

Thermochemische und physikalische Eigenschaften von Element 112**

Robert Eichler,* Nikolay V. Aksenov, Alexey V. Belozerov, Gospodin A. Bozhikov, Victor I. Chepigin, Sergey N. Dmitriev, Rügard Dressler, Heinz W. Gäggeler, Alexander V. Gorshkov, Mikhail G. Itkis, Florian Haenssler, Andreas Laube, Viacheslav Ya. Lebedev, Oleg N. Malyshov, Yuri Ts. Oganessian, Oleg V. Petrushkin, David Piguet, Andrei G. Popeko, Peter Rasmussen, Sergey V. Shishkin, Alexey A. Serov, Alexey V. Shutov, Alexander I. Svirikhin, Evgeny E. Tereshatov, Grigory K. Vostokin, Maciej Wegrzecki und Alexander V. Yeremin

Die hohen Kernladungen der schwersten Elemente beeinflussen ihre Elektronenstruktur und damit ihre chemischen Eigenschaften.^[1–5] Den bisher erhaltenen experimentellen Ergebnissen zufolge verhalten sich die schwersten chemisch untersuchten Elemente Seaborgium,^[6,7] Bohrium^[8] und Hassium^[9] wie typische Vertreter ihrer Gruppen 6, 7 bzw. 8 des Periodensystems. Die relativistischen Effekte führen offensichtlich nicht zur merklichen Destabilisierung der höchsten Oxidationsstufen dieser Elemente in den untersuchten chemischen Umgebungen. Für die Transactinoiden der Gruppen 12–18 wird eine Verstärkung der relativistischen Effekte erwartet.^[1–3] Für das Element 112 aus der Gruppe 12 des Periodensystems wird dabei eine Grundzustandskonfiguration $[Rn]5f^{14}6d^{10}7s^2$ mit abgeschlossener Elektronenschale vorhergesagt, sodass dieses Element ein Schlüsselement bezüglich relativistischer Effekte auf die Elektronenstruktur ist.^[3,5,10] Unsere kürzlich durchgeführten gaschromatographischen Experimente mit nur zwei beobachteten Atomen des Elements 112 deuteten auf eine metallische Wechselwirkung bei der Adsorption an der stationären Phase Gold hin.^[11] Hier präsentieren wir experimentelle Resultate mit weiteren Atomen, die die vorherigen Resultate bestätigen

und ihre statistische Signifikanz erhöhen. Aus diesem kompletten Datensatz wurden thermochemische und physikalische Daten für Element 112 abgeleitet und mit den entsprechenden Eigenschaften seiner Homologen Zn, Cd und Hg verglichen. Die daraus folgende Stabilisierung des atomaren Zustands von Element 112 zeigt eine weitere Verstärkung der relativistischen Effekte mit steigender Kernladungszahl Z in der Gruppe 12.

Für das Element 112 wurde aus empirischen Korrelationen eine hohe Flüchtigkeit, aber dennoch ein metallischer Charakter vorhergesagt.^[12,13] Relativistische Rechnungen zeigen eine Kontraktion der sphärischen 7s-Orbitale, was auf eine erhöhte Stabilität des atomaren Zustands hinweist. Demzufolge wurde für Element 112 ein edelgasähnliches Verhalten postuliert.^[14] Moderne Rechenmethoden bestätigten eine stärkere Bindung der 7s-Orbitale.^[3] Es wird aber auch vorhergesagt, dass eine verstärkte Spin-Bahn-Kopplung der 6d-Orbitale zu einer elektronischen Grundzustandskonfiguration führt, in der das $6d^{5/2}$ -Orbital energetisch und räumlich nahe dem 7s-Orbital liegt. Daher könnte das Element 112 ein edles Übergangsmetall^[5,15] oder sogar ein Halbleiter sein.^[16] Ausgehend von diesen stark variierenden Vorhersagen ist es in chemischen Experimenten entscheidend, beide Grenzfälle – Edelmetall- und Edelgasverhalten – zu unterscheiden. Zu diesem Zweck wurden die Adsorptionseigenschaften des Elements 112 auf Metalloberflächen untersucht.^[17] Dabei wird der Energieinhalt der Adsorptionsbindung zwischen Element 112 und der metallischen stationären Phase, die Standardadsorptionsenthalpie bei Nullbedeckung (ΔH_{ads}^{Au}), bestimmt. Diese Größe unterscheidet sich für eine metallische Bindung oder eine schwache Van-der-Waals-Wechselwirkung im Fall der Physisorption. Die Ausgangsdaten für das semiempirische makroskopische Adsorptionsmodell nach Miedema^[18] wurden weiter verbessert^[13] und sagen für das Element 112 eine schwächere metallische Wechselwirkung mit Gold voraus als für Hg. Relativistische Rechnungen unter Annahme der Wechselwirkung von Atomen des Elements 112 mit Goldclustern deuten eine metallische Wechselwirkung an.^[19] Ein Adhäsionsmodell für Edelgase auf Metallen wurde zur Abschätzung der Physisorptionswechselwirkung eines edelgasähnlichen Elements 112 mit Gold erweitert^[20] (Tabelle 1, ΔH_{ads}^{Au} ber.).

[*] Dr. R. Eichler, Dr. R. Dressler, Prof. H. W. Gäggeler, Dr. F. Haenssler, A. Laube, D. Piguet, P. Rasmussen, A. A. Serov
Labor für Radio- und Umweltchemie
Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI (Schweiz)

und
Departement für Chemie und Biochemie Universität Bern
3012 Bern (Schweiz)
Fax: (+41) 56-310-4435
E-Mail: robert.eichler@psi.ch

N. V. Aksenov, A. V. Belozerov, Dr. G. A. Bozhikov, V. I. Chepigin, Prof. Dr. S. N. Dmitriev, A. V. Gorshkov, Prof. Dr. M. G. Itkis, Dr. V. Y. Lebedev, O. N. Malyshov, Prof. Dr. Y. T. Oganessian, O. V. Petrushkin, A. G. Popeko, Dr. S. V. Shishkin, A. V. Shutov, A. I. Svirikhin, E. E. Tereshatov, G. K. Vostokin, Dr. A. V. Yeremin
Flerov Laboratory of Nuclear Reactions
Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna (Russland)

M. Wegrzecki
Institute of Electron Technology, 02-668 Warschau (Polen)

[**] Wir danken der Mannschaft des U-400-Zyklotrons für die intensiven ^{48}Ca -Strahlen. Diese Arbeit wurde unterstützt durch den Grundlagenforschungsfonds Russlands (Projekt 07-03-00430) und durch den Schweizerischen Nationalfonds (Projekt 200020-109171).

Tabelle 1: Experimentelle und berechnete thermochemische Daten für Elemente der Gruppe 12 und Radon.

	$-\Delta H_{\text{ads}}^{\text{Au}}$ [kJ mol ⁻¹] exp.	$-\Delta H_{\text{ads}}^{\text{Au}}$ [kJ mol ⁻¹] ber.	ΔH_{subl} [kJ mol ⁻¹] exp.	ΔH_{subl} [kJ mol ⁻¹] ber.	Sdp. [K]
Rn	27 \pm 3 ^[20]	27 ^[20]	20 ^[26]		211 ^[25]
Zn			130 ^[25]		1180 ^[25]
Cd			111 ^[25]		1040 ^[25]
Hg	98 \pm 3 ^[27]		64 ^[25]		630 ^[25]
112	52 ^{+4 -3} ^[a]	12 ^[11]	38 ^{+10 -12} ^[a]	22 ^[12]	357 ^{+112 -108} ^[a]
	52 ^{+46 -7} ^[11]	30 \pm 5 ^[20]		39 \pm 3 ^[13]	
		67 ^[19]		110 \pm 3 ^[16]	
		78 ^[20]			
		84 \pm 10 ^[13]			

[a] Diese Arbeit.

Erste chemische Experimente ergaben 2001–2004^[21–24] keine eindeutigen Resultate bezüglich der chemischen Eigenschaften von Element 112. 2006 wurde das Element 112 in einer Versuchsreihe am FLNR Dubna zum ersten Mal eindeutig nach seiner chemischen Abtrennung nachgewiesen.^[11] Diese chemischen Experimente waren auf die Untersuchung des Isotops ²⁸³112 ausgerichtet, dessen Bildung in der durch Schwerionen induzierten Kernfusion von ⁴⁸Ca mit ²³⁸U beobachtet wurde.^[28] Es zerfällt mit einer Halbwertszeit von ca. 3.8 s durch Emission eines Alphateilchens ($E_{\alpha} = 9.54$ MeV) zu ²⁷⁹Ds, das seinerseits mit einer Halbwertszeit von 200 ms spontan zerfällt. Diese Zerfallseigenschaften des Isotops ²⁸³112 wurden 2007 unter Verwendung der gleichen Kernreaktion mit dem SHIP-Separator bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt bestätigt.^[29] Noch größere Produktionsraten für ²⁸³112 wurden auf dem indirekten Produktionspfad ²⁴²Pu(⁴⁸Ca,3n)²⁸⁷114 ($t_{1/2} = 0.48$ s, $E_{\alpha} = 10.02$ MeV) → ²⁸³112 beobachtet.^[28] Deshalb wurde hier diese Reaktion benutzt. Die Apparatur für diese Experimente beruhte auf der thermochromatographischen In-situ-Verflüchtigung mit Online-Detektion (IVO) in Kombination mit einem Kryo-Online-Detektor (COLD; siehe Lit. [8,11,24] für Details). Durch die Beobachtung von nur zwei Atomen (Abbildung 1, Kette 1 und 2), die eindeutig dem Isotop ²⁸³112 zugeordnet werden konnten, wurden erste Hinweise für ein flüchtiges metallisches Element 112 erhalten.^[11] Im Jahr 2007 konnten wir die Gesamteffizienz um einen Faktor von fast 3 steigern (siehe *Experimentelles*), indem wir die Transportzeit verkürzten und die Transmission des Targetkühlgitters erhöhten. Wir beobachteten drei weitere Zerfallsketten von ²⁸³112 (Abbildung 1, Ketten 3–5).

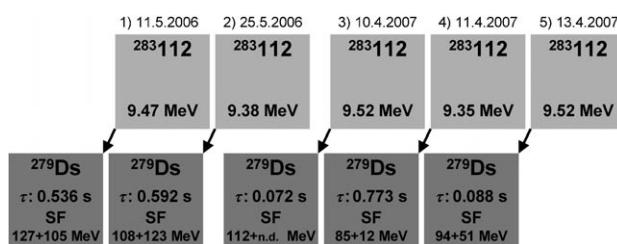


Abbildung 1. Die detektierten α -SF-Zerfallsketten, die dem Isotop ²⁸³112 zugeordnet wurden. n.d.: nicht bestimmt.

Die unter variierten experimentellen Bedingungen erhaltenen thermochromatographischen Abscheidungsmuster für ¹⁸⁵Hg, ²¹⁹Rn und ²⁸³112 (Abbildung 2) sind charakteristisch für das gaschromatographische Verhalten einzelner Atome:

- Im ersten Experiment 2006^[11] wurde ein Trägergasfluss von 860 mL min⁻¹ und ein Temperaturgradient zwischen –24 und –184 °C eingestellt (Abbildung 2a). Die spontane diffusionskontrollierte Abscheidung von ¹⁸⁵Hg wurde auf den ersten elf Detektoren beobachtet. ²¹⁹Rn schied sich fast komplett auf den letzten neun Detektoren ab. Unter diesen Bedingungen wurde eine Zerfallskette (Kette 1) für ²⁸³112 auf dem zweiten Detektor (–28 °C) zusammen mit ¹⁸⁵Hg und klar abgesetzt von ²¹⁹Rn gemessen.
- Im zweiten Teil dieses Experiments 2006^[11] wurde die Temperatur beim Start des Chromatographiedetektors erhöht, was zu einem steileren Temperaturgradient zwischen 35 und –180 °C führte (Abbildung 2b). Der Trägergasfluss betrug 890 mL min⁻¹. Unter diesen Bedingungen zeigte ¹⁸⁵Hg im Einklang mit dem erhöhten Diffusionskoeffizienten von Hg im Trägergas bei höheren Temperaturen ein schmaleres Abscheidungsprofil bis zum achten

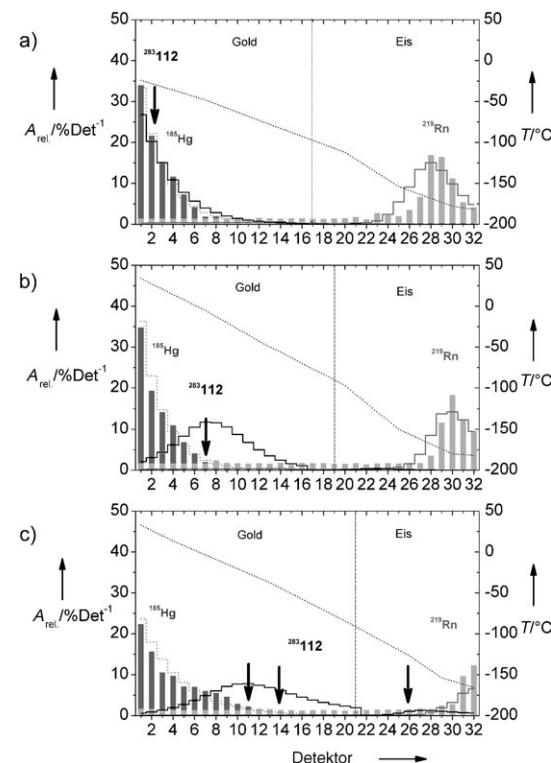


Abbildung 2. Thermochromatographische Abscheidung von ¹⁸⁵Hg, ²¹⁹Rn und ²⁸³112 im COLD in Abhängigkeit von den experimentellen Parametern. Die pro Detektor gemessenen relativen Aktivitäten ($A_{\text{rel.}}$, linke Achse) von ¹⁸⁵Hg (dunkelgrau Balken, MCS: graue gestrichelte Linie) und ²¹⁹Rn (graue Balken, MCS: graue Linie) sind gezeigt. Die Positionen der detektierten ²⁸³112-Atome sind hervorgehoben (schwarze Pfeile, MCS: schwarze Linie). Der Temperaturgradient ist als schwarze gestrichelte Linie dargestellt (rechte Achse). Experimentelle Parameter: a) Gasfluss 860 mL min⁻¹, Temperaturgradient von –24 bis –184 °C; b) Gasfluss 890 mL min⁻¹, Temperaturgradient von 35 bis –180 °C; c) Gasfluss 1500 mL min⁻¹, Temperaturgradient von 32 bis –164 °C. Der Beginn der Eisbedeckung der Detektoren bei –95 °C ist durch die vertikale Linie markiert.

Detektor. Wegen der etwas höheren Temperatur der letzten Detektoren schieden sich nur noch 70 % des ^{219}Rn auf den letzten sechs Detektoren ab. Eine weitere Zerfallskette für $^{283}\text{112}$ (Kette 2) wurde auf Detektor 7 (-5°C) gemessen, wieder klar von ^{219}Rn abgesetzt.

- Im Experiment 2007 (Abbildung 2c) wurde der Gasfluss auf 1500 mL min^{-1} erhöht, um die Transporteffizienz zu verbessern. Der Temperaturgradient wurde zwischen 32 und -164°C eingestellt. Die Abscheidungsregion von ^{185}Hg verbreiterte sich dadurch drastisch auf 14 Detektoren. Nur noch etwa 30 % des ^{219}Rn schied sich auf den letzten vier Detektoren ab. Der höhere Trägergasfluss transportierte auch die drei beobachteten Atome von $^{283}\text{112}$ weiter zu Detektoren mit tieferen Temperaturen. Zwei der Atome (Kette 3 und 5) schieden sich auf den Detektoren 11 (-21°C) und 14 (-39°C) ab, das dritte Atom (Kette 4) erst auf dem Detektor 26 (-124°C). Aufgrund der Resultate der ständigen Taupunktbestimmung im Trägergas muss angenommen werden, dass die Detektoroberflächen unterhalb von -95°C mit einer dünnen Eisschicht bedeckt sind (Abbildung 2a-c, vertikale Linien, -•-). Daraus schließen wir, dass vier Ereignisse (Ketten 1-3 und 5) Atome von Element 112 repräsentieren, die auf der Goldoberfläche abgeschieden wurden, und ein Zerfall der Abscheidung von Element 112 auf Eis zuzuordnen ist (Kette 4).

Zur Bestimmung der wahrscheinlichsten Standardadsorptionsenthalpien auf der Goldoberfläche bei Nullbedeckung ($-\Delta H_{\text{ads}}^{\text{Au}}$) aus den chromatographischen Abscheidungen von Hg, Rn und Element 112 wurde ein mikroskopisches kinetisches Modell der Gaschromatographie auf der Grundlage einer Monte-Carlo-Simulation (MCS)^[30] verwendet. Die diffusionskontrollierte Abscheidung, die für Hg beobachtet wurde, ermöglichte die Bestimmung einer unteren Grenze von $-\Delta H_{\text{ads}}^{\text{Au}}(\text{Hg}) > 65 \text{ kJ mol}^{-1}$ (Abbildung 2, graue gestrichelte Linien) in Übereinstimmung mit Literaturdaten.^[27] Die Abscheidung von ^{219}Rn führte zu einer Adsorptionsenthalpie von $19 \pm 2 \text{ kJ mol}^{-1}$ (Abbildung 2, graue durchgezogene Linie), die in guter Übereinstimmung mit $-\Delta H_{\text{ads}}^{\text{Eis}}(\text{Rn}) = 20 \pm 2 \text{ kJ mol}^{-1}$ für Rn auf Eisoberflächen ist.^[31] Die statistische Analyse des Abscheidungsverhaltens von $^{283}\text{112}$ (Abbildung 2, schwarze Pfeile) ergab eine Standardadsorptionsenthalpie für Element 112 auf Goldoberflächen von $-\Delta H_{\text{ads}}^{\text{Au}}(112) = 52^{+4}_{-3} \text{ kJ mol}^{-1}$ (68 % Konfidenzintervall). Unter Verwendung dieses Werts wurde aus der berechneten Abscheidung bei hohem Gasfluss (Abbildung 2c, schwarze Linie) ermittelt, dass mit ca. 15 % Wahrscheinlichkeit Atome von Element 112 den Detektor 21 erreichen und den chromatographischen Prozess auf Eis fortsetzen. Dies erklärt auch die Beobachtung der Kette 4 auf dem Detektor 26. Die erwartete Zahl zufällig korrelierter Zerfallsketten des beobachteten Typs $\alpha_{9.5 \pm 0.2 \text{ MeV}} - \text{SF}_{E > 50 \text{ MeV}}$ während des gesamten Experiments wurde zu 0.05 bestimmt. Verglichen mit der durch ein Physisorptionsmodell vorhergesagten Wechselwirkung^[20] ist die bestimmte Adsorptionsenthalpie von Element 112 auf Gold deutlich erhöht. Daraus wird ersichtlich, dass eine metallische Bindung zwischen Element 112 und Gold besteht. Dichtefunktionalrechnungen

zum Wechselwirkungspotential 112-Au^[15,19] und das makroskopische semiempirische Eichler-Miedema-Adsorptionsmodell^[13] sagen einen metallischen Bindungsanteil voraus, scheinen dessen Energieinhalt aber zu überschätzen (Tabelle 1). Trotzdem ist Element 112 chemisch nicht so inert wie ein Edelgas, was Pitzer 1976 postulierte.^[14]

Empirisch wurden für verschiedene Verbindungsklassen auf verschiedenen Chromatographiematerialien lineare Zusammenhänge zwischen der atomaren (molekularen) Eigenschaft ΔH_{ads} und der Flüchtigkeit von makroskopischen Mengen eines Elements (einer Verbindung) erhalten, die durch die Standardsublimationsenthalpie ΔH_{subl} gegeben ist.^[32] Eine ähnliche Korrelation wurde zwischen $\Delta H_{\text{ads}}^{\text{Au}}$ und ΔH_{subl} von Elementen gefunden [Gl. (1)].^[33]

$$-\Delta H_{\text{ads}}^{\text{Au}} = (1.08 \pm 0.05) \Delta H_{\text{subl}} + (10.3 \pm 6.4) \text{ kJ mol}^{-1} \quad (1)$$

Mit dieser Korrelation ergibt sich eine Standardsublimationsenthalpie von $\Delta H_{\text{subl}}(112) = 38^{+10}_{-12} \text{ kJ mol}^{-1}$, die in sehr guter Übereinstimmung mit der vorhergesagten Flüchtigkeit von Element 112 ist^[13] (Tabelle 1, ΔH_{subl} ber.). Die heute verfügbaren quantenchemischen Methoden scheinen die Flüchtigkeit von Element 112 zu unterschätzen.^[16] Unter Verwendung der geschätzten Sublimationsentropie $\Delta S_{\text{subl}} = 106.5 \pm 2.0 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{[13]}$ kann für Element 112 ein Siedepunkt von $357^{+112}_{-108} \text{ K}$ angenommen werden, sodass es bedeutend flüchtiger wäre als seine leichteren Homologen Zn, Cd und Hg (Abbildung 3 und Tabelle 1). Damit manifestiert sich die Erhaltung des Trends der steigenden Stabilität des atomaren Zustandes in der Gruppe 12 des Periodensystems bis hin zum Element 112, weil relativistische Effekte in der Elektronenstruktur zunehmend an Bedeutung gewinnen.

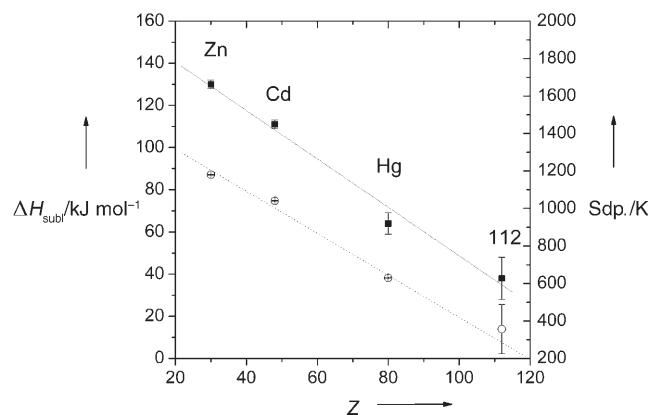


Abbildung 3. Zur Flüchtigkeit von Elementen der Gruppe 12 des Periodensystems. Die Standardsublimationsenthalpien (ΔH_{subl} ; schwarze Quadrate) und die Siedepunkte (offene Kreise, rechte Achse) werden als Maß für die Flüchtigkeit der Elemente genutzt. Die Fehler für Zn und Cd sind kleiner als die Symbole. Die gestrichelten Linien dienen der Veranschaulichung.

Experimentelles

Am U-400-Zyklotron des FLNR Dubna wurde 2007 ein stationäres, durch ein Gitter gestütztes $^{242}\text{PuO}_2$ -Target (ca. 1.4 mg cm^{-2}), das $50 \text{ } \mu\text{g cm}^{-2}$ Nd in natürlicher Isotopenzusammensetzung enthielt, mit

⁴⁸Ca (278 ± 3 MeV) bestrahlt. Die Projektilenergie im Targetmaterial wurde mit SRIM2003^[34] zu 227–242 MeV berechnet. Während der 16-tägigen Bestrahlung wurde eine Gesamtdosis von $3.1 \cdot 10^{18}$ ⁴⁸Ca-Teilchen auf das Target akkumuliert. Die Transmission des Targetgitters betrug ca. 85 %. Um das durch Emission von Alphateilchen zerfallende ¹⁸⁵Hg ($t_{1/2} = 49$ s) während des gesamten Experiments mitzuproduzieren, wurde dem Target Neodym beigemischt. Zusätzlich wurden einige Radonisotope in Multinucleonentransferreaktionen des Projektilteilchens mit dem Targetmaterial erzeugt, z.B. ²¹⁹Rn ($t_{1/2} = 3.96$ s). Die Kernreaktionsprodukte, die aufgrund ihres Rückstoßes das Target verlassen, wurden in einer Rückstoßkammer gestoppt, die (den Kupferstrahlstopper ausgenommen) mit einem Quarzeinsatz ausgekleidet war. Danach wurden sie mit dem Trägergasfluss (He/Ar = 1:1, 1500 mL min⁻¹) durch einen Ofen gespült. Dieser war auf 850 °C geheizt und enthielt eine Quarzkolonne mit einem Quarzwattefilter (zur Abreicherung von Aerosolteilchen) und mit Tantalmetall (zum Entfernen von O₂- und H₂O-Spuren; der gemessene Taupunkt von –95 °C entspricht einem Wassergehalt von 0.2 ppm). Damit wurde sichergestellt, dass nur nichtreaktive, flüchtige Produkte weiter durch die 8 m lange PFA-Teflonkapillare zum COLD transportiert werden. In diesem Thermochemographiedetektor sind 32 gegenüberliegende Paare von Silicium-PIPS-Detektoren (9.7 × 9.7 mm² aktive Fläche) aneinandergereiht, sodass sie einen rechteckigen Chromatographiekanal (11.6 × 1.5 mm²) mit über 80 % aktiver Detektorfläche bilden; eine Seite des Kanals war mit einer 50 nm dicken Goldschicht bedampft. Diese Anordnung wurde in einem vakuumdichten Kanal montiert. Der Temperaturgradient entlang des Kanals wird mit einem Thermostaten an der warmen Eingangsseite und einem Flüssigstickstoffkryostaten am kalten Ende aufrechterhalten. Dieser Thermochemographiedetektor eignet sich für eine zeitauf lösende Alpha- und Spaltfragmentspektroskopie (SF) mit einer Temperaturauflösung um 5 °C. Durch die günstige Detektionsgeometrie gelang die Online-Identifizierung einzelner Atome, die auf der Detektoroberfläche abgeschieden wurden mit einer Detektionseffizienz von nahezu 100 % für SF-Zerfall und 86 % für α -Zerfall.

Eingegangen am 30. Oktober 2007
Online veröffentlicht am 12. März 2008

Stichwörter: Adsorption · Element 112 · Gaschromatographie · Thermochemie · Transactinoide

- [1] P. Pyykkö, J.-P. Desclaux, *Acc. Chem. Res.* **1979**, *12*, 276–281.
- [2] B. Fricke in *Structure and Bonding*, Vol. 21 (Hrsg.: J. D. Dunitz, P. Hemmerich, R. H. Holm, J. A. Ibers, C. K. Jorgensen, J. B. Neilands, D. Reinen, R. J. P. Williams), Springer, Heidelberg, **1975**, S. 89.
- [3] P. Schwerdtfeger, M. Seth in *Encyclopedia of Computational Chemistry*, Vol. 4 (Hrsg.: P. von R. Schleyer), Wiley, New York, **1998**, S. 2480.
- [4] V. G. Pershina, *Chem. Rev.* **1996**, *96*, 1977–2010.
- [5] M. Seth, P. Schwerdtfeger, M. Dolg, *J. Chem. Phys.* **1997**, *106*, 3623–3632.
- [6] M. Schädel, W. Brüchle, R. Dressler, B. Eichler, H. W. Gäggeler, R. Günther, K. E. Gregorich, D. C. Hoffman, S. Hübener, D. T. Jost, J. V. Kratz, W. Paulus, D. Schumann, S. Timokhin, N. Trautmann, A. Türler, G. Wirth, A. B. Yakushev, *Nature* **1997**, *388*, 55.
- [7] A. Türler, W. Brüchle, R. Dressler, B. Eichler, R. Eichler, H. W. Gäggeler, M. Gärtner, K. E. Gregorich, S. Hübener, D. T. Jost, V. Y. Lebedev, V. G. Pershina, M. Schädel, S. Taut, S. N. Timokhin, N. Trautmann, A. Vahle, A. B. Yakushev, *Angew. Chem.* **1999**, *111*, 2349–2351; *Angew. Chem. Int. Ed.* **1999**, *38*, 2212–2213.

- [8] R. Eichler, W. Brüchle, R. Dressler, C. E. Düllmann, B. Eichler, H. W. Gäggeler, K. E. Gregorich, D. C. Hoffman, S. Hübener, D. T. Jost, U. W. Kirbach, C. A. Laue, V. M. Lavanchy, H. Nitsche, J. B. Patin, D. Piguet, M. Schädel, D. A. Shaughnessy, D. A. Strellis, S. Taut, L. Tobler, Y. S. Tsyganov, A. Türler, A. Vahle, P. A. Wilk, A. B. Yakushev, *Nature* **2000**, *407*, 63–65.
- [9] C. E. Düllmann, R. Dressler, B. Eichler, H. W. Gäggeler, F. Glauß, D. T. Jost, D. Piguet, S. Soverna, A. Türler, W. Brüchle, R. Eichler, E. Jäger, V. Pershina, M. Schädel, B. Schästen, E. Schimpf, H.-J. Schött, G. Wirth, K. Eberhardt, P. Thörle, N. Trautmann, T. N. Ginter, K. E. Gregorich, D. C. Hoffman, U. W. Kirbach, D. M. Lee, H. Nitsche, J. B. Patin, R. Sudowe, P. M. Zielinski, S. N. Timokhin, A. B. Yakushev, A. Vahle, Z. Qin, *Nature* **2002**, *418*, 859–862.
- [10] C. S. Nash, *J. Phys. Chem. A* **2005**, *109*, 3493–3500.
- [11] R. Eichler, N. V. Aksenen, A. V. Belozerov, G. A. Bozhikov, V. I. Chepigin, R. Dressler, S. N. Dmitriev, H. W. Gäggeler, V. A. Gorshkov, F. Haenssler, M. G. Itkis, V. Y. Lebedev, A. Laube, O. N. Malyshev, Yu. Ts. Oganessian, O. V. Petruschkin, D. Piguet, P. Rasmussen, S. V. Shishkin, A. V. Shutov, A. I. Svirikhin, E. E. Tereshatov, G. K. Vostokin, M. Wegzrecki, A. V. Yeremin, *Nature* **2007**, *447*, 72–75.
- [12] B. Eichler, *Kernenergie* **1976**, *19*, 307–311.
- [13] a) B. Eichler, Metal Chemistry of Transactinides PSI Report 00-09, Villigen, **2000**, ISSN 1019-0643. b) B. Eichler, Volatilization Properties of Transactinides from Metal Surfaces and Melts. (Thermochemical Calculation). PSI Report 03-01, Villigen **2002**, ISSN 1019-0643.
- [14] K. S. Pitzer, *J. Chem. Phys.* **1975**, *63*, 1032–1033.
- [15] V. Pershina, T. Bastug, *Chem. Phys.* **2005**, *311*, 139–150.
- [16] N. Gaston, I. Opahle, H. W. Gäggeler, P. Schwerdtfeger, *Angew. Chem.* **2007**, *119*, 1692–1695; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2007**, *46*, 1663–1666.
- [17] B. Eichler, T. Reetz, *Kernenergie* **1982**, *25*, 218–221.
- [18] B. Eichler, H. Rossbach, *Radiochim. Acta* **1983**, *33*, 121–125.
- [19] a) C. Sarpe-Tudoran, *Eur. Phys. J. D* **2003**, *24*, 65–67; b) C. Sarpe-Tudoran, B. Fricke, J. Anton, V. Pershina, *J. Chem. Phys.* **2007**, *126*, 174702–174707.
- [20] R. Eichler, M. Schädel, *J. Phys. Chem. B* **2002**, *106*, 5413–5420.
- [21] A. B. Yakushev, G. V. Buklanov, M. L. Chelnokov, V. I. Chepigin, S. N. Dmitriev, V. A. Gorshkov, S. Hübener, V. Ya. Lebedev, O. N. Malyshev, Yu. Ts. Oganessian, A. G. Popeko, E. A. Sokol, S. N. Timokhin, A. Türler, V. M. Vasko, A. V. Yeremin, I. Zvara, *Radiochim. Acta* **2001**, *89*, 743–745.
- [22] A. B. Yakushev, I. Zvara, Yu. Ts. Oganessian, A. V. Belozerov, S. N. Dmitriev, B. Eichler, S. Hübener, E. A. Sokol, A. Türler, A. V. Yeremin, G. V. Buklanov, M. L. Chelnokov, V. I. Chepigin, V. A. Gorshkov, A. V. Gulyaev, V. Ya. Lebedev, O. N. Malyshev, A. G. Popeko, S. Soverna, Z. Szeglowski, S. N. Timokhin, S. P. Tretyakova, V. M. Vasko, M. G. Itkis, *Radiochim. Acta* **2003**, *91*, 433–440.
- [23] H. W. Gäggeler, W. Brüchle, C. E. Düllmann, R. Dressler, K. Eberhardt, B. Eichler, R. Eichler, C. M. Folden III, T. N. Ginter, F. Glauß, K. E. Gregorich, F. Haenssler, D. C. Hoffman, E. Jäger, D. T. Jost, U. W. Kirbach, J. V. Kratz, H. Nitsche, J. B. Patin, V. Pershina, D. Piguet, Z. Qin, U. Rieth, M. Schädel, E. Schimpf, B. Schästen, S. Soverna, R. Sudowe, P. Thörle, N. Trautmann, A. Türler, A. Vahle, P. A. Wilk, G. Wirth, A. B. Yakushev, A. von Zweidorff, *Nucl. Phys. A* **2004**, *734*, 208–212.
- [24] R. Eichler, W. Brüchle, R. Buda, S. Bürger, R. Dressler, C. E. Düllmann, J. Dvorak, K. Eberhardt, B. Eichler, C. M. Folden III, H. W. Gäggeler, K. E. Gregorich, F. Haenssler, D. C. Hoffman, H. Hummrich, E. Jäger, J. V. Kratz, B. Kuczewski, D. Liebe, D. Nayak, H. Nitsche, D. Piguet, Z. Qin, U. Rieth, M. Schädel, B. Schästen, E. Schimpf, A. Semchenkov, S. Soverna, R. Sudowe, N. Trautmann, P. Thörle, A. Türler, B. Wiercinski, N. Wiehl,

- P. A. Wilk, G. Wirth, A. B. Yakushev, A. von Zweidorf, *Radiochim. Acta* **2006**, *94*, 181–191.
- [25] *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 87. Aufl. (Hrsg.: D. R. Lide) CRC, Boca Raton, **2006**.
- [26] B. M. Smirnov, *Uspekhi Fiz. Nauk.* **2001**, *171*, 1291–1293.
- [27] S. Soverna, R. Dressler, C. E. Düllmann, B. Eichler, R. Eichler, H. W. Gäggeler, F. Haenssler, J.-P. Niklaus, D. Piguet, Z. Qin, A. Türler, A. B. Yakushev, *Radiochim. Acta* **2005**, *93*, 1–5.
- [28] Yu. Ts. Oganessian, V. K. Utyonkov, Yu. V. Lobanov, F. Sh. Abdullin, A. N. Polyakov, I. V. Shirokovsky, Yu. S. Tsygano, G. G. Gulbekian, S. L. Bogomolov, B. N. Gikal, S. Iliev, V. G. Subbotin, A. M. Sikhov, A. A. Voinov, G. V. Buklanov, K. Subotic, V. I. Zagrebaev, M. G. Itkis, J. B. Patin, K. J. Moody, J. F. Wild, M. A. Stoyer, N. J. Stoyer, D. A. Shaughnessy, J. M. Kenneally, P. A. Wilk, R. W. Lougheed, R. I. Il'kaev, S. P. Vesnovskii, *Phys. Rev. C* **2004**, *70*, 064609.
- [29] S. Hofmann, D. Ackermann, S. Antalic, H. G. Burkhard, V. F. Comas, R. Dressler, Z. Gan, S. Heinz, J. A. Heredia, F. P. Heßberger, J. Khuyagbaatar, B. Kindler, I. Kojouharov, P. Kuusiniemi, M. Leino, B. Lommel, R. Mann, G. Münzenberg, K. Nishio, A. G. Popeko, S. Saro, H. J. Schött, B. Streicher, B. Sulignano, J. Uusitalo, M. Venhart, A. V. Yeremin, *Eur. Phys. J. A* **2007**, *32*, 251–260.
- [30] I. Zvara, *Radiochim. Acta* **1985**, *38*, 95.
- [31] B. Eichler, P. Zimmermann, H. W. Gäggeler, *J. Phys. Chem. A* **2000**, *104*, 3126–3131.
- [32] B. Eichler, R. Eichler in *Chemistry of Superheavy Elements* (Hrsg.: M. Schädel), Kluwer, Dordrecht, **2003**, S. 205.
- [33] R. Eichler, *Radiochim. Acta* **2005**, *93*, 245–248.
- [34] J. F. Ziegler, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **2004**, *219–220*, 1027–1036.