

**Abb. 1** Das damalige Team arbeitet am ersten „professionellen“ Reaktionsmikroskop an der GSI (v.r.n.l. gegen den Uhrzeigersinn): Martin Unverzagt, Wolfgang Schmitt, Robert Moshammer, Joachim Ullrich und Holger Kollmus

## STERN-GERLACH-MEDAILLE

# Erkenntnisreiche Zerstörung

Wie lassen sich die fundamentalen Bewegungen in der atomaren und molekularen Welt sichtbar machen?

Joachim Ullrich

Die komplexe Bewegung von Quanten, Elektronen und Kernen stabilisiert die Atome und bringt Moleküle hervor. Doch wie genau entstehen diese? Wie bewegen sich zwei Elektronen im Helium-Atom? Wie reagieren sie auf eine Störung? Diese „korrelierte Vielteilchen-Quantendynamik“ hat uns in der Gruppe um Horst Schmidt-Böcking fasziniert, der ich Anfang der 1980er-Jahre beitrug – nicht zuletzt wegen der Frage, ob sich diese Bewegung eines Tages auch gezielt steuern lässt.

Eigentlich sollte die Beschreibung von Elektronen und Kernen kein Problem sein, schließlich haben wir die relativistische Vielteilchen-Dirac-Gleichung. Paul Dirac selbst schrieb 1929 [1]: „The general theory of

quantum mechanics is now almost complete [...] The underlying physical laws [...] are thus completely known, and the difficulty is only that the exact application of these laws leads to equations much too complicated to be soluble“. Trotz enormer Fortschritte in der Rechnertechnologie bleiben die Gleichungen bis heute nicht stringent lösbar: Wir brauchen Näherungsmethoden und deren experimentelle Bestätigungen – zumindest so lange, bis Quantencomputer das Problem vielleicht tatsächlich berechnen können.

Doch wir stehen hier vor einem experimentellen Dilemma: Wir können Quantensysteme nicht beobachten, ohne sie zu stören oder gar zu zerstören. Entscheidend ist es, die Zerstörung so zu gestalten und vor allem so umfassend und präzise zu vermessen, dass sich möglichst vollständige In-

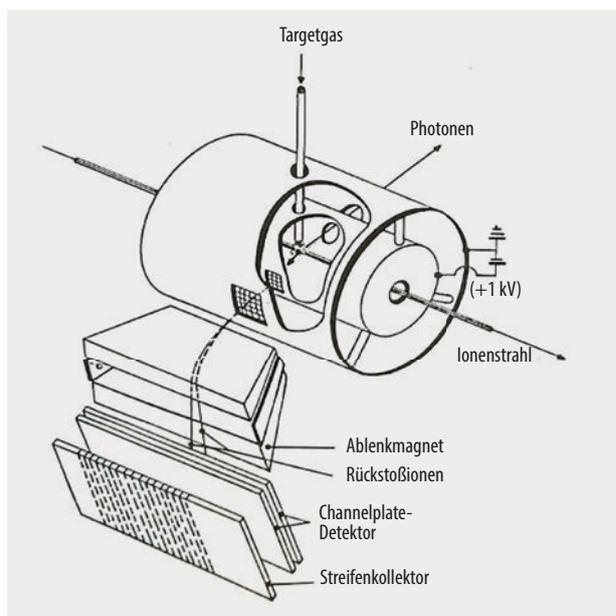


Abb. 2 So stellte sich das erste RIM-Spektrometer dar (vgl. Text).

formationen über den Zustand des Systems zum Zeitpunkt der Zerstörung ergeben. Gelungen ist dies für mehrere Teilchen in der Atomphysik erstmals mit dem „Reaktionsmikroskop“ (REMI, Abb. 1).

### Wie alles begann

Ausgangspunkt war somit das Ziel, eine „Zerstörung“ bzw. Reaktion kinematisch vollständig zu erfassen. Dies war damals nur für zwei Reaktionsprodukte – zwei Elektronen – in sogenannten ( $e, 2e$ )- oder ( $\gamma, 2e$ )-Experimenten möglich. Einzelne Elektronen oder Photonen trafen auf Atome, und zwei Elektronen wurden im Ausgangskanal impuls aufgelöst und zeitlich koinzident vermessen. Bei einer Nachweiswahrscheinlichkeit der beiden Elektronen von typischerweise eins zu einer Million war dies enorm zeitaufwändig und beschäftigte viele Gruppen weltweit über Jahrzehnte. Die Technik funktionierte außerdem nicht für Ionenbeschuss bei hohen Energien – zu meiner Anfangszeit ein hochmodernes Gebiet. Denn weder „verschwindet“ das Ion im Endkanal wie ein absorbiertes Photon, noch ist seine meist winzige Impulsänderung messbar. Gleichzeitig faszinierten diese Schwerionenstöße, welche auch Grundlage heutiger Krebstherapien sind. In einem einzigen Stoß konnte ein hochgeladenes Uran-Ion einem Argon-Atom innerhalb von Zeptosekunden ( $1 \text{ zs} = 10^{-21} \text{ s}$ ) alle Elektronen entreißen: Ein hochgeladenes, sehr erstaunlicherweise langsames „Rückstoßion“ war geboren. Wir wollten wissen, welche Dynamik diesem Prozess zugrundeliegt.

Da das Projektil seinen Impuls unmessbar wenig veränderte, galt es, den Impuls des Rückstoßions zu erfassen – das Thema meiner Doktorarbeit. Mit der eigens entwickelten Apparatur (Abb. 2) gelang dies weltweit erstmals in Experimenten an den Beschleunigern der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt: Aus einer Koinzidenzmessung mit dem gestreuten Projektil ergab

sich die Flugzeit von Neon-Targetionen transversal zur Strahlrichtung über eine Strecke von fünf Millimetern und damit ihr transversaler Impuls. Die anschließende magnetische Separation lieferte zusätzlich ihre Ladungszustände: Die Rückstoß-Ionenimpuls-Spektroskopie (Recoil-Ion Momentum Spectroscopy, RIMS) war geboren. Zu unserer großen Enttäuschung waren die meisten der übertragenen Impulse kleiner als diejenigen der thermischen Verteilung. Das Target musste gekühlt werden, was zur Entwicklung der „COLD Target RIMS“ oder COLTRIMS führte. Dies war Gegenstand der Doktorarbeit von Reinhard Dörner. In diesem Experiment, das in transversaler Richtung kinematisch vollständig war, ließ sich erstmals die Drei-Körper-Dynamik der Einfachionisation in schnellen Schwerionenstößen detailliert vermessen, was zu unserer ersten Veröffentlichung in den „Physical Review Letters“ führte.

Danach hielten kalte Targets Einzug. Hier wird Gas adiabatisch bei hohem Druck durch eine Öffnung mit 10 bis 50  $\mu\text{m}$  expandiert. Die Gruppe um Lewis Cocke zeigte, dass sich durch Anlegen eines schwachen Feldes in der Reaktionszone praktisch alle entstandenen Ionen hoch-effizient über den gesamten Raumwinkel nachweisen lassen. Die Messung von Auftreffort und Flugzeit lieferte den vollständigen Impulsvektor sowie ihren Ladungszustand. Damit und erstmals in Kombination mit einem kalten Target gelang eine hervorragende Impulsauflösung von  $\pm 0,13 \text{ a.u.}$  (Abb. 3), wobei 1 a.u. der Impuls eines Elektrons der Energie 13,6 eV ist. Fängt beispielsweise ein langsames Alpha-Teilchen mit etwa  $0,004 c$  ( $c$ : Lichtgeschwindigkeit) ein Elektron eines Helium-Atoms beim Stoß ein, erlaubte es diese Impulsauflösung zu unterscheiden, ob das Elektron in der K- oder L-Schale gelandet war. Eine Serie wunderbarer COLTRIMS-Experimente begann [2].

Parallel hatten wir an der GSI mit einer kleinen Gruppe eine COLTRIMS-Apparatur aufgebaut (Abb. 1). Gemeinsam mit Robert Moshhammer versuchten wir, Elektroneneinfangreaktionen zu vermessen. Die hohen Projektil-Geschwindigkeiten an der GSI von etwa  $0,1 c$  machten aber die Einfangwahrscheinlichkeit zu klein. Nach vielen enttäuschenden Versuchen kam uns in einer Nachtschicht die Idee, die viel wahrscheinlichere Ionisationsreaktion zu untersuchen und uns dafür einen zusätzlichen „Trigger“ zu verschaffen – also eine Signatur dafür, dass ein ionisierender Stoß stattgefunden hat.

Neben dem Ion entstehen auch immer eines oder mehrere Elektronen, die das schwache elektrische Feld für den Ionennachweis allerdings wenig beeindruckt. Aber ein schwaches Magnetfeld fängt die Elektronen ein und projiziert sie auf einen Detektor. Also wickelten wir nachts eine Spule (Abb. 4), erzeugten eine Helmholtz-Konfiguration entlang der Richtung des elektrischen Extraktionsfeldes, installierten gegenüber dem Ionendetektor einen ortsauflösenden Detektor für die Elektronen und schalteten diese in Koinzidenz – mit umwerfendem Resultat: Die Ereignisse ratterten nur so in die Datenanalyse, die Ionenimpulsverteilung entlang der Extraktionsachse war extrem schmal, die Spektren nahezu untergrundfrei!

Damit hatten wir ein hocheffizientes, hochauflösendes und in der Atomphysik vollständig neuartiges Spektrometer

für niederenergetische Elektronen bis etwa 100 eV gebaut, abhängig von der Stärke des Magnetfeldes. Der Nachweis eines Elektrons oder bei einer Multi-hit-Auslese mehrerer Elektronen erfolgte impuls aufgelöst mit hoher Auflösung in Koinzidenz zu einem oder mehreren Rückstoßionen über praktisch den gesamten relevanten Raumwinkel. Die Maschine nannten wir „Reaktionsmikroskop“ oder REMI.

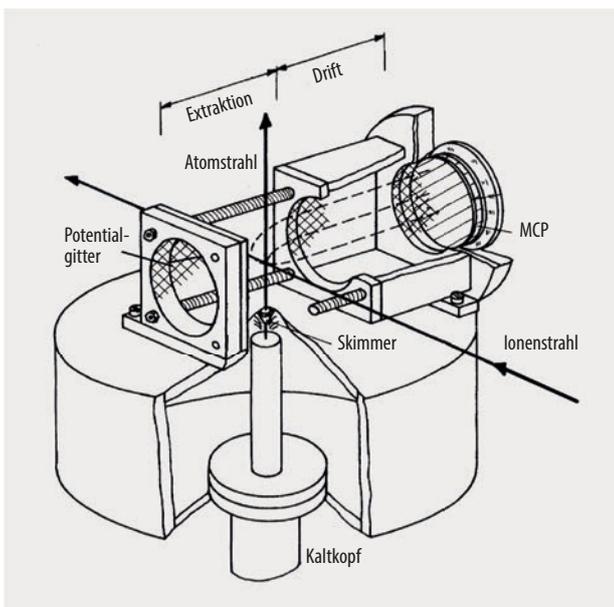
Das REMI brachte echte „Vielteilchen-Koinzidenz-techniken“, die in der Kern- und Elementarteilchenphysik bereits existierten, in die Atom- und Molekülphysik. Die korrelierte Vielteilchen-Quantendynamik ließ sich nun in praktisch allen Konstellationen hocheffizient erforschen: REMI- und COLTRIMS-Apparaturen sind universell einsetzbar, insbesondere auch in Kombination mit Ultrakurz-puls Lasern und Freie-Elektronen-Lasern (FEL) in Pump-Probe-Experimenten. Sie zählen heute zur Standardausrüstung in mehr als hundert Labors weltweit. Communities, die zuvor aufgrund sehr spezieller Apparaturen praktisch vollkommen getrennt agierten, wuchsen zusammen, wie die Laser-, Ionen- und Elektronenstoßphysik oder die Atom- und Molekülphysik an Synchrotrons.

### Schlüsselexperimente

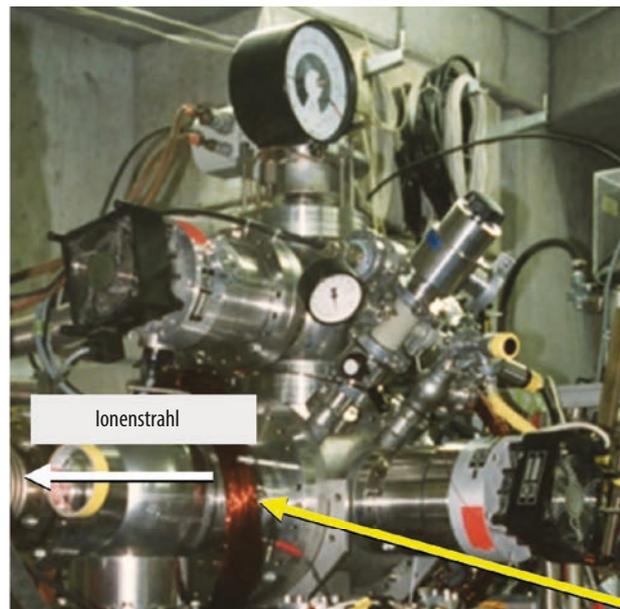
Ein früher „Augenöffner“ zur Dynamik der einfachen Ionisation bei hohen Projektilgeschwindigkeiten war ein Experiment zur Einfachionisation von He durch  $U^{92+}$ -Projektilen mit 1 GeV/u (0,88  $c$ ) vom Schwerionen-Synchrotron (SIS) der GSI (Abb. 5). Die Rückstoßenergie ist winzig und im Mittel kleiner als 2 meV bei Stößen mit 0,2 TeV-Projektilen. Der Impuls des auslaufenden Elektrons  $p_e$  wird praktisch vollständig vom Impuls des Rückstoßions  $p_R$  kompensiert. Beides ergibt die sehr kleine Impulsänderung des Projektils:  $\Delta p_P = -(p_e + p_R)$  – es würde gerade einmal drei Meter abge-

lenkt, wenn es von hier bis zum Mond flöge! Das Projektil liefert also lediglich Energie, nicht Impuls – sehr ähnlich zur Photoionisation durch Absorption, wo der Kern den Impuls des Photoelektrons fast vollständig aufnimmt. Tatsächlich kann man den zeitabhängigen elektromagnetischen Puls  $E(t)$  durch das Schwerion, das weit außerhalb des mittleren Atomradius von Helium vorbeifliegt, am Ort des Targets berechnen und in den Frequenzraum  $E(\omega)$  Fourier-transformieren. Wie Carl Friedrich von Weizsäcker und Evan James Williams vorgeschlagen haben [3], kann man dieses Feld quantisieren und erhält ein „virtuelles Lichtfeld“, d. h. eine Überlagerung von einer von der Frequenz abhängigen Zahl von „virtuellen“ Photonen  $N(\hbar\omega)$ , die das Atom „photoionisieren“. Ein solcher Puls ist extrem stark und kürzer als eine Attosekunde ( $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$ ). Dabei stellen sich Feldstärken von  $10^{11} \text{ V/cm}$  und Leistungsdichten von  $10^{21} \text{ W/cm}^2$  ein.

Da auch sehr hohe Frequenzen vertreten sind, können „alle“ Elektronen eines Atoms „gleichzeitig photoionisiert“ werden, deutlich schneller als eine typische Umlaufzeit im Atom. Ein hochgeladenes, langsames Rückstoßion entsteht: In Stößen mit  $U^{65+}$  (5,9 MeV/u) haben  $Ne^{6+}$ -Ionen überwiegend eine Energie unter 50 meV. Auch die Elektronenenergien liegen meist deutlich unter 100 eV und können äußerst effizient Doppelstrangbrüche in der DNA erzeugen. Neben der guten Positionierbarkeit und der hohen Energiedeposition von Ionen im Bragg-Peak begründet diese Eigenschaft die Effizienz der Tumortherapie mit Schwerionen im Vergleich zur Protonentherapie. Eine Messung der Elektronenimpulse ergibt eine Blitzlichtaufnahme einer korrelierten Vielelektronen-Wellenfunktion im Impulsraum: Das „Attosekunden-“ oder „Heisenberg-Mikroskop“ [4, 5] sollte die korrelierte Bewegung von Elektronen in Vielelektronen-Atomen sichtbar machen und ist an der Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR) geplant.



**Abb. 3** Das erste moderne COLTRIMS-Spektrometer besaß einen gekühlten Überschalljet als Target und eine elektrische Extraktion der Ionen auf einen orts- und zeitaufösenden Detektor, der später auch eine Multi-hit-Auslese ermöglichte.



**Abb. 4** Das erste Reaktionsmikroskop arbeitete noch mit handgewickelten und sehr provisorischen Spulen (gelber Pfeil).

Die vielen COLTRIMS- oder REMI-Experimente hier auch nur annähernd zu würdigen, ist unmöglich [2]. Daher möchte ich nur einige Schlüsselexperimente erwähnen:

- 1996: „Sattelpunktelektronen“ sind Elektronen, die im klassischen Bild auf dem „Sattel“ des Coulomb-Potentials zwischen Projektil und Target in langsamen Stößen „stranden“. Sie wurden 1983 vorausgesagt. Quantenmechanisch werden sie über koppelnde quasi-molekulare Orbitale ins Kontinuum gehoben. Dabei bilden sich „Wirbel“ in der zeitabhängigen Elektronendichte, die 2014 beobachtet wurden.

- 1997: Ein von Llewellyn Thomas 1927 im klassischen Bild vorgeschlagener doppelter Stoßprozess, der zum Einfang eines Elektrons in ein schnelles Projektil-Ion führt, ließ sich 70 Jahre später erstmals zweifelsfrei nachweisen.

- 1998: In schnellen Stößen ergibt sich aus dem generalisierten Wignerschen Schwellengesetz aufgrund der langen Reichweite des Coulomb-Potentials eine Singularität in der Verteilung emittierter Elektronen bei  $v = 0$  relativ zum Target. Diese konnte mehr als 15 Jahre nach ihrer Vorhersage eindeutig nachgewiesen und detailliert untersucht werden.

- 1999: Die ersten kinematisch vollständigen ( $e, 3e$ )-Experimente an Helium gelingen und zeigen plastisch allgemeine Strukturen und Symmetrien.

- 2000: Das Herz der „Attosekunden-Physik“, der „Re-Kollisionsmechanismus“ in starken Laserfeldern, wird nachgewiesen und eröffnet ein komplett neues Forschungsfeld.

- 2004: Der eindeutige Nachweis des 1997 vorhergesagten „interatomaren Coulomb-Zerfalls“ (ICD), eines sehr schnellen Zerfallsprozesses, gelingt. Dieser ließ sich auch in biologischen Systemen nachweisen (siehe unten) – mit großer Auswirkung für die Strahlentherapie.

- 2008: Tunnelzeiten (Wigner-Zeit) von wenigen Attosekunden durch laserinduzierte Barrieren werden beobachtet und bis heute diskutiert.

- 2010: Die Zeit für eine Isomerisation, also das Wandern eines Protons über ein Molekül hinweg, ergab sich in VUV-

VUV-Pump-Probe-Experimenten bei Azetylen-Ionen am Freie-Elektronenlaser FLASH in Hamburg zu etwa 50 fs.

- 2013: Ein HD-Molekül dient als isotopensignierter „flexibler“ Doppelspalt und die Messung seiner Impulsaufnahme realisiert das Einstein-Bohr-„Gedankenexperiment“.

- 2015: Der Nachweis der wohl exotischsten gebundenen Moleküle im Universum, sogenannte Efimov-Trimere (vorhergesagt 1977), gelingt ebenso wie die genaue Vermessung der Struktur und der Bindungsenergie  $E_B$  von Grund- und erstem angeregten Zustand mit  $E_{Ba} = 2,6 \pm 0,2$  mK ( $\pm 90$  neV!).

- 2017: An FELs setzen Moleküle in einem Puls von wenigen Femtosekunden bis zu 50 Elektronen frei – viel mehr als individuelle Atome, was nur ein ultraschneller Ladungstransfer während des Pulses erklären kann [6].

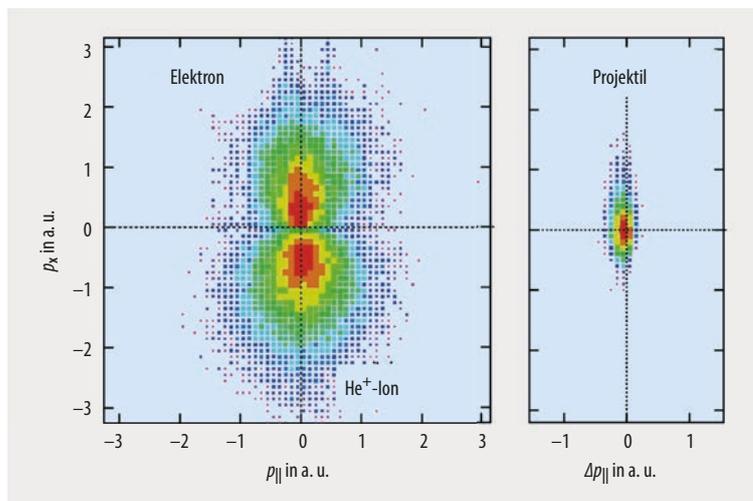
- 2021: Am einfachsten und fundamentalen chiralen System, einem laserangeregten Li-Atom in einer optischen Falle, lässt sich starker zirkularer Dichroismus verbunden mit Helizität-abhängiger Autler-Townes-Aufspaltung nachweisen [7].

## Wege in die Zukunft

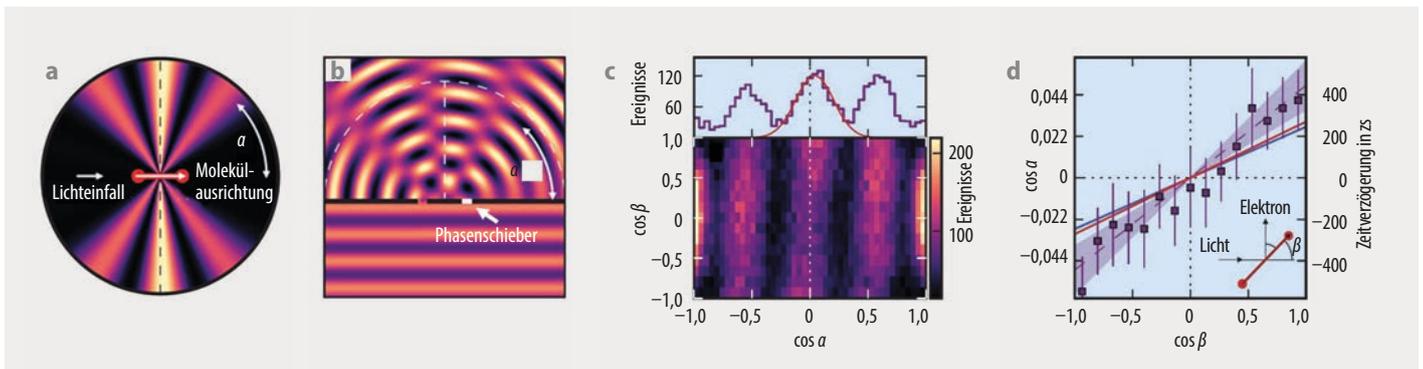
Experimente auf der Zeitskala von Atto- und Zeptosekunden stehen an der Schwelle ihres Durchbruches. Mit neuen hochintensiven Quellen für ultra-kurze optische, Röntgen- und relativistische Schwerionenpulse sowie insbesondere MHz-Pulsraten entfaltet das REMI seine eigentliche Stärke, da es bei hohen Pulsraten einsetzbar ist. Damit lassen sich sehr schnell große Datenmengen aufnehmen.

In einem wunderbaren Experiment gelang es, eine Zeitverzögerung bei der molekularen Photoionisation [8] nachzuweisen, je nachdem wo im Molekül das Photoelektron geboren wurde. Hier ionisiert ein linkshändig polarisiertes Photon (800 eV) ein entlang der Strahlachse ausgerichtetes  $H_2$ -Molekül zweifach. Die beiden Protonen werden zusammen mit einem Elektron nachgewiesen. Das Photon trifft wegen seiner endlichen Geschwindigkeit zu unterschiedlichen Zeiten Teile der molekularen Wellenfunktion an den beiden H-Atomen und erzeugt dort schnelle Photoelektronen (**Abb. 6a, b**). Für eine mittlere Bindungslänge ( $0,74 \pm 0,02$  Å) beträgt der Zeitunterschied 247 zs. Dies entspricht einem Doppelspaltversuch mit phasenverzögert geöffneten Spalten. Das entstehende Interferenzmuster des schnellen Photoelektrons ( $735 \pm 15$  eV) ist somit nicht mehr symmetrisch  $90^\circ$  relativ zur Strahlachse. Aus der Verkipfung des Musters in Abhängigkeit von den beiden Winkeln  $\alpha$  und  $\beta$  (**Abb. 6c**) lässt sich die „Geburtszeitverzögerung“ extrahieren. Sie liegt nahe am erwarteten Wert, wenn zur Phasenverzögerung durch die unterschiedliche Auftreffzeit (blaue Linie) auch Nicht-Dipol-Anteile der Photonenwechselwirkung hinzukommen (rote Linie).

Ähnliche Experimente werden an der zukünftigen FAIR-Anlage möglich, wenn virtuelle Zeptosekunden-Lichtpulse hochgeladener relativistischer Schwerionen Atome und Moleküle beleuchten. Das verspricht einmalige Einblicke in korrelierte Vielelektronen-Wellenfunktionen, auch in Pump-Probe-Szenarien mit Hochrepetitionslasern. Zwei technische Entwicklungen zur Abbildung molekularer



**Abb. 5** Zu sehen ist die Projektion der Impulse von Projektil,  $He^+$ -Ion und Elektron auf eine Ebene parallel ( $p_{||}$ ) und senkrecht ( $p_x$ ) zur Strahlrichtung, die der Impuls des gestreuten  $He^+$ -Ions definiert.



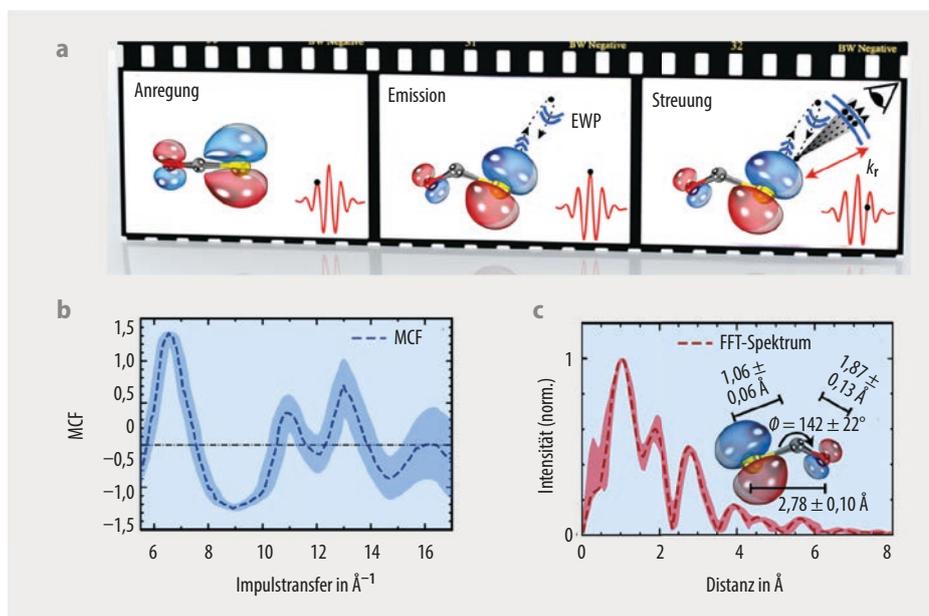
**Abb. 6** Ein entlang des Photonenstrahls ausgerichtetes Molekül (a) wirkt als Doppelspalt-Emitter von Photoelektronen (b), die mit Phasenverzögerung an den beiden Atomen des Moleküls geboren werden und zu einer winkelabhängigen Verschiebung des Interferenzmusters führen (c). Aus dieser lässt sich dann die „Geburtszeitverzögerung“ der Photoelektronen extrahieren (d, vgl. Text).

Strukturen (der Konfiguration der Kerne) mittels licht-erzeugter schneller Elektronen im Attosekundenbereich haben das Potenzial, in Kombination mit REMIs chemische Reaktionen auf ihrer intrinsischen Zeit- und Ortsskala (Sub-Femtosekunden und Ångström) zu beobachten.

Bei der „Laser-Induced Electron Diffraction“ (LIED-Technologie) wird ein Elektron während eines Maximums im Laserzyklus durch Feld- oder Tunnelionisation geboren (**Abb. 7a**), vom Feld des Lasers zunächst vom Muttermolekül weggetragen, jedoch im nächsten Zyklus bei umgekehrter Feldrichtung des Lasers auf dieses zurückgeschleudert und an ihm gestreut [9]. Aus dem Streubild (**Abb. 7b**) des hier untersuchten  $\text{OCS}^+$ -Ions lässt sich, beispielsweise über Fourier-Transformation, die Struktur des Moleküls berechnen (**Abb. 7c**). Da der Rückstreuzeitpunkt innerhalb von wenigen Hundert Attosekunden festgelegt ist, lassen sich Strukturänderungen, die im vorangegangenen Teil des Laserpulses auftreten, mit Sub-Femtosekunden-Zeitauflösung und Pikometer-Ortsauflösung erfassen – in einer „Intrapuls-Pump-Probe-Konfiguration“. Ein phasenstabilisierter Infrarot-Puls mit wenigen Zyklen

( $\Delta t = 96$  fs (FWHM),  $\lambda = 3,2$   $\mu\text{m}$ , 160 kHz) erzeugt bei großen Wellenlängen hohe Rückstreuenergien von bis zu 900 eV. Das REMI ist entscheidend, weil sich damit die Impulse der Ionen und ihre Massen zur Separation verschiedener Kanäle sowie die Impulsverteilung des gestreuten Elektrons mit großer Akzeptanz dreidimensional vermessen lassen. Im gezeigten Experiment ergaben sich die Bindungslängen zu  $R_{\text{CO}} = 1,06 \pm 0,06$  Å,  $R_{\text{CS}} = 1,87 \pm 0,13$  Å und  $R_{\text{OS}} = 2,78 \pm 0,10$  Å in guter Übereinstimmung mit anderen Messungen. Der Winkel  $\Phi_{\text{OCS}} = 142 \pm 22^\circ$  weicht allerdings vom feldfreien Wert von  $\Phi_{\text{OCS}} = 180^\circ$  ab. Quantenchemische Rechnungen zeigen, dass vorwiegende Ionisation des angeregten  $2_1A'$ -Zustandes diesen Biegewinkel hervorruft. Dieser Zustand wird über feldmodifizierte Zustände („dressed states“) und den Renner-Teller-Effekt in der ansteigenden Flanke des Laserpulses bevölkert.

Der zweite Weg wird durch Röntgen-FELs bei hohen Pulsraten wie am European XFEL möglich, wie kürzlich in einem Experiment an  $\text{O}_2$ -Molekülen überzeugend demonstriert wurde (**Abb. 8**). Ein 670-eV-Photon ionisiert die innere Schale eines Atoms des  $\text{O}_2$ -Moleküls mit einer



**Abb. 7** Bei der LIED-Technologie (a) erhält man aus dem Streumuster (b) nach Fourier-Transformation die Bindungslängen und Winkel des  $\text{OCS}$ -Moleküls (c), vgl. Text.

effektiven Pulsrate von 420 Hz und einer Pulslänge von 25 fs. Ein Photoelektron von 127 eV verlässt das Molekül. Dieses ist nach Auger-Zerfall der K-Vakanz doppelt geladen, dissoziiert und wird bei verschiedenen Abständen  $R$  von einem zweiten Photon im gleichen Puls getroffen. Der Abstand  $R$  ergibt sich indirekt und wegen verschiedener beitragender Dissoziationspfade nur ungefähr aus der kinetischen Energie der Fragmente (Kinetic Energy Release, KER). Das dazugehörige Photoelektron mit einer Energie zwischen 80 eV und 105 eV, die von der Emissionszeit abhängt, „beleuchtet das dissoziierende Molekül von innen“. Es streut so, dass sich aus den Streubildern bei verschiedenen Abständen (**Abb. 7c**) die Struktur des dissoziierenden Moleküls (hier der Abstand zwischen den beiden Atomen) zum Zeitpunkt der zweiten Absorption bestimmen lässt. Koinzident nachgewiesen werden die Impulse von erzeugten  $O^+$ - und  $O^{3+}$ -Ionen, die unter anderem die Molekülachse festlegen, sowie der beiden Photoelektronen.

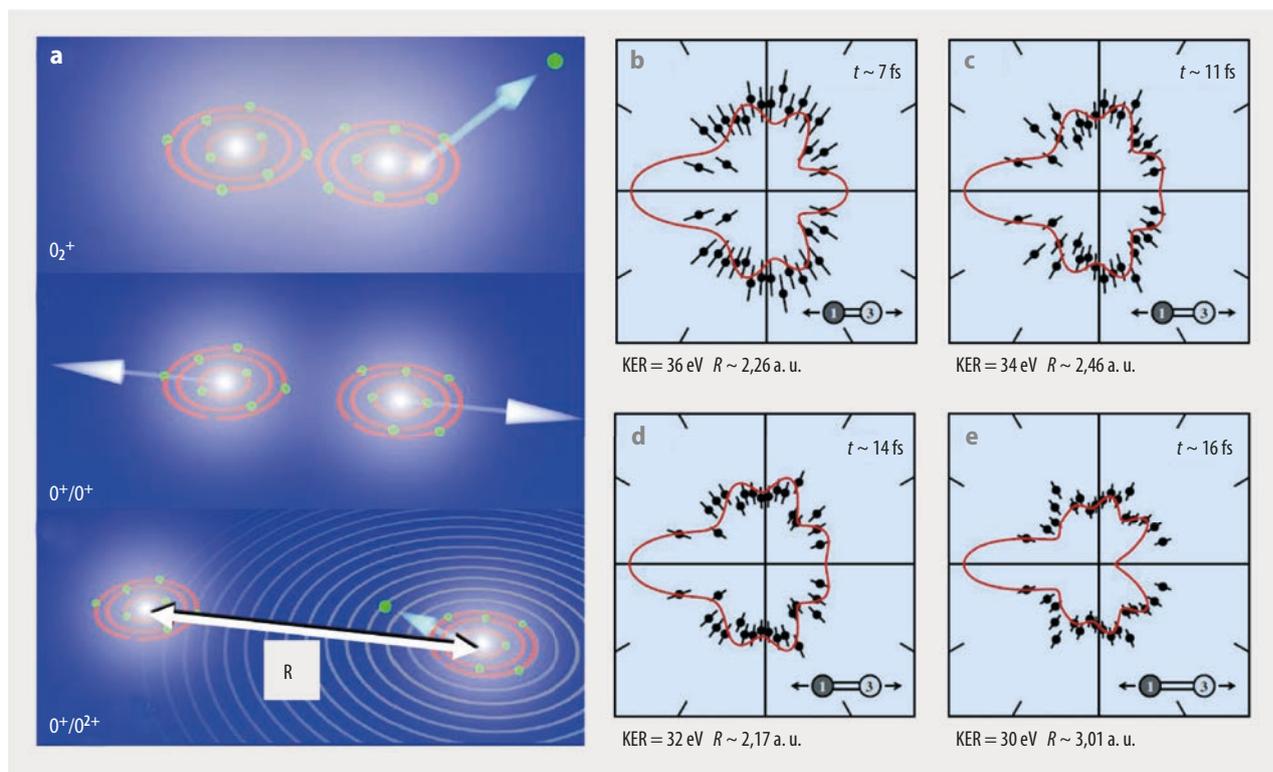
Das Experiment zeigt beeindruckend, dass Mehrfachkoinzidenzen an XFELs mit hohen Pulsraten routinemäßig messbar sind. In Zukunft ermöglicht dies systematische Pump-Probe-Experimente an einfachen Molekülen, in denen ein optischer Laser gezielt eine molekulare Reaktion auslöst und das Photoelektron aus dem Röntgenpuls dessen Struktur nach definierter Verzögerung erfasst. Die Struktur ist auch mittels „Coulomb-Explosion-Imaging“ zu bestimmen. Dies gelang mit hochintensiven XFEL-Pulsen mit 2 keV an  $C_3H_4IN$ -Molekülen durch die impuls aufgelöste Aufnahme von 8-fach-Koinzidenzen [11]. Mit Sicherheit stehen bald sowohl Attosekunden-Infrarot-Pump- als auch Röntgen-Probe-Pulse zur Verfügung. Diese erlauben Auf-

lösungen von Attosekunden- und Pikometern und erfüllen den Traum vom „Molecular Movie“ – der Beobachtung der korrelierten Bewegung von Kernen und Elektronen unter Einsatz von REMIs.

Diese Experimente zeigen, dass der Siegeszug unserer Apparaturen erst begonnen hat. Er reicht von der Untersuchung der fundamentalsten Fragen korrelierter Quantendynamik über die grundlegende Dynamik in der Chemie bis hin zu den Geheimnissen des Lebens in biologisch relevanten Molekülen. Vor Kurzem gelang es, ultraschnelle Relaxationsprozesse [12] sowie den Einfluss wässriger Umgebung auf Zerstörprozesse erstmals mit einem REMI nachzuweisen.

**Danksagung**

Ich hatte das große Privileg, meine Diplom- und Doktorarbeit in einer innovativen, offenen, experimentierfreudigen Gruppe um H. Schmidt-Böcking anfertigen zu können. Dazu gehörte auch, Fehler machen zu dürfen. Die Stoßphysik-Community, in der ich wissenschaftlich groß wurde, war kompetitiv, aber immer, wenn es darauf ankam, unterstützend, wofür ich mich bei C. L. Cocke, B. Fricke, E. Salzborn, R. Dreizler, insbesondere H.-J. Kluge und vielen anderen bedanken möchte. Ohne die nCTMC-Methode von R. Olson hätten wir vieles Überraschende nicht verstanden. Das größte Privileg war es aber, mit so vielen engagierten, inspirierenden und einfallreichen Kolleg:innen und Mitarbeiter:innen, von denen ich nur wenige nennen konnte, zusammenarbeiten zu dürfen. Die Unterstützung durch die DFG, den Leibniz-Preis, durch das BMBF und nicht zuletzt durch die MPG haben uns unendliche Freiheit zu forschen gegeben.



**Abb. 8** Wird eine molekulare Reaktion von innen beleuchtet (a), ergeben sich Streubilder zu verschiedenen Zeiten und Abständen  $R$  während der Dissoziation (b – e, schwarz). Die Daten passen gut zu berechneten Werten (rot).

## Literatur

- [1] P. A. M. Dirac, Proc. Roy. Soc. London **A123**, 714 (1929)  
 [2] J. Ullrich et al., J. Phys. B **30**, 2917 (1997); R. Dörner et al., Phys. Rep. **330**, 95 (2000); J. Ullrich et al., Rep. Prog. Phys. **66**, 1463 (2003); J. Ullrich, J. Phys. B **49**, 210502 (2016); T. Jahnke et al., High-Resolution Momentum Imaging, in: B. Friedrich und H. Schmidt-Böcking (Eds.), Molecular Beams in Physics and Chemistry, Springer, Cham (2021)  
 [3] C. F. von Weizsäcker, Z. Phys. **88**, 612 (1934); E. J. Williams, Phys. Rev. **45**, 729 (1934)  
 [4] W. Heisenberg, Z. Phys. **43**, 172 (1927)  
 [5] J. Ullrich, R. Moshhammer und R. Dörner, Phys. Bl. **54**, 140 (1998)  
 [6] A. Rudenko, Nature **546**, 129 (2017)  
 [7] A. H. N. C. De Silva et al., Phys. Rev. Lett. **126**, 023201 (2021)  
 [8] S. Grundmann et al., Science **370**, 339 (2020)  
 [9] A. Sanchez et al., Structural Dynamics (akzeptiert)  
 [10] G. Kastirke et al., Phys. Rev. X **10**, 021052 (2020)  
 [11] R. Boll et al., (private Mitteilung)  
 [12] X. Ren et al., Nat. Phys. **14**, 1062 (2018)  
 [13] E. Wang et al., Nat. Comm. **11**, 2194 (2020)

## Der Autor



**Joachim Ullrich** studierte Geophysik und Physik an der Universität Frankfurt, wo er auch promovierte, und ging dann an die GSI in Darmstadt. Nach verschiedenen Gastprofessuren in den USA wurde er nach Freiburg und dann als Direktor ans Max-Planck-Institut für Kernphysik nach Heidelberg berufen. Er erhielt zahlreiche

Preise, darunter den Leibniz-Preis der DFG. Seit 2012 ist er Präsident der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. Er ist Mitglied der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaft und in vielen Gremien tätig, unter anderem als Vizepräsident des International Committee for Weights and Measures (CIPM). In der (leider zu kurzen) Freizeit widmet er sich seiner Familie und fährt mit Begeisterung Fahrrad.

**Prof. Dr. Joachim Ullrich**, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

**PFEIFFER**  **VACUUM**



# HiPace® Turbopumpen

Für höchste Anforderungen an perfekte Vakuumlösungen

- Einzigartige Rotorkonstruktion mit bewährter Hybridlagerung
- Hohe Kompression von leichten Gasen
- Minimaler Platzbedarf durch kompakte Bauweise
- Verlängerte Wartungsintervalle
- Lagerwechsel vor Ort
- Geringe Vibrationen durch patentierte Laser Balancing™-Technologie

Sie suchen eine perfekte Vakuumlösung? Sprechen Sie uns an:

**Pfeiffer Vacuum GmbH** · Germany · T +49 6441 802-0 · [www.pfeiffer-vacuum.com](http://www.pfeiffer-vacuum.com)