

## Erste „Quantenüberweisung“

Nur 90 Sekunden dauerte es und die weltweit erste Banküberweisung, deren Sicherheitscode über miteinander verschränkte Photonen verschlüsselt wurde, war abgeschlossen. Die quantenmechanisch gekoppelten Lichtteilchen gelangten dabei über



Die erst quantenkryptographisch verschlüsselte Banküberweisung brachte dem Institut für Experimentalphysik der Universität Wien eine Spende über 3000 Euro ein.

ein anderthalb Kilometer langes Glasfaserkabel vom Wiener Rathaus zu einer Filiale der Bank Austria. Damit gelang es der Arbeitsgruppe von Anton Zeilinger an der Universität Wien zusammen mit der Firma ARC Seibersdorf, einen absolut zufälligen Codeschlüssel zu erzeugen und abhörsicher zu versenden.

Die beiden verschränkten Photonen befinden sich in einem gemeinsamen quantenmechanischen Zustand, der erst nach Messung der Polarisation eines einzigen Photons festgelegt wird – „horizontale Polarisation“ steht für eine „0“, „vertikale“ für eine „1“ im Code. Jede Messung an einem der beiden Teilchen beeinflusst simultan die Eigenschaften des jeweils anderen. In der Praxis erzeugten die Physiker mit einem Laseraufbau im Wiener Rathaus ein verschränktes Photonenpaar, das über einen Kristall als Strahlteiler getrennt wurde. Ein Photon verblieb beim Empfänger, das andere wurde über die Glasfaser zur Bankfiliale geschickt. Nachdem diese Übertragung mit vielen verschränkten Photonenpaaren wiederholt wurde, besaßen beide Kommunikationspartner eine identische Ziffernfolge, die dann als Codierungsschlüssel für die Banküberweisung diente.

Zur Kontrolle, ob niemand diese Übermittlung abgehört hat, „opfern“ Sender und Empfänger einen kurzen Abschnitt des übertragenen Schlüssels und vergleichen diesen über einen konventionellen offenen

Kanal. Das Pilotexperiment wies dabei eine Fehlerrate von sechs Prozent auf, die ihre Ursache in dem Verlust des Verschränkungszustandes einzelner Photonenpaare aus technischen Gründen hatte. Zeilinger zeigte sich mit diesem Wert zufrieden, da nach den Berechnungen erst Abweichungen über 11,4 Prozent auf einen Lauschversuch deuten.

Der längere Rest des Schlüssels diente nun zur Codierung der Nachricht, also der eigentlichen Überweisung, nach dem so genannten „One-Time-Pad“-Verfahren: Jedem Bit der Nachricht wird dabei genau ein Bit des Schlüssels zugeordnet. So hängt die Länge des Codes immer mit der Länge der Nachricht zusammen. Eine „0“ im Code lässt beim Sender das zugeordnete Nachrichten-Bit unverändert, eine „1“ verursacht einen Austausch von „0“ in „1“ bzw. umgekehrt. Die so verschlüsselte Information – eine scheinbar wirre Folge von Nullen und Einsen – lässt sich nicht knacken. Der Empfänger kann jedoch den gleichen Schlüssel auf die Nachricht anwenden und erhält nach einem analogen Verfahren die Bitfolge in ihrem ursprünglichen Zustand.

Findet ein Lauschangriff statt, dann kann der Lauscher somit bestenfalls die Übertragung verhindern; der Schlüssel selbst bleibt geheim.

## Löschbare Druckplatten

Druckplatten sind Einwegartikel. Für jede einzelne Buch- oder Zeitungsseite belichten Drucker von Neuem eine photosensitive Schicht, die auf Aluminium oder Kunststoff aufgetragen wurde. Michael Vergöhl und seine Kollegen vom Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST) in Braunschweig haben nun eine Methode entwickelt, mit der sich Druckplatten nach einer Verwendung wieder löschen und für eine neue Belichtung vorbereiten lassen.

Dies gelingt mit einer nanokristallinen Schicht aus dem Pigment Titandioxid, das zwischen wasserabstoßend (hydrophob) und wasseranziehend (hydrophil) hin- und hergeschaltet werden kann. Wässrige Druckfarben bleiben so für den Druckvorgang an den hydrophilen Bereichen hängen und lassen sich auf Papier bannen. Grundlage ist eine photochemische Reaktion der etwa zehn Nanometer kleinen

Kristallite des Weißpigments. Unter einer wenige Minuten dauernden UV-Bestrahlung (360–370 nm) entstehen Elektronen-Loch-Paare, das vierwertige Titan wird dreiwertig und freigesetzte Radikale an der Oberfläche halten Wassermoleküle effizienter fest. Über eine Belichtungsmaske lassen sich so Texte und hochgerasterte Bilder auf diese Fläche reversibel einprägen. Für eine abermalige Nutzung der Druckplatte müssen diese hydrophilen Bereiche wieder „gelöscht“, also in den hydrophoben Grundzustand zurückgebracht werden.

Dazu griffen die Fraunhofer-Forscher auf ein atmosphärisches, kaltes Plasma zurück. In einem Kilovolt-Wechselspannungsfeld erzeugten sie in Luft und anderen Testgasen eine hohe Elektronendichte und säuberten mit diesem Plasma die benutzte Titandioxidplatte. Nach einem Prozess, der allerdings noch nicht ganz verstanden ist, ging die Anzahl der freien Radikale an der Oberfläche zurück und dreiwertiges Titan wurde wieder zu vierwertigem oxidiert. Alle durch die Belichtung hervorgehobenen, hydrophilen Druckbereiche wurden wieder wasserabstoßend. Dieser Löschvorgang verläuft innerhalb weniger Millisekunden, benötigt kein Vakuum und sollte sich daher ohne großen Aufwand in der Praxis anwenden lassen.

Nach großer Resonanz auf diese Entwicklung auf der diesjährigen Hannover-Messe hofft Vergöhl, dass diese Plasma-Technik bald in modernen Druckereien eingesetzt wird. Über Partner in der Industrie schweigt der Forscher jedoch, zumal eine Patenterteilung für diese Innovation noch aussteht.

## Teilchenphysiker retten Musikschätze

Tausende von alten Tonaufnahmen schlummern in den Museumsarchiven. Gebannt auf empfindlichen Schellackplatten oder gar auf rund hundert Jahre alten Wachstummeln könnten sie bei jedem Abspielen beschädigt werden. Amerikanische Teilchenphysiker vom Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) fanden nun eine elegante Methode, diese wertvollen Klänge ohne eine Berührung mit einer Nadel wieder erschallen zu lassen und digital zu sichern. Mit einem konfokalen Lichtmikroskop foto-

1) [www.cdf.lbl.gov/~av/](http://www.cdf.lbl.gov/~av/),

2) [www.research.philips.com](http://www.research.philips.com); K. Brunner et al., J. Am. Chem. Soc., 2 DOI: 10.1021/ja049883a (2004)

grafierten sie die Tonrillen einer alten Schellack-Platte. Das Abbild des Linienmusters werteten sie mit einem Programm der Art aus, wie es sonst üblicherweise zur Analyse von Flugbahnen in einem Elementarteilchendetektor genutzt wird. Völlig natürlich und rauschfrei erklang so das Lied „Nobody Knows



Ausgehend von hochaufgelösten lichtmikroskopischen Bildern der feinen Plattenrillen lassen sich alte und empfindliche Tonaufnahmen berührungsfrei rekonstruieren und abspielen. (Foto: LBNL)

the Trouble I've Seen“ in einer fast 60 Jahre Aufnahme von Marian Anderson.

Entscheidend für den Erfolg des Verfahrens ist eine ausreichende Bildauflösung von vier Mikrometer in der Ebene und 100 Nanometer in der Senkrechten. Bei einer Platte, die mit 78 Umdrehungen pro Minute abgespielt wird und rund 160 Mikrometer breite Tonrillen hat, lassen sich die meist feineren Kratzer erkennen und bei der Bildauswertung „reparieren“. Übrig bleibt die reine Wellenstruktur der Rille, die beispielsweise für einen 10 Kilohertz-Ton zwischen Radien von 40 und 100 Mikrometer schwankt.

Ihre Erfahrungen aus der Analyse von Teilchenbahnen nutzen die Physiker, um die Wellenform der Rillen mathematisch exakt zu beschreiben. So wie sich Ladung und Impuls eines Elementarteilchens aus der Analyse der Flugbahn in einem Magnetfeld erschließt, lässt sich aus der Rillenstruktur eine Tonfolge mit ihren unterschiedlichen Frequenzen simulieren. Zentraler Teil dieser Computersimulation ist eine virtuelle Tonnadel. Gespeist mit den Gleichungen, die die Wellenform der Tonrillen beschreiben, vollführt sie im Rechner quasi die gleichen Bewegungen wie eine echte Nadel in realem Kontakt mit der Platte. Da jedes kleinste Nadelzittern genau einem Ton zugeordnet werden kann, erzielten die Forscher eine naturgetreue Wiedergabe, die nah an die ursprüngliche Aufnahmequalität heranreicht.

Mit der gleichen Methode ließen sich sogar die allerersten Tonaufnahmen, die über ein Muster auf einer Wachstrommel gespeichert wurden, kontaktfrei rekonstruieren. Auch zerbrochene Schellackscheiben können über die Rillenbilder im Rechner wieder zusammengesetzt und „abgespielt“ werden. Nach Aussage der LBNL-Forscher haben bereits Konservatoren der Kongressbibliothek in Washington großes Interesse an dem Verfahren gezeigt, um ihr riesiges Tonarchiv auszuwerten und auf digitale Datenträger zu sichern.<sup>1)</sup>

## Organische Leuchtdioden strahlen effizienter

Großflächige und brillante Bildschirme mit organischen Leuchtdioden – kurz OLED – rücken der Massenproduktion immer näher. Mit gleich zwei technischen Neuerungen gelang es Forschern des Elektronikonzerns Philips, die Eigenschaften der filigranen Module zu verbessern. Zum einen verringert ein neues Anodenmaterial deutlich die auftretenden Leistungsverluste, die bei der Erzeugung der Ladungsträger im Polymermaterial entstehen. Zum anderen gelingt es mithilfe einer zusätzlichen phosphoreszierenden Substanz, die Lichtausbeute bei der Rekombination angeregter Elektronen mit den jeweiligen Elektronenlöchern zu erhöhen. Mit beiden Effekten erreichen die Forscher um Klemens Brunner bei gleicher Stromversorgung rund 90 Prozent der Lichteffizienz herkömmlicher anorganischer Leuchtdioden.

Der Leuchteffekt einer OLED beruht auf der strominduzierten Bildung von Elektronen und Löchern, die nach ihrer Trennung rekombinieren und dabei Photonen aussenden. Wegen einer zu großen Beweglichkeit der Elektronen fanden bisher jedoch nicht alle Löcher wieder zu einem Rekombinationspartner. Das neue Anodenmaterial – ein Polymer, über deren Struktur die Philips-Forscher noch keine Auskünfte geben wollen – dient nun als Elektronen-Blocker und konzentriert diese negativen Ladungsträger in der Nähe der Löcher. So gelang es Brunner und Kollegen, den Mangel an Elektronen zu verringern und die Ladungsträgerbilanz wieder ins Gleichgewicht zu bringen. Je nach Farbe der Leuchtdiode steigerten

sie die Rekombinationsrate um das Drei- bis Fünffache und erreichten Leuchtwerte zwischen 20 (blau) und 35 (gelb) Candela pro Ampere.

Für die zweite Effizienzsteigerung nutzen die Wissenschaftler zusätzlich zu den in einer OLED üblichen fluoreszierenden Substanzen nun auch phosphoreszierende. Ein so genanntes Hauptketten-Carbazol führte dabei in Kombination mit einem Schwermetall-Iridiumkomplex zur Ausbildung von neuen strahlenden Übergängen bei der Rekombination von Elektronen und Löchern. Bisher ließen sich nur Lichtteilchen über die Fluoreszenz bei Rekombination von Ladungs-



Mit effizienteren organischen Leuchtdioden lassen sich ähnlich leistungsfähige Farbdisplays realisieren wie mit anorganischen LEDs. (Foto: Philips)

trägern mit antiparallelen Spins erzeugen. Nun ergaben sich über eine Singulett-Triplett-Mischung auch strahlende Übergänge von Teilchen mit parallelen Spins über Phosphoreszenz. In rot und grün leuchtenden Prototypen, die sich bereits für die industrielle Fertigung eignen, konnte so die Lichtausbeute vervierfacht werden. Die blaue OLED funktioniert allerdings bisher nur unter Laborbedingungen.

Die Displayqualität leidet dabei nicht durch das Phosphoreszieren, da das Nachleuchten binnen sechs Mikrosekunden abgeklungen ist, Schaltraten für Videoanwendungen dagegen bei etwa 20 Mikrosekunden liegen. Die Aussendung eines Fluoreszenz-Photons läuft mit wenigen Nanosekunden um rund eine Größenordnung schneller ab.<sup>2)</sup>

JAN OLIVER LÖFKEN