Ga}$ -DOTA-TATE und  $^{68}\text{Ga}$ -DOTATOC hergestellt und an verschiedene Spitäler von Genf bis Aarau geliefert worden. Bisher wird  $^{68}\text{Ga}$  mit einer Halbwertszeit von etwa einer Stunde aus  $^{68}\text{Ga}/^{68}\text{Ge}$ -Generatorsystemen gewonnen. Diese sind jedoch sehr teuer in der Anschaffung (40-70 kCHF) und können nur ca. ein halbes Jahr betrieben werden, da die Halbwertszeit des  $^{68}\text{Ge}$  271 Tage beträgt. Es laufen deshalb grosse Anstrengungen, die Produktion von  $^{68}\text{Ga}$  am Zyklotron in Bern zu etablieren, damit die  $^{68}\text{Ga}$ -basierten Radiotracer in grösseren Mengen hergestellt werden können. Als weitere Radionuklide sind  $^{43,44}\text{Sc}$  vorgesehen, die sich sehr gut mit dem therapeutischen Radionuklid  $^{177}\text{Lu}$  für eine theranostische Anwendung kombinieren lassen. Die Radiopharmazie der Universität Bern stellt auch ca. 100 Dosen  $^{177}\text{Lu}$ -DOTATOC her und weitere  $^{177}\text{Lu}$  Produkte sind in Vorbereitung. Auch diese Produkte sind für spezialisierte Anwender lieferbar, bisher wurden sie in Bern, aber auch in St. Gallen, Aarau und Bellinzona verwendet. An der Universität Bern laufen im Rahmen eines SNF Sinergia Projekts (PHOR) Forschungsarbeiten, um die Grundlagen für eine neue Methode zur Produktion von Radionukliden für theranostische Anwendungen zu schaffen. Durch die Verwendung eines Hochleistungs-Elektronenbeschleunigers werden energiereiche und intensive Gammastrahlen erzeugt, um damit photonukleare Reaktionen auszulösen. Um dieses Ziel zu erreichen, ist ein multidisziplinärer Ansatz erforderlich, der Physik, Ra-

diochemie und Radiopharmazie umfasst. In Bern wurde deshalb ein auf diesen Gebieten tätiger Kompetenzcluster mit der Universität Bern und der Bundesanstalt für Metrologie (METAS) etabliert.

Dieses Sinergia Projekt konzentriert sich auf Synthese der theranostischen Radionuklidpaare  $^{43,44}\text{Sc} / ^{47}\text{Sc}$ ,  $^{64}\text{Cu} / ^{67}\text{Cu}$  sowie auf die Produktion des Alphaemitters  $^{225}\text{Ac}$ , für den kürzlich herausragende Ergebnisse in der Krebstherapie erzielt wurden. Derzeit ist die Verfügbarkeit dieser Radioisotope für klinische Studien nicht vorhanden oder äusserst begrenzt. Die Grundlage dieser Studien sind bereits vorhandene Infrastrukturen, bestehend aus dem 22 MeV 20 micro Ampere-Elektronenmikrotron der METAS in Bern und dem Zyklotron des Universitätsspitals Bern, mit dem in protoneninduzierten Reaktionen die PET-Diagnosepartner ( $^{43,44}\text{Sc}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ) erzeugt werden können.

## Koordinationschemische und organometallische Grundlagenforschung mit Radionukliden

*Roger Alberto, Institut für Chemie, Universität Zürich*

Die Entwicklung von Liganden für ein bestimmtes Radionuklid, deren Kopplung an biologisch aktive Trägermoleküle und die Markierung mit dem entsprechenden Radionuklid folgen Konzepten, welche für die radiopharmazeutische Chemie und für alle Gebiete der organometallischen Chemie oder der Koordinationschemie prototypisch sind. Die zusätzliche Komponente der Radioaktivität und die damit verbundenen Anwendungsmöglichkeiten geben dem Gebiet einen zusätzlichen Anreiz und Bedeutung. Nimmt man neben der rein chemischen die damit verbundene biologische Wirksamkeit, entsteht ein umfassendes, interdisziplinäres und sehr attraktives Forschungsgebiet. Es verlangt neben radiochemischen und radioanalytischen Methoden auch synthetische und biologische Fertigkeiten. Die Anwendungsmöglichkeiten führen für entsprechende Firmen zu kommerziellem Interesse.

Um grundlegende Erkenntnisse zur Chemie von Radionukliden zu gewinnen, ihre physikalisch-chemischen Eigenschaften zu bestimmen und Modellverbindungen für eine Anwendung herzustellen, werden oft die nicht-radioaktiven Isotope eines Elements genommen. Deren Komplexe oder Verbindungen haben fast identische chemische oder biologische Eigenschaften. Diese Parallelbeziehung ist jedoch nicht möglich für Elemente, welche selbst kein stabiles Isotop besitzen. Dies sind Technetium (Ordnungszahl 43) und Promethium (61), sowie alle Elemente schwerer als Bismuth. Da Promethium nur kurzlebige Isotope hat ( $^{147}\text{Pm}$ ,  $t_{1/2}=2.6\text{y}$ ), lässt sich mit ihm kaum makroskopische Chemie betreiben. Bei Technetium ist die Situation jedoch vorteilhafter: Langlebig-makrosko-

pisch ( $^{99}\text{Tc}$ ,  $t_{1/2} = 212\,000\text{ y}$ ) und kurzlebig-mikroskopisch ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $t_{1/2} = 6\text{ h}$ ) ermöglichen breitabgestützte Studien. Eigenschaften wie Strukturen oder biologische Stabilitäten von pharmazeutisch relevanten Komplexen werden deshalb mit  $^{99}\text{Tc}$  bestimmt um eine radiopharmazeutisch interessante  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Verbindung zu charakterisieren.

Grundlagenforschung und Anwendung sind beim Technetium eng verknüpft. Findet man bei einem neuen, per se nicht für die Praxis gedachten Komplex Hinweise auf eine Anwendung, muss die analoge Verbindung mit mikroskopischen Mengen an  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  hergestellt werden. Für die routinemässige Anwendung muss die Synthese gewissen Randbedingungen genügen: i) Herstellung in reproduzierbaren Ausbeuten von nahezu 100 %, ii) Synthese in wässriger Lösung innerhalb einer halben Stunde, bei Raumtemperatur oder maximal  $100^\circ\text{C}$  sowie iii) ausgehend von Pertechnetat [ $^{99\text{m}}\text{TcO}_4$ ] $^-$ , der stabilsten Form von Technetium in wässrigen Lösungen. Dass trotz dieser Einschränkungen auch ungewöhnliche Verbindungen zugänglich sind, ist in Abb. 3 gezeigt. «Anwendung inspirieren Grundlagen» und «Grundlagen inspirieren Anwendungen» sind eng miteinander verknüpft.

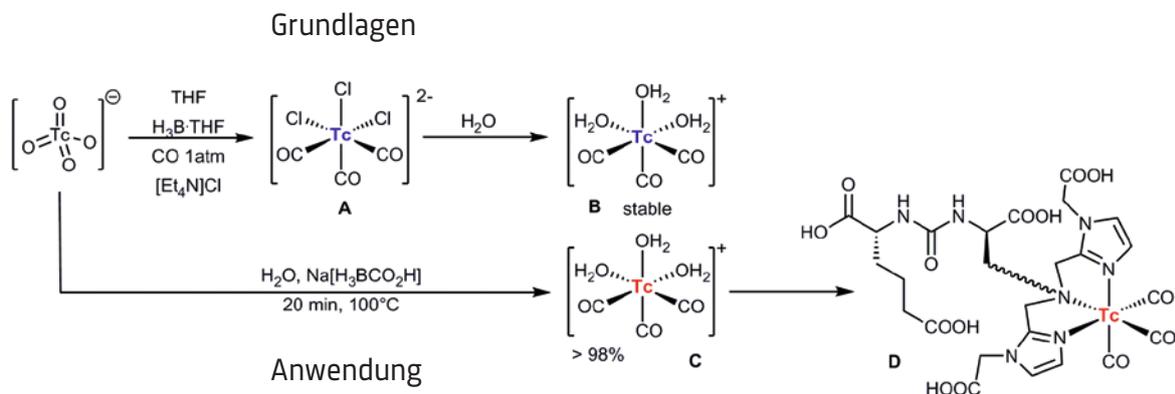


Abb. 3: Verknüpfung von Grundlagenforschung mit Anwendung: Der CO Komplex **A** wird unter Laborbedingungen hergestellt. Komplex **B** tauscht alle Cl-Liganden gegen  $\text{H}_2\text{O}$  aus, und koordiniert leicht andere Liganden  $\rightarrow$  Anwendungspotential: Herstellung von **C** mit  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  unter milden Bedingungen und ohne CO. Die Markierung eines PSMA (Prostata - Spezifisches Membran - Antigen) bindenden Moleküls führte zu einem Diagnostikum für Prostata **D**.

Während die Anwendung von  $^{99m}\text{Tc}$  die «driving force» hinter der Grundlagenforschung war, gibt es heute weltweit aus verschiedenen Gründen nur noch wenige Laboren, in denen die Chemie von Technetium erforscht wird. Der Wettbewerb in der bildgebenden Diagnostik durch andere Methoden ist einer davon. Trotzdem erfolgen immer noch ca. 80% aller Imaging Prozeduren mit günstigem, allerdings aus dem Ausland importiertem  $^{99m}\text{Tc}$ .

Die Chemie von Technetium ist äusserst vielfältig, nicht zuletzt auch weil dieses Element in vielen Oxidationszuständen bis zu +VII vorkommt. Kombiniert man seine vielfach noch ungenügend erforschte Grundlagenchemie mit potentiellen Anwendungen, eröffnen sich attraktive Möglichkeiten für zukünftige Forschungsarbeiten. Die Universität Zürich (UZH) hat die Perspektive, radiochemische Forschung und Ausbildung der anwendungsorientierten Grundlagenforschung zu erhalten erkannt. Im neuen Chemiebau werden modernste, für synthetische Zwecke nutzbare Radiolabore eingerichtet. Damit kann grundsätzlich die  $^{99}\text{Tc}$  Forschung weitergeführt und auf andere medizinisch nützlichen Radionuklide ausgedehnt werden.

Ein erweitertes Konzept zur Radiomarkierung von rezeptorbindenden Vektoren oder pharmazeutisch aktiven Verbindungen ist der «integrated approach». Dieser aus der medizinisch-anorganischen Chemie übernommene und für die radiopharmazeutische Chemie angepasste Ansatz beruht auf dem Prinzip, eine pharmazeutisch aktive, klinisch angewendete Struktur direkt zu markieren, ohne dass ein Ligand an das Molekül konjugiert werden muss. Diesem Konzept ist zum Beispiel im Falle von Ferroquin, einem eisenhaltigen Anti-Malaria Wirkstoff, abgeleitet vom weltweit eingesetzten Chloroquin, ein beträchtlicher Erfolg beschieden. Gegenwärtig werden damit klinische Studien in Phase III durchgeführt. Andere Beispiele haben gezeigt, dass in der Krebstherapie eingesetzte Protein Kinase Hemmer durch integrierte Metallkomplexe an Selektivität und Affinität enorm gewinnen. Dieses für die Radiopharmazie neue Markierungskonzept eröffnet enorm breite Möglichkeiten und ist insbesondere wegen seiner herausfordernden Chemie für Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler von grosser Attraktivität.

## Radiopharmazeutische Forschung

*Roger Schibli, Zentrum für Radiopharmazeutische Wissenschaften, Paul Scherrer Institut und Department für Chemie und angewandte Biowissenschaften, ETH Zürich*

Die radiopharmazeutische Forschung in der Schweiz fokussiert primär auf die Bereiche Krebsdiagnostik und -therapie sowie neurologische Erkrankungen. Vielver-

sprechende Zielstrukturen wie der Somatostatin Rezeptor sst2, der Bombesin Rezeptor, die Folatezeptoren  $\alpha$  &  $\beta$ , der Cholecystokin-2 Rezeptor CCK2 für onkologische Indikationen sowie das Glutamat- und das Endocannabinoid-System für Erkrankungen des zentralen Nervensystems bilden Schwerpunkte der präklinischen und translatorischen, radiopharmazeutischen Forschung in der Schweiz. Zahlreiche Publikationen zu diesen Gebieten mit potentieller klinischer Anwendung zwischen der Universität Bern, dem PSI und der ETHZ mit den Universitätskliniken Zürich, Basel und CHUV belegen den Erfolg dieser zielgerichteten Forschung.

Entsprechende, rezeptorbindende Radiopharmaka werden dabei mit verschiedensten Radionukliden markiert, wobei metallische und nicht-metallische Nuklide zum Einsatz kommen. Als Beispiel seien  $^{18}\text{F}$  (Diagnostik, PET),  $^{68}\text{Ga}$  (Diagnostik, PET),  $^{111}\text{In}$  (Diagnostik, SPECT),  $^{177}\text{Lu}$  (Therapie),  $^{64}\text{Cu}$  (Diagnostik, PET),  $^{44}\text{Sc}$  (Diagnostik, PET) und  $^{47}\text{Sc}$  (Therapie) erwähnt. Eine eigentliche Spezialität der radiopharmazeutischen Radionuklidentwicklung in der Schweiz stellt die «Terbium Familie» dar:  $^{149}\text{Tb}$  (alpha-Therapie & PET),  $^{152}\text{Tb}$  (Diagnostik, PET),  $^{155}\text{Tb}$  (Diagnostik, SPECT) und  $^{161}\text{Tb}$  (Therapie). Die Terbium Radionuklide wurden in einer Kollaboration zwischen dem Zentrum für Radiopharmazeutische Wissenschaften (ZRW – PSI) und dem Labor für Radiochemie (LRC – PSI) mit CERN (ISOLDE) resp. der SINQ (PSI) und den Forschungsreaktoren am Institut Laue Langevin (Frankreich) und SAFARI (Südafrika) hergestellt.

Die folgenden, mehr spezifischen Beispiele sollen das Zusammenspiel rezeptorbindender Radiomarkierungen von Molekülen bis zum klinischer Einsatz genauer aufzeigen.

**Radiopharmaka gegen den Folatezeptor:** Der Folatezeptor (FR) ist in verschiedenen Tumoren über-, in normalen Organen jedoch nur begrenzt exprimiert. Das rezeptorbindende  $^{18}\text{F}$  markierte Radiopharmaka [ $^{18}\text{F}$ ]-AzaFol wurde durch sukzessive Optimierung der natürlichen Folsäure zu einen PET Radiotracer entwickelt. [ $^{18}\text{F}$ ]-AzaFol ist in guten radiochemischen Ausbeuten herstellbar und weist ein passendes pharmakokinetisches Profil auf. [ $^{18}\text{F}$ ]-AzaFol wurde kürzlich in einer multizentrischen Pilotstudie bei Patientinnen mit metastasiertem Eierstockkrebs und Lungenkrebs am USZ, am Kantonalen Krankenhaus St. Gallen und am CHUV getestet. Die ersten klinischen Daten haben gezeigt, dass FR-positive Tumoren gut identifiziert werden können. Parallel dazu testet das CRS präklinisch erfolgreich Radiofolatderivate für die Tumorthherapie.

**Radiopharmaka gegen den Cholecystokin-2 (CCK2) Rezeptor:** Ebenfalls aus dem Bereich der Onkologie zielen diese Radiopharmaka auf das medulläre Schilddrüsenkarzinom, die dritthäufigste Krebsart an der Schilddrüse. Es gehört

zu den besonders aggressiven Formen von Schilddrüsenkarzinomen und weist besonders viele CCK2-Rezeptoren auf. Ein  $^{177}\text{Lu}$  markiertes Radiopharmaka wurde am Paul Scherrer Institut weiterentwickelt und pharmakologisch optimiert auf Grund von Resultaten aus einer EU geförderten COST Initiative (European Kooperation in Science & Technology). Dieses therapeutisch wirksame, mit  $^{177}\text{Lu}$  markierte Radiopharmakon wird derzeit in Zusammenarbeit mit dem Universitätsspital Basel in Patientinnen resp. Patienten, die an medullärem Schilddrüsenkarzinom leiden, erfolgreich getestet.

**Radiopharmaka gegen den Cannabinoid-Rezeptoren Subtyp 2 (CB2R):** Dieses Einsatzgebiet von Radiopharmaka stammt aus dem Bereich der Neurologie. Erhöhte CB2R Expression wurden in der menschlichen Physiologie und Pathophysiologie und in verschiedener Krankheiten wie Neurodegeneration und Neuroinflammation nachgewiesen. Dieser Rezeptor weist unter basalen Bedingungen sehr niedrige bis nicht nachweisbare Expressionsniveaus im Gehirn auf. Unter pathologischen Bedingungen kann er auf aktivierten Mikroglia (Makrophagen des Gehirns) aber hochreguliert sein. Studien in den letzten Jahren ha-

ben gezeigt, dass CB2R bei neurodegenerativen Erkrankungen wie Huntington-Krankheit, Alzheimer-Krankheit sowie bei Neuroinflammation und insbesondere bei Multiple Sklerose (MS) und amyotrophe Lateralsklerose (ALS) ebenfalls hochreguliert wird. Dieses Expressionsprofil macht CB2R zu einem interessanten Ziel für die nichtinvasive Bildgebung und möglicherweise auch für die Therapie. Mit Unterstützung des Muskelzentrum des Kantonsspital St. Gallen und der Roche Basel hat die ETHZ den CB2R-spezifischen PET Liganden [ $^{18}\text{F}$ ]CB2-R1 entwickelt. Erste Ergebnisse zeigten, dass der neuartige PET-Ligand spezifisch an humane ALS-Rückenmarkgewebe bindet. Dieser Befund bestätigt die Hypothese, dass bei ALS-Patienten der CB2R tatsächlich im Rückenmark exprimiert ist. Derzeit wird an der klinischen Umsetzung dieses neuartigen PET-Radioliganden gearbeitet.

Diese ausgewählten, translationalen, radiopharmazeutischen Forschungsprojekte zeigen, wie multidisziplinär und komplex die radiopharmazeutische Forschung ist, und belegt gleichzeitig das Potential für die Diagnostik und Therapie.

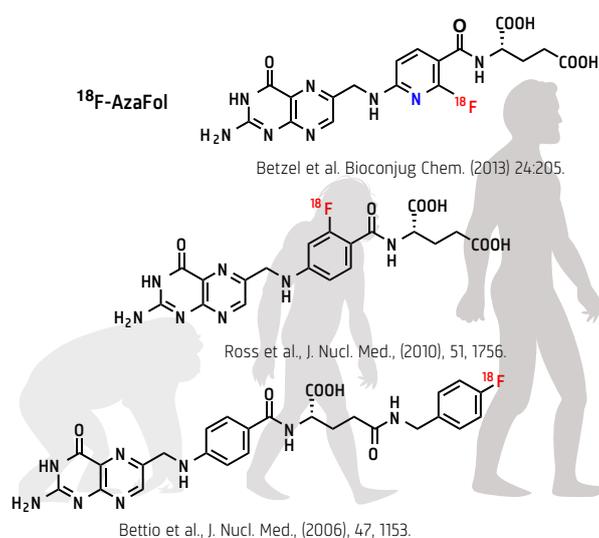


Abb. 4: (links) Sukzessive Entwicklung neuer  $^{18}\text{F}$ -Folatderivate bis hin zu [ $^{18}\text{F}$ ]-AzaFol; (rechts) Klinische Anwendung von [ $^{18}\text{F}$ ]-AzaFol in einer Patientin mit metastasiertem Ovarialkarzinom (gelbe Pfeile markierten die Metastasen) (PET/CT Scans am USZ durchgeführt). (Bild links: macrovector/freepik, Foto rechts: Universitätsspital Zürich)

## Weitere ausgewählte Beispiele radiopharmazeutischer Forschung am PSI

Nicholas P. van der Meulen und Cristina Müller,  
Paul Scherrer Institut

Ein besonderer Forschungsschwerpunkt am PSI liegt auf der Herstellung und präklinischen Prüfung von exotischen (nicht standardisierten) Radiometallen für die medizinische Anwendung. Ziel ist es, diagnostische und therapeutische Radionuklide desselben Elements (Radioisotope) zu untersuchen, die es ermöglichen würden, chemisch-identische Radiopharmaka zur Bildgebung (Diagnose) und Behandlung von Krebserkrankungen (Therapie) einzusetzen, was dem theranostischen Konzept entspricht. Zwei Elemente, Scandium und Terbium, waren in diesem Zusammenhang von besonderem Interesse und wurden am PSI verfolgt.

Scandium besitzt drei Radioisotope, welche eine therapeutische Anwendung ermöglichen.  $^{43}\text{Sc}$  ( $T_{1/2} = 3,9$  h) und  $^{44}\text{Sc}$  ( $T_{1/2} = 4,0$  h) können beide für die Diagnose mittels PET angewendet werden, während  $^{47}\text{Sc}$  ( $T_{1/2} = 3,35$  d) für die therapeutische Anwendung vorgesehen ist, da es sowohl  $\beta^-$ -Partikel als auch  $\gamma$ -Strahlung emittiert, die für eine SPECT-basierte Dosimetrie geeignet ist.  $^{44}\text{Sc}$  wurde erstmals aus angereicherten  $^{44}\text{Ca}$ -Targets am Forschungszyklotron Injektor II des PSI hergestellt. Die Trennung von  $^{44}\text{Sc}$  vom Target Material wurde mit chromatographischen Methoden entwickelt und im Laufe der Jahre optimiert, so dass das Radionuklid in hoher Aktivität und mit hoher radionuklidischer Reinheit zur Verfügung gestellt werden kann.  $^{44}\text{Sc}$  wurde in zahlreichen präklinischen Experimenten mit einem selbst entwickelten Folat-Konjugat sowie mit klinisch eingesetzten Targeting Molekülen wie DOTATOC und PSMA-617 untersucht. Auch wenn sich die Herstellung von  $^{43}\text{Sc}$  als anspruchsvoller erwiesen hat, wäre dieses Radionuklid aufgrund des Fehlens einer energiereichen  $\gamma$ -Strahlung vorteilhafter als das  $^{44}\text{Sc}$ -Pendant. Es besteht die Perspektive, radionuklidisch reines  $^{43}\text{Sc}$  an einem medizinischen Zyklotron mit Deuteronen über die Kernreaktion  $^{42}\text{Ca}(d,n)^{43}\text{Sc}$  zu erzeugen.  $^{47}\text{Sc}$  wurde in einem Hochflussneutronenreaktor an der ILL in Grenoble, Frankreich, unter Verwendung der  $^{46}\text{Ca}(n,\gamma)^{47}\text{Ca} \rightarrow ^{47}\text{Sc}$ -Reaktion hergestellt, die eine mehrmalige Trennung von  $^{47}\text{Sc}$  vom Ca-Target ermöglichte. Pilotstudien mit tumortragenden Mäusen bestätigten das therapeutische Potenzial von  $^{47}\text{Sc}$ -folat und die Möglichkeit, präklinische SPECT Messungen durchzuführen.

Terbium ist insofern einzigartig, als es vier medizinisch interessante Radioisotope besitzt,  $^{149}\text{Tb}/^{152}\text{Tb}/^{155}\text{Tb}/^{161}\text{Tb}$ .  $^{155}\text{Tb}$  ( $T_{1/2} = 5,32$  d) und  $^{152}\text{Tb}$  ( $T_{1/2} = 17,5$  h) können für SPECT respektive PET verwendet werden. Beide Radionuklide sind für die Dosimetrie vor der Anwendung

der Radiolanthanidtherapie von Interesse sind.  $^{152}\text{Tb}$  und  $^{155}\text{Tb}$  wurden durch protoneninduzierte Spallation hergestellt, gefolgt von einer Massentrennung in der ISOLDE-Anlage am CERN, Genf, und danach einer chemischen Trennung vom Targetmaterial am PSI. Beide Radiometalle wurden in präklinischen Experimenten mit einer Vielzahl von Tumor-Targeting-Molekülen wie Folsäure und DOTATOC auf ihre Bildfähigkeit untersucht.  $^{152}\text{Tb}$  war das erste Tb-Isotop, das in zwei klinischen Pilotanwendungen in der Zentralklinik, Bad Berka, Deutschland, zum Einsatz kam. Die Zerfallseigenschaften von  $^{161}\text{Tb}$  ( $T_{1/2} = 6,89$  d) ähneln denen des klinisch verwendeten  $^{177}\text{Lu}$ , aber die zusätzliche Emission von Konversions- und Augerelektronen macht es attraktiv für eine kombinierte  $\beta^-$ -/Augerelektrotherapie.  $^{161}\text{Tb}$  wird an einer Neutronenquelle (z.B. der SINQ des PSI) oder einem Kernreaktor in Analogie zu  $^{177}\text{Lu}$  trägerfrei unter Verwendung der  $^{160}\text{Gd}(n,\gamma)^{161}\text{Gd} \rightarrow ^{161}\text{Tb}$ -Reaktion hergestellt. Anschliessend folgt die chemische Trennung des gewünschten Produkts vom Gd Target. Aufgrund der ähnlichen chemischen Eigenschaften der Lanthanide Gd und Tb ist die chemische Trennung schwierig, hat sich aber bei PSI gut etabliert.  $^{161}\text{Tb}$  wurde in präklinischen Experimenten verwendet, um die potenzielle Überlegenheit gegenüber  $^{177}\text{Lu}$  mit Folatliganden und PSMA-Targeting-Molekülen zu untersuchen. Es wurde nachgewiesen, dass  $^{161}\text{Tb}$ -markierte Ligandenwirkstoffe das gleiche Gewebeverteilungsprofil zeigen wie die  $^{177}\text{Lu}$ -markierten Pendants. Es wurde jedoch gezeigt, dass  $^{161}\text{Tb}$ -basierte Radioliganden effektiver sind, um Krebszellen in vitro und in vivo abzutöten, als ihre  $^{177}\text{Lu}$ -markierten Pendants, wenn sie bei gleicher Aktivität angewendet werden.

$^{149}\text{Tb}$  ( $T_{1/2} = 4,1$  h) wurde für eine gezielte  $\alpha$ -Therapie mit der Möglichkeit der PET-Bildgebung vorgeschlagen.  $^{149}\text{Tb}$  wurde an der ISOLDE-Anlage am CERN produziert und anschliessend am PSI mittels chemischer Trennverfahren aufgereinigt. Die jüngsten präklinischen Experimente zeigten eine signifikante Verzögerung des Wachstums von Prostata-tumoren bei Mäusen, die mit  $^{149}\text{Tb}$ -PSMA-617 behandelt wurden.  $^{149}\text{Tb}$  emittiert zudem  $\beta^+$ -Strahlung, welche mittels PET detektiert werden kann. Die einzigartige Möglichkeit, einen  $\alpha$ -Emitter zu visualisieren, macht dieses Radiometall für zukünftige klinische Anwendungen sehr attraktiv. In diesem Zusammenhang ist es unser Ziel, eine Produktionsstätte am 590 MeV-Protonenbeschleuniger des PSI zu installieren, um Spallationsreaktionen durchführen zu können, welche mit einem Masseseparator gekoppelt sind.

Zum jetzigen Zeitpunkt sind  $^{161}\text{Tb}$  und  $^{155}\text{Tb}$  vielversprechend in Bezug auf eine Produktion, in einer Qualität und Quantität, welche für eine klinische Umsetzung ausreichen ist, was für die nahe Zukunft geplant ist.

$^{64}\text{Cu}$  ist ein weiteres Radiometall, das am PSI weiterentwickelt wurde. Ein neues chemisches Trennsystem mit Kationenaustauscher wurde entwickelt, während auch präklinische Untersuchungen durchgeführt wurden, wobei das Produkt mit NODAGA-basierten Molekülen markiert wurde.

### Radioanalytische Analysen im Bereich der Radiopharmazie und Radiotoxikologie (GCR) am Institut de Radiophysique (IRA)

*Marietta Straub, GCR, IRA, CHUV Lausanne*

Die Gruppe Radiopharmazeutische Chemie des Radio-physikalischen Instituts (IRA-GCR) des CHUV arbeitet einerseits auf dem Gebiet der Radiopharmazeutischen Chemie zur Überwachung der Qualität Radiopharmazeutischer Produkte in der Schweiz und ist andererseits in der Entwicklung von Methoden für die Inkorporationsüberwachung von Radionukliden tätig.

Die Gruppe wird vom Bundesamt für Gesundheit für Projekte im Zusammenhang mit der Überwachung des Schweizer Radiopharmamarktes beauftragt und stellt auf Schweizer Ebene Expertise bei der Registrierung neuer Radiopharmazeutika durch Swissmedic und Expertise bei den radiopharmazeutischen Qualitätsanforderungen zur Verfügung. Im Rahmen dieser Mandate testet und entwickelt die Gruppe zum Beispiel analytische Methoden zur Qualitätskontrolle von Radiopharmazeutika in der Nuklearmedizin. Es werden Charakterisierungen von radionuklidischen und radiochemischen Verunreinigungen durchgeführt und neue Methoden entwickelt, und werden Analysemethoden für verschiedene Radiopharmazeutika getestet. Radionuklidreinigungungsverfahren mittels HPLC (Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie) und TLC (Dünnschichtchromatographie), sowie Qualitätskontrollanalysen, Partikelgrößenanalysen, und Verfahren zur Identifikation chemischer Verunreinigungen werden regelmäßig eingesetzt. Die Gruppe verfügt auch über die notwendigen Geräte (HPLC, TLC-Leser, Aktivitätsmessgeräte, HPGe und NaI für die Gammaskopimetrie, Flüssigszintillationszähler usw.) zur Erfüllung ihrer Aufgaben.

### Aufnahme von radioaktiven Stoffen: Radiotoxikologie

*Marietta Straub, Pascal Froidevaux, IRA, CHUV, Lausanne*

In den Labors IRA-GRE und IRA-GCR werden von den Überwachungsbehörden akkreditierte radiotoxikologische Messungen durchgeführt, um das Personal zu überwachen, das mit offenen radioaktiven Quellen oder in potenziell kontaminierten Bereichen arbeitet. Die wichtigsten Absorptionswege wie Inhalation, Einnahme, Injektion oder offene Wunden werden untersucht und spezifische Verfahren für die Routine- und Notfallüberwachung entwickelt. Nach dem Eintritt in den Körper werden radioaktive Stoffe im Blut und in den Organen verteilt, bevor sie über Stoffwechselwege ausgeschieden werden. Einige Stoffe können sich in bestimmten Organen anreichern und werden nur teilweise eliminiert oder sogar vollständig zurückgehalten. Die Dauer ihres Aufenthaltes im Körper hängt von ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften sowie ihren individuellen physiologischen Eigenschaften ab und kann je nach Substanz stark variieren. Einige Nuklide erfordern radiotoxikologische Analysen und in vitro Messungen: Urin, Blut oder Stuhlproben (hauptsächlich für reine Alpha- und Betastrahler). Abhängig vom Radionuklid können in-vitro-Messungen eine chemische Separierung erfordern. Für diese Messungen ist das IRA derzeit für folgende Radionuklidverfahren akkreditiert:  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{33}\text{P}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{45}\text{Ca}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ .

## Forschung zur sicheren Entsorgung von Radionukliden

Eine sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle aus der Kerntechnologie und von Anwendern radioaktiver Substanzen (z.B. Spitäler) bedarf fundierter Kenntnisse radiologischer resp. radiochemischer und geochemischer Prozesse. In der Schweiz wird diese Aufgabe hauptsächlich im Auftrag der NAGRA gemeinsam vom Paul Scherrer Institut und der Universität Bern durchgeführt.

*Sergey Churakov, Labor für Endlagersicherheit,  
Paul Scherrer Institut und Institut für Geologie,  
Universität Bern*

Die radioaktiven Abfälle der Schweiz stammen derzeit zu zwei Dritteln aus dem Betrieb der Kernkraftwerke und zu einem Drittel aus der Medizin, Industrie und Forschung. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich dieses Verhältnis mit dem anstehenden Rückbau der Schweizer Kernkraftwerke stark verschieben wird. In der Schweiz werden die Abfälle je nach Inventar als hochaktive Abfälle (HAA), langlebige mittelaktive Abfälle (LMA) und kurzlebige schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) unterteilt. HAA beinhalten abgebrannte Brennelemente und verglaste Abfälle aus Wiederaufarbeitung. Wegen hoher thermischer Leistung, die durch Zerfall der Spaltprodukte entsteht (sogenannte Restwärme) werden HAA auch als wärmeproduzierende Abfälle klassifiziert. Es braucht bis zu einer Million Jahre bis die Radionuklide in HAA soweit zerfallen sind, dass die restliche Aktivität demjenigen von natürlichem Uranerz entspricht. LMA/SMA benötigen etwa 100'000 Jahre bis die radiologische Aktivität demjenigen von natürlichem Gestein in der Schweiz entspricht.

### Geologische Tiefenlagerung

Aufgrund der langen Zerfallszeiten und dem hohem radiologischen Risiko ist es international anerkannt, dass mit heutiger Stand der Technik einzig die geologische Tiefenlagerung eine Lösung zum Schutz von Mensch und Umfeld bietet.

In der Schweiz wurden drei geeignete Standorte für geologische Tiefenlagerung identifiziert und werden derzeit intensiv untersucht. Diese Standorte befinden sich in tonreichen Gesteinen, die zu sogenannten Opalinustonformationen gehören.

Das Sicherheitskonzept für die geologische Tiefenlagerung basiert auf mehreren technischen und natürlichen Barrieren. Diese Barrieren ermöglichen einerseits die Ausbreitung von Radionukliden zu blockieren, bzw. zu verlangsamen, und andererseits einen möglichen Wassereintritt von aussen zu reduzieren. Keine der technischen Barrieren genügt für sich allein genommen, die Radionuklidfreisetzung zu vermeiden. Schliesslich trägt das geologische Wirtsgestein wesentlich zur Rückhaltung der Radionuklide bei.

Aufgrund der unterschiedlichen Toxizitäten und der thermischen Leistung haben HAA und SMA unterschiedliche technische Anforderungen. Die verglasten HAA Abfälle und abgebrannte Brennelemente werden im Stahlbehälter eingepackt und so eingelagert. Der Zwischenraum im Endlagertunnel wird dann mit Bentonit aufgefüllt. Bentonit hat ausgeprägt starke Abdichtungseigenschaften.

Stahlbehälter mit dem verglasten HAA Abfall erlauben, die Radionukliden für eine erste Zeitperiode vor dem Eintritt von Wasser zu schützen. Gemäss einer konservativen Abschätzung werden die Endlagerbehälter nach etwa 10 000 Jahren durchkorrodieren und durchlässig werden. SMA und LMA Abfälle werden in Gegensatz zu HAA mittels einer Zementmatrix befestigt.

## Tiefenlager Radiochemie

Wegen der sehr langen Einlagerungszeiten, des komplexen Inventars sowie einer heterogenen Abfallmatrix stellt ein geologisches Tiefenlager ein sehr komplexes System dar. Eine umfassende Beschreibung der chemischen Prozesse in einem Endlager über die Zeit und Raum benötigt Kenntnisse aus verschiedensten Fachrichtungen wie Geo- und Radiochemie, Material- und Umweltwissenschaft, sowie Felsmechanik und Hydrogeologie. Aufgrund der chemischen Wechselwirkungen und Phasenumwandlungen können die technischen Barrieren die Freisetzung von Radionukliden nicht komplett verhindern, sondern nur verlangsamen. Die Sicherheitsanalysen von Endlagern basieren auf einem detaillierten Verständnis von Freisetzungsmechanismen. Die wichtigsten Prozesse für die Ausbreitung der Radionuklide sind Diffusion, Sorption, und Minerallöslichkeit. Diese Prozesse bestimmen die maximalen Konzentrationen und den Freisetzungspfad der Radionuklide in Nah- und Fernfeld.

Die Planung, Implementierung und der Abschluss der Tiefenlager ist ein Generationenprojekt, das über einen Zeitraum von mehr als 100 Jahren geht. An diesem Projekt werden mehrere Generationen von Ingenieur- und Naturwissenschaftlerinnen und Wissenschaftler arbeiten. Die Grundlage zu den heutigen Konzepten zur Tiefenlagerung stammen aus dem 20. Jahrhundert. Die Schweiz wird auch in Zukunft Fachkräfte benötigen, um die Tiefenlagersicherheit auf dem aktuellen Stand der Technik und der Wissenschaft evaluieren zu können.

## Kompetenzzentren in der Schweiz

Das Labor für Endlagersicherheit (LES) am Paul Scherrer Institut ist das schweizerische Kompetenzzentrum für die Geochemie in einem geologischen Tiefenlager. Das PSI bietet mit seinen Hot-Zellen, den A- und C-Laboratorien, der Synchrotron Lichtquelle Schweiz (SLS), der Spallations-Neutronenquelle (SINQ), dem Zugang zu Hochleistungsrechnern und weiteren Anlagen eine einzigartige Infrastruktur. LES führt ein breites Experimentalprogramm zum besseren Verständnis der Rückhaltung und des Transports von Radionukliden in porösen Materialien und der geochemischen Wechselwirkungen in geologischen Tiefenlagern durch. Weiter entwickelt das LES einheitliche Betrachtungen von Transport- und Sorptionsprozessen, sowie von Grenzflächenreaktionen und befasst sich mit der Hochskalierung dieser Prozesse auf natürliche Systeme. Mit seinen Daten, Modellen und Expertenkenntnissen liefert das LES einen wesentlichen Beitrag zur wissenschaftlichen Basis dieser Beurteilungen. Durch Betreuung von Master- und Doktorarbeiten leisten die LES-Mitarbeitenden einen wesentlichen Beitrag zur Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses und zum Wissenstransfer in den Bereichen der nuklearen Entsorgung und Umweltgeochemie.

## Hauptautoren



**Roger Alberto** studierte Chemie an der ETH Zürich und doktorierte bei Prof. G. Anderegg über Fluorokomplexe von Technetium. Nach einem Post Doc als Humboldt Fellow bei Prof. W.A. Herrmann (TU München) und bei Prof. A. Sattelberger (Los Alamos National Lab) forschte er bei Prof. A. Schubiger am PSI in Radiopharmazie. 1999 erhielt er einen Ruf an die Universität Zürich. Er leitete das Institut für anorganische Chemie von 2006 bis 2012 und 2013-2016 das Institut für Chemie. Seit 2013 ist er für das universitäre Schwerpunktprogramm «Light to Chemical Energy Conversion» verantwortlich. Er wurde unter anderem mit dem «Award in Bioorganometallic Chemistry», dem «Alexander von Humboldt Research Award» und der «Heilbronner-Hückel Lectureship» der GDCh ausgezeichnet. Seine Forschungsinteressen sind die Technetium- und Bioorganometallchemie sowie die künstliche Photosynthese.



**Mario Burger** lernte Chemielaborant, studierte an der Fachhochschule Burgdorf Chemieingenieur und anschliesslich an der Universität Fribourg Chemie. Er dissertierte an der Universität Bern in Radio- und Umweltchemie. In der Dissertation und einem Postdoc mit der NASA wurden Meteorite mittels Neutronenaktivierungsanalyse auf Spurenelemente zur genaueren Bestimmung der kosmischen und irdischen Alter bestimmt. Im Herbst 1991 ist er in das Labor Spiez als Radiochemiker eingetreten und über verschiedene Etappen Chef der Gruppe Radioaktivität/Radiochemie geworden, die er über 10 Jahre erfolgreich geführt hat. Er war in zwei Perioden als Chefinspektor der UNSCOM im Irak auf dem chemischen Gebiet tätig. Er ist aktiv in internationalen Abrüstungsbestrebungen auf dem nuklearen Gebiet (CTBTO, NPT, etc.) und seit 15 Jahren als Senior Scientific Advisor des Umweltprogramms der UNO (UNEP) im Post-Conflict and Disaster Management Umfeld aktiv. Er leitet seit 10 Jahren den Fachbereich Nuklearchemie des Labor Spiez der fokussiert darauf ist, im nationalen und internationalen Umfeld mit der nach ISO/EN 17025 akkreditierten Prüfstelle STS0028 auf dem anorganisch- und radioanalytischen Gebiet Resultate von höchster Qualität zu generieren. Er ist IAEA Collaborating Center, in einigen IAEA technischen Kooperationsprojekten aktiv (z.B. Marshall Islands, Rückbauanalytik KKW, etc.), ist national designiertes Laboratorium für die nukleare Forensik und dort international verknüpft, in BAG-Projekten wie Radium-Altlasten, usw. integriert.



**Heinz Gäggeler** studierte Chemie an der Universität Bern und promovierte 1973 unter Prof. H.R. von Gunten auf dem Gebiet der Kernspaltung. Eine zehnjährige Auslands­tätigkeit führte ihn an das Joint Institute for Nuclear Research in Dubna, vormalige UdSSR, und die Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt, BRD. Hauptforschungsgebiet war die Synthese und das Studium chemischer Eigenschaften schwerster Elemente. 1984 wurde er Leiter der Abteilung Chemie am EIR in Würenlingen, ab 1988 umbenannt in Labor für Radiochemie des neugegründeten PSI. 1989 habilitierte er an der Abteilung Physik der ETHZ in «Nuclear Chemistry». 1993 wurde er Professor für Radiochemie an der Universität Bern, unter Beibehaltung seiner Anstellung am PSI. Seiner Gruppe gelang die erstmalige chemische Untersuchung von vier Elementen (Sg, Bh, Hs, Cn). Zudem engagierte er sich in Paläoatmosphärenstudien unter Verwendung von Gletschereis als Archiv. Er war von 2000-2003 Direktor des Departements für Chemie und Biochemie der Universität Bern, von 2003-2009 Leiter des Departements Teilchen und Materie und von 2003-2007 stv. Direktor des Paul Scherrer Instituts. Zudem leitete er verschiedene nationale und internationale Vereinigungen. 2007 erhielt er den Dr. h.c. des JINR in Dubna für seine Beiträge zur Chemie schwerster Elemente, sowie 2016 die Vladimir Majer Medal der Tschechischen Chemischen Gesellschaft.

## Weitere Autorinnen und Autoren



**Sergey Churakov** ist ordentlicher Professor für Mineralogie an der Universität Bern im Institut für Geowissenschaften und leitet seit 2014 das Labor für Endlagersicherheit am Paul Scherrer Institut. Er studierte Geochemie und angewandte Mathematik an der Lomonossow Universität in Moskau. Er begann seine Forschungskarriere am Geo-Forschungszentrum in Potsdam und promovierte in Naturwissenschaften an der Technischen Universität Berlin im Jahr 2001. Nach seinem Doktorat arbeitete er an Forschungsprojekten am Schweizerischen Rechenzentrum in Lugano, an der ETH Zürich, und kam 2004 ans PSI. Seine Forschung umfasst multidisziplinäre Themen der Umweltgeochemie und Mineralogie mit dem Fokus auf das molekulare Verständnis der Prozesse des Transports und der Rückhaltung von Radionukliden in natürlicher Umgebung und in geotechnischen Systemen.



**Robert Eichler** studierte Chemie in Dresden und Darmstadt und promovierte an der Universität Bern (H.W. Gäggeler) zum Thema der Erstmaligen Chemischen Untersuchung des Bohrium (Element 107). Dafür wurde er mit dem GDCH Promotionspreis und dem Promotionspreis der Universität Bern ausgezeichnet. 2001/02 folgte ein Postdoc-Aufenthalt an der Universität Mainz und der Gesellschaft für Schwerionenforschung Darmstadt, BRD. 2002 wurde er als Gruppenleiter der Forschungsgruppe Schwere Elemente am Paul Scherrer Institut angestellt. 2004/05 wurde er durch den SNF mit einem Forschungsaufenthalt am Lawrence Berkeley Nationallabor gefördert, simultan zur Gruppenleitung am PSI. Seit 2017 ist er Leiter des Labors für Radiochemie am Paul Scherrer Institut.



**Pascal Froidevaux** ist leitender Wissenschaftler und Chemiker am Institut für Strahlenphysik des Universitätsspitals Lausanne. Er erhielt seinen Dokortitel in Chemie unter der Aufsicht von J.-C. Bünzli an der Universität Lausanne. Von 1995 bis 1997 war er als Postdoktorand an der Universität von Westaustralien tätig. Seit 1998 arbeitet er als (radio)analytischer Chemiker auf dem Gebiet der Radioökologie am Institut für Strahlenphysik. Seine Forschungsinteressen umfassen die Analyse von Radionukliden, die Mobilität und Bioverfügbarkeit von Radionukliden, die Auswirkungen von Radionukliden auf den Menschen und die Entwicklung von Festphasenextraktionsharzen zur Analyse von Radionukliden.



**Nicholas van der Meulen** stammt aus Kapstadt, Südafrika und erhielt dort seine Ausbildung. Seinen Dokortitel in Chemie erhielt er von Stellenbosch University im Jahr 2008, wobei sich seine Doktorarbeit auf folgende Themen konzentrierte: die Herstellung verschiedener Radionuklide, vorwiegend für medizinische Zwecke. Er arbeitete als Forschungschemiker am iThemba-Laboratory for Accelerator Based Sciences für 17 Jahre, bevor er die Position des Gruppenleiter: Radionuklidentwicklung am Paul Scherrer Institut in 2013 antrat. Er ist aktiv an der Entwicklung von exotischen Radionukliden beteiligt, sowie der Betreuung der Studierenden in diesem Bereich.



**Cristina Müller** studierte von 1995-2000 Pharmazie an der Universität Bern und an der ETH Zürich. Sie führte Ihre Doktorarbeit im Gebiet der Radiopharmazeutischen Wissenschaften am Paul Scherrer Institut durch und erlangte im Jahr 2005 den Dokortitel (PhD) der ETH Zürich, welche sie mit der ETH Medaille auszeichnete. Anschliessend arbeitete C. Müller als Postdoktorandin am Erasmus Medical Center in Rotterdam, Holland. Nachdem sie ans Paul Scherrer Institut zurückgekehrt war, erhielt sie ein Ambizione Fellowship des Schweizerischen Nationalfond. Ihre Habilitationsschrift wurde 2014 von der ETH Zürich genehmigt, welche ihr den Titel der Privatdozentin (PD) verlieh. Im gleichen Jahr erhielt sie den Ruzicka Preis der ETH Zürich. Zurzeit, leitet C. Müller eine etablierte Forschungsgruppe am Paul Scherrer Institut. Ihre Forschungsschwerpunkte liegen in der Entwicklung neuer Radioliganden für die Radiotheragnostik von Krebs und anderen Erkrankungen und der Untersuchung von «nicht-standard» (exotischen) Radionukliden für die Bildgebung und Therapie. Im Jahr 2018 erhielt sie den Marie Curie Award am Jahreskongress der Europäischen Vereinigung für Nuklearmedizin (EANM) in Düsseldorf.



**Roger Schibli** ist gewählter Professor am Departement Chemie und Angewandte Biowissenschaften der ETH Zürich und Laborleiter am Paul Scherrer Institut (PSI) im Bereich BIO. Er leitet das Zentrum für Radiopharmazeutische Wissenschaft (CRS). Das CRS wird von der ETH Zürich, dem Paul Scherrer Institut und das Universitätsspital Zürich unterstützt. Prof. Schibli studierte Chemie an der Universität Basel. Seine frühen Forschungen widmete sich der Entwicklung neuer, metallorganische Komplexe der Elemente Technetium und Rhenium. Nach seinem Abschluss verbrachte er zwei Jahre an der Universität von Missouri-Columbia als Postdoc.

2004 wurde er als Assistenzprofessor ans Institut für Pharmazeutische Wissenschaften der ETH Zürich berufen. Prof. Schiblis Forschung fokussiert auf die Entwicklung neuer, gezielter Radiodiagnostika und -therapeutika für die Anwendung am Menschen. Dazu gehören die Herstellung neuer Radionuklide, die Identifizierung neuartiger Ziel-moleküle und deren biologische und pharmakologische Charakterisierung und Optimierung.



**Dorothea Schumann** studierte Chemie an der Technischen Universität Dresden und erwarb die Doktorwürde 1992 nach einem 5-jährigen Arbeitsaufenthalt am Vereinigten Kernforschungsinstitut in Dubna (Russland) mit Arbeiten zur «Elektromigration von Radionukliden in trägerfreier Elektrolytlösung». Bis 1999 war sie als wissenschaftliche Assistentin in der Arbeitsgruppe «Radiochemie» im Institut für Analytik der Technischen Universität Dresden angestellt und untersuchte die chemischen Eigenschaften superschwerer Elemente. Nach einem kurzen Zwischenstopp als Projektmanagerin in der Firma Wälischmiller wechselte sie 2002 ans Paul Scherrer Institut, wo sie seitdem als Gruppenleiterin der Arbeitsgruppe «Isotopen- und Targetchemie» tätig ist. Ihr Haupt-Forschungsinteresse liegt in der Entwicklung von Trennmethoden zur Gewinnung exotischer Radionuklide aus bestrahlten Materialien sowie der Bestimmung von Halbwertszeiten langlebiger Isotope.



**Marietta Straub** promovierte in Wissenschaften an der ETHZ innerhalb einer Zusammenarbeit mit der Princeton University, wo sie während des Doktorats 4 Jahre als Gastwissenschaftlerin tätig war. Nach ihrer Promotion nahm sie eine Stelle als wissenschaftliche Mitarbeiterin in der radioökologischen Gruppe am IRA, CHUV Lausanne, an. Zwei Jahre später wurde sie zur Gruppenleiterin der chemischen radiopharmazeutischen Gruppe. Von 2015 bis 2016 war sie für die Radiopharmazeutische Produktion in der Nuklearmedizin am CHUV verantwortlich und absolvierte eine CAS Ausbildung für radiopharmazeutische Chemie und Radiopharmazie an der ETH. Ende 2016 verließ sie die Radiopharmazeutische Produktion und konzentrierte ihre Gruppe auf Entwicklungen von Inkorporation Messungen und auf die Mandate mit dem BAG und Swissmedic, für radiopharmazeutische Qualität Sicherung in der Schweiz. Seit 2020 ist sie Gruppenleiterin der Gruppe Radioanalytische Chemie am IRA, CHUV Lausanne (Radio-ökologie und Radiopharmazeutische Chemie).



**Sönke Szidat** studierte Chemie und promovierte an der Leibniz Universität Hannover. Im Jahr 2000 kam er als Postdoc zum Labor für Radio- und Umweltchemie an die Universität Bern. Er wurde unabhängiger Forschungsgruppenleiter und Dozent in 2010 und assoziierter Professor in 2017. Seit 2012 leitet Sönke Szidat das LARA, das Labor zur Analyse von Radiokohlenstoff mit AMS an der Universität Bern. Er erhielt den Atmospheric Chemistry and Physics (ACP) Award der SCNAT in 2008 und den Fritz-Strassmann-Preis der Fachgruppe Nuklearchemie der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) in 2009. In seiner Forschung verwendet er  $^{14}\text{C}$  für die Quellenzuordnung von atmosphärischen Komponenten wie kohlenstoffhaltigen Aerosolen,  $\text{CO}_2$  und  $\text{CH}_4$  und entwickelt gekoppelte analytische Systeme zur  $^{14}\text{C}$ -Messung.



**Andreas Türler** studierte Chemie an der Universität Bern und erhielt dort seine Doktorwürde im Jahr 1989 auf dem Gebiet der Nukleontransferreaktionen. Anschliessend arbeitete er drei Jahre als Postdoctoral Fellow in der Gruppe von Prof. Darleane C. Hoffman am Lawrence Berkeley National Laboratory in den USA auf dem Gebiet der Chemie der schwersten Elemente. Anschliessend zog er zurück in die Schweiz ans Paul Scherrer Institut. Die Gesellschaft Deutscher Chemiker zeichnete ihn 1994 mit dem »Fritz-Strassmann-Preis« aus. Die Habilitation erfolgte 2000 an der Universität Bern gefolgt von einem Ruf auf den Lehrstuhl für Radiochemie und Direktor des Instituts für Radiochemie an der Technischen Universität München. In 2009 folgte ein Ruf auf den Lehrstuhl für Radiochemie an der Universität Bern und als Leiter des Labors für Radio- und Umweltchemie am Paul Scherrer Institut, diese Position hielt er bis 2017 inne. Gegenwärtig beschäftigt sich Prof. Türler an der Universität Bern mit der Entwicklung neuer Radionuklide für Anwendungen in der Nuklearmedizin.

## Abkürzungsverzeichnis

<b>ALS</b>	Amyotrophe Lateralsklerose
<b>AMS</b>	Accelerator Mass Spectrometry
<b>BAG</b>	Bundesamt für Gesundheit
<b>BFE</b>	Bundesamt für Energie
<b>CB2R</b>	Cannabinoid-Rezeptoren Subtyp 2
<b>CCK2</b>	Cholezystokinin-2
<b>CHUV</b>	Centre hospitalier universitaire vaudois
<b>CINCH</b>	Modular European Education and Training Concept In Nuclear and Radio Chemistry
<b>CT</b>	Computertomographie
<b>CURML</b>	Centre universitaire romand de médecine légale
<b>DGT</b>	Diffusive gradients in thin films
<b>DOTATOC</b>	(1,4,7,10-Tetraazacyclododecan-1,4,7,10-tetraessigsäure D-Phe-cyclo[Cys-Tyr-D-Trp-Lys-Thr-Cys]-Thr(ol)
<b>EDA</b>	Eidgenössisches Departement für auswärtige Angelegenheiten
<b>EIR</b>	Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung (Vorläufer des PSI)
<b>ENSI</b>	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
<b>FR</b>	Folatzeptor
<b>GCR</b>	Groupe de chimie radiopharmaceutique (de l'Institut de radiophysique du CHUV)
<b>GMP</b>	Good Manufacturing Practice
<b>GRE</b>	Groupe de radioécologie der Uni Lausanne
<b>HAA</b>	Hochaktive Abfälle
<b>HPLC</b>	High-performance liquid chromatography
<b>IAEA</b>	International Atomic Energy Agency
<b>IRA</b>	Institut de Radiophysique Appliquée (Uni Lausanne)
<b>ISOLDE</b>	Isotope Separator On Line DEvice am CERN
<b>LES</b>	Labor für Endlagersicherheit am PSI
<b>LIP</b>	Labor für Ionenstrahlphysik der ETHZ
<b>LMA</b>	Langlebige mittelaktive Abfälle
<b>LS</b>	Labor Spiez
<b>METAS</b>	Bundesanstalt für Metrologie
<b>MRI</b>	Magnetic Resonance Imaging
<b>MS</b>	Multiple Sklerose/Massenspektrometrie
<b>MTK</b>	Medulläres Schilddrüsenkarzinom
<b>NAGRA</b>	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
<b>NAZ</b>	Nationale Alarmzentrale
<b>NODAGA</b>	1,4,7-triazacyclononane,1-gluteric acid-4,7-acetic acid
<b>PET</b>	Positronen-Emissions-Tomographie
<b>PSI</b>	Paul Scherrer Institut
<b>PSMA</b>	Prostata-spezifische Membran Antigen
<b>RIKEN</b>	Rikagaku Kenkyūjo, Physikalisch-chemisches Institut in Japan
<b>SBFI</b>	Staatssekretariat für Bildung, Forschung und Innovation
<b>SINERGIA</b>	Finanzierungsprogramm des SNF
<b>SINQ</b>	Swiss Spallation Neutron Source am PSI
<b>SLS</b>	Swiss [Synchrotron] Light Source am PSI
<b>SMA</b>	Kurzlebige schwach- und mittelaktive Abfälle
<b>SNF</b>	Schweizerischer Nationalfonds
<b>SPECT</b>	Single Photon Emission Computed Tomography
<b>StSV</b>	Strahlenschutzverordnung
<b>Swiss-FEL</b>	Swiss Free Electron Laser am PSI
<b>TLC</b>	Thin Layer Chromatography
<b>UNSCOM</b>	United Nations Special Commission
<b>USB</b>	Universitätsspital Basel
<b>USZ</b>	Universitätsspital Zürich
<b>UZH</b>	Universität Zürich
<b>VBS</b>	Eidgenössisches Departement für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport
<b>ZRW</b>	Zentrum für Radiopharmazeutische Wissenschaften (von ETHZ, PSI und USZ)
<b>ZWILAG</b>	Zwischenlager für alle Kategorien radioaktiver Abfälle in der Schweiz



### **SCNAT – vernetztes Wissen im Dienste der Gesellschaft**

Die **Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT)** engagiert sich regional, national und international für die Zukunft von Wissenschaft und Gesellschaft. Sie stärkt das Bewusstsein für die Naturwissenschaften als zentralen Pfeiler der kulturellen und wirtschaftlichen Entwicklung. Ihre breite Abstützung macht sie zu einem repräsentativen Partner für die Politik. Die SCNAT vernetzt die Naturwissenschaften, liefert Expertise, fördert den Dialog von Wissenschaft und Gesellschaft, identifiziert und bewertet wissenschaftliche Entwicklungen und legt die Basis für die nächste Generation von Naturwissenschaftlerinnen und Naturwissenschaftlern. Sie ist Teil des Verbundes der Akademien der Wissenschaften Schweiz.

