

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 Alkalauridaurate(i) $[\text{MAu}_4][\text{M}_3\text{AuO}_2]$ ($\text{M} = \text{Rb}, \text{Cs}$), die sich durch Disproportionierung von Au in Au^+ und Au^- herstellen lassen, ^[17] sollte zu einer Weiterentwicklung der Chemie der homo- und heterometallischen Cluster im Nanomaßstab 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. Langetepe, 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. Pykkö, *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 vorgebracht. 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 Schwergewichte „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.^[1]

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
 Fax: (+1)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,^[2] 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 Fullerenmolekülen treten all diese Probleme nicht auf. Man kann sie einzeln herstellen. Man kann dafür sorgen, dass sich wirklich nur ein einzelnes Fullerenmolekül in der Apparatur befindet. Man kann das auch experimentell nachweisen. Und trotzdem, schickt man Fullere, Molekül für Molekül, Teilchen für

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

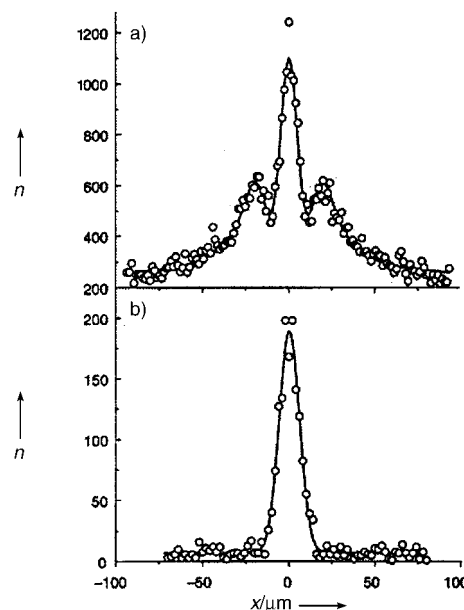


Abbildung 1. Ergebnisse der Interferenzuntersuchungen, aufgenommen mit (a) und ohne (b) eingeschobenenes Gitter. Zu beachten ist die unterschiedliche Zählrate an der Y-Achse in (a) und (b). Die durchgezogene Linie ist nach der Theorie berechnet. Die Daten sind aus Lit.[1] reproduziert.

Das Experiment

Das verwendete Fulleren (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 (5×10^{-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 Schlitzen und einer Gitterkonstante von 100 nm positioniert. Das Detektionssystem stand 1.25 m weiter entfernt (siehe Abbildung 2 b). Zur Detektion wurden die Fullerenmoleküle erst mit einem fokussierten 24-W-Argon-Ionenlaser ionisiert und dann mit einer Beryllium-Kupfer-Konversionselektrode, kombiniert mit einem Channeltron-Detektor, nachgewiesen. Die Dunkelzählrate betrug weniger als ein Teilchen pro Sekunde.

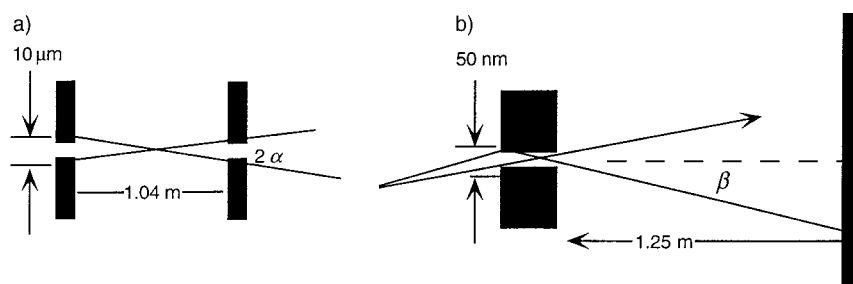


Abbildung 2. Experimentieller Aufbau der Kollimatorgeometrie (a) und der Sammelgeometrie (b).

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 $10\text{ }\mu\text{m}$ pro 1.04 m oder etwa 10^{-5} beträgt. Andererseits sind die einzelnen Spalte des Gitters 50 nm breit. Selbst wenn das Gitter aus einem stabilen Material gefertigt ist (SiN_x), muss es wenigstens einige Mikrometer dick sein. Abbildung 2b zeigt, dass dann die Wände eines Spaltes als Reflektoren für die 0.5 nm großen Fullerenmoleküle wirken können. Dort reflektierte Moleküle sollten in der Detektorebene $10\text{ }\mu\text{m} \times (1.25\text{ m}/1.04\text{ m}) = 12.5\text{ }\mu\text{m}$ 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 Beugungsexperiment nur ein Bruchteil aller Fullerenmoleküle 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 Fullerenmoleküle 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 Kirchhoffsche Beugungstheorie erklärt 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 Fullerenmoleküle zeigt.

Eine Spekulation: Sind Fullerenmoleküle „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 Atomen 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 spekulative, Annahme: In einer noch unverstandenen Weise teilen sich die Fullerenmoleküle 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. Zumindest Elementarteilchen sind keine Billiardkugeln.^[3]

Ein zweiter Grund dafür, dass wir die Idee eines weichen Fullerenmoleküls 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^[4] 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-Andrae, 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.