



Surround-Sound aus rollengedruckten Piezolausprechern: Das Papiersubstrat lässt sich auf der Rückseite farbig bedrucken.

## Papier zum Zuhören

Piezoelektrische Lautsprecher sind vollständig im Rollendruck entstanden.

Seit einigen Jahren konkretisiert sich die Idee gedruckter Elektronik. Die Ansätze sind vielfältig: Schon vor einigen Jahren haben Forscher der TU Chemnitz Einzelblätter mit funktionalen und grafischen Schichten bedruckt. Nun können sie piezoelektrische Lautsprecher im Rolle-zu-Rolle-Verfahren herstellen. Alle Prozessschritte erfolgen innerhalb der Fertigungslinie, inklusive der Polarisation funktionaler Schichten, der Laminierung und der Qualitätskontrolle.<sup>1)</sup>

Zunächst bedruckte das Team eine über 500 Meter lange Papierrolle mit den Elektroden. Als Material diente das leitfähige Polymer PEDOT:PSS. Dann folgte die piezoelektrische Schicht, ebenfalls auf Basis eines Polymers. Im letzten Schritt wurden mit einer Silbertinte die Kontaktierungen der Elektroden gedruckt. Das funktionalisierte Papier teilten die Chemnitzler auf zwei Rollen auf, um die beiden Bahnen zu laminieren, mit den piezoelektrischen Schichten zueinander orientiert. Die Elektroden liegen also jeweils einander gegenüber.

Nach dem Druck der Piezoschicht sind die Dipole zunächst statistisch verteilt; eine Hochspannung sorgte für die Polarisation. Das hierfür in die

Fertigungslinie integrierte Verfahren entwickelten die Beteiligten selbst, es kontrolliert auch die Qualität des Ergebnisses. Die Qualität der Elektroden, der Silberkontakte und der Lautsprecher wurde ebenfalls innerhalb der Fertigungslinie überwacht.

Das resultierende Piezolausprecher-Papier besaß eine hohe dauerhafte Polarisation von  $78 \text{ mC/m}^2$ , bei einer Ausbeute von über 90 Prozent. Die Schalldruckpegel erreichten in 93 Prozent der Fälle Werte von über 86 dB (bei 4,9 kHz). Als Demonstrator fertigte das Team eine knapp vier Meter lange Lautsprecherbahn mit einer farbig bedruckten Rückseite. Integriert sind 56 Lautsprecher.

## Filter für Fasern

Eine durchstimmbare Kavität lässt sich als dynamischer Filter nutzen.

Optische Fasern bilden das Rückgrat weltumspannender Kommunikationsnetze und erlauben durch ihre geringe Baugröße und große Robustheit auch Anwendungen in der Sensorik. Oft geht es darum, eine definierte Wellenlänge durch die Faser zu schicken. Dies ermöglichen optische Resonatoren wie Fabry-Pérot-Kavitäten. Ein Team der Universität Bonn und der mexikanischen Universidad de Guanajuato hat nun einen wirkungs-

vollen Ansatz entwickelt, um diese Kavitäten in durchstimmbare Filter zu verwandeln.<sup>2)</sup>

Die Spiegel der Kavitäten sind in kommerziell erhältlichen Glashülsen fixiert, um die Ausrichtung des Resonators gegenüber der Faser sicherzustellen. Durch ein an die Hülse geklebtes Piezoelement lässt sich der Abstand zwischen den Spiegeln verändern und damit die Resonanzfrequenz der Fabry-Pérot-Kavität – fertig ist der dynamische Filter.

Verschiedene Designs wurden getestet und charakterisiert. Eine stabile Kopplung an die Kavität gelingt bereits für Feedback-Bandbreiten von deutlich unter einem Hertz. Dies bestätigt die hohe passive Stabilität der Konfiguration. Am oberen Extrem ließen sich einige zehn Kilohertz erreichen, was nahe der ersten mechanischen Resonanzfrequenz des Aufbaus liegt. Über einen weiten Frequenzbereich bestimmt allein das thermische Rauschen das Untergrundrauschen.

Mögliche Anwendungen der Faserfilter sind platzsparende Gassensoren, einstellbare optische Filter und quantenelektrodynamische Grundlagenexperimente. Vorstellbar wären auch miniaturisierte, tragbare optische Oszillatoren mit hoher Kurzzeitstabilität.

## Energiernter in 3D

Druckbare Materialien ermöglichen neue Architekturen für thermoelektrische Generatoren.

Industrie 4.0 und Internet der Dinge sind die Schlagworte für eine umfassend vernetzte Welt – mit Milliarden von Sensoren, von denen viele energieautark funktionieren sollten. Dazu müssen sie Energie aus der Umgebung beziehen. Hierfür kommen thermoelektrische Generatoren (TEGs) infrage, die den Seebeck-Effekt ausnutzen, um Wärme in Strom umzuwan-

1) G. C. Schmidt et al., Adv. Mater. (2021), 2006437, DOI: 10.1002/adma.202006437

2) C. Saavedra et al., Opt. Express **29**, 974 (2021)

3) A. G. Rösch et al., npj Flexible Electronics **5**, 1 (2021); M. M. Mallick et al., ACS Energy Lett. **6**, 85 (2021)

4) Z. Li et al., Sci. Adv. **7**, eabe4458 (2021)



Die gefalteten thermoelektrischen Generatoren bilden einen winzigen Kubus.

deln. Sie sind noch recht teuer und nutzen seltene Materialien wie Tellur. Ein Team des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), der Ausgründung Otego und des InnovationLab Heidelberg hat nun gedruckte TEGs vorgestellt.<sup>3)</sup>

Sie beruhen auf zwei skalierbaren Herstellungskonzepten. Beim ersten Ansatz erzeugt das Team auf einer Substratfolie im Siebdruck ein Muster aus Thermoelementen, angeordnet in 13 Spalten und 39 Reihen. Die thermoelektrischen Tinten beruhen auf PEDOT-Nanodrähten bzw. einem  $TiS_2$ -Hexylamin-Komplex. Aus dem zweidimensionalen Muster wird in zwei Schritten eine dreidimensionale Struktur gefaltet, wobei das Substrat als isolierende Zwischenschicht dient. Die Packungsdichte beträgt 190 Thermoopaare pro  $cm^2$ . Die Dicke des Bauteils – und damit sein thermischer Widerstand – lassen sich durch das Falten an die Anwendung anpassen.

Bei 30 K Temperaturdifferenz erreicht der Stapel eine Leistungsdichte von  $47,8 \mu W/cm^2$ . Er konnte einen Wettersensor mit Bluetooth-Verbindung ausreichend mit Energie versorgen, um die Daten für Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchte auf einem Smartphone zu empfangen.

Beim zweiten Ansatz erzeugt das Team stereolithografisch dreidimensionale Strukturen, auf die es die druckbaren TEG-Materialien aufträgt. Für die eine Seite des Thermoelements kam eine thermoelektrische Tinte auf  $Ag_2Se$ -Basis zum Einsatz, für die andere PEDOT. Das Team charakterisierte drei TEG-Bauformen für Temperaturunterschiede von 10 bis 70 K. Die elektrische Leistungsabgabe lag bei einigen Mikrowatt, die Ausgangsspannungen bei einigen Millivolt.

## Schlanke Optik

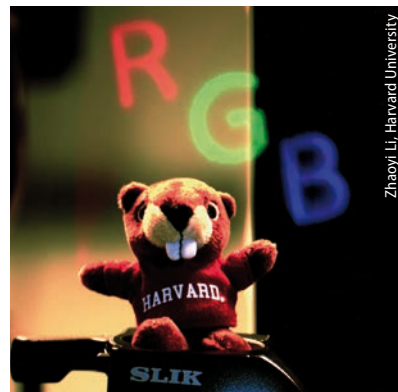
Metalinsen machen Virtual-Reality-Systeme leichter und kleiner.

Trotz großer Fortschritte sind die Geräte für Virtual und Augmented Reality aufgrund der Optiken noch immer klobig. Denn die Korrektur der Abbildungsfehler erfordert mehrere brechende Linsen – oder beugende Fresnel-Linsen. Metalinsen wären eine Alternative, sind bislang aber zu klein. Nun hat ein Team der Harvard University, der Boston University, der National University of Singapore und des Korea Institute of Science and Technology eine Metalinse entwickelt, die größer und für die Hauptfarben R, G, B achromatisch ist.<sup>4)</sup>

Die Metalinse erlaubt es, Phasenprofil, Dispersion in verschiedenen Zonen und Phasendiskontinuitäten an den Zonenübergängen unabhängig voneinander zu optimieren. Eine der Metalinsen hat einen Durchmesser von 2 mm und eine numerische Apertur von 0,7. Mittels Rippen aus  $TiO_2$  in unterschiedlichen Querschnittsgeometrien war die Linse in 681 Zonen aufgeteilt, die zwischen 470 und 670 nm achromatisch sind. Die Zonenübergänge sind so optimiert, dass der Fokus bei den Wellenlängen 488, 532 und 658 nm übereinstimmt.

Die Abbildungsleistung zeigte sich bei einer augennahen Display, bei dem Bildhelligkeit, Dynamik und Farbwiedergabe erstaunlich gut sind. Die Metalinse hat bislang nur ein Gesichtsfeld von unter  $10^\circ$ , weil sonst Abbildungsfehler wie Koma oder Bildfeldwölbung zu stark werden.

Michael Vogel



Demonstration der Metalinse: virtuelle Buchstaben über einer realen Szene



PASSION. PRECISION. PURITY.



## RELIABLE UNDER ALL CONDITIONS.

Heading into the unknown to open new horizons demands reliable tools. Help turn your research goals into reality. Vacuum valve solutions and bellows from VAT provide unfailing reliability and enhanced process safety – under all conditions.

