

Das Prinzip des robusten und empfindlichen Feuchtigkeitssensors ist von der Kamelnase inspiriert worden.

Sensor à la Kamelnase

Ein poröses Polymernetzwerk mit Zwitterionen ermöglicht eine Feuchtemessung.

Feuchtigkeitssensoren spielen für Anwendungen in der Industrie, Medizin und Geologie eine wichtige Rolle. Sie beruhen auf verschiedenen Detektionsprinzipien, wie Widerstandsmessungen oder kalorimetrischen Verfahren, mit unterschiedlichen Stärken und Schwächen. Ein chinesisches Team hat nun einen Feuchtigkeitssensor mit zahlreichen Vorteilen vorgestellt: hohe Sensitivität, Trennschärfe, exzellente Haltbarkeit und sehr kurze Ansprechzeit.¹⁾ An der Entwicklung waren die Chinesische Akademie der Wissenschaften, das Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China, Fuzhou, und mehrere Universitäten beteiligt.

Als Vorbild diente die Nase des Kamels, die durchströmender Luft die Feuchtigkeit entzieht. Zudem können Kamele in der Wüste den Weg zu Wasserstellen und Vegetation erschnüffeln. Entscheidend dafür sind die große Oberfläche der Naseninnenseite und ein hygroscopisch wirkender Schleim, der sie bedeckt. Das Team hat ein poröses Polymernetzwerk hergestellt und darin Zwitterionen eingelagert – Moleküle, die entgegengesetzt geladene funktionelle Gruppen besitzen. Das Polymernetzwerk sorgt für eine große Oberfläche; die Zwitterionen übernehmen die Wirkung des Schleims. Die Signalmessung erfolgt kapazitiv.

Der Sensor überstand unbeschadet mechanische Belastungen, Tem-

peraturen zwischen -20 und $+60$ °C, langes intensives Sonnenlicht und die Einwirkung von Lösungsmitteln. Die hohe Bindungsenergie zwischen Wasser und Zwitterionen führt zu einem synapsenähnlichen Verhalten: Zum Beispiel fällt bei zweimaligem Stimulus das Antwortsignal stärker aus.

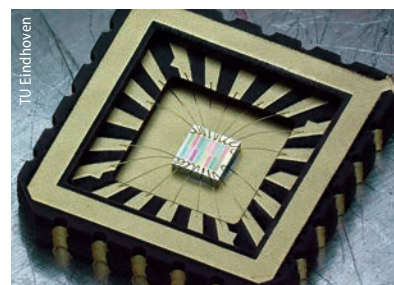
Der Sensor wurde umfassend analysiert und verschiedenen Messungen unterzogen. Dazu gehören die Feuchtebestimmung in Abgasen, auf der Haut und in Anwesenheit störender Dämpfe sowie die Richtungsbestimmung einer Wasserquelle und der Einsatz als Mensch-Maschine-Schnittstelle.

Weniger bringt mehr

Ein vereinfachtes System erleichtert die Miniaturisierung und Chip-Integration.

Das Nahinfrarot wird ausgiebig für die spektroskopische Analyse organischer Materialien genutzt. Dabei rekonstruieren alle Spektrometer erst nach den Messungen die Spektren. Viele Systeme sind unhandlich und keinesfalls chip-integriert. Forschende der TU Eindhoven haben daher einen reduktionistischen Ansatz verfolgt, bei dem ein integriertes Spektrometer auf die Rekonstruktion der Spektren verzichtet und die gemessenen Fotoströme unmittelbar analysiert.²⁾ Denn viele Anwendungen erfordern kein hochaufgelöstes Spektrum.

Der Demonstrator besteht aus einem Array aus 16 Kavitäten. Die Pixel enthalten eine dünne absorbierende Schicht im Inneren unterschiedlicher Fabry-Pérot-Kavitäten. So hängt die Quantenausbeute jedes Pixels stark von der einfallenden



Die Fotoströme der 16 Kavitäten des Sensors (Mitte) lassen sich gleichzeitig elektronisch auslesen.

Wellenlänge ab. Die aktiven Flächen, pin-Dioden aus Indiumphosphid, sind $150 \times 750 \mu\text{m}^2$ groß. Die absorbierenden Schichten bestehen aus Indiumgalliumarsenid. Das Spektrometer lässt sich mit den Methoden der Halbleiterindustrie herstellen.

Die spektralen Empfindlichkeiten der Pixel müssen an die Messaufgabe angepasst sein. Beim Demonstrator decken sie Wellenlängen zwischen 850 und 1700 nm ab. Das Team hat ein Klassifikationsmodell entwickelt, das die Fotoströme der Pixel direkt in chemometrische Daten umwandelt. Den Fettgehalt von Milch bestimmt das chipbasierte Spektrometer mit vergleichbarer Prognosegenauigkeit wie ein kommerziell erhältliches Minispektrometer. Außerdem gelang es, unterschiedliche Kunststoffe zu erkennen.

Eine Ausgründung will den Ansatz kommerzialisieren. Naheliegende Anwendungen finden sich in Landwirtschaft, Medizin- und Labortechnik. Perspektivisch wäre auch ein Einsatz in Smartphones vorstellbar.

Zoomen mit Spannung

Eine einfach herstellbare Flüssiglins kann ihre Brennweite verdoppeln.

Flüssigkeitslinsen erregen seit einiger Zeit das Interesse der Forschung. Wellenleiter, bildgebende Systeme, mobile Elektronik und Endoskope liefern potenzielle Einsatzfelder. Kommerziell erhältliche Linsen beruhen meist auf der Elektrobenetzung. Dabei verändert ein elektrisches Feld die Oberflächenspannung einer geringen Flüssigkeitsmenge, sodass sich ein neuer Kontaktwinkel einstellt. Das variiert die Linsenkrümmung und damit die Brennweite. Ein Team der chinesischen Hefei University of Technology hat nun ein anderes Material und Prinzip für die Herstellung einer Flüssiglins vorgestellt.³⁾

Zum Einsatz kam Dibutyladipat (DBA), ein Ester, der zum Beispiel in PVC als Weichmacher oder in Kosmetika vorkommt. Die plankonvexe Linse besteht aus einer ringförmigen Frontelektrode aus Kupfer, dem flüssigen DBA, einer Polymerfolie und



Bei der Aufnahmeserie mit der Flüssiglense war das Motiv für eine Brennweite von 7,5 mm (links) richtig positioniert, für 13 mm (rechts) nicht mehr.

einem mit Indiumzinnoxid beschichteten Glasträger als rückwärtiger Elektrode.

Liegt eine Spannung an, wandern die polarisierten DBA-Moleküle zur Anode und sammeln sich dort an der Oberfläche. Das verformt den Flüssigkeitskörper – und die Brennweite der Linse ändert sich. Das Team erstellte eine Linse mit 1 mm Durchmesser und 7,5 mm Brennweite. Stieg die Spannung von 0 auf 100 V, erreichte die Linse eine Brennweite von 13 mm. Die Transmission liegt zwischen 390 und 780 nm bei 95 Prozent; temperaturstabil war die DBA-Flüssigkeit von 20 bis 100 °C. Die Auflösung der Linse erreichte 28,5 Linienpaare/mm.

Verglichen mit Elektrobenetzungs-Linsen kommt es nicht zu Flüssigkeitsverlusten oder Mikrobläschen, und die DBA-Linse lässt sich einfacher herstellen. Das Zoomen dauert mehrere zehn Sekunden und ist daher ebenso wenig konkurrenzfähig wie die hohe Arbeitsspannung.

Bessere Terahertz-Laser

Ein geeignetes Verstärkungsmedium sorgt für eine engmaschige Abdeckung zwischen 0,25 und 1,3 THz.

Frequenzen zwischen 0,3 und 3 THz ermöglichen viele neue technische Anwendungen, etwa bei bildgebenden Verfahren, in der Kommunikation oder in der Sicherheit. Trotz jahrzehntelanger Forschung existieren bislang nur wenige praktisch nutzbare Terahertz-Strahlungsquellen. Entweder ist es schwierig, Frequenzen oberhalb von einem THz zu erreichen, oder

die Geräte sind sperrig und schwer. Manches Verfahren erzeugt breite Linien bei geringer Ausgabeleistung, oder der kontinuierliche Betrieb erfordert eine kryogene Kühlung.

Forschende der Harvard University, der Duke University in Durham, des DEVCOM Army Research Laboratory in Houston und der kalifornischen Firma DRS Daylight Solutions haben jetzt einen kompakten kontinuierlichen THz-Laser demonstriert, der zwischen 0,25 und 1,3 THz 120 Frequenzen erzeugt.⁴⁾ Dazu pumpt ein Quantenkaskadenlaser, der viel kompakter ist als ein Gaslaser für das mittlere Infrarot, die THz-Strahlungsquelle. Bislang gelangen damit nur Demonstratoren, die entweder eine geringe Ausgabeleistung hatten, nur einen sehr beschränkten Frequenzbereich abdecken oder nur wenige Laserlinien erzeugten.

Entscheidend für das vorliegende Laserkonzept war ein neues Verstärkungsmedium: Methylfluorid. Die 120 erzeugten Laserlinien entsprechen knapp 40 Prozent aller theoretisch möglichen Übergänge. Die erzielte Ausgabeleistung lag bei allen Linien mindestens zehnmals so hoch wie bei Stickstoffoxid, dem bislang üblichen Verstärkungsmedium. Der neue Ansatz sollte kompakte THz-Laser mit deutlich höherer Leistung ermöglichen, die keine Kühlung erfordern.

Michael Vogel

1) C. Li et al., ACS Nano **16**, 1511 (2021)
 2) K. D. Hakkel et al., Nat. Commun. **13**, 103 (2022)
 3) M. Xu et al., Opt. Lett. **47**, 509 (2022)
 4) A. Amirzhan et al., APL Photonics **7**, 016107 (2022)

quantum approved.



Laser Rack Systems

Quantum Technology meets Industry Standards

Our lasers do not need an optical table! The T-RACK is the perfect home for TOPTICA's high-end tunable diode lasers and frequency combs in a modular 19" form factor. Pick yours!

- Tunable Diode Laser Systems
- Frequency Comb Systems
- Wavelength Meters
- Locking Electronics
- 330 .. 1770 nm



www.toptica.com/T-RACK