

Der Licht-Turbo – mehr Tempo für Datennetze

Licht breitet sich mit rund 300 000 Kilometer pro Sekunde aus – aber nur im Vakuum. Forscher können dieses Tempo mittlerweile fast beliebig reduzieren und in speziellen Materialien sogar Lichtpulse speichern. Doch ihre Fantasie reicht noch weiter: Neue optische Technologien könnten den weltweiten Datenverkehr deutlich beschleunigen.

Von Luc Thévenaz und Thomas Schneider

»» **E**s hat den Anschein, dass es sogar dem Licht schwerfällt, (das langsame Glas) zu durchdringen – so schwer, dass die Reise von eineinhalb Zentimetern durch dieses Material ungefähr eine Sekunde in Anspruch nimmt ... Sie haben die Welt gesehen, wie sie eine Sekunde vorher, in der Vergangenheit, existierte!«

Was in Bob Shaws Roman »Augen der Vergangenheit« von 1972 noch reine Sciencefiction war, haben Forscher 30 Jahre später in die Realität umgesetzt. Die Verlangsamung von Licht ist einer der erstaunlichsten Fortschritte der Optik.

AUF EINEN BLICK

LOB DER LANGSAMKEIT

1 1999 gelang es Forschern erstmals, **Licht abzubremsen** – auf eine Geschwindigkeit von gerade einmal 17 Meter pro Sekunde. Damit ist es im Prinzip möglich geworden, Lichtpulse zu speichern. Dies wird in Kommunikationsnetzen dringend benötigt.

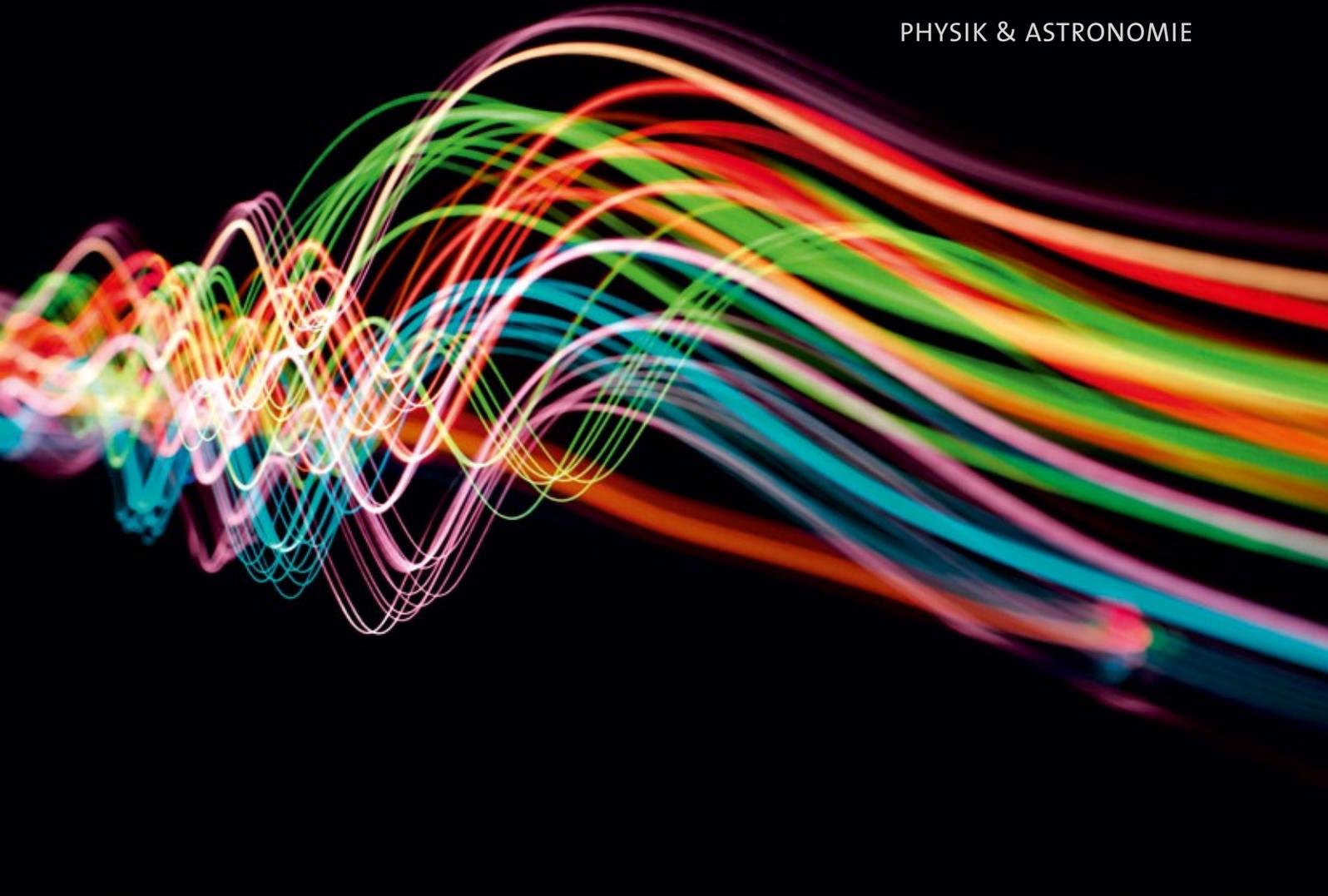
2 2004 schaffte es einer der Autoren dieses Beitrags erstmals, Licht auch in **Glasfaserkabeln** zu verzögern, dem Rückgrat der modernen Kommunikationsnetzwerke. Allerdings zeigte sich bald, dass der Anwendungsbereich der neuen Technik begrenzt ist.

3 Mittlerweile haben die Arbeiten über »langsameres Licht« aber weitere unerwartete Fortschritte initiiert. Schon in naher Zukunft könnte die **Speicherung von Lichtsignalen** möglicherweise tatsächlich zu höheren **Datenübertragungsraten** führen.

Dank neuer Verfahren, die sich von dieser völlig unerwartet verfügbar gewordenen Technik inspirieren ließen, können wir schon in naher Zukunft die Kommunikationsnetze erheblich optimieren und neuartige photonische, also auf Lichtsignalen basierende Bauelemente mit geringem Energieverbrauch herstellen.

Die Grundidee mag zwar paradox erscheinen. Schließlich haben wir mühsam gelernt, in einer einzelnen optischen Faser tausende Gigabit pro Sekunde an Daten zu übertragen – und nun wollen wir das Licht verlangsamen, das diese Daten transportiert? Tatsächlich heißt das: Wir haben nun auch die Kontrolle über eine zuvor unzugängliche Variable der Lichtwelle erlangt, nämlich die Zeit. Dies ist für zahlreiche Anwendungen von größter Bedeutung. Denn indem wir ein Lichtsignal verlangsamen, können wir die darin enthaltene Information auch speichern – im Prinzip beliebig lange.

Alles begann mit einem Artikel, den ein Team der Harvard University um die Dänin Lene Hau 1999 in der Fachzeitschrift »Nature« veröffentlichte und der eine wahre Schockwelle in der Gemeinde der Physiker auslöste. Die Forscher hatten ein Gas auf eine Temperatur von einigen milliardstel Kelvin herabgekühlt und einen hindurchlaufenden optischen Puls mittels elektromagnetisch induzierter Transparenz (EIT, siehe Kasten S. 50) auf eine Geschwindigkeit von 17 Meter pro Sekunde abgebremst. Das sind gerade ein-



1999 gelang es einem Team um die Dänin Lene Hau von der Harvard University erstmals, die Gruppengeschwindigkeit von Licht zu verlangsamen. Damals horchte auch die breite Öffentlichkeit auf: Licht schien gewissermaßen greifbar zu werden. Dies blieb zwar eine Illusion. Dennoch bahnte die Forschungsarbeit den Weg zu neuartigen optischen Netzwerken.

mal 61 Kilometer pro Stunde, das Tempo eines Radrennfahrers.

Den Forschern war es damit gelungen, die Ankunftszeit eines optischen Pulses kontrolliert zu verzögern, ihn gewissermaßen für eine kurze Zeit zu speichern. Zwar lässt sich die Ankunftszeit von Licht auch auf andere Weise variieren: Man sendet den Puls früher oder später aus, schickt ihn wahlweise durch längere oder kürzere optische Fasern oder lässt ihn auf einen Spiegel fallen, den man auf einem Schlitten verschieben kann, so dass sich der Lichtweg verkürzt oder verlängert. Für Telekommunikationssysteme kommen all diese Verfahren jedoch nicht in Frage. Indem Forscher nun aber erstmals die Geschwindigkeit des Lichts selbst manipulierten, eröffneten sich ihnen völlig neue Möglichkeiten.

Selbst außerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft stieß die Entdeckung auf großes Interesse. Schließlich suggerierte sie, man könne die Ausbreitung eines optischen Pulses mit eigenen Augen beobachten – auch wenn der Effekt zunächst auf einer Wegstrecke von lediglich 0,23 Millimetern

gemessen wurde und der Puls sich dabei um nur wenige Mikrosekunden verlangsamte.

Dass Licht gewissermaßen greifbar werden könnte, blieb allerdings aus vielerlei Gründen eine Illusion. Völlig klar war jedoch, dass seine zeitliche Steuerung zu wesentlich effizienterer Datenübertragung in optischen Netzwerken führen könnte. Weltweit begannen Forscher deshalb, sich dem Phänomen intensiv zu widmen.

Staus im Datenverkehr auflösen

Heute fließt der weitaus größte Teil des Daten- und Telefonverkehrs in Form optischer Signale durch Glasfasern. An Netzwerknoten werden die Signale von Routern in Empfang genommen. Diese lesen die Adressinformationen der Datenpakete aus und entscheiden, in welche Richtung sie weitergeleitet werden müssen. Stauen sich die Pakete, muss der Router einige von ihnen zwischenspeichern, bis wieder Übertragungskapazitäten frei werden. Bei Datenraten von typischerweise 10 bis 40 Gigabit (Milliarden Informationsein-

So lässt sich Licht abbremsen

Elektromagnetisch induzierte Transparenz (EIT)

Das Verfahren der elektromagnetisch induzierten Transparenz beruht auf einem speziellen Material, das zunächst undurchlässig für das Licht eines Lasers ist. Durch einen zweiten Laserstrahl kann es aber »gepumpt« und damit in einem bestimmten Frequenzbereich transparent gemacht werden. Bei diesem Vorgang bildet sich in dem Material ein Brechungsindex aus, der linear mit wachsender Frequenz stark steigt oder fällt. Ein Medium mit linear frequenzabhängigem Brechungsindex ist wiederum die Voraussetzung dafür, dass sich die Gruppengeschwindigkeit von Lichtpulsen in diesem Medium verändert.

Grundlage der EIT ist ein Quanteneffekt. Der Pumplaser sorgt dafür, dass bestimmte energetische Übergänge in dem Material quantenmechanisch nicht mehr »erlaubt« sind, weil die Wahrscheinlichkeiten für ihr Eintreten destruktiv interferieren. Die Frequenzen des ersten Strahls können die Übergänge nun nicht mehr anregen, er behält also seine Energie und durchquert das Material ungehindert. In genau diesem Frequenzbereich entsteht der gewünschte Verlauf des Brechungsindex.

Kohärente Besetzungszillation (CPO)

Normalerweise befinden sich die meisten Elektronen eines Festkörpers auf einem niedrigen Energieniveau und nur wenige auf einem höheren. Bei der kohärenten Besetzungszillation oder Coherent Population Oscillation (CPO) sorgt ein Pumplaser dafür, dass sich die Verhältnisse umkehren. Anschließend lassen die Forscher entlang des Mediums zwei Strahlen mit unterschiedlichen, aber nah beieinanderliegenden Frequenzen miteinander interferieren. Das entstehende Schwingungsmuster, eine Schwebung, sorgt dafür, dass die Elektronen periodisch

von einem Energieniveau auf das andere wechseln. Die mathematische Analyse des Vorgangs zeigt, dass dies zu einem sich linear mit der Frequenz verändernden Brechungsindex führt, der die Gruppengeschwindigkeit von durch das Medium laufenden Lichtpulsen beeinflusst.

Stimulierte Brillouin-Streuung (SBS)

Mit der stimulierten Brillouin-Streuung (SBS) lassen sich sehr hohe Verzögerungen der Gruppengeschwindigkeit von Licht erzielen. Innerhalb eines Mediums treten dabei zwei optische Wellen miteinander in Wechselwirkung. Sie besitzen leicht unterschiedliche Frequenzen und breiten sich in entgegengesetzter Richtung aus. Normalerweise wird die Welle mit der höheren Frequenz als Pumpwelle bezeichnet, während die Welle mit der niedrigeren Frequenz das Signal bildet. Wie bei der CPO entsteht auch hier durch Interferenz eine Schwebung, die sich entlang des Mediums ausbreitet.

Unter bestimmten Umständen kann die Wechselwirkung der Schwebung mit dem Material dazu führen, dass darin eine Schallwelle entsteht – mit einer Frequenz, die eine Million Mal höher ist als die des höchsten Tons, den ein Mensch hören kann. Die Schallwelle ändert periodisch die Dichte des Mediums, die wieder auf die optischen Wellen zurückwirkt. Auf diese Weise wird ein Teil der Pumpleistung an das Signal transferiert, dessen Amplitude dadurch steigt. Die so genannten Kramers-Kronig-Beziehungen sagen nun aus, dass eine Amplitudenänderung (also Verstärkung oder Dämpfung) zu einer Phasenänderung und damit zu einer Änderung des Brechungsindex führt. Ist diese Änderung stark genug und verläuft sie linear mit der Frequenz, lässt sich so die Gruppengeschwindigkeit verändern.

heiten pro Sekunde) und Datenpaketen, die wie beim Internet typischerweise aus 1000 Bit und mehr bestehen, beträgt die Mindestverzögerung 25 bis 100 Nanosekunden. In dieser Zeit kann eines der Pakete vollständig gesendet werden und so den Weg für das nächste frei machen.

Bislang verwandeln die Router die ankommenden optischen Impulse stets in elektronische Signale. Nur so können sie die Adressdaten auslesen und die Pakete gegebenenfalls zwischenspeichern. Anschließend erfolgt deren Rückverwandlung in optische Signale. Der Vorgang ist aber langsam und erfordert zudem teure Hardware, die viel Energie verbraucht. Lässt er sich optimieren?

Ein Teil der Lösung besteht in Verfahren, mit denen sich optische Signale zwischenspeichern lassen, ohne sie umwandeln zu müssen. Viele Forscher setzten nach der epochalen »Nature«-Veröffentlichung ihre Hoffnungen auf langsames Licht. Tatsächlich gelangen damals sehr schnell erhebliche Fortschritte. Im Jahr 2003 veröffentlichten Matthew Bigelow, Nick Lepeshkin und Robert Boyd von der University of Rochester im US-Bundesstaat New York ihre Ergebnisse. Sie hat-

ten Licht in einem optischen Kristall mit Hilfe der kohärenten Besetzungszillation (CPO, siehe Kasten oben) stark verlangsamt – und das sogar schon bei Raumtemperatur.

Der entscheidende Schritt gelang kurz darauf, zunächst an der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) unter Leitung eines der Autoren (Thévenaz) und – unabhängig davon – ein paar Monate später einer Forschergruppe in den USA um Robert Boyd, Daniel Gauthier und Alexander Gaeta. Mit Hilfe der stimulierten Brillouin-Streuung (SBS, siehe Kasten oben) schafften wir es im September 2004 erstmals, langsames Licht direkt in einer optischen Faser zu erzeugen – also in genau dem Medium, welches das Rückgrat der modernen Telekommunikationsnetze bildet!

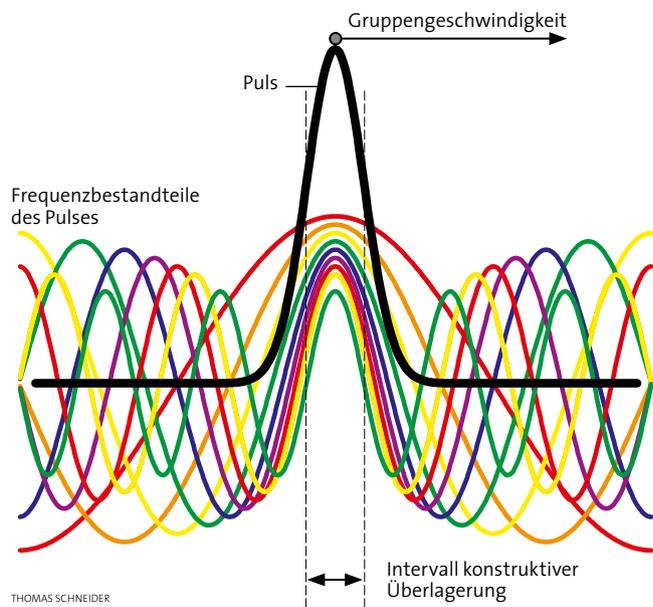
Die meisten Menschen verbinden das Wort Lichtgeschwindigkeit mit der speziellen Relativitätstheorie von Albert Einstein und mit dem konstanten Wert von rund $3 \cdot 10^8$ Meter pro Sekunde. Doch bereits um das Jahr 1910 herum diskutierten Forscher darüber, ob in einem Medium gegen Einsteins Postulat verstoßen werden kann, dem zufolge sich Signale nie schneller als mit Lichtgeschwindigkeit aus-

breiten dürfen. Denn bei theoretischen Überlegungen waren sie darauf gestoßen, dass in Medien Geschwindigkeiten auftreten könnten, die deutlich höher (oder auch niedriger) sind als die $3 \cdot 10^8$ Meter pro Sekunde, die Licht im Vakuum zurücklegt.

1914 zeigten dann Arnold Sommerfeld und Léon Brillouin in Beiträgen für die Leipziger »Annalen der Physik«, dass sich in einem Medium tatsächlich fünf verschiedene Lichtgeschwindigkeiten unterscheiden lassen: Phasen-, Gruppen- und Informationsgeschwindigkeit (die auch als Signalgeschwindigkeit bezeichnet wird) sowie Front- und Schlussgeschwindigkeit. Anders als im Vakuum treten die Lichtwellen in einem Medium nämlich in Wechselwirkung mit den Teilchen, aus denen dieses besteht. Dadurch verändern sich die Eigenschaften der Wellen. Die einzige der genannten Geschwindigkeiten, die nicht schneller als die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum werden darf, ist die Informationsgeschwindigkeit: Denn würden Informationen schneller als mit Lichtgeschwindigkeit übertragen, könnte laut spezieller Relativitätstheorie der Absender einer Nachricht die Antwortsignale schon dann erhalten, wenn er die Nachricht noch gar nicht gesendet hat. Damit käme die Wirkung zeitlich vor die Ursache zu liegen, was dem Kausalprinzip widerspricht. Die übrigen Geschwindigkeiten sind jedoch überraschend variabel.

Wechselwirkung mit Elektronen bremst das Licht

Ein Lichtpuls besteht aus der Überlagerung langer Züge von Sinusschwingungen, die jeweils unterschiedliche Amplitude, Frequenz und Phase besitzen. Die Phase gibt dabei an, in welchem Abschnitt einer Schwingungsperiode sich die Welle an einem bestimmten Ort befindet, beispielsweise an einem Maximum oder im Nullpunkt. An einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit überlagern sich all diese Schwingungen konstruktiv – zum Beispiel fallen Maxima auf Maxima –, so dass innerhalb eines kleinen Intervalls in der Summe eine Pulsform entsteht (Grafik rechts oben). Außerhalb des Intervalls kommt es hingegen zu einer destruktiven Überlagerung. Dort sind die einzelnen Sinusschwingungen

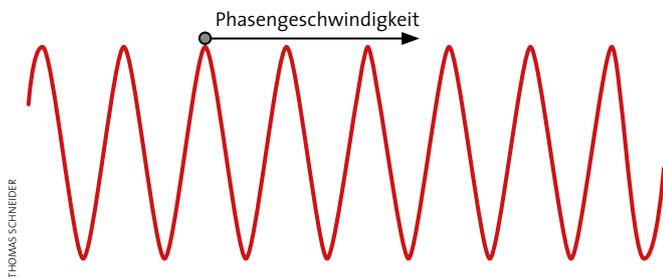


Ein Lichtpuls (schwarz) besteht aus einer Vielzahl von Wellenzügen mit unterschiedlichen Frequenzen (farbig), die einander überlagern. Nur in einem bestimmten Intervall (gestrichelt) geschieht dies so, dass sie in der Summe die beobachtete Pulsform annehmen (konstruktive Überlagerung). Außerhalb davon löschen sie sich gegenseitig aus (destruktive Überlagerung). Die Geschwindigkeit, mit der sich der Puls als Ganzes fortbewegt, ist die Gruppengeschwindigkeit. Im Fall einfacher Pulsformen ist sie identisch mit der Geschwindigkeit des Pulsmaximums.

gen im Prinzip zwar vorhanden, löschen sich aber gegenseitig aus.

Für einzelne Wellenzüge (Grafik links unten) lässt sich keine Ausbreitungsgeschwindigkeit definieren. Allerdings kann man die so genannte Phasengeschwindigkeit bestimmen, mit der sich eine bestimmte Phasenlage eines Wellenzugs wie zum Beispiel ein Maximum fortbewegt. In einem Medium bewegt sich Licht jedoch mit anderer Geschwindigkeit als im Vakuum, weil die Teilchen im Medium, vor allem die Elektronen, durch die Lichtwelle in Bewegung versetzt werden. Sie strahlen daraufhin ihrerseits Licht aus, das eine andere Phase als die Ursprungswelle besitzt. Sobald sich beide Wellen überlagern, entsteht eine Welle mit neuen Eigenschaften, insbesondere auch mit veränderter Phasengeschwindigkeit. Je nach Brechungsindex des Materials kann die Phasengeschwindigkeit in diesem Material sowohl schneller als auch langsamer sein als die Phasengeschwindigkeit im Vakuum.

Auch wenn man Licht nicht als Welle auffasst, sondern als Teilchenstrahlung, lässt sich die Veränderlichkeit der Phasengeschwindigkeit in einem Medium verstehen. Die Atome absorbieren die Photonen, werden dadurch angeregt und strahlen ihrerseits wieder Photonen aus, dies allerdings zeitversetzt, was einer Verzögerung entspricht. Die Lichtteilchen selbst werden dadurch nicht abgebremst; zwischen den Ato-



Bewegt sich Licht nicht im Vakuum, sondern durch ein Medium, lässt sich seine Geschwindigkeit auf unterschiedliche Weise definieren. Die so genannte Phasengeschwindigkeit des Lichts ist im Fall einer einzelnen Welle diejenige, mit der sich zum Beispiel die Maxima der Welle fortbewegen.

men bewegen sie sich stets mit rund $3 \cdot 10^8$ Meter pro Sekunde.

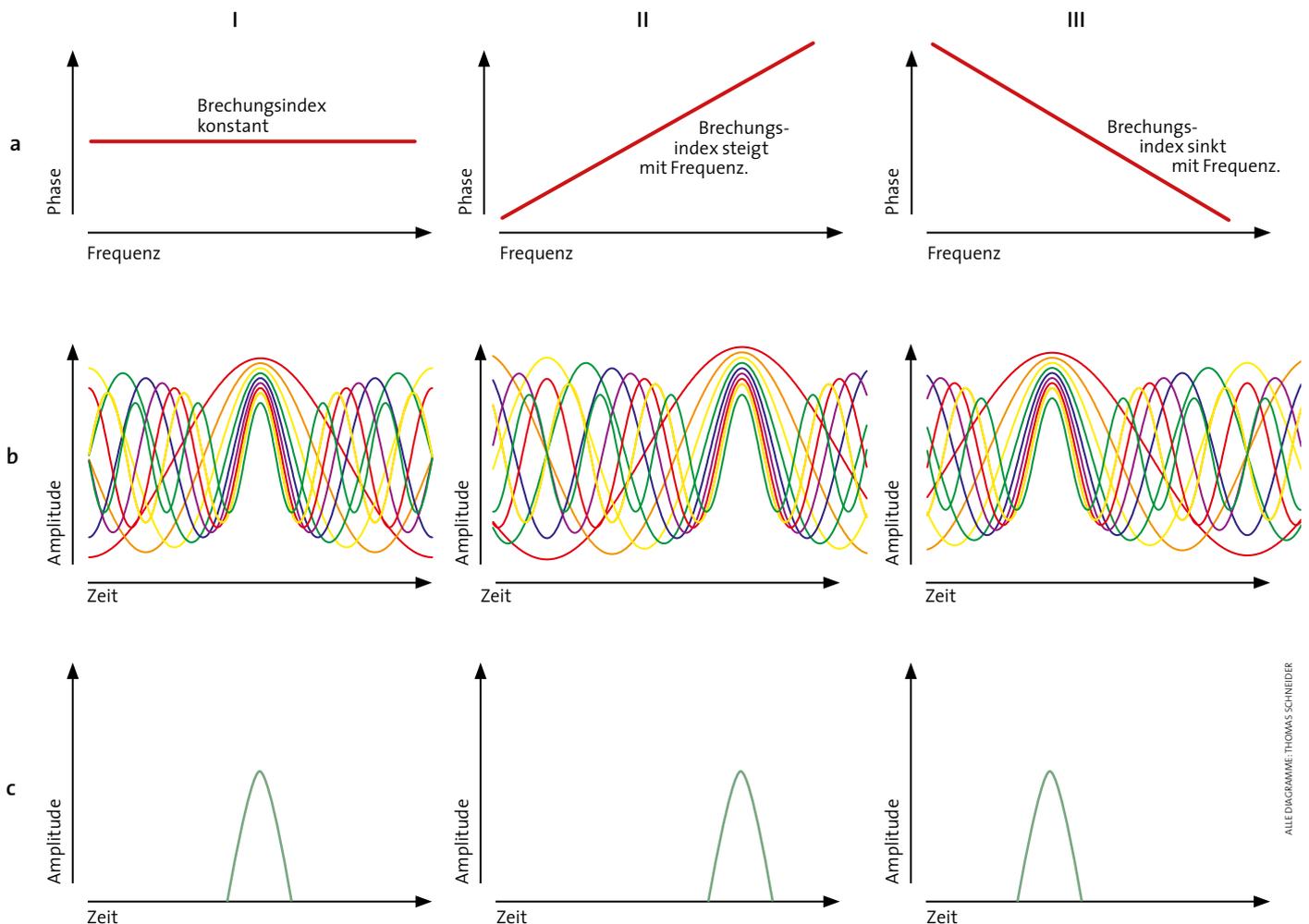
Für die Datenübertragung ist immer der Puls als Ganzes entscheidend. Er schreitet fort, weil sich der Ort, an dem sich die einzelnen Wellenzüge konstruktiv überlagern, mit der Zeit verändert. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der konstruktiven Überlagerung wird als Gruppengeschwindigkeit bezeichnet und ist bei einfachen Pulsformen identisch mit der Geschwindigkeit, mit der sich das Maximum des Pulses im Medium ausbreitet (siehe Grafik auf S. 51 oben). Auch die Gruppengeschwindigkeit kann größer oder kleiner als die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und sogar negativ werden – und es ist allein diese Geschwindigkeit, die von den in diesem Artikel beschriebenen Verfahren modifiziert wird.

Was geschieht nun, wenn ein Lichtpuls in ein Medium eintritt? Der Brechungsindex des Mediums unterscheidet

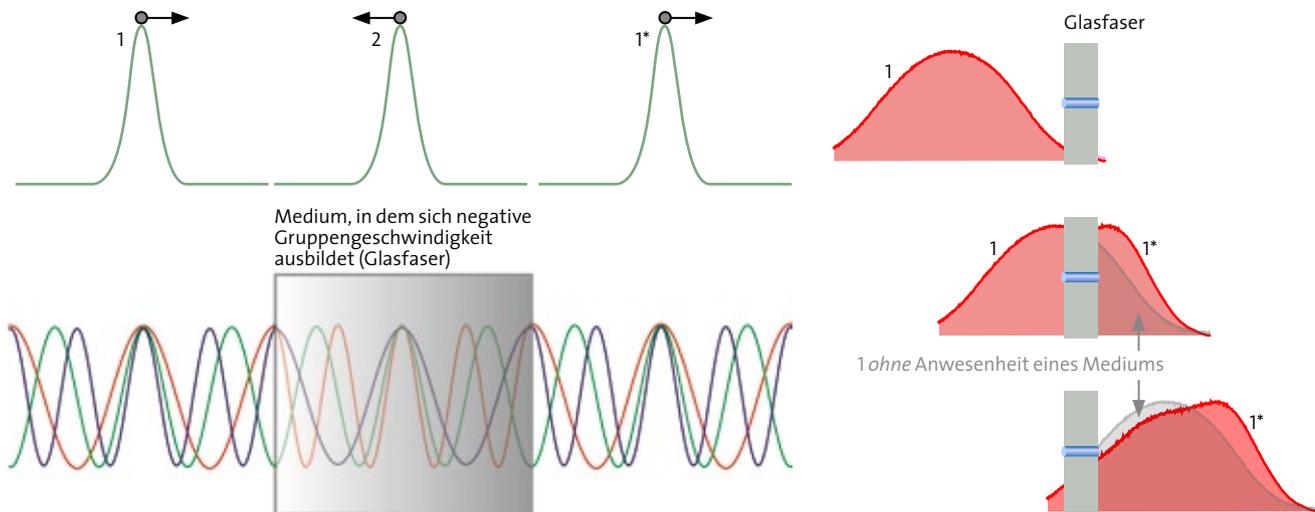
sich in der Regel für jede der eintreffenden Frequenzen, weshalb sich jede einzelne der Wellen, aus denen der Puls zusammengesetzt ist, mit einer anderen Phasengeschwindigkeit im Medium ausbreitet. Dies führt dazu, dass sich der Puls zeitlich verbreitert oder im Extremfall ganz auseinanderläuft. Doch unter besonderen Umständen – nämlich dann, wenn sich der Brechungsindex linear mit der Frequenz verändert – verschiebt sich lediglich das Intervall, in dem die Einzelwellen konstruktiv interferieren, in der Zeit. Der Puls selbst bleibt also erhalten, befindet sich nun aber an einem anderen Ort. Das heißt nichts anderes, als dass er sich infolge des veränderten Brechungsindex mit veränderter Geschwindigkeit bewegt.

Die Geschwindigkeitsdifferenz ist dabei umso größer, je stärker sich der Brechungsindex mit der Frequenz verändert. Steigt er mit der Frequenz, wird der Puls verzögert (Grafik

In einem Medium mit konstantem Brechungsindex bewegt sich ein Puls mit einer bestimmten Gruppengeschwindigkeit fort (Spalte I). Steigt jedoch der Brechungsindex mit der Frequenz, verschiebt dies die Phasen der einzelnen Frequenzen, aus denen der Puls besteht (II b, II c). Das Resultat ist ein in der Zeit nach hinten verschobener, also verzögerter Puls; seine Gruppengeschwindigkeit sinkt. Sinkt der Brechungsindex hingegen mit der Frequenz, wird der Puls in der Zeit nach vorne verschoben, also beschleunigt (III b, III c); seine Gruppengeschwindigkeit wächst.



ALLENDRUCK: THOMAS SCHNEIDER



Kann eine Wirkung ihrer Ursache vorausgehen? Die vereinfachende Grafik zeigt einen sehr speziellen Fall. Ein Lichtpuls 1 läuft auf ein Medium zu, in dem sich eine negative Gruppengeschwindigkeit ausbildet, weil die Frequenzabhängigkeit seines Brechungsindex extrem hoch ist. Puls 1 ist in genau dem Intervall zu beobachten, in dem sich lange Wellen unterschiedlicher Frequenzen (rot, grün, blau) konstruktiv überlagern. Der frequenzabhängige Brechungsindex lässt die grüne Welle unbeeinflusst, verkürzt aber die Länge der roten und verlängert die der blauen Welle. Dadurch tritt konstruktive Interferenz auch an anderen Orten auf. Neben Puls 1 sind nun – noch bevor er ganz in das

Medium eingetreten ist! – zwei weitere Pulse zu sehen: ein rückwärtslaufender Puls 2 innerhalb des Mediums sowie ein Puls 1*, der vom Ende des Mediums her nach rechts läuft. Die Grafik rechts zeigt Messdaten von einem der Autoren (Thévenaz). Noch bevor das Maximum von Puls 1 das Medium erreicht, tritt das Maximum von Puls 1* aus dem Medium aus. Puls 2 ist nicht dargestellt. Puls 1 wird also beim Durchgang durch das Medium, das im Experiment zwei Meter lang war, zu einem leicht deformierten und schnelleren Puls 1*. Grau ist dargestellt, wie Puls 1 zu diesem Zeitpunkt ohne Anwesenheit eines Mediums aussähe. Das Kausalitätsprinzip wird durch diese Phänomene nicht verletzt.

links, Spalte II); sinkt er mit der Frequenz, wird der Puls beschleunigt (Spalte III).

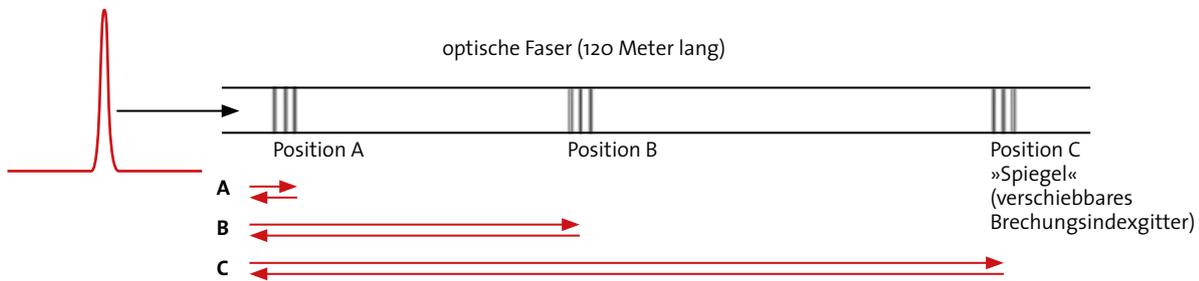
Ist die Veränderung des Brechungsindex groß genug, kann die Gruppengeschwindigkeit sogar negativ werden. Dieser Fall ist so faszinierend und scheint dem gesunden Menschenverstand so sehr zu widersprechen, dass wir ihn – auch wenn er keine Bedeutung für die Praxis spielt – hier vorstellen wollen. Dabei kommt es zu folgender Situation (Grafiken oben): Noch bevor das Maximum des Pulses den Anfang des Mediums erreicht hat, bilden sich am Ende des Kabels zwei Kopien. Die eine Kopie des Pulses bewegt sich von dort aus weiter in der Ausbreitungsrichtung des ursprünglichen Pulses, die andere Kopie läuft in entgegengesetzter Richtung zum Anfang des Mediums.

Dieses erstaunliche Verhalten scheint auf den ersten Blick das Kausalitätsprinzip zu verletzen: Noch bevor die Ursache am Anfang des Mediums zu sehen ist, sieht man bereits eine Wirkung am Ausgang. Doch natürlich wird das Kausalitätsprinzip auch in einem Medium mit negativer Gruppengeschwindigkeit nicht ausgehebelt. Diese sorgt nur dafür, dass sich das Intervall der konstruktiven Überlagerung verschiebt. Vielmehr sind die einzelnen Frequenzen schon vor dem Puls am Ausgang des Mediums präsent, löschen einander aber zunächst destruktiv aus.

Wie stark sich die Gruppengeschwindigkeit verändern lässt, die in einer typischen Glasfaser 205 000 Kilometer pro Sekunde beträgt, konnten wir bereits vor einigen Jahren zeigen. Im Dezember 2004 gelang es dem Team um einen der Autoren (Thévenaz), mit Hilfe der stimulierten Brillouin-Streuung die Gruppengeschwindigkeit in einer zwei Meter langen Faser zwischen rund 70 500 Kilometer pro Sekunde und einer negativen Geschwindigkeit von minus 428 000 Kilometer pro Sekunde zu variieren. Verglichen mit einem Puls unter »normalen« Umständen trat das Pulsmaximum dabei 18,6 Nanosekunden (milliardstel Sekunden) später beziehungsweise 14,4 Nanosekunden früher aus der Faser aus.

Mitgerissen vom Licht

Die meisten Methoden, um langsames Licht zu erzeugen, beruhen auf den so genannten Resonanzfrequenzen eines Mediums. Das ins Medium einfallende Licht kann die an einen Atomrumpf gebundenen Elektronen dazu anregen, gegen den Rumpf zu schwingen. In der Regel existieren dann Frequenzbereiche, so genannte Resonanzen, in denen sich das System leicht zu sehr starken Schwingungen anregen lässt. Liegt die Frequenz der einfallenden Lichtwelle im Bereich einer der Resonanzfrequenzen, werden die Teilchen besonders stark von ihr »mitgerissen«. Dabei entziehen sie der Welle



Forscher können Lichtpulse auch ganz einfach dadurch verzögern, dass sie ihre Laufzeit verlängern. Die Grafik zeigt das Grundprinzip eines Experiments an der EPFL in Lausanne. Ein Puls tritt von links in eine optische Faser ein und wird dort an einem verschiebbaren »Spiegel« reflektiert. Er lässt sich also während genau der Zeit »speichern«, die er benötigt, um wieder aus der Faser auszutreten. Als Spiegel fungiert ein so genanntes Brechungsindexgitter, das an einem frei wählbaren Ort innerhalb der Faser durch die Überlagerung zweier von außen eingestrahelter Lichtwellen entsteht.

viel Energie, so dass das Licht stark gedämpft wird. Diese starke Dämpfung der Welle sorgt gemäß den so genannten Kramers-Kronig-Beziehungen für die lineare Veränderung des Brechungsindex und damit für die Beschleunigung des Pulses.

Der Puls lässt sich aber auch verzögern, indem man die Welle wie im Fall der stimulierten Brillouin-Streuung in einer optischen Faser verstärkt. Auch hier führt eine Amplitudenänderung (also Verstärkung oder Dämpfung) zu einer Phasenänderung und damit zu einer Änderung des Brechungsindex, die wiederum die Gruppengeschwindigkeit beeinflusst.

Für all diese Verfahren gilt: Je stärker sie die Signalamplitude verändern, desto stärker beeinflussen sie die Gruppengeschwindigkeit. Dabei führen Amplitudenverstärkungen zu einer Signalverzögerung, umgekehrt beschleunigt eine Dämpfung das Signal. Die Amplitudenänderung lässt sich in der Regel einfach dadurch variieren, dass man die Leistung des Pumpasers, der das Medium »aktiviert«, erhöht oder erniedrigt.

Im Extremfall bleibt das Licht stehen

Neben den oben erwähnten Resonanzen kann man die Bandlücke eines Mediums nutzen, um die Gruppengeschwindigkeit eines optischen Pulses zu verändern. Diese Lücke ist ein Energiebereich, in dem sich aus quantenmechanischen Gründen weder bewegliche noch gebundene Elektronen aufhalten können. Durch periodische Strukturen wie Bragg-Gitter, gekoppelte Resonatoren oder photonische Kristalle lässt sich ein derartiger »verbotener« Frequenzbereich auch für Photonen künstlich schaffen. Liegen die Frequenzen und damit die Energien eines elektromagnetischen Pulses im Bereich der Grenzen der Bandlücke, verändert sich die Gruppengeschwindigkeit stark und im Extremfall sogar zu null.

Diese Art des langsamen Lichts, bei der das Medium mit künstlichen makroskopischen Strukturen ausgestattet wird, bezeichnen Wissenschaftler als »strukturell«. Hingegen be ruht »materielles« langsames Licht auf dem mikroskopi-

schen Verhalten des Materials. Die strukturellen Systeme haben den Vorteil, dass sie Licht verzögern können, ohne dass man ihnen Energie zuführen müsste. Das Maß der Verzögerung lässt sich jedoch nicht mehr nachträglich variieren, da es in die Struktur eingefroren ist.

Darüber hinaus ist die Technik weiteren Grenzen unterworfen. So hängt beim materiellen langsamen Licht das Maß der Verlangsamung von der Resonanzbreite ab. Diese Größe beschreibt das Maß, in dem eine Resonanz nicht nur bei einer ganz bestimmten Frequenz, sondern auch bei Nachbarfrequenzen auftritt. Es gilt: Je schmaler die Resonanzbreite, desto größer ist die Verlangsamung. Das ist allerdings auch die Achillesferse der Technik. Denn eine schmale Resonanz bedeutet zugleich, dass Signalanteile mit hoher Frequenz verloren gehen. Das Signal wird also umso stärker verzerrt, je stärker man es verzögert.

Eine wichtige Kenngröße der Kommunikationstechnik ist das Produkt aus Verzögerung und Bandbreite. Man stelle sich eine Glasfaser vor, die eine Million Bits pro Sekunde transportiert. In der Faser verzögern bestimmte Effekte die Signale um jeweils 50 Millisekunden. Das Produkt aus den beiden Zahlen beträgt 50 000 Bit. Genau diese Datenmenge ist also in der Glasfaser »gespeichert« – dadurch, dass an ihrem Eingang stets Daten nachgeliefert, aber erst mit Verzögerung wieder am Ausgang weitergereicht werden.

Mittlerweile wissen wir jedoch, dass bei materiellem langsamem Licht, das nur einen einzelnen schmalen Frequenzbereich für Verstärkung oder Dämpfung nutzt, das Verzögerung-Bandbreite-Produkt aus prinzipiellen Gründen immer etwa eins beträgt. Ein Signal lässt sich also maximal um ein Bit verzögern. Beim strukturellen langsamen Licht wiederum erzielt man zwar an der Grenze der Bandlücke hohe Verzögerungen, doch wird das Signal dort gleichzeitig stark gedämpft. Auch hier erreicht man etwa ein Bit, dann aber dominiert die Dämpfung, und das Signal geht im Rauschen unter.

Im Jahr 2007 konnte ein Team um einen der Autoren (Schneider) am Institut für Hochfrequenztechnik (IfH) der Hochschule für Telekommunikation in Leipzig nachweisen,

dass man diese Grenze beim materiellen langsamen Licht auf immerhin vier Bit erhöhen kann. Und ein Jahr später zeigte Andrea Melloni vom Politecnico di Milano, wie sich mit strukturellem langsamem Licht in einem System aus acht gekoppelten Ringresonatoren acht Bit erreichen lassen.

Aus Anwendungssicht sind allerdings auch diese Grenzen viel zu niedrig. Moderne elektronische Router besitzen eine Speicherkapazität von zum Beispiel 10 Gigabit bei Datenraten von 40 Gigabit pro Sekunde. Von solchen Werten sind optische Router auf Basis von langsamem Licht weit entfernt.

Die Forscher begannen darum umzudenken und nach anderen Anwendungen zu suchen. So stellte sich schnell heraus, dass langsames Licht eine wichtige Rolle in der Mikrowellenphotonik spielen kann. Dabei wird eine optische Trägerwelle mit einer Frequenz in der Größenordnung von 10^{14} Hertz verwendet, die durch ein Mikrowellensignal mit einer Frequenz von einigen 10^9 Hertz moduliert ist, aber ganz normal in einer Glasfaser übertragen werden kann. Für die Verarbeitung eines solchen analogen Signals ist es normalerweise nicht nötig, Zeitverzögerungen zu erzeugen, die größer sind als eine Periode der Trägerwelle. Das entspricht aber genau dem Verzögerung-Bandbreite-Produkt, das sich mit langsamem Licht erzielen lässt. Das europäische Projekt GOSPEL (»Governing the speed of light«), dem einer der Autoren (Thévenaz) angehört, hat mit dieser Technik komplexe Filter und Mikrowellengeneratoren hoher Stabilität entwickelt, die über weite Frequenzbereiche abstimmbare sind und beispielsweise in Radarsystemen oder Mobilfunknetzen zum Einsatz kommen können.

Gestautes Licht verstärkt nichtlineare Effekte

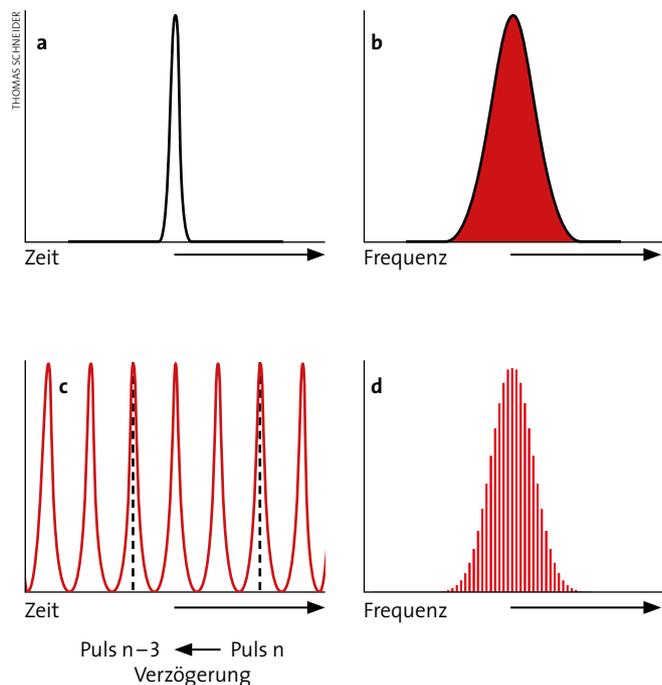
Weitere unerwartete Anwendungen resultieren aus der höheren Energiedichte von langsamem Licht. In einem durchsichtigen Medium ist die Geschwindigkeit, mit der die Energie der Lichtwelle übertragen wird, identisch mit der Gruppengeschwindigkeit. Senkt man in einem Medium für strukturelles langsames Licht also die Gruppengeschwindigkeit, sinkt auch die Geschwindigkeit, mit der die Energie des Lichts übertragen wird. Folglich steigt aber, weil sich das Licht gewissermaßen staut, die Dichte der optischen Energie. Davon wiederum profitieren eine Reihe nichtlinearer optischer Effekte im Medium, die umso stärker sind, je höher die Energiedichte ist.

Systeme, die auf solchen Effekten basieren – wie optische Schalter oder Geräte, welche die Frequenz einer Trägerwelle in eine andere Frequenz umwandeln –, lassen sich dank dieses Effekts nun viel kleiner bauen oder benötigen deutlich weniger Energie. Auch elektrooptische Modulatoren, welche die Phase von Lichtwellen verändern, und optische Schalter auf Basis des strukturellen langsamen Lichts haben Forscher bereits entwickelt.

Die Arbeit mit langsamem Licht hat aber auch gänzlich neue Ideen für die Optimierung digitaler Kommunikationsnetze hervorgebracht. Sie besitzen großes Potenzial, so dass

wir die ursprünglich gesetzten Ziele vielleicht doch noch verwirklichen könnten. So gelang es, Verzögerungen von mehr als 1000 Bit bei Datenraten von zehn Gigabit pro Sekunde zu erreichen. Der genaue Wert ließ sich dabei ohne elektronische Umwege allein mittels optischer Verfahren einstellen. Das Prinzip beruht darauf, dass die Gruppengeschwindigkeit in einer Glasfaser von der Wellenlänge der Trägerwelle abhängt. Pulse mit einer Trägerwellenlänge von 1550 Nanometern bewegen sich schneller durch die Faser, als wenn ihre Trägerwellenlänge beispielsweise 1560 Nanometer beträgt. Indem man also die Wellenlänge der Trägerwelle verändert – etwa durch den nichtlinearen optischen Effekt der Vierwellenmischung –, lässt sich die gewünschte Verzögerung variabel einstellen. Am Ende muss dann wieder die ursprüngliche Trägerwelle erzeugt werden.

Prinzipiell könnten solche Verfahren in digitalen Kommunikationsnetzen zum Einsatz kommen, der technische Aufwand wäre allerdings enorm. Zum einen bedarf es für aus-



So funktioniert die am Leipziger Institut für Hochfrequenztechnik entwickelte Quasilichtspeicherung: Ein einzelner Puls (Grafik a) setzt sich aus Einzelwellen verschiedener Frequenzen zusammen. In seinem Spektrum (b) ist zu sehen, dass diese Frequenzen kontinuierlich verteilt sind. Eine Folge identischer Pulse (c) besitzt hingegen ein Spektrum aus diskreten Frequenzen, die durch identische Abstände voneinander getrennt sind (d). Das bedeutet im Umkehrschluss: Entnimmt man einem Puls einzelne Frequenzbereiche, erzeugt man eine Folge zahlreicher identischer Kopien. Eine dieser Kopien des Ursprungspulses wählt man nun aus. Je weiter hinten sie auf der Zeitachse liegt, desto größer ist die erreichte Verzögerung. In Grafik c ist ein Beispiel angedeutet: Die Auswahl von Puls n-3 statt von Puls n entspricht einer zeitlichen Verzögerung von drei Pulsbreiten.

reichende Verzögerungen sehr langer Medien – meist Glasfasern mit einer Länge von mehreren Dutzend Kilometern. Zum anderen wird das Signal dabei stark verzerrt, und die Techniken zu seiner Wiederherstellung stoßen an die Grenzen des heute Möglichen.

Vor Kurzem erzielten wir sowohl an der EPFL als auch am IfH aber weitere Fortschritte bei der optischen Verzögerung beziehungsweise Speicherung. Das System der EPFL arbeitet nach dem Prinzip einer konventionellen Verzögerungsstrecke: Der optische Puls wird einfach an einem verschiebbaren Spiegel reflektiert. Die Verzögerung ist dabei stufenlos von null bis zu der Zeit einstellbar, die der Puls zum Spiegel und zurück benötigt, wenn sich Letzterer am Ende der Verschiebungsstrecke befindet. Den Spiegel selbst erzeugen wir im Inneren der Glasfaser, die der Puls durchläuft, indem wir von den Enden zwei Lichtwellen in entgegengesetzter Richtung in die Glasfaser einstrahlen. Dadurch entsteht in der Faser ein Reflexionsgitter, an dem der Puls reflektiert wird. Mit diesem System konnten wir bei einer Faserlänge von gerade einmal 120 Metern einen Puls mit einer Dauer von 600 Piko-sekunden ohne nennenswerte Verzerrungen um mehr als eine Mikrosekunde und damit um rund 1700 Bit verzögern.

Lange Speicherzeiten dank Pulskopien

Am Institut für Hochfrequenztechnik entwickelten wir unterdessen das Verfahren der Quasilichtspeicherung (QLS). Jeder Lichtpuls lässt sich wie in der Grafik auf S. 55 darstellen: Die Frequenzen, aus denen er sich zusammensetzt, sind kontinuierlich unter einer Einhüllenden verteilt. Handelt es sich hingegen um einen periodisch wiederkehrenden Puls, bleibt die Einhüllende dieselbe, das Spektrum ist jedoch diskret. Es enthält jetzt also nur noch einzelne Frequenzen mit einem festen Abstand zueinander. Dabei entspricht der Abstand zwischen den Frequenzen dem Kehrwert des Zeitabstands zwischen den Pulsen – ein Zusammenhang, der sogar für ganze Datenpakete aus vielen Pulsen gilt.

Die Idee hinter dem System des IfH besteht nun einfach darin, aus dem kontinuierlichen Spektrum des ankommenden Datenpakets einzelne äquidistante Frequenzen zu entnehmen. Diese setzen sich daraufhin zu einem Paket zusammen, das stetig wiederkehrt. Anders gesagt: Von dem Paket liegen nun etliche Kopien vor, die einander in bestimmten zeitlichen Abständen folgen. Die gewünschte Speicherzeit lässt sich grob dadurch justieren, dass man spätere oder frühere Pakete herausgreift. Indem wir den Abstand zwischen den entnommenen Frequenzen verändern, lässt sie sich fein einstellen. Dabei treten, solange man bestimmte Bedingungen einhält, nicht einmal Verzerrungen auf.

Derzeit erreichen wir am IfH eine Speicherzeit von bis zu 120 Nanosekunden. So konnten wir Datenpakete mit einer Länge von acht Bit bei einer Datenrate von einem Gigabit pro Sekunde um 120 Bit verzögern. Da die Methode unabhängig von der Datenrate ist, ergibt sich für ein Signal bei einer Datenrate von 40 Gigabit pro Sekunde eine Speicherzeit von 4800 Bit, für ein Signal bei 100 Gigabit pro Sekunde eine von

12 000 Bit und so weiter. Das reicht für Anwendungen bereits aus. Gemeinsam mit Kollegen von der Technischen Universität Berlin haben wir mittlerweile Siliziumchips entwickelt, die genau dieses Verfahren beherrschen. Damit ist die Massenproduktion preiswerter und kompakter optischer Speicher in Reichweite.

Das langsame Licht mag die ursprünglichen Erwartungen nicht ganz erfüllt haben. Doch es hat den Wissenschaftlern die Augen dafür geöffnet, dass sich bei der Ausbreitung optischer Signale auch die Variable Zeit kontrollieren lässt. So erschlossen sie in wenigen Jahren völlig neue Forschungsgebiete. Die optischen Systeme mit höherer Leistung und geringerem Energieverbrauch, die nun möglich geworden sind, werden Antworten auf manche Herausforderung der Zukunft geben.

Doch das ist nicht alles. Inspiriert vom langsamen Licht entwickelten die Forscher völlig neue Methoden, um optische Signale zeitlich zu kontrollieren. Mit ihrer Hilfe könnten wir die Datenraten in unseren Kommunikationssystemen künftig möglicherweise drastisch erhöhen. ~

DIE AUTOREN



Luc Thévenaz (links) forscht seit 1988 an der École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Dort leitet er derzeit die Arbeitsgruppe Faseroptik. Die Forschungsinteressen des Physikers umfassen faseroptische Sensoren, die nichtlineare Optik in Fasern,

langsames und schnelles Licht und die Laserspektroskopie in Gasen. Einladungen zu Forschungsaufenthalten führten ihn an die Stanford University, USA, nach Südkorea und nach Australien. Er gründete die Firma Omnisens im schweizerischen Morges. **Thomas Schneider** ist seit 2000 Professor an der Hochschule für Telekommunikation Leipzig (HfT) und leitet das dortige Institut für Hochfrequenztechnik. Seine Forschungsinteressen liegen auf nichtlinearen optischen Effekten in Wellenleitern und Festkörpern, der ultrahochoauflösenden Spektroskopie, der Speicherung und Verlangsamung von Licht sowie der Erzeugung und Nutzung von Wellen im Terahertzbereich für die Kommunikation.

QUELLEN

- Bigelow, M. S. et al.:** Superluminal and Slow Light Propagation in a Room-Temperature Solid. In: *Science* 301, S. 200–202, 2003
- González-Herráez, M. et al.:** Optically Controlled Slow and Fast Light in Optical Fibers Using Stimulated Brillouin Scattering. In: *Applied Physics Letters* 87, S. 081113, 2005
- Jamshidi, K. et al.:** A Review to the All-Optical Quasi-Light Storage. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 99, S. 1–7, 2011
- Schneider, T. et al.:** Quasi-Light Storage: A Method for the Tunable Storage of Optical Packets With a Potential Delay-Bandwidth Product of Several Thousand Bits. In: *Journal of Lightwave Technology* 28, S. 2586–2592, 2010
- Thévenaz, L.:** Slow and Fast Light in Optical Fibres. In: *Nature Photonics* 2, S. 474–481, 2008

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1135751