

1 H Wasserstoff																
3 Li Lithium	4 Be Beryllium															
11 Na Natrium	12 Mg Magnesium															
19 K Kalium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium														
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium														
55 Cs Caesium	56 Ba Barium	57 La Lanthan	58 Ce Cer	59 Pr Praesodym	60 Nd Neodym	61 Pm Promethium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uran	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	

Ordnungszahl
Symbol
Name

Elementare Einzelgänger

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften superschwerer Elemente lassen sich mit wenigen Atomen bestimmen.

Kerstin Sonnabend

Einige chemische Elemente des Periodensystems tragen ihren Namen, um berühmte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zu ehren, beispielsweise Meitnerium oder Mendelevium. Auch Länder und Städte sind als Namensgeber beliebt. Wie aber schafften es das deutsche Bundesland Hessen und das 150 000 Einwohner zählende Darmstadt, einen Platz in dem mittlerweile 150 Jahre alten Symbol der Naturwissenschaften zu ergattern?

Die Antwort darauf findet sich im Norden von Darmstadt. Wenige Kilometer östlich des Stadtteils Wixhausen befindet sich das GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung. Als einziges Beschleunigerzentrum weltweit kann „die GSI“ mit ihren Anlagen jedes auf der Erde vorkommende Element als Ionenstrahl beschleunigen. Damit gelang es in den 1980er- und 1990er-Jahren, sechs superschwere Elemente erstmals nachzuweisen. Zwei davon – Hassium und Darmstadtium – erinnern an den Ort ihrer Entdeckung. Heute bleibt es in Darmstadt bei der Forschung zu superschweren Elementen nicht bei deren Nachweis, sondern es geht um ihre Physik und Chemie.

Die schwersten Elemente, die in der Natur vorkommen, sind Thorium und Uran mit den Ordnungszahlen 90 und

92 sowie Spuren von Plutonium. Streng genommen handelt es sich dabei um radioaktive Elemente, die kein stabiles Isotop besitzen. Allerdings betragen die Halbwertszeiten der langlebigsten Isotope ^{232}Th und ^{235}U mehrere Milliarden Jahre, sodass sie im Vergleich zum Alter des Sonnensystems als nahezu stabil gelten können. Davon ausgehend entstehen beispielsweise in Kernreaktoren durch den Einfang von Neutronen und Betazerfälle die Actinoide bis Fermium (Ordnungszahl 100). Hier verhindert die so genannte Spaltbarriere, dass weitere schwerere Elemente entstehen: Bei allen bisher bekannten Fermium-Isotopen treten Kernspaltung oder Alphazerfall schneller auf als der Betazerfall, bei dem sich ein Neutron in ein Proton umwandelt.

Schwerere Elemente als Fermium entstehen durch Fusionsreaktionen, bei denen zwei Atomkerne miteinander verschmelzen. Beispielsweise erzeugten amerikanische Wissenschaftler 1961 das schwerste Actinoid Lawrencium (Ordnungszahl 103), indem sie ein Target aus Californium-Isotopen mit beschleunigten Bor-Ionen als Projektilen bestrahlten. Ab der Ordnungszahl 104 spricht man von Transactinoiden oder superschweren Elementen. Wenn bei einer Fusionsreaktion Target und Projektil zu einem neuen Element verschmelzen, liegt zunächst ein Compound-Kern vor. Dieser angeregte Zwischenzustand der Reaktion gibt

Sechs superschwere Elemente wurden am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt entdeckt.

										2 He Helium					
										5 B Bor	6 C Kohlenstoff	7 N Stickstoff	8 O Sauerstoff	9 F Fluor	10 Ne Neon
										13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphor	16 S Schwefel	17 Cl Chlor	18 Ar Argon
22 Ti Titan	23 V Vanadium	24 Cr Chrom	25 Mn Mangan	26 Fe Eisen	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Kupfer	30 Zn Zink	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsen	34 Se Selen	35 Br Brom	36 Kr Krypton	
40 Zr Zirkonium	41 Nb Niob	42 Mo Molybdän	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silber	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Zinn	51 Sb Antimon	52 Te Tellur	53 I Iod	54 Xe Xenon	
71 Lu Lutetium	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantal	74 W Wolfram	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platin	79 Au Gold	80 Hg Quecksilber	81 Tl Thallium	82 Pb Blei	83 Bi Bismut	84 Po Polonium	85 At Astat	86 Rn Radon
103 Lr Lawrencium	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 Mc Moscovium	116 Lv Livermorium	117 Ts Tenness	118 Og Oganesson

seine überschüssige Energie wieder ab und zerfällt dabei meist in zwei oder mehr Teile. Die Anregungsenergie des Compound-Kerns ergibt sich dabei aus den Bindungsenergien der beteiligten Kerne sowie der kinetischen Energie des Projektils. Es gibt zwei Möglichkeiten, Compound-Kerne zu erzeugen. Bei der kalten Fusion bleibt die Anregungsenergie niedrig, sodass nach der Emission eines Neutrons ein Atomkern in einem angeregten oder isomeren Zustand verbleibt, der durch einen Gammazerfall den Grundzustand erreicht. Bei der kalten Fusion kommen Blei- oder Bismut-Targets zum Einsatz und relativ schwere Projektile wie Eisen, Nickel oder Zink.

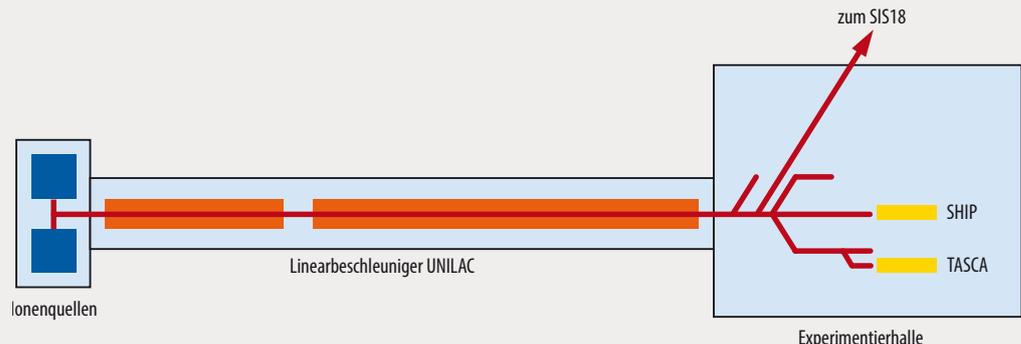
Sechsmal die Nase vorn

Mit dieser Methode gelang es an der GSI, von 1981 bis 1996 die Elemente mit den Ordnungszahlen 107 bis 112 zu erzeugen: Bohrium, Hassium, Meitnerium, Darmstadtium, Roentgenium und Copernicium. Dabei kam es zu einem Wettlauf mit dem russischen Kernforschungszentrum in

Dubna, das die zweite Möglichkeit umsetzte, die heiße Fusion. Anstatt die Ordnungszahl der Projektile zu erhöhen, verwendeten die russischen Physiker schwerere Elemente als Targetmaterial wie Uran und andere Actinoide. Dann besitzt der Compound-Kern eine hohe Anregungsenergie und emittiert mehrere Neutronen. Weil einzelne Resultate zunächst nicht in anderen Laboren bestätigt werden konnten, zweifelten einige Forscher außerhalb Russlands diese Ergebnisse an.

Mittlerweile hat sich die heiße Fusion durchgesetzt, bevorzugt mit dem Isotop ⁴⁸Ca als Projektil. Wie das in Darmstadt funktioniert, erklärt mir der Kernphysiker Michael Block, den ich an der GSI treffe. Seit vier Jahren leitet er dort die Abteilung für die Physik der superschweren Elemente. Zunächst begeben wir uns ganz an den Anfang der Beschleunigeranlage, zu den Ionenquellen. Dort entsteht aus einem neutralen Gas oder einem Festkörper mit Hilfe elektrischer Energie ein Plasma. Die positiv geladenen Ionen verlassen die Quelle aufgrund eines elektrostatischen Potentials in Richtung der Beschleunigeranlage. „Wir

Die schematische Übersicht zeigt die Position der beiden Separatoren SHIP und TASCA in der Experimentierhalle für niedrige Energien an der GSI. Nicht alle Strahllinien sind abgebildet.





Mannshoch sind die Alvarez-Strukturen des Linearbeschleunigers UNILAC. Die Ionen bewegen sich in der dünnen langgestreckten Röhre im Zentrum der Struktur.

verbrauchen etwa ein halbes Milligramm ^{48}Ca pro Stunde Strahlzeit. Das ergibt fast zehn Billionen ^{48}Ca -Ionen“, schätzt Michael Block.

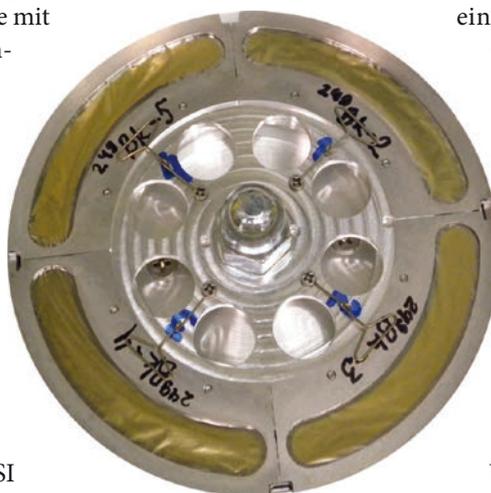
Auf 120 Metern Länge erhöht der Linearbeschleuniger UNILAC die Energie der Ionen bis auf etwa zehn Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Die weiteren Beschleunigerstufen der GSI spielen bei der Produktion der superschweren Elemente keine Rolle. Zu ihrer Erzeugung ist es wichtig, den Projektilen genau die richtige Energie mitzugeben, um einen Compound-Kern zu bilden. Dann ist die Wahrscheinlichkeit besonders hoch, dass Projektil und Target verschmelzen, was als Resonanz bezeichnet wird. „Wir müssen die Energie im Promillebereich regeln, um eine Resonanz zu treffen“, sagt Block. Das geht mit dem UNILAC besser als beispielsweise mit dem Zyklotronbeschleuniger am Kernforschungszentrum in Dubna.

Dort durchlaufen die Kalzium-Ionen mehrfach die gleiche Beschleunigungsstrecke, sodass die Energie des Strahls nur in festen Schritten eingestellt werden kann. Anschließend lässt sich die Energie mit Degradier-Folien gezielt verringern. Allerdings sind in Dubna die Strahlzeiten nicht auf eine kurze Zeit im Jahr begrenzt: Die Anlage dient im Gegensatz zu den Beschleunigern der GSI

vor allem der Suche nach superschweren Elementen. Aufgrund der geringen Produktionsraten von einem Atom in zwei Wochen wundert es nicht, dass das bisher schwerste Element Oganesson (Ordnungszahl 118) erstmals in Russland nachgewiesen wurde – in enger Zusammenarbeit mit dem amerikanischen Lawrence Livermore National Laboratory, eine lange Zeit undenkbbare Kollaboration. „Die superschweren Elemente waren ein heißes Eisen im Kalten Krieg“, beschreibt Michael Block den auch politisch motivierten Wettstreit.

In Darmstadt trifft der Ionenstrahl aus dem UNILAC auf ein „Targetrad“, das sich durch den Strahl dreht. Das verteilt den Wärmeeintrag gleichmäßig auf die hauchdünnen Folien, die am äußeren Rand eines kreisförmigen Rahmens eingespannt sind. „Sonst würde der Strahl nach kurzer Zeit ein Loch in die Folie schmelzen“, sagt Block.

Dennoch sieht man den Gebrauch deutlich an. Zuständig für deren Herstellung, insbesondere wenn radioaktive Elemente zum Einsatz kommen, ist das Team des Kernchemikers Christoph Düllmann. Wie Michael Block arbeitet auch Düllmann als Professor an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz und forscht am



Helmholtz-Institut Mainz. Am GSI Helmholtzzentrum leitet er die Abteilung für die Chemie der superschweren Elemente. Gemeinsam möchten beide die superschweren Elemente nicht nur erzeugen, sondern auch deren physikalische und chemische Eigenschaften erforschen.

Doch dazu müssen sie die vereinzelt Atome, die bei Fusionsreaktionen des Ionenstrahls in den Targetfolien entstanden sind, erst einmal aussortieren. Dazu gibt es an der GSI zwei Aufbauten: Der „Separator for Heavy Ion reaction Products“ SHIP trennt mit einer Kombination elektrischer und magnetischer Felder die superschweren Elemente vom Rest des Primärstrahls ab. Zwei bis drei Mikrosekunden dauert es, bis hinter der zwölf Meter langen Anordnung nur noch die gesuchten Reaktionsprodukte vorliegen. SHIP kam auch bei der Entdeckung von Bohrium bis Copernicium zum Einsatz und ist seit 1976 mit zahlreichen Erneuerungen in Betrieb.

Der „TransActinide Separator and Chemistry Apparatus“ TASCA ist 30 Jahre jünger. An diesem gasgefüllten Separator gelang es, das bisher schwerste Element an der GSI nachzuweisen: Tenness mit Ordnungszahl 117. Durch Stöße mit dem Gas erreichen alle Atome eines Elements den gleichen Ladungszustand und fliegen durch das Magnetfeld des Separators auf einer Bahn, die durch das Verhältnis von Impuls und Ladung bestimmt wird. „So können wir das superschwere Element effizient aussortieren“, erklärt Christoph Düllmann. „Aber dann müssen wir es noch identifizieren.“

Ein Fingerabdruck aus Zerfällen

Dazu nutzen Forscherinnen und Forscher weltweit den einzigartigen Fingerabdruck, den die Isotope eines superschweren Elements bei ihrem Zerfall hinterlassen. Die meisten Isotope emittieren nach einer bestimmten Lebensdauer bevorzugt ein Alphateilchen mit einer festen Energie. Als eindeutige Signatur gelten daher Alphazerfallsketten, die für bereits untersuchte Isotope bekannt sind. Auf der Suche nach einem neuen Element helfen die Ketten, – ausgehend von bereits bekannten Isotopen und ihren Zerfallseigenschaften – mit einem neuen Zerfall auf einen schwereren Ausgangspunkt zu schließen. Wichtig ist es dafür, sowohl die Energie der Alphateilchen als auch den Zeitpunkt ihrer Detektion sehr präzise zu messen.

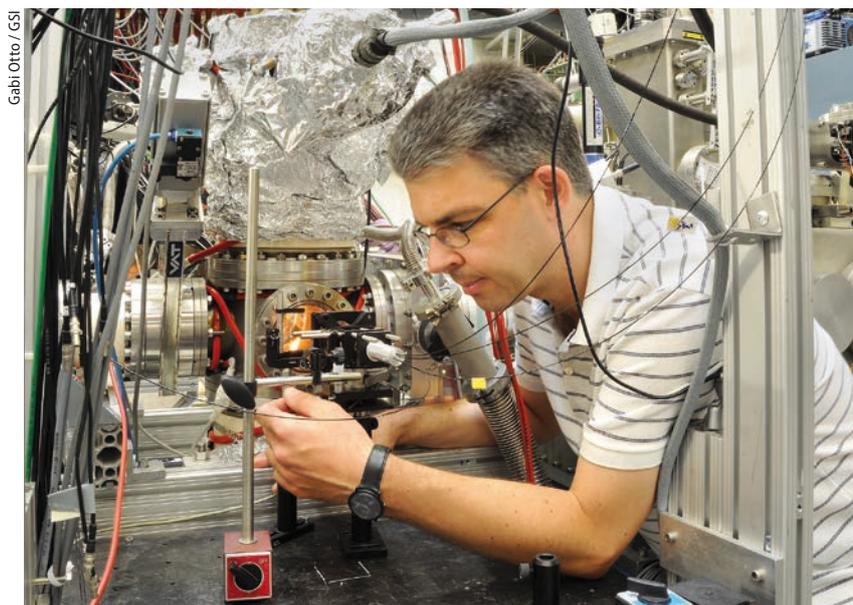
Wenn Michael Block und Christoph Düllmann die physikalischen und chemischen Eigenschaften eines superschweren Elements erforschen wollen, suchen sie zunächst nach einem Weg, das Element möglichst effizient zu erzeugen und zu separieren. „Ein paar Jahre Vorarbeit bis zum Experiment sind keine Seltenheit“, sagt Michael Block. Als Beispiel führt er die laserspektroskopische Untersuchung von Nobelium-Isotopen (Ordnungszahl 102) mit Halbwertszeiten unter einer Minute an, um das atomare Spektrum zu bestimmen. Dabei regt ein durchstimmbarer Laser die Atome resonant an, ein zweiter Laser ionisiert sie im Anschluss daran. Eine Elektrode saugt die Ionen mit einem elektrostatischen Potential zu einem Detektor, um die Isotope anhand ihrer Alphazerfallsketten zu identifizieren. Erste Tests zum Erzeugen von Nobelium

gab es schon vor 13 Jahren. Die erste Strahlzeit dazu fand 2014 statt. Um Atome resonant anzuregen, muss man aber ihre angeregten Zustände – also das atomare Spektrum – kennen. „Da beißt sich die Katze in den Schwanz“, bringt Block die Herausforderung auf den Punkt. Theoretische Vorhersagen geben zwar einen Anhaltspunkt für die Suche. Trotzdem brauchte es mehrere Messkampagnen, bis es vor drei Jahren gelang, mit einem breitbandigen Laser in mehreren tausend Schritten einen angeregten Zustand zu treffen. Seither ist Nobelium das schwerste Element, das jemals laserspektroskopisch untersucht wurde. „Dafür haben uns einzelne Ionen pro Sekunde ausgereicht“, stellt Michael Block fest. Für das nächst schwerere Element Lawrencium müsse man mit einem Ion in zehn Sekunden auskommen.

Bei dem schwersten bisher nachgewiesenen Element Oganesson ist dies in absehbarer Zeit nicht möglich. „Wir haben Oganesson in Darmstadt bisher noch nicht erzeugt“, sagt Christoph Düllmann. Im Oktober 2006 gelang es erstmals in Dubna, eine Alphazerfallskette zu identifizieren, deren Ausgangspunkt nur ein Atomkern mit 118 Protonen und 176 Neutronen sein konnte. Doch erst zehn Jahre später erkannte auch die International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) die Entdeckung offiziell an und legte im November 2016 den Elementnamen fest.

Das Verfahren dauert so lange, um sicherzustellen, dass dem Periodensystem nicht voreilig weitere Elemente hinzugefügt werden. Eigentlich verlangt die IUPAC einen unabhängigen Nachweis von einer anderen Kollaboration, am besten durch ein Experiment mit einer anderen Fusionsreaktion als Produktionsweg. „Diese strengen Vorgaben lassen sich in Zukunft wohl nicht immer erfüllen“, meint Christoph Düllmann. Darum arbeitet die IUPAC gerade an neuen Kriterien. Sigurd Hofmann, einer der Entdecker von superschweren Elementen an der GSI, leitet die zuständige Kommission.^{#)}

#) Ein Bericht dazu findet sich unter <https://bit.ly/2Xcuh0M> (PDF).



Michael Block bereitet ein Experiment vor, um die physikalischen Eigenschaften superschwerer Elemente zu bestimmen.



Gabi Otto / GSI

Christoph Düllmann erklärt, wie sich mit einem Kanal goldbedampfter Siliziumdetektoren die Chemie der superschweren Elemente untersuchen lässt.

Über den Nachweis hinaus

Jenseits des Wettlaufs um immer höhere Ordnungszahlen – und damit verbunden dem Recht, den Elementnamen vorzuschlagen – rückt auch die Chemie der bekannten superschweren Elemente immer mehr in den Fokus aktueller Forschung. Christoph Düllmann und seiner Gruppe reichen dazu einzelne Atome aus. Doch nicht Reagenzglas und Bürette kommen dabei zum Einsatz, sondern ein etwas mehr als 30 Zentimeter langer, enger Kanal, den eine Reihe goldbedampfter Siliziumdetektoren bildet. Beim Experiment befinden sich die jeweils 30 Detektoren auf einer Seite des Kanals auf unterschiedlichen Temperaturen: Von Raumtemperatur am ersten Detektor nimmt sie bis auf weniger als -160 Grad am letzten Detektor ab, der mit flüssigem Stickstoff gekühlt wird. „Die Position des Detektors, an dem wir das superschwere Element nachweisen, zeigt uns seine chemischen Eigenschaften“, erklärt Düllmann.

Dazu muss er mit seinem Team zunächst verstehen, wie sich die leichteren Elemente in dem Kanal verhalten, die in der gleichen Gruppe des Periodensystems zu finden sind wie das superschwere Pendant. Ist bekannt, wo sich eine bestimmte Verbindung in dem Kanal niederschlägt, lässt sich aus der zugehörigen Temperatur auf ihre Flüchtigkeit schließen. Ein Beispiel sind die Elemente der Eisengruppe: Während sich Osmiumtetroxid (OsO_4) erst bei etwa -80 Grad in dem Kanal anlagert, findet sich das Tetroxid von Hassium (Ordnungszahl 108) schon bei höheren Temperaturen. Hassium bildet also ein weniger flüchtiges Oxid als sein leichteres Homolog – genau wie man es aus der Extrapolation der Eigenschaften der leichteren Elemente Ruthenium und Osmium erwartet. Keine Selbstverständlichkeit, wurde die Position von Hassium im Periodensystem

doch allein aufgrund der Ordnungszahl bestimmt. „Unser Experiment zeigt, dass hier auch die Chemie stimmt“, stellt Christoph Düllmann fest.

Am Ende des Periodensystems

Doch was sind die Konsequenzen, wenn sich in Zukunft ein superschweres Element anders verhält als erwartet? Ist dann das Ende des Periodensystems erreicht? Wo könnte ein Ende liegen, falls es eines gibt? Schon heute stellt allein das Erzeugen von Atomen mit immer höheren Ordnungszahlen eine wachsende Herausforderung dar. „Die Raten werden immer kleiner“, sagt Michael Block. „Selbst wenn sich noch Atome bilden könnten, weisen wir sie vielleicht niemals nach.“ Beispielsweise könnten zu geringe Strahlintensitäten oder zu kurze Halbwertszeiten dafür sorgen, dass das physikalische Limit nie erreicht wird.

Aus Sicht des Physikers sei es auch interessant, die Isotopenketten der superschweren Elemente zu erforschen, denn mehr Neutronen bei gleicher Protonenzahl könnten zu stabileren Isotopen desselben Elements führen. Außerdem ließe sich über den Vergleich von Halbwertszeiten, Massen oder Niveauschemata sehr viel über die Validität kernphysikalischer Modelle lernen, die auch für die Elementsynthese im Universum wichtig sind. „Vielleicht finden wir eine ‚Insel der Stabilität‘, wo die Atomkerne Stunden oder gar Tage existieren“, erinnert Michael Block an Vorhersagen des Schalenmodells.

Laut theoretischer Rechnungen sollten Atome bis zu Ordnungszahlen um 170 möglich sein. Darüber hinaus könnte die Bindungsenergie der inneren Elektronen mehr als 1,022 MeV betragen und spontane Paarbildung ermöglichen. „So ein Gebilde würden wir wohl nicht mehr als Atom bezeichnen“, meint Block. „Falls die Atomkerne überhaupt lang genug leben, um Elektronen zu binden“, ergänzt Christoph Düllmann. Weniger als 10^{-14} Sekunden Lebensdauer sollten es nicht werden – denn ohne Elektronenhülle kein Atom und ohne Atom kein Element, also das Ende des Periodensystems.

Doch für Düllmann ist auch entscheidend, dass sich die chemischen Eigenschaften anhand der Ordnungszahl ableiten lassen, weil diese die Konfiguration der Elektronenhülle bestimmt: „Wir sehen aber schon bei den Actinoiden Abweichungen durch relativistische Effekte.“ Die immer höher geladenen Atomkerne deformieren die Orbitale der Elektronen, sodass sich bei schwereren Elementen teilweise die Systematik ändert, entlang welcher die Orbitale aufgefüllt werden. „Vielleicht beeinflusst irgendwann sogar die chemische Form eines Elements das Auffüllen der Orbitale“, stellt der Kernchemiker fest. Das könnte schon der Fall sein, wenn ab einer Ordnungszahl von 121 eine weitere Gruppe von Orbitalen im Atommodell eine Rolle spielt. Für die nächsten beiden superschweren Elemente ist sich Christoph Düllmann aber sicher: „Bei Ordnungszahl 119 finden wir ein Alkalimetall und bei 120 ein Erdalkalimetall.“ Darüber hinaus will er nicht spekulieren. „In den 150 Jahren seiner Existenz wurde das Periodensystem nicht nur erweitert, sondern auch immer wieder korrigiert. Das macht einen Teil seiner Erfolgsgeschichte aus.“