

Eschenholz sprengt die Grenzen des Holzbaus Seite 58

Wozu das Antimaterie-Experiment am Cern gut ist Seite 59

Ausdauertraining verlangsamt Leistungsabbau im Alter Seite 59

Eine grüne Körperfarbe schützt Blattläuse vor Marienkäfern Seite 59

Die perfekte Welle

Wie Forscher mit massgeschneiderten Lichtblitzen chemische Bindungen manipulieren

Laser haben verschiedenste Forschungsgebiete massgeblich verändert. Jetzt geht der Trend dahin, Laserlicht für spezielle Aufgaben nach Mass zu schneiden.

Helga Rietz

Beinahe mutet das Forschungsvorhaben wie das Hirngespinn eines Alchimisten an: Chemische Reaktionen könnten manipuliert, schwer synthetisierbare Stoffe hergestellt werden – und all das mit nichts als Licht. Massgeschneiderte Lichtblitze, so die Theorie, könnten die mikroskopische Welt der Moleküle nach Belieben steuern. In jüngster Zeit verzeichnet die «kohärente Kontrolle» – so heisst die Chemie mit massgeschneidertem Licht in Fachkreisen – allerdings auf ganz anderem Terrain Erfolge: Unter anderem könnten Mikroskope und Geräte zur Analyse von Flüssigkeiten und Gasen künftig von den Technologien profitieren, an deren Anfang einmal der alte Wunschtraum der Chemiker stand, nach Belieben in die Welt der Moleküle eingreifen zu können.

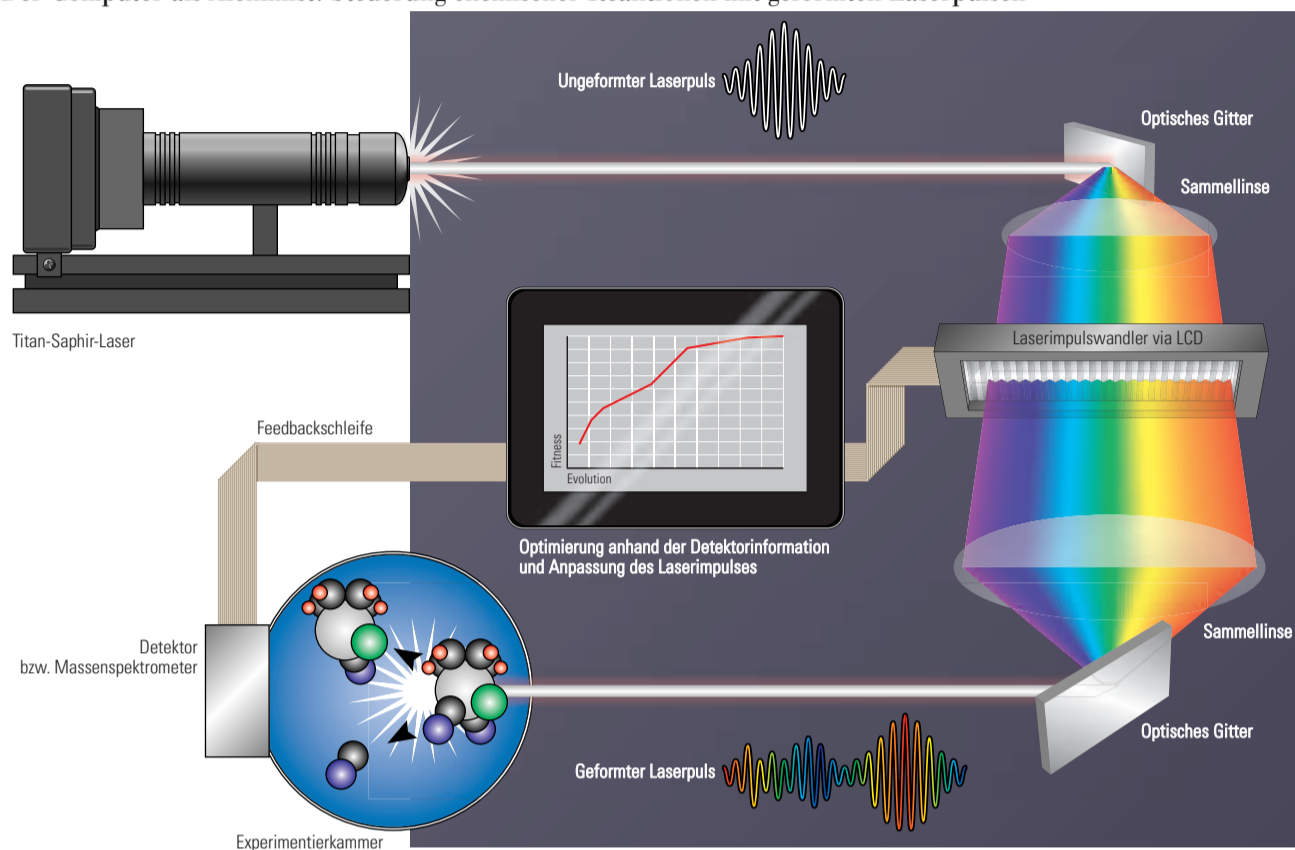
Licht als Katalysator

Die Idee, die mikroskopische Welt der Moleküle mit Laserlicht zu manipulieren, ist fast so alt wie der Laser selbst. Dazu braucht man sich nur vor Augen zu führen, dass die Quantenmechanik, auch wenn dort immer mit Wahrscheinlichkeiten gerechnet wird, eine ziemlich deterministische Angelegenheit ist. Für die Entwicklung eines Quantenobjekts gibt es nur eine einzige, festgelegte Möglichkeit, die nur von den Eigenschaften des Objekts und den darauf wirkenden Kräften bestimmt wird. Wer diese Kräfte beherrscht, kann folglich auf die Entwicklung Einfluss nehmen – zum Beispiel steuern, welche chemischen Bindungen innerhalb eines Moleküls gekappt, welche neu geknüpft werden. Das ist leichter gesagt als getan. Wie zerrt man an einem Atomkern? Wie verschiebt man Elektronen innerhalb eines Moleküls? Da die Akteure, die Elektronen und Atomkerne, elektrisch geladen sind, lassen sie sich mit elektrischen Feldern beeinflussen – die wiederum ein Laserstrahl wohl dosiert zur Verfügung stellen kann. Jedenfalls wenn es gelingt, dessen Frequenz, Polarisation und Intensität genau so einzustellen wie für ein bestimmtes Molekül notwendig.

Dabei kam den Forschern die rasante Entwicklung moderner Laser in den 1980er und 1990er Jahren zu Hilfe. Mit den Titan-Saphir-Lasern standen neuerdings Lichtquellen zur Verfügung, die anders als die Geräte der Laserpioniere Licht in sehr kurzen Blitzen lieferten und deren Frequenz – die die Farbe des Lichtes bestimmt – einen grossen Bereich überspannte. Solche Laserpulse lassen sich formen. Dazu durchläuft der Laserstrahl ein Gitter, das das Licht verschiedener Farben unterschiedlich stark ablenkt. Nun können die verschiedenfarbigen Strahlen einzeln beeinflusst werden. Meist verändern die Forscher deren Intensität, oder sie entlassen bestimmte Farben ein klein wenig später als andere auf ihren Weg durch ein zweites Gitter, das alle Strahlen wieder zu einem Laserpuls zusammenführt.

Das Resultat ist ein Lichtblitz, bei dem verschiedene Farben und Intensitäten aufeinanderfolgen; in gewisser Weise das optische Analogon einer Melodie. Das Zusammenspiel von Lichtblitz und Molekül kann man sich dann – wenn man der Einfachheit halber ein paar quantenmechanische Besonderheiten ausser acht lässt – so vorstellen, als bewegten sich die Atome eines Moleküls auf einer hügeligen Oberfläche, bei der benachbarte Täler verschie-

Der Computer als Alchimist: Steuerung chemischer Reaktionen mit geformten Laserpulsen



QUELLE: «PHYSIKALISCHE BLÄTTER» 57, 4 (2001), T. BRIXNER UND G. GERBER

NZZ-INFOGRAFIK/ict.

denen molekularen Konfigurationen entsprechen. Der Lichtblitz mit seiner festgelegten Abfolge von Intensitäten und Frequenzen schiebt die Atomkerne auf dieser Fläche so umher, dass sich das gewünschte Molekül formt.

Bleibt die Frage, wie die genaue Form des Laserpulses ausfindig zu machen ist, die das gewünschte Ergebnis herbeiführt. Eine Antwort darauf weiss die Mathematik – theoretisch. Denn die numerische Beschreibung von Laserpuls und Molekül ist aufwendig, und sie setzt voraus, dass man über die Vorgänge im Molekül en détail Bescheid weiss – genauer, als das bis heute der Fall ist. Einen Ausweg aus diesem Dilemma fand Hershel Rabitz, Forscher an der Princeton University. Er schlug vor, die Suche nach dem passenden Puls einem selbst lernenden Algorithmus zu überlassen. Dabei werden, gesteuert von einem Computerprogramm, viele verschiedene Pulsformen ausprobiert und daraufhin geprüft, ob sie das gewünschte Ergebnis erzielen. Der Algorithmus findet so innert kurzer Zeit die optimale Pulsform, die für das jeweilige Experiment perfekte Lichtwelle.

Um die Jahrtausendwende berichteten gleich mehrere Forschungsgruppen von ersten Erfolgen bei der experimentellen Umsetzung dieser Ideen, allen voran die Arbeitsgruppen von Kent Wilson an der University of California sowie Gustav Gerber an der Universität Würzburg.¹ Wenig später gelang Marcus Motzkus und seinen Mitarbeitern am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching, mit kohärenter Kontrolle die Ausbeute einer Photosynthese-Reaktion zu steuern. Dank den Algorithmen mussten sich die Forscher nun nicht mehr um die genauen Vorgänge im Molekül bemühen – der Vergleich zwischen dem erreichten und dem erwünschten Resultat reichte.

Die Stunde des Ingenieurs

Jetzt schien alles nur noch eine Frage der Technologie, die Stunde des Ingenieurs gekommen. Berechtigter Stolz und grosse Euphorie kennzeichnen eine Flutwelle von Publikationen in den ersten Jahren des neuen Jahrtausends. Dass Ahmed Zewail für seine Arbeiten mit kurzen Laserpulsen 1999 den Nobelpreis erhalten hatte, befeuerte das internationale Interesse an dem benachbarten Forschungsbereich der kohärenten Kontrolle. In Europa und den USA durften sich Patentanwälte mit der

neuen Technologie vertraut machen. Massgeschneidertes Laserlicht, so die Hoffnung, könnte einst als «photonischer Katalysator» in die Prozesse der chemischen Industrie Einzug halten.

Davon ist bis jetzt nichts zu spüren. Die Technologie der kohärenten Kontrolle ist über das Stadium eines Laborphänomens noch nicht hinausgekommen, noch immer sind es nur vereinzelte Moleküle mit ganz speziellen Eigenschaften, die sich per Laserpuls zähmen lassen. Ist der Forschungszweig in eine Sackgasse geraten? Motzkus, der inzwischen an der Universität Heidelberg forscht, widerspricht: Auch wenn die frühen Versprechen noch nicht eingelöst worden seien, bestehe noch immer ein grosses Interesse an den Methoden der kohärenten Kontrolle. Die Schwierigkeiten lägen darin begründet, dass per kohärenter Kontrolle immer nur winzige Stoffmengen beeinflusst würden – industrielle Massstäbe sehen anders aus. Hinzu kommt, dass die kohärente Kontrolle mit Laser und Pulsformer reichlich kostspielige, wartungsintensive Gerätschaften benötigt. «Photonen nach Mass sind eben teuer», fasst Motzkus lapidar zusammen.

Das Interesse der chemischen Industrie ist trotzdem geweckt. Horst Weiss von der BASF in Ludwigshafen sieht ein grosses Potenzial für industrielle Anwendungen der kohärenten Kontrolle, allerdings auf eher indirektem Weg, etwa bei der systematischen Suche nach geeigneten Katalysatoren. Deren Entwicklung sei stets ein sehr langwieriger und teurer Prozess. Deshalb hat die BASF zusammen mit der Würzburger Forschungsgruppe mit Gerber untersucht, ob über kohärente Kontrolle Katalysewege für Reaktionen gefunden werden können, die bisher so nicht möglich sind. Ein Teil der Ergebnisse wurde unlängst veröffentlicht.² Mittels kohärenter Kontrolle wirklich etwas herzustellen, also ein bestimmtes Produkt zu synthetisieren, hält Weiss hingegen für derzeit utopisch.

Motzkus erwartet im Zuge der Entwicklung neuer Lasertypen auch einen deutlichen Anstieg bei den Experimenten zur kohärenten Kontrolle. Momentan seien Titan-Saphir-Laser das Arbeitspferd seines Forschungszweigs, echte Alternativen gebe es nicht. «Die Frequenzen, die dieser Lasertyp liefert, liegen im infraroten Bereich und decken damit nur einen ganz kleinen Teil dessen ab, was chemisch für eine Steuerung mit massgeschneidertem Licht in Frage

käme», sagt Motzkus. Mit einem ultravioletten Pendant des Titan-Saphir-Lasers, an dem bereits in zahlreichen Labors gearbeitet wird, werden daher bald neue Prozesse für die kohärente Kontrolle in Frage kommen.

Analyse statt Steuerung

Derweil kommt so manches ungelöste Problem der kohärenten Kontrolle einem neuen Trend noch zugute. Geformte Laserpulse nicht zur Steuerung von Reaktionen, sondern als diagnostisches Werkzeug einzusetzen, ist eine neue Stossrichtung, die auch Jean-Pierre Wolf von der Universität de Genève verfolgt. Er arbeitet daran, die Techniken der kohärenten Kontrolle für biomedizinische Anwendungen nutzbar zu machen. Die jüngsten Ergebnisse seiner Arbeitsgruppe belegen bereits, dass wichtige Proteinbausteine mittels geformter Lichtblitze identifiziert werden können, die anderweitig nur mit Mühe unterscheidbar sind.³ Das ist immer dann gefragt, wenn vor gefährlichen Stoffen gewarnt, ein Grenzwert überwacht werden muss. Die normale Atemluft enthält üblicherweise rund eine Million Bakterien pro Kubikmeter, erklärt Wolf, aber bei Seuchengefahr müssten wenige, dafür potenziell schädliche Krankheitserreger unter ihnen erkannt werden. Mit konventioneller Spektroskopie sei das nicht zu bewerkstelligen, dafür seien sich die dort verwendeten Signaturen viel zu ähnlich. Die sensiblen Techniken der kohärenten Kontrolle könnten hier Abhilfe schaffen, obwohl sie anfangs für ganz andere Ziele entwickelt wurden.

«Unsere Idee beruht auf der Erkenntnis, dass jedes Molekül auf eine ganz bestimmte Pulsform reagiert», sagt Wolf. Dieser könne das Molekül daher wie ein Fingerabdruck codieren. Da Bakterien, Viren – und nach neuesten Erkenntnissen auch Krebszellen – spezifische Proteine an ihrer Oberfläche tragen, die bei Bestrahlung mit geformtem Laserlicht fluoreszieren, könnten auf diesem Weg Krankheitserreger verlässlich entlarvt werden. «Noch sind wir weit vom eigentlichen Ziel entfernt», betont Wolf. Sollte sich die Methode aber bewähren, eröffne sich für die Diagnostik mit geformten Lichtblitzen ein weites Feld von Anwendungen bis hin zur Früherkennung von Krebs.

¹ Science 288, 824 (2000); ² PNAS 107, 10366–10370 (2010); ³ Physical Review Letters 105, 073003 (2010).

Kinder helfen keinen Fiesen

Moralabhängiges Sozialverhalten

bef. · Kleinkinder helfen andern Menschen schon in frühem Alter, sie sind aber keineswegs allen Mitmenschen gegenüber gleich hilfsbereit, wie dies Wissenschaftler bisher angenommen haben. Vielmehr erkennen bereits Dreijährige böse Absichten anderer und lassen destruktiven Menschen deutlich weniger Hilfe zuteilwerden. Dies haben Entwicklungspsychologen um Amrisha Vaish am Max-Planck-Institut für Evolutionäre Anthropologie in Leipzig mit Verhaltenstests bei Dreijährigen herausgefunden.¹ Die Kinder reagieren somit schon früh auf das moralische Verhalten anderer und zeigen Ansätze eines von Erwachsenen bekannten Verhaltensmusters, nämlich Hilfsbereitschaft zu erwidern und destruktiven Menschen aus dem Weg zu gehen oder sie gar abzustrafen.

Kinder erkennen Absicht

Bei den Tests lernte ein Kind eine erwachsene Schauspielerin als entweder hilfsbereit oder fies kennen. So half die Schauspielerin vor den Augen des Kindes einer dritten Person beispielsweise, eine irrtümlich zerrissene Zeichnung oder eine fallengelassene Figur zu reparieren, oder sie zeigte sich destruktiv, indem sie die Zeichnung einer dritten Person absichtlich zerriss oder eine von dieser Person hergestellte Figur zerstörte. Anschliessend begannen die Schauspielerin und eine vierte, neutrale Person je mit einem einfachen Puzzlespiel, zu dem ihnen jeweils ein Teil fehlte, in dessen Besitz das Kind war. Aus dem Umstand, wem das Kind das fehlende Puzzleteil allenfalls überreichte, schlossen die Forscher auf dessen Hilfsbereitschaft. Zeigte sich die Schauspielerin hilfsbereit, erhielt sie das Teil in 11 von 18 Fällen, zeigte sie sich destruktiv, in 4 von 18 Fällen.

Allerdings ist es nicht nur das destruktive Handeln, das Kinder mit unterlassener Hilfsbereitschaft bestrafen, sondern auch die Absicht dazu, wie die Wissenschaftler mit weiteren, ähnlich aufgebauten Tests herausfanden. Die Schauspielerin zerstörte dazu Zeichnung oder Figur unabsichtlich und äusserte ihr Bedauern darüber, oder sie zeigte die Absicht, das Werk zu zerstören, schaffte es aber nicht. Hier erhielt die Schauspielerin das fehlende Puzzleteil in 9 von 18 Fällen, in denen sie das Werk unabsichtlich zerstörte, und in 6 von 18 Fällen, in denen sie eine böse Absicht zeigte.

Früher Altruismus

Schon länger bekannt ist, dass Kinder bereits im frühen Alter altruistisch handeln. Sie helfen anderen Menschen, auch ohne eine direkte Gegenleistung, und zwar auch fremden, nichtverwandten Menschen. So halfen etwa ein- bis zweijährige Kleinkinder in Versuchen Erwachsenen in einer unbeholfenen Situation (beispielsweise mit einem Stapel Zeitschriften in den Händen), einen fallengelassenen Stift aufzuheben oder ihnen eine Tür zu öffnen. Auch ist bekannt, dass ein- und zweijährige Kinder bereits emotional auf andere Menschen eingehen können und gelegentlich weinende Personen trösten.

Zudem weiss man, dass bereits Säuglinge zwischen hilfsbereitem und destruktivem Verhalten unterscheiden können und das hilfsbereite Verhalten bevorzugen. Wissenschaftler haben dies in Verhaltensstudien mit 6 Monate alten Kleinkindern beobachtet. In einer Art Puppenspiel halfen stilisierte Holzfiguren anderen, einen Berg hochzukommen, oder hinderten sie daran. Vor die Wahl gestellt, mit welcher Holzfigur die Säuglinge spielen möchten, zeigten alle 12 jungen Probanden auf die helfende Figur.

¹ Child Development, 81, 1661–1669 (2010).