

■ Für Obst und Gemüse

Ein Anemometer erfasst Strömungsgeschwindigkeiten in porösen Medien mit minimalen Beeinträchtigungen.

Landwirtschaftliche Erzeugnisse wie Äpfel, Zwiebeln, Kartoffeln oder Orangen lagern häufig für mehrere Monate in Kühllagern in Großkisten oder als Schüttung. Da-



Der neu entwickelte Strömungssensor passt perfekt zwischen gelagerte Äpfel.

mit ihre Qualität nicht leidet, werden Temperatur, Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit und Atmosphäre über eine Luftströmung geregelt. Sind Geschwindigkeit und Gleichmäßigkeit des Luftstroms falsch gewählt, steigen die Lagerverluste und der elektrische Energieverbrauch. Optimale Kühllagerkonzepte erfordern daher eine Überprüfung mit Luftströmungsmodellen. Jede Simulation ist jedoch auf experimentelle Daten zum Validieren angewiesen, die sich bei porösen Medien wie Äpfeln in Kisten nur schwer gewinnen lassen: Eine Strömung in einer Kiste oder einem Stapel mit einem gängigen Anemometer kontinuierlich zu messen, ist kaum möglich. Ein Konsortium aus drei Forschungseinrichtungen und fünf Industriepartnern hat nun unter Führung des Potsdamer Leibniz-Instituts für Agrartechnik und Bioökonomie einen neuartigen Sensor entwickelt.¹⁾

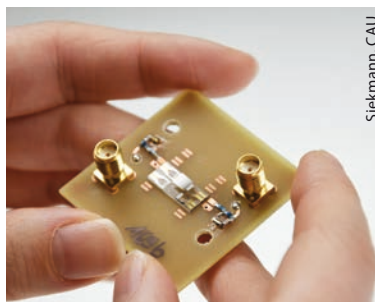
Dieser besteht aus vier transparenten Kunststoffkugeln mit 80 mm Durchmesser, die pyramidenförmig – also dichtest gepackt – miteinander verbunden sind. In ihrer Mitte befindet sich eine Diode; in den Lücken zwischen jeweils zwei Kugeln sind insgesamt vier weitere, in Reihe geschaltete Referenzdioden.

Die Hohlkugeln bieten genug Platz für Elektronik und Akkus; Daten lassen sich bis zu 28 Stunden lang autark erfassen. Der Sensor misst kalorimetrisch. Das Prinzip beruht auf der Abkühlung der elektrisch erwärmten zentralen Diode durch die Luftströmung. Die vier Referenzdioden erfassen die Temperaturdifferenz zwischen Diode und Umgebung. Der kalibrierte Sensor misst Strömungen ungerichtet in einem Bereich von 0 bis 1,5 m/s, wie Versuche im Labor und in einem Obstlager gezeigt haben.

■ Für Herz und Hirn

Ein magnetostriktiver Sensor misst biomagnetische Signale bei Raumtemperatur.

Magnetfeldsensoren spielen derzeit in Kardiologie und Neurologie keine große Rolle. Dabei hätten sie einige Vorteile gegenüber elektrischen Sensoren. So erfordern sie keinen Hautkontakt, was bei Notfall- oder Langzeit-EKG praktisch wäre. Zudem variiert die elektrische Leitfähigkeit an verschiedenen Körperstellen, während magnetische Signale davon weitgehend unbeeinträchtigt bleiben. Herz- und Hirnströme erzeugen allerdings nur sehr schwache Magnetfelder, sodass ihre Messung entsprechend aufwändig ist. Zwar existieren bereits empfindliche Sensoren, allerdings müssen sie auf -197 °C gekühlt werden. Wissenschaftler der Universität Kiel haben nun im Labormaßstab einen Sensor entwickelt, der als Ausgangsbasis für künftige medizinisch einsetzbare Magnetfeldmessungen dienen kann.²⁾



Oberflächenwellensensoren sollen langfristig empfindlich genug werden, um biomagnetische Felder zu detektieren.

Der Sensor arbeitet bei Raumtemperatur und weist ein sehr geringes magnetisches Rauschen auf (etwa $100\text{ pT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$). Seine Bandbreite beträgt 50 kHz, sein dynamischer Bereich 120 dB. Die Forscher stellten den Sensor mittels Dünnschichttechnik, Lithografie und Ätzverfahren her. Als eigentliches Sensorelement dient eine magnetostriktive dünne Schicht aus amorphem FeCoSiB. Bei dieser Art von Material hängen Magnetisierung und Elastizität miteinander zusammen: In Anwesenheit eines Magnetfelds sinkt das Elastizitätsmodul, das Material wird also weicher. Diese Veränderung lässt sich mithilfe von Schallwellen detektieren, die über die Oberfläche der dünnen Schicht laufen. Die Wellen langsamen sich, wenn ein Magnetfeld auftritt. Aus der Geschwindigkeitsänderung ergibt sich also die Magnetfeldstärke. Langfristiges Ziel ist es, Magnetfeldstärken auf Piko- bis Femtotesla zu messen.

■ Für Mensch und Maschine

Ein intrinsisch dehnbare Transistor-Array weist beachtliche Eigenschaften auf.

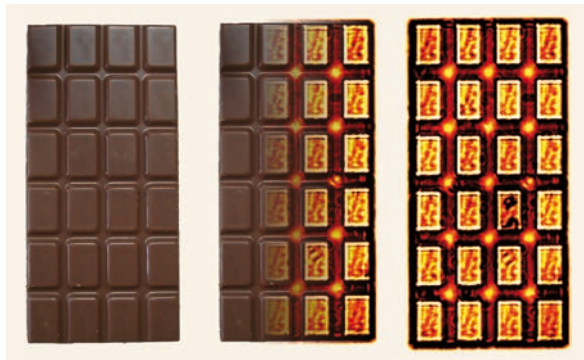
Elektronik, die sich nahtlos auf die menschliche Haut aufbringen lässt, ist für viele Anwendungen von Interesse: für medizinische Überwachung und Implantate, für biologische Untersuchungen sowie für Mensch-Maschine-Schnittstellen und Soft Robotics. Kein Wunder, dass in den vergangenen Jahren in vielen Labors entsprechende Demonstratoren entstanden sind. Wissenschaftler der US-amerikanischen Stanford University haben nun unter Mitarbeit einer südkoreanischen Universität und einem Forschungsinstitut von Samsung eine elektronische Haut mit erstaunlichen Eigenschaften entwickelt.³⁾ Sie ist intrinsisch elastisch, lässt sich mit einem skalierbaren Verfahren herstellen und weist unerreichte Dichten von 347 Transistoren pro Quadratzentimeter auf.

Um eine intrinsische Dehnbarkeit bei gleichzeitig guten

1) M. Geyer et al., *Sensors* **18**, 576 (2018)

2) A. Kittmann et al., *Sci. Rep.* (2018), doi:10.1038/s41598-017-18441-4

3) S. Wang et al., *Nature* (2018), doi: 10.1038/nature25494



Enthält eine Schokoladentafel Verunreinigungen? War sie bereits geschmolzen? Solche Fragen kann ein Millimeterwellensensorsystem beantworten.

elektrischen Eigenschaften zu erreichen, dienen Polymere als Materialbasis. Das mehrstufige Herstellungsverfahren der Transistoren, das die Wissenschaftler als Technologieplattform verstanden haben wollen, beruht im Kern auf Rotationsbeschichtung und Fotolithografie. Damit war es möglich, ein Array aus 6300 Transistoren auf einer $4,4 \times 4,4 \text{ cm}^2$ großen Fläche zu fertigen. Die Transistoren erreichen bei geringer Streuung eine Ladungsträgermobilität von etwa $0,8 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, was im Bereich der Ladungsträgermobilität von amorphem Silizium liegt. Die Betriebsspannung der Transistoren betrug 10 V. Beim Schalten zeigen sie keine Hysterese, ein An/Aus-Stromverhältnis von 10^4 und minimale Gate-Verluste. Nach tausend Dehnungen des Arrays um jeweils 100 Prozent hatte sich die Ladungsträgermobilität höchstens um eine Größenordnung verschlechtert.

Zur Demonstration ihrer Technologie haben die Forscher mehrere elektronische Anwendungen realisiert: eine Backplane für eine Anordnung aus hundert taktilen Sensoren, einen Wandler und einen Verstärker mit Pulssensor.

■ Für Tiefkühl- und Trockenware

Ein Millimeterwellensensorsystem inspiziert verpackte Lebensmittel.

Zur Qualitätssicherung am fertigen Produkt kommen in der Lebensmittelindustrie Röntgensysteme und Hyperspektralkameras zum Einsatz. Beide haben Nachteile. So lassen sich durch Röntgen zum Beispiel keine Fremdeinschlüsse aus Materialien niedriger Ordnungszahl erkennen, etwa Kunststoffe

oder gewisse Gläser, weil der Kontrast zum Lebensmittel zu gering ist. Mit Hyperspektralkameras bleibt die Analyse auf oberflächennahe Bereiche beschränkt. Forscher zweier Fraunhofer-Institute haben daher ein Millimeterwellensensorsystem entwickelt, das sich für die Qualitätskontrolle von getrockneten und gefrorenen Lebensmitteln eignet, auch wenn sie verpackt sind. Das System erkennt Schwankungen in Homogenität und Restfeuchte, Fremdkörper aus Materialien niedriger Ordnungszahl sowie Oberflächentexturen. Die Hardware wurde am Fraunhofer-Institut für Hochfrequenztechnik und Radartechnik FHR in Wachtberg entwickelt, die automatische Bildauswertung am Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB in Karlsruhe.

Der Demonstrator arbeitet bei 90 GHz. Eine rotierende Antenne bestrahlt einen 20 cm breiten Bereich. Gegenüberliegend befindet sich die Empfangsantenne. Aus der Differenz zwischen Send- und Empfangssignal leiten sich Dämpfung und Phasenverschiebung ab. Zusammen mit der Ortsinformation lässt sich daraus per Algorithmus ein Millimeterwellenbild erstellen. Für höhere Scanraten würde man die Einzelantenne durch ein Array ersetzen. Die Arbeitsfrequenz hat sich aus der zu bewegenden Masse und den Gegebenheiten des Markts ergeben: Je niedriger die Frequenz, desto größer wäre die Antenne; oberhalb von 90 GHz gibt es keine kommerziell erhältlichen Hochfrequenzkomponenten mehr, die ein Gesamtsystem zu vertretbaren Kosten ermöglichen würden.

Michael Vogel