

■ Blaues Wunder für grünes Licht

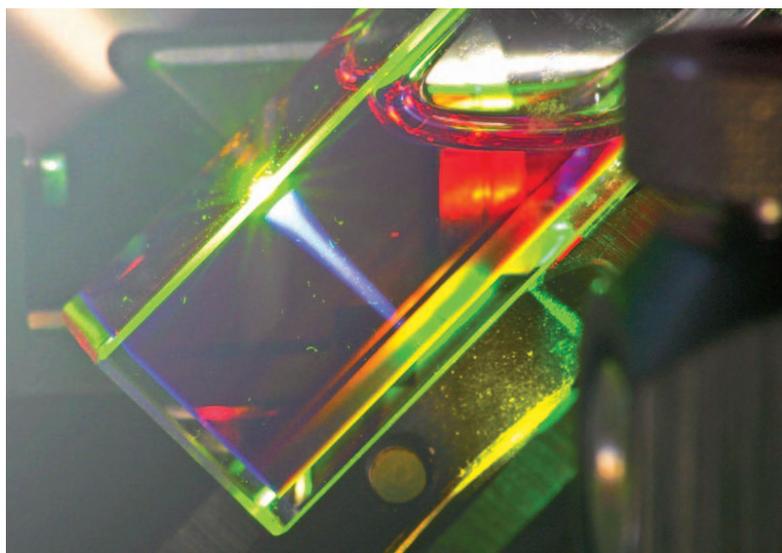
Up-conversion von Photonen für effizientere Solarzellen

#) Aufgrund der mit der Relaxation aus den Singulett-Zuständen in Triplett-Zustände verbundenen Thermalisierungsverluste ist die Photonenenergie des energiereichen Photons in der Regel kleiner als die Summe der beiden niederenergetischen Photonen. Dies erscheint auf den ersten Blick als Verlustmechanismus, die theoretische Analyse der up-conversion zeigt jedoch, dass derartige Thermalisierungsprozesse für eine Realisierung von effizienter up-conversion bei geringen Lichtintensitäten unabdingbar ist [3].

Ein zentrales Problem beschäftigt die Entwickler, wenn es darum geht, Solarzellen effizienter zu machen: Photonen mit Energien unterhalb der Bandlücke des Absorbermaterials werden nicht absorbiert und durchqueren die Solarzelle damit ungenutzt. Diese Photonen geringer Energie ließen sich dennoch zumindest partiell nutzen, wenn es gelänge, die Photonenenergie auf Kosten der Photonenzahl zu erhöhen [1]. Inzwischen ist eine Vielzahl solcher Mechanismen der up-conversion bekannt, der kommerziell erfolgreichste ist die Frequenzverdopplung von Festkörperlasern. Viele diese Mechanismen benötigen aber kohärentes Licht und sind nur bei großen Intensitäten effektiv, d. h. mit Sonnenlicht funktionieren sie prinzipiell nicht.

Im Gegensatz dazu ist es Wissenschaftlern am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz sowie am Sony Materials Science Laboratory in Stuttgart nun gelungen, up-conversion mit inkohärentem Licht, ja sogar mit Sonnenlicht nachzuweisen [2]. Ein auf der Rückseite der Solarzelle aufgebracht up-converter könnte damit aus je zwei von der Solarzelle transmittierten Photonen geringer Energie ein Photon höherer Energie erzeugen, das dann innerhalb der Solarzelle absorbiert wird und dabei ein Elektron-Loch Paar generiert. Eine theoretische Analyse dieser Idee zeigt, dass die Kombination von Solarzelle und up-converter einen deutlich höheren Wirkungsgrad ermöglicht [3].

Der neue Mechanismus beruht auf einer Mischung aus absorbierenden organischen Molekülen (metallated porphyrin macrocycles), die in eine Matrix aus Licht emittierenden Molekülen mit sehr hoher Lumineszenz-Quantenausbeute eingebettet sind. Die absorbierenden Moleküle agieren dabei als „Antennen“, die das eingestrahlte langwellige Licht absorbieren und dabei in einen Singulett-Zustand übergehen. Die



Mehr Energie auf Kosten der Intensität: Eine Kombination spezieller Moleküle (hier: in Lösung in einer 1 cm dicken

Küvette) erlaubt es, den grünen Teil des Sonnenspektrums teilweise in kurzwelligeres blaues Licht umzuwandeln.

anschließende Relaxation endet in einem Triplett-Zustand, aus dem heraus ein strahlender Übergang in den Grundzustand verboten ist. Während der daraus resultierenden langen Lebensdauer kann es passieren, dass sich der gleiche Prozess völlig unkorreliert in einem Nachbarmolekül wiederholt. Beide Triplett-Zustände können sich nun gegenseitig auslöschen und ihre gemeinsame Energie an eines der beiden Moleküle oder an ein drittes übertragen, das dadurch in einen energiereichen Singulett-Zustand gerät. Auf diese Weise wird durch Absorption von zwei Photonen geringer Energie ein hochangeregter Zustand eines Licht emittierenden Moleküls erzeugt, bei dessen strahlender Rekombination schließlich das gewünschte Photon größerer Energie emittiert wird.^{#)}

Geschickte Rollenverteilung

Baluschew und Kollegen gelang es zu zeigen, dass sich mithilfe der von ihnen verwendeten organischen Materialkombination grünes Sonnenlicht ($\lambda = 550 \text{ nm}$) mit einer Intensität von nur 10 W/cm^2 mit einem Quantenwirkungsgrad von 1 % in blaues Licht ($\lambda = 450 \text{ nm}$) umwandeln lässt. Für die Expe-

rimente haben die Autoren konzentriertes Sonnenlicht (Faktor 100) verwendet, für das auch sog. Konzentratorzellen konzipiert werden. Vielversprechend an dem Ansatz, die Rolle von Absorption und Emission auf verschiedene Moleküle aufzuteilen, ist die Möglichkeit, mit Hilfe verschiedener Molekülkombinationen einen breiteren Spektralbereich abzudecken, was speziell für Solarzellen wichtig wäre. Um allerdings die up-conversion bei heute existierenden Solarzellen aus Silizium, Kupfer-Indiumdiselenid oder Galliumarsenid anwenden zu können, müsste sie ins Infrarote verschoben werden: Für Silizium bedeutet das, dass die Lichtwellenlänge von $\lambda > 1100 \text{ nm}$ nach $\lambda < 1100 \text{ nm}$ konvertiert werden muss.

Anders als von den Autoren angegeben, ist die up-conversion von nicht-kohärentem Licht schon länger bekannt. Beispielsweise gibt es mit Phosphoren beschichtete Infrarot-Sensor-Karten, die bei Beleuchtung mit infrarotem Licht im Sichtbaren leuchten. Gemeint sind hier Karten, die nicht vorher mit sichtbarem Licht „aufgeladen“ werden müssen. Diese Karten werden zwar hauptsächlich zur Strahlver-

Dr. Thorsten Trupke, Centre of Excellence for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics, University of New-South-Wales, Sydney, Australien, und Prof. Peter Würfel, Institut für Angewandte Physik, Universität Karlsruhe, Wolfgang-Gaede-Str. 1, 76128 Karlsruhe

folgung von Infrarot-Lasern benutzt, funktionieren aber auch mit nicht-kohärentem Licht.

Ähnlich, nämlich durch Energie-Transfer zwischen verschiedenen Selten-Erd-Atomen, funktionieren verschiedene anorganische Phosphore, wie Erbium-dotiertes Natrium-Yttrium-Fluorid ($\text{NaYF}_4:\text{Er}$), das auf der Rückseite von kristallinen Silizium-Solarzellen eine Quantenausbeute von 2,5 % bei Laserbelichtung mit 1532 nm erreichte [4]. Der Laser wurde dabei nur aus praktischen Gründen als

Lichtquelle benutzt. Der Nachteil dieses und anderer Selten-Erd-Phosphore für Solarzellenanwendungen ist die Begrenzung der *up-conversion* auf einen recht engen Spektralbereich. Hier könnte der Ansatz von Balushev et al. wesentliche Verbesserungen bringen. Ihre Ergebnisse sind somit vielversprechend, reichen für eine tatsächliche Verbesserung des Wirkungsgrades der Solarzellen aber noch nicht aus: Eine Verschiebung der *up-conversion* ins Infrarote, eine Verbesserung des Quantenwirkungsgrads auf grö-

ßer 10 % und eine weitere Verringerung der benötigten Lichtintensität müssen noch erreicht werden. Dazu wünschen wir den Autoren viel Erfolg.

Thorsten Trupke und Peter Würfel

- [1] P. Würfel und T. Trupke, *Physik Journal*, Dezember 2003, S. 45
- [2] S. Balushev, T. Miteva, V. Yakutkin, G. Nelles, A. Yasuda und G. Wegner, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 143903 (2006)
- [3] T. Trupke et al., *J. Appl. Phys.* **92**, 4117 (2002), P. Würfel, *Physics of Solar Cells*, Wiley-VCH (2005)
- [4] A. Shalav, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 013505 (2005)

■ Protokolle für die Quanteninformation

Erstmals gelang die Teleportation von Licht auf Materie und die Verschränkungsreinigung von atomaren Teilchen

Die Quanteninformationsverarbeitung (QIV) nutzt quantenmechanische Eigenschaften von Materie und Licht für sichere Kommunikationstechnologien und für neuartige Computer und Algorithmen. Die experimentell bislang am weitesten entwickelte Form der QIV ist die Quantenkryptographie, bei der quantenmechanische Informationsträger, üblicherweise Photonen, zum Aufbau eines Nachrichtenschlüssels verwendet werden. Mit Hilfe dieses Schlüssels lassen sich anschließend geheime Nachrichten sicher übertragen.

Eine Herausforderung für künftige praktische Anwendungen ist die Skalierbarkeit der Methode über weite Distanzen. Schickt man Photonen durch Glasfasern bei typischen Wellenlängen, so werden diese nach einer Entfernung von wenigen Kilometern absorbiert. Um Photonen über weitere Entfernungen zu schicken, müssten diese, wie auch klassische Signale, in regelmäßigen Abständen verstärkt werden. Quantenzustände haben aber die bemerkenswerte Eigenschaft, dass man sie nicht kopieren („klonen“) kann, was einerseits vor Abhörattacken schützt, andererseits aber eine Verstärkung ohne Verlust der Quanteneigenschaften unmöglich macht. Dadurch wird das Verfahren exponentiell ineffizient.

Dieses Problem lässt sich generell mithilfe von verschränkten Zuständen lösen. Dabei wird nun nicht mehr ein (unbekannter) Zustand als Träger der Quanteninformation über einen verrauschten Kanal übermittelt, sondern vielmehr ein bekannter, verschränkter Zustand, den man mehrfach erzeugen kann. Die Verschränkungsreinigung und die Teleportation, zwei grundlegende Protokolle der QIV, erlauben es dann, (unbekannte) Quanteninformation beinahe rauschfrei zu übermitteln. Insbesondere kann durch eine geschickte Kombination dieser beiden Protokolle, dem Quantenrepeater [1], Verschränkung über beliebige Distanzen effizient aufgebaut werden.

Verschränkung als Ressource

Einfachstes Beispiel für einen verschränkten Zustand verschiedener Freiheitsgrade eines Systems ist der aus zwei Quantenbits A und B bestehende EPR-Zustand $|\Psi\rangle_{AB} = |0\rangle_A|1\rangle_B - |1\rangle_A|0\rangle_B$. Bei einem Quantenbit handelt es sich um ein Zwei-Niveau-System, wobei physikalisch völlig unterschiedliche Objekte als Quantenbit beschrieben werden können, etwa der Spin eines Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchen, zwei orthogonale Polarisationszustände eines Photons oder zwei Energieeigenzustände eines Atoms. Dieser EPR-Zustand hat die

bemerkenswerte Eigenschaft, dass die Komponenten der Spins bezüglich jeder beliebigen Messrichtung perfekt anti-korreliert sind.

Damit wird das seltsame Quantenphänomen der Verschränkung, das unser Bild der Welt in Bezug auf Realität und Lokalität in Frage stellt, zur wertvollen Ressource für verschiedene praktische Anwendungen in der QIV. Man kennt inzwischen einen ganzen Zoo von verschränkten Zuständen mehrerer Quantenbits, mit Anwendungen im Bereich der Quantenkommunikation und des Quantenrechnens.

Zu den Anwendungen dieser Verschränkung zählt auch die so genannte Teleportation. Dabei werden die Korrelationen zwischen zwei verschränkten, räumlich getrennten Quantensystemen A und B (im Zustand $|\Psi\rangle_{AB}$) genutzt, um einen dritten, unbekanntem Quantenzustand $|\phi\rangle_A$ von A nach B zu übermitteln. Um dies zu erreichen, werden die Quantenbits in A und A' in einer aus verschränkten Zuständen bestehenden Basis, der Bell-Basis, gemessen. Der Zustand des Quantenbits in B ist – bis auf lokale Drehungen, die nur vom vorliegendem Messergebnis abhängen – identisch mit $|\phi\rangle$. Teleportation wurde in den letzten Jahren bereits für einzelne Photonen, Atome und Lichtfelder experimentell nachgewiesen. Kürz-

Dr. Wolfgang Dür und Prof. Dr. Hans-J. Briegel, Institut für Theoretische Physik, Universität Innsbruck, Technikerstr. 25, A-6020 Innsbruck und Institut für Quantenoptik und Quanteninformation der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Technikerstrasse 21a, 6020 Innsbruck