

Wie der Mensch das Licht zu seinem Boten und Spion dressiert

Unsere Möglichkeiten, dem Licht Informationen zu entlocken, sind so gross wie nie zuvor – wir kreieren sogar selbst spezielle Lichtquellen, die uns mit Wissen über kleinste Bausteine der Natur versorgen. Und wir haben gelernt, Licht gezielt zur Datenübertragung einzusetzen – etwa durch Glasfasern, ohne die es die heutige Informationsgesellschaft nicht gäbe.

Von Thomas Feurer

Fast 3000 Jahre hat die Menschheit damit verbracht, der Natur des Lichts auf die Spur zu kommen. Die grössten Genies jedes Zeitalters haben sich die Köpfe darüber zerbrochen, warum und wie wir sehen. Von den «Sehstrahlen» der Griechen bis zu den Quantenteilchen, die wir heute Photonen nennen, war es ein langer Weg – voller Kontroversen, Missgunst, Fantasie und Genialität (siehe dazu den Beitrag auf Seite 5). Heute wissen wir, was Licht ist, oder um es mit Albert Einsteins Worten zu formulieren: «Heute glaubt zwar jeder Lump, er wisse es, aber er täuscht sich ...» So ganz trauen wir den Photonen nämlich noch immer nicht über den Weg, vor allem weil sie zwei Gesichter haben, die unterschiedlicher nicht sein könnten: Sie sind gleichzeitig Welle und Teilchen.

Trotzdem haben wir gelernt, diese Tatsachen zu akzeptieren und unser Denken entsprechend anzupassen – auch weil die Theorie der Photonen, die Quantenelektrodynamik, eine der erfolgreichsten Theorien überhaupt ist. Sie reproduziert mit grosser Genauigkeit alle Experimente, die mit Photonen durchgeführt wurden und werden. So wissen wir heute, dass Photonen sich durch ihre Farbe, ihre Bewegungsrichtung und ihre Polarisation ordnen lassen, und dass sie manchmal ihr Wellengesicht und manchmal ihr Teilchengesicht zeigen, je nachdem, welches Experiment man mit ihnen anstellt. Wir wissen auch, dass Photonen sich mit der grösstmöglichen Geschwindigkeit überhaupt ausbreiten – eine Tatsache die eng verknüpft ist mit der Entwicklung der Relativitätstheorie Einsteins (siehe dazu auch Seite 9). Das Verständnis über die Natur der Photonen



Die einzelnen Fasern eines Glasfaserkabels.

und ihren Eigenschaften hat dazu geführt, dass wir sie in nie gekanntem Masse für unsere Forschungen und zum Nutzen der Gesellschaft einsetzen können. So können wir heute Lichtquellen ungeahnter Qualität herstellen: Zum Beispiel energiesparende Lampen, LEDs oder verschiedenste Laser, die unsere Welt von der Medizin bis zu diversen Industrieanwendungen prägen, und ohne die moderne Kommunikation praktisch nicht möglich wäre. Dieser Beitrag zeigt an Beispielen, wie der Mensch Licht als Medium zur Informationsübertragung einsetzt – es sozusagen zu seinem Boten und Spion dressiert.

Das Licht trägt Informationen in sich

Etwa 75 Prozent der Informationen über seine unmittelbare Umgebung nimmt der Mensch über das Auge auf. Meist verarbeiten wir Bilder, tagsüber in Farbe, nachts in Schwarz-Weiss. Das Licht übermittelt uns in Bildern Informationen über Objekte in unserer unmittelbaren Umgebung. Aus naheliegenden Gründen ist unser abbildendes Sehvermögen optimiert auf Entfernungen zwischen 25 Zentimetern (damit wir sehen, was wir mit unseren Händen anstellen) und einigen 100 Metern (damit wir sehen, vor welchen Gefahren wir uns

besser in Sicherheit bringen). Seit dem Mittelalter versuchen Wissenschaftler, das abbildende Sehvermögen des Menschen mit Hilfe spezieller Apparate zu verbessern und zu erweitern. Sei es, um einem schlecht sehenden Menschen sein volles Sehvermögen zurückzugeben, sei es, um weit entfernte Objekte wie den Jupiter und seine Monde, fremde Galaxien oder gar den Urknall zu betrachten, oder sei es, um kleinste Bestandteile des Lebens, zum Beispiel Bakterien oder Zellen, zu beobachten.

Auch die ersten Datenübertragungssysteme basierten auf der Fähigkeit des Auges, Bilder entfernter Objekte wahrzunehmen. Anfänglich wurden Signalfeuer benutzt, um ein Bit Information zu übertragen, nämlich Gefahr (Feuer an) oder keine Gefahr (Feuer aus). Später wurden die Systeme ausgefeilter. Ganze Botschaften konnten entweder durch austauschbare Objekte (zum Beispiel Flaggen) oder mittels verstellbarer Signalelemente (zum Beispiel Semaphoren) übermittelt werden.

Moderne Datenübertragung mit Licht

Seit James Clerk Maxwell (1831–1879) wissen wir, dass Licht eine bestimmte Form elektromagnetischer Strahlung ist, und seit Heinrich Hertz (1857–1894) und Guglielmo Marconi (1874–1937) wissen wir, dass man nicht unbedingt Bilder braucht, um Informationen zu übertragen. Auch andere Eigenschaften der Photonen können dazu benutzt werden. Es genügt, die Schwingungen einer Lichtwelle zu modulieren (analoge Datenübertragung), oder das Licht in Lichtpakete zu zerstückeln (digitale Datenübertragung). Ein zunächst ungelöstes Problem war die Tatsache, dass Licht sich nicht einfach in eine bestimmte Richtung senden und schon gar nicht um Ecken und andere Hindernisse herum lenken lässt. Es musste also eine Art Lichtleiter gefunden werden: Ein «Lichtschlauch», in den man



In Glasfasern wird Licht mit vielen Wellenlängen, also Farben, verschickt.

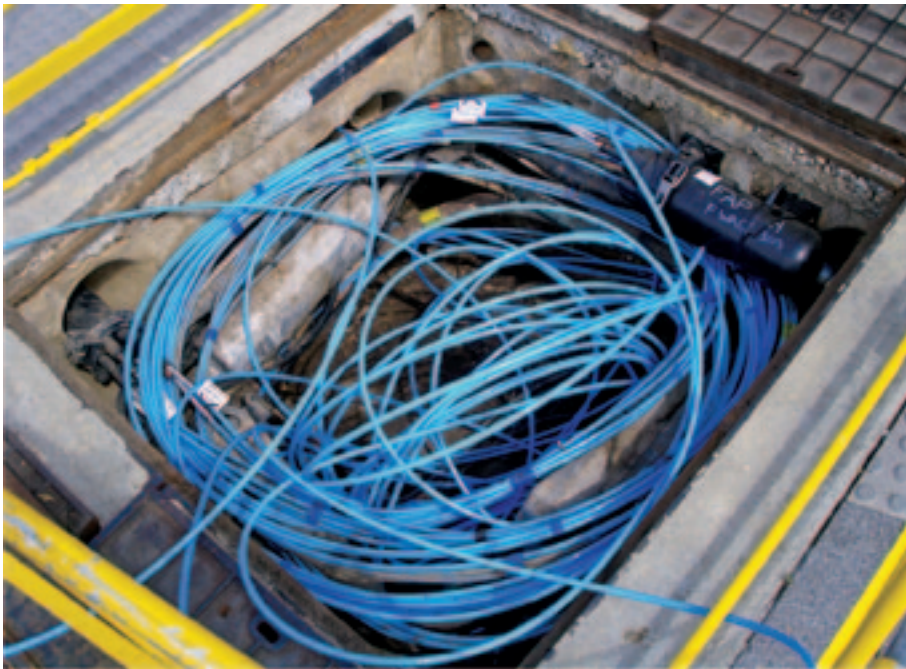
Licht hineinschicken und von einem Ort zum anderen transportieren kann, falls nötig auch um Hindernisse herum. Seit den 1960er-Jahren benutzen wir dazu sogenannte Glasfasern, die nur etwa doppelt so dick sind wie ein Haar, und so flexibel, dass man sie um einen Finger wickeln kann.

Um eine möglichst grosse Datenmenge übertragen zu können, schickt man Lichtpakete mit vielen Wellenlängen (Farben) gleichzeitig durch eine Glasfaser und bündelt zudem viele Glasfasern zu einem Kabel zusammen. Die Glasfaser bietet beim aktuellen Stand der Technik die Möglichkeit, rund 1 Terabit Daten pro Sekunde zu übertragen: Das ist eine Millionen Mal mehr, als die besten elektrischen Kabel jemals zu leisten im Stande waren. Aus diesem Grund hat die Glasfaser unser Informationszeitalter revolutioniert und verbindet heute Kontinente, Länder und vermehrt auch Städte und Häuser miteinander. Die meisten Schweizer Städte haben entschieden, Glasfasernetze bis in die Haushalte zu ziehen. Geht man dieser Tage durch Berner Strassen, so sieht man Techniker an Schächten sitzen, die mit einem kleinen Apparat hantieren: Dieser dient dazu, Glasfaserenden miteinander zu verschweissen. Ein Problem der Glasfaser

ist die Sicherheit der Datenübertragung, denn um ein Telefongespräch belauschen zu können, genügt es, aus jedem Lichtpaket einige wenige Photonen abzuzwacken. Dieses Problem lässt sich lösen, indem man die Information in Paketen von nur einem Photon verschickt. Fehlt es beim Empfänger, merkt er sofort, dass das Gespräch belauscht wurde. Heute gilt die auf diesen Prinzipien basierende sogenannte Quantenkryptographie als die sicherste Möglichkeit, geheime Daten auf Glasfasern zu übertragen.

Vom Licht lernen

Seit Jahrhunderten nutzen wir Fernrohre, um dem Licht die Geheimnisse unseres Universums zu entlocken. Von Galileo Galilei, der durch die Beobachtung des Jupiters und seinen Monden unser Weltbild revolutionierte, bis hin zum Teleskop Hubble, das uns Einblicke in die Anfänge des Universums ermöglichte, waren Fernrohre ein wesentliches Instrument auf dem Weg zu unserem heutigen Weltbild. Die Zukunft um das Fernrohr herum war bald so wichtig, dass sich ein eigenständiger Wissenschaftszweig entwickelte, die Astronomie. Der Wunsch nach besseren Fernrohren war eine der treibenden Kräfte zur



Das Glasfasernetz wird zurzeit stark ausgebaut – der Hausanschluss an die «Datenautobahn» gehört künftig zur Grundversorgung.

Beschäftigung mit der Natur des Lichts – etwa bei Christiaan Huygens (1629–1695) oder Joseph Fraunhofer (1787–1826).

Während Licht durch das Fernrohr betrachtet Bilder und Informationen weit entfernter Objekte lieferte, erschloss ein anderes Instrument die Welt des Mikrokosmos: das Mikroskop. Von ihm profitierten am meisten die Biologie und die Medizin, konnte man mit dem Mikroskop doch erstmals kleinste Lebewesen, Zellen und Zellbausteine sehen.

Makro- und Mikrokosmos sind jedoch noch längst nicht vollständig erforscht. So fangen wir zum Beispiel gerade erst an zu verstehen, wie man aus der Beobachtung des Lichts aus dem Universum etwas über Planeten anderer Sonnensysteme lernen kann. Und aus der Farbzusammensetzung des Lichts wird man vielleicht dereinst schliessen können, ob es auf einem Planeten organische Moleküle gibt. Auch die Mikroskopie entwickelt sich ständig weiter. Immer kleinere Bestandteile des Lebens können beobachtet werden. Dem Licht Informationen zu entlocken wird also noch weitere Generationen von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern beschäftigen.

Blitze – die kürzesten Ereignisse

Die Möglichkeiten, mittels Licht etwas über den Mikrokosmos zu lernen, machen heute längst nicht mehr halt bei Bakterien, Zellen oder Zellbausteinen. Die Entwicklung ist so weit fortgeschritten, dass wir mittels Licht sogar Moleküle und andere fundamentale

Bausteine der Natur, die noch etwa 1000 bis 10000 Mal kleiner als Zellen sind, studieren – und ihnen sogar bei ihren Bewegungen zusehen können. Diese sind oftmals derart schnell, dass gänzlich neue Lichtquellen entwickelt werden mussten, um sie beobachten zu können: Lichtquellen, die Lichtblitze mit einer unvorstellbar kurzen Dauer von nur 0,000000000000001 Sekunden aussenden und damit die kürzesten je vom Menschen erzeugten Ereignisse sind. Das Institut für Angewandte Physik der Universität Bern (IAP) war von Anfang an an der Entwicklung dieser Lichtquellen und der darauf basierenden Analyseverfahren beteiligt. Die Probleme sind inzwischen so komplex und facettenreich, dass sie nur in einer interdisziplinären Forschungsumgebung gelöst werden können. Aus diesem Grund leitet das IAP zusammen mit der ETH Zürich seit 2010 ein vom Schweizerischen Nationalfonds gefördertes Kompetenzzentrum (NCCR MUST), das sich ausschliesslich diesen Fragestellungen widmet.

Doch warum ist es so wichtig, Moleküle und andere Bausteine der Natur in ihrem Bewegungsablauf zu studieren? Francis Crick, einer der Entdecker der Doppelhelixstruktur der DNA, hat einmal gesagt «If you want to understand function, study structure» (Wer die Funktion verstehen will, muss die Struktur erforschen). Eine Reihe von Verfahren wurde entwickelt, um die Struktur und damit den Aufbau von komplexen Molekülen zu studieren. Die wichtigsten sind die Kernspinresonanz und

die Röntgenstreuung. Letztere Verfahren haben Forschungen ermöglicht, die mit nicht weniger als 19 Nobelpreisen in Physik, Chemie und Medizin ausgezeichnet wurden, kein anderes Gebiet war je so erfolgreich.

Heute wissen wir jedoch, dass wir noch viel mehr über die Funktion dieser Bausteine lernen können, wenn wir nicht nur ihre Struktur kennen, sondern ihnen auch quasi bei der Arbeit zusehen können. Man stelle sich vor, wie viel mehr ein Ausserirdischer über die Funktionsweise eines Autos lernen kann, wenn er die Möglichkeit hat, es beim Fahren anstatt bloss geparkt zu beobachten. Mit den oben dargestellten Lichtquellen haben wir die technischen Voraussetzungen geschaffen, um diese Aufgaben anzugehen. Heute steht uns neben der notwendigen räumlichen auch die zeitliche Auflösung zur Verfügung, um die Dynamik von Elektronen und Atomen innerhalb von kleinsten Bausteinen sichtbar zu machen. In diesem Sinne ist unsere Maxime «If you want to understand function, study time-dependent structure» (Wer die Funktion verstehen will, muss die zeitabhängige Struktur erforschen). Und wieder besteht die eigentliche Aufgabe darin, dem Licht, genauer gesagt den Lichtblitzen, die entscheidenden Informationen über das Molekül zu entlocken.

Kontakt: Prof. Dr. Thomas Feurer, Head of Division Laser Physics am Institut für Angewandte Physik (IAP), thomas.feurer@iap.unibe.ch