

Gleich zwei auf einen Streich: die neuen chemischen Elemente 110 und 111

Günter Herrmann*

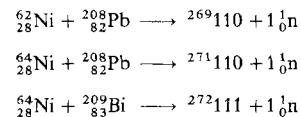
Seit etwa einem Jahrzehnt, seit eine Arbeitsgruppe um Peter Armbruster, Sigurd Hofmann und Gottfried Münzenberg am Schwerionenbeschleuniger UNILAC der Gesellschaft für Schwerionenforschung Darmstadt (GSI) die drei damals schwersten chemischen Elemente zum ersten Male erzeugt und identifiziert hatte^[1] – Element 107 im Februar 1981, 109 im August 1982 und 108 im März 1984 –, gab es nichts entscheidend Neues am Ende des Periodensystems. Vielmehr schien hinsichtlich weiterer Schritte darüber hinaus eher Skepsis angebracht. „[...] Die Synthese dieser Kerne ist unerwartet stark erschwert. Hierin, und weniger im Verschwinden der Kernstabilität, zeichnet sich die Grenze des Periodensystems ab: Noch schwerere Elemente sollten existieren können, doch fehlt es bislang an einem Weg, sie herzustellen“ heißt es 1988 in einem Bericht^[2] in dieser Zeitschrift. Auf Kerneigenschaften kommt es also an, wenn die Grenze des Periodensystems anvisiert wird. Die Elektronenhülle hat damit nichts zu tun, sehr wohl aber mit der Frage, wo die schwersten Elemente im Periodensystem stehen und ob sich dessen Systematik bis dorthin ungebrochen fortsetzt.

Nun ist derselben Arbeitsgruppe in einer überaus ereignisreichen Strahlzeit Ende 1994 erneut ein Paukenschlag gelungen: Am 9. November 1994 um 16:39 h entdeckte sie Element 110 in Form eines Atomkerns der Massenzahl 269^[3]. Am 23. November um 20:07 h kam ein zweites Isotop des Elements 110 mit der Massenzahl 271 hinzu^[4, 5]. Bereits am 8. Dezember um 05:49 h folgte Element 111 mit der Massenzahl 272^[6]. Der Kern ^{269}Ni wurde viermal, ^{271}Ni neunmal und ^{272}Ni dreimal beobachtet^[5]. Jeder dieser neuen Kerne mündet in Zerfallsketten wohlbekannter α -Strahler mit insgesamt 68 erfaßten α -Teilchen^[4]. Lebensdauer und Zerfallsenergie der Kettenglieder stellen ganz charakteristische Signaturen dar, die nicht zufällig zustande kommen können. Mehr noch: was über Bildung und Zerfall schwerster Atomkerne zutage trat, läßt auf noch schwerere Elemente hoffen. Die seit drei Jahrzehnten diskutierten „superschweren“ Elemente um Element 114 erscheinen greifbar geworden.

Synthesestrategie und Nachweistechnik sind im Grunde dieselben geblieben wie bei den Elementen 107 bis 109; wer sich eingehender informieren möchte, sei auf Übersichten verwiesen^[1, 2]. Schwerste Elemente werden durch Fusion zweier Atomkerne erzeugt. Einer der beiden, der ruhende Targetkern, ist Blei-208 (Protonenzahl $Z = 82$) oder Bismut-209 ($Z = 83$), die schwersten stabilen Atomkerne in der Natur. Der andere,

der Projektilkern, bringt genau die Anzahl an Protonen ein, die zum gewünschten Element noch fehlt. Damit Projektil- und Targetkern miteinander reagieren können, müssen sie in Kontakt gebracht werden; die abstoßende elektrostatische Kraft zwischen den beiden Kernen muß überwunden werden. Dazu wird das Projektil im UNILAC auf etwa zehn Prozent der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Um Element 110 aus Blei und Element 111 aus Bismut aufzubauen, wird Nickel ($Z = 28$) als Projektil benötigt. Verwendet werden dessen seltene neutronenreiche Isotope 62 oder 64, nicht die häufigsten Isotope 58 oder 60. Dadurch soll der Neutronenüberschuß, den schwerste Kerne aufweisen, wenigstens einigermaßen aufgebracht werden.

Als kernchemische Reaktionsgleichungen geschrieben, lauten die drei Fusionsreaktionen zu den neuen Elementen:



Dabei verschmelzen die beiden Reaktionspartner zunächst zu einem Verbundkern, der aber mehr oder weniger stark aufgeheizt ist, denn die kinetische Energie des Projektils, die zum Kernkontakt verhilft, wird bei der Kernreaktion nicht aufgebraucht; ein Rest verbleibt als Anregungsenergie im Verbundkern. Dieser kühlt sich dann durch Abdampfen von Neutronen ab; das Element bleibt dabei erhalten, aber die Massenzahl vermindert sich entsprechend. Bei den drei Synthesen der neuen Elemente genügt dazu ein einziges Neutron (n), eine Besonderheit von Kernfusionen mit Blei- und Bismutkernen; sie verlaufen kalt, ohne den Verbundkern übermäßig anzuregen.

Deshalb gelten solche Reaktionen, zuerst 1974 von Yuri Oganessian vom Vereinigten Institut für Kernforschung in Dubna (Rußland) vorgeschlagen, als aussichtsreichstes Rezept zur Synthese neuer Elemente. Daß sie so sanft verlaufen, liegt am Abschluß von Kernschalen bei Blei und Bismut, wodurch solche Kerne besonders fest gebunden sind – tief gefroren, sozusagen –, wie übrigens auch die Nickelpjektile. Treffend könnte man von „kalter Fusion“ sprechen, wenn damit nicht der Flop der kalten Fusion von Deuteriumkernen anklingen würde. Die Schalenstruktur der Kerne ist ein quantenmechanisches Phänomen, ganz analog zur Schalenstruktur der Elektronenhülle und mit der gleichen, stabilisierenden Wirkung.

So einfach solche Fusionsreaktionen auf dem Papier aussehen, so schwierig sind sie zu realisieren. Denn ganz andere Abläufe herrschen bei weitem vor. In derart schweren Systemen beginnt die abstoßende Kraft zwischen den Protonen gegenüber

[*] Prof. Dr. G. Herrmann
Institut für Kernchemie der Universität
Fritz-Straßmann-Weg 2, D-55099 Mainz
Telefax: Int. + 6131/39-4488

der anziehenden Kernkraft zwischen den Nucleonen zu dominieren. Sie treibt die beiden sich berührenden Kerne wieder auseinander, bevor sie überhaupt miteinander reagiert haben oder vollständig fusioniert sind. Ist die Reaktion doch einmal bis zum Verbundkern fortgeschritten, zerbricht dieser – aufgeheizt – meist sofort wieder in zwei Fragmente, statt durch Abdampfen von Neutronen in den Kern überzugehen, auf den man abzielt. Durch Erhöhen der Projektilenergie lässt sich die Fusion zwar fördern, doch wird der Verbundkern dadurch noch heißer und anfälliger gegen Kernspaltung; somit wird nichts gewonnen.

Wie problematisch die Situation ist, lässt sich durch einige Zahlen erläutern. Die Wahrscheinlichkeit für einen Stoß zwischen Projektil- und Targetkern ist angenähert durch die geometrischen Querschnitte gegeben, das sind rund 10^{-24} cm^2 oder 1 barn, eine bei den Kernforschern beliebte Einheit. Die von der Darmstädter SHIP-Gruppe – so genannt nach ihrem zentralen Instrument, dem Separator for Heavy Ion Reaction Products – gemessenen Produktionsquerschnitte nehmen von 10^{-32} cm^2 für Element 104 auf 10^{-35} cm^2 für Element 109 ab; das sind schließlich nur noch 10 Pikobarn. Anschaulicher ausgedrückt: Von 10^{11} Zusammenstößen zwischen Projektil und Target führt nur ein einziger zum Element 109. Auf noch schwerere Elemente extrapoliert, lässt dieser Trend Werte um ein Pikobarn für Element 111 erwarten, entsprechend einem Quadratmillimeter in einem Feld von einem Quadratkilometer. Dieser Pegel schien selbst der SHIP-Gruppe vor einem Jahrzehnt unerreichbar niedrig. Das technisch Mögliche schien ausgeschöpft, und an Naturgegebenheiten kommt man ohnehin nicht vorbei.

Aber dann gelang es der SHIP-Gruppe doch, ihre Methoden in zahlreichen kleineren Schritten^[3] auf Produktionsquerschnitte von einem Pikobarn zu trimmen. Auf diesem Pegel würde man am UNILAC im Mittel alle sechs Tage einen Atomkern beobachten können, vorausgesetzt die Projektilenergie ist optimal, nämlich auf ein Prozent genau eingestellt. Fusionsreaktionen hängen sehr empfindlich von der Einschussenergie ab. Die SHIP-Gruppe hat dies an den Synthesen von Element 104 und 108 gründlich studiert, um die richtigen Energien für den Angriff auf die neuen Elemente zu wählen.

Indessen brauchte das nun vorhandene Potential bei der Synthese von Element 110 und 111 gar nicht voll ausgeschöpft zu werden. Die beiden Kerne $^{269}\text{110}$ und $^{272}\text{111}$ entstehen mit Querschnitten um 3 Pikobarn^[3, 6], und für $^{271}\text{110}$ werden gar 15 Pikobarn gemessen^[5] – ein Mehrfaches dessen, was man erwartet hatte.

Wie aber lassen sich die wenigen Atome eines neuen Elements überhaupt aus dem Wust von uninteressanten Kernen herausfischen und eindeutig identifizieren? Das Sortieren geschieht innerhalb weniger Mikrosekunden während des Flugs positiv geladener Ionen durch SHIP, ein 11 m langes Rückstoßspektrometer. Es ist aufgebaut aus einem rotierenden Target, aus dem eigentlichen Separator – mit magnetischen Linsen und gekreuzten elektrischen und magnetischen Feldern bestückt – und aus dem Detektor. Eingespeist werden alle Arten von Reaktionsprodukten, die beim Stoß zwischen dem gepulsten Projektilstrahl und dem Target aus der Targetfolie herausgeschleudert werden. Aber auch der starke Projektilstrahl durchsetzt nahezu ungeschwächt das Target, da die meisten Projektile keine Reaktionen eingehen. Um der wenigen ganz schweren Kerne habhaft zu werden, nutzt man deren Flugrichtung und Geschwindigkeit

aus: Fusionsprodukte sind geradeaus, Produkte anderer Reaktionen mehr seitwärts gerichtet, und Fusionsprodukte fliegen langsamer als Projektil. Nur Kerne mit der richtigen Richtung und Geschwindigkeit werden durch dieses überaus wirkungsvolle Filter zum Detektor durchgelassen.

Zum Nachweis der seltenen Kerne dient der α -Zerfall, die Emission eines Heliumkerns mit der Kernladungszahl 2 und der Massenzahl 4. Verdächtig sind Zerfallsereignisse mit hoher α -Teilchenenergie, weil am Ende des Periodensystems diese Energie von Element zu Element ansteigt. Schlüssig bewiesen wird das Vorliegen eines neuen Elements durch diesen seinen α -Zerfall in eine ganze Kette bekannter Atomkerne, die wiederum durch α -Zerfall miteinander verknüpft sind. Der α -Zerfall des neuen Elements führt zu einem um zwei Protonen und vier Nucleonen leichteren, bekannten Kern, der sich durch Lebensdauer und α -Energie kenntlich macht und in eine bekannte Zerfallsreihe mündet.

Dieses Prinzip der genetischen Verknüpfung von Neuem mit Bekanntem wird im SHIP auf raffinierte Weise in einem 80 mm breiten, 35 mm hohen Silizium-Halbleiterdetektor realisiert, der mechanisch und elektronisch in eine Matrix von 3700 Einzel detektoren mit 0.8 mm^2 Fläche unterteilt ist. Wenn ein Atomkern im Detektor einschlägt, erzeugt er ein elektrisches Signal, das Zeitpunkt und Ort des Einschlags angibt. Alles, was später an demselben Ort geschieht, wird ebenso festgehalten: welche Zerfallsereignisse zu welchem Zeitpunkt stattfinden und wieviel Energie dabei freigesetzt wird. So wird das Schicksal des ursprünglichen Kerns Stufe für Stufe anhand der Lebensdauer und α -Teilchenenergie seiner Nachkommen verfolgt.

Abbildung 1 zeigt drei Zerfallsketten der neuen Elemente. Der erste vom Element 110 überhaupt beobachtete Kern $^{269}\text{110}$ zerfiel 393 μs nach seiner Implantation durch einen α -Zerfall von 11.13 MeV Energie in einen Kern, der sich nach weiteren 583 μs durch ein α -Teilchen von 10.57 MeV als das bekannte $^{265}\text{108}$ erwies. Auch für die anschließend aus $^{265}\text{108}$ hervorgehende Zerfallskette stimmen Lebensdauer –, oder, daraus abgeleitet, Halbwertszeit – und α -Energie aller Glieder mit den bekannten Daten überein. Deshalb muß der anfangs stehende, neue α -Strahler dem Kern $^{269}\text{110}$ zugeordnet werden. Nach demselben Prinzip ist der Kern $^{271}\text{110}$ identifiziert. Beim Element 111 waren die beiden ersten Folgeprodukte, $^{268}\text{109}$ und $^{264}\text{107}$, nicht bekannt; aber da drei lange Ketten bei gesicherten Isotopen der Elemente 105 oder 103 enden, muß am Anfang der Kern $^{272}\text{111}$ stehen.

Zusammengefaßt ergeben sich für die neuen Elemente die in Tabelle 1 aufgeführten Zerfallsdaten als Mittelwerte aller beobachteten Ketten.

Tabelle 1. Kerneigenschaften der neuen Elemente und deren Produktionsquerschnitte x – Ergebnisse der SHIP-Gruppe am UNILAC-Schwerionenbeschleuniger [3–6].

Element	Massenzahl	Halbwertszeit [ms]	α -Teilchenenergie [MeV]	x [Pikobarn]
110	269	0.17	11.112	3.5
	271	1.1	10.738	15
	271m [a]	56	10.681 10.709	
111	272	1.5	10.820	3.5

[a] Isomerer Kern.

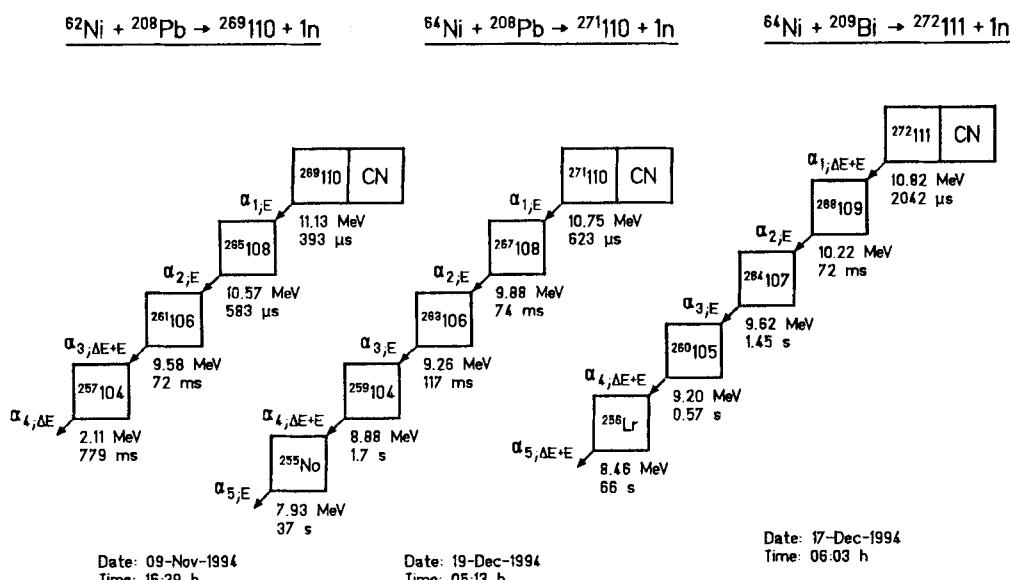


Abb. 1. Drei repräsentative Zerfallsketten für Element 110 und Element 111 [5]. In der oberen Zeile sind die Synthesereaktionen formuliert. Durch CN ist der Verbundkern von Projektil und Target vor dem Abdampfen eines Neutrons gekennzeichnet, links daneben steht der danach vorliegende Kern, mit dem die Zerfallsfolge beginnt. Für jedes Kettenglied i ist die gemessene α -Teilchenenergie α_i eingetragen, darunter steht die beobachtete individuelle Lebensdauer (E und ΔE beziehen sich auf Details der Energieröhrung). Die untere Zeile gibt an, wann der Kern des neuen Elements im Detektor einschlug.

achteten Atomkerne. Die α -Energien lassen sich selbst bei wenigen Ereignissen sehr genau reproduzieren; Halbwertszeiten und Produktionsquerschnitte schwanken hingegen stärker wegen der statistischen Natur radioaktiver Prozesse. Beim $^{271}\text{110}$ erweist sich einer der neun beobachteten Kerne als isomerer Kernzustand längerer Lebensdauer^[6].

Daß die Methode der genetischen Verknüpfung in dieser Perfection mit wenigen Atomkernen auskommt, hat die SHIP-Gruppe in der jüngsten Strahlzeit erneut eindrucksvoll demonstriert, als sie noch einmal den Kern 265 des Elements 108 durch Fusion von Eisen-58 ($Z = 26$) mit Blei-208 herstellte. Nun ließ sich an 79 Kernen bestätigen, was seinerzeit an nur drei Kernen schon festgestellt wurde, als Element 108 zum ersten Male hergestellt worden war.

Evidenz für die Synthese von Element 110 haben auch zwei andere Gruppen auf jüngsten Konferenzen vorgelegt. Albert Ghiorso^[7] berichtete schon im Juni 1994 über ein am Lawrence Berkeley Laboratory bei der Fusion von Cobalt-59 ($Z = 27$) mit Bismut-209 beobachtetes Ereignis, das der Massenzahl 267 zugeschrieben werden könnte. Die Zerfallsfolge ist indessen ziemlich unvollständig und kann nicht ohne Annahmen interpretiert werden. Wiederholen läßt sich das Experiment in Berkeley nicht, weil der SuperHILAC-Schwerionenbeschleuniger abgeschaltet und das benutzte Rückstoßspektrometer abgebaut ist. Unvollständig erscheint auch das von Yuri Lazarev^[8] im April 1995 beschriebene Ereignis der „heißen“ Fusion von Schwefel-34 ($Z = 16$) mit Plutonium-244 ($Z = 94$) in Dubna, das zur Massenzahl 273 gehören könnte. Demgegenüber nennt die SHIP-Gruppe ihre Zuordnung zum Ele-

ment 110 unzweideutig^[3], und sie tut dies zurecht.

Wo die neuen Elemente im Periodensystem einzurichten sind, ist in Abbildung 2 gezeigt: 110 sollte unter Platin, 111 unter Gold stehen, wenn das System nach Abschluß der Aktinoidreihe mit dem Element 104 in der 4. Nebengruppe fortgesetzt und nach rechts einfach fortgeschrieben wird. Daß die beiden ersten Elemente jenseits der Aktinoiden, 104 und 105, tatsächlich in die 4. und 5. Nebengruppe gehören, ist durch ihr chemisches Verhalten belegt^[9]. Über das Element 105, Hahnium, hinaus sind Studien der Chemie schwerster Elemente noch nicht gediehen, denn kurze Halbwertszeiten und extrem niedrige Produktionsraten führen zu einer ganz ungewöhnlichen Situation: Wenn ein neues Atom erscheint, ist das vorangehende schon wieder zerfallen, und so muß mit einzelnen Atomen experimentiert werden. Abgesehen von den technischen Problemen stellt sich die Frage, ob an einzelnen Atomen das Verhalten makroskopischer Mengen überhaupt erkannt werden kann; theoretischen Studien zufolge trifft dies für bestimmte Klassen von Experimenten durchaus zu.

Die Chemie des Elements 105, Hahnium, wird mit dem Isotop 262, Halbwertszeit 34 s, untersucht, das durch Fusion von Sauerstoff-18 ($Z = 8$) mit Berkeli-249 ($Z = 97$) erzeugt wird. Die Produktionsrate ist so niedrig, daß nur in jedem zehnten

H															He								
1															2								
Li	Be																						
3	4																						
Na	Mg																						
11	12																						
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
19	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36							
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	J	Xe						
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54						
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86						
Fr	Ra	Ac	Rf/Ku	Ha	Sg	Ns	Hs	Mt	110	111	Th												
87	88	89	104	105	106	107	108	109			90												
											Pa	91											
											U	92											
											Np	93	94	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	
														95	96	97	98	99	100	101	102	103	
An																							
Ln	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu									
	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71									

Abb. 2. Das Periodensystem der Elemente heute. In dieser etwas ungewöhnlichen Form sind die Actinoide (An) über den Lanthanoiden (Ln) angeordnet und so geschrieben, daß Ähnlichkeiten der ersten Actinoide zu den Nebengruppenelementen unterstrichen werden. Für die schwersten Elemente sind die von den Schwerelementforschern bevorzugten Namen und Symbole eingetragen.

chemischen Experiment, statistisch verteilt, ein Hahnium-Zerfall beobachtet wird. Man benutzt automatisierte und miniaturisierte Techniken; automatisiert, um Tausende von Experimenten durchstehen zu können, und miniaturisiert, um dabei möglichst wenig Atome durch Zerfall zu verlieren. In manchen Eigenschaften sind die beiden ersten Transactinoid-Elemente dennoch schon so gut charakterisiert, daß sie mit ihren homologen Elementen genauer verglichen werden können, etwa die in wäßrigen Lösungen oder in der Gasphase auftretenden Spezies^[9]. Dabei zeigen die Elemente 104 und 105 zwar die erwarteten Oxidationsstufen IV bzw. V. Im Detail schließen sie sich aber häufig den „Pseudohomologen“ am Anfang der Actinoide an. Element 105 folgt dem Protactinium, weniger dem Niob und kaum dem Tantal, seinem unmittelbaren Nachbarn. Dies könnte an Umordnungen der Elektronenhüllen liegen, bedingt durch den relativistischen Massenzuwachs der extrem schnell umlaufenden Elektronen. Man darf gespannt sein, wie sich diese Tendenz beim Element 106 fortsetzt, über dessen Chemie nichts bekannt ist, die sich die Schwerstelementchemiker aber jetzt vornehmen werden.

Über neue Elemente kann man nicht berichten, ohne auf die Namen der schwersten Elemente einzugehen. Weil durch Kontroversen über die Priorität mancher Entdeckung so viel Konfusion entstanden ist, haben die Internationale Union für reine und angewandte Chemie (IUPAC) und die entsprechende Union für Physik (IUPAP) eine Arbeitsgruppe beauftragt, der Geschichte aller Transfermium-Elemente – jenseits Element 100 – nachzugehen. Die Gruppe hat ihre Evaluationen in Entdeckungsprofile gefaßt^[10], an denen deutlich wird, wie kompliziert einige Fälle sind und daß manche Priorität geteilt werden sollte. Für die Elemente 107 bis 109 ist die Priorität der SHIP-Gruppe indessen umstritten, und so wurde am 7. September 1992 in einer festlichen Zeremonie der GSI^[11] das Element 107 Nielsbohrium (Ns) benannt, Element 108 Hassium (Hs) und Element 109 Meitnerium (Mt), zu Ehren der Physiker Niels Bohr und Lise Meitner und nach dem Sitzland Hessen der GSI. Nach der Evaluation durch die IUPAC-IUPAP-Studiengruppe, die keine Namen vorschlug, haben sich die betroffenen Arbeitsgruppen weitgehend auf Namen geeinigt, die sich schon länger eingebürgert hatten und auch in diesem Bericht verwendet werden; strikt war letztlich wohl nur noch das Element 104.

Leider hat die Nomenklaturkommission für Anorganische Chemie der IUPAC eine ziemlich abweichende Liste von Namen^[12] zur Ratifizierung durch den IUPAC-Council vorgelegt. Darin sind die Vorschläge der SHIP-Gruppe nur beim Element 109, Meitnerium, übernommen; 107 soll Bohrium (Bh) heißen und 108 Hahnium (Hn), bislang für Element 105 benutzt. Warum Element 108 nicht nach einem, mit der Entdeckung verknüpften, geographischen Begriff benannt werden soll – wie zahlreiche natürliche und künstliche Elemente –, für Element 104 mit Dubnium dies hingegen vorgeschlagen wird, bleibt unbegründet. In einem einzigen Satz heißt es lediglich, durch die Benennung der benachbarten Elemente 108 und 109 nach Otto Hahn und Lise Meitner soll ihre entscheidende Rolle bei der Entdeckung der Kernspaltung gewürdigt werden^[12]. So ansprechend der Gedanke sein mag, diese beiden, Jahrzehntelang gemeinsam arbeitenden Forscher im Periodensystem nebeneinander verewigt zu sehen, so betrüblich wäre es doch, den Chemiker Otto Hahn vom Element 105 zu verbannen. Denn eine Chemie

des Hahniums gibt es ja schon; ob es aber jemals eine Chemie des Elements 108 geben wird, mag dahingestellt bleiben. Die anderen abweichenden Vorschläge sind^[12]: Dubnium statt Rutherfordium für Element 104, Joliotium statt Hahnium für 105 und Rutherfordium statt Seaborgium für 106.

Gegen diese Verletzung des Rechts der Entdecker, für ein neues Element einen Namen zu wählen, hat Peter Armbruster namens der SHIP-Gruppe protestiert^[13]. Offensichtlich ist der IUPAC auch ein Verstoß gegen ihre eigenen Regeln unterlaufen^[14]. Danach (Bylaw B2.11) dürfen Empfehlungen dieser Tragweite nur als vorläufig veröffentlicht werden und müssen dadurch erst einmal zur Diskussion gestellt werden. Nun scheint die IUPAC zu diesen Regeln zurückkehren zu wollen^[15]. Die vehementen Proteste hätten somit gewirkt, und wer eifrig die neuen Namen schon gebraucht hat, wäre voreilig gewesen.

Wie aber könnte es weitergehen? Wie steht es jenseits des Elements 111 um die Stabilität und wie um die Machbarkeit von Kernen? Dies ist zuerst eine Frage nach der Schalenstruktur der Atomkerne, denn ab Element 108 existieren Atomkerne überhaupt nur noch, weil sie durch Kernschalen zusammengehalten werden.

Wie stark die Schalenenergie bekannter Kerne ist, wird den Kernmassen oder – was auf dasselbe hinausläuft – α -Zerfallsenergien entnommen. An solche Daten werden Kernmodellrechnungen angepaßt, mit denen dann die Schalenenergie unbestimmter Kerne extrapoliert wird. Abbildung 3 zeigt Ergebnisse neuester Rechnungen^[16], die auch komplizierte Kernformen berücksichtigen. Diese Landschaft der Schalenenergie beginnt links unten mit dem tiefen Tal (-14.3 MeV) um das Blei-208. Das – nicht eingezeichnete – Band der bekannten Kerne führt dann einen steilen Anstieg hinauf zu einem Bergsattel (-3 MeV) bei den Urakern mit $Z = 92$, $N \approx 146$. Dann geht es sanfter bergab in ein nordöstlich orientiertes Plateau mit einem flachen Tal (-7.2 MeV) um das Element 108 bei der Neutronenzahl 162. Dort findet man die schwersten bekannten Kerne angesiedelt, wie in Abbildung 3 zu sehen ist. Danach setzt sich das Plateau nach Osten – zu noch neutronenreicher Kernen – fort

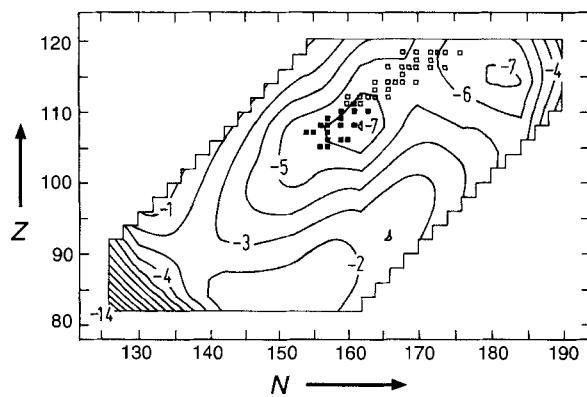


Abb. 3. Mit Kernmodellen berechnete Schalenenergie schwerster Atomkerne [16], aufgetragen gegen die Protonenzahl Z und die Neutronenzahl N . Durch Konturlinien verbunden sind Kerne gleicher Schalenenergie, gegeben in MeV; je negativer dieser Wert ist, um so stärker ist der Kern stabilisiert. Man erkennt drei Minima für Kerne mit abgeschlossenen Protonen- und Neutronenschalen: in der linken unteren Ecke das steile Minimum beim Blei-208 mit $Z = 82$, $N = 126$, in der Mitte ein flacheres Minimum bei $Z = 108$, $N = 162$ und rechts oben das noch flachere Minimum bei $Z = 114$, $N = 182$. Gefüllte Quadrate kennzeichnen die schwersten bekannten Kerne, leere Quadrate sind Verbundkerne, die vom Blei-208 ausgehend mit entsprechend gewählten Projektilen prinzipiell zugänglich sind [5].

und mündet nach einem kaum merklichen Sattel in ein weiteres, noch flacheres Tal (ebenfalls -7.2 MeV) um das Element 114 mit der Neutronenzahl 182. Nach anderen, ebenfalls jüngst erschienenen Rechnungen^[17] läge der tiefste Punkt (-9.4 MeV) etwas weiter westlich, beim Element 115 und 179 Neutronen.

Die Voraussage kugelförmiger, superschwerer Atomkerne mit 114 Protonen hat Theoretiker wie Experimentatoren seit drei Jahrzehnten in Atem gehalten, nur sah man diese Kerne als eine Insel, vom Festland der bekannten Kerne durch das Meer der Instabilität getrennt. Nun, nachdem neue Elemente und Kerne gefunden sind und dadurch Modelle sowie Extrapolationen besser fundiert sind, sieht die Landschaft ganz anders aus: Das Meer ist einem breiten Landrücken schalenstabilisierter Kerne gewichen; Kernen, die keine Kugeln sind, sondern einem länglichen Zylinder mit abgerundeten Kanten gleichen. Solch komplexere Kernformen hat man seinerzeit nicht einbezogen.

Was bedeuten nun die Schaleneffekte für die Halbwertszeiten? Dies lässt sich theoretisch ziemlich gut abschätzen, doch ergibt sich ein etwas kompliziertes Bild, weil zwei Zerfallsarten – α -Zerfall und spontane Kernspaltung – maßgeblich sind, die unterschiedliche Trends zeigen. Summarisch gesehen, sollten die meisten Kerne, die mit stabilen Projektilen und zugänglichen Targets erzeugt werden können, α -Strahler mit Halbwertszeiten zwischen einer Mikrosekunde und einer Sekunde sein. Die spontane Kernspaltung wird nicht dominant, und so scheint, von der Kernstabilität her gesehen, die Grenze des Periodensystems noch nicht in Sicht; sie wird letztlich dort erreicht, wo Kerne überhaupt nicht mehr zusammenhalten, sondern sofort in zwei Bruchstücke auseinanderbrechen.

Schwieriger zu durchschauen sind nach wie vor die Syntheseprozesse. Wie diese ablaufen, ist noch nicht recht verstanden, und was man über Fusionsreaktionen in leichteren Systemen weiß, lässt sich nicht übertragen. Man ist somit auf empirische Extrapolationen angewiesen, und da lassen die 15 Pikobarn Produktionsquerschnitt des Kerns $^{271}110$ natürlich hoffen. Für Element 112 extrapoliert man^[5] etwa drei Pikobarn, für Element 113 und Element 114 ein Pikobarn Querschnitt, wenn Zink-70 ($Z = 30$) oder Germanium-76 ($Z = 32$) mit Blei oder Bismut fusioniert werden – alles in Reichweite der SHIP-Gruppe. Das Zentrum der Stabilität, der Bergsee um Element 114, lässt sich freilich vom Blei-208 aus nicht erreichen. Wie Abbil-

dung 3 zeigt, führt die Schneise der machbaren Kerne westlich daran vorbei. Auch andere Strategien führen nicht zum Ziel, weil es keine Kombination zugänglicher Projektil- und Targetkerne gibt, welche so viele Neutronen einbringen kann. Immerhin, utopisch scheint es nicht, den breiten Weststrand zu betreten. Erwiese sich die Landschaft dort so wie vorhergesagt, dann wäre man wohl auch des Sees ansichtig geworden.

Stichworte: Element 110 · Element 111 · Elementsynthese · Kernstabilität · Transurane

- [1] G. Münzenberg, *Rep. Prog. Phys.* **1988**, *51*, 57–104.
- [2] G. Herrmann, *Angew. Chem.* **1988**, *100*, 1471–1491; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1988**, *27*, 1417–1436.
- [3] S. Hofmann, V. Ninov, F. P. Heßberger, P. Armbruster, H. Folger, G. Münzenberg, H. J. Schött, A. G. Popeko, A. V. Yeremin, A. N. Andreyev, S. Saro, R. Janik, M. Leino, *Z. Phys. A* **1995**, *350*, 277–280.
- [4] S. Hofmann, V. Ninov, F. P. Heßberger, P. Armbruster, H. Folger, G. Münzenberg, H. J. Schött, A. G. Popeko, A. V. Yeremin, A. N. Andreyev, S. Saro, R. Janik, M. Leino, *GSI Nachrichten* **1995** (2), 4–15.
- [5] S. Hofmann, Vortrag Konferenz *Low Energy Nuclear Dynamics*, St. Petersburg, **1995**, 18.–22. April; Preprint *GSI-95-25* **1995**; Proceedings im Druck.
- [6] S. Hofmann, V. Ninov, F. P. Heßberger, P. Armbruster, H. Folger, G. Münzenberg, H. J. Schött, A. G. Popeko, A. V. Yeremin, A. N. Andreyev, S. Saro, R. Janik, M. Leino, *Z. Phys. A* **1995**, *350*, 281–282.
- [7] A. Ghiorso, D. Lee, L. P. Somerville, W. Loveland, J. M. Nitschke, W. Ghiorso, G. T. Seaborg, P. Wilmarth, R. Leres, A. Wydler, M. Nurmia, K. Gregorich, R. Gaylord, T. Hamilton, N. J. Hannink, D. C. Hoffman, C. Jarzynski, C. Kacher, B. Kadkhodayan, S. Kreek, M. Lane, A. Lyon, M. A. McMahan, M. Neu, T. Sikkeland, W. J. Swiatecki, A. Türler, J. T. Walton, S. Yaskita, *Nucleus-Nucleus Collisions V* (Hrsg.: M. Di Toro, E. Migneco, P. Piatelli) (*Nucl. Phys. A* **1995**, *583*, 861–866).
- [8] Yu. A. Larazev, Vortrag Konferenz *Low Energy Nuclear Dynamics*, St. Petersburg, **1995**, 18.–22. April; Proceedings im Druck. Zitiert nach S. Hofmann, persönliche Mitteilung.
- [9] J. V. Kratz, *Actinides-93* (Hrsg.: D. L. Clark, D. E. Hobart, J. Fuger) (*J. Alloys Compd.* **1994**, *213/214*, 20–27); D. C. Hoffman, *Chem. Eng. News* **1994**, *72* (18), 24–34.
- [10] Transfermium Working Group of IUPAC and IUPAP (D. H. Wilkinson, A. H. Wapstra, I. Ulehla, R. C. Barber, N. N. Greenwood, A. Hrynkiewicz, Y. P. Jeannin, M. Lefort, M. Sakai), (*Pure Appl. Chem.* **1993**, *65*, 1757–1814).
- [11] *Die Benennung der schwersten Elemente 107, 108 und 109* (Hrsg.: P. Armbruster), Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt, **1993**.
- [12] IUPAC Commission on Nomenclature of Inorganic Chemistry (A. M. Sargent, Chair), (*Pure Appl. Chem.* **1994**, *66*, 2419–2421).
- [13] P. Armbruster, *Nachr. Chem. Tech. Lab.* **1995**, *43*(1), 53.
- [14] D. C. Hoffman, persönliche Mitteilung, **1995**.
- [15] Zitiert nach M. Freemantle, *Chem. Eng. News* **1995**, *73*(19), 7.
- [16] R. Smolanczuk, A. Sobczewski, Vortrag Konferenz *Low Energy Nuclear Dynamics*, St. Petersburg, **1995**, 18.–22. April; Proceedings im Druck.
- [17] P. Möller, J. R. Nix, W. D. Myers, W. J. Swiatecki, *At. Data Nucl. Data Tables* **1995**, *59*, 185–381.