

Nanostrukturen von Gold – von kleinen Clustern zu niederdimensionalen Anordnungen**

Peter Schwerdtfeger*

Stichwörter:

Clusterverbindungen · Gold · Katalyse · Metall-Metall-Wechselwirkungen · Nanostrukturen

Gold ist ein Edelmetall, und im Unterschied zu den leichteren Elementen der Gruppe 11, Kupfer und Silber, wurde es lange Zeit als weitgehend unkatalytisch oder oberflächeninaktiv betrachtet. Zwar war durchaus bekannt, dass atomares Gold in der Gasphase hoch reaktiv sein kann, aber erst mit der Beschreibung der Oxidation von CO bei niedriger Temperatur an trägergebundenen Goldkatalysatoren wie Au/TiO₂ oder Au/Fe₂O₃ durch Haruta et al. 1987 erweckte das Interesse an Gold-Nanostrukturen.^[1] Seither sind nanokristalline Goldverbindungen Gegenstand intensiver Forschungen mit weit reichenden Anwendungen in der Katalyse, für Sensoren und molekulare Elektronik oder als biokonjugierte Sonden für Marker in der Genanalyse, der Antikörper- und Antigenerkennung, der DNA-Sequenzierung, der Genkartierung usw.^[1,2] Als ein Beispiel gelang es Wang et al. kürzlich, auf der Kugeloberfläche eines Kuherbsen-Mosaikvirus (CPMV, „cowpea mosaic virus“) mit 30 nm Durchmesser 1.4 nm große Goldcluster anzu- bringen (Abbildung 1).^[3]

Die meisten Studien beschäftigen sich bislang fast ausschließlich mit rei-

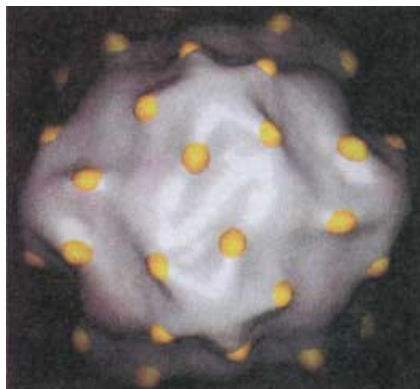


Abbildung 1. Mit 1.4-nm-Goldclustern dotiertes Kuherbsen-Mosaikvirus.^[3]

nen Goldnanoclustern unterschiedlicher Größe und Struktur. Die kürzliche Erzeugung der äußerst stabilen gemischten ikosaedrischen Goldcluster W@Au₁₂ und Mo@Au₁₂ (Abbildung 2 A), deren Existenz von Pyykkö und Runeberg zuvor theoretisch vorhergesagt wurde,^[5] durch Wang et al.^[4] hat einen Zugang zu völlig neuen nanostrukturierten Goldmaterialien eröffnet, bei denen das dotierte Zentralatom eine wichtige Rolle bei der Feinabstimmung von elektronischen Eigenschaften spielt.

Es ist seit langem bekannt, dass Gold eine Vielzahl von Clusterverbindungen bildet, die sich von denen der anderen Elemente der Gruppe 11 grundlegend unterscheiden. Einige der größeren Clustersysteme wurden erst kürzlich charakterisiert, darunter [Au₁₀(PPh₃)₇{S₂C₂(CN)₂}₂] (Abbildung 2 C),^[6] [Au₁₃(PR₃)₁₀Cl₂(PF₆)₃] (verzerrt ikosaedrischer Au-Kern), [Au₃₉(PR₃)₁₄Cl₈] (nahezu hexagonal dicht gepackter Au-Kern), [Au₅₅(PR₃)₁₂Cl₆] und [Au₇₃₋₇₅(PR₃)₁₅₋₁₇Cl_x] (R = organischer Ligand).^[7] Die Farbe dieser Verbindungen kann stark variieren und reicht von gelb über

orange und rot bis grün (aufgrund eines zusätzlichen Absorptionsmaximums im Blauen). Eine Mischung solcher Clusterverbindungen ist unter dem Handelsnamen „Nanogold“ erhältlich. Ebenfalls bekannt sind elementzentrierte ligandenbehafte Gold-Clusterverbindungen, z.B. die oktaedrischen [{C@Au₆}(Ph₃P)₆X₂]^{−[8]} (Abbildung 2 D) oder die ikosaedrischen [{Pd@Au₁₂}(Ph₃P)₈Cl₄]-Cluster (Abbildung 2 B).^[9]

Die starke Tendenz von Gold, Metall-Metall-Wechselwirkungen einzugehen („Aurophilie“), ist auf die starken relativistischen Effekte in Gold zurückzuführen, die im letzten Jahrzehnt intensiv untersucht wurden.^[10] Besonders stark ist die Wechselwirkung mit elektropositiven Liganden (Metallen), die Elektronendichte in das relativistisch kontrahierte und stabilisierte Au-6s-Orbital übertragen und so die aurophilen Wechselwirkungen verstärken. Dies erklärt die ungewöhnliche Stabilität von Gold und gemischten Metall-Gold-Clustern. Die genaue Beschreibung der dynamischen und elektronischen Eigenschaften solcher Schweratomclustersysteme ist nach wie vor eine schwierige Aufgabe für die Theorie. So wird gegenwärtig kontrovers diskutiert, bei welcher Clustergröße der Übergang vom Nichtmetall (Bandlücke δ zwischen besetztem und unbesetztem Zustand $> kT$) zum Metall ($\delta < kT$) auftritt. Die Herausforderungen an die Theorie werden z.B. anhand der Leitfähigkeit von Gold deutlich, die im Festkörper $4.3 \times 10^7 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ beträgt und somit um Größenordnungen höher liegt als die Leitfähigkeit 2 nm großer Goldcluster ($1.4 \times 10^{-3} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$).^[11]

Diskrete ikosaedrische Metallcluster sind relativ häufig, da M₁₃-Cluster

[*] Prof. Dr. P. Schwerdtfeger
Department of Chemistry
University of Auckland
Private Bag 92019, Auckland (Neuseeland)
Fax: (+64) 9-3737-422
E-mail: p.schwerdtfeger@auckland.ac.nz

[**] Diese Arbeit wurde vom Marsden Fund der Royal Society of New Zealand unterstützt. Mein Dank gilt A. Hammerl, R. Bast, H. Häkkinen und H. Idriss für wertvolle Kommentare sowie Y. Kondo, Tokyo, und W. Ho, Irvine, für die freundliche Zusendung hochauflösender Bilder von Gold-Nanostrukturen.

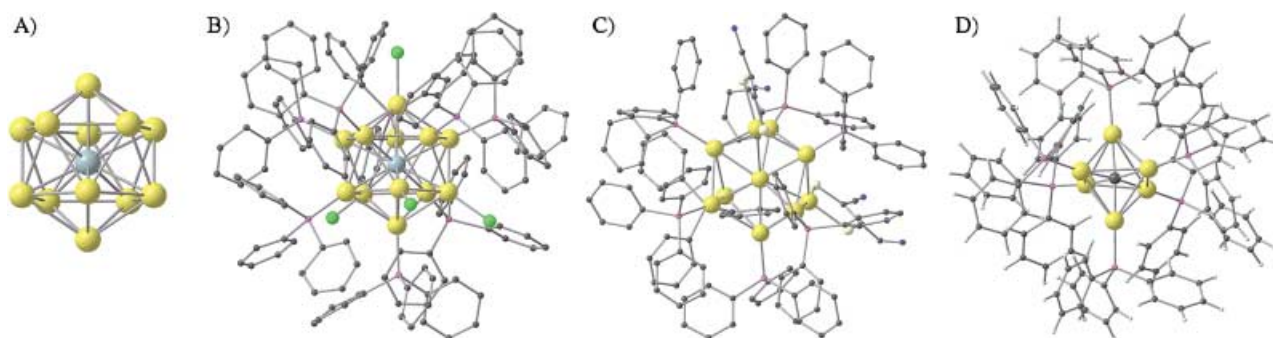


Abbildung 2. Strukturen von $W@Au_{12}$ (A) (kleinster Au-Au-Abstand $r_{\text{ber.}} = 2.817 \text{ \AA}^{[5]}$),^[4] $[\{Pd@Au_{12}\}(Ph_3P)_8Cl_4]$ (B) ($r = 2.814 \text{ \AA}$),^[9] $[Au_{10}(PPh_3)_7\{S_2C_2(CN)_2\}_2]$ (C) ($r = 2.565 \text{ \AA}$)^[6] und $[\{C@Au_6\}(Ph_3P)_6]^{2+}$ (D) ($r = 2.887 \text{ \AA}$).^[8]

mit I_h -Symmetrie zur Klasse der „magischen“ Cluster gehören. Gemäß allen gängigen Simulationsmethoden, die auf Zweikörperpotentialen beruhen (Lennard-Jones-, Morse- und erweiterte Ansätze), sind diese Clustergröße und Struktur bevorzugt.^[12] Es überrascht daher nicht, dass I_h -symmetrisches Au_{13} gut charakterisiert ist. Moleküldynamiksimulationen von Landman et al. zeigen zudem, dass in der Vorschmelze größere Goldcluster in Au_{13} -Einheiten aufbrechen.^[13] Außergewöhnlich ist allerdings, dass Au_6 entgegen der Erwartung keine oktaedrische (oder zumindest leicht verzerrte oktaedrische) Struktur in der Gasphase aufweist,^[14] was darauf hindeutet, dass Goldcluster von den typischen Lennard-Jones-, Morse- oder Gupta-Systemen abweichen, die in ihren Strukturen eine maximale Zahl an kleinen Atom-Atom-Abständen anstreben. Nach jüngsten Studien von Häkkinen und Landman sowie Bravo-Pérez et al.^[14] bevorzugt Au_6 eine trigonal-planare D_{3h} -Struktur (Abbildung 3),

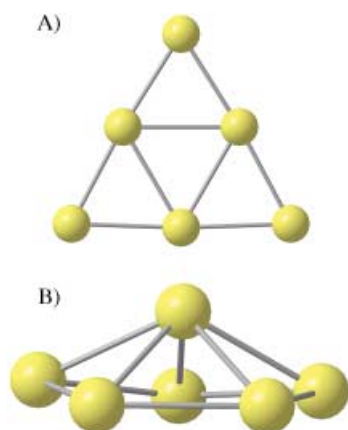


Abbildung 3. Niedereenergetische Strukturen von Au_6 : A) trigonal-planar (globales Minimum), B) verzerrte pentagonale Pyramide.

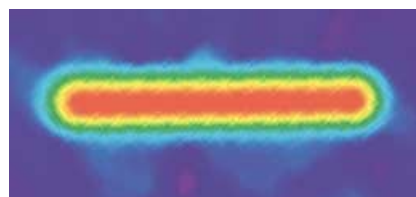


Abbildung 4. Topographische STM-Aufnahme einer Au_{20} -Kette auf einer $NiAl(110)$ -Oberfläche.^[21]

die energetisch günstiger ist als alle anderen möglichen Anordnungen einschließlich der oktaedrischen. Die bevorzugte Planarität kleiner Goldcluster ist auf relativistische Effekte zurückzuführen.^[15] Darüber hinaus wird angenommen, dass die „magischen“ Cluster Au_{38} , Au_{55} und Au_{75} in der Gasphase fehlgeordnet sind.^[16] Die genaue Beschreibung solch großer Systeme mit quantentheoretischen Methoden wie Ab-initio- oder Dichtefunktionalrechnungen oder mit semiempirischen oder Vielkörperentwicklungen von Wechselwirkungspotentialen^[17] ist eine große Herausforderung für zukünftige Computersimulationen.

Es ist zu erwarten, dass die Strukturen von Goldclustern auf Oberflächen sich deutlich von denen in der Gasphase unterscheiden.^[18] So weisen EXAFS-Experimente (EXAFS = Feinstruktur von Röntgenabsorptionskanten) mit Goldnanoclustern auf MgO -Oberflächen auf das Vorliegen von Au_6 -Oktaedern hin.^[19] Goldnanocluster wurden in vielfältigen Größen und Formen hergestellt, angefangen von diskreten Einheiten („nulldimensionalen“ Quantenpunkten) von 1 bis 170 nm Größe, die sich zu zweidimensionalen Flächen umordnen können,^[20] über eindimensionale Ketten aus bis zu 20 Goldatomen (Abbildung 4),^[21] Nanodrähte mit Au_{55} -

Clustern und Nanoröhren bis 250 nm Länge^[22] bis hin zu koordinierten Nanostrukturen^[23] oder den kürzlich von Kondo und Takayanagi synthetisierten helicalen mehrwandigen Goldnanoröhren (Abbildung 5).^[24] Solche Cluster

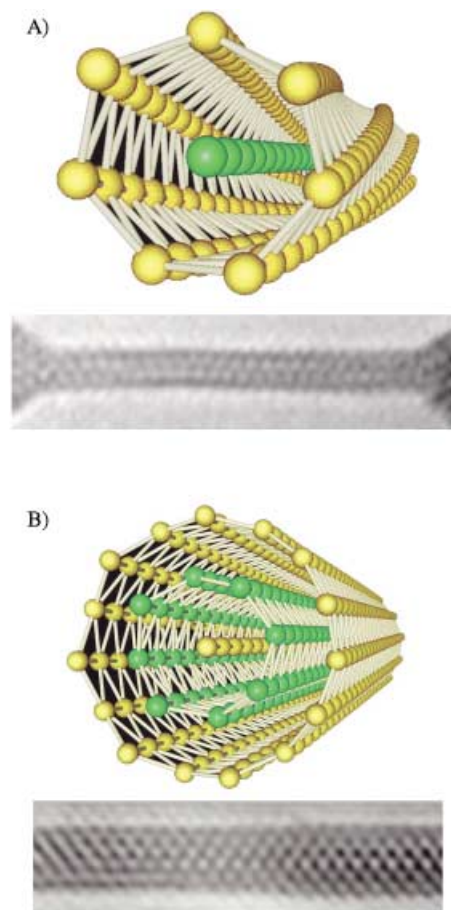


Abbildung 5. TEM-Aufnahmen (schwarz-weiß; Durchmesser ca. 1 nm) und simulierte Modelle^[24] von helicalen mehrwandigen Goldnanodrähten; dunkle Punkte sind die Atompositionen auf der Bildfläche. A) 7-1-Struktur, B) 15-8-1-Struktur. $n-m-l$ gibt die Zahl der Atome der polygonalen Röhre von der äußeren (n) hin zur inneren Schale (l) an.

werden derzeit auf eine Vielzahl von z.B. katalytischen Anwendungen hin untersucht.^[25]

Goldcluster haben daneben interessante elektronische Eigenschaften. Wallis et al. untersuchten z.B. Au-Ketten mit bis zu 20 Goldatomen durch Rastertunnelspektroskopie (STS).^[26] Die differentielle Leitfähigkeit (dI/dV) der Ketten im Energiebereich von 1.0 bis 2.5 eV lässt auf eine eindimensionale Oszillation der Elektronendichte schließen – ähnlich dem Modell des Elektrons im eindimensionalen Kasten –, bei einer effektiven Masse von 0.4 ± 0.1 der Masse eines freien Elektrons.^[26] Ein weiteres Beispiele sind Au_{55} -Cluster mit ungerader Zahl von Valenzelektronen, die nach Abscheidung auf Silicioxidoberflächen aufgrund der elektronischen Sättigung der zweiten Cluster-schale eine ungewöhnlich hohe Oxidationsresistenz erhalten.^[27]

Sicher werden wir in naher Zukunft weitere interessante Entwicklungen bei Gold-Nanomaterialien und ihren technischen Anwendungen erleben. Die Feinabstimmung von elektronischen Eigenschaften durch systematisches Variieren der Form, Größe und Dotierung von Metallclustern (z.B. Gold auf Trägeroberflächen) sowie der Träger selbst kann die gezielte Synthese von spezifischen und hoch effizienten Katalysatoren ermöglichen. Theoretische Studien zu Struktur-, Elektronen- und Dotierungseffekten von trägergestützten Goldnanoclustern, die zum grundsätzlichen Verständnis von Quanteneffekten beitragen dürften, wurden bereits begonnen,^[28] und die Anwendung solcher Cluster wie der kürzlich von Wang et al. synthetisierten^[4] wird zu interessanten neuen Techniken führen.

- [1] a) M. Haruta, T. Kobayashi, H. Samo, N. Yamada, *Chem. Lett.* **1987**, 405–408; b) M. Haruta, N. Yamada, T. Kobayashi, S. Ijima, *J. Catal.* **1989**, 115, 301–309; c) M. Haruta, *Catal. Today* **1997**, 36, 115–123; d) M. Haruta, *Catal. Today* **1997**, 36, 153–166; e) G. C. Bond, *Catal. Today* **2002**, 72, 5–9.
- [2] a) W. T. Wallace, R. L. Whetten, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, 124, 7499–7505; b) A. Ueda, M. Haruta, *Gold Bull.* **1999**, 32, 3–11; c) G. Mul, A. Zwiijnenburg, B. van der Linden, M. Makee, J. A. Moulijn, *J. Catal.* **2001**, 201, 128–137; d) Y. Kim, R. C. Johnson, J. T. Hupp, *Nano*

- Lett.* **2001**, 1, 165–167; e) N. Lu, J. Zheng, M. Gleiche, H. Fuchs, L. Chi, O. Vidoni, T. Reuter, G. Schmid, *Nano Lett.* **2002**, 3, 1097–1099; f) J. L. Gardea-Torresdey, J. G. Parsons, E. Gomez, J. Peralta-Videa, H. E. Troiani, P. Santiago, M. J. Yacaman, *Nano Lett.* **2002**, 2, 397–401; g) N. Funasaki, A. Henmi, S. Ito, Y. Asano, S. Yamashita, T. Kobayashi, M. Haruta, *Sens. Actuators* **1993**, 13–14, 536–538; h) Z. Ma, S.-F. Sui, *Angew. Chem.* **2002**, 114, 2280–2283; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2002**, 41, 2176–2179; i) J. F. Hainfeld, F. R. Furuya, *J. Histochem. Cytochem.* **1992**, 40, 177–184; j) T. M. Herne, M. J. Tarlov, *J. Am. Chem. Soc.* **1997**, 119, 8916–8920; k) D. Zanchet, C. M. Micheel, W. J. Parak, D. Gerion, A. P. Alivisatos, *Nano Lett.* **2000**, 1, 32–35; l) Y. W. Cao, R. Jin, C. A. Mirkin, *Science* **2002**, 297, 1536–1540; m) A. G. Kanaras, Z. Wang, A. D. Bates, R. Cosstick, M. Brust, *Angew. Chem.* **2003**, 115, 201–204; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2003**, 42, 191–194; n) S. M. Schiller, R. Naumann, K. Lovejoy, H. Kunz, W. Knoll, *Angew. Chem.* **2003**, 115, 219–222; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2003**, 42, 208–211; o) C. Mohr, H. Hofmeister, J. Radnik, P. Claus, *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, 125, 1905–1911; p) T. S. Kim, J. D. Stiehl, C. T. Reeves, R. J. Meyer, C. B. Mullins, *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, 125, 2018–2019; q) C. V. Corti, R. J. Holliday, D. T. Thompson, *Gold Bull.* **2002**, 35, 111–117; r) F. Patolsky, Y. Weizmann, O. Lioubashevski, I. Willner, *Angew. Chem.* **2002**, 114, 2429–2433; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2002**, 41, 2323–2327; s) J. Guzman, B. C. Gates, *Angew. Chem.* **2003**, 115, 714–717; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2003**, 42, 690–693; t) N. I. Kovtyukhova, T. E. Mallouk, *Chem. Eur. J.* **2002**, 8, 4355–4363; u) J. Aizpurua, P. Hanarp, D. S. Sutherland, M. Käll, G. W. Bryant, F. J. Garcia de Abajo, *Phys. Rev. Lett.* **2003**, 90, 057401.
- [3] Q. Wang, T. Lin, L. Tang, J. E. Johnson, M. G. Finn, *Angew. Chem.* **2002**, 114, 477–480; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2002**, 41, 459–462.
- [4] X. Li, K. Boggavarapu, J. Li, H.-J. Zhai, L.-S. Wang, *Angew. Chem.* **2002**, 114, 4980–4983; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2002**, 41, 4786–4789.
- [5] P. Pykkö, N. Runeberg, *Angew. Chem.* **2002**, 114, 2278–2280; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2002**, 41, 2174–2176.
- [6] G. M. T. Cheetham, M. M. Harding, J. L. Haggitt, D. M. P. Mingos, H. R. Powell, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* **1993**, 1000–1001.
- [7] a) C. E. Briant, B. R. C. Theobald, J. W. White, L. K. Bell, D. M. P. Mingos, A. J. Welch, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* **1981**, 201–202; b) B. K. Teo, X. Shi, H.

- Zhang, *J. Am. Chem. Soc.* **1992**, 114, 2743–2745; c) G. Schmid, *Inorg. Synth.* **1990**, 27, 214–218; d) K. Fauth, U. Kreibitz, G. Schmid, *Z. Phys. D* **1991**, 20, 297–300; e) E. Gutiérrez, R. D. Powell, F. R. Furuya, J. F. Hainfeld, T. G. Schaaff, M. N. Shafigullin, P. W. Stephens, R. L. Whetten, *Eur. Phys. J. D* **1999**, 9, 647–651.
- [8] a) F. Scherbaum, B. Huber, G. Müller, H. Schmidbaur, *Angew. Chem.* **1988**, 100, 1600–1602; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1988**, 27, 1542–1544; b) F. Gabbai, A. Schier, J. Riede, H. Schmidbaur, *Chem. Ber.* **1997**, 130, 111–115.
- [9] a) M. Laupp, J. Strähle, *Angew. Chem.* **1994**, 106, 210–211; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1994**, 33, 207–209; b) M. Laupp, J. Strähle, *Z. Naturforsch. B* **1995**, 50, 1369–1372.
- [10] P. Pykkö, *Angew. Chem.* **2002**, 114, 3723–3728; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2002**, 41, 3573–3578.
- [11] P. P. Edwards, S. R. Johnston, M. O. Jones, A. Porch, R. L. Johnston, *Stud. Surf. Sci. Catal.* **2001**, 132, 719–724.
- [12] D. J. Wales, J. P. K. Doye, *J. Phys. Chem. A* **1997**, 101, 5111–5116.
- [13] C. L. Cleveland, W. D. Luedtke, U. Landman, *Phys. Rev. Lett.* **1998**, 81, 2036–2039.
- [14] H. Häkkinen, U. Landman, *Phys. Rev. B* **2000**, 62, R2287–R2290; G. Bravo-Pérez, I. L. Garzón, O. Novaro, *THEOCHEM* **1999**, 493, 225–231.
- [15] H. Häkkinen, M. Moseler, U. Landman, *Phys. Rev. Lett.* **2002**, 89, 033401.
- [16] a) J. P. K. Doye, D. J. Wales, *New J. Chem.* **1998**, 733–744; b) K. Michaelian, N. Rendón, I. L. Garzón, *Phys. Rev. B* **1999**, 60, 2000–2010.
- [17] a) N. T. Wilson, R. L. Johnston, *J. Mater. Chem.* **2002**, 12, 2913–2922; b) N. T. Wilson, R. L. Johnston, *Eur. Phys. J. D* **2000**, 12, 161–169.
- [18] G. Pacchioni, *Surf. Sci.* **2002**, 520, 3–5.
- [19] J. Guzman, B. C. Gates, *Nano Lett.* **2001**, 12, 689–692.
- [20] a) B. Kim, S. L. Tripp, A. Wei, *J. Am. Chem. Soc.* **2001**, 123, 7955–7956; b) I. Sloufová, B. Vlcková, *Nano Lett.* **2002**, 2, 121–125; c) C. Stowell, B. A. Korgel, *Nano Lett.* **2001**, 1, 595–600; d) G. Schmid, M. Bäuml, N. Beyer, *Angew. Chem.* **2000**, 112, 187–189; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2000**, 39, 181–183.
- [21] N. Nilius, T. M. Wallis, W. Ho, *Science* **2002**, 297, 1853–1856.
- [22] a) D. Wyrwa, N. Beyer, G. Schmid, *Nano Lett.* **2002**, 2, 419–421; b) P. L. Gai, M. A. Harmer, *Nano Lett.* **2002**, 2, 771–774; c) S. O. Obare, N. R. Jana, C. J. Murphy, *Nano Lett.* **2001**, 1, 601–603; d) F. Kim, J. H. Song, P. Yang, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, 124, 14316–14317.

- [23] S. Liu, R. Maoz, G. Schmid, J. Sagiv, *Nano Lett.* **2002**, 2, 1055–1060.
- [24] Y. Kondo, K. Takayanagi, *Science* **2000**, 289, 606–608.
- [25] a) M. Valden, X. Lai, D. W. Goodman, *Science* **1998**, 281, 1647–1650; b) J. Luo, V. W. Jones, M. M. Maye, L. Han, N. N. Kariuki, C.-J. Zhong, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, 124, 13988–13989; c) G. Schmid, *Chem. Rev.* **1992**, 92, 1709–1727; d) M. Valden, S. Pak, X. Lai, D. W. Goodman, *Catal. Lett.* **1998**, 56, 7–10.
- [26] T. M. Wallis, N. Nilus, W. Ho, *Phys. Rev. Lett.* **2002**, 89, 236802.
- [27] H.-G. Boyen, G. Kästle, F. Weigl, B. Koslowski, C. Dietrich, P. Ziemann, J. P. Spatz, S. Riethmüller, C. Hartmann, M. Möller, G. Schmid, M. G. Garnier, P. Oelhafen, *Science* **2002**, 297, 1533–1536.
- [28] a) H. Häkkinen, S. Abbet, A. Sanchez, U. Heiz, U. Landman, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2003**, 42, 1297–1300; H. Häkkinen, U. Landman, *J. Am. Chem. Soc.* **2001**, 123, 9704–9705; b) J. Wang, G. Wang, J. Zhao, *Phys. Rev. B* **2002**, 66, 035418; c) N. Lopez, J. K. Nørskov, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, 124, 11262–11263; d) G. Mills, M. S. Gordon, H. Metiv, *J. Chem. Phys.* **2003**, 118, 4198–4205; e) J. Li, X. Li, H.-J. Zhai, L.-S. Wang, *Science* **2003**, 299, 864–867; f) D. H. Wells, W. N. Delgass, K. T. Thomson, *J. Chem. Phys.* **2002**, 117, 10597–10603; g) D. Krüger, H. Fuchs, R. Rousseau, D. Marx, M. Parinello, *J. Chem. Phys.* **2001**, 115, 4776–4786; h) D. Krüger, H. Fuchs, R. Rousseau, D. Marx, M. Parinello, *Phys. Rev. Lett.* **2002**, 89, 186402.



Eisenbrand, G. / Metzler, M. / Hennecke, F.J.

Toxikologie für Naturwissenschaftler und Mediziner

Stoffe, Mechanismen, Prüfverfahren

Mit einer Einführung in das Chemikalien- und Gefahrstoffrecht von F. Hennecke

2. aktualisierte Auflage

2002. 342 S. Broschur.

€ 32,90/sFr 56,-. ISBN 3-527-30675-7

Auf leicht verständliche Weise werden gesundheitsschädliche Stoffe und ihre Wirkungsweise auf den Organismus dargestellt. Der Schwerpunkt liegt

dabei auf Stoffen, mit denen Chemiker und andere Naturwissenschaftler häufig in Ausbildung und Beruf umzugehen haben. Dieses einführende Lehrbuch ist zur vorlesungsbegleitenden Lektüre wie zum Selbststudium geeignet. Mit umfangreichem Glossar und Stichwortverzeichnis.

Stimmen zur ersten Auflage:

„... eignet sich für den Erwerb der Fachkenntnisse, die von der Gefahrstoffverordnung für den Umgang mit gefährlichen Stoffen gefordert werden.“ *Schweizerische Laboratoriumszeitung*

„... erreicht in überzeugender Weise sein Ziel, in die Toxikologie als einer interdisziplinären Wissenschaft

einzuführen und dem Naturwissenschaftler in kompetenter Weise die Risiken im Umgang mit Schadstoffen darzustellen.“ *Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung*

Wiley-VCH · Postfach 10 11 61 · D-69451 Weinheim · Tel: +49 (0) 62 01-60 61 52
Fax: +49 (0) 62 01-60 61 84 · e-mail: service@wiley-vch.de · Internet: www.wiley-vch.de



WILEY-VCH