

Die Brennstoffzelle lässt sich beim Sport am Oberarm befestigen.

(Bild: X. Chen / CNRS / U. Grenoble Alpes)

Schweiß zu Strom

Eine elastische, dehnbare Bio-Brennstoffzelle erzeugt genügend elektrische Leistung, um einfache Verbraucher zu betreiben.

Elektronik, die sich wie ein Kleidungsstück direkt am Körper tragen lässt, gilt als ein Zukunftsmarkt. Bislang funktionieren die meisten Ansätze allerdings nur im Labor. Schließlich muss Wearable Electronics elastisch, dehnbar und hautverträglich sein. Diese Anforderungen gelten auch für eine Energiequelle. Hier sind Bio-Brennstoffzellen besonders interessant, weil sie aus körpereigenen Flüssigkeiten elektrischen Strom erzeugen. Wissenschaftler aus den USA, Frankreich und Großbritannien haben nun eine solche Bio-Brennstoffzelle vorgestellt.¹⁾ Beteiligt waren die University of California San Diego in La Jolla, die CNRS/Universität Grenoble Alpes und die Universität Birmingham.

Die Brennstoffzelle nutzt Laktat und Sauerstoff aus dem Schweiß. Als Elektrodenmaterial dient Buckypapier – ein Netz aus Kohlenstoff-Nanoröhren. Es ist selbsttragend und elektrisch

leitfähig. Als immobilisierende Matrix für die Enzyme an Anode und Kathode kommt ein Polymer zum Einsatz. Die Forscher erreichen eine hohe Elastizität und Dehnbarkeit der Brennstoffzelle durch einen Aufbau, bei dem die Elektroden Inseln bilden, die über serpentinenförmige Leiterbahnen miteinander verbunden sind. Ein Hydrogel auf Basis eines Polyvinyl-Alkohols dient als Elektrolyt.

Die Brennstoffzelle erreicht eine Leerlaufspannung von 0,74 V und eine Leistungsdichte von $520 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Ein Proband unter physischer Belastung konnte damit eine elektrische Leistung von $450 \mu\text{W}$ erzeugen – genug, um eine LED zu betreiben. Die Langlebigkeit der Zelle wurde bislang nicht systematisch untersucht.

Aus mikro wird nano

Mikro-elektromechanische Systeme (MEMS) lassen sich dank Graphen weiter miniaturisieren.

Chipintegrierte MEMS sind heute der Standard unter den Beschleunigungsmessern. Sie stecken in Smartphones, Autos oder Industrieanlagen. Obwohl sie klein sind, wird die weiter voranschreitende Miniaturisierung irgendwann dazu führen, dass selbst MEMS zu sperrig werden. Daher versuchen Forscher, noch kleinere Systeme für die Beschleunigungsmessung zu entwickeln, sozusagen NEMS (Na-

no-...) statt MEMS. Ein schwedisch-deutsches Team hat nun einen solchen Sensor vorgelegt.²⁾ Beteiligt waren die Königliche Technische Hochschule in Stockholm, die RWTH Aachen, die Firma AMO aus Aachen und die schwedischen Firmen Senseair und Silex Microsystems.

Der Beschleunigungsmesser besteht aus einem zweilagigen Graphenband und einer Prüfmasse aus Silizium. Zur Herstellung des Systems kamen nur skalierbare Verfahren zum Einsatz, wie sie in der Halbleiterfertigung gängig sind. Die Prüfmasse hängt im Sensor frei schwingend am Graphenband, das wiederum an der Siliziumdioxidschicht des Substrats befestigt ist. Dort erfolgt die elektrische Kontaktierung des Bands.

Die Fertigung ist anspruchsvoll, das Graphenband mechanisch empfindlich, daher die doppelagige Ausführung. Sie ermöglichte eine Ausbeute von deutlich über 50 % – im Vergleich zu einem Prozent bei Versuchen mit einlagigen Graphenbändern. Die Projektbeteiligten charakterisierten die Graphenbänder mit der daran hängenden Prüfmasse elektromechanisch. Die funktionalen Elemente des NEMS – Prüfmasse, Transducer, Trägerrahmen und Kontakte – beanspruchen etwa $80 \times 60 \mu\text{m}^2$. Das sind mindestens zwei Größenordnungen weniger als aktuelle piezoresistive Beschleunigungsmesser benötigen.

Kontrollierte Abrüstung

Ein neutronenbasiertes Untersuchungsverfahren macht Abkommen zur Abrüstung verlässlicher.

Verträge zur nuklearen Abrüstung konzentrieren sich bislang vor allem auf die Demontage der Trägersysteme, also der Raketen und Bomber. Sie sind ein gutes Maß für die Fähigkeit eines Landes, Nuklearwaffen einsetzen zu können. Der Fokus auf die Trägersysteme hat einen weiteren Grund: Die überwachte Zerlegung der Nuklearsprengköpfe verriet viel über das Design der Waffe, doch solche Informationen möchte kein Vertragspartner preisgeben. Wissenschaftler des Massachusetts Institute of Technolo-



KTH Royal Institute of Technology

Der Flächenbedarf der funktionalen Elemente des NEMS ist um mindestens zwei Größenordnungen kleiner als bei heutigen piezoresistiven Beschleunigungsmessern.

1) X. Chen et al., Adv. Funct. Mater. (2019), doi:10.1002/adfm.201905785

2) X. Fan et al., Nat. Electronics 2, 394 (2019); X. Fan et al., Nano Lett. (2019), doi:10.1021/acs.nanolett.9b01759

3) E. Engel et al., Nat. Commun. (2019), doi:10.1038/s41467-019-12386-0

4) F. Ashtiani et al., Optica 6, 1255 (2019)

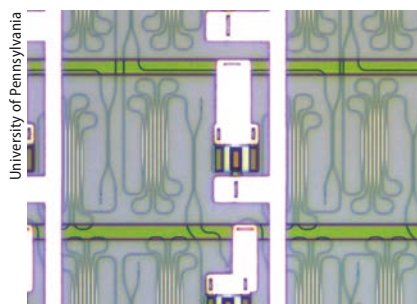
gy haben nun die Machbarkeit für ein im vergangenen Jahr neu erdachtes Verifikationsverfahren experimentell nachgewiesen.³⁾ Sie nutzen dabei Resonanzen im Wirkungsquerschnitt neutroneninduzierter Reaktionen aus, mit denen sich die Isotopenzusammensetzung und die Geometrie eines Sprengkörpers ermitteln lassen. Der Clou: Die Information wird physikalisch verschlüsselt, sodass Attrappen zwar identifizierbar, aber sicherheitskritische Informationen bei echten Sprengköpfen verborgen bleiben.

Im Experiment verwendeten die Forscher Molybdän und Wolfram statt Plutonium. Sie schickten einen Neutronenstrahl durch ihr Target, sozusagen den Sprengkopf. Die Wechselwirkung der Neutronen hängt stark vom Isotopengemisch ab. Nach dem Durchgang durch den „Sprengkopf“ treffen die Neutronen auf einen Filter, der als kryptographischer Schlüssel dient. Grundsätzlich kann dieser jede Materialmischung sein, die innerhalb der gewünschten Messzeit genügend Neutronen zum Detektor durchlässt. Der Staat, bei dem ein echter Sprengkopf unangemeldet kontrolliert wird, könnte dem Filter also Isotope beimischen, wie sie in Sprengköpfen vorkommen. Da die Verschlüsselung physikalisch erfolgt, ist kein Hacking möglich. Das resultierende Signal erlaubt keine Rückschlüsse auf Isotopenzusammensetzung und Geometrie eines Sprengkopfs. Aber das verschlüsselte Signal zeigt noch immer ein charakteristisches Muster, mit dem sich die zu untersuchenden Sprengköpfe von einer Referenz unterscheiden lassen, die bereits als echt erkannt ist.

Licht statt Mikrowellen

Dank der Verarbeitung von Mikrowellensignalen im Optischen sind Systeme zur Nahfeldbildgebung miniaturisierbar.

Die Mikrowellenbildgebung im Nahfeld hat verschiedene Anwendungen, die von Radar über den Blick durch Gewebe bis zur Detektion von Krebszellen reicht. Typisch sind Systeme, die ein sehr breitbandiges Mikro-



Blick auf einen Teil des nanophotonischen Mikrowellenchips

wellensignal empfangen können. Sie bestrahlen das Untersuchungsobjekt mit einer Folge kurzer Pulse und empfangen die reflektierten Signale mit einem Antennen-Array. Für die Bildrekonstruktion sind elektrische Verzögerungsstrecken erforderlich, um die Phasenunterschiede auszugleichen. Solche bildgebenden Systeme füllen einen ganzen Tisch, sind also recht sperrig. Je nach Ausführung kann ihr Stromverbrauch relativ hoch sein, oder sie sind anfällig für elektromagnetische Störungen. Wissenschaftler der University of Pennsylvania in Philadelphia haben einen chipbasierten Ansatz entwickelt, der sehr viel kleinere Systeme erlaubt.⁴⁾

Beim Labormuster werden die empfangenen Signale nicht elektrisch verarbeitet, sondern mit elektrooptischen Ringmodulatoren ins Optische konvertiert. Das hat Vorteile, weil nanophotonische Wellenleiter weniger Übertragungsverluste und hohe Übertragungsbandbreiten haben. Die Forscher haben ein ganzes Netz aus Verzögerungsstrecken auf einem $2 \times 2 \text{ mm}^2$ kleinen CMOS-Chip integriert. Optisch detektiert wird das Signal mit einer Matrix aus elf mal elf Photodioden.

Diese Art der nanophotonischen Bildgebung im Nahfeld erfordert eine 44 Mal kleinere Chipfläche bei elektrischer Verzögerung. Die Übertragungsverluste sinken um das mehr als 16-Fache. Elektromagnetische Störungen spielen keine Rolle mehr. Das Labormuster erreicht eine räumliche Auflösung von $4,8^\circ$ und ein Gesichtsfeld von $\pm 27^\circ$. Als nächstes gilt es, die Zahl der Pixel zu steigern und die Auflösung mittels kürzerer Mikrowellenpulse zu erhöhen.

Michael Vogel

Mid-IR Laser Diagnostik



- Spektrometer bis $6.3 \mu\text{m}$
- Autokorrelatoren bis $12 \mu\text{m}$