

Zauberhafte Geschwindigkeiten aus der Retorte

Spektrum der Wissenschaft Online (12.10.2000)

Dramatisch muss eine Nachricht sein. Neue Weltrekorde sind gut. Gebrochene Tabus noch besser. Und ein gestürztes Genie einfach perfekt: Einstein hat sich geirrt - Überlichtgeschwindigkeit ist möglich! Das Jahr 2000 bescherte uns gleich zwei Mal diese Meldung, gestimmt hat es allerdings nie. Schuld an der Verwirrung ist die noch ungeklärte Frage, was physikalisch unter einer 'Information' zu verstehen ist. Diese Lücke nutzen manche Wissenschaftler, um aus ihrem Hut angeblich Kaninchen zu zaubern, die sie noch gar nicht reingesteckt hatten.

"Information" ist das zentrale Stichwort, wenn es um vermeintliche Überlichtgeschwindigkeit geht. Denn nach Einsteins Relativitätstheorie kann sich keine Information schneller als mit der Geschwindigkeit des Lichts im Vakuum ausbreiten. Dagegen war Überlichtgeschwindigkeit im weiteren Sinne bis vor einigen Jahren noch geradezu alltäglich: Lässt man eine der mittlerweile altmodischen Schallplatten in ihre Hülle zurückgleiten, bewegen sich die Schnittpunkte des Plattenrandes mit der Kartonhülle immer schneller aufeinander zu - zum Schluss sogar mit Überlichtgeschwindigkeit. Information kann man so allerdings nicht übertragen.

Auch eine einzelne Lichtwelle ist dafür ungeeignet. Sie ist als ideale Sinusschwingung eine räumlich und zeitlich unbegrenzte Abfolge von Bergen und Tälern, ohne unerwartete Struktur, die man als Signal interpretieren kann. Erst die Kombination mehrerer Wellen mit verschiedenen Frequenzen macht das Bild interessanter. Eine Überlagerung von zwei Wellen ergibt eine Schwebung, bei der die Intensität des elektromagnetischen Feldes an- und abschwilt. Aber immer noch ist das Ganze beliebig ausgedehnt. Um wirklich Information damit zu übertragen, müsste man ein Stück ausschneiden, zum Beispiel ein einzelnes Maximum.

Dieses Kunststück ist mit Hilfe weiterer Interferenzen machbar. Eine dritte Welle mit einer Frequenz genau zwischen den beiden ersten bringt die beiden benachbarten Maxima zum Verschwinden, eine vierte Welle unterdrückt das nächste Paar und so fort. Die Überlagerung von unendlich vielen Wellen liefert schließlich ein Lichtpuls genanntes Wellenpaket, das aus einem einzigen Maximum besteht.

In der Praxis müssen sich die Wissenschaftler natürlich mit endlich vielen Ausgangswellen und daher nicht perfekten Paketen begnügen. Wichtiger ist allerdings der Umstand, dass die Lichtpulse in ihren Versuchen Überlagerungen vieler Einzelwellen mit unterschiedlichen Frequenzen sind. Diese reagieren nämlich alle leicht unterschiedlich, wenn das Licht von einem Medium in ein anderes übertritt. Ein Regenbogen demonstriert den als Dispersion bezeichneten Effekt besonders schön: Rotes Licht wird an den Grenzen der Wassertröpfchen stärker gebrochen als blaues Licht. Als quantitatives Maß haben Physiker den Brechungsindex eingeführt. Er gibt das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten im Vakuum und im Medium an - je größer der Wert, umso langsamer kommt das Licht in dem Material voran.

Nun gibt es aber auch Stoffe, die nicht das eintretende rote Licht stärker brechen, sondern blaues. Dieses als anormale Dispersion bezeichnete Phänomen tritt bei Materialien mit negativem Brechungsindex auf. Im Prinzip kann der so weit ins Minus gehen, dass selbst ein negatives Vielfaches der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit denkbar ist. Das Vorzeichen ergibt sich aus der Gleichung und hätte für eine Information wenig zu bedeuten. Die Geschwindigkeit an sich wäre jedoch so groß, dass in einem solchen Fall die Folge vor der Ursache auftreten müsste. In der Natur lässt sich sowas allerdings nicht beobachten, da anormal dispergierende Substanzen Licht so stark

absorbieren, dass sie undurchsichtig sind.

Was unter gewöhnlichen Bedingungen nicht passiert, das können Forscher im Labor manchmal erzwingen. Am 20. Juli 2000 traten Lijun Wang, Arthur Dogariu und Alexander Kuzmich vom NEC Research Institute in Princeton mit einem Artikel in Nature an die Öffentlichkeit. Sie erklärten darin, dass in ihrem Experiment ein Lichtpuls so schnell durch eine Probenkammer gewandert sei, dass er am anderen Ende früher auftauchte, "als wenn er die gleiche Strecke im Vakuum zurückgelegt hätte." Fast ebenso flink war die Nachricht von der Überlichtgeschwindigkeit in allen Medien. Der nachfolgende Satz, dass die Überlichtgeschwindigkeit "keinen Widerspruch zur Kausalität darstellt, da sie eine direkte Konsequenz der klassischen Interferenz der verschiedenen Frequenz-komponenten in einer Region mit anormaler Dispersion ist", klang dagegen wohl zu kompliziert und abschwächend - er schaffte es so gut wie nie in die Berichterstattung. Vielleicht war das den NEC-Wissenschaftlern auch ganz recht, denn sie hatten wie Zauberkünstler ihre Versuchsbedingungen mit viel Liebe und Mühe so eingestellt, dass es tatsächlich so aussah, "als ob..."

Eine sechs Zentimeter lange Glaszelle hatten die Forscher mit Cäsiumdampf gefüllt. Dieses Gas könnte 16 verschiedene Quantenzustände einnehmen, von denen aber nur der unterste besetzt war. Das erreichten Wang und seine Kollegen durch so genanntes optisches Pumpen, indem sie das Cäsium während der gesamten Dauer des Experiments mit Laserlicht bestrahlten. Mit einem zweiten Laser schickten sie einen Testpuls von 3,7 Mikrosekunden Dauer durch die Kammer. Er hatte fast die Form einer Gaußglocke: Zunächst stieg die Intensität an, erreichte ein Maximum und fiel dann wieder ab. Die halbe Höhe an der aufsteigenden Flanke stellte für die Forscher die Information dar.

Um im Vakuum sechs Zentimeter zurückzulegen, wäre das Maximum 0,2 Nanosekunden unterwegs, schickten sie den Lichtpuls aber durch das Cäsiumgas, trat es 62 Nanosekunden früher aus der Kammer aus. 62 Nanosekunden früher als nach 0,2 Nanosekunden - das bedeutete, die Information verließ die Kammer, bevor sie überhaupt hineingegangen war. Ihre Geschwindigkeit wäre das 310-fache der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum gewesen.

Der Widerspruch zur Intuition und speziellen Relativitätstheorie löst sich auf, wenn man den Lichtpuls sowie die Vorgänge an und in der Glaszelle genauer betrachtet: Der schöne glockenförmige Verlauf der Lichtintensität ist das Resultat einer Überlagerung von vielen Einzelwellen mit verschiedenen Frequenzen. Jede davon wird auf Grund der anormalen Dispersion im Cäsium beim Eintritt in das Gasmedium anders verzögert. Dadurch interferieren sie anders und der Puls bekommt eine ganz neue Form. Beim Austritt des Lichtes erhalten die einzelnen Strahlen zwar wieder ihre ursprüngliche Frequenz, aber weil sie unterschiedlich schnell durch das Gas gewandert sind, haben sie sich gegeneinander verschoben. Als Folge entsteht ein Maximum weiter vorne im Puls. Die halbe Höhe dieses neuen Maximums interpretierten die Physiker als ihr Signal. In Wirklichkeit gab es jedoch zwei Maxima an verschiedenen Stellen des Testpulses: Das eine entstand im Laser und war noch gar nicht in die Kammer eingetreten, während das andere weiter vorne im Puls durch die Interferenz der verschobenen Wellen wuchs, 62 Nanosekunden Vorsprung hatte und das Gas schon verließ. Die Überlagerung verlief so, dass hinter dem Cäsium nur noch dieses neue Maximum übrig blieb. War das Überlichtgeschwindigkeit?

Die Antwort hängt davon ab, was unter "Information" zu verstehen ist. Wangs Team setzt das halbe Intensitätsmaximum an der aufsteigenden Flanke des Lichtpulses als Signal fest, und das ist in ihrem Versuch zwar auf rund 40 Prozent des Ausgangswertes geschrumpft, aber eben hinter der Kammer auch so weit vorne, wie es mit Lichtgeschwindigkeit nicht hätte sein können. Insgesamt hatte der Puls sogar wieder fast die gleiche Form wie zu Anfang. Darin sehen Kritiker die eigentliche Leistung und den Trick der Wissenschaftler, denn Verschiebungen von Maxima durch anormale Dispersion war schon anderen Arbeitsgruppen gelungen. Allerdings waren die Pulse hinter den Proben stark

verformt und ihre Intensität heftig reduziert. Die NEC-Forscher hatten dagegen als erste ihre Bedingungen so fein eingestellt, dass der eingehende und ausgehende Puls sich zum Verwechseln ähnelten und ganz grob betrachtet etwa gleich groß waren.

Trotz des Augenscheins hat sich jedoch auch in Wangs Experiment keine Welle überlichtschnell bewegt und auch kein "Punkt" des Pulses. Der Vorgang an der Kammer ist vergleichbar mit dem Ausrollen eines Kuchenteigs: An einigen Stellen hat er Luftblasen, die vor dem Nudelholz durch kleine Kanälchen fliehen und weiter vorne neu entstehen. Sind beim Teig tatsächlich Teilchen unterwegs, sorgen beim Lichtpuls alleine die anormale Dispersion und Interferenz für eine transportfreie Umordnung. Beide Male sieht es so aus, als sei der Träger gewandert, obwohl er sich gar nicht oder zumindest viel langsamer bewegt hat.

Definiert man einen plötzlichen Sprung in der Intensität - zum Beispiel das Auftreten der ersten Photonen - als Information, verschwindet jeglicher Hauch von Überlichtgeschwindigkeit sofort. Auch in Wangs Versuch hat kein Licht die Kammer verlassen, bevor der Puls das Cäsium mit der Material-typischen Geschwindigkeit durchwandert hat. Manche Physiker sind daher der Ansicht, nur Experimente mit wenigen Photonen könnten überzeugende Argumente für eine Überlichtgeschwindigkeit bringen - wenn solche Versuche überhaupt erfolgreich wären.

Abgesehen von dem wissenschaftlichen Anspruch möchte Wang seine Arbeit auch zum Wohle der Menschheit einsetzen. Auf seiner Homepage schreibt er: "Wir hoffen, dass unsere Arbeit nützlich werden kann für friedliche Anwendungen, von denen die ganze Menschheit profitiert." An welche Art von Anwendung er dabei denkt, hat Wang nicht erwähnt. Und so sind andere Physiker skeptisch, darunter Dag Schiöberg vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching, der sich fragt: "Wer will das Universum mit Cäsium auffüllen, damit wir einen Nutzen davon haben?"