

# Auf der Jagd nach Superschweren

In neueren Experimenten wurden mit großer Wahrscheinlichkeit erstmals superschwere Atomkerne erzeugt und nachgewiesen.

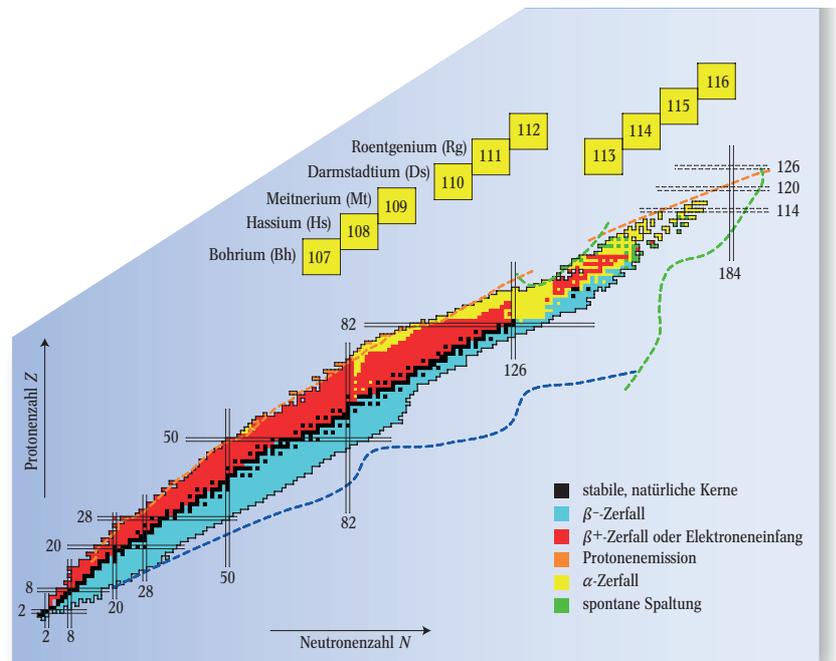
Sigurd Hofmann

Als „moderne Alchemisten“ haben die Kernphysiker in den vergangenen Jahrzehnten aus bekannten Elementen neue erzeugt und damit das Periodensystem und die Nuklidkarte kontinuierlich erweitert. Die Suche nach neuerschweren Elementen ist eine der spannendsten Aufgaben der Kernphysik und Kernchemie, seitdem Kernmodelle eine „Insel der Stabilität“ vorausgesagt haben, die gewissermaßen von einem Meer der Instabilität umgeben und dem Kontinent der bekannten Isotope vorgelagert ist. Mit den neuesten Ergebnissen scheint diese Insel nun erreicht zu sein.

Die Atome der Edelgase erhalten ihre besonderen Eigenschaften dadurch, dass sie abgeschlossene Elektronenschalen besitzen. Analog dazu sind auch einige Atomkerne besonders stabil, weil sie abgeschlossene Schalen für Protonen oder Neutronen besitzen. Kerne mit diesen „magischen Zahlen“ für Protonen oder Neutronen zeichnen sich durch zwei wichtige Eigenschaften aus. Ihre Bindungsenergie, die aus den Massen der Kerne bestimmt wird, ist besonders hoch, und die Kerne sind sphärisch und nur schwer deformierbar. Die bekannten magischen Zahlen für Protonen ( $Z$ ) und Neutronen ( $N$ ) sind 2, 8, 20, 28, 50, 82 und für die Neutronen auch  $N=126$ .

Die größte Stabilität besitzen doppelt-magische Kerne, also solche, bei denen sowohl die Protonenzahl als auch die Neutronenzahl magisch ist (Abb. 1). Der schwerste bekannte doppelt-magische Kern und zugleich schwerste stabile Atomkern überhaupt ist  $^{208}\text{Pb}$  mit  $Z=82$ ,  $N=126$  und der Massenzahl  $Z+N=208$ .<sup>1)</sup> Unter den noch schwereren Elementen besitzen nur die Isotope  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  der Elemente Thorium ( $Z=90$ ) und Uran ( $Z=92$ ) ausreichend lange Halbwertszeiten, um sie heute noch in der Natur zu finden.

Mit dem Modell eines elektrisch geladenen Tropfens, das Anfang der 1930er Jahre von Hans Bethe, George Gamow und Carl Friedrich von Weizsäcker entwickelt wurde, gelang es erstmals recht gut, den Trend der Bindungsenergien für alle Kerne



**Abb. 1:** Die Nuklidkarte zeigt alle bekannten Kerne in einem Koordinatensystem, das aus der Zahl ihrer Protonen ( $Z$ ) und der Zahl ihrer Neutronen ( $N$ ) aufgespannt wird. Die „magischen“ Zahlen sind durch vertikale oder horizontale Doppellinien gekennzeichnet. Die gestrichelten Kurven markieren die theoretisch vorhergesagten Grenzen der Nuklidkarte. Superschwere

Elemente werden im Bereich der doppelt-magischen Kerne bei  $Z=114$ ,  $120$  oder  $126$  und  $N=184$  erwartet. Hervorgehoben sind die sechs Elemente von 107 bis 112, die bei der GSI in Darmstadt entdeckt wurden, und die Elemente von 113 bis 116, die erst kürzlich am FLNR in Dubna synthetisiert wurden.

der Nuklidkarte zu beschreiben. Die Bindungsenergie ergibt sich demnach aus den anziehenden Kernkräften, die zwischen Protonen und Neutronen wirken, und den abstoßenden elektrischen Kräften, die nur zwischen Protonen wirken. Das Tröpfchenmodell erklärt die erst später (Ende 1938) in den Arbeiten von Otto Hahn, Lise Meitner und Friedrich Wilhelm Straßmann entdeckte Spaltung des Urans in zwei Bruchstücke.

Für die Stabilität eines Kerns ist die Energie entscheidend, die benötigt wird, um den Kern aus dem Grundzustand heraus zu deformieren. Diese Deformationsenergie ergibt sich im Tröpfchenmodell im Wesentlichen aus der Differenz von Oberflächenspannung und Coulomb-Kraft. Ist die Deformationsenergie positiv, so entsteht eine

1) Erst kürzlich gelang der Nachweis, dass das vermeintlich stabile  $^{209}\text{Bi}$  ( $Z=83$ ,  $N=126$ ) durch Aussenden von  $\alpha$ -Teilchen radioaktiv zerfällt, wenn auch mit außergewöhnlich langer Halbwertszeit von  $1,9 \times 10^{19}$  Jahren.

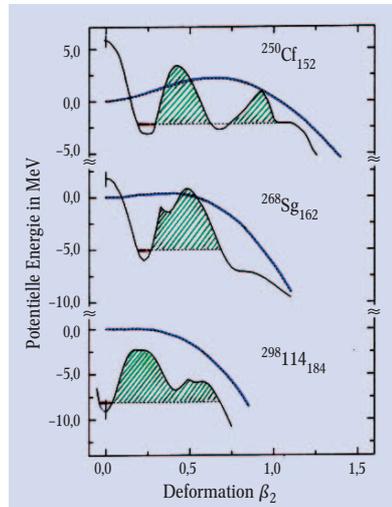
## KOMPAKT

- ▶ Kernmodelle sagen stabile „magische“ Schalen für Protonen und Neutronen jenseits der bekannten Schalenabschlüsse voraus.
- ▶ Mit hochentwickelten Techniken gelingt es, neue schwere Isotope zu erzeugen und diese einzeln und eindeutig zu identifizieren.
- ▶ Demnach gibt es zumindest bis Element 118 ein zusammenhängendes Gebiet quasi-stabiler Kerne.
- ▶ Die gemessenen Eigenschaften dieser Kerne stimmen hervorragend mit Vorhersagen überein; z. B. haben die Isotope  $^{267}\text{Db}$  bzw.  $^{267}\text{Rf}$  relativ große Halbwertszeiten von 73 Minuten bzw. 2,3 Stunden.

Prof. Dr. Sigurd Hofmann, Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), Planckstraße 1, 64291 Darmstadt

Barriere, die eine sofortige Spaltung verhindert (Abb. 2). Spaltung ist dann nur durch den quantenmechanischen Tunneleffekt möglich. Bei etwa  $Z=110$  wechselt die Differenz jedoch das Vorzeichen, sodass dann die abstoßenden Kräfte überwiegen und schwerere Kerne gleich nach ihrem Entstehen in zwei Bruchstücke zerfallen sollten – demnach wäre mit Element 110 ein Ende des Periodensystems erreicht.

**Abb. 2:** Nach dem Tröpfchenmodell (blaue Kurve) ist der Kern  $^{250}\text{Cf}$  (oben,  $Z=98$ ) im Grundzustand sphärisch und hat eine breite Spaltbarriere. Berücksichtigt man auch die Schaleneffekte, so ergibt sich ein deformierter Grundzustand (erstes Minimum von links) und eine zweihöckrige Spaltbarriere. Die grün schraffierte Fläche ist ein Maß für die Behinderung der Spaltung. Bei  $^{268}\text{Sg}$  (Mitte,  $Z=106$ ) ist die Barriere nach dem Tröpfchenmodell schon fast verschwunden, wegen der Schaleneffekte bildet sich trotzdem eine respektable Spaltbarriere aus. Auch dieser Kern ist im Grundzustand deformiert. Bei dem superschweren Kern  $^{298}114_{184}$  (unten) erzwingen die Schaleneffekte einen sphärischen Grundzustand und eine breite und hohe Spaltbarriere. (nach A. Sobiczewski).



Für die magischen Zahlen bietet das Tröpfchenmodell keine Erklärung. Diese werden erst im Rahmen des Schalenmodells für den Atomkern verständlich, das Maria Goeppert-Mayer in Chicago und unabhängig Otto Haxel, J. Hans Daniel Jensen und Hans Eduard Suess in Heidelberg 1948 entwickelt haben. Sie führten dazu in die Schrödinger-Gleichung für die Energiezustände eine starke Kopplung zwischen der Bahn der Nukleonen und ihrem Eigendrehimpuls (Spin) ein.

Mit dem Schalenmodell wuchs die Hoffnung auf eine Fortsetzung des Periodensystems und eine erhöhte Stabilität bei dem nächsten doppelt-magischen Kern jenseits von  $^{208}\text{Pb}$ . Allerdings mussten noch weitere zwanzig Jahre vergehen, bevor es Ende der 1960er Jahre mehreren Theoretikern gelang, die stabileren Bereiche einzugrenzen: Zunächst kombinierte der Russe Vilen M. Strutinski das Tröpfchenmodell mit dem Schalenmodell (makroskopisch-mikroskopisches Modell), dann berechneten die Amerikaner William D. Myers und Wladyslaw Swiatecki starke Schaleneffekte bei  $Z=126$  und  $N=184$ , und schließlich sagte der Deutsche Heiner W. Meldner die nächste magische Protonenzahl nach 82 bei  $Z=114$  voraus. Bei schweren Kernen tragen die Schaleneffekte zwar nur im Promillebereich zur gesamten Bindungsenergie bei (diese beträgt für den in Abb. 2, unten, gezeigten Kern  $^{298}114$  rund  $-2123$  MeV), diese kleine Korrektur kann das Vorzeichen der Deformationsenergie aber wieder ändern, sodass eine Spaltbarriere entsteht (Abb. 2).

Weitere theoretische Arbeiten sagten eine ganze „Insel der Stabilität“ aus superschweren Elementen voraus, die, getrennt vom „Kontinent“ durch ein Meer der Instabilität, bei Protonenzahlen  $Z=114$  über 120 bis 126 und der Neutronenzahl  $N=184$  liegen sollte. Durch den Schnittpunkt  $Z=114$  und  $N=184$  verläuft, wie beim doppelt-magischen  $^{208}\text{Pb}$ , die Linie der gegen  $\beta$ -Zerfall stabilen Kerne. Deshalb wurden gerade dort besonders lange Lebensdauern erwartet. Der Nachweis von  $^{298}114$  wurde zum Wunschtraum der Kernchemiker

und Physiker, und der Wettlauf begann, dieses und weitere superschwere Elemente zu finden.

Nach den kühnsten Vorhersagen sollten superschwere Elemente ausreichend lange Halbwertszeiten haben, um sie auch in der Natur finden zu können. Zudem sollten sie durch leicht zu messende Spaltung in zwei Bruchstücke zerfallen, sodass man sie sogar mit vergleichsweise geringem Aufwand hätte entdecken können, ein Grund, warum sich auch viele kleinere Labors an dem Wettlauf beteiligten.

Arbeitsgruppen in Forschungszentren mit Schwerionenbeschleunigern versuchten gleichzeitig, die superschweren Elemente in Kernreaktionen herzustellen. Doch die von Zeit zu Zeit verkündeten „Entdeckungen“ hielten einer genaueren Untersuchung nicht stand. Schließlich kehrten die „Alchemisten“ zur bewährten Tradition zurück: Statt zum direkten „Sprung auf die Insel“ anzusetzen, suchten sie nach den Grenzen des Periodensystems, geduldig und in mühevoller Kleinarbeit, Schritt für Schritt und Element für Element.

### Die Transfermium-Elemente

Die Transfermium-Elemente von 101 bis  $106^{2)}$  wurden zwischen 1955 bis 1974 entdeckt, und zwar am Lawrence Berkeley sowie Lawrence Livermore National Laboratory (LBNL bzw. LLNL), beide in Kalifornien, und am Joint Institute for Nuclear Research (JINR) in Dubna, 120 km nördlich von Moskau. Sie entstanden in Fusionsreaktionen mit „Targets“ aus den schwersten Elementen, die sich noch in wägbaren Mengen (mg oder  $\mu\text{g}$ ) in Kernreaktoren erzeugen lassen, wie z. B. Curium (96), Californium (98) oder Einsteinium (99). Bestrahlt wurden die Targets mit Isotopen von Helium (2), Kohlenstoff (6), Sauerstoff (8) oder Neon (10), die in Zyklotronen auf etwa 10 % der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt wurden. Diese Geschwindigkeit ist notwendig, um die elektrische Abstoßung zwischen Projektil- und Targetkern zu überwinden und eine Fusionsreaktion in Gang zu bringen. Die Experimente waren erschwert durch die hohe Radioaktivität des Targetmaterials.

Dieses Problem lässt sich mit Targets aus stabilen Elementen wie Blei oder Wismut vermeiden. Aufgrund der notwendigen schwereren Projektilen sind dann aber stärkere Beschleuniger nötig, wie sie zunächst in Dubna gebaut wurden. Dort gelang es erstmals, schwere Elemente in Fusionsreaktionen mit Strahlen von Argon (18) bis Chrom (24) und Targets aus Blei oder Wismut herzustellen.

Nach der Inbetriebnahme des Schwerionenbeschleunigers UNILAC (Universal Linear Accelerator) bei der GSI in Darmstadt wurden 1976 zunächst auch Targets aus Blei und Wismut bestrahlt. Anfang der 1980er Jahre gelang die Entdeckung der Elemente Bohrium (107), Hassium (108) und Meitnerium (109) mit Strahlen aus Chrom und Eisen. Man hatte erwartet, dass die Kerne vor dem Erreichen der Insel der Stabilität mit zunehmender Ladung immer wahrscheinlicher durch Spontanspaltung zerfallen würden und zwar mit immer kürzer werdenden Halbwertszeiten, die so kurz werden könnten, dass sich die Kerne einem Nachweis sogar entzögen. Zur Überraschung der Physiker wurde statt Spontanspaltung jedoch die Emission von  $\alpha$ -Teilchen gemessen mit relativ langen Halbwertszeiten von 1–100 ms.

Die mit Detektoren gemessene Energie der  $\alpha$ -Teilchen gibt die Differenz der Bindungsenergien zwischen emittierendem Kern und seinem Zerfallsprodukt an.

2) Diese sind Mendeleevium ( $Z=101$ ), Nobelium (102), Lawrencium (103), Rutherfordium (104), Dubnium (105) und Seaborgium (106).

Daher lassen sich  $\alpha$ -Zerfallsketten zur Messung von Kernbindungsenergien benutzen. Die Ergebnisse zeigten erhöhte Stabilität für Kerne nahe  $Z=108$  und  $N=162$ , wodurch die Spaltwahrscheinlichkeit der Kerne soweit reduziert wird, dass der  $\alpha$ -Zerfall die schnellere Zerfallsart bildet. Die erhöhte Stabilität lässt sich theoretisch dadurch erklären, dass bei diesen Nukleonenzahlen und einer bestimmten Deformation der Kerne die Energien von Nukleonenbahnen teilweise zu kleineren Energien und teilweise zu größeren Energien verschoben werden, sodass bei  $Z=108$  und  $N=162$  eine Energielücke entsteht. Da jede Bahn mit zwei Protonen oder Neutronen besetzt werden kann, ergibt sich eine kleinere (negative) Bindungsenergie für Kerne, bei denen die tiefer liegenden Bahnen besetzt werden. Dies gilt auch dann noch, wenn einige Protonen oder Neutronen Bahnen oberhalb der Energielücke besetzen. Dieser Effekt entspricht genau dem eines Schalen- oder Unterschalen-Abschlusses bei sphärischen Kernen, ist aber damit nicht identisch, weshalb der Begriff „deformierte Schale“ nur bedingt richtig ist.

Wie Abbildung 2 an drei ausgewählten Beispielen zeigt, haben schon kleine Änderungen an den Werten der Schaleneffekte Auswirkungen auf die Spaltbarrieren und damit großen Einfluss auf die Lebensdauern von schweren Kernen.

### Das Dilemma – kalte oder heiße Fusion?

Kommen wir jetzt zurück zu einer näheren Betrachtung des Fusionsprozesses. Bei der Reaktion zwischen Projektil und Target entsteht zunächst ein fusionierter Kern (Compound-Kern), von dem Neutronen abdampfen müssen, damit sich die Kernmaterie abkühlt und ein kalter Restkern entsteht, den wir schließlich im Experiment nachweisen. Die Temperatur oder Anregungsenergie des Compound-Kernes ergibt sich dabei aus den Bindungsenergien der beteiligten Kerne sowie der kinetischen Energie des Projektils. Je höher die Anregungsenergie ist, desto mehr Neutronen müssen emittiert werden. Je nach Temperatur des Compound-Kernes bei den verschiedenen Reaktionen unterscheidet man heiße oder kalte Fusion.

Von heißer Fusion spricht man bei der Erzeugung schwerer Elemente mit Targets aus Aktiniden<sup>3)</sup> und leichten Projektilen, die zusammen eine relativ geringe Kern-Bindungsenergie aufweisen. Bei Strahlenergien, mit denen gerade die elektrische Abstoßung zwischen Projektil- und Target-Kern überwunden wird, führt dieser Prozess zur Emission von mindestens vier Neutronen. Leider ist bei hoher Anregungsenergie aber auch die Wahrscheinlichkeit groß, dass der Compound-Kern in zwei Bruchstücke zerfällt.

Aus diesem Grund erscheinen kalte Fusionsreaktionen mit Blei- oder Wismut-Targets und Projektilen aus Calcium bis Zink vorteilhaft. Bei diesen Kernen ist die Summe der Bindungsenergien höher, und bei der Fusion wird nur ein Neutron emittiert. Allerdings erschwert ein anderes Phänomen, das von der Reakti-onstheorie ins Feld geführt wird, den Fusionsprozess mit schweren Projektilen. Betrachtet man die Kerne als Flüssigkeitstropfen, so ist das Verschmelzen zweier Tropfen mit Reibung verbunden, die das Projektil so stark verlangsamt, dass es nicht zu einer Fusion kommt. Die Reaktionspartner trennen sich wieder nach Austausch einiger oder mehrerer Nukleonen. Es wird also eine Zusatzenergie (Extrapush) gebraucht, damit das System fusioniert. Aber letztlich wird auch diese

Energie in Anregungsenergie umgewandelt und damit die Spaltwahrscheinlichkeit erhöht. Zudem wurde angenommen, dass mit zunehmendem  $Z$  auch die Größe der notwendigen Zusatzenergie rapide ansteigen muss. All diese Argumente ließen es sehr zweifelhaft erscheinen, dass neue Elemente jenseits von 109 in absehbarer Zeit machbar sein würden.

### Verbesserte experimentelle Einrichtung

Bei genauer Durchsicht der Daten wurde deutlich, dass die Aussagen über Fusionswahrscheinlichkeiten und Zusatzenergien recht unsicher und inkonsistent waren. Es gab genug Unsicherheiten, um einen Hoffnungs-schimmer aufkeimen zu lassen, dass superschwere Elemente doch noch machbar sein könnten und vielleicht auf Wegen, die bisher noch nicht versucht wurden. Um dies einer gründlichen experimentellen Prüfung zu unterziehen, haben wir bei der GSI beschlossen, das Experiment zur Fusion von Element 108 zu wiederholen. Bei der Entdeckung 1984 haben wir die Reaktion  $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{266}108^*$  (der Stern zeigt an, dass es sich um einen angeregten Compound-Kern handelt) nur bei einer einzigen Projektilenergie vermessen, von der wir glaubten, dass sie die maximale Produktionsrate liefern würde. Damals gelang es, drei Atome nachzuweisen.

Nun schien es unbedingt notwendig, die Strahlenergie zu variieren, um die Produktionsrate als Funktion der Energie messen und damit die optimale Energie experimentell bestimmen zu können. Diese sog. Anregungskurven enthalten grundlegende Informationen über den Fusionsprozess. Um sie zu gewinnen, mussten wir aber mindestens dreißig Atome produzieren anstatt nur drei, das heißt, die damals schon hohe Empfindlichkeit unserer Experimentiertechnik musste entscheidend verbessert werden.

Die Verbesserungen begannen damit, eine neue äußerst stabile Ionenquelle für den Projektilstrahl aufzubauen, die hohe Ladungszustände der Ionen und hohe

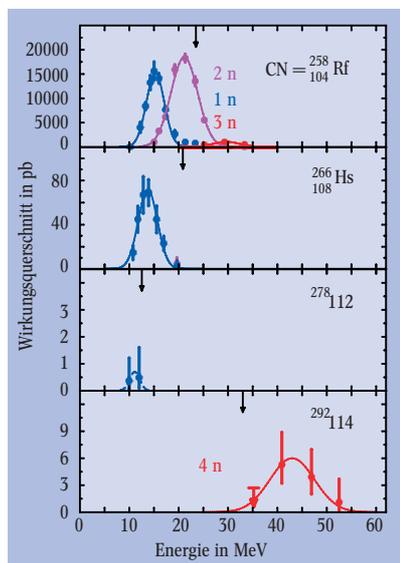
3) Aktiniden sind die Elemente von Aktinium (89) bis Lawrencium (103), die wie die Seltenen Erden oder Lanthaniden von Lanthan (57) bis Lutetium (71) alle sehr ähnliche chemische Eigenschaften besitzen.



**Abb. 3:** Das Geschwindigkeitsfilter SHIP (oben) bildet zusammen mit dem Targetrad (links) und dem Detektorsystem (links oben) das Hauptnachweisgerät zur Entdeckung neuer chemischer Elemente am Darmstädter Schwerionenbeschleuniger.

Ströme liefert (es wurden  $3\text{--}6 \times 10^{12}$  Ionen pro Sekunde am Targetort erreicht) und dabei nur wenige Milligramm Material verbraucht – ein wichtiger Faktor angesichts der teilweise sehr teuren angereicherten Isotopen.

Entscheidend verbessert wurde auch unser wichtigstes Nachweisgerät zur Abtrennung der Reaktionsprodukte, das 11 m lange Geschwindigkeitsfilter SHIP (Separator for Heavy Ion reaction Products, Abb. 3). Die Flugzeit der Fusionsprodukte durch SHIP von etwa einer Mikrosekunde bestimmt die kürzeste Lebensdauer von Kernen, die wir beobachten können. Die Fusionsreaktionen finden in dünnen Targets statt, die sich auf einem Rad montiert durch den Projekttilstrahl drehen. Die Fusionsprodukte fliegen in Strahlrichtung aus dem Target heraus, aber mit ihnen auch die meisten der Projektile, die ohne zu reagieren durch das Target hindurch geflogen sind. Eine Anordnung von elektrischen und magnetischen Feldern trennt höchst effizient die langsameren Fusionsprodukte von den schnelleren Projektile, die in einem wassergekühlten Kupferblech gestoppt werden. Der auftreffende elektrische Strom wird gemessen und integriert, um aus der Strahldosis zusammen mit der Targetdicke und der gemessenen Anzahl von Fusionsprodukten die Reaktionswahrscheinlichkeit zu bestimmen.



**Abb. 4:** Gemessene Anregungskurven für die Fusion schwerer und superschwerer Elemente bei kalter Fusion (Compoundkerne  $^{258}\text{Rf}$  bis  $^{278}\text{112}$ ) und bei heißer Fusion ( $^{292}\text{114}$ ). Die Pfeile an den jeweils oberen Abszissen markieren die Anregungsenergien der Compoundkerne für den Fall, dass die kinetische Energie des Projektils gerade ausreicht, damit sich die mittleren Radien von Projektil- und Targetkern bei einem zentralen Stoß berühren. Im Falle der kalten Fusion (CN =  $^{258}\text{Rf}$  bis  $^{278}\text{112}$ ) liegen die maximalen Bildungswahrscheinlichkeiten unterhalb, im Falle der heißen Fusion ( $^{292}\text{114}$ ) oberhalb dieser Energie.

Das Rad mit acht Targets rotiert mit 1125 U/min durch den Strahl und erlaubt es, auch dünne Schichten aus metallischem Blei oder Wismut trotz ihres niedrigen Schmelzpunktes mit hohen Teilchenströmen zu bestrahlen. Targets aus PbS und  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  sollen aufgrund ihrer höheren Schmelzpunkte künftig Strahlströme von bis zu  $6 \times 10^{15}$  Ionen pro Sekunde ermöglichen.

Die Fusionsprodukte passieren das SHIP ungehindert und werden mit einem Magneten in eine ausgefeilte Anordnung verschiedener Detektoren abgelenkt. Drei Flugzeitdetektoren sowie ein Silizium-Detektor liefern vier gleichzeitige Signale, die das Implantieren eines Ions anzeigen. Ein Stopp-Detektor misst die Energie des auftreffenden Teilchens, den Zeitpunkt des Auftreffens und den Ort in horizontaler und vertikaler Richtung. Er misst auch, was in der Folge am gleichen Ort im Detektor passiert, ob ein radioaktiver Zerfall stattfindet, zu welchem Zeitpunkt und mit welcher Energie. Weitere Detektoren, darunter solche zum Nachweis von Gamma- oder Röntgenstrahlen, vervollständigen das neue Detektorsystem, das implantierte Ionen,  $\alpha$ -Teilchen und Fragmente der Spontanspaltung

zu hundert Prozent nachweist. Alpha-Zerfallsketten werden „vollständig“ erfasst, kein Kettenglied geht verloren. Alle Signale, die zu einer Zerfallskette gehören, müssen den gleichen Ort im Detektor besitzen wie das zuerst implantierte Ion. Das Schicksal dieses Kerns lässt sich Schritt für Schritt über einige Generationen bekannter radioaktiver Zerfallsprodukte verfolgen. Jede dieser Zerfallsketten hat ihren eigenen Fingerabdruck, der durch die Lebensdauern der Isotope und die Energien der emittierten Zerfallsteilchen gekennzeichnet ist. Dadurch wird der unbekannte Ausgangskern eindeutig identifiziert. Die Ortsinformation (Auflösung:  $\pm 0,1$  mm) wird gebraucht, um auch Ketten zu verfolgen, die aus Kernen mit langen Lebensdauern bestehen.

### Neue Erfolge mit der kalten Fusion

Wie wirkungsvoll die gemachten Verbesserungen waren, zeigte sich, als die Synthese von Element 108 wiederholt wurde. In der gleichen Messzeit, in der zehn Jahre zuvor drei Atome erzeugt wurden, gelang es jetzt, 75 nachzuweisen. Vollständige Anregungskurven im Energiebereich der Emission von einem Neutron wurden für die Produktion sowohl von Element 108 als auch von Element 104 gemessen (Abb. 4). Aus diesen beiden Kurven ergab sich die optimale Energie zur Herstellung von Element 110 durch Extrapolation.

Im November 1994 wurde zwei Wochen lang ein  $^{208}\text{Pb}$ -Target mit einem Strahl aus  $^{62}\text{Ni}$ -Ionen der „richtigen“ Energie bestrahlt. Das erste Atom von Element 110 wurde am 9. November 1994 entdeckt, nach nur zwei Tagen Messzeit; zwei weitere Atome mit der Massenzahl 269 folgten. Mit dem gleichen Target, aber dem neutronenreicheren  $^{64}\text{Ni}$ -Isotop gelang in den folgenden zwei Wochen die Erzeugung von neun Atomen des schwereren Isotops mit der Massenzahl 271.

Nur einen Monat später, am 8. Dezember 1994, folgte das nächste neue Element: Bei Bestrahlung eines  $^{209}\text{Bi}$ -Targets mit  $^{64}\text{Ni}$ -Ionen wurden in einem Zeitraum von drei Wochen drei Atome von Element 111 mit der Massenzahl 272 produziert. Innerhalb der Zerfallskette gelang auch erstmals der Nachweis der Tochterkerne  $^{268}\text{Mt}$  (109) und  $^{264}\text{Bh}$  (107). Die Ketten endeten bei bekannten Isotopen von Dubnium (105) und Lawrencium (103).

Gut ein Jahr später wurde am SHIP in der Reaktion  $^{70}\text{Zn} + ^{208}\text{Pb}$  eine Suche nach Element 112 gestartet. Am 9. Februar 1996 wurde die bisher längste Zerfallskette gemessen und auf Grund ihres „Fingerabdrucks“ durch den Zerfall bekannter Tochterkerne dem Isotop mit der Massenzahl 277 des neuen Elementes 112 zugeordnet. Abb. 5 zeigt diese Zerfallskette zusammen mit anderen bis heute gemessenen Isotopen der Elemente 110 und 111.

Die Ergebnisse zu den Elementen 110 bis 112 wurden inzwischen in weiteren Experimenten am SHIP selbst, aber auch mit einem ähnlichen Nachweissystem am RIKEN-Labor in Saitama nahe Tokio von Kosuke Morita und Mitarbeitern mehrfach bestätigt. Die nahezu unbegrenzt zur Verfügung stehende Strahlzeit erlaubte es der japanischen Gruppe, in einem groß angelegten Versuch nach Element 113 zu suchen. Insgesamt 20 Wochen lang bestrahlten sie ein  $^{209}\text{Bi}$ -Target mit  $^{70}\text{Zn}$ -Ionen. Am 23. Juli 2004 wurde die erste und in dieser Reaktion bisher einzige Zerfallskette von Element 113 gemessen und dem Isotop mit der Massenzahl 278 zugeordnet (Abb. 5). Der gemessene Bildungsquerschnitt von 55 Femtobarn (fb) ist der kleinste bei dieser Art von Kernreaktion jemals gemessene Wert

und stimmt mit der am SHIP gemessenen Obergrenze von 160 fb überein. Zum Vergleich dazu, der am SHIP gemessene Wirkungsquerschnitt für die Synthese von Element 112 beträgt 400 fb.

Ein international besetztes Gremium der IUPAC und IUPAP (International Union of Pure and Applied Chemistry und Physics) hat inzwischen entschieden, dass der GSI das Recht zusteht, die Elemente 110 und 111 zu benennen. Die von uns vorgeschlagenen Namen Darmstadium (Ds) bzw. Roentgenium (Rg) wurden bereits als endgültig von der IUPAC angenommen. Eine endgültige Entscheidung über die Entdeckung der Elemente 112 und darüber hinaus steht noch aus.

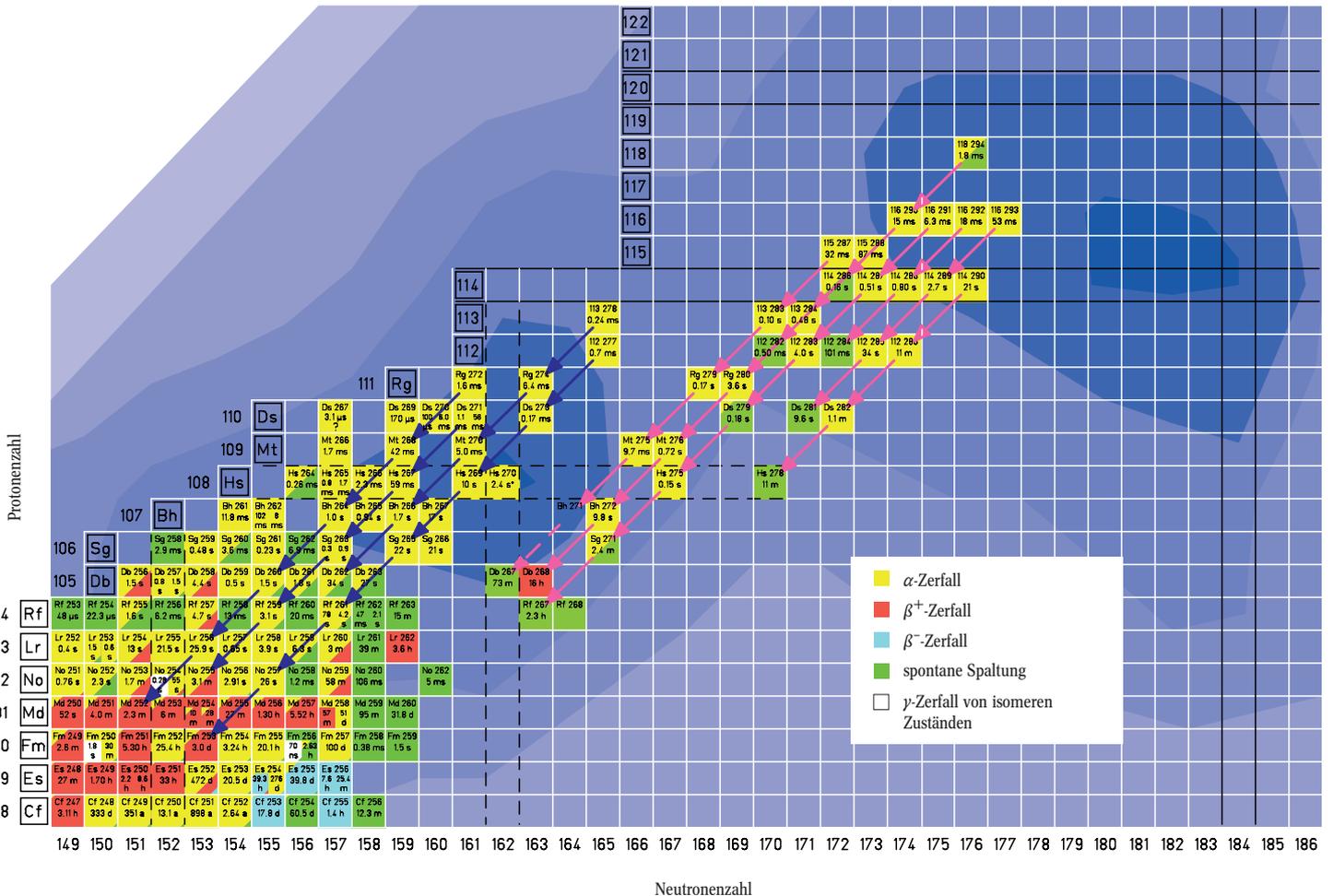
### Neue Erfolge mit der heißen Fusion

Reaktionen, die wir wegen ihrer hohen Anregungsenergie als „heiße Fusion“ bezeichnen, basieren auf Isotopen der Aktiniden als Targets.  $^{232}\text{Th}$  und  $^{238}\text{U}$  sind die neutronenreichsten Isotope der Elemente Thorium und Uran, die in der Natur vorkommen. Sie sind nur schwach radioaktiv und im Labor noch ohne aufwändige Sicherheitsvorkehrungen als Targetmaterial zu handhaben. Dennoch ist es möglich, auch die in Kernreaktoren künstlich hergestellten Isotope der Elemente jenseits von Uran als Targets zu verwenden. Beispiele sind  $^{242}\text{Pu}$ ,  $^{244}\text{Pu}$  ( $Z=94$ ),  $^{243}\text{Am}$  (95),  $^{245}\text{Cm}$ ,  $^{248}\text{Cm}$  (96) und  $^{249}\text{Cf}$  (98). Diese sehr neutronenreichen Isotope ergeben zusammen mit dem neutronenreichen  $^{48}\text{Ca}$

als Projektil sehr neutronenreiche Compound-Kerne. Trotz Abdampfung von etwa vier Neutronen sind die erhaltenen Verdampfungsrestkerne bis einschließlich Element 114 um sechs bis acht Neutronen reicher als entsprechende Reaktionen der kalten Fusion. Mit heißer Fusion ist es also möglich, näher an die ersehnte magische Neutronenzahl 184 und damit näher an das Zentrum der Insel der Stabilität heranzukommen.

Das Paradebeispiel für heiße Fusion ist die Reaktion  $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm} \rightarrow ^{292}116 + 4n$  mit  $N=176$  für die Neutronenzahl des Verdampfungsrestkernes. Zwischen 1976 bis 1983 war in Berkeley, Dubna und Darmstadt vergeblich versucht worden, in dieser Reaktion superschwere Elemente herzustellen. Der erreichte Grenzwert lag bei 200 pb. Heute wissen wir, dass diesen Experimenten zwei Größenordnungen an Empfindlichkeit gefehlt hat.

Zwischen 1996 und 1998 unternahm Yuri Ts. Oganessian und seine Mitarbeiter am FLNR (Flerov Laboratory of Nuclear Reactions) des JINR in Dubna neue Anstrengungen, um die Möglichkeiten der heißen Fusion zur Synthese superschwerer Elemente auszuloten. Eine neue Ionenquelle, speziell für einen Strahl aus  $^{48}\text{Ca}$ -Ionen entwickelt, ermöglichte Strahlströme von bis  $8 \times 10^{12}$  Ionen pro Sekunde bei einem Materialverbrauch von nur 0,3 mg pro Stunde. In den folgenden fünf Jahren fast ununterbrochener Experimentierzeit wurden insgesamt 14 Gramm  $^{48}\text{Ca}$  verbraucht.

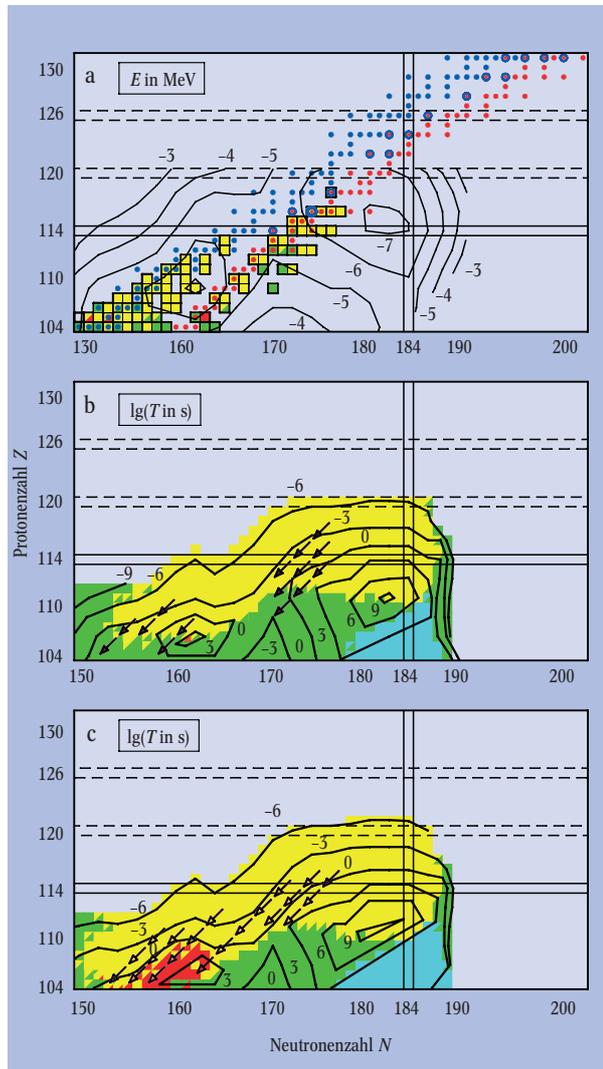


**Abb. 5:** Das obere Ende der Nuklidkarte mit bekannten und zugeordneten Kernen, deren gemessenen Halbwertszeiten und Zerfallsketten. Die Hintergrundstruktur in blau zeigt die berechneten Schalenkorrekturen nach dem makroskopisch-mikroskopischen Modell von Sobczewski und Mitarbeitern.

Die Minimalwerte liegen bei  $-7$  MeV sowohl für deformierte Kerne bei  $Z=108, N=162$  und für sphärische superschwere Kerne bei  $Z=114, N=184$ . Farbänderungen markieren zunehmende Schalenkorrekturen bis  $-2$  MeV in Schritten von 1 MeV.

Zur Abtrennung der Reaktionsprodukte wurden zwei Separatoren benutzt, ein SHIP-ähnliches Gerät mit dem Namen VASSILISSA (genannt nach einer Fee in einem russischen Märchen) und ein gasgefüllter Separator. Der entscheidende Vorteil gegenüber den Experimenten bei GSI ist auch hier, wie in Japan, die nahezu unbegrenzte Strahlzeit, ermöglicht durch einen dedizierten Beschleuniger.

**Abb. 6:** Berechnete Grundzustands-Schalenkorrektur-Energien und Compoundkerne, die in kalter Fusion mit  $^{208}\text{Pb}$ -Targets und in heißer Fusion mit  $^{248}\text{Cm}$ -Targets erreicht werden können (a). Die farbigen Quadrate markieren die gegenwärtig bekannten Kerne. In b) und c) ist die dominierende Zerfallsart, d. h. diejenige mit der kürzesten Halbwertszeit, durch Farbfelder markiert (Spontanspaltung: grün,  $\alpha$ -Zerfall: gelb,  $\beta^+$ -Zerfall: rot und  $\beta^-$ -Zerfall: blau). b) gilt für gerade-gerade-Kerne, c) für Kerne mit ungerader Massenzahl. Die Pfeile zeigen gemessene Zerfallsketten und ihre Zuordnung.



In systematischer Arbeit wurden in den Jahren von 1998 bis heute die oben schon erwähnten Targets mit  $^{48}\text{Ca}$ -Ionen bestrahlt. Den jeweiligen Targets entsprechend wurden gemessene Zerfallsketten den neuen Elementen 114, 115, 116 und 118 zugeordnet. Das neue Element 113 entstand dabei als Tochterprodukt nach dem Zerfall von Element 115 bei einer Messung im Sommer 2003, also noch vor dem  $Z=113$ -Experiment in RIKEN. Neue neutronenreiche Isotope von Element 112 wurden sowohl in Reaktionen mit  $^{238}\text{U}$  als auch als Tochterprodukte von Element 114 und 116 gemessen. Abb. 5 zeigt alle in Dubna neu gemessenen Elemente und Isotope, insgesamt wurden 66 Zerfallsketten gemessen und zugeordnet.

Alle Zerfallsketten enden nach einer Reihe von  $\alpha$ -Zerfällen durch Spontanspaltung. Keine der Ketten endet in einem bekannten Isotop. Dieser Umstand ließ anfangs eine Isotopenzuordnung und damit die Bestimmung der abgedampften Neutronen fragwürdig erscheinen. Um die Unsicherheiten zu reduzieren, wur-

den seit 2003 Anregungskurven gemessen (ein Beispiel ist in Abb. 4 unten gezeigt). Außerdem wurde versucht, ein und dasselbe Isotop mit verschiedenen Targetisotopen und entsprechend angepassten Strahlenergien zu produzieren. Dies gelang bei der Bestrahlung von  $^{242}\text{Pu}$  und  $^{244}\text{Pu}$  und dem Nachweis von  $^{287}\text{114}$  einmal bei kleiner Strahlenergie und Abdampfung von drei Neutronen und zum anderen bei höherer Energie und Abdampfung von fünf Neutronen. Ähnlich verhält es sich mit der Zuordnung von Zerfallsketten zu  $^{288}\text{114}$  und  $^{289}\text{114}$ , die sowohl durch Abdampfen von vier bzw. drei Neutronen in Reaktionen mit  $^{244}\text{Pu}$  entstehen als auch als Tochterprodukte bei entsprechender Anzahl abgedampfter Neutronen mit einem  $^{248}\text{Cm}$ -Target und  $Z=116$  als Ausgangselement. Durch diese „Cross-bombardments“ und die Anregungskurven gelang es, anfängliche Fehlzuordnungen zu korrigieren, sodass sich nunmehr, trotz fehlender Anbindung an bekannte Kerne, ein konsistentes Zuordnungsschema ergibt.

### Was wurde erreicht?

Die gemessenen Zerfallsdaten der neuen Elemente und Isotope stimmen sehr gut mit den theoretischen Vorhersagen des makroskopisch-mikroskopischen Modells überein. Abb. 6 zeigt den wichtigsten Parameter dieses Modells, die stabilisierende Schalenkorrektur, zusammen mit den daraus folgenden Halbwertszeiten für Isotope der Elemente 104 bis 120. Zwei ausgeprägte Minima charakterisieren die Potentiallandschaft, eines bei  $Z=108$  und  $N=162$  für deformierte Kerne, das andere bei  $Z=114$  und  $N=184$  für sphärische superschwere Kerne. Im Bereich dieser Minima ist die partielle Halbwertszeit der Kerne für Spontanspaltung so sehr verlängert, dass  $\alpha$ -Zerfall die dominierende Zerfallsart wird.

Für Kerne mit gerader Anzahl von Proton und Neutronen (Abb. 6b) entsteht so eine Insel von  $\alpha$ -Emittlern, die von spontan-spaltenden Kernen umgeben ist. Im Rahmen der Vorhersagegenauigkeit stimmen alle gemessenen Zerfallsketten damit überein. Nach einer Reihe von  $\alpha$ -Zerfällen enden die Ketten durch spontane Spaltung. Bei ungeraden Kernen (Abb. 6c) verlängert das ungerade Nukleon die partiellen Halbwertszeiten für  $\alpha$ -Zerfall und Spontanspaltung um den Faktor 10 bzw. 1000. Dadurch verschwindet der Inselcharakter der  $\alpha$ -Emitter, und  $\alpha$ -Zerfallsketten können bis Rutherfordium und darüber hinaus vorkommen. Auch dies ist im Einklang mit dem Experiment.

In dem allegorischen Bild, in dem die superschweren Elemente als Insel in einem Meer der Instabilität gesehen werden, zeigen die gerade-gerade-Kerne die Situation während der Flut, die ungeraden Kerne dagegen während der Ebbe, dann ist die Insel mit dem Kontinent verbunden.

Gemessene Halbwertszeiten sind am längsten im Bereich der Neutronenzahl 162. Dies ist insbesondere der Fall für Kerne am Ende der Zerfallsketten von  $^{287}\text{115}$  und  $^{288}\text{115}$ . So wurden für die Kerne  $^{267}\text{Db}$  und  $^{267}\text{Rf}$ , ebenfalls im Einklang mit den Vorhersagen, Werte von 73 Minuten bzw. 2,3 Stunden für spontane Spaltung gemessen. Diese Übereinstimmung spricht sehr für die getroffene Zuordnung, da die theoretischen Vorhersagen zu den Zerfalleigenschaften von Kernen in diesem Gebiet an nahe benachbarten und bereits sicher zugeordneten Kernen überprüft werden können.

Sogar Details der Kernstruktur stimmen exzellent überein. Trotz geringer Anzahl gemessener Zerfälle ließ sich bereits nachweisen, dass die Kerne um  $Z=108$  und

$N=162$  deformiert sind, wie theoretisch vorhergesagt. Auch wurden bei einer Reihe von Kernen isomere Zustände identifiziert, die das Schalenmodell gut erklärt. Darüber hinaus nehmen die Halbwertszeiten bei Annäherung an  $N=184$  zu, was deutlich aus den gemessenen Werten für die zusammenhängenden Reihen neutronenreicher Isotope der Elemente 112, 114 und 116 hervorgeht. Die Existenz eines ausgeprägten Schaleneffektes der Protonen bei  $Z=114$  folgt bislang aber nicht aus den Messdaten.

Wirkungsquerschnitte zu kennen ist nicht nur von rein praktischer Bedeutung für die Produktion von superschweren Elementen. Insbesondere geben gemessene Anregungskurven Auskunft, auf welchem Weg zwei leichtere Kerne fusionieren. Die drei wichtigen Parameter, die sich aus den gemessenen Kurven ableiten lassen, sind die Lage als Funktion der Energie, der Wert im Maximum und die Breite der Kurven. Theoretisch sind die unterschiedlichen Werte der gemessenen Kurven für kalte und heiße Fusion (Abb. 4) und auch der systematische Trend bei der kalten Fusion noch nicht vollständig verstanden. Von maßgebendem Einfluss sind sicher folgende Eigenschaften:

► Die elektrische Abstoßung zwischen Projektil und Targetkern, die vom Produkt aus der Zahl der Protonen beider Kerne abhängt und bei anwachsenden Werten zunehmend zu Reseparation nach mehr oder weniger starkem Nukleonenaustausch führt.

► Die Kernstruktur von Projektil und Targetkern, die bestimmt, auf welchem Weg und mit wie viel Verlust an kinetischer Energie durch Reibung (Anregung von Nukleonen in höhere Energiezustände) Nukleonen vom Projektil zum Targetkern übergehen können. Hier erlauben die von Walter Greiner und Mitarbeitern vorhergesagten „kalten Täler“ bei Verwendung von doppelt-magischen Projektilen wie  $^{48}\text{Ca}$  oder Targetkernen wie  $^{208}\text{Pb}$  einen besonders reibungsfreien Fusionsweg.

► Die geometrische Form von Projektil und Targetkern. Hier zeigen die neuen Daten zur heißen Fusion, dass bei deformierten Kernen wie  $^{244}\text{Pu}$  eine Verschmelzung nur stattfindet, wenn der deformierte Targetkern auf der Breitseite getroffen wird. Dies ergibt sich aus der zur Fusion notwendigen höheren Projektilenergie. In dieser Ausrichtung des Targetkerns bildet sich eine besonders kompakte Konfiguration, wobei leere Orbitale um den Äquator des Targetkerns einen Übergang der Nukleonen vom Projektil zum Target erleichtern.

► Die Spaltwahrscheinlichkeit des Compound-Kerns, die zusammen mit der Emissionswahrscheinlichkeit für Neutronen die Überlebenswahrscheinlichkeit des Compound-Kerns bestimmt. Die relativ hohen gemessenen Wirkungsquerschnitte bis zu 5 pb bei der heißen Fusion lassen sich damit erklären, dass mit Erreichen der superschweren Kerne einmal die Spaltbarrieren höher und breiter werden und damit die Spaltwahrscheinlichkeiten abnehmen und außerdem die Emissionswahrscheinlichkeit für Neutronen durch die geringere Neutronenbindungsenergie zunimmt. So folgt aus den neuen gemessenen Anregungskurven für die heiße Fusion eine besonders erfreuliche Perspektive für weitere Messungen im Bereich der superschweren Kerne.

### Was bleibt zu tun?

Um jeden Zweifel aus dem Weg zu räumen, dass mit den jüngsten Experimenten in Dubna die Insel der sphärischen superschweren Kerne erreicht wurde, ist einmal eine unabhängige Bestätigung notwendig

und zum anderen ein Nachweisverfahren, welches erlaubt, Elemente und Isotope eindeutig zu identifizieren. Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten. Am aussichtsreichsten scheint mir ein Auffüllen der noch existierenden Lücke zwischen den Kernen, die mit kalter Fusion erzeugt wurden und die an bekannte Kerne angebunden sind und dem neuen Bereich neutronenreicher Kerne aus der heißen Fusion. Reaktionen dazu stehen ausreichend zur Verfügung. Mit dieser Strategie werden gleichzeitig neue und wichtige Daten zu den Eigenschaften der superschweren Kerne gewonnen und durch einen lückenlosen Übergang die neuen Kerne auch eindeutig zugeordnet. Was fehlt, ist genügend Strahlzeit.

Weitere Methoden, die jede für sich neue und andere Informationen zum Verständnis der Eigenschaften superschwerer Kerne und Atome erbringt, sind direkte Massenmessungen in magnetischen Separatoren oder Ionenfallen, Anregungskurven, Crossbombardments und Laseranregungen von eingefangenen Ionen. Die Bestimmung der chemischen Eigenschaften von superschweren Elementen und ihren Zerfallsprodukten dient sowohl dem Verständnis relativistischer Effekte in der Atomhülle als auch künftigen Trennverfahren durch chemische Reaktionen.

Um auch bei kleinen Wirkungsquerschnitten effektiv messen zu können, sind weitere technische Verbesserungen mit dem Ziel höherer Strahlintensitäten notwendig. Bei der GSI wurde dafür der Aufbau einer neuen Ionenquelle eingeplant, die nochmals höhere Teilchenströme bei höherem Ladungszustand der Ionen liefert. Damit lässt sich auch die Beschleunigereffizienz von jetzt 28 % auf 50 % eines Dauerbetriebs erhöhen. Insgesamt wird eine Stromerhöhung um einen Faktor zehn erwartet. Targetentwicklungen und Verbesserungen am Separator wurden bereits gemacht oder sind in Arbeit, damit sich diese hohen Ströme in Zukunft auch vom Experiment nutzen lassen.

### Literatur

- [1] Yu. Ts. Oganessian et al., Phys. Rev. C **70**, 064609 (2004)
- [2] K. Morita et al., J. Phys. Soc. JPN. **73**, 2593 (2004)
- [3] S. Hofmann und G. Münzenberg, Rev. Mod. Phys. **72**, 733 (2000)
- [4] S. Hofmann, On beyond uranium, in: V. Moses (Hrsg.), Science Spectra, Taylor and Francis, London (2002)

### Der Autor

**Sigurd Hofmann** hat an der Technischen Hochschule (heute: TU) Darmstadt studiert und promoviert. Direkt im Anschluss wurde er 1974 wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der GSI, wo er am Aufbau des Geschwindigkeitsfilters SHIP beteiligt war. Im Jahr 1989 übernahm er nach Peter Armbruster und Gottfried Münzenberg die Leitung der SHIP-Gruppe. Sigurd Hofmann wurde im Jahr 1998 Honorarprofessor an der Universität Frankfurt und im Jahr 2004 mit der Josef Buchmann-Laureatus-Professur ausgezeichnet. Sein Hauptarbeitsgebiet sind die Erzeugung und die Zerfallsspektroskopie neuer Kerne und Elemente. Der Nachweis der Protonenemission von  $^{151}\text{Lu}$  (1981) und die Entdeckung der Elemente 110 bis 112 (1994–1996) gehören zu seinen wichtigsten Arbeiten.

