

1) A. Pospisil et al., Nat. Photonics, DOI: 10.1038/nphoton.2013.240;  
X. Wang et al., DOI: 10.1038/nphoton.2013.241;  
X. Gan et al., DOI: 10.1038/nphoton.2013.253

2) M. M. Shulaker et al., Nature 501, 526 (2013)

## ■ Scharfes Fischauge

**Ein monozentrisches Kameradesign erreicht trotz 120° Gesichtsfeld eine hohe Auflösung.**

Fischaugen-Objektive haben das Problem, dass sie ein großes Gesichtsfeld auf einen ebenen Sensor abbilden müssen. Um die starken Abbildungsfehler in Grenzen zu halten, unterliegt das Design eines solchen extremen Weitwinkelobjektivs starken Einschränkungen – will man ein großes Gesichtsfeld, muss man mit einer eingeschränkten Winkelauflösung leben. Wissenschaftler der University of California in San Diego haben nun aber eine Kamera entwickelt, die alles zwischen einem halben Meter und 500 Meter Entfernung scharf abbilden kann und eine Auflösung von 0,2 Milliradian (rund 40 Bogen Sekunden) erreicht.

Die Forscher arbeiten dazu mit einem monozentrischen optischen Design: Mit ausschließlich sphärischen Linsen und einer sphärischen Bildebene lassen sich geometrische Abbildungsfehler weitgehend vermeiden. Die Anpassung der sphärischen Bildebene an den ebenen Bildsensor gelingt den Wissenschaftlern durch hochauflösende Faserbündel, deren Konturen sie auf der Eintrittsseite sphärisch geschliffen haben. Dies war bislang ein ungelöstes Problem.

Der vorliegende Demonstrator hat 12 mm Brennweite und liefert

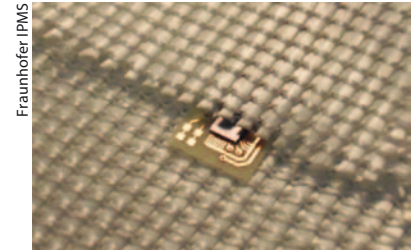
ein Bild mit 5 Megapixel. Bereits dieses einfache System erreicht bei einem Gesichtsfeld von 120° an den Bildfeldrändern eine höhere Auflösung als eine Spiegelreflexkamera mit einem hochwertigen Zoomobjektiv bei gleicher Brennweite. Die Wissenschaftler bauen nun bereits einen Demonstrator mit 30 Megapixel Auflösung. Potenzielle Anwendungen sehen sie bei Drohnen oder in Smartphones.

## ■ Sensoren als Einnäher

**In Faserverbundbauteile lassen sich Sensoren während der Fertigung integrieren.**

In den vergangenen Jahren ist das Interesse an textilverstärkten Verbundbauteilen für den breiten industriellen Einsatz deutlich gewachsen. Treibende Kraft sind vor allem die Herausforderungen in der Automobilindustrie: Sparsamere Fahrzeuge oder Elektromobilität erfordern eine weitere Reduktion des Gewichts – der Austausch von Aluminium oder Stahl gegen Faserverbundwerkstoffe macht das möglich. Dabei geht es auch um neue Konzepte. Ein Beispiel ist eine Sensorik, die sich bereits während der Fertigung in die Verbundbauteile integrieren lässt. Sie gilt als weniger störanfällig als Sensorsysteme, die nachträglich an einem Bauteil angebracht werden. Wissenschaftler des Fraunhofer-Instituts für Photonische Mikrosysteme IPMS in Dresden haben nun Demonstratoren entwickelt, die verdeutlichen, wohin die Reise gehen könnte. Sie arbeiteten dazu mit Kollegen der TU Dresden zusammen.

Die Projektpartner haben Sensoren für die Messung von Temperatur, Druck oder Dehnung in Faserverbundwerkstoffe integriert. Dazu montieren sie kommerziell erhältliche elektronische Bauteile auf Leiterplatten. Die Platten sind entsprechend den geometrischen Anforderungen des textilen Werkstoffes beschaffen und lassen sich entweder durch die ins Gewebe integrierten Leiterbahnen „anstickern“ oder beim Zusammenfügen der mehrlagigen Werkstoffe gleich mit



In textilverstärkte Verbundbauteile lassen sich Sensoren integrieren.

„eingießen“. Dabei müssen die Sensoren einige Minuten lang Temperaturen von 200 °C und Drücke von etwa fünf Bar schadlos überstehen.

Die Demonstratoren sind mit Blick auf Ausfallsicherheit optimiert: Sie bestehen aus einem Sensornetz, das in ein Verbundbauteil mit mehreren Zentimetern Kantenlänge eingearbeitet ist. Energieversorgung und Datenkommunikation zwischen den einzelnen Sensoren sind redundant ausgelegt. So sollen zum Beispiel bei einer Stoßstange nach einem Crash, bei dem manche der Sensoren ausgefallen sind, die restlichen Sensoren trotzdem noch ihre Daten weitergeben können.

## ■ Graphen kann's richten

**Chipintegrierte Photodetektoren, an die eine Graphenschicht angekoppelt ist, erreichen eine hohe Bandbreite.**

Die optische Datenübertragung bildet heute das Herzstück der Weitverkehrsnetze. Optische Verbindungen zwischen Rechenclustern, auf einem Motherboard oder auf Prozessorebene, sind dagegen noch kein Standard, könnten aber eines Tages die Entwicklung extrem leistungsfähiger Computer ermöglichen. Hierfür sind auch aktive Komponenten wie integrierte Modulatoren oder Photodetektoren nötig, die derzeit noch auf Germanium oder Verbindungshalbleitern beruhen. Solche Materialien bringen aber in einer Technologiewelt, die ansonsten auf Silizium setzt, hohe Kosten und technologische Schwierigkeiten mit sich, so dass die Forscher nach Alternativen suchen.

Ein Ansatz könnte Graphen sein, das außergewöhnliche elektrische und optische Eigenschaften besitzt. Im Labormaßstab ist es bereits



Im Vergleich zu der Aufnahme einer klassischen Spiegelreflexkamera (a) lassen sich Objekte mit der in Kalifornien entwickelten monozentrischen Optik schärfer abbilden (b).

gelingen, erste Modulatoren und Photodetektoren auf der Basis des Materials zu entwerfen und in die Welt der Silizium-Photonik zu integrieren. Drei Arbeitsgruppen haben nun unabhängig voneinander chipintegrierte Photodetektoren auf der Basis von Graphen vorgestellt, die einen relativ großen Wellenlängenbereich, der für die optische Übertragung relevant ist, zwischen  $1,3\ \mu\text{m}$  und  $2,75\ \mu\text{m}$  abdecken: ein Team der TU Wien und der Johannes-Kepler-Universität Linz, eine Gruppe der Chinesischen Universität Hong-Kong sowie ein gemeinsames Team der Columbia University, des Massachusetts Institute of Technology und IBM.<sup>1)</sup>

Das evaneszente elektrische Feld der optischen Signale wird dabei durch Siliziumwellenleiter geführt, die parallel zu einer Graphenschicht verlaufen. Bei seiner Ausbreitung regt es Exzitonen im Graphen über dessen gesamte zweidimensionale Struktur an, was die erwünschte optische Wechselwirkung maximiert. Maßgeblich für eine hohe Ausbeute an Photoladungsträgern ist dabei das Design der Elektroden.

Das größte Problem bei der Massenfertigung der Detektoren bleibt jedoch das Graphen selbst: Für die Muster haben alle drei Gruppen die Graphenschicht noch manuell abschälen müssen.

## ■ Nanoröhren-Rechner

**Erstmals ist es gelungen, einen Computer mit Kohlenstoffnanoröhren-Transistoren zu bauen.**

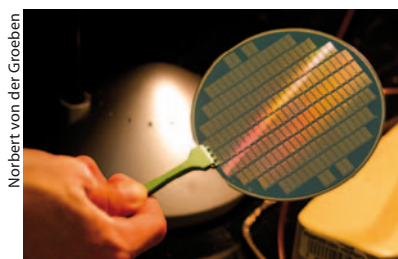
Transistoren aus Kohlenstoff-Nanoröhren (Carbon Nano Tubes, CNT) gelten seit Längerem als potenzielle Kandidaten, um zukünftig Siliziumtransistoren zu ersetzen. Dank der

Eigenschaften der CNTs würden entsprechende Transistoren energieeffizienter arbeiten als ihre derzeitigen Silizium-Pendants. Schwierig ist es jedoch, CNTs so in Transistoren zu integrieren, dass sich die Prozesse für die Massenfertigung eignen. Vor diesem Hintergrund ist der erste funktionierende CNT-Computer, den nun Wissenschaftler der Stanford University vorgestellt haben, ein Meilenstein.<sup>2)</sup>

Der Computer arbeitet mit einer Frequenz von 1 kHz; seine Leistung ist mit Rechnern von Mitte der 50er-Jahre zu vergleichen. Die Forscher haben das einfachste mögliche Computerdesign gewählt, um die Zahl der Transistoren – und damit die Fehleranfälligkeit in der Herstellung – gering zu halten: Der Computer arbeitet nur mit einem Bit Information und nutzt einen einzigen Befehl – bei modernen Rechnern sind 32 oder 64 Bit und viele Befehle üblich. Zur Demonstration ließen die Wissenschaftler ihren Computer zählen und ganze Zahlen sortieren. Der dafür nötige Befehl ist mit nur 20 CNT-Transistoren in Hardware umsetzbar.

Neben dem einfachen Design war für das Labormuster ein Herstellungsverfahren nötig, das unerwünschte CNTs entfernt, also solche, die in einer abgeschiedenen Schicht falsch positioniert wurden oder die metallisch anstatt halbleitend sind. Das hierfür in Stanford entwickelte Verfahren ist kompatibel zu gängigen Methoden der Massenfertigung in der Chipindustrie. Die CNT-Computer entstehen also vollständig auf Wafern. Auf dem Weg zur industriellen Herstellung müssen die kleinsten Transistorstrukturen noch von  $8\ \mu\text{m}$  auf  $20\ \text{nm}$  schrumpfen, um mit heutigen Chips konkurrieren zu können. Die verwendete Logik (p-Type Metal-Oxide Semiconductor) beschränkt ebenfalls die Skalierbarkeit der CNT-Chips. Die heute gängige CMOS-Logik (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) erfordert sehr viel mehr Fertigungsschritte. Dadurch sänke die Gesamtausbeute der Wafer, also die Zahl der funktionsfähigen Chips, deutlich.

**Michael Vogel**



Auf einem Wafer befinden sich knapp 1000 CNT-Computer.

Norbert von der Groeben