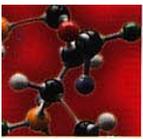


# Brains and Tools

- Perspektiven
- Energie
- Erde und Umwelt
- Gesundheit
- Struktur der Materie
- Verkehr und Weltraum
- Schlüsseltechnologien
- Nachwuchs

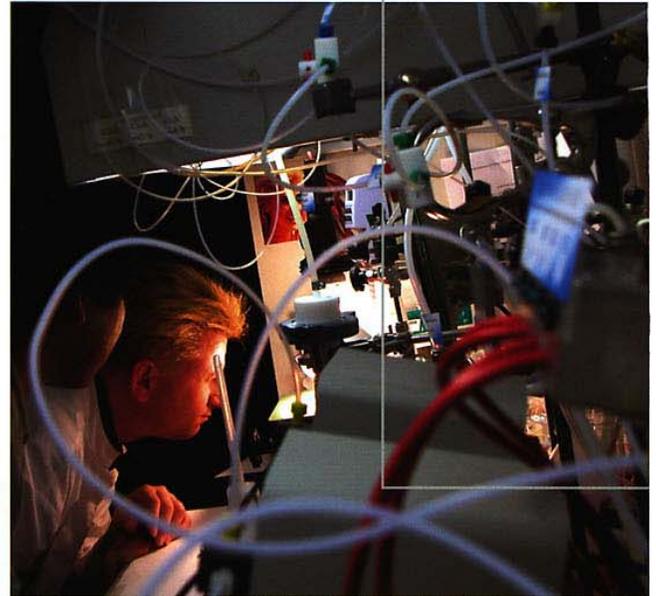




## Struktur der Materie

# Grenzwertig!

Forscher in Darmstadt untersuchen einzelne Atome superschwerer Elemente. Ihre Arbeit könnte die Chemie auf Neuland jenseits des Periodensystems führen.



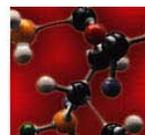
Ein Beitrag aus der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt

Die chemischen Elemente – sie sind die Bausteine aller Stoffe und die Grundlage für unser Leben. Im Periodensystem, dem klassischen Ordnungssystem der Chemie, sind alle bekannten, um die hundert verschiedenen chemischen Elemente einsortiert. Für Wissenschaftler ist diese im 19. Jahrhundert entwickelte Klassifizierung ein hilfreiches Instrument. Denn am Periodensystem lassen sich in einfacher Weise die chemischen Eigenschaften der Elemente ablesen und voraussagen. In den letzten Jahren haben allerdings zahlreiche Experimente Zweifel an der scheinbar so einfachen und überzeugenden Struktur des Periodensystems aufkommen lassen. Verantwortlich dafür sind vor allem Experimente mit so genannten superschweren Elementen. Ein internationales Team von Wissenschaftlern bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt arbeitet daran, die chemischen Eigenschaften dieser Elemente und damit ihren Platz im Periodensystem herauszufinden. Ihre Erkenntnisse versprechen Antwort auf die Frage, wie weit das Periodensystem die moderne Chemie trägt.

1																	18					
1	H																	He				
2	Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18				
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
7	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	111	112	113	114	115	116						
+ Actinoide			Th	Pa	SUPERSCHWERE ELEMENTE																	
			U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr								
* Lanthanoide			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu						

Periodensystem der Elemente. Die Elemente mit den Ordnungszahlen 104, Rutherfordium (Rf), bis 108, Hassium (Hs), sind nun auch chemisch soweit charakterisiert, dass sie in die Gruppen 4 bis 8 eingeordnet werden können. Die aktuelle Suche nach chemischen Eigenschaften des Elements 112 ist durch die gepunktete Linie angedeutet: Es könnte Eigenschaften von Quecksilber (Hg), aber auch von Radon (Rn) in sich vereinen.

Superschwere Elemente sind weit schwerer als Uran (U), das schwerste auf der Erde vorkommende Element. Die Ordnungszahl – das ist die Anzahl der Protonen im Atomkern – der heute sicher bekannten superschweren Elemente reicht lückenlos von 104, dem Rutherfordium (Rf), bis zu 112, einem noch namenlosen Element. Darüber hinaus gibt es aus dem Kernforschungszentrum in Dubna erste Hinweise auf noch schwerere Elemente. Die Elemente 107 bis 112 – darunter Element 110, das gemäß der Tradition in der Chemie angelehnt an den Entdeckungsort Darmstadtium heißt – konnten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im Verlauf der letzten 20



## Struktur der Materie

*Kinder lernen es spielerisch kennen. Und Wissenschaftler testen in komplexen Experimenten, wie weit sein Erklärungshorizont reicht: Das Periodensystem sortiert die chemischen Elemente.*

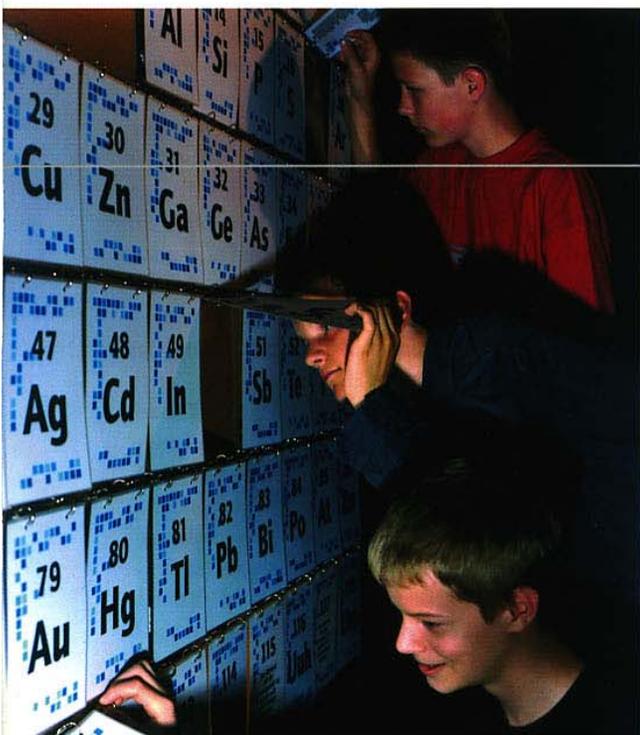
### **Chemie mit superschweren Elementen**

Chemische Experimente mit superschweren Elementen unterscheiden sich erheblich von solchen Experimenten, wie sie den meisten aus der Schule vertraut sind. Die größte Herausforderung für die Chemiker: Die Elemente stehen ihnen nicht in wägbaren Mengen zur Verfügung. Ja, sie haben nicht einmal soviel, wie es die empfindlichsten chemischen Nachweisverfahren erfordern. Für die Forscher bedeutet das: Alle diese Elemente können jeweils nur als einzelne kurzlebige Atome durch Kernreaktionen an Schwerionenbeschleunigern hergestellt werden. Für das Element 108, Hassium (Hs), sind dies beispielsweise nur rund drei Atome pro Tag. Zudem zerfallen diese schon kurze Zeit nach ihrer Bildung. Die Chemiker müssen also Chemie mit einzelnen Atomen betreiben – und das innerhalb von wenigen Sekunden!

### **Hassium: das schwerste chemisch untersuchte Element**

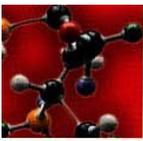
Für das Element 108, Hassium (Hs), erwarteten die Wissenschaftler, dass sein Verhalten zu den leichteren Elementen in der Gruppe 8 passen würde. Besonders aufschlussreich dafür ist die Untersuchung von Verbindungen mit Sauerstoff (O), wodurch sich Elemente chemisch gut unterscheiden lassen. So gibt es bei den Schwermetallen aus Gruppe 8, Ruthenium (Ru) und Osmium (Os), die Besonderheit, dass sie ein sehr leicht flüchtiges, schon bei Zimmertemperatur verdampfendes Tetroxid ( $\text{RuO}_4$ ,  $\text{OsO}_4$ ) bilden. Die Frage, ob Hassium ebenfalls ein Tetroxid bildet ( $\text{HsO}_4$ ) und die Bestimmung seiner Flüchtigkeit: Darum ging es also bei den ersten chemischen Untersuchungen am Element 108.

Bei diesen kernchemischen Untersuchungen arbeiten viele Arbeitsgruppen in einem weltweiten Netzwerk eng zusammen. Für die Wissenschaftler besonders wichtig:



Jahre bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt erstmals herstellen und nachweisen. Ihr jüngster Erfolg ist ebenfalls eine Premiere: Ihnen gelang es, Hassium, das Element 108, chemisch zu untersuchen. Damit ist Hassium das derzeit schwerste Element, über das chemische Eigenschaften bekannt sind.

In Berkeley, USA, und in Dubna, Russland, sind schon früher erste Übersichtsexperimente zur Chemie superschwerer Elemente durchgeführt worden. Sie brachten zunächst durchaus erwartete Ergebnisse. So schien die generelle Einordnung der Elemente 104 und 105 in die Gruppen 4 und 5 des Periodensystems zutreffend zu sein. Neuere Experimente, viele davon in Darmstadt, in Villigen (Schweiz) und in Tokai (Japan) durchgeführt, haben dies bestätigt. Überraschungen gab es allerdings bei immer detaillierteren chemischen Untersuchungen. Hier wurden Eigenschaften sichtbar, die deutlich von den Erwartungen abwichen. Waren dies bereits die ersten Anzeichen für „das Ende“ des Periodensystems? Das blieb zunächst offen, denn eine Reihe von weitergehenden Untersuchungen am Element 106, Seaborgium (Sg), und ein erster Blick auf Element 107, Bohrium (Bh), zeigten – inzwischen fast schon überraschend – ein ganz normales Verhalten für die Gruppen 6 und 7.



# Struktur der Materie

GSI

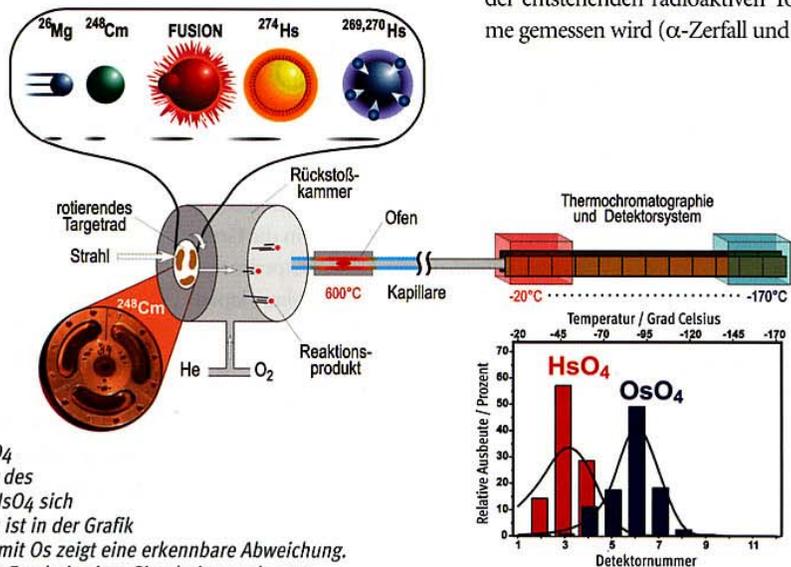
In Darmstadt können sie eine optimale Kombination aus dem 120 Meter langen Schwerionenbeschleuniger UNILAC (Universal-Linear-Accelerator) der GSI und hervorragenden Experimentiermöglichkeiten nutzen. Die für dieses Experiment notwendigen neuen chemischen Trenn- und Nachweis-Apparaturen wurden in einem ersten Typ am Lawrence Berkeley National Laboratory (USA) und in einer Weiterentwicklung am Paul Scherrer-Institut (Schweiz) gebaut und beide bei GSI in das Gesamtexperiment integriert. Auch die „erste Chemie“ an dem Element, das 1984 bei GSI entdeckt wurde und zu Ehren des Bundeslandes Hessen den Namen Hassium trägt, war konsequenterweise international. Ein Team von Wissenschaftlern aus Deutschland, der Schweiz, Russland, den Vereinigten Staaten und China war beteiligt.

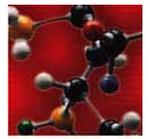
Die Forscherinnen und Forscher nutzten den Schwerionenbeschleuniger UNILAC der GSI, um Magnesium-26-Ionen mit etwa 10 Prozent Lichtgeschwindigkeit auf eine Curium-248 Folie zu schießen. Durch die Fusion

eines Magnesium-Atomkerns mit einem Curium-Atomkern entsteht in sehr seltenen Fällen ein Hassium-Atom. Dieses Hassium-Atom fliegt dann in eine mit Helium und Sauerstoffgas gefüllte Kammer und einen 600 Grad Celsius heißen Ofen. Unter diesen Bedingungen kann sich die gewünschte Sauerstoffverbindung – das Hassiumtetroxid – bilden. Anschließend strömt diese durch mehrere Meter lange Teflon-Kapillare binnen weniger Sekunden zu einer Chemieapparatur. Nur wenn sich tatsächlich ein leicht flüchtiges  $\text{HsO}_4$  gebildet hat, wird es die Chemieapparatur erreichen.

Die Apparatur dient den Forschern zum Nachweis und zur Charakterisierung der Flüchtigkeit des  $\text{HsO}_4$ . Zu diesem Zweck wird es durch einen schmalen, 1,5 Millimeter hohen und etwa 40 Zentimeter langen Kanal geleitet, in dem hintereinander an zwölf Positionen Halbleiter-Detektoren angeordnet sind. Diese sind unterschiedlich gekühlt, sodass sich ein kontinuierliches Temperaturgefälle von minus 20 Grad bis minus 170 Grad Celsius entlang des Kanals ergibt. Jede Detektorposition entspricht einer bestimmten Temperatur. Das durch den Kanal strömende  $\text{HsO}_4$ -Molekül scheidet sich auf einem Detektor ab. Der Detektor identifiziert das Hassium-Isotop, indem sein spezifischer radioaktiver Zerfall und der Zerfall der entstehenden radioaktiven Tochteratome gemessen wird ( $\alpha$ -Zerfall und Spontan-

*Schema des Experiments zur ersten chemischen Untersuchung des Elements 108, des Hassium. Oben links: Magnesium-26-Ionen werden auf eine Curium-248-Folie geschossen. Durch Kernfusion können Hassium-269- und Hassium-270-Isotope gebildet werden. In einer Rückstoßkammer, gefüllt mit Helium und Sauerstoff und einem Ofen, kann sich das flüchtige Hassiumtetroxid ( $\text{HsO}_4$ ) bilden. Innerhalb weniger Sekunden strömt es durch eine mehrere Meter lange Kapillare zu einer Chemieapparatur (Thermochromatographie- und Detektorsystem). In einem schmalen Kanal sind dort hintereinander an zwölf Positionen Detektoren mit kontinuierlich abfallenden Temperaturen von minus 20 Grad bis minus 170 Grad Celsius angeordnet. Um die Flüchtigkeit des  $\text{HsO}_4$  zu bestimmen, wird die Temperatur des Detektors gemessen, auf dem das  $\text{HsO}_4$  sich niedergeschlagen hat. Das Ergebnis ist in der Grafik unten rechts gezeigt. Der Vergleich mit  $\text{Os}$  zeigt eine erkennbare Abweichung. Die durchgezogenen Linien sind das Ergebnis einer Simulationsrechnung.*





## Struktur der Materie



*Wissenschaftler bei Montagearbeiten an einem der Hassium-Experimente.*

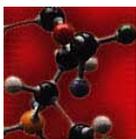
spaltung). Aus der Temperatur des Detektors, auf dem sich das  $\text{HsO}_4$  abscheidet, können die Forscher dann auf dessen Flüchtigkeit schließen.

### **Sieben Atome reichten**

Mit nur sieben Atomen konnte im ersten Experiment zur Chemie des Hassiums gezeigt werden, dass Hassium, wie vorhergesagt, ähnlich zu Osmium und Ruthenium ein flüchtiges Tetroxid bildet. Drei der  $\alpha$ -Zerfallsketten wurden dabei eindeutig dem Isotop Hassium-269 zugeordnet, zwei dem dabei vermutlich neu entdeckten Hassium-270 – ein schönes „nukleares Nebenprodukt“ der chemischen Untersuchung –, zwei weitere waren mit dem leichten Makel einer nicht ganz vollständig registrierten Zerfallskette behaftet. Die Halbwertszeiten der beiden Hassiumisotope betragen etwa 15 und vier Sekunden. Aber nicht nur die Tatsache, dass das Tetroxid überhaupt gebildet wird, interessierte die Forscher. Unbedingt wissen wollten sie natürlich auch, wie es um seine Flüchtigkeit bestellt ist. Deshalb beobachteten sie genau die Abscheideposition für die sieben  $\text{HsO}_4$ -Moleküle. Die Wissenschaftler ermittelten dabei eine Abscheidetemperatur von

( $-44 \pm 6$ ) Grad Celsius für  $\text{HsO}_4$ . Sie weicht erkennbar ab von derjenigen des  $\text{OsO}_4$ , die in diesem Experiment zu ( $-82 \pm 7$ ) Grad Celsius bestimmt worden war. Genau diese Unterschiede mit Hilfe der theoretischen Chemie zu verstehen, ist derzeit eine weitere Herausforderung.

Ein zweites, in allerjüngster Zeit bei der GSI durchgeführtes Experiment, das in enger Zusammenarbeit mit der Universität Mainz vorbereitet wurde, hatte das Ziel, bei Raumtemperatur eine erste chemische Reaktion des  $\text{HsO}_4$  mit der alkalischen Oberfläche von Natriumhydroxid zu untersuchen. Die Forscher nutzten dabei die gleichen Synthese- und Transportwege wie beim ersten Experiment. Während das erste allerdings mit extrem trockenen Gasen gearbeitet hatte – es sollte sich ja kein Eis auf den kalten Detektoren abscheiden – wurden nun gezielt feuchte Gase eingesetzt. Auch hier waren es wieder nur „eine Hand voll“ Hassium-Atome, die zur ersten nachweisbaren chemischen Reaktion des  $\text{HsO}_4$  führten. Die beobachteten Ergebnisse stehen im Einklang mit den Erwartungen, die die Forscher ausgehend von den leichteren Elementen in



## Struktur der Materie

Gruppe 8 hatten: Hassiumtetroxid bildet mit Natriumhydroxid das Natriumhassat (VIII),  $\text{Na}_2[\text{HsO}_4(\text{OH})_2]$ .

Als schwerstes, bisher eindeutig chemisch charakterisiertes – und damit der Chemie erschlossenes – Element hat Hassium damit seinen Platz unterhalb von Osmium in der Gruppe 8 des Periodensystems gefunden. Zwar erlebten die Forscher Überraschungen, was die chemischen Eigenschaften superschwerer Elemente im Detail betrifft – in diesem Fall bei der unterschiedlichen Flüchtigkeit von  $\text{HsO}_4$  und  $\text{OsO}_4$ . Die „Welt der Chemiker“ wurde durch die Untersuchungen des Hassium aber nicht erschüttert. Das Periodensystem behält fürs erste seine Gültigkeit.

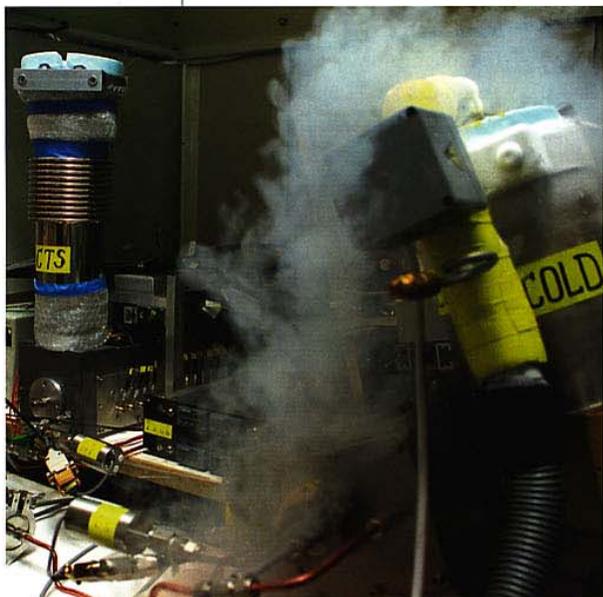
GSI

### Neue Frage:

#### *Ist Element 112 ein gasförmiges Schwermetall?*

Einige Entwicklungen und Erfahrungen der bisherigen Experimente, kombiniert mit völlig neuen Verfahren, bilden nun die Grundlage für die Untersuchung noch schwererer Elemente. Denn schon laufen die ersten Experimente für einen großen Sprung nach vorne im Periodensystem:

*Die moderne Alchemie zur Erkundung superschwerer Elemente nutzt neu entwickelte Apparaturen wie den am Paul Scherrer-Institut, Villigen, gebauten Cryo-On-Line-Thermochromatography-Detektor (COLD) und das am Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, entwickelte Vorläufermodell CTS. Ein internationales Team von Kernchemikern aus China, Deutschland, Russland, der Schweiz und den USA konnte damit am Beschleuniger der GSI erstmals wichtige chemische Eigenschaften des Elements 108, Hassium (Hs), studieren und – mit nur sieben Atomen – Hassium in die Gruppe 8 des Periodensystems einordnen.*



Element 112 ist weltweit das nächste Ziel der Kernchemiker. Hier wird es allen Erwartungen nach ganz besonders spannend. Element 112 ist nämlich das erste Element, bei dem bisher unbekannte, ja geradezu widersprüchliche Kombinationen von chemischen Eigenschaften auftreten könnten. Einerseits gehört es wohl zusammen mit Quecksilber (Hg) in die Gruppe 12 des Periodensystems – und sollte damit ein Schwermetall sein. Andererseits könnte es chemisch sehr viel weniger reaktiv als Quecksilber sein und zugleich eine deutlich höhere Flüchtigkeit besitzen. Damit wäre es in einem bestimmten Sinne fast dem Edelgas Radon (Rn) aus Gruppe 18 ähnlich.

Um einen Zugang zur Chemie des Elements 112 zu finden, haben zwei internationale Kollaborationen bereits erste Experimente in Dubna und in Darmstadt durchgeführt. Schon dabei konnten die Forscher Hinweise finden, dass sich Element 112 nicht genau wie Quecksilber verhält und vermutlich eine geringere Reaktivität und höhere Flüchtigkeit besitzt. Für das neueste, bei GSI durchgeführte Experiment wurde nun unter Führung einer Schweizer Gruppe ein Detektor entwickelt und eingesetzt, der es ermöglicht, für Element 112 ein breites Spektrum von Flüchtigkeit zu bestimmen – von Quecksilber bis hin zum Edelgas Radon. Die ersten Daten, noch in Auswertung, sehen sehr vielversprechend aus. Gasförmige Schwermetalle? Vielleicht betreten die Kernchemiker bei der Erforschung superschwerer Elemente nun bald wirklich Neuland: Damit wären nämlich in der Tat zwei widersprüchliche Eigenschaften in einem Element vereinigt, die nicht mehr in einfacher Weise aus dem Periodensystem abgelesen werden könnten. Die Frage, wie weit das Periodensystem die moderne Chemie trägt, bleibt weiter spannend.

**Dr. Matthias Schädel**

Leiter der Arbeitsgruppe „Kernchemie“

**Dr. Ingo Peter**

Wissenschaftliche Geschäftsführung, Öffentlichkeitsarbeit  
Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt