

■ Einblicke in Magen und Darm

Mit einnehmbaren Sensoren lassen sich Gaskonzentrationen im Verdauungstrakt messen.

Mobile Sensoren, die medizinisch relevante Daten am oder im Körper erheben, haben in den vergangenen Jahren die Fantasie der Forscher beflügelt. Während die meisten dieser im Routinebetrieb verfügbaren Sensoren bislang mit Hautkontakt arbeiten, bieten einnehmbare Sensoren einen

zweiten, noch kaum etablierten Ansatz.



Der in Australien entwickelte einnehmbare Sensor steckt in einer versiegelten Polymerhülle.

Kommerziell erhältliche Sensoren dieser Art können bislang nur pH-Wert oder Druck messen, die Freisetzung von Wirkstoffen überwachen oder spezielle tomografische Untersuchungen ermöglichen. Australische Wissenschaftler der RMIT University und der Monash University in Melbourne sowie der Forschungsorganisation CSIRO in Brisbane haben nun einen einnehmbaren Sensor erfolgreich an Menschen erprobt, der die Konzentration verschiedener Gase im Verdauungstrakt bestimmen kann.¹⁾ Diese Gase entstehen vor allem durch endogene chemische Prozesse, Enzyme und Stoffwechselfaktoren.

Der Sensor ist 26 mm lang und besitzt einen Durchmesser von knapp 10 mm. Im Innern der Kapsel befinden sich Gas-Sensoren für Kohlenstoffdioxid, Wasserstoff und Sauerstoff, ein Temperatursensor, ein Mikrocontroller, ein Funk sender und eine Knopfzelle. Es handelt sich entweder um thermische Leitfähigkeits- oder Halbleitersensoren. Mithilfe eines Algorithmus kann man aus den Messdaten Gasprofile ableiten. Die Konzentrationen von H₂ und O₂ lassen sich auf mindestens 0,2 Prozent genau bestimmen, die CO₂-Konzentration auf ein Prozent. Ein Funkempfänger in der Hosentasche des Probanden erfasst die Temperatur und die

Gaskonzentrationen und leitet sie per Bluetooth an ein Smartphone weiter. Den aktuellen Aufenthaltsort der Sensorkapsel überprüfen die Forscher per Ultraschall.

An sechs Probanden konnten sie mit den Sensorkapseln ernährungsabhängige charakteristische Gasprofile organbezogen unterscheiden. Nun suchen sie Geldgeber für eine klinische Studie mit mehr Versuchspersonen.

■ Algorithmus statt Hardware I

Ein 3D-Ultraschallgerät kommt mit nur einem einzigen statt zig tausend Sensoren aus.

Fast alle medizinischen Ultraschallgeräte arbeiten heutzutage mit piezoelektrischen Elementen. Die 3D-Bildgebung ist zwar auch bei Ultraschalluntersuchungen möglich, aber nicht weit verbreitet, denn entsprechende Geräte erfordern eine vierstellige Zahl an Sensoren auf engem Raum sowie hohe Datenraten. Das ist teuer. Verschiedene Arbeitsgruppen haben jedoch inzwischen für optische und Ultraschallsysteme gezeigt, dass komplexe Hardware nicht notwendig ist, wenn man das so genannte Compressive Sensing für die Signalverarbeitung ausnutzt. Der Grundgedanke: In jedem Signal, das nach dem Passieren einer kodierten Maske entsteht, steckt ein Muster, das zur Rekonstruktion des Objektbilds dienen kann – bei vertretbaren Informationseinbußen. Wissenschaftler des Erasmus Medical Center in Rotterdam und der TU Delft haben nun mit diesem Verfahren die 3D-

Ultraschallbildgebung im Labor demonstriert.²⁾

Sie verwendeten nur einen einzigen Transducer, um die Ultraschallsignale aufzunehmen. Vor dem Sensor platzierten sie eine kodierte Maske – eine Scheibe aus Kunststoff, in die sie zufällig verteilte, sich teils überlappende Vertiefungen bohrten, die 0,1 bis 1 mm tief waren. Dies macht die Maske zur ortsabhängigen Verzögerungsstrecke, sodass die Ultraschallwellen nicht mehr in Phase zueinander sind. Vielmehr entsteht ein Interferenzmuster, das auf das zu untersuchende Objekt trifft und reflektiert wird, bevor der Transducer es wieder erfasst. Anschließend kann die Rekonstruktion des 3D-Bilds beginnen.

Noch hat die Laborstudie Nachteile gegenüber 3D-Ultraschall-Arrays. Objekte in Bewegung, etwa ein schlagendes Herz, lassen sich so nicht untersuchen. Auch die Untersuchung mit höheren Harmonischen, um den Bildkontrast zu steigern, ist mangels Fokussierbarkeit der Ultraschallpulse nicht möglich. Treten beim untersuchten Objekt starke Gradienten in Schallgeschwindigkeit oder Dichte auf, führt das zudem zu relativ großen Fehlern bei der Rekonstruktion. Diese Hürden sind aber nicht von prinzipieller Natur. Anwendungen für ihre 3D-Technik sehen die Wissenschaftler etwa bei der Endoskopie, bei welcher der Transducer naturgemäß entsprechend klein sein muss.

■ Algorithmus statt Hardware II

Eine objektivlose Kamera erstellt ein 3D-Bild aus einer einzigen Aufnahme.

Mit Scan-Verfahren oder Mehrfachaufnahmen lassen sich hoch aufgelöste optische 3D-Bilder anfertigen, allerdings geht das zu Lasten der Geschwindigkeit. Dagegen sind 3D-Bilder mit einer einzigen Aufnahme zwar rasch erstellbar, allerdings nur mit geringer Auflösung oder kleinem Gesichtsfeld. Zudem erfordern dreidimensionale



Die drehbare kodierte Maske befindet sich direkt vor dem Transducer.

1) K. Kalantar-Zadeh et al., Nat. Electronics, doi: 10.1038/s41928-017-0004-x

2) P. Kruizinga et al., Sci. Adv. 3, e1701423 (2017)

3) N. Antipa et al., Optica 5, 1 (2018)

4) S. Haghani et al., Optica 4, 1522 (2017)



Beispiel für eine rekonstruierte Aufnahme mit der kalifornischen Kamera, eingeklinkt sind die Rohdaten (rechts unten).

Bilder oft sperrige Hardware und komplizierte Konfigurationen. Insgesamt gibt es also noch genügend Optimierungspotenzial.

Vor diesem Hintergrund haben Wissenschaftler der University of California in Berkeley eine objektivlose Kamera entwickelt, die aus einer einzigen Aufnahme mit 1,3 Megapixel Auflösung ein 3D-Bild mit 100 Megavoxel macht.³⁾ Die Kamera nutzt das Compressive Sensing aus, rekonstruiert das 3D-Bild also aus einem Interferenzmuster des Objektraums, das durch eine kodierte Maske vor dem Bildsensor entsteht. Bei der Maske handelt es sich im Fall der kalifornischen Kamera um eine transparente Folie, die zwar dünn ist, aber eine sanft wechselnde Stärke aufweist. Eine Punktlichtquelle im Objektraum erzeugt dadurch ein Muster auf dem gesamten Bildsensor, das von der lateralen und axialen Position der Punktlichtquelle

abhängt. Hieraus lässt sich die 3D-Information rekonstruieren.

Die Auflösung der Kamera hängt beim Compressive Sensing von der Komplexität des Objekts ab. Grundsätzlich möglich scheinen Anwendungen in der Ferndiagnose, in der mobilen Fotografie und in der Mikroskopie lebender Organismen. Letzteres wird auch die erste Anwendung im Rahmen eines Forschungsprojekts: Da die Kamera leicht ist und ohne Optik auskommt, lässt sie sich am Kopf von präparierten Mäusen befestigen, um die neuronale Aktivität im Gehirn zu erfassen.

■ Gespaltene Persönlichkeit

Dank einer Nanostrukturierung wird Glas zugleich durchlässig und opak.

Der Wirkungsgrad von Solarzellen und Leuchtdioden hängt in ihrer technischen Ausführung auch von der Frage ab, wie viel Licht in die aktive Schicht eingekoppelt beziehungsweise aus der aktiven Schicht ausgekoppelt wird. Forscher der University of Pittsburgh, Pennsylvania, haben daher Quarzglas so nanostrukturiert, dass es die gewünschten Eigenschaften möglichst optimal erfüllt.⁴⁾

Die Strukturen ähneln Grashalmen und haben Durchmesser zwischen 100 und 200 nm. Sie sind einige Mikrometer lang – über die



Verdunstet das Wasser zwischen den Nanostrukturen, wird das Glas opak.

Länge lassen sich die gewünschten optischen Eigenschaften des Glases gezielt einstellen. Die Strukturierung erfolgt mit reaktivem Ionenätzen in einem einstufigen Prozessschritt ohne Maske. Je länger die Ätzdauer, desto höher die Halme. So haben die Forscher bei Licht mit 550 nm Wellenlänge für nanostrukturiertes Quarzglas gleichzeitig eine Durchlässigkeit (nicht zu verwechseln mit der Transparenz für direkten Lichtdurchlass) und Streuung von jeweils mehr als 95 Prozent erreicht. Mit anderen Worten: Das Glas sieht optisch trüb aus, lässt aber trotzdem einen Großteil des einfallenden Lichts durch.

Eher zufällig haben die Forscher im Zuge der Entwicklung entdeckt, dass sich durch eine Flüssigkeit mit vergleichbarem Brechungsindex diese Glaseigenschaften wieder aufheben lassen, weil die Flüssigkeit sich zwischen den Halmen einlagert: Verdunstet die Flüssigkeit, entfalten die Nanostrukturen wieder ihre Wirkung. Im Prinzip lässt sich so also ein schaltbares Fenster verwirklichen.

Michael Vogel