

Einzmoleküluntersuchungen

Eine molekulare Grundlage für die molekulare Elektronik

Ronald A. Wassel und Christopher B. Gorman*

Stichwörter:

Einzmoleküluntersuchungen · Elektronentransport ·
Molekulare Elektronik · Molekulare Funktions-
einheiten · Struktur-Eigenschafts-Beziehungen

Die Ausführung von logischen Operationen und Speicheroperationen mit einem einzelnen Molekül oder mit einem sehr kleinen Ensemble von Molekülen ist das Endziel der Miniaturisierung von elektronischen Bauelementen. Daher ist man vielerorts auf die molekulare Elektronik aufmerksam geworden, sei es aus wissenschaftlicher Neugierde oder um geistiges Eigentum als Unternehmensgrundlage zu schaffen. Die Nanoforschung wird zweifelsohne neue Technologien und auch finanziellen Ertrag bringen (wenn auch vielleicht nicht so rasch wie der Investor hofft), zuvor aber gilt es, einige Schlüsselfragen zu beantworten. Dem Chemiker als „Molekül-Ingenieur“ fällt hierbei die entscheidende Aufgabe zu: Er soll die fundamentalen Prinzipien für die Nanotechnologie herausarbeiten. Dazu müssen einige zentrale Fragen beantwortet und die bestehenden Forschungsansätze geprüft werden. Zum Beispiel muss herausgefunden werden, wie durch Lithographietechniken (Top-down-Ansätze) und Selbstorganisationstechniken (Bottom-up-Ansätze) eine hinreichend dichte Integration von Komponenten erzielt werden kann, sodass die Größen- skala von Einzmolekül-Bauelementen ausgereizt werden kann. Wie werden sich Nanoröhren in dieser Hinsicht bewähren?^[1] Bis heute gibt es keine realistischen Ansätze zur Lösung dieser Probleme. Andere wichtige Fragen könnten

einfacher zu beantworten sein, so etwa die Frage nach den grundlegenden Prinzipien der Molekularwissenschaften auf der Ebene nanoskaliger Ensembles: Wie kann ein Kontakt zu einem Molekül hergestellt werden? Welche elektronische Struktur hat ein „verdrahtetes“ Molekül? Können molekulare Struktur-Eigenschafts-Beziehungen abgeleitet werden, die die Struktur eines Moleküls mit nichtlinearer Strom-Spannungs-Charakteristik, Schaltbarkeit und Gating-Verhalten in Beziehung bringen? In jüngster Zeit wurden mehrere plausible Ansätze entwickelt, um diese Fragen zu beantworten.

Die wichtigste Voraussetzung für die Ausführung elektronischer Messungen im Nanobereich ist die Herstellung eines elektrischen Kontakts zu den Bauelementen. Hierbei wird das zu untersuchende Molekül unweigerlich gestört. Ein erster Ansatz zur Herstellung von Kontakten zu kleinen Molekül- ensembles bestand in der Verwendung mechanischer Bruchkontakte.^[2] Einen Bruchkontakt erhält man, indem man einen Metalldraht auf einem flexiblen Substrat anbringt und das Substrat dann biegt, bis der Draht bricht. Die so erzeugte Lücke wird mit geeigneten Molekülen überbrückt. Mit dieser Anordnung ermittelte Widerstände sind in Einklang mit dem Widerstand eines einzelnen Moleküls.^[3]

Ein weiterer Typ von Oberseitenkontakt wird durch Aufdampfen eines Metalls auf ein Molekülensemble (z. B. eine selbstorganisierte Monoschicht (SAM) oder einen Langmuir-Blodgett-Film) hergestellt. Bei diesem Experiment wird eine Nanopore verwendet, die kleiner ist als die Domänengröße der

SAM.^[4] Das verdampfte Metall kondensiert nun ausschließlich auf der Oberfläche der SAM. Mit einem solchen Versuchsaufbau wiesen Reed, Tour et al. bei Strom-Spannungs-Messungen an Molekülen mit einem Nitroamin- Redoxzentrum einen negativen differentiellen Widerstand nach.

Da diese Metall-Molekül-Metall-Anordnungen individuell hergestellt werden, lassen sie sich nur schwer vergleichen. Weiter ist zu bedenken, dass Metalle stark reduzierend wirken und reduzierte Moleküle oft chemisch reaktiv sind. Demnach könnte sich das Molekül, das in den Metall-Molekül-Metall-Sandwich eingebracht wurde, von der letztlich untersuchten Spezies unterscheiden. Erschwerend kommt hinzu, dass die Sandwichgeometrie eine spektroskopische Charakterisierung der Moleküle unmöglich macht.

Um dieses Problem zu beheben, haben verschiedene Forschungsgruppen Methoden entwickelt, bei denen die leitende Spitze eines Rastertunnelmikroskops (STM) oder eines Rasterkraftmikroskops (AFM) als zweiter Kontakt an einem Molekül dient, das sich gewöhnlich in einer selbstorganisierten Monoschicht befindet.^[5-21] Hipps und Mitarbeiter berichteten über orbitalvermitteltes Tunneln bei Phthalocyanin- und Porphyrin-Metallkomplexen.^[5-8] Tour, Bard und Mitarbeiter erhielten bei Experimenten mit einem „Stimm- gabel“-STM (Tuning-Fork-STM) für Phenylmethinylen-Oligomere (OPEs) scharfe Signale in den *I-V*-Kurven.^[9,10] Wir untersuchten den negativen differentiellen Widerstand in strukturierten elektroaktiven SAMs mit dem STM.^[16] Weiss und Mitarbeiter bauten einzelne

[*] R. A. Wassel, Prof. C. B. Gorman
Department of Chemistry
North Carolina State University
Raleigh, NC 27695-8204 (USA)
Fax: (+1) 919-515-8920
E-mail: chris_gorman@ncsu.edu

OPEs in eine isolierende *n*-Alkanthiolat-SAM ein und fanden, dass diese Moleküle eine höhere Leitfähigkeit hatten als die nichtmodifizierte SAM.^[11–14] Durch Beobachtung von Einzelmolekülen fanden die Autoren heraus, dass deren Leitfähigkeit zeitlich variiert. Diese Änderungen der Leitfähigkeit (stochastische Schaltvorgänge) wurden Konformationsänderungen im Molekül zugeschrieben (und nicht elektrostatischen Effekten des Ladungstransfers). Ähnliche stochastische Schaltvorgänge beobachteten Lindsay und Mitarbeiter bei Carotenoid-Molekülen mit einem Gold-Nanoteilchen als Endgruppe^[20,21] sowie unsere Arbeitsgruppe bei Ferrocenyl-terminierten Alkanthiolen in einer *n*-Alkanthiolat-SAM.^[17]

Diese rastersondenmikroskopischen Ansätze geben zwar Aufschluss über einige zentrale Aspekte von molekularen Kontakten, lassen aber eine wichtige Frage offen: Wie beeinflussen die metallischen Kontakte die elektronische Struktur eines Moleküls, das sie verbindet? In einer neueren Arbeit konnten Nazin et al. zeigen, wie sich die elektronische Struktur eines Moleküls im Kontakt mit Metallbrücken zunehmender Länge verändert.^[22] Mithilfe eines Tieftemperatur-Ultrahochvakuum-STM erzeugten die Autoren Nanostrukturen aus einem Kupferphthalocyanin(CuPc)-Molekül, das an unterschiedlich lange Ketten aus Goldatomen gebunden war. Hierzu wurden die Au-Atome und CuPc-Moleküle thermisch verdampft und auf einer NiAl(110)-Oberfläche abgeschieden (Abbildung 1).

Bei hinreichend kleinem Abstand der STM-Spitze von der Oberfläche konnten die Au-Atome entlang der Bewegungsrichtung der Spitzte mitgezogen werden. Auf diese Weise wurden Ketten aus Goldatomen in einer Rinne von Ni-Atomen zusammengefügt. Die Autoren erzeugten zwei Ketten in einem Abstand von 5 Ni-Ni-Gitterkonstanten und brachten ein CuPc-Molekül in den Zwischenraum. Nach Herstellung des Kontakts zwischen dem CuPc-Molekül und zwei Au-Atomen wurde in den dI/dV -Kurven eine Verschiebung und Aufspaltung der Signale für die CuPc-Moleküle beobachtet. Eine Verlängerung der Ketten führte zu keiner weiteren Signalverschiebung. Die Au-Atome in direktem Kontakt mit dem

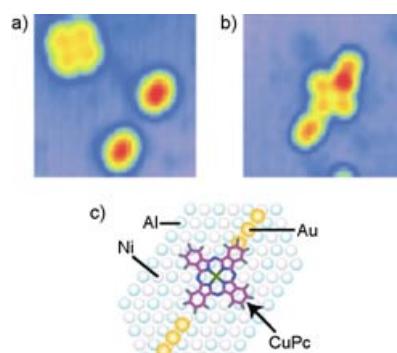


Abbildung 1. CuPc@2Au₃-Hybridstrukturen:
a) Die beiden Au₃-Kontakte vor dem Einführen der Moleküle ($V_{bias} = 1$ V, $I = 1$ nA; 47×47 Å);
b) Hybridstrukturen ($V_{bias} = 0.5$ V, $I = 1$ nA; diese Aufnahmebedingungen verdeutlichen die Adsorptionskonfiguration); c) Die Au-CuPc-Au-Anordnung (Metall-Molekül-Metall) auf einer NiAl(110)-Oberfläche. Übernommen aus Lit. [22].

Molekül können somit als Teil eines verlängerten CuPc-Moleküls angesehen werden. Signalmaxima in den dI/dV -Kurven, die über dem letzten Au-Atom in der Kette aufgenommen wurden, waren gegenüber Maxima von Au-Ketten, die nicht mit einem CuPc-Molekül verknüpft waren, zu höheren Energien verschoben. Die Zustände des Au-Atoms in direktem Kontakt mit dem Molekül waren nicht in Resonanz mit den Zuständen der übrigen Au-Atome der Kette. Diese Befunde zeigen deutlich, dass die elektronische Kopplung zwischen dem CuPc-Molekül und den verschiedenen Au-Ketten stark variiert. Daraus ergeben sich wichtige Konsequenzen für die Messung der Leitfähigkeit mit solchen Kontakten. Aus der Sicht des Chemikers sind Metall-Molekül-Metall-Kontakte deshalb als kontinuierliche molekulare Systeme zu betrachten, und die Eigenschaften eines Kontakts sind somit von entscheidender Bedeutung für das rationale Design molekularer Bauelemente.

Die Effekte der Herstellung eines Kontakts auf die Moleküleigenschaften wurden auch durch Kubatkin et al. untersucht. Bei diesen Experimenten wurde der Elektronentransport durch ein einzelnes *para*-Phenylenvinyl-Oligomer bei 4 K gemessen; das Molekül wurde in eine kleine Strukturlücke (2 nm) auf einem halbleitenden, als Gate-Elektrode fungierenden Substrat

eingebracht.^[23] Die Gate-Spannung (V_g) des Einzelelektronentransistors (SET) mit einem einzelnen Molekül in der Nanostrukturlücke wurde in kleinen Schritten von -4.3 V nach $+4.3$ V geändert, und bei jeder Spannung wurde der Source-Drain-Strom gemessen. In Einklang mit der großen Zahl möglicher diskreter Zustände für das untersuchte Molekül wurden acht unterschiedliche offene Transistorzustände ermittelt. Allerdings wichen die aus den SET-Daten abgeleiteten Energien der elektronischen Zustände stark von den Werten aus Untersuchungen in Lösung ab. Es wurde vermutet, dass Spiegelladungen in den Source- und Drain-Elektroden diese Störungen verursachen. Auch in diesem Fall besteht also zwischen dem Molekül und dem Metall nicht nur eine einfache Verknüpfung, sondern ein komplizierter Kontakt. Bei der Untersuchung des elektronischen Verhaltens sind daher viele andere Faktoren zu berücksichtigen.

Ein weiterer entscheidender Aspekt in der molekularen Elektronik ist die Beziehung zwischen dem elektronischen Verhalten und der Struktur eines Moleküls. Durch systematische Änderung der Molekülstruktur gewünschte Eigenschaften zu erzielen, ist lange schon eine zentrale Aufgabe der Chemie. Auch für das junge Gebiet der molekularen Elektronik sind solche Struktur-Eigenschafts-Beziehungen von überragender Bedeutung. Experimente sollen Aufschluss darüber geben, ob ein Effekt auf eine Änderung in der Struktur des Moleküls zurückzuführen ist.

Einige systematische Studien zur Leitfähigkeit von unterschiedlich langen Molekülen wurden beschrieben. Meist wurden einfache *n*-Alkanthiolat-SAMs^[11,19] oder SAMs aus konjugierten oder aromatischen Molekülen eingesetzt.^[2,10,12,14,18,21,24–34] Aus den Untersuchungen geht hervor, dass die Leitfähigkeit, gemessen als relative Geschwindigkeit des diskreten Elektronentransfers durch ähnlich aufgebaute molekulare Brücken, mit der Moleküllänge variiert. Ein Beispiel für eine Vergleichsgröße ist der Elektronentransferkoeffizient β für eine bestimmte molekulare Architektur, für den gilt: $-\ln k_{ET} = \beta r$. (r ist der Abstand zwischen einer Donor- und einer Acceptorgruppe.)

Das Phänomen der Kondo-Resonanz wurde in zwei wichtigen Untersuchungen genutzt, in denen besondere Strukturmerkmale eines Moleküls als Ursache für sein elektronisches Verhalten identifiziert wurden. Beim Kondo-Effekt beeinflusst der Spinzustand einer Fremdkomponente (in diesem Fall eines Moleküls) in einem Draht dessen Leitfähigkeit. Liang et al. wiesen in einem Einzelmolekültransistor das Auftreten einer Kondo-Resonanz nach. Hierzu verwendeten sie einen molekularen Divanadium-Komplex („V₂“), dessen Spin- und Ladungszustand durch die Gate-Spannung eingestellt werden konnte.^[35] Im dI/dV-Diagramm wurde ein scharfes Signal beobachtet, wenn die Gate-Spannung auf einen Spinzustand des „V₂“-Moleküls mit $S=1/2$ abgestimmt war. Das Signal verschwand, wenn das Molekül in den Spinzustand $S=0$ versetzt wurde. Ein weiteres Merkmal der Kondo-Resonanz ist eine Aufspaltung des Signals im dI/dV-Diagramm durch ein angelegtes Magnetfeld bei einem Spinzustand von $S=1/2$.

Park et al. beobachteten eine Kondo-Resonanz bei einer Veränderung der Kopplung zwischen einem Co²⁺³⁺-Ion und den Elektroden.^[36] Das Co²⁺³⁺-Ion ist mit zwei Terpyridyl-Einheiten oktaedrisch koordiniert, die durch Linker mit Thiol-Endgruppen mit den Gold-elektroden eines Bruchkontakte verbunden sind. Für den Co²⁺-Komplex wurde in den dI/dV-Kurven ein Signal beobachtet, das überdies bei angelegtem Magnetfeld aufgespalten wurde. Somit können Moleküle, deren Spinzustände durch die Gate-Spannung einstellbar sind, zum Aufbau von Systemen genutzt werden, in denen eine Moleküleigenschaft in direkter Beziehung mit einer elektronischen Eigenschaft steht.

In aktuellen Arbeiten beschreiben Mayor et al., wie der Elektronentransport durch ein Molekül durch dessen Struktur beeinflusst wird.^[37–40] Mechanische Bruchkontakte aus zwei 9,10-Bis(phenylethinal)anthracen-Derivaten wurden verglichen; die Thiol-Ankergruppen befanden sich entweder in *para*- oder *meta*-Stellung (Abbildung 2). Wegen der schwächeren Elektronenkonjugation in der Anordnung mit *meta*-Substitution ist die elektronische Kommunikation zwischen den Metallelektroden und dem Molekül deutlich

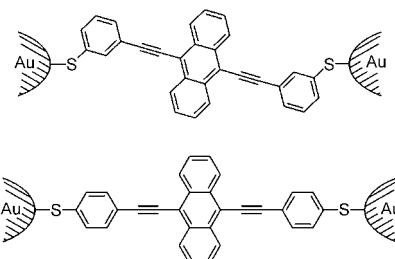


Abbildung 2. 9,10-Bis(phenylethinal)anthracen-Derivate mit Thiol-Linkern in *meta*- (oben) und *para*-Position (unten) als Komponenten in Bruchkontakte.

geringer als bei *para*-Substitution. Mit dem *meta*-substituierten Molekül wurden um bis zu zwei Größenordnungen niedrigere Ströme gemessen; darüber hinaus traten in den I/V-Kurven bei 30 K Stufen auf, die einem resonanten Tunneln durch das HOMO des Moleküls zugeschrieben wurden.

Bevor praxistaugliche molekulare Bauelemente gefertigt werden können, müssen noch viele Fragen beantwortet werden. Die hier vorgestellten Studien bilden Ansatzpunkte zur Lösung zweier zentraler Aufgaben, nämlich 1) die Struktur eines Moleküls mit seinen elektronischen Eigenschaften in Beziehung zu setzen und 2) zu bestimmen, wie die Bindung an Metallelektroden die elektronischen Eigenschaften von Molekülen beeinflusst. Die Ergebnisse sind ein wichtiger Schritt in der Entwicklung der molekularen Elektronik.

Online veröffentlicht am 16. September 2004

- [1] P. Avouris, J. Appenzeller, R. Martel, S. J. Wind, *Proc. IEEE* **2003**, *91*, 1772.
- [2] M. A. Reed, C. Zhou, C. J. Muller, T. P. Burgin, J. M. Tour, *Science* **1997**, *278*, 252.
- [3] M. Mayor, H. B. Weber, *Chimia* **2002**, *56*, 494.
- [4] J. Chen, M. A. Reed, A. M. Rawlett, J. M. Tour, *Science* **1999**, *286*, 1550.
- [5] W. L. Deng, K. W. Hipps, *J. Phys. Chem. B* **2003**, *107*, 10736.
- [6] K. W. Hipps, D. E. Barlow, U. Mazur, *J. Phys. Chem. B* **2000**, *104*, 2444.
- [7] X. Lu, K. W. Hipps, X. D. Wang, U. Mazur, *J. Am. Chem. Soc.* **1996**, *118*, 7197.
- [8] X. Lu, K. W. Hipps, *J. Phys. Chem. B* **1997**, *101*, 5391.
- [9] F.-R. F. Fan, J. Yang, S. M. Dirk, D. W. Price, D. Kosynkin, J. M. Tour, A. J. Bard, *J. Am. Chem. Soc.* **2001**, *123*, 2454.
- [10] F.-R. F. Fan, J. P. Yang, L. T. Cai, D. W. Price, Jr., S. M. Dirk, D. V. Kosynkin, Y. X. Yao, A. M. Rawlett, J. M. Tour, A. J. Bard, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, *124*, 5550.
- [11] L. A. Bumm, J. J. Arnold, T. D. Dunbar, D. L. Allara, P. S. Weiss, *J. Phys. Chem. B* **1999**, *103*, 8122.
- [12] M. T. Cygan, T. D. Dunbar, J. J. Arnold, L. A. Bumm, N. F. Shedlock, T. P. Burgin, L. Jones, D. L. Allara, J. M. Tour, P. S. Weiss, *J. Am. Chem. Soc.* **1998**, *120*, 2721.
- [13] Z. J. Donhauser, B. A. Mantooth, K. F. Kelly, L. A. Bumm, J. D. Monnell, J. J. Stapleton, D. W. Price, A. M. Rawlett, D. L. Allara, J. M. Tour, P. S. Weiss, *Science* **2001**, *292*, 2303.
- [14] L. A. Bumm, J. J. Arnold, M. T. Cygan, T. D. Dunbar, T. P. Burgin, L. Jones, D. L. Allara, J. M. Tour, P. S. Weiss, *Science* **1996**, *271*, 1705.
- [15] C. B. Gorman, R. L. Carroll, Y. He, F. Tian, R. Fuierer, *Langmuir* **2000**, *16*, 6312.
- [16] C. B. Gorman, R. L. Carroll, R. R. Fuierer, *Langmuir* **2001**, *17*, 6923.
- [17] R. A. Wassel, R. R. Fuierer, N. Kim, C. B. Gorman, *Nano Lett.* **2003**, *3*, 1617.
- [18] G. Leatherman, E. N. Durantini, D. Gust, T. A. Moore, A. L. Moore, S. Stone, Z. Zhou, P. Rez, Y. Z. Liu, S. M. Lindsay, *J. Phys. Chem. B* **1999**, *103*, 4006.
- [19] X. D. Cui, X. Zarate, J. Tomfohr, O. F. Sankey, A. Primak, A. L. Moore, T. A. Moore, D. Gust, G. Harris, S. M. Lindsay, *Nanotechnology* **2002**, *13*, 5.
- [20] G. K. Ramachandran, T. J. Hopson, A. M. Rawlett, L. A. Nagahara, A. Primak, S. M. Lindsay, *Science* **2003**, *300*, 1413.
- [21] G. K. Ramachandran, J. K. Tomfohr, J. Li, O. F. Sankey, X. Zarate, A. Primak, Y. Terazono, T. A. Moore, A. L. Moore, D. Gust, L. A. Nagahara, S. M. Lindsay, *J. Phys. Chem. B* **2003**, *107*, 6162.
- [22] G. V. Nazin, X. H. Qiu, W. Ho, *Science* **2003**, *302*, 77.
- [23] S. Kubatkin, A. Danilov, M. Hjort, J. Cornil, J. L. Bredas, N. Stuhr-Hansen, P. Hedegard, T. Bjornholm, *Nature* **2003**, *425*, 698.
- [24] M. P. Samanta, W. Tian, S. Datta, J. I. Henderson, C. P. Kubiak, *Phys. Rev. B* **1996**, *53*, R7626.
- [25] M. Magoga, C. Joachim, *Phys. Rev. B* **1997**, *56*, 4722.
- [26] V. J. Langlais, R. R. Schlittler, H. Tang, A. Gourdon, C. Joachim, J. K. Gimzewski, *Phys. Rev. Lett.* **1999**, *83*, 2809.
- [27] C. Zhou, M. R. Deshpande, M. A. Reed, L. Jones, J. M. Tour, *Appl. Phys. Lett.* **1997**, *71*, 611.
- [28] T. Ishida, W. Mizutani, U. Akiba, K. Umemura, A. Inoue, N. Choi, M. Fuji-

- hira, H. Tokumoto, *J. Phys. Chem. B* **1999**, *103*, 1686.
- [29] T. Ishida, W. Mizutani, N. Choi, U. Akiba, M. Fujihira, H. Tokumoto, *J. Phys. Chem. B* **2000**, *104*, 11680.
- [30] S. Howell, D. Kuila, B. Kasibhatla, C. P. Kubiak, D. Janes, R. Reifenberger, *Langmuir* **2002**, *18*, 5120.
- [31] T. Ishida, W. Mizutani, Y. Aya, H. Ogiso, S. Sasaki, H. Tokumoto, *J. Phys. Chem. B* **2002**, *106*, 5886.
- [32] J. G. Kushmerick, D. B. Holt, S. K. Pollock, M. A. Ratner, J. C. Yang, T. L. Schull, J. Naciri, M. H. Moore, R. Shashidhar, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, *124*, 10654.
- [33] J. Reichert, H. B. Weber, M. Mayor, H. von Löhneysen, *Appl. Phys. Lett.* **2003**, *82*, 4137.
- [34] J. J. Stapleton, P. Harder, T. A. Daniel, M. D. Reinard, Y. X. Yao, D. W. Price, J. M. Tour, D. L. Allara, *Langmuir* **2003**, *19*, 8245.
- [35] W. J. Liang, M. P. Shores, M. Bockrath, J. R. Long, H. Park, *Nature* **2002**, *417*, 725.
- [36] J. Park, A. N. Pasupathy, J. L. Goldsmith, C. Chang, Y. Yaish, J. R. Petta, M. Rinkoski, J. P. Sethna, H. D. Abruña, P. L. McEuen, D. C. Ralph, *Nature* **2002**, *417*, 722.
- [37] M. Mayor, H. B. Weber, J. Reichert, M. Elbing, C. von Hanisch, D. Beckmann, M. Fischer, *Angew. Chem.* **2003**, *115*, 6014; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2003**, *42*, 5834.
- [38] J. Reichert, H. B. Weber, M. Mayor, H. von Löhneysen, *Appl. Phys. Lett.* **2003**, *82*, 4137.
- [39] H. B. Weber, J. Reichert, F. Weigend, R. Ochs, D. Beckmann, M. Mayor, R. Ahlrichs, H. von Löhneysen, *Chem. Phys.* **2002**, *281*, 113.
- [40] H. B. Weber, J. Reichert, R. Ochs, D. Beckmann, M. Mayor, H. von Löhneysen, *Phys. E* **2003**, *18*, 231.

E. Heilbronner / F. A. Miller

A Philatelic Ramble through Chemistry

278 pages with 1025 color reproductions.

Softcover. € 79.00/ sFr 116.00.

ISBN 3-906390-31-4

A Philatelic Ramble through Chemistry is a light-hearted, historically based survey of chemistry and some related topics in physics. It is illustrated with more than 1000 beautiful color reproductions of postage stamps and covers. Many stories and anecdotes have been included. The book provides delightful personal reading and may be useful for courses on the history of chemistry. It is a source of numerous anecdotes which instructors can use to enliven their lectures.

€ -price is available only for Germany.

Wiley-VCH, Postfach 10 11 61, 69451 Weinheim, Germany
Fax: +49 (0) 6201 606-184, e-Mail: service@wiley-vch.de,
www.wiley-vch.de



Softcover edition!

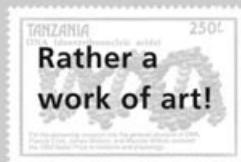
Praise for the Hardcover Edition

'This is a gem of a book. [...] I recommend it to all those to whom chemistry means more than an academic discipline, but a multi-faceted part of human culture, as Heilbronner and Miller so beautifully demonstrated.'

Interdisciplinary Science Reviews

'The creation of an exceptional book must be driven not only by knowledge but also by passion. This book by two chemists, Heilbronner and Miller, is clearly the product of a love for the world of postage stamps as well for chemistry in its widest sense.'

Advanced Materials



WILEY-VCH

14170499_v0