

für die Stabilität der siebenkernigen Mischmetallcluster sein. Dies könnte neue, allgemein anwendbare Synthesekonzepte für die Herstellung von Mischmetallclustern eröffnen.

Dank seiner einzigartigen Natur hat Gold bedeutend zur Erforschung und zum Design neuer Klassen mehrkerniger Metallkomplexe und Metallcluster beigetragen. Ein tiefer gehendes Verständnis binärer und ternärer Festkörper, z.B. die Alkaliauridaurate(i)  $[MAu_4][M_3AuO_2]$  ( $M = Rb, Cs$ ), die sich durch Disproportionierung von Au in  $Au^+$  und  $Au^-$  herstellen lassen,<sup>[17]</sup> sollte zu einer Weiterentwicklung der Chemie der homo- und heterometallischen Cluster im Nano-maßstab führen. Mit dem Synthesekonzept, entweder weiche (z.B. Sulfide oder Selenide) oder harte (z.B. Amide) Brückenliganden einzusetzen, lässt sich die Zahl der Kerne von Goldclustern auf eine routinemäßige, systematische und kontrollierbare Weise erhöhen. Durch Verwendung von Metall-Liganden kann die Vielseitigkeit der Synthesestrategien sogar noch weiter entwickelt werden. Mit diesen Möglichkeiten und dem Potential für die Bildung vielkerniger supramolekularer Aggregate hat Gold eine große Bedeutung für das Design und die zukünftige Entwicklung neuer Nanomaterialien.

[1] a) *Gold: Progress in Chemistry, Biochemistry, and Technology* (Hrsg.: H. Schmidbaur), Wiley, Chichester, 1999; b) H. Schmidbaur, *Gold Bull.* **1990**, 23, 11; c) H. Schmidbaur, *Chem. Soc. Rev.* **1995**, 391.

[2] Siehe z.B.: a) A. Deveson, S. Dehnen, D. Fenske, *J. Chem. Soc. Dalton Trans.* **1997**, 4491; b) J. F. Corrigan, D. Fenske, *Angew. Chem.* **1997**, 109, 2070; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1997**, 36, 1981; c) J. F. Corrigan, D. Fenske, W. P. Power, *Angew. Chem.* **1997**, 109, 1224; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1997**, 36, 1176; d) V. W.-W. Yam, K. K.-W. Lo, *Comments Inorg. Chem.* **1997**, 19, 209.

- [3] a) G. Marbach, J. Strähle, *Angew. Chem.* **1984**, 96, 695; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1984**, 23, 715; b) S.-P. Huang, M. G. Kanatzidis, *Angew. Chem.* **1992**, 104, 799; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1992**, 31, 787.
- [4] a) C. Kowala, J. M. Swan, *Aust. J. Chem.* **1966**, 19, 547; b) P. G. Jones, G. M. Sheldrick, E. Hädicke, *Acta Crystallogr. Sect. B* **1980**, 36, 2777; c) K. Angermaier, H. Schmidbaur, *Chem. Ber.* **1994**, 127, 2387; d) F. Canales, M. C. Gimeno, P. G. Jones, A. Laguna, *Angew. Chem.* **1994**, 106, 811; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1994**, 33, 769.
- [5] F. Canales, M. C. Gimeno, A. Laguna, P. G. Jones, *J. Am. Chem. Soc.* **1996**, 118, 4839.
- [6] a) V. W.-W. Yam, E. C.-C. Cheng, K.-K. Cheung, *Angew. Chem.* **1999**, 111, 193; *Angew. Chem. Int. Ed.* **1999**, 38, 197; b) V. W.-W. Yam, E. C.-C. Cheng, Z.-Y. Zhou, *Angew. Chem.* **2000**, 112, 1749; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2000**, 39, 1683.
- [7] D. Fenske, T. Langentepe, M. M. Kappes, O. Hampe, P. Weis, *Angew. Chem.* **2000**, 112, 1925; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2000**, 39, 1857.
- [8] a) P. A. Bates, J. M. Waters, *Acta Crystallogr. Sect. A* **1987**, 43, C194; b) P. Pyykkö, *Chem. Rev.* **1997**, 97, 597.
- [9] C. E. C. A. Hop, R. Bakhtiar, *J. Chem. Educ.* **1996**, 73, A162, zit. Lit.
- [10] a) V. Ramamoorthy, P. R. Sharp, *Inorg. Chem.* **1990**, 29, 3336; b) A. Grohmann, J. Riede, H. Schmidbaur, *J. Chem. Soc. Dalton Trans.* **1991**, 783.
- [11] a) K. Angermaier, H. Schmidbaur, *Chem. Ber.* **1995**, 128, 817; b) A. Shiotani, H. Schmidbaur, *J. Am. Chem. Soc.* **1970**, 92, 7003.
- [12] S. D. Bunge, O. Just, W. S. Rees, Jr., *Angew. Chem.* **2000**, 112, 3199; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2000**, 39, 3082.
- [13] a) P. Miele, J. D. Foulon, N. Hovnanian, J. Durand, L. Cot, *Eur. J. Solid State Inorg. Chem.* **1992**, 29, 573; b) P. B. Hitchcock, M. F. Lappert, L. J.-M. Pierssens, *Chem. Commun.* **1996**, 1189.
- [14] A. M. James, R. K. Laxman, F. R. Fronczek, A. W. Maverick, *Inorg. Chem.* **1998**, 37, 3785.
- [15] A. Vogler, H. Kunkely, *Chem. Phys. Lett.* **1988**, 150, 135.
- [16] E. Cerraga, M. Contel, A. D. Valencia, M. Laguna, T. Gelbrich, M. B. Hursthouse, *Angew. Chem.* **2000**, 112, 2443; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2000**, 39, 2353.
- [17] A.-V. Mudring, M. Jansen, *Angew. Chem.* **2000**, 112, 3194; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2000**, 39, 3066.

## Fulleren-Einzelmoleküle und der Welle-Teilchen-Dualismus

Karl Otto Greulich

### Einführung

Oft haben in der Vergangenheit Entwicklungen aus der Physik Entwicklungen in der angewandten Chemie vorangebracht. Nun ist es die angewandte Chemie, die zu einem Verständnisschub in der Physik beiträgt: Es geht um nichts Geringeres als den Welle-Teilchen-Dualismus.  $C_{60}$ - und  $C_{70}$ -Moleküle — Fullerene — tragen dazu bei, zwei der wichtigsten Fragen der Physik zu klären: Gilt der Welle-Teilchen-Dualismus auch für „große“ Objekte, und können Teilchen mit sich selbst interferieren?

$C_{70}$ -Moleküle haben ein Molekulargewicht von ca. 1000 Da, das entspricht einem Peptid aus acht bis neun Aminosäuren oder einem Oligonucleotid von drei bis vier Monomeren. Die

Linearabmessung eines solchen Fulleren liegt bei etwa vier C-Atomen (denn  $4^3 = 64$ ), d.h. drei C-C-Bindungen oder 5 Å. Objekte dieser Größenordnung kann man mit guten Rastertunnel- oder Rasterkraftmikroskopen „sehen“. Kaum jemand wird bezweifeln, dass diese molekularen Schwerpunkte „gestandene“ Teilchen sind.

Wenn es gelänge, zu zeigen, dass Fullerene dieser Größe auch Welleneigenschaften haben, wäre dies ein Durchbruch in einer der grundlegendsten Fragen der modernen Naturwissenschaften. Genau das leistet eine Serie von Experimenten, die von der Wiener Arbeitsgruppe um Anton Zeilinger publiziert wurden.<sup>[1]</sup>

### Zur Erinnerung

Wenn eine Welle auf einen Doppelspalt auftrifft, wird ein Teil davon durch Spalt A, der andere durch Spalt B gehen. Wenn der Steg zwischen den Spalten etwa eine Wellenlänge breit ist und auch die Spaltbreite selbst in dieser Größenordnung liegt, werden von den Spalten Kugelwellen ausge-

[\*] Prof. Dr. K. O. Greulich  
Institut für Molekulare Biotechnologie  
Postfach 100813, 07708 Jena (Deutschland)  
[www.imb-jena.de/greulich](http://www.imb-jena.de/greulich)  
Fax: (+49) 3641-656-410  
E-mail: kog@imb-jena.de

hen, die sich überlagern und dabei Interferenzerscheinungen zeigen, also Bereiche mit Wellenverstärkung und Bereiche mit Wellenauslöschung. Stellt man einige cm hinter dem Doppelspalt einen Schirm auf, erhält man ein Intensitätsmuster mit Maxima und Minima. In ruhigem Gewässer ist dies leicht nachzuprüfen: Berührt man mit dem ausgestreckten Daumen und Ringfinger einer Hand synchron die Wasseroberfläche und erzeugt eine leichte Vibration, hat man praktisch das Modell für Kugelwellen, die von einem Doppelspalt ausgehen, und es erscheint ein deutliches Interferenzmuster. Doppelspaltexperimente mit Licht (Young, Huygens) haben im 19. Jahrhundert den Beweis erbracht, dass Licht auch Wellencharakter hat. Allgemein ausgedrückt: Wann immer zwei oder mehr Wege möglich sind und dahinter Interferenzen gesehen werden, liegt eine Welle vor. Soweit ist das nichts Überraschendes, allenfalls die Mathematik, die den Vorgang beschreibt, ist etwas schwierig.

Die Qual für den wissenschaftlichen Normalverbraucher begann mit der Einführung der Quantenmechanik, die fordert, dass solche Interferenzerscheinungen auch auftreten, wenn ein Strahl von echten Teilchen, anstelle von Wellen, durch den Doppelspalt geht – und zwar auch dann, wenn der Teilchenstrahl so schwach ist, dass zu einem gegebenen Zeitpunkt sich nur ein einziges Teilchen in der Apparatur befindet. Es kann dann also nicht mehr die Interferenz von einem Teilstrahl durch Spalt A mit dem Teilstrahl durch Spalt B sein. Hierzu wurde viel spekuliert, so wurden verborgene Führungswellen angenommen oder eben die Interferenz eines Teilchens mit sich selbst.

Über Jahrzehnte hinweg wurden die meisten Experimente mit Licht durchgeführt, wobei das Licht für diesen Zweck als Photonenstrahl angesehen wurde. Formulierungen wie „wenn man den Lichtstrahl soweit abschwächt, dass nur ein Photon pro Zeiteinheit durch die Apparatur geht ...“ findet man zuhauf auch in neueren Lehrbüchern. Nur, solch ein Experiment hat es nie gegeben. Grund dafür ist, dass fast jede Lichtquelle, sei es ein Laser oder sogar eine billige Taschenlampenbirne, immer einige Photonen aneinanderhängt, d.h. mehr oder weniger lange Wellenzüge erzeugt. Da in einem solchen Wellenzug, z.B. bei grünem Licht, alle 1.6 Femtosekunden ein Photon kommt und Messtechniken, die Femtosekunden auflösen können,<sup>[2]</sup> in Doppelspaltexperimenten noch nicht eingesetzt wurden, wissen wir selbst bei Verwendung von „Einzelphoton“ Detektoren nie, ob wir tatsächlich ein einzelnes Photon messen oder eben nur das erste Photon eines Wellenzuges registriert haben. Daher sind Doppelspaltexperimente, die mit Licht durchgeführt wurden, zur Erklärung quantenmechanischer Effekte und insbesondere zur Erklärung der Selbstinterferenz in ihrer Interpretation angreifbar.

Spätestens die Zeilinger Experimente haben wohl solche Zweifel beseitigt: Bei Fullerentmolekülen treten all diese Probleme nicht auf. Man kann sie einzeln herstellen. Man kann dafür sorgen, dass sich wirklich nur ein einzelnes Fullerentmolekül in der Apparatur befindet. Man kann das auch experimentell nachweisen. Und trotzdem, schickt man Fullerene, Molekül für Molekül, Teilchen für

Teilchen, durch einen Doppelspalt (oder aus praktischen Gründen durch ein entsprechendes Gitter), sieht man das in Abbildung 1a veranschaulichte Ergebnis: ganz offensichtlich Interferenz!

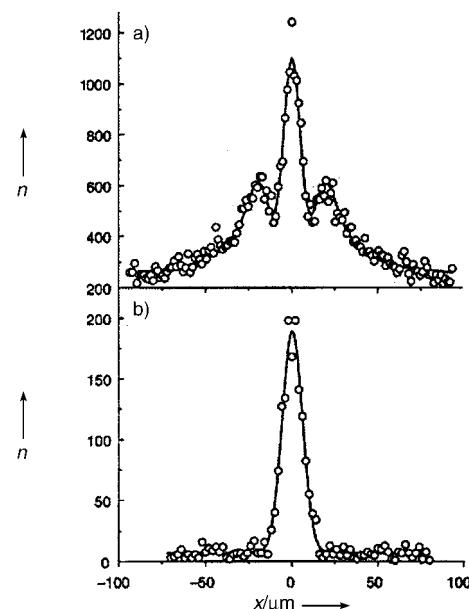


Abbildung 1. Ergebnisse der Interferenzuntersuchungen, aufgenommen mit (a) und ohne (b) eingeschobenes Gitter. Zu beachten ist die unterschiedliche Zählrate an der Y-Achse in (a) und (b). Die durchgezogene Linie ist nach der Theorie berechnet. Die Daten sind aus Lit. [1] reproduziert.

#### Das Experiment

Das verwendete Fullerene (Reinheit 99.5 %) wurde kommerziell erworben. Nach dem Erhitzen in einem Ofen auf 900–1000 K wurden durch einen Kollimator, bestehend aus zwei 10 μm breiten Spalten im Abstand von 1.04 m, im Vakuum ( $5 \times 10^{-7}$  mbar) diejenigen Moleküle ausgesucht, die sich mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit in die gewünschte Richtung bewegten. Unmittelbar nach dem zweiten Kollimatorschlitz war ein Gitter mit 50 nm breiten Schlitten und einer Gitterkonstante von 100 nm positioniert. Das Detektionssystem stand 1.25 m weiter entfernt (siehe Abbildung 2b). Zur Detektion wurden die Fullerentmoleküle erst mit einem fokussierten 24-W-Argon-Ionenlaser ionisiert und dann mit einer Berrylium-Kupfer-Konversionselektrode, kombiniert mit einem Channeltron-Detektor, nachgewiesen. Die Dunkelzählrate betrug weniger als ein Teilchen pro Sekunde.

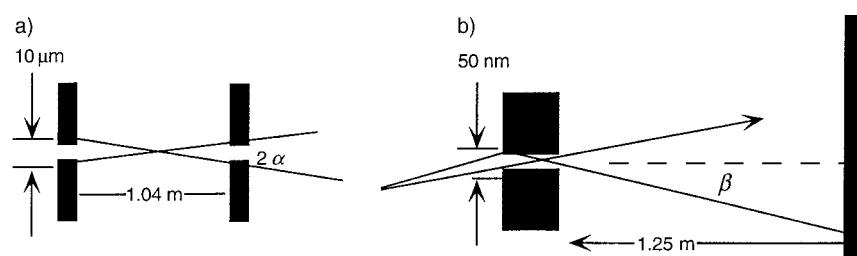


Abbildung 2. Experimentieller Aufbau der Kollimatorgeometrie (a) und der Sammelgeometrie (b).

## Gibt es hierfür eine „triviale“ Erklärung?

Bei einem so wichtigen Aspekt der Grundlagenforschung muss man natürlich genau nachprüfen, ob vielleicht eine triviale Interpretation möglich ist. Wir sollten einigen ganz offensichtlichen Fragen nachgehen: Im Kollimator bleibt eine kleine Winkeldivergenz erhalten, der Teilchenstrahl ist nicht absolut parallel. Man kann leicht verifizieren, dass der Zahlenwert für diese Divergenz  $10 \mu\text{m}$  pro  $1.04 \text{ m}$  oder etwa  $10^{-5}$  beträgt. Andererseits sind die einzelnen Spalte des Gitters  $50 \text{ nm}$  breit. Selbst wenn das Gitter aus einem stabilen Material gefertigt ist ( $\text{SiN}_x$ ), muss es wenigstens einige Mikrometer dick sein. Abbildung 2b zeigt, dass dann die Wände eines Spaltes als Reflektoren für die  $0.5 \text{ nm}$  großen Fullerene-Moleküle wirken können. Dort reflektierte Moleküle sollten in der Detektorebene  $10 \mu\text{m} \times (1.25 \text{ m}/1.04 \text{ m}) = 12.5 \mu\text{m}$  rechts und links des zentralen Maximums, erzeugt durch direkt durch den Spalt gehendene Moleküle, auftreten. Tatsächlich sind etwa an diesen Positionen Peaks zu sehen (Abbildung 1a).

Interferenz von Fullerenen – nur ein trivialer geometrischer Effekt? Nicht ganz! Ausgehend von bestimmten Annahmen über geometrische Details des Zeilinger-Experiments, die allerdings nicht direkt aus der Experimentbeschreibung ersichtlich sind, sollten die Nebenmaxima mindestens eine Größenordnung schwächer sein, als sie tatsächlich sind. Daher ist diese triviale geometrische Erklärung unwahrscheinlich.

Etwas problematischer ist die Tatsache, dass im Beugungs- experiment nur ein Bruchteil aller Fullerene-Moleküle detektiert wurde. Die Skalen in Abbildung 1a und 1b sind sehr verschieden. Das Maximum im Kontrollexperiment hat eine Zählrate von 200 Teilchen pro Sekunde oder 10 000 Teilchen pro 50 Sekunden (Abbildung 1b). Die Zählrate im zentralen Maximum von Abbildung 1a ist 1100 Teilchen pro 50 Sekunden. Selbst bei Berücksichtigung der größeren Halbwertsbreite des Maximums im Beugungsbild ergibt eine grobe Schätzung, dass höchstens 20% aller Fullerene-Moleküle detektiert werden, wenn das Gitter eingeschoben ist. In einem reinen Wellenmodell sollte das Einbringen eines Gitters in das Experiment nicht einen so hohen Prozentsatz an Molekülen „verschlucken“.

Dieses Problem lässt sich hier nicht endgültig lösen, aber die Daten können mit großer Genauigkeit durch die Kirchhoff'sche Beugungstheorie erlärt werden (durch die Datenpunkte gezogene Linie in Abbildung 1). Es ist ziemlich unwahrscheinlich, dass eine solch gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Daten rein zufällig auftritt, mit anderen physikalischen Ursachen. Insbesondere können die relativen Intensitäten der Maxima kaum zufällig richtig sein. Insgesamt können wir daher, bei einem sehr geringen Restzweifel, akzeptieren, dass das Experiment in der Tat (Selbst-) Interferenz und damit Welleneigenschaften einzelner Fullerene-Moleküle zeigt.

## Eine Spekulation: Sind Fullerene-Moleküle „weich“?

Was ist die Konsequenz der beobachteten Interferenz? Eine naive Antwort wäre: Fullerene sind weich! Was viele

von uns für Photonen, Elektronen, Neutronen und vielleicht auch für einzelne Atome akzeptiert haben, ist offensichtlich auch für diese Aggregate aus 60–70 Atomem gültig. Nicht nur das! Weil wir tatsächlich jeweils nur ein Teilchen in der Apparatur hatten, müssen wir auch akzeptieren, dass diese Fullerene tatsächlich mit sich selbst interferieren.

Theoretiker haben sicherlich eine Erklärung für all dieses oder sie machen uns klar: „So ist die Natur, das haben wir so zu akzeptieren“. Seien wir aber einfach mal etwas weniger pessimistisch, machen wir eine, zugegebenermaßen spekulativen, Annahme: In einer noch unverstandenen Weise teilen sich die Fullerene-Moleküle am Steg des Doppelspalts tatsächlich auf, so wie das z. B. bei einem Öltropfen geschehen kann, der auf ein scharfkantiges Hindernis trifft.

Ist die Annahme eines solchen weichen Teilchens wirklich so naiv, dass wir sie sofort von der Hand weisen müssen? Vielleicht nicht! Vielleicht ist unsere Vorstellung von Teilchen unvollständig. Bei harten kosmischen Gammaquanten denken wir sofort an Teilchen, aber bei weichen Radiowellen käme niemand auf eine solche Idee. Dennoch würde das gesamte Gedankengebäude der Physik zusammenbrechen, wenn wir annehmen würden, dass diese beiden nur durch die Wellenlänge unterscheidbaren Formen elektromagnetischer Strahlung ihrem Wesen nach verschieden wären. Gammaquanten erscheinen uns vielleicht nur deswegen als hart, weil die in ihnen enthaltene Energiedichte sehr viel größer ist als diejenige der Detektoren (Atome, Atomkerne), die wir zum Nachweis verwenden. Radiowellen empfinden wir als weich, weil wir zu deren Nachweis Metallstangen (Antennen) einsetzen. Wir haben hier ein klares Beispiel dafür, dass es eher eine Frage unserer Wahrnehmung ist als eine absolute Wahrheit, ob wir ein Objekt als Teilchen oder als Welle sehen. Zummindest Elementarteilchen sind keine Billardkugeln.<sup>[3]</sup>

Ein zweiter Grund dafür, dass wir die Idee eines weichen Fullerene-Moleküls nicht sofort verwerfen sollten, ist das Tröpfchenmodell des Atomkerns, welches von vielen Physikern akzeptiert wird und wofür Jensen mit dem Physiknobelpreis ausgezeichnet wurde.

Nachdem das letzte Jahrhundert gezeigt hat, dass Teilchen auch Wellen sind, und nachdem das Zeilinger-Experiment nachgewiesen hat, dass dies sogar für vergleichsweise große Teilchen gilt, sollten wir jetzt beginnen, die gleichermaßen überraschend einfache und doch so schwierige Frage zu stellen: Was ist ein Teilchen? Experimentell öffnet sich uns hierzu die Tür, weil die rasante Entwicklung von Einzelmolekültechniken<sup>[4]</sup> zunehmend erlaubt, einzelne Moleküle zu beobachten und sogar (im übertragenen Sinn) in die Hand zu nehmen. Nicht zu vergessen ist die angewandte Chemie, die für solche Untersuchungen, die idealen Beobachtungsobjekte liefert.

[1] M. Arndt, O. Nairz, J. Vos-Andreae, C. Keller, G. van der Zouw, A. Zeilinger, *Nature* **1999**, *401*, 680; M. Arndt, A. Zeilinger, *Phys. Bl.* **2000**, *56*, 69.

[2] Z. Y. Ou, L. Mandel, *Phys. Rev. Lett.* **1988**, *61*, 54; A. Schenzle, *Phys. Bl.* **1989**, *45*, 25.

[3] J. Maddox, *Nature* **1989**, *342*, 121.

[4] Siehe z. B. die kürzlich gegründete Druck- und Internet-Fachzeitschrift *Single Molecules* von Wiley-VCH.