



GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER

FACHGRUPPE NUKLEARCHEMIE IN DER GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER



Forschung & Perspektiven



Frankfurt am Main, Januar 2018

IMPRESSUM

Herausgeber / Redaktion

Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V. (GDCh)
Fachgruppe Nuklearchemie
Varrentrappstraße 40-42
60486 Frankfurt am Main
fg@gdch.de
www.gdch.de/nuklearchemie

Grafik

PM-GrafikDesign
Peter Mück, Wächtersbach

Druck

Seltersdruck Vertriebs- und Service GmbH & Co KG,
Selters

* Aus Gründen der besseren Lesbarkeit haben wir im Text nur die männliche Form der Personenbezeichnung verwendet.
Mit den gewählten Formulierungen sind immer beide Geschlechter angesprochen.

I. EINLEITUNG

Die Fachgruppe Nuklearchemie in der Gesellschaft Deutscher Chemiker repräsentiert die Wissenschaftler* und Ingenieure, die bei ihren Arbeiten mit radioaktiven Stoffen und ionisierender Strahlung umgehen und diese für Zwecke der Forschung, Industrie, Medizin und Lehre nutzen. Die Tätigkeiten ihrer Mitglieder reichen von den rein grundlagenwissenschaftlichen Gebieten der Chemie radioaktiver Stoffe, wie den schwersten synthetischen Elementen über nuklearchemische Aspekte der Kernenergienutzung bis hin zur Verwendung von Radionukliden in den Lebens- und Umweltwissenschaften. Die Nuklearchemie umfasst die Bereiche der Kern-, Radio- und Strahlenchemie.

In ihrer mehr als 100-jährigen Geschichte, die mit der Entdeckung der Radioaktivität und der Radioelemente begann, hat die Nuklearchemie mit bahnbrechenden Entdeckungen, mit der Einführung bedeutender neuer Arbeitsmethoden und mit einer Vielzahl von innovativen wissenschaftlichen und technischen Anwendungen die Entwicklung der modernen Industriegesellschaft mitgestaltet. In der öffentlichen Wahrnehmung werden jedoch nuklearchemische Arbeiten überwiegend der nuklearen Energiegewinnung und dem nuklearen Brennstoffkreislauf zugeordnet – Themen, die in der Öffentlichkeit sehr kontrovers diskutiert werden. Diese Bereiche stellen nach wie vor bedeutende Themen für die Nuklearchemie dar.

Entsprechend der vielfältigen Möglichkeiten und der Fortentwicklung von Wissenschaft und Technik haben sich parallel verschiedene Schwerpunkte herausgebildet, die ebenfalls von großer grundlegender, gesellschaftlicher, ökologischer und ökonomischer Relevanz sind. Nuklearchemische Therapie- und Diagnoseverfahren sind beispielsweise aus den Lebenswissenschaften und der Medizin nicht mehr wegzudenken. Nuklearchemiker untersuchen die Elementsynthese in Sternen, sie erforschen die Struktur von Atomkernen, erzeugen die schwersten Elemente jenseits des Urans, die alle radioaktiv sind, und untersuchen deren chemische und physikalische Eigenschaften. Sie treibt unter anderem die Suche nach dem Verständnis an, was die Materie im Innersten zusammenhält. Das breite Spektrum nuklearchemischer Methoden macht deren Einsatz auch für ganz andere Sparten interessant: Auch in der Geologie, der Hydrologie, der Umweltforschung, dem Strahlenschutz oder der nuklearen Forensik kommt man nicht ohne das Handwerkszeug der Nuklearchemie aus.

Die vorliegende Broschüre soll einen Einblick in die vielfältigen Themen und Arbeitsfelder nuklearchemischer Forschung und Anwendung geben, die in den folgenden Schwerpunkten zusammengefasst werden können:

Grundlagenforschung	2
Chemie der schwersten Elemente	2
Actinidenchemie	4
Kosmochemie	5
Radioanalytik	6
Gesundheit und Umwelt	8
Nuklearchemie in den Lebenswissenschaften (Radiopharmazie)	9
Isotopengeochemie	10
Strahlenschutz und Radioökologie	11
Nukleare Forensik	12
Energie	13
Actinidenrecycling	15
Endlagerforschung	16
Reaktorchemie	17
Tritiumchemie	18
Lehre, Ausbildung und Kompetenzerhalt	19

II. ARBEITSSCHWERPUNKTE

GRUNDLAGENFORSCHUNG

Chemie der schwersten Elemente

Alle Elemente mit Ordnungszahlen Z bis 118 sind offiziell als entdeckt anerkannt und benannt. Die Suche nach neuen Elementen jenseits 118 ist ein spannendes aktuelles Forschungsgebiet. Die Abbildung zeigt das aktuelle Periodensystem der Elemente.

Elemente mit $Z \geq 104$ folgen den Actiniden und werden entsprechend als Transactiniden bezeichnet. Sie können in Kernfusionsreaktionen an Beschleunigerzentren hergestellt werden, allerdings nur in Raten von einzelnen Atomen pro Minute, Stunde, oder Tag. Alle ihre Isotope

1 H																	18 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57-103 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89-103 Ac-Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Das Periodensystem der Elemente. Die superschweren Elemente, mit $Z \geq 104$, sind hervorgehoben.

sind kurzlebig mit typischen Halbwertszeiten von Minuten, Sekunden oder noch weniger. Nur in ganz wenigen Fällen liegen diese über einer Stunde. Trotz der kurzen Lebensdauern und geringen Produktionsraten wurden die Transactinide Rutherfordium (Rf, Element 104), Dubnium (Db, 105), Seaborgium (Sg, 106), Bohrium (Bh, 107), Hassium (Hs, 108), Copernicium (Cn, 112) und Flerovium (Fl, 114) chemisch untersucht und ihre Eigenschaften mit denjenigen ihrer leichteren Homologen verglichen.

Durch die hohe Kernladung werden Elektronen mit hoher Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichte nahe am Kern

(z.B. s-Elektronen) auf sehr hohe Geschwindigkeiten beschleunigt und unterliegen einem relativistischen Massezuwachs. Der Einfluss solcher relativistischen Effekte auf chemische Eigenschaften lässt sich ideal an den allerschwersten chemischen Elementen untersuchen, da diese die höchste Kernladung aufweisen und die Effekte besonders groß sind.

In Experimenten in der flüssigen Phase mit miniaturisierten und automatisierten Hochleistungsflüssigchromatographie-Apparaturen wurde beispielsweise die Komplexbildung der Elemente Rf, Db und Sg in Mineralsäuren oder im

Fluoridsystem untersucht. Auch wurden Extraktionsstudien durchgeführt. In der Gasphase wurden alle Transactinide bis zum Hassium sowie Copernicium und Flerovium untersucht. Während die d-Elemente in Form von (Oxy)haliden (z.B. RfCl_4 , RfBr_4 , DbOCl_3 , SgO_2Cl_2 , BhO_3Cl), Oxiden (HsO_4) oder Oxid-Hydroxiden ($\text{SgO}_2(\text{OH})_2$) bei relativ tiefen Temperaturen flüchtig sind, können die p-Elemente im elementaren Zustand untersucht werden, da dieser eine hohe Flüchtigkeit aufweist. In den Experimenten wird die Flüchtigkeit und auch die Reaktivität der flüchtigen Spezies mit dem Chromatographiekolonnenmaterial (z.B. Quarz oder Au) untersucht und mit dem Verhalten der leichteren Homologen verglichen.

Die gewonnenen Daten können nur verstanden werden, wenn in theoretischen Rechnungen der Einfluss der Relativität korrekt berücksichtigt wird. Damit unterstützen die experimentellen Daten die Weiterentwicklung voll-relativistischer quantenmechanischer theoretischer Ansätze.

Aktuelle experimentelle Entwicklungen haben zum Ziel, bisher nicht zugängliche Elemente (z.B. Meitnerium (Mt, 109) oder Nihonium (Nh, 113)) und Verbindungsklassen (z.B. organometallische Verbindungen) zu untersuchen. Daraus werden vertiefte Erkenntnisse über den Einfluss relativistischer Effekte auf die Chemie erwartet.

Chemische Experimente sind elementspezifisch und erlauben dadurch die Präparation reiner Proben der schwersten Elemente, um so auch ihre Synthese und ihre nuklearen Eigenschaften in untergrundfreier Umgebung untersuchen zu können. Ein Ziel ist dabei die Synthese sehr langlebiger Nuklide, wie sie im Bereich der ‚Insel der Stabilität‘, die in theoretischen Modellen im Bereich neutronenreicher Isotope der Elemente mit $Z \sim 114-126$ vorhergesagt wird, erwartet werden.

Actinidenchemie

Die dem Actinium folgenden 14 Elemente im Periodensystem werden als Actiniden bezeichnet. Charakteristisch für sie ist ihre besondere elektronische Struktur, hervorgerufen durch das Auffüllen der 5f-Schale. Die Actiniden nehmen daher innerhalb des Periodensystems eine Sonderstellung ein, wodurch sich ein grundlegendes Interesse an ihrem chemischen Verhalten, der Koordinationschemie sowie der Bindungsverhältnisse und der elektronischen Struktur ihrer Verbindungen ergibt. Wichtig ist ihr chemisches Verhalten für die Herstellung von Kernbrennstoffen, die Wiederaufarbeitung von abgebrannten Kernbrennstoffen und für ihre Abtrennung von Spaltprodukten, um sie dann einer Kernumwandlung mit Hilfe von neuartigen Transmutationstechnologien zu unterziehen. In der Erdkruste kommen die dem Uran folgenden, auch als Transurane bezeichneten Actiniden nicht in wägbaren Mengen vor. Direkte Kenntnisse zum geochemischen Verhalten der Actiniden in geologischen Zeiträumen sind daher nicht zugänglich. Hieraus leitet sich ein weiterer Schwerpunkt der Actinidenchemie ab, das Studium des geochemischen Verhaltens der Actiniden in Hinblick auf die Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern hochradioaktiver Abfälle.

In der präparativen Chemie der Actiniden werden metallische und intermetallische Verbindungen synthetisiert und deren physikalischen Eigenschaften, wie das Auftreten komplexer magnetischer Ordnungsphänomene, Supraleitung und die Existenz schwerer Fermionen-Verbindungen, studiert. Die gezielte Synthese von metallorganischen Verbindungen und deren Untersuchung liefern

grundlegende Erkenntnisse über die Zusammenhänge zwischen Molekülsymmetrie und Ladungsverteilung. Neuerdings werden metallorganische Uranverbindungen auf ihre katalytischen Eigenschaften hin untersucht und die Anwendung kurzlebiger Uranisotope gebunden an biologisch relevante Moleküle in der medizinischen Therapie diskutiert. Im Zusammenhang mit der Suche nach alternativen Entsorgungswegen für langlebige radioaktive Abfallstoffe ergibt sich in jüngster Zeit wieder ein verstärktes Interesse an der Actinidenseparationschemie als vorgeschalteten Prozess für die Transmutation. Darüber hinaus finden Separationsmethoden verstärkt Anwendung im Bereich der Umweltanalytik zur quantitativen Erfassung der Actiniden im sub-nanomolaren Bereich.

Die Chemie der Actiniden in wässriger Lösung ist geprägt durch die hohe Ladung der Metallionen, die ausgeprägte Tendenz zur Wechselwirkung mit harten Pearson-Basen sowie durch das komplexe Redoxverhalten der leichteren Actiniden. Neuere Untersuchungen weisen allerdings auch auf einen ausgeprägten kovalenten Bindungscharakter in Komplexen mit weichen Donoratomen z.B. Stickstoffatomen hin. Schwerpunkt der aquatischen Chemie der Actiniden sind Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der thermodynamischen Eigenschaften der Actiniden in der wässrigen Phase sowie deren Wechselwirkungen an der fest-flüssig Grenzfläche. Hierfür werden vorrangig leistungsfähige und hochsensitive spektroskopische Methoden, insbesondere basierend auf der Anwendung von Laser- und Synchrotronstrahlung, eingesetzt.

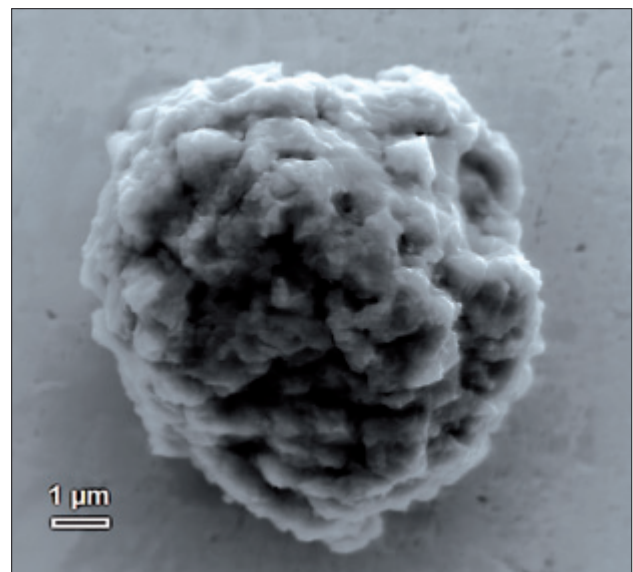
Kosmochemie

Kosmochemie als interdisziplinäres Gebiet befasst sich mit dem Studium extraterrestrischer Materie. Untersuchungsobjekte sind Meteorite (möglicherweise auch vom Mars), Mondgestein, sowie interplanetare Staubteilchen. Viele der heutzutage in der Isotopengeochemie (s. unten) eingesetzten Methoden hatten ihre ersten Anwendungen in der Kosmochemie und haben den Weg aus der Grundlagenforschung in die mehr angewandte Forschung gefunden.

Als Methode zur chemischen Analyse ist vor allem die instrumentelle Neutronenaktivierungsanalyse zu nennen, die zerstörungsfrei arbeitet und somit weitere Untersuchungen des seltenen Materials mit anderen Methoden erlaubt. Das Bildungsalter der Meteorite wird mit verschiedenen Datierungsmethoden bestimmt, die auf dem Zerfall langlebiger radioaktiver Nuklide basieren. Kurzlebige Radionuklide mit Halbwertszeiten im Bereich von etwa 0.1 bis 10 Millionen Jahren (z.B. ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl), die durch die kosmische Strahlung produziert werden, setzt man (oft in Kombination mit seltenen stabilen Nukliden, etwa ^{21}Ne) ein, um die Zeitdauer zu bestimmen, die die Meteorite für die Reise von ihrem "Mutterkörper" zur Erde benötigten. Hier wurden Zählmethoden aufgrund der kürzeren Messzeit und des geringeren Materialverbrauchs weitgehend durch die Beschleunigermassenspektrometrie (AMS = accelerator mass spectrometry) ersetzt.

Die gleichen (inzwischen "ausgestorbenen") Radionuklide waren auch in der Frühphase des Sonnensystems "lebend" und sind Zeugen der Entstehung der chemischen Elemente durch stellare Nukleosynthese, mit Beiträgen bis zum Zeitraum kurz vor der Bildung unseres Sonnensystems. Dies wird belegt durch massenspektrometrische Untersuchungen der Tochterelemente, die relative Überschüsse der Tochternuklide (etwa ^{10}B , ^{26}Mg , $^{36}\text{Ar}/^{36}\text{S}$) zeigen und deren relative Häufigkeiten eine zeitliche Feinauflösung der Bildungsprozesse unseres Sonnensystems ermöglichen.

Weitergehende Informationen zur stellaren Nukleosynthese erhält man aus der Analyse überlebender präsolarer Materie (Sternenstaub), die in geringen Mengen in den ursprünglichsten Meteoriten zu finden ist. Die Interpretation der gemessenen Isotopenverteilungen hängt ganz wesentlich von der Kenntnis der Wirkungsquerschnitte für die ablaufenden Kernreaktionen ab. Da diese bei den durch die Temperatur im Sterninneren definierten Teilchenenergien oft extrem gering sind, bedarf dies besonderer Anstrengungen, z.B. Messungen in Untergrundlabors. Für neutroneninduzierte Reaktionen, wie sie eine Rolle für die Bildung der Kerne im Massenbereich oberhalb von Fe spielen, wird inzwischen, sofern die Halbwertszeit der Reaktionsprodukte dies zulässt, oft die Aktivierungsmethode in Kombination mit Beschleunigermassenspektrometrie angewandt. Ein Extremfall ist die Bestimmung der Eigenschaften extrem kurzlebiger und extrem neutronenreicher Kerne auf dem Reaktionspfad des schnellen Neutroneneinfangs (r-Prozess; Prozessdauer etwa 1 Sekunde, wahrscheinlich während der Explosion einer Supernova).



Sternenstaub von Roten Riesen – Siliziumkarbid-Korn aus dem Meteoriten Murchison. (© J. Huth, S. Merchel, MPI Mainz)

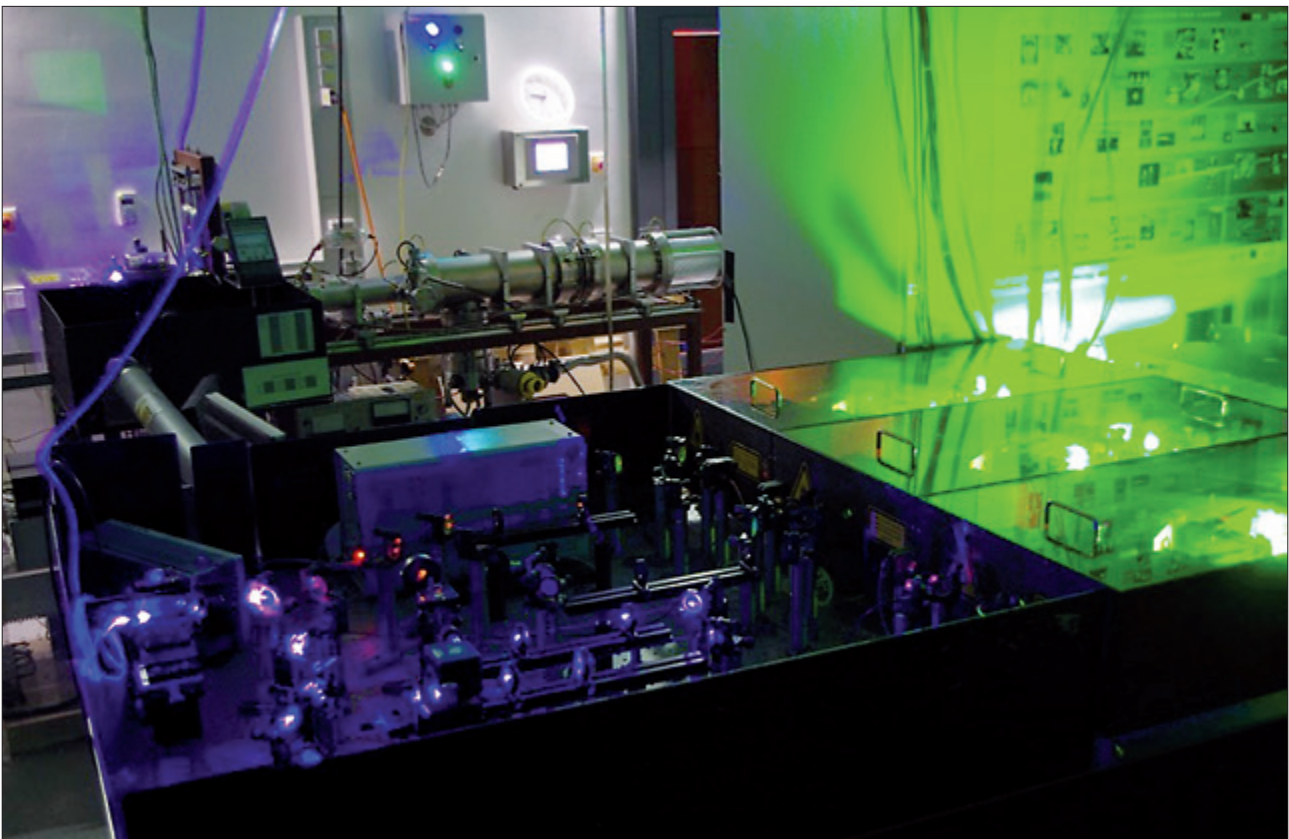
Radioanalytik

Grundlegend für die Radioanalytik sind radiometrische Messverfahren, bei denen der Zerfall eines Radionuklids in seine Tochternuklide qualitativ und/oder quantitativ nachgewiesen wird. Wesentlich hierfür sind die Zerfallsart, die emittierte Strahlungsart, die Halbwertszeit und die Probenmatrix. Sofern die jeweiligen Tochternuklide auch radioaktiv sind, können diese ebenfalls zur Bestimmung herangezogen werden.

Die Auswahl eines geeigneten Messverfahrens hängt von den Zerfallseigenschaften ab. Alpha- und Gammaskpektrometrie sind häufig eingesetzte Methoden. Eine chemische

oder physikalische Probenvorbereitung hat zum Ziel, eine möglichst aufkonzentrierte, homogene Probe definierter Geometrie herzustellen. Die Gammaskpektrometrie kommt im Gegensatz zur Alphaskpektrometrie in vielen Fällen ohne chemischen Aufschluss aus. Eventuell ist eine einfache Aufkonzentrierung nötig, z. B. bei organischen Proben durch Veraschen oder bei Wasserproben durch Eindampfen.

Viele Nuklide wie ^{137}Cs und ^{60}Co sowie zahlreiche Nuklide der natürlichen Zerfallsreihen eignen sich gut für eine gammaskpektrometrische Analyse. Für den Nachweis z.B.



Das Foto zeigt im Vordergrund die Laserapparatur für die Resonanzionisations-Massenspektrometrie (RIMS), die am Institut für Kernchemie der Universität Mainz zum Ultrapurennachweis von Plutonium, Neptunium und Technetium eingesetzt wird. Mit dem von einem Nd:YAG-Laser erzeugten grünen Laserlicht werden drei Ti:Saphir-Laser gepumpt. Das blaue Laserlicht entsteht durch Frequenzverdopplung des von einem der Ti:Saphir-Laser abgegebenen fundamentalen Laserlichtes. Im Hintergrund ist das Flugzeit-Massenspektrometer (TOF-MS) zum Nachweis der durch die Laserstrahlung selektiv ionisierten Radioisotope zu sehen. (© Nils Stöbener, Institut für Kernchemie, Universität Mainz)

von ^{210}Po , ^{239}Pu oder ^{234}U wird die Alphaspektrometrie eingesetzt. Eine Reihe wichtiger Nuklide sind jedoch praktisch reine β -Strahler (z. B. ^3H , ^{14}C , ^{90}Sr und ^{90}Y). Diese Nuklide können mittels Flüssigszintillation (LSC) analysiert werden. Radiometrische Messverfahren können auch zur Bestimmung von inaktiven Nukliden genutzt werden, wenn diese – wie bei der Neutronenaktivierungsanalyse (NAA) – zuvor durch Aktivierung in Radionuklide umgewandelt wurden.

Die Radioanalytik findet in vielfältigen Gebieten Anwendung: In Umweltanalytik und Radioökologie wie beispielsweise für die Untersuchung von Boden-, Bewuchs- und Nahrungsmittelproben nach nuklearen Unfällen (z.B. die Analyse von Wildfleisch und wildwachsenden Pilzen im Hinblick auf Tschernobyl-Folgen), für Dosimetrie in Strahlenschutz und Medizin, Überwachung von kerntechnischen und anderen industriellen Anlagen, in der Geologie zur Altersbestimmung, für die nuklearmedizinische Diagnostik, zur Spurenelementbestimmung mittels Neutronenaktivierungsanalyse und in zahlreichen weiteren Anwendungsfeldern.

Neuerdings werden verstärkt moderne massenspektrometrische Methoden zur Bestimmung von Radionukliden eingesetzt. Zur Spurenanalytik langlebiger Radionuklide wie z.B. der Actiniden Pu und U in Umweltproben findet die Massenspektrometrie mit einem induktiv gekoppelten Plasma (ICP-MS) bereits weitverbreitete Anwendung. Die Bestimmung von ^{14}C mittels Beschleunigermassenspektrometrie zur Altersdatierung ist ebenfalls schon weitgehend Routine. Neben der ICP-MS und AMS wird insbesondere die Resonanzionisations-Massenspektrometrie (RIMS) weiterentwickelt und zur Radionuklidultrapurenanalytik eingesetzt.

GESUNDHEIT UND UMWELT

Nuklearchemische Methoden zur Erforschung und Bekämpfung von Krankheiten, zur Aufklärung von biochemischen Mechanismen, zur Altersbestimmung über lange bis extrem lange Zeiträume, zur Lösung geowissenschaftlicher Fragestellungen oder für Beiträge zur Beherrschung von Problemen im Bereich der Sicherheit des Umgangs mit Radionukliden im Allgemeinen und mit Kernbrennstoffen im Besonderen gehören zum unverzichtbaren Repertoire der Naturwissenschaft.

Beginnend mit der Entdeckung des Radiotracerprinzips durch Georg K. v. Hevesy und Friedrich A. Paneth im Jahr 1913 unter Einsatz kleinster Stoffmengen sowie deren erste zielgerichtete Anwendungen in den 20er und 30er Jahren des 20. Jahrhunderts (Georg K. v. Hevesy, Rudolf Schönheimer; Einführung der Isotopenmarkierung) hat sich daraus eine neue medizinische Disziplin entwickelt, die Nuklearmedizin. Speziell die mittels Radiotracertechniken möglich gewordene Aufklärung metabolischer Vorgänge hat der Biochemie entscheidend zum Durchbruch verholfen.

Die Besonderheiten der Energiegewinnung, der Herstellung künstlicher Radionuklide auf hohem Aktivitätsniveau bis hin zum Umgang mit offenen radioaktiven Substanzen niedriger und hoher Aktivität in Technik und Medizin, aber auch die Freisetzung radioaktiver Substanzen durch die Tätigkeit des Menschen hat die Frage der Verteilung radioaktiver Substanzen in der Biosphäre und damit verbundener möglicher gesundheitlicher Implikationen in das Zentrum des wissenschaftlichen und öffentlichen Interesses gerückt und damit zur Entwicklung des Strahlenschutzes als einer bedeutenden Disziplin beigetragen.

Im Zuge jahrzehntelanger Entwicklungen hat sich eine Fülle besonderer Arbeitstechniken herausgebildet, die das Untersuchen funktioneller Vorgänge von der Pflanze bis zum Menschen, das Verfolgen von Substanzspuren im ultra-niedrigen Konzentrationsbereich bis hin zur Aufklärung des Herstellungs- und Transportweges, der Handhabung und des Einsatzes von Kernmaterial ermöglichen.

Die Nutzung radioaktiver Substanzen, die Notwendigkeit ihrer Handhabung und der sichere Umgang mit ihnen ist aus dem täglichen Leben nicht wegzudenken: Wer denkt schon daran, dass durch Nutzung von geothermischen Energiequellen oder bei der Förderung von Erdgas erhebliche Mengen radioaktiver Substanzen in die Umwelt befördert werden? Wer denkt daran, dass die Bekämpfung von Krebserkrankungen ganz wesentlich durch Einsatz ionisierender Strahlung und damit verbundener Radionuklidhandhabung vonstattengeht? Wer kennt die Methoden, um die Proliferation (Weiterverbreitung) von Kernmaterial zu kontrollieren bzw. zu verhindern? Wer kennt die Methoden, um Epochen der Erdgeschichte zeitlich exakt zu skalieren?

Im Folgenden wollen wir darauf für die Thematiken

- **Nuklearchemie in den Lebenswissenschaften (Radiopharmazie)**
- **Isotopengeochemie**
- **Strahlenschutz und Radioökologie**
- **Nukleare Forensik**

einige Antworten geben.

Nuklearchemie in den Lebenswissenschaften (Radiopharmazie)

Der Einsatz von Radionukliden in den Lebenswissenschaften hat im letzten Jahrzehnt eine deutliche Verschiebung erfahren. Durch die Einzigartigkeit und Universalität der Möglichkeiten, mit spezifischen internen Sonden (Radiotracer) funktionelle Prozesse „von außen“ verfolgen zu können, diese zu quantifizieren und darüber hinaus auch zielgerichtete interne therapeutische Interventionen durchführen zu können, hat sich diese Anwendung kontinuierlich weiterentwickelt.

Die mit Abstand wichtigste Anwendung radioaktiver Substanzen in den Lebenswissenschaften dient der bildgebenden Diagnostik, zunehmend auch der Therapie, unter Nutzung von Radiopharmaka. Die Anwendung am Menschen erfolgt in der Nuklearmedizin, die ihrerseits mit unterschiedlichen medizinischen Fächern kooperiert.

Radiopharmaka für die „klassische“ SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography) bzw. ihre Ausgangsprodukte (Radionuklidgeneratoren und Markierungs-KITs) und Radiotherapeutika werden vorwiegend von industriellen Lieferanten bereitgestellt, während Radiopharmaka für die PET (Positron Emission Tomography) vorrangig von PET-Zentren produziert werden. In Deutschland werden etwa 125 PET-Tomographen betrieben (Stand 2015). Dazu werden täglich Positronen-emittierende Radionuklide auf hohem Aktivitätsniveau (bis in den 400 GBq-Bereich) hergestellt und in automati-

sierten Synthesen zur radioaktiven Markierung von Substanzen genutzt. Die PET hat sich während der letzten 15 Jahre von einem vorrangig auf wenige Standorte konzentrierten Forschungsinstrument zu einer in vielen Universitäten und Forschungseinrichtungen etablierten Methode der Hochleistungsmedizin entwickelt.

Für den Einsatz von Radiotracer und Radiotherapeutika ist die Entwicklung radioaktiv markierter Moleküle eine besondere Herausforderung. Die Entwicklungen der letzten Jahre zeigen, dass der wechselseitige Einsatz eines diagnostisch-therapeutischen Isotopenpaares im gleichen Radiopharmakon die Anwendung im Sinne der Theranostik ermöglicht. Diese interdisziplinäre Aufgabe wird im Zusammenwirken zwischen Spezialisten vorrangig aus der (Radio-)Chemie und den Biowissenschaften, aber auch von Spezialisten zur Gewinnung von funktionellen Bildern (Molekulare Bildgebung) in Mensch, Tier und Pflanze bearbeitet. Mit der zunehmenden Anwendung in der Medizin dominieren zunehmend Aspekte der Arzneimittelherstellung (GMP – Good Manufacturing Practice – Gute Herstellungspraxis) die Planung und Durchführung dieser Arbeiten.

Durch Kombination von Radiotracertechniken mit weiteren Methoden der Bildgebung, wie der Röntgen-Computertomographie (CT) oder der Magnetresonanztomographie (MRT) wird die diagnostische Aussage wesentlich erhöht.



Multimodale Bildgebung mittels PET/MRT: Patient mit Verdacht auf Rezidiv eines Prostatakarzinoms nach radikaler Prostatektomie. Die PET-Aufnahme unter Verwendung von [¹¹C]Acetat (links) zeigt eine umschriebene Tracer-Mehranreicherung (Pfeil), die für ein Tumorrezidiv spricht. Die MRT (Mitte) zeigt eine Raumforderung in der linken Hälfte der früheren Prostataloge. Mit Hilfe der PET/MR (rechts) kann das Tumorrezidiv eindeutig lokalisiert werden. (© Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf/ PET-Zentrum)

Isotopengeochemie

Geowissenschaftliche Fragestellungen werden heute mit einer Vielzahl nuklearchemischer Techniken bearbeitet. Es ist dabei den wenigsten Menschen bewusst, dass diese Methoden auf radioaktivem Zerfall, Strahlung oder Radionukliden beruhen.

Als eine der empfindlichsten Methoden wird die Neutronenaktivierungsanalyse als Standardverfahren für die Bulkanalyse geologischer Proben eingesetzt. Für die ortsaufgelöste Analyse stehen beschleunigerbasierte Methoden wie die teilchen-induzierte Röntgen- und Gammaemission (PIXE bzw. PIGE) zur Verfügung. Diese haben gegenüber den Verfahren mittels Elektronen- und Röntgenanregung (EDX, RFA) den Vorteil des besseren Signal-zu-Untergrund-Verhältnisses und können als primäre Methoden zur Zertifizierung von Referenzmaterialien durchgeführt werden.

Ultimative Nachweisgrenzen für langlebige Radionuklide wie ^{14}C oder ^{129}I liefert die Beschleunigermassenspektrometrie (AMS – accelerator mass spectrometry). Die sog. Radiokarbondatierung kommt, neben der Datierung und Falsifizierung archäologischer Objekte, zunehmend auch für geowissenschaftliche Untersuchungen an Böden,

Muscheln, Sedimenten und Gestein zum Einsatz. Messungen kurzlebiger, anthropogen freigesetzter oder in der Atmosphäre produzierter Radionuklide wie ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{210}Pb und ^{32}Si , die meist mittels Zerfallsmessung quantifiziert werden, werden durch langlebige Radionuklide wie ^{36}Cl und ^{129}I für Untersuchungen z.B. in der Ozeanographie und Hydrogeologie ergänzt. In der Geomorphologie kann die Analyse sog. kosmogener Nuklide wie ^{10}Be , ^{26}Al und ^{36}Cl zur Datierung von Vulkanausbrüchen, Bergstürzen, Tsunamis, Meteoriteneinschlägen, Erdbeben und Gletscherbewegungen eingesetzt werden. Zudem werden Klimaveränderungen durch Eisbohrkernuntersuchungen rekonstruiert. Die Detektion von ^{60}Fe in Meeressedimenten und Mangankrusten und die indirekte Analyse über die Anreicherung des Tochternuklides in Meteoriten, lässt Rückschlüsse auf Bedingungen in Sternexplosionen und während der Bildung unseres Sonnensystems zu. Geochronologische Altersbestimmungen basieren ebenfalls auf dem radioaktiven Zerfall: Mittels K-Ar- bzw. Ar-Ar-Datierung (Zerfall von ^{40}K), oder der Messung von Pb-Isotopen (Zerfall von U und Th), können die Entstehungszeit und der Ursprung von Gesteinen und Mineralen bestimmt werden.

Strahlenschutz und Radioökologie

Radioökologie ist die Wissenschaft von Entstehung, Vorkommen und Verbreitung der Radionuklide in der Umwelt. Sie befasst sich mit dem Phänomen Radioaktivität von der Entstehung der Elemente bis zum Zerfall, von den Quellen bis zu den Senken oder von der Erzeugung künstlicher Radioaktivität bis zur Endlagerung radioaktiver Abfälle und beschreibt die Pfade der Radionuklide durch die Umwelt zu Pflanzen, Tieren und Menschen sowie ihre Wechselwirkung mit der unbelebten und belebten Natur bis hin zur resultierenden Strahlenexposition der Lebewesen.

Die Radioökologie entstand in der Folge der Kontamination der Umwelt mit Radionukliden aus dem globalen Fallout der oberirdischen Kernwaffenexplosionen. Aufgrund des starken Rückgangs der Exposition nach Einstellung der Tests fokussiert die Radioökologie heute auf andere Themen. Schwerpunkte deutscher Forschung in der Radioökologie sind Ausbreitung der Emissionen von kerntechnischen Anlagen (zum Beispiel Wiederaufarbeitungsanlagen Sellafield, GB, und La Hague, F) sowie von ehemaligen Uran Bergbaugebieten, z.B. in Sachsen aber auch die Folgen der Reaktorunglücke in Tschernobyl und Fukushima. Erhebliche Einträge zumeist kurzlebiger Radionuklide entstehen bei medizinischen diagnostischen

und therapeutischen Verfahren (z.B. ^{99m}Tc , ^{131}I). Untersuchungen der Ausbreitungspfade bis hin zur Strahlenexposition des Menschen erfolgen heute mit modernsten analytischen Methoden zum Teil auf mikroskopischer Ebene, um von der chemischen Speziation bis hin zum Wirken von Mikroorganismen ein umfassendes Verständnis der zugrundeliegenden Prozesse zu erzielen. Dies ist von großer Wichtigkeit für eine realistische Expositionsmodellierung bei Ableitungen, Freisetzungen, aber auch für den Langzeitsicherheitsnachweis potentieller Endlager für radioaktive Abfälle, wie sie der Gesetzgeber fordert.

Ein weiteres Arbeitsfeld ist die Strahlenbelastung durch natürlich vorkommendes Uran und Thorium sowie deren Zerfallsprodukte, insbesondere des Radons, das mit seinen Folgeprodukten den größten Teil zur natürlichen Strahlenexposition beiträgt. In diesem Kontext erfolgen Untersuchungen von Wohnraum in Gebieten mit erhöhter Radonaktivität sowie Gebäude mit Th/U-haltigen Lehmwänden.

Erhöhte Strahlenexpositionen durch technologisch erhöhte Vorkommen natürlicher Radionuklide (NORM = naturally occurring radioactive materials) sind ebenfalls ein Thema der Radioökologie. Aufgrund des hohen Anteils dieser Nuklide an der weltweiten Strahlenexposition des Menschen hat die Bedeutung dieser Nuklide in den letzten Jahren stark zugenommen. Ein aktuelles Beispiel ist hier die Anreicherung natürlicher Radioaktivität bei der Nutzung von Erdwärme in Geothermieanlagen.



Roter Wald, Chernobyl Exclusion Zone, Ukraine. (© C. Walther)

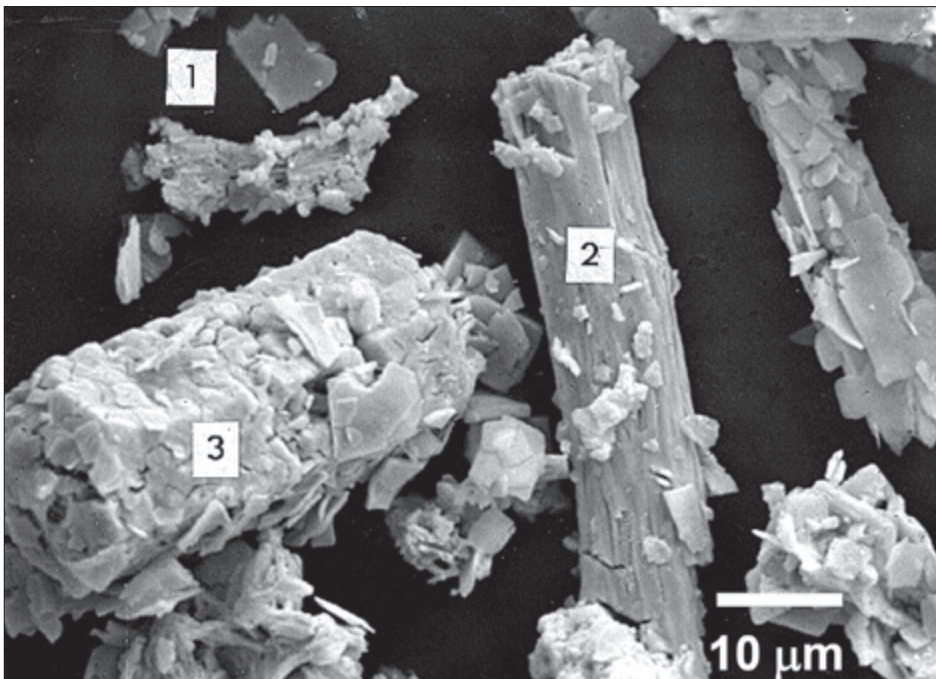
Nukleare Forensik

Der Umgang und der Handel mit Nuklearmaterial unterliegen weltweit strengen Kontrollen. Nuklearmaterial unbekannter Herkunft, das oft auch im Zusammenhang mit einer kriminellen Handlung stehen kann, muss daher umfassend charakterisiert werden. Die Bestimmung chemischer und physikalischer Eigenschaften trägt entscheidend dazu bei, Fragen nach der beabsichtigten Verwendung und dem Ursprung des Materials zu beantworten.

Die Verarbeitung von Kernbrennstoffen erstreckt sich von der Erzaufbereitung über die Brennstoffherstellung, die Bestrahlung im Reaktor, bis hin zur Wiederaufarbeitung von bestrahltem Brennstoff. Wie bei jedem industriellen Prozess hinterlassen auch hier die einzelnen Schritte charakteristische Spuren im Material. Hierzu zählen die Morphologie des Nuklearmaterials im Nano- bis Mikrometerbereich, dessen Geometrie auf makroskopischer Skala, der Gehalt an Spurenelementen, wie etwa Seltenerdelementen, oder auch die Isotopenzusammensetzung.

Aus der Vielzahl der Parameter müssen die jeweils charakteristischen Größen identifiziert und gemessen werden. Dazu werden radiochemische, aber auch mikroanalytische und materialkundliche Messtechniken eingesetzt, die speziell für die Analyse von radioaktiven Materialien adaptiert sind.

Die Interpretation der Messdaten liefert Hinweise auf Ort und Zeitpunkt der Materialherstellung; zum Teil können auch Transportwege rekonstruiert werden. Dazu müssen in vielen Fällen Vergleichsinformationen zur Verfügung stehen, um eine Zuordnung des Materials vornehmen zu können. Die nukleare Forensik kombiniert somit radioanalytische und materialkundliche Methoden mit Kenntnissen des Kernbrennstoffkreislaufs sowie vergleichenden statistischen Techniken.



Elektronenmikroskopische Aufnahme von MOX (Mischoxid) Brennstoff, der 1994 auf dem Flughafen München beschlagnahmt wurde. Die Plättchen (1) und das zylindrische Partikel (2) bestehen aus PuO_2 , das größere sechseckige Partikel (3) aus U_3O_8 . (© European Communities).

ENERGIE

Die Spaltung liefert wegen der hohen Energiedichte des Urankerns etwa sechs Größenordnungen mehr Energie zur Stromerzeugung, als dies durch die Nutzung fossiler Brennstoffe möglich ist. Weltweit produzieren 448 Kernkraftwerksblöcke (Stand: Dezember 2016) ca. 10-11% des elektrischen Stroms. Nach dem Reaktorunfall in Fukushima wurde in Deutschland entschieden, sich von dieser Technologie innerhalb weniger Jahre endgültig zu verabschieden: 8 von 17 Reaktoren wurden sofort stillgelegt, die verbleibenden werden bis 2022 vom Netz genommen werden. Die sehr negative Bewertung der Energiegewinnung durch Kernspaltung in Deutschland wird international in diesem Maße nicht geteilt. International befinden sich 60 Blöcke in der Errichtung (Stand: Dezember 2016).

Darunter befinden sich neue Reaktortypen der Generation III, die bereits heute in der Lage sind, Auswirkungen einer Kernschmelze auf die Umgebung, wie in Fukushima passiert, auszuschließen.

Intensiv wird die Forschung zu Kernfusion vorangetrieben. Das erklärte Ziel ist, eine neue Energiequelle mit günstigen Sicherheitseigenschaften, großen Brennstoffreserven und einer geringen Umweltbelastung zu erschließen. Die technisch auf der Erde am einfachsten zu realisierende Fusionsreaktion ist die DT-Reaktion, bei der Deuterium- und Tritiumkerne zu Heliumkernen fusioniert werden. Die Hauptvorteile der Kernfusion sind die großen verfügbaren Vorräte an Deuterium und Lithium (aus dem



Schnitt durch den Aufbau des im Bau befindlichen EPR Reaktors in Olkiluoto, Finnland. Dabei handelt es sich um einen Kernspaltungsreaktor der III. Generation. (© Framatome GmbH)

das benötigte Tritium erbrütet wird) und die sehr hohe Energieausbeute (1 g Brennstoff entspricht 10.000 l Heizöl). Die Entwicklung einer Technologie, die durch eine kontrollierte Fusionsreaktion Energie erzeugt, stellt nach wie vor eine Herausforderung dar. Eine Reihe von experimentellen Fusionsanlagen wird betrieben, um grundlegende Daten und Parameter zu erarbeiten. Diese Erkenntnisse werden derzeit in dem internationalen Großprojekt ITER in Südfrankreich angewandt, um erstmals eine große experimentelle Anordnung mit Leistungsreaktoreigenschaften zu bauen.

Sowohl Kernspaltung als auch Kernfusion stellen CO₂-emissionsarme Energietechnologien dar und können einen wesentlichen Beitrag zur Ablösung fossiler Energieträger und zum Klimaschutz leisten. Die Nutzung von

Kernenergie, sowohl aus Kernspaltung als auch durch Fusion, ist aber auch unvermeidlich mit dem Umgang mit bzw. der Bildung von Radionukliden verbunden, deren unkontrollierte Freisetzung eine Gefährdung sowohl der in den Anlagen Beschäftigten wie auch der Bevölkerung außerhalb der Anlagen bedeuten würde. Des Weiteren fallen radioaktive Reststoffe an, die so sicher behandelt bzw. gelagert werden müssen, dass keine unzulässigen radiologischen Belastungen für Mensch und Umwelt zu erwarten sind.

Ungeachtet des deutschen Ausstiegs aus der Energienutzung durch Kernspaltung wird das Fachgebiet der Reaktorchemie auch in Zukunft eine wichtige Rolle im Hinblick auf einen sicheren und optimierten Betrieb deutscher Anlagen sowie den Kompetenzerhalt spielen.

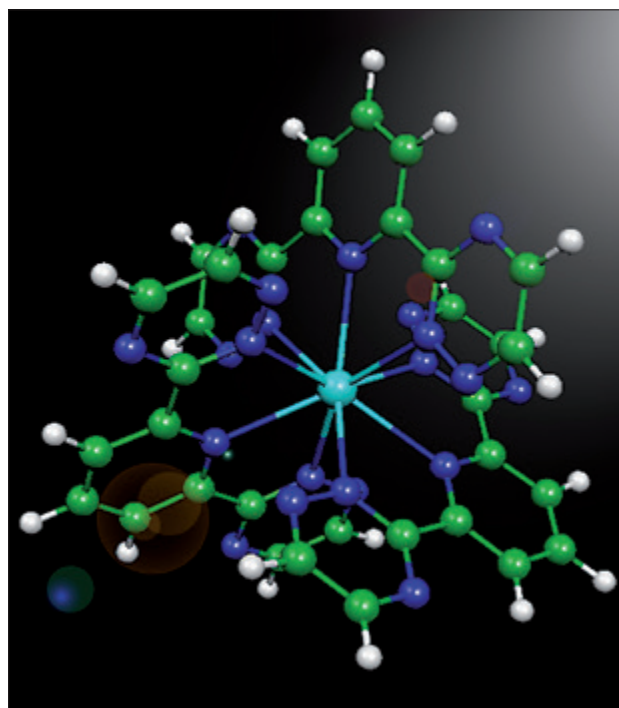
Actinidenrecycling

Anstelle der direkten Endlagerung abgebrannter Kernbrennstoffe wird in einigen Ländern ein „Actinidenrecycling“ verfolgt. Dabei werden Uran und Plutonium im PUREX-Prozess abgetrennt und wieder als MOx-Brennstoff eingesetzt. Neben der besseren Nutzung des Energierohstoffs Uran lässt sich das Volumen und – nach einer Abklingzeit von rund 100 Jahren – die Wärmeleistung der endzulagernden wärmeentwickelnden Abfälle reduzieren. Eine weitergehende Reduktion könnte erfolgen, wenn auch die sogenannten minoren Actiniden (Americium, Neptunium, und Curium) rezykliert würden, wobei der Beitrag von Americium maßgeblich ist. Auf diese Weise könnte das Endlagervolumen wesentlich effizienter genutzt werden.

Dieses Konzept erfordert die Entwicklung von Prozessen zur Abtrennung minorer Actiniden. Als eine besondere Herausforderung gilt hierbei die Trennung der in Lösung dreiwertig vorliegenden Actinidionen (Americium(III), Curium(III)) von den chemisch ähnlichen (Spalt)lanthanidionen. Auf dem Prinzip der auch im PUREX-Prozess angewandten flüssig-flüssig-Extraktion basierende Trennprozesse benötigen dazu hochselektive Liganden. Solche wurden und werden insbesondere im Rahmen von EU-Forschungsprogrammen entwickelt und kontinuierlich optimiert. In diesem Zusammenhang sind grundlegende radiochemische Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich der Actinidenkoordinationschemie dringend erforderlich.

Als Alternative zu diesen „wässrigen“ Verfahren werden sogenannte „trockene“ Verfahren entwickelt. Dabei handelt es sich meist um elektrochemische Trennverfahren, bei denen aufgrund unterschiedlicher Redoxpotentiale Actiniden von Spaltprodukten durch Abscheidung an geeignete Elektrodenmaterialien getrennt werden.

Selbstverständlich spielen solche Technologien im „Aussteigerland“ Deutschland keine Rolle. In Staaten, die langfristig auf die Nutzung der Kernenergie setzen, kann das „Actinidenrecycling“ einerseits die Reichweite des Rohstoffs Uran signifikant erhöhen und andererseits die Menge der anfallenden wärmeentwickelnden Abfälle und damit den „footprint“ eines Endlagers deutlich verringern.



Komplex des dreiwertigen Americiumions mit drei Bis-Triazinyl-Pyridin-Molekülen. Dabei handelt es sich um ein hochselektives Extraktionsreagenz für die Actiniden-Lanthanidentrennung. (© KIT)

Endlagerforschung

Die Frage wie und wo radioaktive Abfälle endzulagern sind wird in Deutschland seit langer Zeit kontrovers diskutiert. In einigen europäischen Ländern sind Endlagerprojekte dagegen bereits weit fortgeschritten. Die Isolation radioaktiver Reststoffe von der Biosphäre soll durch technische Barrieren (Abfallformen, Behälter), geotechnische Barrieren (Versatzmaterial) und geologische Barrieren (Deckgebirge) gewährleistet werden. Der Nachweis der Sicherheit eines Endlagerkonzepts erfordert ein fundamentales Wissen um die nuklearchemischen Eigenschaften radioaktiver Reststoffe und des Langzeitverhaltens von Radionukliden im Endlager und seiner Umgebung. Darüber hinaus stellen sich Aufgaben und Fragen im Bereich der Materialforschung, die sich u.a. mit dem Korrosionsverhalten der jeweiligen Abfallformen beschäftigt. Dies können verbrauchte Brennelemente bei der direkten Endlagerung sowie verglaste oder zementierte Abfälle aus der Wiederaufarbeitung sein. Die Forschung schließt auch die Entwicklung neuer keramischer Abfallmatrizes für Actiniden und Spaltprodukte mit ein, die als extrem langzeitstabile Endlagerformen diskutiert werden.

Die Forschungsarbeiten der letzten Jahrzehnte haben maßgeblich dazu beigetragen, das Verhalten von Radionukliden aus den Abfällen in Endlagersystemen wesentlich besser verstehen und vorhersagen zu können. Ein vertieftes Verständnis der aquatischen Chemie betreffender Problemelemente ergibt sich aus Untersuchungen zur Thermodynamik der Radionuklidreaktionen in wässrigen und festen Phasen, zur Kolloidchemie und zur Radionuklidspeziation. Nuklearchemische Endlagerforschung erfordert wegen ihrer Komplexität eine intensive Zusammenarbeit mit anderen wissenschaftlichen Disziplinen wie der Materialforschung, Geochemie, Hydrologie, Mikrobiologie etc.. Neben klassischen radiochemischen Methoden kommen hier moderne physikalische und theoretische Verfahren wie z.B. die synchrotronbasierte Röntgenspektroskopie, leistungsfähige Laserspektroskopische Techniken sowie die Quantenchemie zum Einsatz. Nur mit ihrer Hilfe werden Einblicke in ablaufende chemische und geochemische Prozesse und ihre Aufklärung auf einer fundamentalen molekularen Ebene möglich.



Links: Aufbau zur Aufklärung der chemischen Form gelöster Actinidionen mittels Laserspektroskopie (© KIT, Coerten);
rechts: Experimente zur Radionuklidmigration im Grimsel Felslabor, Schweiz (© COMET, Photoshopping, GmbH, Weisslingen)

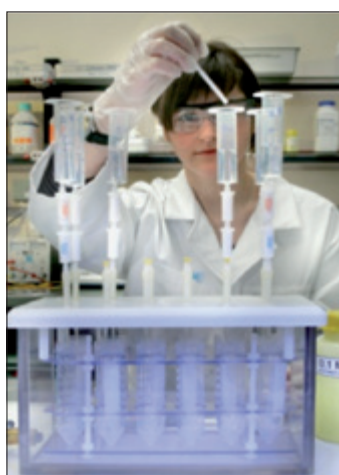
Reaktorchemie

Reaktorchemische Dienstleistungen sind eine unabdingbare Voraussetzung für den sicheren Betrieb von Kernkraftwerken weltweit und umfasst die Entwicklung und Anwendung eines vielseitigen Spektrums von radiochemischen Untersuchungsmethoden. In Deutschland fokussieren sich die Arbeiten auf den Restbetrieb und den ordnungsgemäßen Rückbau kerntechnischer Anlagen. Forschungs- und Entwicklungsarbeiten liefern wichtige Beiträge auf folgenden Gebieten:

- **Überwachung und Unterstützung des Betriebs von Kernkraftwerken durch radiochemische Analytik von Proben der Betriebsverfolgung, der Reinigungs- und der Rückhalteanlagen**
- **Charakterisierung der Betriebsabfälle für die anschließende Endlagerung**
- **Optimierung der Brennstoffausnutzung und Minimierung der Strahlenexposition Beschäftigter durch optimierte chemische Fahrweise des Reaktors im Hinblick auf möglichst geringe Korrosion und Ablagerungen**

- **Untersuchungen zum Radionuklidverhalten bei möglichen Störfällen zur Optimierung von Unfallbeherrschungsmaßnahmen und einer verbesserten Auslegung bzw. Nachrüstung gegen die Auswirkungen von Störfällen.**

In Deutschland sind Fragen der Stilllegung kerntechnischer Anlagen (Kernkraftwerke, Produktionsanlagen des Brennstoffkreislaufs) außerordentlich aktuell. Vielfältige Randbedingungen erfordern ein breites Spektrum radiochemischer Untersuchungsmethoden, letztlich zur Optimierung des Strahlenschutzes. Stetige Optimierungen und Weiterentwicklungen auf dem Gebiet der Reaktorchemie sind daher in Deutschland nach wie vor erforderlich. Die entsprechenden Kompetenzen werden in der Industrie, bei den Kernkraftwerksbetreibern und in Ministerien, Behörden und Forschungszentren auch in Zukunft benötigt.



Reaktorchemie: Probenahme, radiochemische Probenaufarbeitung und Strahlungsmessung. (© Framatome GmbH)

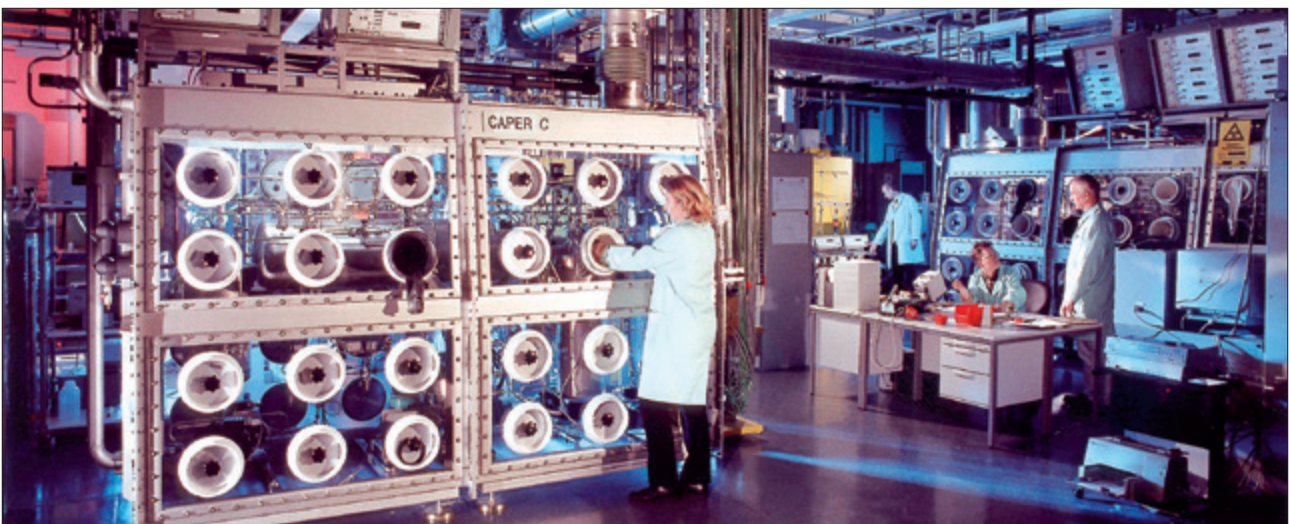
Tritiumchemie

Ein wesentlicher Bereich der Entwicklung der Fusions-technologie betrifft die Bildung und das Verhalten von Radionukliden. Auch hier spielen nuklearchemische Fragen eine wichtige Rolle. Sie betreffen z.B. den Brennstoffkreislauf einer Fusionsanlage, der den Umgang mit Tritiumgas und die Behandlung der Brutmedien einschließt, die Chemie von Flüssigmetall- und Feststoff-Blankets, die Chemie und die Radionuklidbildung in der ersten Wand, die Reinigung der Plasmaabgase einschließlich der Tritiumrückgewinnung und die Tritiumentfernung aus dem Kühlmittel Wasser.

Weitere Themen ergeben sich aus der notwendigen Minimierung einer Tritiumabgabenauch außen, z.B. während des Fusionsreaktorbetriebes. Dazu müssen entsprechende Rückhalteinrichtungen entwickelt werden. Darüber hinaus stellen sich Fragen zur Dekontamination tritiumkontaminierter Oberflächen und der geeigneten Behandlung tritiumhaltiger Abfälle. Der zufriedenstellenden Lösung dieser Fragen wird bei der Entwicklung dieser Technologie zu einer kommerziell nutzbaren Energietechnik eine entscheidende Bedeutung zukommen, vor allem im Hinblick auf die Begrenzung von Radionuklidfreisetzungen auf extrem niedrige Werte, sowohl im bestimmungsgemäßen Betrieb wie auch in Unfallsituationen. Chemische Reaktionen und

stoffliches Verhalten spielen dabei eine wichtige Rolle und sind oft von spezifisch nuklearchemischen Problemstellungen geprägt. Von entscheidender Bedeutung für die Effizienz und Zuverlässigkeit von Verfahren im Fusionsbrennstoffkreislauf ist der Einsatz geeigneter Prozessanalytik. Vorgesehen sind Inline- und Online-Techniken auf der Basis von Massenspektrometrie, Radiogaschromatographie, Ion-Zyklotron-Resonanz-Massenspektrometrie und Laser-Raman-Spektrometrie, d.h. Messmethoden, die sich besonders für die quantitative und qualitative Bestimmung kleiner Mengen von deuterierten/tritiierten Verunreinigungen eignen.

Die Handhabung von Tritium ist nicht nur vor dem Hintergrund der Entwicklung von Fusionstechnologien wichtig. Für das KARlsruher TRitium Neutrino (KATRIN) Experiment wird eine hochpräzise Tritiumquelle entwickelt, um eine äußerst empfindliche Massenmessung des beim β -Zerfall des Tritiums entstehenden Antineutrinos in einem supraleitenden Spektrometer durchzuführen. Damit erhofft man sich die Beantwortung offener Fragen zum Standardmodell der Teilchenphysik, aber auch Aufschluss darüber, welche Rolle Neutrinos für die ‚dunkle Materie‘ in unserem Universum spielen.



Blick in das Tritiumlabor des KIT (© KIT 2002, Martin Lober, Markus Breig)

LEHRE, AUSBILDUNG, KOMPETENZ-ERHALT UND KOMPETENZAUSBAU

Wie diese Broschüre zeigt, ist das Fachgebiet der Nuklearchemie für eine Vielzahl wissenschaftlicher Fragestellungen und wichtiger gesellschaftlicher Themen relevant und erforderlich. Klassische Techniken der Kernstrahlenspektroskopie werden heute durch moderne röntgen-, laser- und massenspektrometrische Methoden ergänzt. Ähnliches gilt für die vielfältigen Anwendungsbereiche, die nahezu alle chemischen Disziplinen, von Anorganik, Organik, Physikochemie, technischer Chemie über die Geochemie hin zur Biochemie umfassen. In vielen nuklearchemischen Bereichen wurden in den letzten Jahren signifikante Fortschritte erzielt und damit z.B. die Anwendungen in der Medizin deutlich ausgeweitet und die Grenzen des Periodensystems signifikant ausgedehnt. Daraus ergibt sich ein wachsender Bedarf an entsprechenden Lehr- und Ausbildungsmöglichkeiten im Fach Nuklearchemie aber auch in den für die Praxis relevanten Themen des Strahlenschutzes und der Radioanalytik. Auch in der Kerntechnik besteht nach wie vor Bedarf an nuklearchemischer Kompetenz in Deutschland. Sicherer Betrieb von Kernkraftwerken bis zur Abschaltung, Rückbau kerntechnischer Anlagen und die sichere Entsorgung radioaktiver Reststoffe stellen einen wichtigen Aspekt der „Energiewende“ dar und benötigen noch für Jahrzehnte nuklearchemisches Know-how. Im Gegensatz dazu hat sich allerdings in den vergangenen Jahrzehnten die Anzahl der Hochschulen und Universitäten in Deutschland, an denen das Fachgebiet Nuklearchemie gelehrt wird, signifikant verringert.

Die Fachgruppe Nuklearchemie sieht ihre Ziele und Aufgaben daher explizit in der Sicherung einer ausreichenden Forschungs-, Lehr- und Ausbildungskapazität in den Fächern Kern-, Radio- und Strahlenchemie und in der Gewährleistung des Kompetenzerhalts in all diesen Bereichen. Dazu nutzen wir z.B.:

- Konferenzen, Arbeitskreise, Mitwirkung am wissenschaftlichen Programm der GDCh, Publikationen und Monographien auf dem Gebiet der Kern-, Radio- und Strahlenchemie
- Kurse zur Vermittlung des sicheren Umgangs mit radioaktiven Stoffen und zum Strahlenschutz
- Aktive Interaktion mit in- und ausländischen Ausschüssen, Verbänden und Organisationen fachverwandter Gebiete.

Des Weiteren engagieren sich Fachgruppenmitglieder in der Lehre an Hochschulen und Universitäten in Form von Vorlesungen und Praktika. In den folgenden Tabellen findet sich eine Aufstellung von Hochschulen sowie Forschungseinrichtungen in Deutschland und im deutschsprachigen Ausland, an denen zu nuklearchemischen Themen gelehrt und geforscht wird.

Lehre und Ausbildung in deutschsprachigen Ländern

DEUTSCHLAND		
Institut	Themen	Kontakt
Universitäten und Hochschulen		
RWTH Aachen Lehrstuhl für Entsorgung nuklearer Abfälle <i>in Kooperation mit dem Forschungszentrum Jülich – Institut für Energie- und Klimaforschung</i>	Kernchemie, Endlagerung radioaktiver Abfälle, Brennstoffkreislauf	Prof. Dirk Bosbach Tel.: +49 2461 61 5299 Fax: +49 2461 61 2450 E-Mail: d.bosbach@fz-juelich.de www.fz-juelich.de/iek/iek-6/DE/home/_node.html
Universität Mainz, Institut für Kernchemie <i>Kooperation mit dem GSI Helmholtz-zentrum für Schwerionenforschung, Darmstadt</i>	Radiopharmazeutische Chemie, Kern- und Radiochemie, Superschwere Elemente, Actinidenchemie, Radioanalytik, Ultrakalte Neutronen	Prof. Michael Block Prof. Christoph E. Düllmann Prof. Tobias Reich Prof. Dieter Ries Prof. Frank Rösch Tel.: +49 6131 39 25879 Fax: +49 6131 39 25253 E-Mail: block@uni-mainz.de duellmann@uni-mainz.de tobias.reich@uni-mainz.de d.ries@uni-mainz.de frank.roesch@uni-mainz.de www.kernchemie.uni-mainz.de
Technische Universität München, Radiochemie und Pharmazeutische Radiochemie	Radiopharmazie, Radioanalytik	Prof. Hans-Jürgen Wester, Dr. Christoph Lierse v. Gostomski Tel.: +49 89 289 12203 Fax.: +49 89 289 12204 E-Mail: h.j.wester@tum.de christoph.lierse@tum.de www.prc.ch.tum.de
Universität des Saarlandes, Anorganische Chemie Elementanalytik – AG WASTE	Umweltchemie Radiochemie Radionuklidmigration Speziationsanalytik	PD Dr. Ralf Kautenburger Tel.: +49 681 302 2171 Fax.: +49 681 302 70655 E-Mail: r.kautenburger@mx.uni-saarland.de www.uni-saarland.de/lehrstuhl/kickelbick/speziations-und-elementanalytik.html
Universität Hannover, Institut für Radioökologie und Strahlenschutz	Radioökologie, Radioanalytik, Strahlenschutz	Prof. Clemens Walther Prof. Georg Steinhauser Tel.: +49 511 762 5112 Fax: +49 511 762 3008 E-Mail: walther@irs.uni-hannover.de steinhauser@irs.uni-hannover.de www.irs.uni-hannover.de

DEUTSCHLAND		
Institut	Themen	Kontakt
Universitäten und Hochschulen		
Freie Universität Berlin, Institut für Chemie und Biochemie – Anorganische Chemie	Koordinationschemie (Tc, U, Th)	Prof. Ulrich Abram Tel.: +49 30 838 54002 Fax: +49 30 838 52676 E-Mail: ulrich.abram@fu-berlin.de
www.bcp.fu-berlin.de/chemie/chemie/forschung/InorgChem/index.html		
Technische Universität Dresden, Professur Radiochemie <i>in Kooperation mit dem Helmholtz- Zentrum Dresden Rossendorf (HZDR) – Institut für Ressourcenökologie</i>	Radioökologie, Actinidenchemie, Strahlenschutz	Institut für Ressourcenökologie Prof. Dr. Thorsten Stumpf Tel.: +49 351 260-3210 Fax: +49 351 260-3553 E-Mail: t.stumpf@hzdr.de
www.chm.tu-dresden.de / www.hzdr.de/db/Cms?pNid=142		
Technische Universität Dresden Professur Bioanorganische und Radiopharmazeutische Chemie <i>in Kooperation mit dem Helmholtz- Zentrum Dresden Rossendorf (HZDR) – Institut für Radiopharmazeutische Krebsforschung</i>	Radiopharmazie Pathobiochemie Bioanorganische Chemie	Institut für Radiopharmazeutische Krebsforschung Prof. Jörg Steinbach Tel.: +49 351 260 3170 Fax: +49 351 260-3232 E-Mail: j.steinbach@hzdr.de
www.hzdr.de/db/Cms?pNid=130		
Universität Leipzig, Forschungsstelle Leipzig des Helmholtz-Zentrums Dresden- Rossendorf <i>in Kooperation mit dem Helmholtz- Zentrum Dresden Rossendorf (HZDR) – Institut für Ressourcenökologie – Institut für Radiopharmazeutische Krebsforschung</i>	Radiopharmazie, Reaktiver Radionuklidtransport Strahlenschutz	Institut für Ressourcenökologie Prof. Dr. Thorsten Stumpf Tel.: +49 351 260-3233 Fax: +49 351 260-3553 E-Mail: t.stumpf@hzdr.de
www.hzdr.de/db/Cms?pNid=142		
Institut für Radiopharmazeutische Krebsforschung Prof. Jörg Steinbach Tel.: +49 351 260 3170 Fax: +49 351 260-3232 E-Mail: j.steinbach@hzdr.de		
www.hzdr.de/db/Cms?pNid=130		

DEUTSCHLAND		
Institut	Themen	Kontakt
Universitäten und Hochschulen		
Universität zu Köln, Abteilung Nuklearchemie <i>in Kooperation mit dem Forschungs- zentrum Jülich – Institut für Neuro- wissenschaften und Medizin (INM)</i>	Radioanalytik, Umweltchemie der Radionuklide, Radiopharmazie	Prof. Dr. Bernd Neumaier Tel.: +49-2461 61-4141 Fax: +49 2461 61-2535 E-Mail: b.neumaier@fz-juelich.de und PD Dr. Erik Strub Tel.: +49 221-478-86807/86806 Fax: +49 221-478-86851 E-Mail: erik.strub@uni-koeln.de http://radiochemie.uk-koeln.de/das-institut
Universität Heidelberg, Physikalisch-Chemisches Institut <i>in Kooperation mit dem Joint Research Centre – Institute for Transuranium Elements (JRC-ITU), Karlsruhe Karlsruher Institut für Technologie – Institut für Nukleare Entsorgung (KIT-INE)</i>	Actinidenchemie, Radiogeochemie	Prof. Thomas Fanghänel Tel.: +49 7247 951 351 +32 229 53696 E-Mail: thomas.fanghaenel@ec.europa.eu http://itu.jrc.ec.europa.eu Prof. Petra Panak Tel.: +49 721 608 24469 Fax: +49 721 608 23927 E-Mail: petra.panak@kit.edu www.radiochemie-heidelberg.de
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für anorganische Chemie (AOC), Institut für Nukleare Entsorgung (INE)	Actinidenchemie, Radiogeochemie	Prof. Horst Geckeis Tel.: +49 721 608 22231 Fax: +49 721 608 24308 E-Mail: horst.geckeis@kit.edu www.ine.kit.edu
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Anorganische und Allgemeine Chemie	Uran-Koordinationschemie	Prof. Karsten Meyer Tel.: +49 9131 8527360 E-Mail: karsten.meyer@fau www.inorganic-chemistry.net
FH Aachen – University of Applied Sciences (Campus Jülich)		Prof. Elisabeth Oehlke Tel.: +49 0241 6009 53894 E-Mail: oehlke@fh-aachen.de www.fh-aachen.de

DEUTSCHLAND		
Institut	Themen	Kontakt
Universitäten und Hochschulen		
Hochschule Mannheim, Institut für Physikalische Chemie und Radiochemie	Radioanalytik, Produktion von Radionukliden, Reaktorchemie, Management radioaktiver Abfälle, NORM	Prof. Ulrich W. Scherer Tel.: +49 621 292 64 85 Fax: +49 621 292 664 851 E-Mail: u.scherer@hs-mannheim.de www.prc.hs-mannheim.de
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden <i>in Kooperation mit dem Helmholtz- Zentrum Dresden-Rossendorf</i>		Dr. Vinzenz Brendler Tel.: +49 351 260-2430 Fax: +49-351 260-3553 E-Mail: v.brendler@hzdr.de www.htw-dresden.de
Philipps-Universität Marburg Fachbereich Chemie Anorganische Chemie mit Ausrichtung Fluorchemie	Anorganische Uran- und Thoriumchemie	Prof. Dr. Florian Kraus Tel.: +49 6421 28 26668 Fax: +49 6421 28 25669 E-Mail: florian.kraus@chemie. uni-marburg.de www.uni-marburg.de/fb15/ag-kraus

DEUTSCHLAND		
Institut	Themen	Kontakt
Forschungseinrichtungen		
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Nukleare Entsorgung (INE)		Prof. Horst Geckeis Tel.: +49 721 608 22231 Fax: +49 721 608 24308 E-Mail: horst.geckeis@kit.edu www.ine.kit.edu
GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt	Superschwere Elemente	Abteilung SHE Chemie Prof. Christoph E. Dußmann Tel.: +49 6159 71 2462 Fax: +49 6159 71 3463 E-Mail: C.E.Duessmann@gsi.de www.superheavies.de

DEUTSCHLAND		
Institut	Themen	Kontakt
Forschungseinrichtungen		
Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) - Institut für Ressourcenökologie - Institut für Radiopharmazie	Radioökologie, Actinidenchemie, Strahlenschutz, Radiopharmazie, Pathobiochemie, Bioanorganische Chemie	Institut für Ressourcenökologie PD Dr. Cornelius Fischer Tel.: +49 351 260-4660 Fax.: +49 351 260-4699 E-Mail: c.fischer@hzdr.de www.hzdr.de/fwo Institut für Radiopharmazeutische Krebsforschung Prof. Peter Brust Tel.: +49 351 260-4610 Fax: +49 351 260-4699 E-Mail: p.brust@hzdr.de www.hzdr.de/fwp
Forschungszentrum Jülich - Institut für Energie- und Klimaforschung (mit Bereich nukleare Entsorgung und Reaktorsicherheit) - Institut für Neurowissenschaften und Medizin (INM) INM 5: Nuklearchemie	Radiopharmazie, Nukleare Daten, Radioanalytik	Prof. Dirk Bosbach Tel.: +49 2461 61 5299 Fax: +49 2461 61 2450 E-Mail: d.bosbach@fz-juelich.de www.fz-juelich.de/iek/iek-6/DE/home/_node.html Prof. Dr. Bernd Neumaier Tel.: +49 2461-61-4141 Fax: +49 2461 61-2535 E-Mail: b.neumaier@fz-juelich.de www.fz-juelich.de/inm/inm-5
Europäische Kommission Joint Research Centre – Standort Karlsruhe	Nukleare Sicherheit und Sicherung	P.O. Box 2340 76125 Karlsruhe Tel.: +49 7247 951 0 E-Mail: JRC-KRU-INFO@ec.europa.eu https://ec.europa.eu/jrc/en
Helmholtz-Institut Mainz	Superschwere Elemente	Forschungssektion SHE Chemie Prof. Christoph E. Düllmann Tel.: +49 6131 39 25852 Fax: +49 6131 39 20811 E-Mail: duellmann@uni-mainz.de www.superheavies.de
Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie	Beschleunigermassenspektrometrie (AMS), Ionenstrahlanalytik (IBA), Ressourcenanalytik, Kosmochemie	Dr. Silke Merchel Tel.: +49 351 260-2802 Fax: +49 351 260-12802 E-Mail: s.merchel@hzdr.de www.hzdr.de/hif

ÖSTERREICH

Institut	Themen	Kontakt
Universitäten		
Universität Wien, Institut für Anorganische Chemie	Umwelt- und Radiochemie	http://anorg-chemie.univie.ac.at/magnoliaPublic/Home.html
Technische Universität Wien, Atominstytut	Strahlenphysik, Radiochemie, Kernchemie	Dr. Johannes H. Sterba Tel.: +43 1 58801 141 357 Fax: +43 1 58801 9141 357 E-Mail: jsterba@ati.ac.at
Universität Innsbruck, Institut für Analytische Chemie und Radiochemie	Radioanalytik und Strahlenschutz	www.uibk.ac.at/acrc/forschung
Universität Salzburg, Materialwissenschaften, Abteilung Physik und Biophysik	Umweltüberwachung, Strahlenschutz	www.uni-salzburg.at

SCHWEIZ

Institut	Themen	Kontakt
Universitäten		
Universität Bern, Departement für Chemie und Biochemie, Labor für Radio- und Umweltchemie	Superschwere Elemente Radiopharmazie Beschleunigermassenspektrometrie (¹⁴ C-AMS)	Prof. Andreas Türlér Prof. Sönke Szidat Tel.: +41 31 631 4264 Fax: +41 31 631 4220 E-Mail: andreas.tuerler@dcb.unibe.ch
www.dcb.unibe.ch/ueber_uns/personen/prof_dr_tuerler_andreas/index_ger.html		
Universität Bern, Institut für Geologie, Mineralogie	Nukleare Entsorgung, Endlagerforschung	Prof. Sergey Churakov Tel.: +41 31 631 87 10 E-Mail: sergey.churakov@geo.unibe.ch
www.geo.unibe.ch/forschung/mineralogie/index_ger.html		
ETH Zürich, Department of Chemistry and Applied Biosciences, Institute of Pharmaceutical Science, Radiopharmaceutical Sciences	Radiopharmazie	Prof. Roger Schibli Tel.: +41 44 633 7492 E-Mail: roger.schibli@pharma.ethz.ch
www.radiopharmaceutical-science.ethz.ch		

SCHWEIZ		
Institut	Themen	Kontakt
Universitäten		
Universität Zürich, Department of Chemistry	Radiopharmazie	Prof. Roger Alberto Tel.: +41 44 635 4631 E-Mail: ariel@chem.uzh.ch www.chem.uzh.ch/en/research/groups/alberto.html
Universität Zürich, Department of Chemistry	Radiochemie und Bildgebung	Prof. Jason P. Holland Tel.: +41 44 635 3990 E-Mail: jason.holland@chem.uzh.ch www.chem.uzh.ch/en/research/groups/holland.html
Universität Lausanne, Faculté de biologie et médecine, Institut de radiophysique (IRA)	Strahlenschutz, Dosimetrie, Radioökologie, Radiopharmazie	Prof. François Bochud Tel.: +41 21 314 8068 E-Mail: Francois.Bochud@chuv.ch www.chuv.ch/ira
Forschungseinrichtungen		
Paul-Scherrer-Institut – Labor für Radio- und Umweltchemie (LCH) – Labor für Entsorgung (LES)	Superschwere Elemente Isotopen- und Targetchemie medizinische Radionuklide Radiogeochemie	Dr. Robert Eichler Tel.: +41 56 310 2401 E-Mail: robert.eichler@psi.ch www.psi.ch/lch Prof. Sergey Churakov Tel.: +41 56 310 4113 E-Mail: sergey.churakov@psi.ch www.psi.ch/les
Paul Scherrer Institute, Center for Radiopharmaceutical Sciences	Radiopharmaceutical Sciences	Prof. Roger Schibli Tel.: +41 56 310 2837 E-Mail: roger.schibli@psi.ch www.psi.ch/zrw/center-for-radiopharmaceutical-sciences-crs
Center for Radiopharmaceutical Sciences (ETH Zürich, PSI und University Hospital Zürich)	Radiopharmazie	Prof. Roger Schibli Tel.: +41 56 310 2837 E-Mail: roger.schibli@psi.ch www.psi.ch/zrw





