

# Vom Quantenfußball zum Quantenspeer

## Spiele mit molekularen Materiewellen

Stefan Gerlich und Markus Arndt

Die Materiewelleninterferometrie ist so alt wie die Quantenphysik selbst und ist die Basis für eine große Zahl aktueller praktischer Anwendungen: Paradebeispiele dafür sind die Oberflächenanalyse und Holografie mit Elektronen, die Strukturanalyse von Festkörpern und biologischen Materialien mittels Neutronenbeugung oder die Präzisionsmetrologie mit Atomen.

### Welle-Teilchen

Unsere Forschungsgruppe an der Universität Wien beschäftigt sich seit einigen Jahren mit der Untersuchung der quantenmechanischen Wellennatur von Objekten aus einer noch komplexeren Welt, nämlich jener der großen Moleküle. Unsere Arbeit ist dabei vor allem von fünf Fragen motiviert:

- Welches ist wohl das größte und komplizierteste Teilchen, für das man de Broglie's Beziehung  $\lambda = h/p$  zum Welle-Teilchen-Dualismus noch nachweisen kann?
- Wie kann es sein, dass die Quantenphysik auf dem Superpositionsprinzip basiert und Schrödingers Wellenfunktion auch die gleichzeitige Realisierung von sich ausschließenden Zuständen erlaubt, wir dies aber bislang im Alltag niemals beobachtet haben?
- Kann man die Quanteninterferometrie benutzen, um etwas über Molekülphysik zu lernen, und neue und genauere Messungen zu machen als zuvor?
- Können Quantentechnologien angewandt werden, um auf eine neue Art molekulare Nanostrukturen zu erzeugen?
- Wenn wir es eines Tages schaffen, Quanteninterferenzen mit sehr massiven Objekten zu sehen, kann uns das dann vielleicht helfen, ein neues Licht auf die Verbindung von Quantenphysik und Gravitation zu werfen?

### Quantenmechanische Wellennatur großer Objekte

Die Liste dieser Fragen zeigt schon, dass der vorliegende Beitrag nur die ersten Schritte auf einem langen und spannenden Weg beschreiben kann. Wir werden uns hier daher besonders auf die sehr praktische Frage konzentrieren, wie

Univ.-Prof. Dr. Markus Arndt leitet die Forschungsgruppe Quantenoptik, Quantennanophysik und Quanteninformation der Fakultät für Physik an der Universität Wien, Strudlhofgasse 4, 1090 Wien.  
e-Mail: markus.arndt@univie.ac.at  
Mag. Stefan Gerlich dissertiert im Rahmen des Doktoratskollegs CoQuS (Complex Quantum Systems).

man die quantenmechanische Wellennatur an großen Objekten überhaupt nachweisen kann.

Wellen sind uns allen seit der Kindheit vertraut: aus der Badewanne, dem See, dem Meer. In der Schule werden Beugungs- und Interferenzexperimente gerne mit Laserlicht und einem Doppelspalt demonstriert: Die aufgeweiteten aber über eine feste Phase des elektromagnetischen Feldes verbundenen Teilwellen des Lichtes treten dabei zugleich durch zwei entfernte Öffnungen der Versuchsanordnung, um sich dann an manchen Orten des Beobachtungsschirms zu verstärken oder auszulöschen. Das molekulare Analogon, die Demonstration von konstruktiver und destruktiver Interferenz durch Fernfeldbeugung der fußballförmigen Kohlenstoffmoleküle  $C_{60}$  und  $C_{70}$  an einem nanomechanischen Gitter, konnten wir schon 1999 in PlusLucis vorstellen [1]. Wir könnten unseren Beitrag an dieser Stelle schon beenden, wenn es nun auch leicht wäre, das Doppelspaltkonzept direkt auf noch massivere und komplexere Objekte, wie den Fußball in Abb. 1 zu übertragen.

Warum dies für einen echten Fußball nicht geht, ist zunächst leicht einzusehen. Die de Broglie Wellenlänge eines solchen Balls erreicht im Flug die Größenordnung der Planck-Länge, also rund  $10^{-35}$  m. Sie ist damit so mikroskopisch klein, dass auch mit Fantasie und Geld ein Doppelspaltexperiment unmöglich scheint.

Aber auch bei deutlich kleineren und praktisch relevanten Objekten, von Makromolekülen bis hin zu den industriell immer wichtiger werdenden Nanopartikeln, kann man die Schwierigkeiten erahnen: Betrachten wir dazu zunächst noch einmal den Doppelspaltversuch und ersetzen wir den Laser durch eine Glühbirne. Im Gegensatz zur kohärenten Laserstrahlung, die einfarbig, sehr gut gerichtet und im Idealfall über die gesamte Emissionsfläche durch eine einzige Phase des elektrischen Feldes beschrieben ist, ist das thermische Licht einer Glühbirne weiß – also aus vielen Wellenlängen zusammengesetzt. Die Emitter schwingen außer Takt und das Beugungsexperiment am Doppelspalt verliert an Kontrast und Qualität.

Dies ist in etwa auch die Situation, vor der man im Fall der Molekülbeugung steht. Es gibt zwar heute schon erste Atomlaser, aber mit großen Molekülen ist man noch weit von derartigen Strahlungsquellen entfernt. Die Moleküle,

die einer thermischen Quelle – also einem mit Pulver gefülltem Ofen – entsteigen, haben sehr ähnliche Kohärenzeigenschaften wie die Lichtquanten der Glühbirne, jedoch ist ihre de Broglie Wellenlänge typischerweise um mindestens fünf Größenordnungen kleiner als die Wellenlänge des Lichtes, beträgt also nur einige Pikometer.

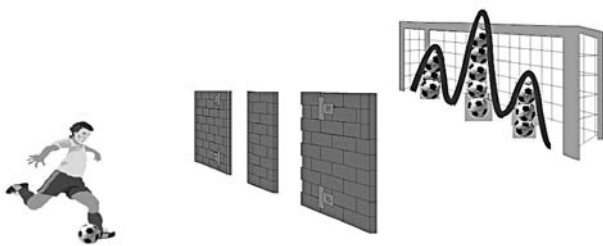
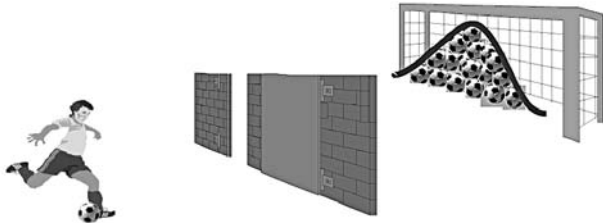


Abb 1: Die Beugung am Doppelspalt ist eine Möglichkeit den Welle-Teilchen-Dualismus an großen Objekten zu studieren. Das Experiment setzt jedoch große Distanzen, eng kollimierte Strahlen oder sehr kohärente Wellenfelder voraus. Die Beugung eines echten FIFA Balls ist aufgrund seiner kleinen de Broglie Wellenlänge für alle vorhersehbaren Zeiten ausgeschlossen. Die Beugung eines Quantenfußballs, des Kohlenstoffmoleküls  $C_{60}$ , wurde dagegen schon 1999 in unserer Gruppe an der Universität Wien erstmals demonstriert [1].

Aus der Schule wissen wir, dass der Beugungswinkel 1. Ordnung am Doppelspalt bestimmt ist durch  $\sin\Theta_{\text{beug}} = \lambda/d$ . Damit man die erwarteten Beugungsmuster auf dem Schirm hinter dem Doppelspalt auch noch auflösen kann, muss der Molekularstrahl so gut kollimiert und so schmal sein, dass seine Auffächerung, die Divergenz  $\Theta_{\text{div}}$ , kleiner ist als der Beugungswinkel:  $\Theta_{\text{div}} < \Theta_{\text{beug}}$ . Eine kurze Abschätzung zeigt, dass schon für kleine Proteine eine Strahlbreite von wenigen hundert Nanometern nötig wäre. Das würde den Teilchenfluss bis zur Nutzlosigkeit reduzieren.

Es gibt mindestens zwei Wege aus dem Dilemma: entweder man vergrößert die de Broglie Wellenlänge oder man verwendet ein neues Interferenzkonzept. Eine Streckung der Wellenlänge wäre durch eine starke Bremsung und Kühlung der Moleküle realisierbar. Rund ein Dutzend Gruppen weltweit arbeitet derzeit an solchen Ideen. Alternativ und rascher kann man aber einen Trick aus der Lichtoptik umsetzen: Dazu muss man die Fernfeldbeugung am einzelnen Gitter durch die Nahfeldinterferometrie mit drei Gittern ersetzen. Das ‚Fernfeld‘ ist dadurch definiert, dass man in guter Näherung die Wellenfronten durch ebene Wellen annähern kann. Die Nahfeldoptik beschreibt dagegen die Ausbreitung von Wellen in der unmittelbaren Umgebung der beugenden Strukturen in einem Bereich, wo die Krümmung der Wellenfronten noch wichtig ist.

Die damit verbundenen Phänomene werden an Schulen kaum gelehrt, da die volle mathematische Beschreibung deutlich komplexer ist als die der Fernfeldbeugung. Die Nahfeldphysik hat aber interessante Vorteile für die Materiewelleninterferometrie. Sie erlaubt es, Interferenzexperimente mit Teilchen anzugehen, deren Größe und Masse diejenige der Fullerene  $C_{60}$  und  $C_{70}$  um mehrere Größenordnungen übersteigt. Vor allem die Talbot-Lau-Interferometrie ist dafür sehr geeignet und soll hier beschrieben werden.

Die Idee des Talbot-Lau-Interferometers ist in Abb. 2 skizziert [2]. Wir suchen dabei einen Kompromiss, der uns erlaubt, die für die Interferometrie benötigte räumliche Kohärenz zu erzeugen und zugleich eine große Anzahl von Molekülen zum Detektor zu bringen.

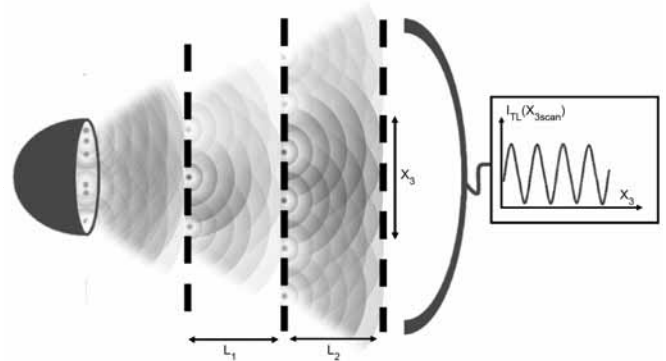


Abb 2: Das Prinzip des Talbot-Lau Interferometers [2] erlaubt es, auch mit inkohärenten Quellen zu arbeiten und dennoch die Wellennatur der fliegenden Objekte zu demonstrieren. Das erste Gitter präpariert die räumliche Kohärenz, das zweite Gitter ist das beugende Element, das dritte dient als Detektionsmaske. Die Schattierungen symbolisieren hier Wellenzüge unterschiedlicher Phase, wohl aber gleicher Wellenlänge.

Die Lösung ist: massiver Parallelismus! Statt eines einzelnen Kollimationsspalts wird nun ein ganzes Gitter eingesetzt, das einige Tausend Spalte eng benachbart positioniert. Im hier beschriebenen Experiment tragen rund 4000 Spalte mit einem mittleren Abstand von 266 nm zum Endsignal bei. Jeder Spalt ist so klein, dass man ihn – cum grano salis – als den Ausgangspunkt eines kleinen Ensembles Huygens'scher Elementarwellen betrachten kann. Diese Wellen weiten sich auf dem Flug so weit auf, dass ihre Fronten mühelos einige benachbarte Spalte des zweiten Gitters beleuchten können. Die für die Quanteninterferenz notwendige Ununterscheidbarkeit von mindestens zwei verschiedenen Pfaden ist dann am Ort des zweiten Gitters gegeben und das Zusammenlaufen der Teilwellen hinter dieser Struktur führt zur Interferenz. Dabei entsteht ein molekulares Dichtemuster, also eine räumlich periodische Verteilung der Wahrscheinlichkeit, ein Molekül anzutreffen. Der Aufbau ist wiederum so gewählt, dass die Periode dieses Musters exakt dem Abstand der Spalte in den vorhergehenden Gittern entspricht. Wenn dann ein drittes Gitter als Maske am Ort des Interferogramms positioniert ist und seitlich über den Molekülstrahl rastert, dann ergibt die Zählrate im großflächigen Detektor hinter der Maske als Funktion der Maskenposition ein Abbild des Interferenzmusters.

Es gibt drei immense Vorteile dieses 3-Gitteraufbaus gegenüber dem Doppelspaltexperiment: Zum einen wird das Signal im Detektor um mehr als einen Faktor 1000 erhöht. Das liegt am massiven Parallelismus. Zum anderen kann man das 3-Gitterinterferometer wegen der Nahfeldbedingungen deutlich kompakter bauen als die im Fernfeld operierende Doppelspaltanordnung. Das im Nahfeldinterferometer entstehende molekulare Dichtemuster kann man in einem zweiten Schritt auch nutzen – sowohl für Präzisionsmessungen molekularer Eigenschaften (Metrologie) als auch in neuartigen Verfahren zur Oberflächendeposition von molekularen Nanostrukturen (Lithographie).

Bei der Interpretation der Talbot-Lau Interferenzen sind jedoch auch einige Subtilitäten zu berücksichtigen. Eine aufmerksame Kollegin könnte zum Beispiel darauf verweisen, dass die Interferenzstreifen sehr große Ähnlichkeiten mit dem klassischen Schattenwurf hinter den ersten beiden Gittern haben, dass wir also vielleicht nur Moiré-Muster beobachten. Man kann einen solchen Einwurf jedoch leicht aus der Welt schaffen, indem man nachweist, dass der Interferenzkontrast mit der de Broglie Wellenlänge der Moleküle variiert. Dabei findet man eine gute Übereinstimmung mit den Erwartungen der Quantenphysik, die sich von denen der klassischen Physik von Teilchenstrahlen signifikant unterscheiden.

Ein ebenso aufmerksamer zweiter Kollege könnte aber auch anmerken, dass der Durchflug großer polarisierbarer Moleküle durch jedwede materielle Gitterstruktur immer mit einer Wechselwirkung verbunden sein muss, die auch klassische Teilchenstrahlen auf ungewöhnliche Weise ablenkt. Und in der Tat erzeugen quantenmechanische Fluktuationen der Ladungsverteilung in den Molekülen fluktuierende elektrische Dipolmomente. Diese induzieren beim Durchflug durch die nur wenige hundert Nanometer dicken Beugungsgitter Spiegeldipole. Das Wechselspiel zwischen dem molekularen und dem induzierten Dipol führt zu einem insgesamt attraktiven Potential, dem van der Waals Potential, das mit der dritten Potenz des Molekül-Wandabstandes abfällt:  $V_{vdW} = -C_3/r^3$ . Diese Wechselwirkung im Flug – während einer enorm kurzen Gitterdurchflugszeit von kaum mehr als 100 ns – ist so stark, dass es zunächst so schien, als müsse das Talbot-Lau Konzept für große und polarisierbare Moleküle scheitern.

Man kann jedoch einen einfachen Ausweg finden: Wenn man die Wechselwirkung mit den Wänden vermeiden will, warum dann nicht einfach die Wände weglassen? Aber wer übernimmt dann die Beugung? Wir wissen aus der Lichtoptik, dass man auch an Seifenlamellen schöne Interferenzen beobachten kann, obwohl diese das Licht nicht absorbieren. Stattdessen wirken Variationen in der Dicke der Seifenhaut als ortsabhängige Phasenschieber und erzeugen die bunten Streifen, die uns schon als Kinder erfreut haben.

Analog kann man nun auch mit Licht ein Phasengitter für Materiewellen aufbauen. Die Kopplung des Lichts an die Materie erfolgt über die Polarisierbarkeit der Moleküle: Das elektrische Feld  $E$  der Laserstrahlung induziert ein rasch oszillierendes elektrisches Dipolmoment  $d$  im Molekül, das wiederum im elektrischen Feld  $E$  des Lasers eine Energieverschiebung erfährt. Insgesamt erfährt das Molekül während der Durchflugszeit  $\tau$  durch den Lichtstrahl eine ortsabhängige Phasenverschiebung  $\Delta\phi$ , die sowohl der Polarisierbarkeit als auch der Intensität des Laserlichtes  $I \propto E^2$  proportional ist:

$$\Delta\phi = \frac{1}{2} \alpha E^2 \sin(4\pi \cdot \chi / \lambda) \tau / \hbar$$

Hier haben wir schon berücksichtigt, dass wir ein Gitter dadurch realisieren, dass wir den Laser der Wellenlänge  $\lambda$  auf einem Spiegel retroreflektieren, um eine Stehwelle der Periode  $\lambda/2$  zu erzeugen (Abb. 3).

Eine dritte Kollegin könnte sich nun freuen und vorschlagen, alle drei Gitter des Talbot-Lau Interferometers durch Laserstehwellen zu ersetzen. Das ist in unseren Experimenten bislang nicht realisiert und scheint auch nur in ausgewählten Fällen wünschenswert: Die Hauptaufgabe des ersten und dritten Gitters ist es ja gerade, Moleküle nach ihrem Ort zu selektieren. Das geht am leichtesten, wenn diese Masken tatsächlich absorptive Strukturen aus undurchlässigem Material sind. Auf der anderen Seite sind weder am ersten noch am dritten Gitter Dephasierungen durch van der Waals Potentiale störend: Am ersten Gitter treffen die Moleküle noch inkohärent ein und das dritte Gitter dient nur noch als Maske zum Abrastern der Interferenz. Es genügt also, das zweite Gitter durch eine Laserstehwelle zu realisieren. Und so haben wir es auch im Labor umgesetzt.

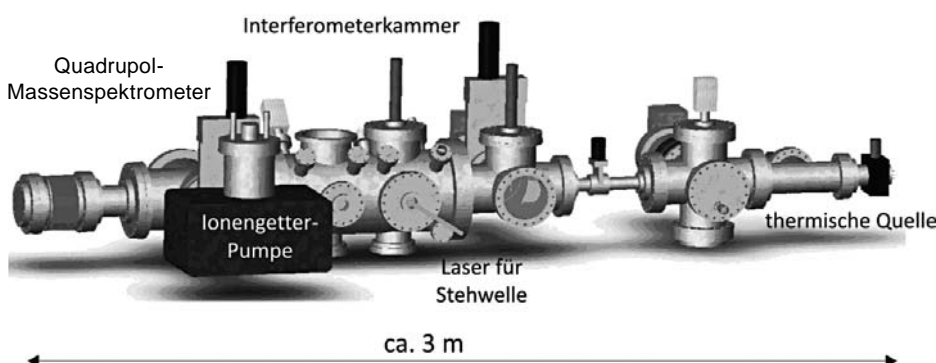


Abb. 3: Molekülinterferometer – Gesamtansicht Die Vakuumapparatur ermöglicht die ungestörte Ausbreitung der Moleküle und den Erhalt ihrer quantenmechanischen Wellennatur. In der thermischen Quelle (rechts) werden die großen Moleküle durch Erhitzen in die Gasphase gebracht. Sie fliegen bis zum Interferometer, wo sie auf drei Gitter treffen. Nach der Passage durch das Interferometer gelangen die Moleküle in einen Detektor, der sie ionisiert und selektiv nachweist. Für Fullerene reicht die Laser-Ionisation zum eindeutigen Nachweis. Für komplexe Moleküle ist ein Quadrupol-Massenspektrometer am Ende der Vakuumkammer montiert.

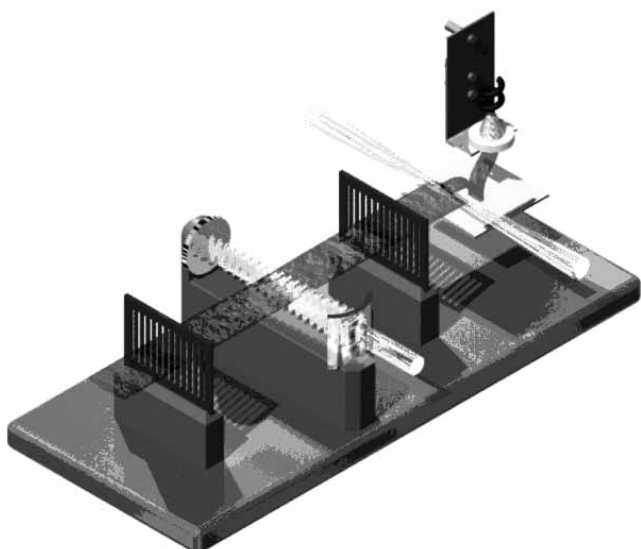
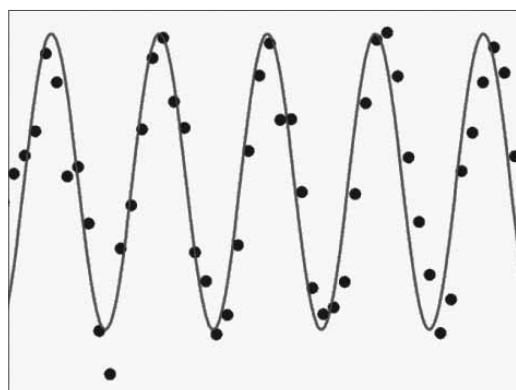
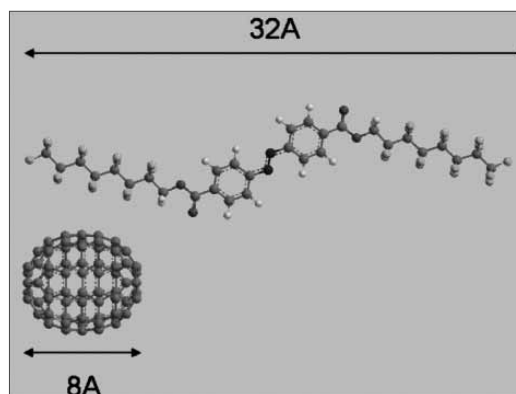


Abb. 4: oben: Aufbau des Kapitza-Dirac-Talbot-Lau Interferometers. Das erste Gitter präpariert die transversale Kohärenz für die Beugung an der Laserstehwelle. Das dritte Gitter wirkt als Maske zum Nachweis der molekularen Interferenz. Bei Experimenten mit Fullerenen (unten links) kreuzt ein Laserstrahl den Molekülstrahl, der die Teilchen ionisiert und so deren Detektion erlaubt. Für komplexere und labilere Moleküle wie die perfluoralkyl-funktionalisierten Diazobenzole (Molekülkette unten links) dienen Elektronenstöße zur Ionisation und ein Quadrupolmassenfilter zur Identifikation der gezählten Teilchen. Unten rechts: Interferogramm der Azobenzolmoleküle. Die Interferogramme erfüllen die Erwartungen der Quantenmechanik.



Die dadurch entstehende Anordnung ist in Abb. 3 von außen und in Abb. 4 von innen dargestellt. Wir nennen sie das Kapitza-Dirac-Talbot-Lau Interferometer (KDTLI). Wir haben diesen Namen gewählt, weil das Experiment verschiedene Ideen aus zwei Jahrhunderten kombiniert: die interferometrische Selbstabbildung von Licht (Talbot, 1836), die Selbstabbildung bei inkohärenter Beleuchtung (Lau, 1948), die Beugung von Materie durch Licht (Kapitza & Dirac, 1933) und unsere eigenen Ideen, Experimente und Erfahrungen zur kohärenten Manipulation großer Moleküle (Arndt, Zeilinger et al. 1999, 2003).

Ein Experiment mit Wellenlängen um rund  $2 \times 10^{-12}$  m und beugenden Nanostrukturen mit Perioden von 266 nm stellt erhebliche Anforderungen an die Präzision bei der Fabrikation der Gitter, aber auch an die Justage des Interferometers. So mussten die Perioden aller drei Gitter im Mittel auf besser als den Durchmesser eines einzelnen Wasserstoffatoms übereinstimmen - das ist technologisch am Limit dessen, was prinzipiell erreichbar ist. Die Expertise von Tim Savas am MIT in Cambridge/USA hat uns dabei sehr geholfen. Das Experiment muss im Ultrahochvakuum durchgeführt werden, damit jedweder Stoß der beugenden Moleküle mit Teilchen aus dem Restgas vermieden wird. Die Vibrationen der Laborumgebung müssen stark gedämpft werden. Dazu ist das Experiment auf einem optischen Tisch mit einem Gewicht von mehr als einer Tonne montiert, der wiederum auf Luftpolsterfüßen frei schwebt. Die Amplitude von Vibrationen und Drifts der Gitter darf nicht mehr als etwa 10 nm betragen, da die Interferenzen sonst an Kontrast verlieren.

Das Experiment wurde zunächst mit den Fullerenmolekülen  $C_{70}$  getestet, von denen uns schon aus unseren früheren Studien bekannt war, dass sie interferieren. Die neuen Versuche waren schließlich auch sehr erfolgreich - wie immer nach langer Arbeit und einigen notwendigen Korrekturen in den Details der Anordnung. Die Dimensionen des neu aufgebauten Interferometers sind nun angepasst für Moleküle mit einer Masse von 10.000 amu bei einer Geschwindigkeit von 50 m/s oder gar Nanopartikel mit 1.000.000 amu bei nur 0,5 m/s. Das entspricht in etwa der Masse eines 5 nm Gold-Nanopartikels oder eines 30 nm großen Rhinovirus.

Eine der größten Herausforderungen im Bereich der Materiewelleninterferometrie ist also gelöst: das Konzept für ein weit skalierbares Makromolekülinterferometer ist erfolgreich umgesetzt. Es gibt aber noch eine zweite ähnlich große Herausforderung: die Erzeugung von kalten, intensiven neutralen Makromolekular- und Clusterstrahlen, mit einer guten Massenselektion, identischer Struktur und Stabilität, geringer thermischer Anregung und einigen anderen Kriterien mehr.

Ein Ansatz scheint derzeit vielversprechend, um zumindest die nächste Größenordnung in der Masse zu überbrücken. Unsere Partner von der Chemie an der Universität Basel (Prof. Mayor und Mitarbeiter) konnten bereits speziell für unsere Bedürfnisse neuartige Moleküle synthetisieren. Thermische Molekularstrahlen werden unter anderem dann intensiv, wenn die Moleküle eine geringe Polarisierbarkeit aufweisen und daher nur wenig aneinander haften. Die Polarisierbarkeit kann man signifikant reduzieren, in dem man in

Kohlenwasserstoffketten alle Wasserstoffatome durch Fluor substituiert. Derart perfluoroalkyl-funktionalisierte Diazobenzole wurden in Basel schließlich auch hergestellt. Sie sind etwa 50% massiver und in der thermisch bevorzugten trans-Form rund viermal ausgedehnter als die Fullerene (s. Abb. 4 unten); sie gleichen eher einem Quantenspeer als einem Quantenfußball. Tatsächlich sind sie bei einer Quelltemperatur von rund 600 K thermisch aber hoch angeregt und somit auch im Flug durch das Interferometer einer raschen Formänderung ausgesetzt. Einige unserer Kollegen prognostizierten daher, dass es unmöglich würde, mit solchen Objekten noch Quanteninterferenzen zu sehen. Und dennoch, Abbildung 4 (unten rechts) zeigt ein typisches Interferenzmuster, das mit diesen Quantenspeeren im Wiener KDTLI beobachtet wurde. Es stimmt sehr gut mit den Gesetzen der Quantenphysik und der Materiewelleninterferometrie überein.

Von hier aus gibt es viele interessante Wege, weiter zu forschen: Vor allem die Entwicklung geeigneter Quellen für supermassive Cluster und Moleküle wird noch viel Zeit, Geduld und Geld erfordern. Interessante Ideen dazu entstehen bereits in Zusammenarbeit mit Experten der Clusterphysik. Aber auch mit Molekülen in Massenbereich bis 5000 amu gibt es noch viele interessante Fragen zu verfolgen: Kann man die Interferometrie verwenden, um etwas über die Struktur der Moleküle im Flug zu lernen – ohne die Moleküle dabei zu beschädigen? Einige wichtige Hinweise können wir schon heute aus der Ablenkung von Interferenzstreifen im elektrischen Kraftfeld gewinnen. Kann man Konformationisomere oder Enantiomere, also Moleküle mit gleicher chemischer Summenformel und Masse aber unterschiedlicher räumlicher Anordnung im Interferometer voneinander trennen? Die Chancen dafür stehen recht gut, angesichts der sehr unterschiedlichen Kopplung an die Beugungsgitter und der räumlichen Separation von molekularen Teilstrahlen auf der Skala von wenigen hundert Nanometern. Und ob es eine technische oder vielleicht gar eine fundamentale Grenze für die Quantenphysik gibt, wird sicher noch eine Frage für viele Forscherjahre bleiben.

## Referenzen

- [1] Erste Beugung von großen Molekülen:  
Markus Arndt, Olaf Nairz, Julian Voss-Andreae, Claudia Keller, Gerbrand van der Zouw & Anton Zeilinger, Wave-particle duality of C<sub>60</sub> molecules, *Nature* 401, 680-682 (1999). Und mit besserer Auflösung:  
Olaf Nairz, Markus Arndt, Anton Zeilinger, Quantum Interference Experiments with Large Molecules, *Am. J. Phys.* 71, 319 (2003). Markus Arndt und Olaf Nairz, Grenzgänger: Welle-Teilchen Dualismus von C<sub>60</sub>, *Plus Lucis* 3, 5-7 (1999)
- [2] Erstes Interferometer für große Moleküle:  
Björn Brezger, Lucia Hackermüller, Stefan Uttenthaler, Julia Petschinka, Markus Arndt & Anton Zeilinger, Matter-wave interferometer for large molecules, *Phys. Rev. Lett.* 88, 100404 (2002).
- [3] Erstes voll skalierbares Interferometer für große Moleküle  
Stefan Gerlich, Lucia Hackermüller, Klaus Hornberger, Alexander Stibor, Hendrik Ulbricht, Fabienne Goldfarb, Tim Savas, Marcel Müri, Marcel Mayor & Markus Arndt, A Kapitza-Dirac-Talbot-Lau interferometer for highly polarizable molecules, *Nature Physics* 3, 711-715 (2007).
- [4] Einführende Artikel in die Molekülinterferometrie:  
Markus Arndt, Lucia Hackermüller und Klaus Hornberger, Wann wird ein Quantenobjekt klassisch? *Physik in unserer Zeit* 1, 20-25 (2006).  
Markus Arndt, Klaus Hornberger & Anton Zeilinger, Probing the limits of the quantum world, *Physics World* 18, 35-40 (2005).

## Danksagung

Die Experimente am Kapitza-Dirac-Talbot Lau Interferometer wurden gemeinsam mit vielen begabten Kolleginnen und Kollegen durchgeführt, darunter in alphabetischer Reihenfolge Fabienne Goldfarb (LAC, Orsay), Lucia Hackermüller (Uni Wien), Marcel Mayor (Uni Basel), Marcel Müri (Uni Basel), Tim Savas (MIT Cambridge), Hendrik Ulbricht (Uni Wien). Die Experimente wurden finanziert durch das FWF Projekt START Y177-N2 und durch Investitionsmittel der Universität Wien.

## Hinweis

Das Projekt wurde vom Regisseur Wolfgang Haberl filmisch über 2 Jahre dokumentiert. Die Dokumentation wurde unter anderem durch einen FWF Wissenschaftskommunikationspreis (2006) finanziert. Anfragen zum Film an: haberl@polycollege.at