



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

bmb+f

Gebändigtes Licht

Themenheft

2000
das jahr der
physik

BMBF PUBLIK

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium für Bildung und Forschung
(BMBF)
Referat Öffentlichkeitsarbeit
53170 Bonn
E-Mail: information@bmbf.bund.de
Internet: <http://www.bmbf.de>

Autorin

Dr. Brigitte Röthlein

Informationen zum Inhalt

Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.
Pressestelle
Hauptstrasse 20 a
53604 Bad Honnef
Telefon: (0 22 24) 9 51 95-18
Telefax: (0 22 24) 9 51 95-19
E-Mail: presse@dpg-physik.de

Redaktion, Konzept und Gestaltung

Iser & Putscher
Kreativagentur für PublicRelations GmbH,
Bad Honnef

Titel

Große Abbildung: Beugungsbild, künstlerisch bearbeitet

Kleine Abbildung: Logo „2000: das Jahr der Physik“

Bildnachweis:

Agentur Bilderberg, Agentur Iser&Putscher, BASF, DESY, FhG-IWS, Fraunhofer Gesellschaft, Institut für Experimentalphysik I/Uni Würzburg, Institut für Halbleitertechnik II/RWTH Aachen, Institut für Neue Materialien, J.Mair, Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie, MPI für Mikrostrukturphysik, MPI für Quantenoptik/Institut für Experimentalphysik/Uni Wien, NASA, Osram OS, Osram, Philip Morris, PTB, Siemens, VDI-Technologiezentrum

Gebändigtes Themenheft Licht

Titelseite:
Beugungsbild, künstlerisch
bearbeitet

Bild rechts:
Laserschneiden eines Werkstücks
(Quelle: MPI für Mikrostruktur-
physik)

„Physik ist lebendig, aufregend und immer wieder überraschend. Sie beantwortet Fragen unter anderem nach Ursprung und Schicksal des Universums, der Struktur der Materie und der Entstehung von Leben auf unserem Planeten. Gleichzeitig besitzt sie eine Schlüsselfunktion in der modernen Technik“, so Alexander M. Bradshaw, Präsident der [Deutschen Physikalischen Gesellschaft \(DPG\)](#). Beim Jahr der Physik arbeitet das [Bundesministerium für Bildung und Forschung \(bmb+f\)](#) eng mit der DPG zusammen. Neben fünf zentralen Veranstaltungen in Berlin und Bonn finden überall in Deutschland an Universitäten, an Forschungseinrichtungen und an Schulen Aktionen zur Physik statt.

Das Jahr der Physik finden Sie im Internet unter www.physik-2000.de



wissenschaft ■ im dialog

Die Bundesministerin für Bildung und Forschung, Edelgard Bulmahn, hat zusammen mit den großen Forschungsorganisationen die bundesweite Initiative [„Wissenschaft im Dialog“](#) gestartet. „Wir müssen deutlich machen, dass Forschung für die Menschen da ist und gleichzeitig Innovation und Arbeitsplätze schafft“, so beschreibt die Ministerin den Leitgedanken der Initiative. Die Wissenschaft öffnet sich der Gesellschaft, indem aktuelle Erkenntnisse vieler Fachgebiete spannend, kontrovers und publikumsnah präsentiert werden. Die Initiative startet im Jahr 2000 mit dem Jahr der Physik.

4	Das Doppelleben des Lichts
9	An der Schwelle zur Quantenwelt
14	Vom „absoluten Nullpunkt“ bis zum „Undulator“
16	Messen mit Licht
20	Das blaue Wunder
22	Am Puls des Moleküls
24	Gebändigtes Röntgenlicht



„Fünfzig Jahre intensiven Nachdenkens haben mich der Antwort auf die Frage ‚Was sind Lichtquanten?‘ nicht näher gebracht. Natürlich bildet sich heute jeder Wicht ein, er wisse die Antwort. Doch da täuscht er sich.“
Albert Einstein, 1951

Das Doppelleben des Lichts

Glühlampe (Quelle: Osram)

Das Augenlicht ist wohl für jeden von uns der teuerste unter den fünf Sinnen. Wir orientieren uns hauptsächlich mit den Augen, wir nehmen Informationen vor allem visuell auf, Licht und Farbe beeinflussen Stimmungen und Gefühle. Die Hormonausschüttung ist gekoppelt mit der Stärke der Sonneneinstrahlung. „Mehr Licht!“ sollen Goethes letzte Worte gewesen sein.

Dieser Satz könnte auch der Leitspruch der modernen Physik sein. Licht ist zum wichtigsten Werkzeug der physikalischen Forschung geworden. Sein Siegeszug geht quer durch alle Disziplinen.

Teilchen oder Welle?

Das Licht ist inzwischen ein ausführlich erforschtes Medium, aber es bewahrt bis heute eine Faszination, die die Gelehrten schon vor Jahrhunderten beschäftigte. Bereits zu Anfang des 18. Jahrhunderts tobte zwischen Isaac Newton und Christian Huygens ein erbitterter Streit darüber, ob Licht aus Wellen oder Teilchen bestehe. Huygens glaubte an die Wellentheorie, Newton und seine Schüler hingegen der Korpuskulartheorie an.

Der Streit wurde damals nicht entschieden, er geriet einfach in Vergessenheit. Nach ihm gab es in der Optik ein Jahrhundert lang keine großen Neuigkeiten, und die Physiker fanden andere Phänomene der Physik, mit denen sie sich lieber beschäftigten. Die Natur des Lichts kam erst wieder zu Beginn des 19. Jahrhunderts auf die Tagesordnung. Inzwischen hatte sich Newtons Ansicht weitgehend durchgesetzt. Licht, so dachte man, bestehe einfach aus schnell fliegenden Teilchen. Doch durch Versuche unter anderem von Thomas Young, der Licht auf einen Doppelspalt fallen ließ, zeigte sich, dass es in manchen Fällen auch Wellencharakter besitzt. Im Zuge der aufkommenden Elektrodynamik erkannte man zudem, dass Licht eine Form der elektromagnetischen Strahlung ist.

Die Sache mit der Interferenz

Ein grundlegender Versuch, bei dem sich Licht eindeutig als Welle und nicht als Teilchen verhält, ist die Beugung am Doppelspalt. Der Versuchsaufbau ist einfach: eine Wand mit zwei dünnen Schlitzen wird mit regelmäßigem („kohärentem“) Licht bestrahlt. In einem Abstand zu der ersten Wand befindet sich eine zweite, auf die das Licht fällt, das durch die beiden Schlitze getreten ist.

Hätte Licht ausschließlich Teilchencharakter, so wäre der Ausgang des Experiments wie in Bild (a). Statt der Lichtteilchen könnte man sich auch kleine Gewehrkugeln denken, die auf die beiden Schlitze treffen. Die meisten Kugeln würden von der Wand abprallen und nur einige durch einen der beiden Schlitze hindurchgehen. Auf der gegenüberliegenden Wand wären zwei Linien zu erkennen, die von dem Aufprall dieser Kugeln herrühren. Direkt neben den beiden Hauptlinien gäbe es auch noch einige Aufprall-Stellen, da ein paar Kugeln an den Kanten der Schlitze abprallen und dadurch zur Seite abgelenkt werden. Dieses Bild beobachtet man jedoch nicht!

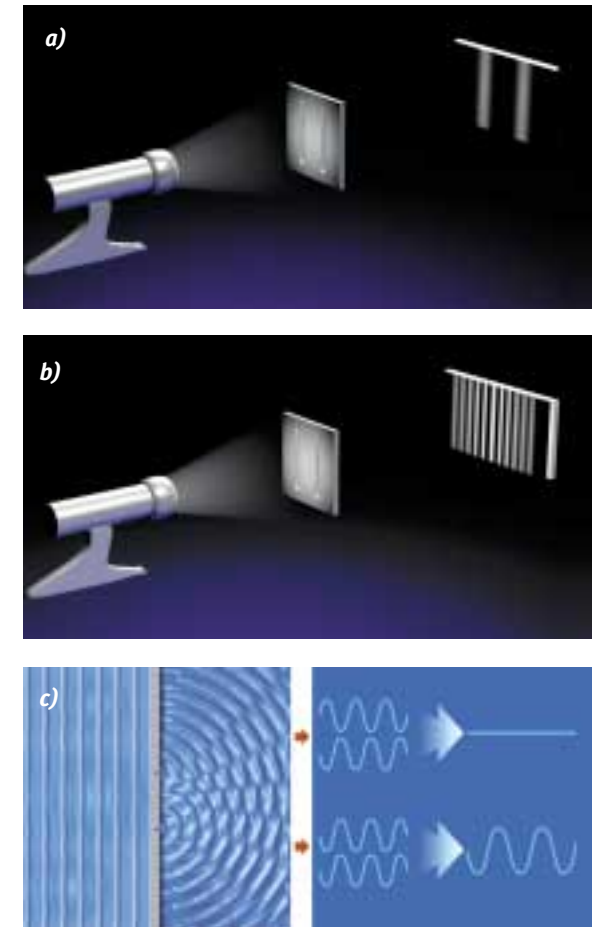


Bild c zeigt den Fall b von oben.
(Grafiken: I&P und J. Mair)

Was man tatsächlich sieht, ist in Bild (b) dargestellt. Auf der zweiten Wand entsteht ein regelmäßiges Muster aus abwechselnd hellen und dunklen Streifen. Der hellste Streifen liegt sonderbarerweise genau in der Mitte zwischen den beiden Spalten. Zu erklären ist dieses Ergebnis nur, wenn man davon ausgeht, dass das Licht sich hier als Welle verhält. Wie eine Meeresbrandung schwappt das Licht zunächst gegen die Wand mit den beiden Schlitzen. Von den Schlitzen breiten sich dann in den Raum zwischen den beiden Wänden kreisrunde Wellen aus. Wie bei Wasserwellen (Bild c), die sich überlagern, gibt es Bereiche, an denen sich gerade ein Wellenberg und ein Wellental gegenseitig auslöschen, und Stellen, an denen zwei Wellenberge zusammentreffen und sich verstärken. So entstehen die dunklen bzw. hellen Stellen auf der hinteren Wand. Diesen Effekt der Überlagerung von Wellen nennt man „Interferenz“.



Photoeffekt

Trifft kurzwelliges Licht auf eine Metalloberfläche, kann es dort Elektronen freisetzen. Deren Anzahl ist proportional zur Intensität des einfallenden Lichts. Dies lässt sich mit der Teilchennatur des Lichts erklären: Jedes freigesetzte Elektron hat genau ein Lichtteilchen („Photon“) absorbiert. Das Licht wirkt also in diesem Fall wie ein Strom winziger Gewehrkugeln, die Elektronen aus dem Metall herauschlagen. Albert Einstein formulierte auf Grund dieses so genannten Photoeffekts die Idee der „Lichtquanten“. Der Photoeffekt findet zum Beispiel in Solarzellen aus Silizium Anwendung, wo das Sonnenlicht im Material Elektronen auslöst, die schließlich einen Stromfluss bewirken. (Quelle: Siemens)

Bis heute bleibt das Phänomen Licht ein Rätsel, auch wenn die Theoretiker im Rahmen der Quantenelektrodynamik sein Verhalten jetzt mathematisch beschreiben können. Manchmal verhält es sich wie eine Welle, manchmal wie ein Teilchenstrom. Aber es ist weder das eine noch das andere: es ist ein Wesen aus der Quantenwelt und entzieht sich unserer Logik. Licht lässt sich nicht festhalten, die Lichtteilchen – die sogenannten Photonen – sind masselos und bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit. Trotzdem ist dieses wechselhafte Medium hervorragend geeignet als Sonde, als Detektor, als Informationsträger und – bei hinreichender Intensität – auch als Erzeuger höchster mechanischer Kräfte.

Die Bändigung des Lichts

Vieles weiß man heute über das Licht, und je mehr man darüber weiß, desto besser kann man es zähmen. Es beginnt schon bei seiner Erzeugung: Elektromagnetische Strahlung und damit auch Licht entsteht, wenn elektrisch geladene Teilchen beschleunigt werden. Dies können Elektronen sein, die in der Sonne oder in den Atomen eines glühenden Drahtes oszillieren oder in der Antenne eines Rundfunksenders. Normalerweise sind diese Schwingungen ungeordnet; entsprechend besteht das so erzeugte Licht aus einer Vielzahl von Einzelwellen, die sich in Richtung und „Phase“, oft auch in ihrer Wellenlänge unterscheiden. Ihre



Licht einer Lampe: viele Sinuswellen mit unterschiedlicher Phase und Wellenlänge, die in alle Richtungen auseinanderlaufen.

Überlagerung erscheint uns dann als Licht einer bestimmten Farbe. Als Werkzeug der physikalischen Forschung ist diese „unordentliche“ Art von Licht nicht besonders gut geeignet.

Wissenschaftler bedienen sich deshalb meist einer geordneten Art des Lichts. Bei diesem laufen alle Lichtwellen parallel und im Gleichtakt, das heißt, in der gleichen Phase. Man nennt dieses Licht „kohärent“, und zu seiner Erzeugung ist ein Laser ideal geeignet. Betrachtet man dieses regelmäßige Licht im Teilchenbild, so besteht es aus einem Strahl von Lichtteilchen, den Photonen, mit der gleichen Energie, die alle parallel fliegen.

Erzeugt wird dieses kohärente Licht auf eine besondere Art und Weise. Albert Einstein hat bereits im Jahr 1916 das Phänomen vorhergesagt, das dem Laser zu Grunde liegt: die stimulierte Emission. Vorher hatte man geglaubt, es gebe nur zwei Arten, wie ein Atom mit einem Photon umgehen kann: Entweder es schluckt das Photon und wird dabei auf ein höheres Energieniveau gehoben (angeregt), oder es sendet ein Photon aus und fällt dabei auf ein niedrigeres Energieniveau. Einstein erkannte, dass es noch eine dritte Art der Wechselwirkung gibt: Ein Photon mit passender Energie kann ein angeregtes Atom dazu bringen, dass es auf ein niedrigeres Niveau fällt und dabei ein Photon mit der gleichen Energie wie das einfallende aussendet. In der normalen Welt passiert dies relativ



Licht eines Lasers: parallele Sinuswellen mit gleicher Wellenlänge, die alle im Gleichtakt („in Phase“) schwingen. (Grafiken: I&P)

selten, denn da sind wesentlich mehr Atome in niedrigen als in angeregten Energiezuständen.

Im Laser versetzt man eine Vielzahl von Atomen künstlich in einen angeregten Zustand, um sie anschließend durch stimulierte Emission gezielt zur Abgabe ihrer Photonen zu zwingen. So erhält man Licht einer einzigen, genau festgelegten Wellenlänge, das man beispielsweise mit Hilfe eines Spiegelsystems zu einem eng gebündelten Strahl formt.

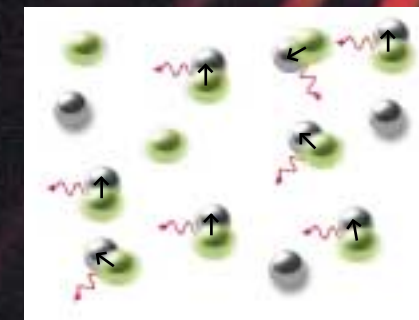
Die Zukunft gehört dem Werkzeug Licht

Mit diesem Trick ist es gelungen, das ach so flüchtige Licht zu bändigen; das Photon wurde zum Werkzeug des Quantenzeitalters. Seit der erste Laser 1960 von Theodore Maiman und Nikolai Basov gebaut wurde, verfeinerten Physiker und Ingenieure seine Technik so sehr, dass es heute fast keine Aufgabenstellung mehr gibt, der ein Laser nicht gewachsen ist. Laser gibt es heute für praktisch alle Wellenlängen des sichtbaren, infraroten und nahen ultravioletten Bereichs; der Schritt zum Röntgenlaser wird soeben vollzogen. Dauerstrichlaser erzeugen kontinuierlich stabile Lichtstrahlen, Puls laser hingegen schießen Lichtscheibchen extremster Kürze ab. Die Größenordnungen der Apparaturen sind ebenfalls vielfältig: Sie reichen vom Diodenlaser, klein wie ein Stecknadelkopf, bis zu gigantischen Laseranlagen mit baumdicken, kilometerlangen Verstärkern. So ist das „wilde“ Licht zum Haustier des Informationszeitalters geworden – ein universelles Instrument, unentbehrlich für Messungen, für Experimente, in Technik und Alltag.

Laserstrahlen, aufgefüchert durch ein mikroskopisches Gitter. (Quelle: Institut für Neue Materialien / VDI-TZ)

Das Prinzip des Lasers

In einem Gas befinden sich fast alle Atome oder Moleküle im Zustand möglichst geringer Energie. Pumpt man durch geeignete Maßnahmen – etwa durch das Einstrahlen von Licht oder durch eine elektrische Entladung – Energie in das Gas hinein, nehmen die Teilchen des Gases die Energie auf und gehen in einen angeregten Zustand über. Strahlt man nun passende Photonen auf die Gasteilchen, so geben diese die gespeicherte Energie in Form eines Photons wieder ab. Das besondere ist, dass das abgestrahlte Photon dieselbe Richtung und Energie hat wie das eingestrahlte. Parallele Spiegel an den Enden des Lasers reflektieren das Licht hin und her. Dabei treffen die Photonen auf weitere angeregte Teilchen und zwingen diese zur Abgabe der gleichen Energie. So werden immer mehr Photonen frei, es entsteht ein Lawineneffekt. Der Laserstrahl aus parallelen Lichtwellen wird durch einen der Spiegel, der teildurchlässig ist, nach außen gestrahlt.

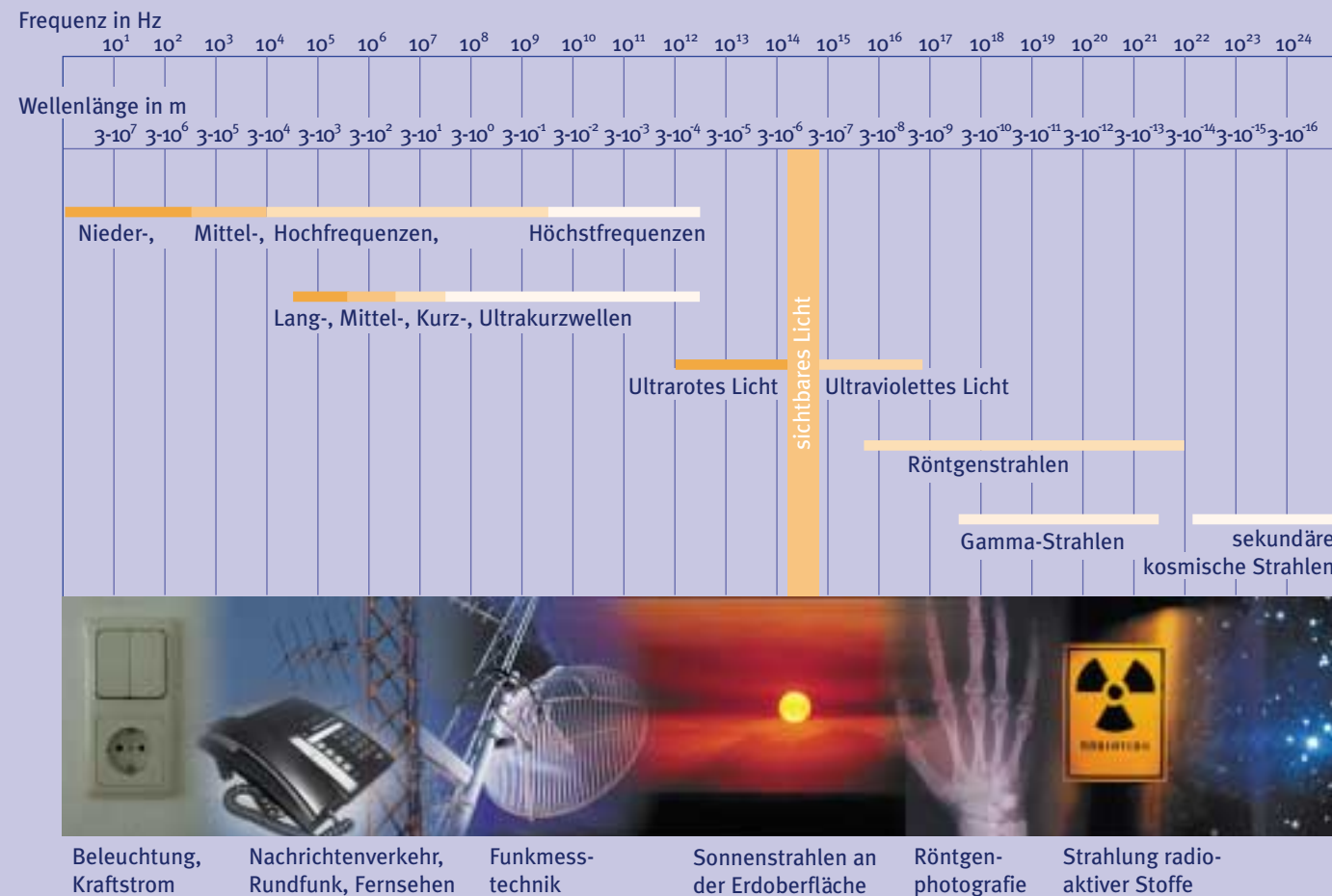


Atome in einem Gas, in das Energie gepumpt wurde. Die dadurch angeregten Atome sind grün, die mit niedriger Energie silbern dargestellt. Geht ein Atom von einem angeregten Zustand in einen mit geringerer Energie über, so sendet es ein Photon aus. In welche Richtung des Photon fliegt, ist hier dem Zufall überlassen. (Grafiken: I&P)

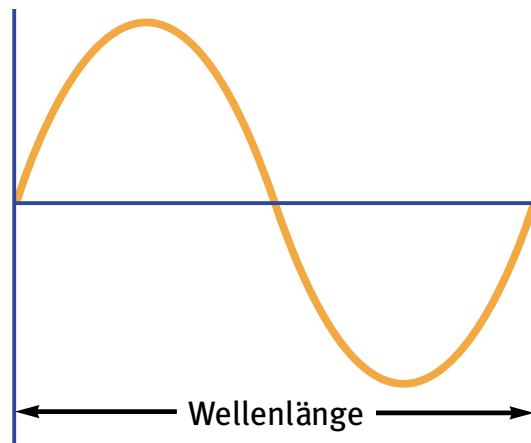


Laserprinzip der stimulierten Emission. Die an den seitlichen Spiegeln reflektierten Photonen veranlassen angeregte Atome (grün), ein Photon in der gleichen Richtung und Phase wie das einfallende auszusenden. Die neu entstandenen Photonen treffen dann wieder auf andere angeregte Atome – ein Lawineneffekt entsteht.

Das elektromagnetische Spektrum



Das elektromagnetische Spektrum reicht von den langwelligen Radiofrequenzen über die Mikrowellen, infrarotes und sichtbares Licht bis zur UV-, Röntgen- und Gamma-Strahlung. Von links nach rechts werden die Wellenlängen immer kürzer, die Frequenzen immer höher. Betrachtet man das Spektrum im Teilchenbild, nimmt die Energie der Photonen oder Quanten von links nach rechts zu.



Die Frequenz der Welle gibt an, wie oft in einer Sekunde eine volle Wellenlänge von der Welle durchlaufen wird. (Grafiken: I&P)

„Die Quanten sind doch eine hoffnungslose Schweinerei!“
Max Born in einem Brief an Albert Einstein

An der Schwelle zur Quantenwelt

Die Welt des Allerkleinsten gehorcht anderen Gesetzen als unsere vertraute, makroskopische Welt. Theoretische Grundlage dafür ist die Quantentheorie, die in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelt wurde und die Vorgänge im Bereich mikroskopischer Maßstäbe mathematisch beschreibt und deutet. Sie stellt die Gesetze der Logik in der Natur in Frage und kippt den Menschen vom sicher geglaubten Thron des unbeteiligten Beobachters.

Ein Beispiel für die Gesetze der Quantenmechanik ist der radioaktive Zerfall: Niemand kann vorhersagen, wann ein bestimmtes radioaktives Atom zerfällt; es geschieht zwar nach einem statistischen Muster, aber immer zufällig. In der Welt der Quantenphysik haben viele Vorgänge keine konkrete Ursache und gehorchen einzig und allein dem Zufallsprinzip – eine Idee, die für die Physik zu Beginn des 20. Jahrhunderts völlig neu war. Sie bricht mit der logischen Vorstellung, dass Ursache und Wirkung die Welt bestimmen, was spätestens seit Newton als ehernes Gesetz galt.

In einer magneto-optischen Falle werden Millionen von Atomen in einer ultrakalten, leuchtenden Gaswolke gefangen. (Quelle: MPI für Quantenoptik/Philip Morris)



Schrödingers Katze – tot und doch lebendig

Einer der Schöpfer der Quantenmechanik war der österreichische Physiker Erwin Schrödinger. Im Jahr 1935 versuchte er, eine weitere für uns schwer vorzustellende Folge der Quantentheorie mit Hilfe eines Gleichnisses zu verdeutlichen: „Schrödingers Katze“ wurde geboren und bald weltberühmt.

Schrödingers Katze

In einer verschlossenen Kiste befindet sich eine Katze zusammen mit einem radioaktiven Atom und einem Fläschchen Gift. Zerfällt das Atom, löst dies einen Mechanismus aus, der die Flasche zerschlägt; die Katze atmet die Giftdämpfe ein und stirbt. Nach der Quantentheorie gibt es zwar eine statistische Wahrscheinlichkeit für den Zerfall des Atoms, wenn es aber tatsächlich zerfällt, ist vollkommen dem Zufall überlassen. Wäre auch die an dieses System gekoppelte Katze ein quantenmechanisches Objekt, so wäre auch der Zustand der Katze ungewiss. Solange man die Kiste nicht öffnet, also eine Messung vornimmt, weiß man nicht, ob die Katze noch lebt oder schon tot ist. Nach den Regeln der Quantenmechanik wäre die Katze bis zum Öffnen der Kiste weder tot noch lebendig, sondern eine „Überlagerung“ der beiden Zustände „Katze tot“ und „Katze lebendig“. Erst wenn der Beobachter hineinschaut, müsste sie sich für einen Zustand „entscheiden“. In der normalen Welt mit richtigen Katzen ist das natürlich nicht so. Deshalb ist „Schrödingers Katze“ zum Glück ein rein gedanklicher Tierversuch geblieben.

Die Ungewissheit über den Zustand der Welt, die in diesem Gleichnis beschrieben wird, ist fundamental für die Sichtweise der Quantenmechanik. Sie arbeitet mit der Vorstellung, dass sich die verschiedenen Zustände, die ein System annehmen kann (z. B. „Katze tot“ und „Katze lebendig“) überlagern. Kein Teilchen befindet sich zu einer bestimmten Zeit genau an einem bestimmten Ort, kein Lichtstrahl ist nur hier und nicht gleichzeitig woanders, selbst das Vakuum, die absolute Leere, ist erfüllt von einer Vielzahl von Teilchen und Wellen, die aus dem Nichts kommen und nach kurzer Zeit wieder verschwinden. Diese seltsame, unbestimmte Welt des Verschwommenen und Ungenauen verwandelt sich jedoch schlagartig in unsere gewohnte, fest gefügte Welt des Erfahrbaren, wenn man daran geht, etwas zu messen. Bei der Katze ist das „Messgerät“ der Beobachter, der die Kiste öffnet und hineinschaut.

Man kann also sagen, Messgeräte verändern die Welt. Sie verwandeln Ungewisses in Gewissheit und Verschwommenes in exakte Daten. Diese ungewöhnliche Idee hat schon viele philosophische Zirkel beschäftigt – vor allem der Übergang von der einen, mikroskopischen, in die andere makroskopische Welt liegt noch im Dunkeln.

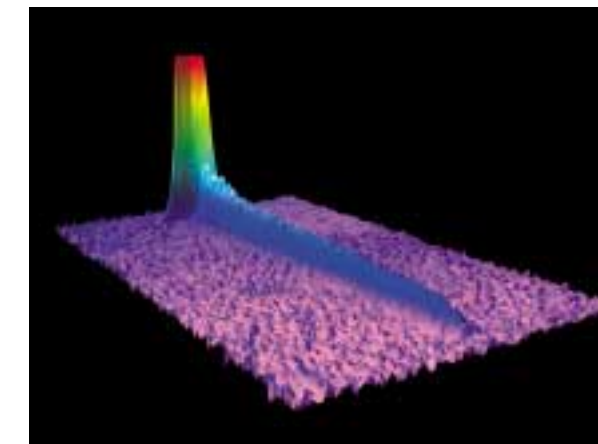


Der mit Hilfe von Radiowellen „angebohrte“ magnetische Käfig lässt Rubidiumatome als Materiewellenstrahl entkommen. (Quelle: MPI für Quantenoptik/ Philip Morris)

Der Schritt an die Grenzen

Erst in jüngster Zeit gibt es eine Reihe von Experimenten, die sich auf raffinierte Weise der Grenze zur Quantenmechanik nähern, etwa indem sie Objekte erzeugen, die zwar makroskopisch beobachtbar sind, aber trotzdem quantenmechanischen Gesetzen gehorchen. So gelang es beispielsweise in den letzten Jahren, Atome in magnetischen Fallen fast bis zum absoluten Nullpunkt (er entspricht $-273,15^\circ\text{C}$ oder Null Kelvin) zu kühlen. Sie bilden dann ein so genanntes [Bose-Einstein-Kondensat](#), eine Ansammlung von Materie, für die die Gesetze der Quantenmechanik gelten, obwohl ihre Ausdehnung Millimetergröße erreicht. Rund eine Million Atome bringt man in den tiefstmöglichen Energiezustand – sie werden dadurch vollkommen ununterscheidbar und verhalten sich wie ein einziges Riesenatom! Ferner gelingt es, aus einem solchen Bose-Einstein-Kondensat mit Hilfe von [Radiowellen](#) Atome herauszulösen. Unter dem Einfluss der Schwerkraft fallen sie aus der Atomfalle heraus nach unten und bilden dabei einen kontinuierlichen Strahl. Man nennt eine derartige Anordnung einen Atomlaser.

Es handelt sich um ein Gerät, das nicht wie ein Laser Photonen, sondern Atome aussendet, die völlig gleich orientiert und sehr eng gebündelt sind. Eine ganze Reihe praktischer Anwendungsmöglichkeiten



Bose-Einstein-Kondensat und Atomlaser
Über der Fläche, auf der sich die Atome befinden, ist die Dichte ihrer Verteilung auf dieser Fläche aufgetragen. Alle Atome sitzen in einem eng begrenzten Gebiet – dort ist die Dichte sehr hoch (Säule mit roter Spitze). Mit Hilfe von Radiowellen werden Atome aus diesem Bose-Einstein-Kondensat herausgelöst. Sie bilden einen kontinuierlichen Strahl. Er ist als Keil zu sehen, der über die Ebene verläuft. (Quelle: MPI für Quantenoptik)

sind dafür denkbar: Man erwartet noch genauere Messmethoden für die Zeit und für die Stärke der Gravitation. Falls es gelingt, ihre Intensität zu steigern, könnte man mit einem Atomlaser wie mit einem Laserdrucker winzigste Strukturen direkt auf Halbleiterchips auftragen.

Bis die Handhabung derartiger Atomlaser aber so ausgereift ist, dass die Geräte problemlos in der Praxis eingesetzt werden können, werden wohl noch einige Jahre vergehen. Eines Tages können Atomlaser vielleicht so klein sein wie heute Halbleiterlaser. Wenn es auch noch gelingt, den „Nachschub“ kalter Atome in der Falle kontinuierlich zu organisieren, lässt sich damit ein kontinuierlicher Laser aus Materiewellen herstellen.

Ein Gas aus Rubidium-Atomen wird in einer Ultrahochvakuum-Kammer mittels sogenannter Laserkühlung auf eine Temperatur nahe dem absoluten Nullpunkt abgekühlt. (Quelle: MPI für Quantenoptik/Philip Morris)

Laser können auch kühlen

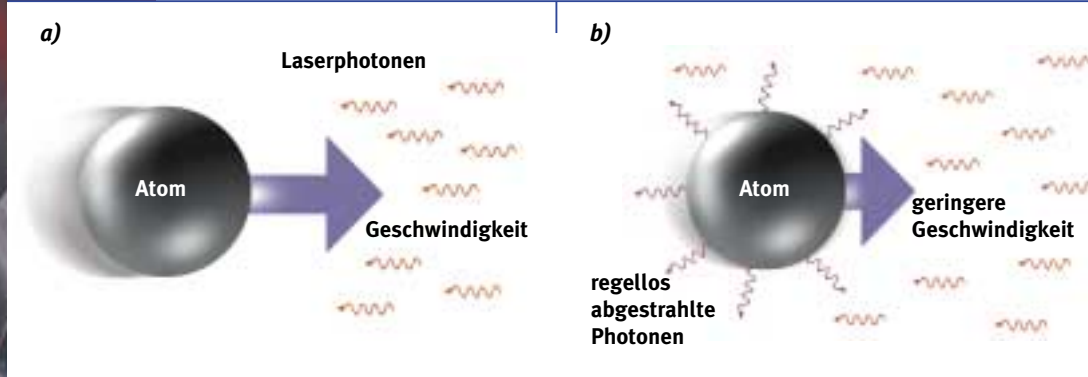
Um Atome in magnetischen Fallen zu fangen, müssen sie so langsam (kalt) sein, dass die Forscher sie erwischen können. Deshalb kühlen die Physiker die bei Raumtemperatur sehr schnellen Atome zunächst vor. Dabei macht man sich die Tatsache zu Nutze, dass Atome Energie nur in Portionen einer bestimmten Größe (den „Quanten“) aufnehmen können. Diese Größe muss genau dem Abstand zwischen zwei Energieniveaus entsprechen. Man bestrahlt nun die Atome mit Laserlicht, dessen Photonen geringfügig unterhalb dieser Energie liegen, oder, anders gesagt, dessen Frequenz unterhalb der nötigen Frequenz liegt. Da sich die Atome bewegen, erkennen diejenigen, die dem Laserlicht entgegenfliegen, wegen des [Dopplereffekts](#) eine Frequenz, die etwas höher liegt. Sie entspricht dann genau der nötigen Absorptionsfrequenz: die Atome schlucken die Photonen.

Bei der Aufnahme jedes Photons bekommen die Atome einen Stoß, der ihre Geschwindigkeit entgegen der Einstrahlungsrichtung des Lasers verringert. Bei der anschließenden Wiederabgabe der Photonen erhalten die Atome jedes Mal einen Rückstoß. Da dieser aber regellos ist – das heißt, in alle Richtungen gehen

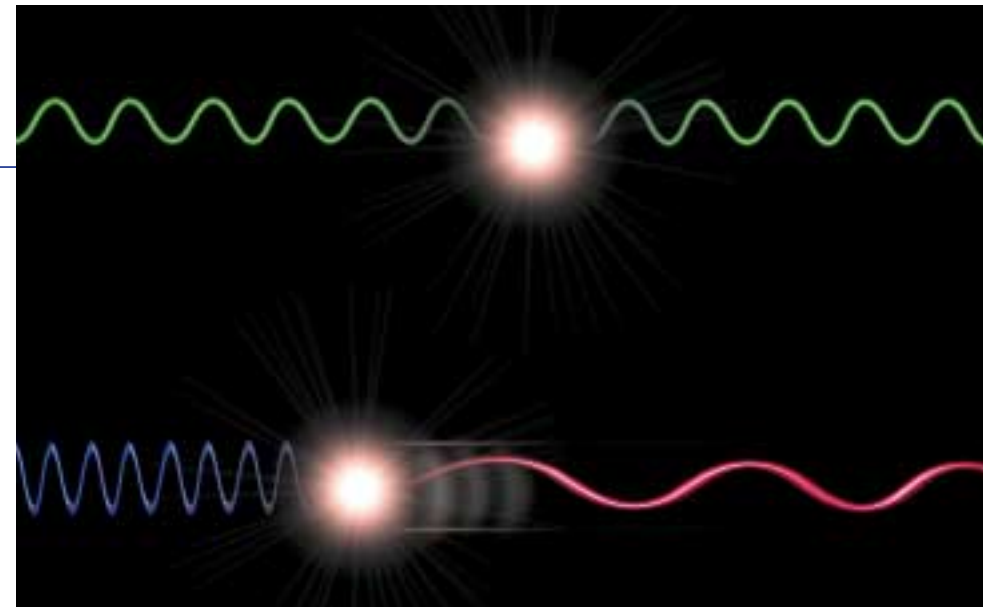
Dopplereffekt

Der Dopplereffekt tritt immer dann auf, wenn ein Sender oder ein Empfänger sich bewegt. Bei Schallwellen ist das Phänomen allgemein bekannt: Das Martinshorn eines Polizeifahrzeugs klingt höher, wenn das Auto herankommt, tiefer, wenn es sich entfernt. Entsprechendes lässt sich auch bei elektromagnetischer Strahlung, etwa bei Licht, beobachten. Bewegen sich Sender und Empfänger aufeinander zu, erscheint die Frequenz höher, entfernen sie sich voneinander, erscheint sie niedriger.

kann – wird dadurch im Mittel keine Beschleunigung verursacht. Die Atome werden also in einer Richtung stark abgebremst und damit gekühlt. Um die Geschwindigkeit auch in den anderen Raumrichtungen zu reduzieren, bestrahlen die Wissenschaftler das Gas aus vielen verschiedenen Winkeln. Der Trick mit dem Dopplereffekt sorgt dafür, dass nur die Atome, die sich noch entgegen der Einstrahlungsrichtung bewegen, die Laserphotonen schlucken. So kann man die Atome schließlich nahezu zum Stillstand bringen und in speziellen Käfigen einsperren. Dieses „[Laserkühlung](#)“ genannte Verfahren wurde inzwischen zu einer Standardmethode der Quantenphysiker.



Das Verfahren der Laserkühlung. Das gezeigte Atom hat eine Geschwindigkeitskomponente entgegen der Einstrahlungsrichtung des Lasers (a). Durch den Trick mit dem Dopplereffekt kann es deshalb die Photonen des Lasers aufnehmen – es wird angeregt. Durch den bei der Aufnahme der Photonen entstehenden Stoß wird das Atom abgebremst und damit gekühlt. Die anschließende Abgabe der eingestrahnten Photonen geschieht regellos und bewirkt deshalb im Mittel keine zusätzliche Beschleunigung (b). Der Prozess der Aufnahme und Abgabe der Laserphotonen muss viele Male und aus unterschiedlichen Raumrichtungen erfolgen, bis das Atom schließlich fast zum Stillstand gekommen ist. (Grafik: I&P)



Dopplereffekt: Der Sender in Ruhe strahlt grünes Licht aus. Bewegt er sich, verändert sich die Wellenlänge und damit auch die Farbe. In der Bewegungsrichtung werden die Wellen gestaucht, auf der anderen Seite auseinander gezogen. (Grafik: I&P)

Rechnen mit Quanten

Selbst Anwendungen der Quantenmechanik in der Computertechnik sind heute keine Luftschlösser mehr. Information ist bekanntlich aus Bits zusammengesetzt, mit denen herkömmliche Computer rechnen. Dort kann ein Bit den Wert Null oder Eins haben, und es wird repräsentiert durch den Ladungszustand eines Schaltelements. Ähnliche Strukturen findet man in der Quantenmechanik, dort gibt es „Zustände“, die Null oder Eins entsprechen, etwa der Grund- und Anregungszustand eines Atoms oder die Drehrichtung eines kreiselnden Teilchens, Spin genannt. So liegt es nahe, diese Ähnlichkeit auszunutzen, um einen Computer zu bauen. Man nennt ihn „Quantencomputer“. Ein angeregtes Atom könnte beispielsweise einer Eins entsprechen, eines im Grundzustand einer Null. Für die Bits der Quantenwelt hat sich auch schon ein Name eingebürgert: „Qubit“.

Quantenmechanische Objekte können sich jedoch – wie oben geschildert – nicht nur in einem eindeutigen Zustand, sondern auch in einer Überlagerung mehrerer möglicher Zustände zur selben Zeit befinden. Man hätte so die Möglichkeit, in allen Zuständen gleichzeitig zu rechnen – ein höchst potenter Parallelrechner wäre realisiert.

Das Problem des Rechenwerkes ist jedoch das Gesetz der Quantenmechanik, dass die Überlagerung der Zustände nur so lange anhält, bis man das System durch ein Messgerät stört. Die Überlagerung bricht dann sofort zusammen, es bleibt nur ein einziger Zustand übrig, nämlich der ermittelte Messwert. In einem Quantencomputer kann man also viele parallele Rechnungen gleichzeitig durchführen, aber man kann jeweils nur ein bestimmtes Ergebnis ablesen, da die Messung die Überlagerung zum Kollabieren bringt – das Qubit wird zum ordinären Bit.

Telepathische Zwillinge

Die Lage ist ernst, aber nicht hoffnungslos, denn kreative Forscher finden immer neue Tricks. So gelang vor kurzem die Produktion von so genannten verschränkten Teilchen. Auch hier handelt es sich um einen Quanteneffekt, und zwar um einen äußerst erstaunlichen, den sich Einstein mit ein paar Kollegen 1935 zunächst als bloßes Gedankenexperiment ausgedacht hat. Werden zum Beispiel zwei Lichtquanten gleichzeitig im selben Prozess erzeugt, dann bleiben ihre Eigenschaften, etwa die Richtung ihrer Polarisation, aneinander gekoppelt („verschränkt“), auch wenn sich die beiden Quanten mit Lichtgeschwindigkeit voneinander entfernen. Verändert man

das eine Quant, dann „fühlt“ das Zwillingsquant – so weit es auch entfernt sein mag – das sofort und verändert sich ebenfalls. Der Effekt, der nach seinen Erfindern Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon heißt, bringt die Physiker ins Schwärmen: Man könnte damit, so glauben sie, die simultane Kopplung von Daten in unterschiedlichen Speichern bewerkstelligen, unabhängig von äußeren Einflüssen, sozusagen in Form von Telepathie zwischen den Quanten. Dass dies keine reine Fantasterei ist, belegen erste [Experimente](#).

Konkrete Hoffnungen auf einen funktionierenden Quantencomputer sind also inzwischen berechtigt. Immerhin wurde das physikalische Grundprinzip schon gezeigt, und erste Ansätze von Software sind ebenfalls im Entstehen. Wenn man bedenkt, wie primitiv 1947 der erste Transistor aussah und was bis heute daraus geworden ist, kann man, zumindest was die technische Seite betrifft, optimistisch sein.



Ein Experiment mit verschränkten Photonen. Mit speziellen Lasern lassen sich Kristalle so anregen, dass sie Photonenpaare abstrahlen. Das Bild zeigt Fluoreszenzlicht aus einem solchen Kristall in Falschfarben. Die Ringe einer Farbe werden jeweils durch viele Photonenpaare erzeugt, die auf den Film der Kamera treffen. Jedes Photonenpaar trägt zur Entstehung des rechten und des linken Rings bei. In den Schnittpunkten der Kreise ist jedes Photonenpaar „verschränkt“: wird an dem einen Photon etwas verändert, so reagiert darauf das zweite Photon – und zwar augenblicklich, ohne Rücksicht auf die Einschränkung durch die Lichtgeschwindigkeit. (Quelle: Institut für Experimentalphysik, Uni Wien)

Vom „absoluten Nullpunkt“ bis zum „Undulator“

Absoluter Nullpunkt

Bisher unerreicht: Bei $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ oder Null Kelvin hört jede Wärmebewegung auf. Der Wellencharakter dominiert das Verhalten der Atome.

Atomlaser

Wie eine Perlenkette: Aus einem Bose-Einstein-Kondensat kann man Atome mit Hilfe von Radiowellen herauslösen. Unter dem Einfluss der Schwerkraft fallen sie nach unten und bilden dabei einen kontinuierlichen Strahl, der so geordnet ist wie ein Laserstrahl.

Bose-Einstein-Kondensat

Riesen-Atom: Millionen Atome im bewegungslosen Zustand – sie sind vollkommen ununterscheidbar. Das Kondensat verhält sich wie ein einziges Riesenatom und kann einige Millimeter groß sein.

Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon

Zwillingsquanten aus Licht: Zwei Quanten, die gemeinsam entstanden sind, bleiben miteinander gekoppelt („verschränkt“), auch wenn sie sich mit Lichtgeschwindigkeit voneinander entfernen. Verändert man das eine Quant, dann „fühlt“ das Zwillingsquant das sofort und verändert sich auch.

Femtosekunden

Ziemlich kurz: 0,000 000 000 001 Sekunden dauert eine Femtosekunde. Licht kann in dieser Zeit gerade mal eine Strecke von 0,3 Mikrometern zurücklegen.

Heisenbergsche Unschärferelation

Schwankung: Bestimmte Größenpaare, wie Ort und Impuls oder Energie und Zeit, folgen einer Unschärferelation. Je genauer der Ort eines Teilchens bekannt ist, desto geringer ist die Information über seinen Impuls – und umgekehrt.

Interferenz

Verräterische Streifen: Wellen können sich gegenseitig auslöschen oder verstärken, dabei ergeben sich charakteristische Hell-dunkel-Streifen. Erstaunlicherweise erzeugen in manchen Experimenten auch Teilchen derartige Streifen, benehmen sich also wie Wellen.

Kohärenz

Lichtquanten im Gleichschritt: Ein Laser erzeugt Licht, das kohärent ist. Alle Wellenzüge sind dabei parallel und im Gleichtakt.

LIDAR

Radar für Licht: Mit diesem Verfahren kann man die räumliche Entfernung und die Konzentration von Schadstoffen in einem Arbeitsgang messen. Auf der Zuspitze steht eine solche Messstation.

Qubit

Ein Bit Licht: Ein Quantencomputer rechnet nicht mit gewöhnlichen Bits von Null oder Eins. Quantenmechanische Objekte befinden sich immer in einer Überlagerung aller möglichen Zustände. So kann ein Qubit gleichzeitig Null und Eins sein.

Röntgenstrukturanalyse

Durchleuchtung von Molekülen: Komplizierte Substanzen, etwa in der Pharmazie, bestehen aus riesigen Molekülen. Um ihre Struktur zu ergründen, erzeugt man aus ihnen Kristalle, die man mit Röntgenstrahlen durchleuchtet. Die kurzwelligen Strahlen werden an den Kristallebenen gebeugt und ergeben ein charakteristisches Muster. Aus ihm können Experten Rückschlüsse auf den Aufbau des Kristalls und damit letztlich des Moleküls ziehen.

Nanotechnik

Zwergenwelt: Elektronische und neuerdings auch mechanische Strukturen werden immer kleiner. In Zukunft werden viele Sensoren und Bauelemente für Computer im Atommaßstab entstehen. Dabei treten quantenphysikalische Effekte auf.

Photon

Es steht nie still: Teilchen der elektromagnetischen Strahlung heißen Lichtquanten oder Photonen. Sie bewegen sich grundsätzlich mit Lichtgeschwindigkeit und haben keine Ruhemasse.

Plasma

Der vierte Aggregatzustand: Gemische aus Ionen und Elektronen sind im Universum häufiger als feste Materie. Plasmen füllen das Weltall und bilden die Sterne. Auf der Erde müssen sie eigens erzeugt werden.

Spektroskopie

Detektivarbeit mit Licht: Jedes Atom oder Molekül hat einen entlarvenden „Fingerabdruck“ aus Licht, denn es kann jeweils nur ganz bestimmte Farben aufnehmen oder abgeben. So gelingt es mit geeigneten Messgeräten, aus der Zusammensetzung des abgestrahlten oder geschwächten Lichts die Art und Anzahl der getroffenen Atome oder Moleküle zu ermitteln.

Undulator

Dauerwelle mit Magneten: Eine Anordnung von Magneten, die sich so gegenüberstehen, dass sie einen Elektronenstrahl auf eine Slalombahn zwingen. Wenn der Slalomtakt kurz genug ist, kann man auf diese Weise intensive Röntgenstrahlung erzeugen, im Idealfall sogar einen Röntgenlaser bauen.

Messen mit Licht

„Der Laser ist eine Lösung auf der Suche nach einer Anwendung.“

Art Schawlow, 1962

Auch von Deutschland aus werden Laserstrahlen auf den Mond geschossen. Das Lasersystem der Fundamentalstation Wettzell im Bayerischen Wald visiert den Spiegel auf dem Mond an, um die Bahn des Erdtrabanten genau zu vermessen. (Quelle: Bilderberg)

Mit Messlatten und Schnüren mussten die Ägypter vor 4500 Jahren auskommen, um die Geometrie beim Bau ihrer Pyramiden festzulegen. Sollte in ferner Zukunft einmal die Zeitmaschine erfunden werden, würde der Zeitreisende mit einem Laser im Gepäck im alten Ägypten wohl begeistert empfangen. Ein Laser wäre nicht nur für die exakte Ausrichtung der Steinblöcke perfekt, er würde auch wunderbar in die nächtlichen Zeremonien passen, die mit dem Pyramidenbau verbunden waren.

Der Laser – ein Lineal aus Licht

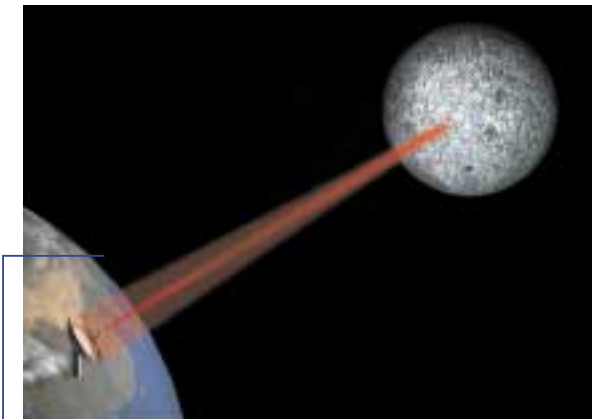
Die starke Bündelung des Laserstrahls, kombiniert mit seiner hohen Lichtintensität, eröffnet ihm überall dort Anwendungsgebiete, wo man masselose Lineale braucht, also bei der exakten Ausrichtung großer Bauteile, architektonischer Elemente oder langer Tunnel.

Auch für die Messung großer Entfernungen ist der Laser gut geeignet. So hilft er, die Entfernung Erde-Mond genau zu bestimmen. Schon im Juli 1969, bei der ersten Mondlandung, ließen die beiden Astronauten Neil Armstrong und Edwin Aldrin etwas auf dem Erdtrabanten zurück, was auch heute, 30 Jahre später, noch gute Dienste leistet: einen [Spiegel](#). Er besteht aus rund 100 Katzenaugen, die so geschliffen sind, dass sie einfallen-

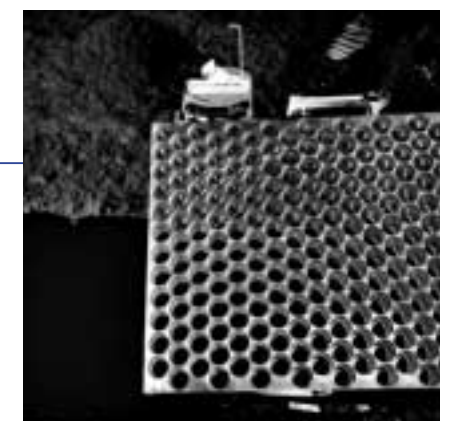
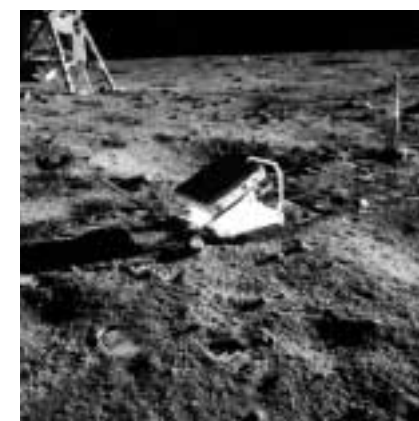
des Licht in sich selbst zurückwerfen. Im August 1969 gelang es dem Lick-Observatorium in Kalifornien erstmals, mit einem Laserpuls von 1,8 Millionen Kilowatt Leistung den Spiegel auf dem Mond anzuvisieren. Der Strahl war beim Auftreffen 1,6 Kilometer dick, bei seiner Rückkehr zur Erde nach etwa 2,5 Sekunden 16 Kilometer. Obwohl die Aufweitung des Licht stark abschwächt, konnte das Drei-Meter-Teleskop den reflektierten Puls noch nachweisen, und so bestimmte man damals mit Hilfe der gemessenen Laufzeit den [Abstand Erde-Mond](#) auf 20 Zentimeter genau, was einer Zeitmessung auf zehn Dezimalstellen entspricht. Mit Hilfe des Spiegels wird noch heute die Mondbahn beobachtet. Man will ermitteln, ob eventuelle Schwankungen der Bahn Hinweise auf Massenverschiebungen im Inneren des Mondes oder der Erde geben. Ähnliche Verfahren mit Satelliten benutzte man zur geodätischen Vermessung der Erde.

Überlagerte Wellen

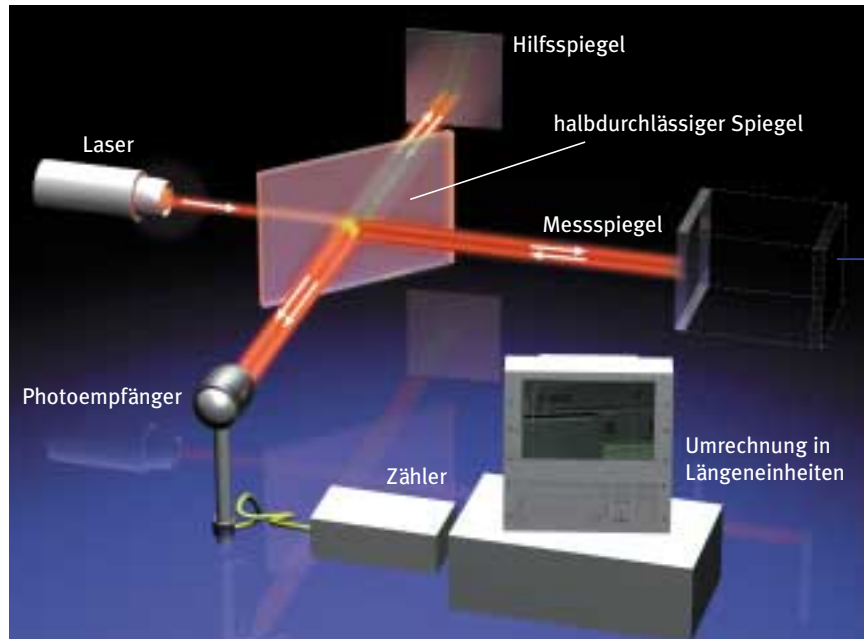
Laufzeitmessungen eignen sich nur für große Strecken. Kleine Abstände lassen sich mit Hilfe der Interferometrie bestimmen. Dabei teilt man einen Laserstrahl vor der Messung in zwei Teile auf und überlagert die Teilstrahlen nach der Messung wieder. Auf diese Weise ergibt sich ein Interferenzmuster, wenn die Weglänge der Strah-



Abstandsmessung Erde - Mond mit Hilfe eines Laserstrahls. Ein kleiner Spiegel auf dem Mond wirft den Laser zurück. Da die Lichtgeschwindigkeit konstant ist, können die Forscher von der Laufzeit auf die Entfernung schließen. (Grafik: I&P)



Bei der ersten Mondlandung ließen die Astronauten Armstrong und Aldrin etwas liegen: einen Spiegel, der aus rund 100 Katzenaugen besteht. (Quelle: NASA)



Prinzip der Interferometrie

Der Laserstrahl wird in zwei Teilstrahlen zerlegt. Nach Reflexion am Hilfsspiegel bzw. am beweglichen Messspiegel werden die beiden Strahlen wieder gebündelt und in einem Photodetektor zusammengeführt. Hat sich der Messspiegel verschoben, ergibt sich ein Wegunterschied der Strahlen, der dazu führt, dass eine Phasenverschiebung zwischen beiden auftritt. Die durch die Interferenz der zwei Laserstrahlen entstehenden hell-dunkel-Wechsel werden vom Photodetektor registriert. Der Zähler stellt die Anzahl der Wechsel fest – der angeschlossene Rechner bestimmt daraus die Wegänderung des Messspiegels. (Grafiken: I&P)



Prinzip der Spektroskopie

Beim Durchgang eines Lichtstrahls durch ein Gas oder eine Flüssigkeit absorbieren die darin vorhandenen Atome oder Moleküle ganz bestimmte Wellenlängen. Sie verändern damit den Lichtstrahl auf eine Weise, die charakteristisch ist für den jeweiligen Stoff. Der Vergleich mit dem unbeeinflussten Strahl ergibt das Absorptionsspektrum, bei dem die Stärke der Absorption gegen die Wellenlänge aufgetragen ist. Spiegel zur Umlenkung der Lichtstrahlen wurden in dieser schematischen Zeichnung weggelassen.

ger kann die entstehenden hellen und dunklen Streifen erfassen und ein Computer daraus den Wegunterschied berechnen. Dieses [Verfahren](#) benutzt man heute beispielsweise für die Steuerung von Greifarmen bei Robotern, aber auch bei einer Vielzahl von Präzisionsmessungen für die Abstandsbestimmung.

Eine andere Möglichkeit ist die Überlagerung zweier Laserstrahlen, von denen einer in seiner Frequenz verändert wurde. Man verwendet diese Methode zur Messung von Geschwindigkeiten und damit indirekt auch von Temperaturen. Das Prinzip beruht wieder auf dem Dopplereffekt (siehe Seite 12/13): Bewegen sich Sender und/oder Empfänger aufeinander zu, erscheint die Frequenz höher, entfernen sie sich voneinander, erscheint sie niedriger.

Strahlt man nun Laserlicht auf ein Objekt, das sich auf den Laser zu bewegt, wirft es das Licht mit etwas erhöhter Frequenz zurück. Überlagert man diesen Messstrahl mit einem ausgekoppelten Teil des ursprünglichen Strahls, zeigt sich eine „Schwebung“. Es handelt sich um eine periodische Zu- und Abnahme der Amplitude, aus der man die Frequenzverschiebung des Messstrahls errechnen kann. Aus ihr wiederum lässt sich die Geschwindigkeit des Objekts ermitteln.

Dieses Verfahren wird bei der Geschwindigkeitsmessung von Fahrzeugen eingesetzt, zur Steuerung von Werkzeugmaschinen oder bei der Beobachtung strömender Flüssigkeiten. Man kann es auch zur Temperaturmessung heißer Gase verwenden, denn die Geschwindigkeit der Gasteilchen ist ein Maß für deren Temperatur.

Licht als „Fingerabdruck“ von Atomen

Abstandsmessungen sind eine der leichtesten Übungen für Laserphysiker. Die hohe Schule des Messens mit Licht beginnt eigentlich erst bei der [Spektroskopie](#). Sie dient in erster Linie dazu, einzelne chemische Elemente an ihrem charakteristischen Licht zu erkennen und zu unterscheiden. Normalerweise senden Atome

kein Licht aus. Erst wenn man sie durch Energiezufuhr anregt, fallen sie nach einiger Zeit wieder in ihren Grundzustand zurück und geben dabei die überschüssige Energie in Form von Licht wieder ab. Aus millionenfachen Messungen ist heute der charakteristische „Fingerabdruck“ jeder Atom- und Molekülsorte bekannt. So kann man Stoffgemische analysieren und durch gezielte Anregung mit passendem Laserlicht bestimmte Atome aufspüren. Denn das „Schlucken“ von Licht – der Physiker spricht von Absorption – ist ebenso verräterisch wie das spätere Wiederabstrahlen (Emission).

Der Blick aufs Ozonloch

In der Umweltüberwachung hat sich der Einsatz der Spektroskopie als sehr nützlich erwiesen. Im einfachsten Fall schießt man einen Laserpuls quer durch eine Schadstoffansammlung, etwa eine Abgaswolke, auf einen Detektor. Wenn das Licht genau die Frequenz besitzt, die das Schadstoff-Molekül absorbieren kann, stellt die Abschwächung des Pulses ein Maß für die Menge der getroffenen Moleküle dar. Je höher die Schadstoffkonzentration, desto stärker wird der Puls geschwächt.

Weitaus anspruchsvoller ist das so genannte LIDAR-Verfahren (Light Detecting and Ranging), bei dem die Messung von Schadstoffen auch aus großer Entfernung möglich ist. Man macht sich dabei die Tatsache zu Nutze, dass Atome und Moleküle auftreffendes Licht streuen, das heißt, aus seiner ursprünglichen Bahn in alle möglichen Richtungen ablenken. Ein Laserpuls, der beispielsweise in eine Schadstoffwolke gestrahlt wird, erfährt diese Streuung. Aus diesem Grund kommt ein winziger Teil des ausgesandten Lichts als Streulicht wieder zurück. Wenn es gelingt, dieses Signal aufzufangen und zu analysieren, kann man aus seiner Intensität die Konzentration der Schadstoffe ermitteln. Gleichzeitig lässt sich aus der Zeit, die zwischen dem Aussenden des Pulses und dem Eintreffen des Signals vergeht, der Abstand zur Wolke ermitteln. Dieses Verfahren ist inzwischen technisch so ausgereift, dass geringste Schadstoffkonzentrationen gemessen werden können. Es wird auch eingesetzt, um die [Abnahme der Ozonkonzentration](#) in großen Höhen zu ermitteln.

Die genauesten Uhren gehen mit Licht

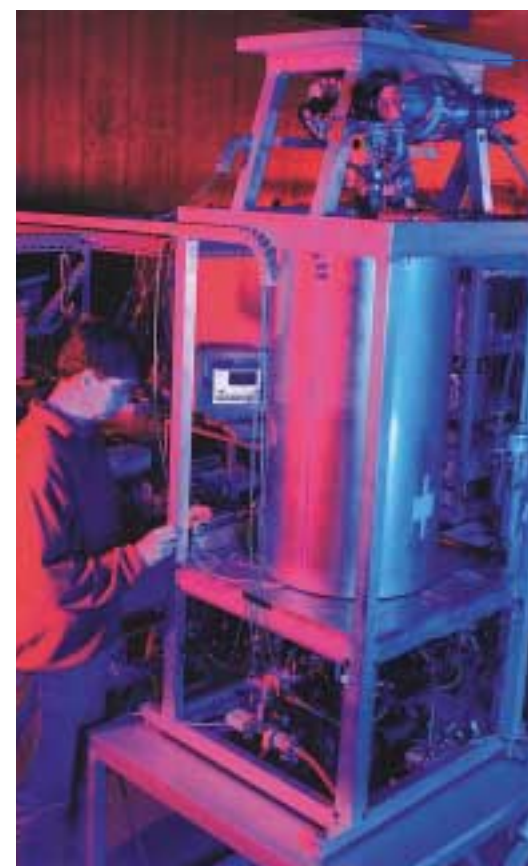
Selbst die Zeitmessung, die weltweit von hochgenauen [Atomuhren](#) gesteuert wird, würde nicht ohne Licht funktionieren. Das Grundprinzip jeder Atomuhr beruht darauf, eine bestimmte Lichtfrequenz konstant zu halten, die den Takt der Uhr steuert. Die heute vielfach gebräuchlichen Cäsium-Atomuhren bestehen aus einem Ofen, in dem Cäsiummetall verdampft wird. So erzeugt man einen Strahl aus Cäsiumatomen, der durch ein luftleer gepumptes Rohr läuft. Ein Magnet an dessen Ende lenkt nur Cäsiumatome

Atomuhr der neuesten Generation. Hier spielt nicht nur Mikrowellen-, sondern auch Laserstrahlung eine Rolle. Die Bewegungsenergie der Cäsium-Atome wird durch das Verfahren der Laserkühlung reduziert. Eine solche Uhr geht weniger als eine Sekunde in 10 Millionen Jahren fehl. (Quelle: PTB)



Messung der Ozon-Konzentration mit einem Laser. Das Lasergerät wird gerade von einem Helikopter auf der Zugspitze, dem höchsten Berg Deutschlands, abgestellt. (Quelle: MPI für Quantenoptik)

mit einem ganz bestimmten Energiezustand in den so genannten Resonator. In ihm werden die Atome mit Lichtquanten der Frequenz 9,19263177 Milliarden Hertz (Mikrowellen) bestrahlt. Die Atome können genau diese Frequenz absorbieren und werden dadurch angeregt. Nun lenkt ein zweiter Magnet die Atome in einen Detektor. Wenn dort plötzlich weniger Atome eintreffen, muss sich die Frequenz des Lichts im Resonator etwas verschoben haben. Ein elektronischer Regelkreis wird aktiv, der diese Takt-Frequenz nachregelt, bis im Detektor wieder die maximale Anzahl an Atomen eintrifft. Auf diese extrem genaue Art und Weise wird die Frequenz der Lichtquelle gleich gehalten und so die Uhr mit hoher Genauigkeit gesteuert.



Das blaue Wunder

„Die Untersuchung des Lichts hat zu Leistungen der Erkenntnis, Phantasie und Erfindungsgabe geführt, die auf keinem Gebiet geistiger Betätigung übertroffen wurden“

Sir J. J. Thomson, 1925

Die blaue Leuchtdiode im Labor
(Quelle: Osram OS)

Manchmal gehen Revolutionen ganz langsam vor sich. Die Erfindung der blauen Leuchtdiode jedenfalls dauerte Jahrzehnte. Man kannte LEDs (Light Emitting Diodes) in den Farben rot, gelb und später auch grün, die man für Anzeigen von Computern und Instrumenten verwendet, oder für Displays, etwa in Sportarenen oder bei Leuchtreklamen. Was fehlte, war Blau, denn aus Rot, Grün und Blau lassen sich alle Farben darstellen. Jeder Fernsehbildschirm tut es.

Leuchtdioden bestehen aus Halbleitern, die normalerweise elektrischen Strom nicht leiten können. Wenn man sie jedoch mit bestimmten Stoffen versetzt („dotiert“), kann man ihnen beispielsweise einen Überschuss an Elektronen mitgeben. Andere Dotierungen können einen Mangel an Elektronen erzeugen, so genannte Löcher. Kombiniert man nun zwei unterschiedlich dotierte Arten von Halbleitern als dünne Schichten und legt eine geringe Spannung an, wandern Elektronen von einer Schicht in die andere und fallen in die Löcher. Dabei geben sie ihre Energie in Form von Licht ab.

Um eine blaue Leuchtdiode zu bauen, muss man eigentlich nur ein Material finden, dessen Elektronen blaues Licht abgeben, wenn sie in die Löcher fallen. Eine schwierige Aufgabe, denn blaues Licht ist energiereicher als rotes, gelbes und grünes. Rund um die Welt suchten Forscher nach einem solchen Material. In den sechziger Jahren schien Galliumnitrid ein geeigneter Kandidat zu sein, doch letztlich gelang es nicht, ein geeignetes Trägermaterial für die benötigten dünnen Schichten zu entwickeln. Man gab schließlich die Versuche auf und bevorzugte nun Zinkselenid, das verheißungsvoller erschien. Erst in den achtziger Jahren wurde das Problem des Trägermaterials wenigstens prinzipiell gelöst – doch auch nach zwanzig Jahren intensivster Forschung lag der Traum einer universell einsetzbaren blauen Leuchtdiode in weiter Ferne.

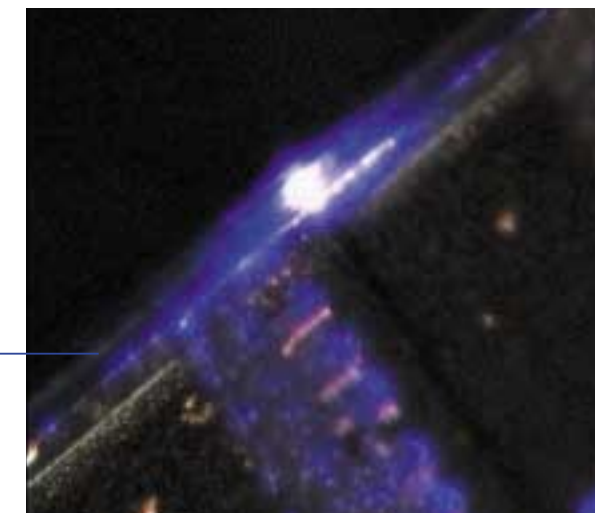


Laserdioden können in sehr kleinen Abmessungen gebaut werden. Sie finden zum Beispiel in CD-Spielern Verwendung. (Quelle: Fraunhofer Gesellschaft)

Der Durchbruch kam wie im Märchen: Shuji Nakamura, Angestellter einer mittelständischen Firma im südlichen Japan, war fasziniert von der Suche nach der blauen Leuchtdiode. Er experimentierte ganz gegen den allgemeinen Trend mit dem Stoff, der in den sechziger Jahren „en vogue“ war – und hatte Erfolg. Später erzählte er: „Ich habe mir Galliumnitrid eigentlich nur deshalb ausgesucht, weil sonst kaum jemand damit arbeitete.“ Im Oktober 1996 war sein System so weit optimiert, dass Nakamura seine blaue LED einige Sekunden lang zum Leuchten brachte. Nur zwei Monate später strahlte die Diode schon 35 Stunden lang. Nun setzte international ein „run“ auf die blaue Leuchtdiode ein. Forscher auf der ganzen Welt experimentierten mit dem neuen, aber eigentlich alten Material. Auch in Deutschland schimmerte es bald blau in den Labors der Halbleiterphysiker.

Und aus den blauen Leuchtdioden lassen sich endlich auch [blaue Halbleiter-Laser](#) bauen, ebenfalls ein alter Traum der Forscher. Diese blauen Laserdioden werden vielfältige Anwendungen finden: Ihre kürzere Wellenlänge ermöglicht zum Beispiel eine feinere Abtastung der CD; die Pits, mit denen die Informationen gespeichert werden, lassen sich auf der CD dann viermal so dicht packen wie bei infrarotem Licht. Dies bedeutet, dass mit blauen

Lasern ein ganzer Kinofilm im hochauflösenden Fernsehformat und in Hifi-Qualität auf einer kleinen Kunststoffscheibe Platz fände. Damit könnten digitale Videodisks (DVD) in Zukunft die Magnetband-Videokassetten ersetzen. Und zusammen mit roten und grünen [Halbleiterlasern](#) kann die blaue Laserdiode bewegte Bilder in jeder Farbe gestochen scharf auf Bildschirmen zaubern. Damit wird schließlich auch dem Traum eines deutschen Erfinders zum Durchbruch verholfen: Christian Deter, Erfinder des Laser-TV, musste vor wenigen Jahren auf Gaslaser mit einem Energieverbrauch von 20 bis 30 Kilowatt und 60 Liter Kühlwasser pro Minute zurückgreifen, um das Prinzip des laserbasierten Fernsehschirms erstmals zu demonstrieren. Mit roten, grünen und blauen Laserdioden reduziert sich der Fernseher der Zukunft auf ein zigarrenschachtelgroßes Gerät, mit dessen Hilfe das Bild an die Wohnzimmerwand oder – bei Bedarf – auch auf die Anzeigentafel eines Stadions projiziert werden kann.



Der blaue Halbleiter-Laser unter dem Mikroskop. Er wird in Zukunft der Informationstechnologie neue Möglichkeiten eröffnen. (Quelle: Osram OS)

Am Puls des Moleküls

„Das Licht sehen – das ist eine Metapher für das Anschauen des Unsichtbaren im Sichtbaren, die Entdeckung der feinen Vorstellungsnetze, die unseren Planeten und alle Existenz zusammenhalten“
Arthur Zajonc, *Catching the Light*, 1993

Über eine Linse wird ein Laserstrahl in eine Flüssigkeit fokussiert und steuert dort eine chemische Reaktion.
(Quelle: Inst. für Experimentalphysik I, Uni Würzburg / Philip Morris)

Der Femtosekundenlaser ist ein aufregendes, neues physikalisches Werkzeug, das es den Forschern erlaubt, chemische Reaktionen wie in Zeitlupe zu verfolgen. Mit Hilfe der ultrakurzen Lichtpulse kann man beobachten, wie sich die Atome im Molekül verhalten, wenn chemische Verbindungen zerbrechen und neue entstehen.

Über Jahrhunderte war die Chemie eine reine Erfahrungswissenschaft. Aus Zigtausenden von Versuchen wusste man, wie bestimmte Stoffe reagieren, wenn man sie mit anderen zusammenbringt. So lernte man, eine Vielzahl neuer Substanzen herzustellen. Bis vor kurzem lag aber immer noch im Dunkeln, was geschieht, wenn sich Atome zu Molekülen zusammen tun. Zwar hatte schon Svante Arrhenius, der Chemie-Nobelpreisträger des Jahres 1903, vor mehr als hundert Jahren eine einfache Formel für die Reaktionsgeschwindigkeit als Funktion der Temperatur gefunden. In den dreißiger Jahren formulierten dann Henry Eyring und Michael Polanyi eine Theorie für die Reaktionen einzelner Moleküle. Diese nahm an, dass es einen „Übergangszustand“ gebe, einen extrem kurzlebigen Moment ohne Wiederkehr in jeder Reaktion, den die Atome irgendwann überschreiten und sich miteinander verbinden. Dass man jemals Experimente in derartig kurzen Zeitabständen machen könnte, um dieses Ereignis genauer zu untersuchen, davon konnte man damals nicht einmal träumen.

Seit 1972 entwickelten Forscher jedoch Laser mit ultrakurzen Pulsen, die bald auch in den Femtosekundenbereich vorstießen. Eine Femtosekunde ist unvorstellbar kurz. Sie beträgt 10^{-15} Sekunden, also den millionsten Teil einer Milliardstel Sekunde; im Verhältnis zu einer Sekunde ist dies genauso wenig wie eine Sekunde im Verhältnis zu 32 Millionen Jahren. Derartig kurze Pulse eignen sich wie eine Art Stroboskop-Licht zur Zerlegung von schnellen chemischen Vorgängen in einzelne Bilder. Als Arbeitspferd der Femtochemie – wie man dieses

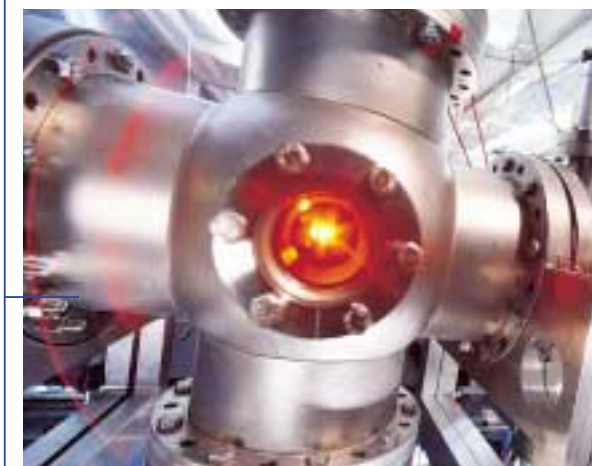
Gebiet neuerdings nennt – hat sich der Titan-Saphir-Laser durchgesetzt, der im infraroten oder sichtbar roten Bereich arbeitet. Er sendet Lichtblitze von einigen -zig Femtosekunden Dauer aus und trifft damit ziemlich genau die „Pulsfrequenz“ von Molekülen. Denn die Zeit, die sie benötigen, um eine Schwingung auszuführen, beträgt im Durchschnitt zehn bis 100 Femtosekunden.

Wie mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gelang es, mit derartigen Lasern Moleküle während des Ablaufs einiger chemischer Reaktionen abzubilden und ein Bild von ihnen genau dann einzufangen, wenn sie sich im Übergangszustand befanden. So konnten die Forscher nachweisen, dass es Zwischenprodukte gibt, sogenannte Intermediäre, die sich auf dem Weg zwischen den ursprünglichen Stoffen und den Endprodukten bilden. Diese Resultate halfen auch, zu verstehen, warum bestimmte chemische Reaktionen stattfinden, andere aber nicht – eine Erkenntnis von großer praktischer Bedeutung.

Denn genau sie ist der Schlüssel zu einer Vielzahl nützlicher Anwendungen. Die Kunst der Chemie ist es ja gerade, aus einer Unmenge möglicher Reaktionspfade genau denjenigen anzusprechen, der zum gewünschten Produkt führt. Wenn es nun in großem Maßstab gelänge, mit genau passenden Laserpulsen Atomen so exakt Energie mitzugeben, dass sie bestimmte chemische Reaktionen ausführen, könnte dies zu einer Revolution in der Chemie führen. So sind der Fantasie in diesem Bereich kaum Grenzen gesetzt. Experten erwarten, dass sich in der Verbrennungsforschung, in der Umwelttechnik und in der medizinischen Diagnostik umwälzende Neuerungen ergeben. Auch die Synthese neuer Materialien, die Veredelung von Oberflächen oder die Konstruktion molekularer Maschinen ist in greifbare Nähe gerückt. So könnte es sein, dass mit dem Femtosekundenlaser die Physik einmal mehr ihrer Schwesterwissenschaft Chemie auf die Sprünge hilft.



Herzstück der Laserkontrolle chemischer Reaktionen ist der Laser-Pulsformer. Er zerlegt Licht in seine spektralen Bestandteile. (Quelle: Inst. für Experimentalphysik I, Uni Würzburg / Philip Morris)



In den Vakuum-Kammern dieser Apparatur werden mittels eingekoppelter Laserpulse chemische Reaktionen in einem Gas ausgelöst. (Quelle: Inst. für Experimentalphysik I, Uni Würzburg / Philip Morris)

Gebändigtes Röntgenlicht

„Und man siehet die im Lichte.
Die im Dunkeln sieht man nicht.“
Bertolt Brecht, *Die Dreigroschenoper*

In Naturwissenschaft und Technik geht der Trend an der Schwelle zum 21. Jahrhundert zu immer kleineren Abmessungen. Er zeigt sich in der Forschung, wo man mittlerweile einzelne Atome und sogar Photonen beobachten und manipulieren kann, aber auch in der Fertigungstechnik, etwa in der Mikroelektronik. So sind die Bauelemente für Computer in den letzten 30 Jahren stetig kleiner geworden. War im Jahr 1970 ein Transistor noch etwa ein Hundertstel Millimeter „groß“, ist er 1985 schon auf ein Zehntel dieser Größe geschrumpft, und heute sind seine Abmessungen erneut zehnmal winziger. Wenn der Fortschritt in der [Miniaturisierung](#) voranschreitet wie bisher, wären in 15 Jahren die elektronischen Bauelemente nur noch rund zehn Nanometer groß. Dies entspricht einer Reihe von etwa 40 Atomen in einem Kristall.

Röntgenstrahlung als Werkzeug und Sonde

Das Werkzeug Licht muss mit dieser Entwicklung Schritt halten. [Sichtbares Licht](#) ist beispielsweise zur Herstellung winziger Schaltkreise im Nanometermaßstab

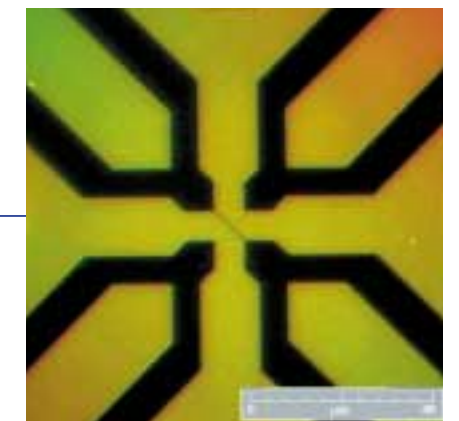
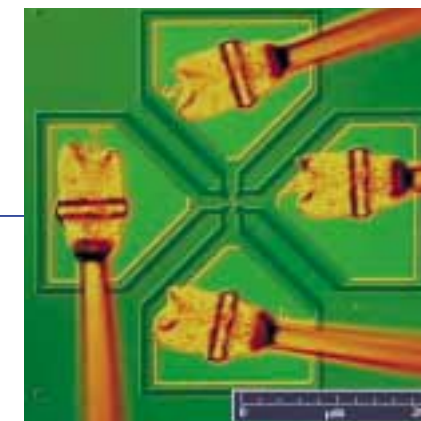
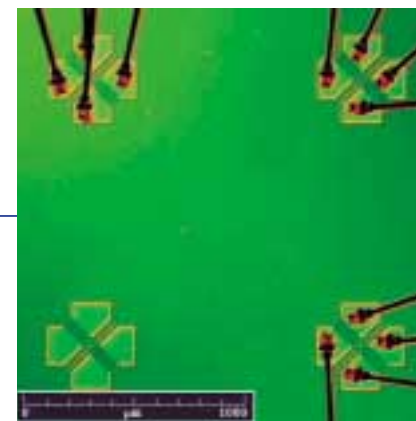
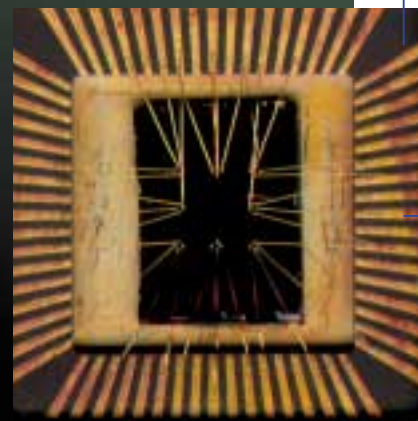
nicht mehr geeignet. Seine Wellenlänge, die etliche hundert Nanometer beträgt, wäre größer als die Strukturen, die es erzeugen soll. Dies entspräche dem Versuch, mit einem Vorschlaghammer eine Taschenuhr zu reparieren.

Deshalb bemühen sich Forscher weltweit, Lichtquellen im Ultravioletten und im Röntgenbereich zu entwickeln. Diese wären nicht nur nützlich für die Fertigung von Nanostrukturen, sondern auch als Sonden in der Grundlagenforschung. So eignet sich extrem kurzwelliges Licht zur Untersuchung feinsten biologischer Objekte, etwa für Gene, Viren oder Enzyme. Auch bei der Durchleuchtung von Kristallen zur Analyse [organischer Riesenmoleküle](#), der so genannten Röntgenstrukturanalyse, ist intensives kohärentes Röntgenlicht unentbehrlich. Hier eröffnen sich wichtige Anwendungen in der medizinischen und pharmazeutischen Forschung. Eine besondere Herausforderung ist schließlich die Röntgenholographie, also die Erzeugung dreidimensionaler Abbilder im kurzwelligen Bereich. Ein zuverlässiger, lichtstarker Röntgenlaser wäre somit fast eine Neuausgabe von Aladins Wunderlampe.

Unter der Maske

Sichtbares Licht wird heute zur Herstellung winziger Schaltkreise für die Mikroelektronik benutzt. Man belichtet dabei Siliziumscheiben, die mit lichtempfindlichem Lack abgedeckt sind. Nur an den Stellen, die von Masken geschützt wurden, bleibt der Lack erhalten. An den anderen Stellen kann das ungeschützte Silizium nun geätzt werden. Auf diese Weise entstehen Mikro-Strukturen wie zum Beispiel Leiterbahnen etc.

Organisches Riesenmolekül. Diese Computergrafik wurde nach Daten aus der Röntgenstrukturanalyse erstellt. (Quelle: BASF)



Die Miniaturisierung in der Mikroelektronik schreitet immer weiter voran. Hier ist ein Zoom in immer kleinere Dimensionen dargestellt. Die Maßstäbe im Bild geben die Größenordnung an. (Quelle: Institut für Halbleitertechnik II, RWTH Aachen)



Test der Beschleuniger-Struktur im Reinraum. (Quelle: DESY)

Elektronen auf der Slalombahn

Es gibt mehrere Wege zur Erzeugung extrem kurzwelliger elektromagnetischer Strahlen: Synchrotronstrahlung, Freie-Elektronen-Laser und hocherhitzte Plasmen.

Die Synchrotronstrahlung wird von Elektronen abgegeben, wenn sie sich auf Kreisbahnen bewegen, etwa in einem Beschleuniger oder Speicherring. Da diese Strahlung zwar sehr intensiv, aber nur mäßig gebündelt und vor allem nicht kohärent ist, ist sie für manche Zwecke nicht geeignet.

Zur Verbesserung der Strahleigenschaften zwingt man deshalb im Freie-Elektronen-Laser hoch beschleunigte, fast licht-schnelle Elektronen durch eine Anordnung alternierender Magnete, einen sogenannten Undulator, auf eine Slalombahn. Dabei geben sie ihre Strahlung weitgehend im Gleichtakt ab. Bei einem sehr kurzen Slalomtakt erzeugt dieser Laser entsprechend kurzwelliges Licht im extremen UV- oder sogar Röntgenbereich. Spiegel könnten den entstehenden

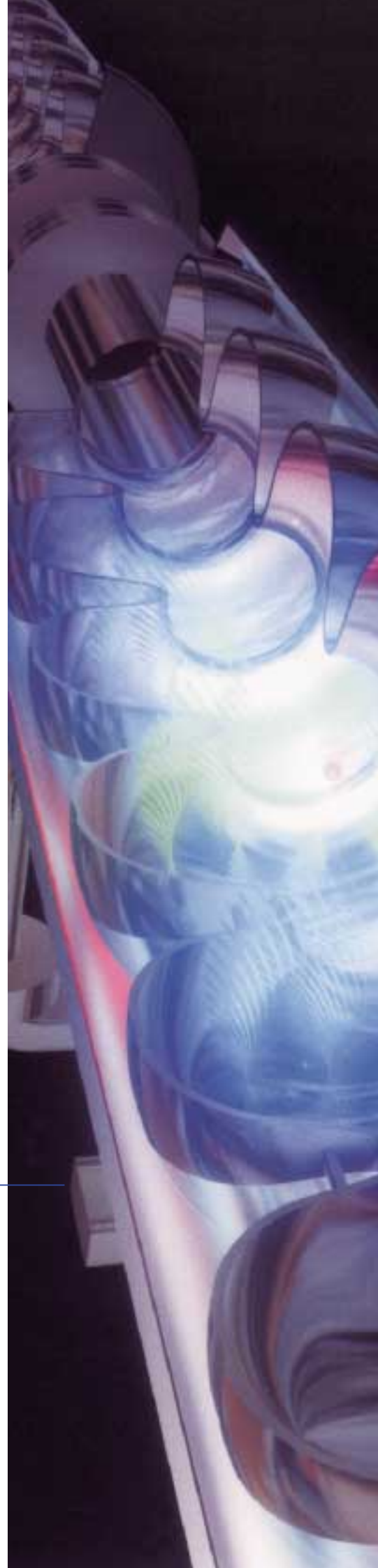
Strahl zusätzlich verstärken und bündeln. Leider gibt es aber kein Material, das sich dazu eignen würde, einen Röntgenstrahl zu reflektieren – er geht durch einen Spiegel einfach hindurch. Man hofft jedoch, mit einer Kombination sehr dünner Schichten, die man auf die Spiegel aufdampft, wenigstens einen Teil der Röntgenstrahlung zurückwerfen zu können und so optische Komponenten auch für den extrem kurzwelligen Bereich zu entwickeln.

Elektronen und Wellen im Wettlauf

Ganz ohne Spiegel kommt hingegen der Freie-Elektronen-Laser nach dem SASE-Prinzip (Self-Amplified Spontaneous Emission) aus. Er arbeitet mit kompakten, sehr energiereichen Elektronenpaketen, wie sie nur von besonderen [Teilchenbeschleunigern](#) erzeugt werden können. Die im Undulator entstehende spontane Strahlung der Elektronen ist etwas schneller als diese und holt deshalb die vor ihr fliegenden Teilchen ein. Sie beschleunigt einen Teil und bremst einen anderen Teil ab. Durch die Wechselwirkung mit der selbst erzeugten elektromagnetischen Welle entstehen also dünne, scheibenförmige Elektronenpakete, die synchron strahlen: ein sich selbst verstärkender Effekt. Erste Versuche mit einem 300 Meter langen Freie-Elektronen-Laser am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg, der nach diesem Prinzip arbeitet, verliefen erfolgreich. Es handelt sich um die Pilotanlage zu einem Röntgenlaser, der am DESY im Zusammenhang mit einem 33 Kilometer langen [Linearbeschleuniger](#) geplant ist.

Weniger als eine Billiardstel Sekunde werden seine Blitze dauern, gleichzeitig werden sie mehr als eine Milliarde mal stärker sein als die besten Röntgenquellen heute. Man will mit ihnen wie in einem Film chemische und physikalische

In den Resonatoren des Linearbeschleunigers schwingen elektromagnetische Felder, die die Elektronen auf Geschwindigkeit bringen. (Quelle: DESY)



Reaktionen in ihrem zeitlichen Ablauf verfolgen. Vor allem die Biologen sind an dem neuen Werkzeug interessiert. Es gibt ihnen die Möglichkeit, komplizierte organische Verbindungen zu durchleuchten und zu untersuchen, wie sie an andere Moleküle andocken. Das so gewonnene Wissen kann beispielsweise dabei helfen, neue Medikamente zu entwickeln.

Heißer als das Innere der Sonne

Eine ganz andere Möglichkeit zur Erzeugung kohärenten Röntgenlichts ist ein hoch erhitztes Plasma, das ist ein Gas aus geladenen Teilchen, zum Beispiel Elektronen und geladenen Atomen, den sogenannten Ionen. Die Plasmaphysik hat in den letzten Jahren einen gewaltigen Aufschwung erlebt, und Experten trauen ihr wahre Wunderdinge zu. Dies ist nicht zuletzt auf Fortschritte in der Lasertechnologie zurückzuführen, die mit Hilfe kürzester Pulse (nur wenige Femtosekunden lang) sehr hohe Lichtintensitäten erzeugen kann.

Fokussiert man einen starken Femtosekundenlaser auf ein geeignetes Ziel (ein „Target“), so zerstäubt er das Material und heizt es auf sehr hohe Temperaturen auf. Wegen der extrem hohen Energiekonzentration auf engstem Raum entsteht dabei ein Gas aus geladenen Atomen. Welche Vorgänge in einem solchen Plasma genau ablaufen, wird derzeit erforscht – es sind prinzipiell dieselben Prozesse wie im Inneren von Sternen, die man auf diese Weise erstmals im Labor studieren kann. In jedem Fall sendet ein solches [Plasma](#) elektromagnetische Wellen im Röntgenbereich aus – im Laserfokus entsteht eine fast punktförmige Quelle sehr intensiver Röntgenstrahlung. Solche Quellen sind nicht nur für die Forschung, sondern insbesondere auch für die industrielle Fertigung interessant: Mit ihnen werden wahrscheinlich die Computerchips der nächsten Generation gefertigt werden,

deren Strukturen selbst nur noch 50 Nanometer groß sind, zehnmal kleiner als die Wellenlänge sichtbaren Lichts. Durch besonders geschickte Wahl der Plasma-parameter kann man sogar Lichtverstärkung durch stimulierte Emission erreichen: Der [Röntgenlaser](#) ist realisiert.

In vielen Labors untersucht man auch ein Phänomen, das eines Tages zu einer weiteren Quelle für kohärente Röntgenstrahlung führen könnte: die Frequenzvervielfachung. Unter extremen Bedingungen kann ein Laserstrahl die Atome eines Targets nicht nur in ihrer eigenen Frequenz stark anregen, sondern auch parallel dazu Oberschwingungen auslösen, ähnlich wie man dies von schwingenden Saiten kennt. Anschließend strahlen die Atome Lichtquanten ab. Deren Frequenz beträgt ein Vielfaches der Grundfrequenz und kann sich bis in den Röntgenbereich erstrecken. Die Umwandlungsrate in Röntgenlicht ist allerdings sehr gering – jenseits der hundertsten Oberwelle wird weniger als der millionste Teil des eingestrahnten sichtbaren Lichts in Röntgenstrahlung verwandelt. Wegen der hohen Strahlqualität erscheint es aber aussichtsreich, auch nach diesem Prinzip kohärente Röntgenlichtquellen zu bauen. Sie wären ideale Werkzeuge für Forschung und Diagnostik in den Mikro- und Nanowelten des kommenden Jahrhunderts.



In dieser Apparatur wird mit Hilfe eines Plasmas kohärentes Röntgenlicht erzeugt. (Quelle: Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie)



Lasererzeugtes Plasma. Emission im sichtbaren Licht. (Quelle: FhG-IWS/VDI-TZ)





Bundesministerium für Bildung und Forschung

bmb+f

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unentgeltlich abgegeben. Sie ist nicht zum gewerblichen Vertrieb bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlbewerbern oder Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen Parlament. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen und an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung.

Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Bundesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

BM BF PUBLIK