



Bild: Albert Hildm

Nase nachrüstbar

Detektoren für einen künstlichen Geruchssinn als Zusatzmodul

Mit elektronischen Geruchssensoren könnten Smartphones bald frische Milch von saurer unterscheiden oder Wiesenblumen erkennen. Im Labor schnüffeln bereits lernfähige E-Nasen.

Von Arne Grävemeyer

Gerüche sind überall und verraten sehr viel über die Dinge um uns herum, zum Beispiel über Kräuter, über den Reifegrad von Früchten oder den von Käse. Gerüche warnen vor giftigen Lösungsmitteln oder vor einem Zimmerbrand. Aber Gerüche lassen sich bisher nur schwer digitalisieren. Analysen im Massenspektrometer etwa sind aufwendig und teuer und bestimmen erst einmal nur chemische Komponenten. Deren Bedeutung ist dann immer noch extra zu interpretieren.

Ein Team um Professor Christof Wöll am Institut für funktionelle Grenzflächen des Karlsruher Institut für Technologie

(KIT) geht im Labor einen vergleichsweise einfachen und direkten Weg. Es hat als Geruchssensoren sogenannte Quarz-Mikrowaagen entwickelt. Diese bestehen aus Quarzresonatoren, die heute als elektronisches Massenprodukt für wenige Cent verfügbar sind und beispielsweise in Smartphones die genaue Einhaltung von Sende- und Empfangsfrequenzen gewährleisten. Diese Bauteile reagieren sehr empfindlich auf Gewichtsveränderungen an ihrer Oberfläche.

Die Forscher beschichteten die Quarzresonatoren mit porösen Materialien, sogenannten metallorganischen Gerüstver-

bindungen (Metal-Organic Frameworks, MOFs). Moleküle in der vorbeiströmenden Luft können dort eindringen und finden dann in den Gerüststrukturen unterschiedlich starken Halt. Diese MOFs lassen sich chemisch leicht variieren. So entstehen Beschichtungen, die charakteristische Moleküle besonders stark an sich binden, die wiederum für sehr unterschiedliche Gerüche stehen können.

Die Quarzresonatoren dienen damit nun als Mikrowaage. Jeder einzelne nimmt aufgrund seiner individuellen Beschichtung leichter oder schwerer die Moleküle der umgebenden Geruchsstoffe auf. So ändert sich die Resonanzfrequenz dieser Einzelsensoren, jeweils abhängig von der Menge der angelagerten Duftstoffe. Damit lassen sich die Einzelmengen elektronisch bestimmen. Die Mengenverhältnisse aller Sensoren zueinander ergeben ein geruchstypisches Muster, quasi den olfaktorischen Fingerabdruck einer bestimmten Substanz.

KI lernt Gerüche kennen

„In den ersten Experimenten hat es einige Monate gedauert, bis wir statistische Verfahren hatten, die auf der Basis von sechs unterschiedlich beschichteten Quarzresonatoren eine eindeutige Unterscheidung zwischen zwei verschiedenen Gerüchen vornehmen konnten“, berichtet Wöll. Inzwischen haben die Forscher diesen Vorgang durch maschinelles Lernen weitgehend automatisiert. Sie gehen davon aus, dass sie mit einer einfachen künstlichen Intelligenz den Lernvorgang für neue Gerüche bis Jahresende auf wenige Minuten beschleunigen können.

Man kann zusätzlich die Verzögerung betrachten, mit der ein Sensor auf einen Geruch anspricht, und diese Datenkurve in die Charakteristik eines Geruchs mit aufnehmen. Die KIT-Forscher experimentieren auch mit der Analyse dieses zeitlichen Verhaltens. Es ist ihnen aber wichtig, die Komplexität der eingesetzten neuronalen Netze zu beschränken, damit jedes gängige Smartphone mit seinem Prozessor das Training der eingesetzten KI schnell verarbeiten und damit neue Gerüche kennenlernen kann. Zudem soll nach Abschluss der Trainingsphase auch mit einfachen Smartphones eine Analyse von Gerüchen in Echtzeit möglich sein.

Das funktioniert inzwischen auch ganz praktisch: Für den botanischen Garten am KIT haben die Forscher eine elek-

Ein künstlicher Geruchssinn mit zwölf Einzelsensoren und KI-Unterstützung konnte im Labor sechs Minzarten sicher unterscheiden.

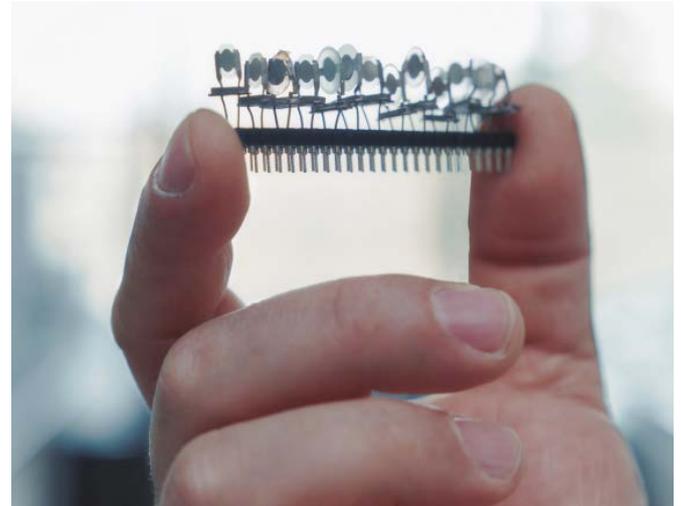


Bild: Andreas Bramstepe / KIT

tronische Nase mit zwölf Quarzresonatoren gebaut, die jeweils ihre spezielle MOF-Beschichtung haben. Nach dem Training der KI ließen sich damit sechs Minzarten in Tees mit 95-prozentiger Sicherheit voneinander unterscheiden, etwa Pfefferminze, Katzenminze oder Pfefferminze. Ebenso unterschied der Sensor sicher verschiedene Basilikumarten. Die künstliche Nase könnte auf diese Weise beispielsweise die Qualitätssicherung beim Einkauf von Lebensmitteln oder in der Industrie unterstützen.

CO₂ macht die Nase frei

Nach jeder Duftbestimmung spülen die Forscher ihre E-Nase etwa eine halbe Stun-

de mit Kohlendioxid, um die Sensoren wieder zu regenerieren. Bei der Suche nach weiteren MOF-Materialien steht daher die Entwicklung neuer Beschichtungen und damit neuer Sensortypen im Vordergrund, die vor allem schneller regenerieren.

Ganz generell geht Wöll davon aus, dass sich flüchtige organische Verbindungen (Volatile Organic Compounds, VOCs) umso sicherer identifizieren lassen, je mehr unterschiedliche Sensoren beteiligt sind und je tiefer das eingesetzte neuronale Netz ist. Die beschichteten Quarzresonatoren haben etwa den Durchmesser von Erbsen. Für ein mobiles, Smartphone-taugliches Zusatzgerät rechnet Wöll mit

Das Entwickler-Kit Smell Inspector ist mit vier Chips à 16 Geruchssensoren ausgestattet. Das können je nach Anwendung bis zu 64 unterschiedliche CNT-Sensoren für Gasmoleküle sein.

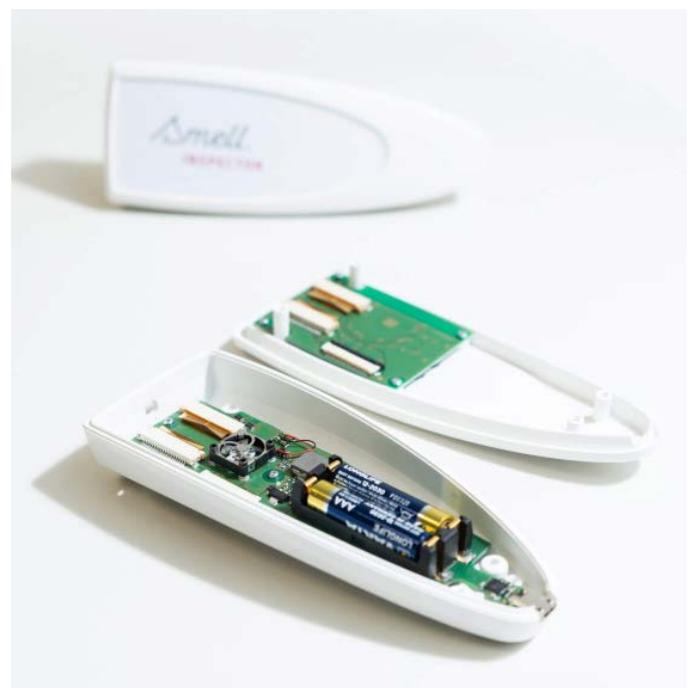


Bild: SmartNanotubes

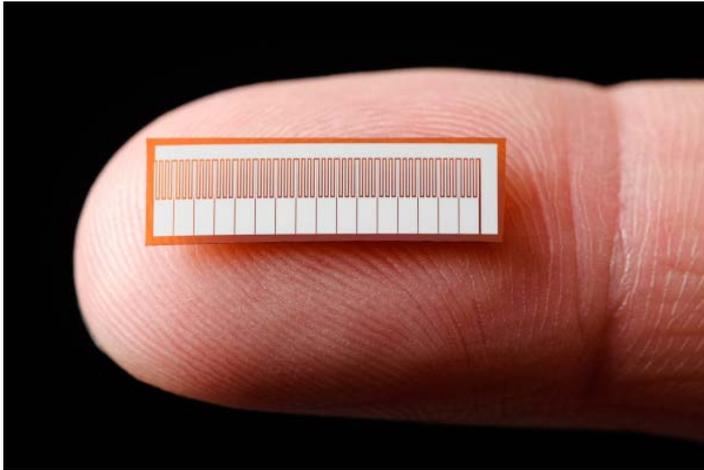


Bild: SmartNanotubes

Der Riech-Chip Smell iX16 enthält ein Sensorelement mit 16 geruchsempfindlichen Kohlenstoffnanoröhren.

etwa sechs bis sieben Einzelsensoren. In einigen Monaten bis zu einem Jahr ließe sich ein solches aufsteckbares Modul entwickeln und auf den Markt bringen.

Zudem wäre es in der Zukunft möglich, die Parameter einer trainierten KI für den Download anzubieten. Der Anwender müsste dann seine elektronische Nase nicht unbedingt selbst trainieren, sondern er könnte beispielsweise die Parameter eines trainierten neuronalen Netzes zur Unterscheidung von Kräutertees, Kaffeesorten oder Wildblumen von einer zentralen Bibliothek herunterladen.

Vor allem wegen der geringen Preise von Quarzsensoren ist Wöll zuversichtlich, dass die riechfähigen Module auch für den Einsatz in diversen Haushaltsgeräten geeignet sein können. Damit könnte künftig zum Beispiel ein Kühlschrank früh warnen, wenn im Gemüsefach faulige Gerüche entstehen.

Chip mit 16 Riechsensoren

Einen anderen Ansatz verfolgt das Start-up SmartNanotubes Technologies aus Freital, eine Ausgründung ehemaliger Forscher der TU Dresden. Ihre Geruchssensoren basieren auf Kohlenstoffnanoröhren (Carbon Nanotubes, CNT), deren wabenartigen molekularen Aufbau sie mit Fremdatomen gezielt variieren. Die Moleküle gasförmiger Duftstoffe lagern sich dann unterschiedlich stark an diesen CNT an, womit sich deren elektrischer Widerstand messbar verändert. 16 derartige Gasdetektoren umfasst ein sogenannter Smell-iX16-Chip aus der Freitaler Produktion.

Der iX16-Chip tastet alle 0,4 Sekunden seine CNT-Sensoren ab und gibt

die Matrix der elektrischen Widerstände aus. Eine spezielle Reinigung oder Spülung des Sensorchips zwischen zwei Riechvorgängen ist laut Hersteller nicht notwendig.

Ähnlich wie beim Ansatz am KIT erfordert auch dieses System den Einsatz einer KI, um Gerüche mit dem Gesamteindruck der unterschiedlichen Widerstände auf den CNT zu verknüpfen und zu erlernen. „Das ganze System ist in gewisser Weise ähnlich dem Riechvorgang in der menschlichen Nase“, erklärt Dr. Viktor Bezugly, CEO und CTO von SmartNanotubes. Zwar gibt es beim Menschen etwa zehn Millionen Riechzellen und darunter 200 bis 400 unter-

schiedliche Typen, aber auch diese Typen sind nicht chemisch auf einzelne charakteristische Moleküle ausgerichtet. Stattdessen spricht jede Riechzelle unterschiedlich intensiv auf vielerlei gasförmige Stoffe an. Das menschliche Gehirn muss dann in einer Lernphase jeden Geruch erst einmal mit den differierenden Eindrücken aller Riechzellen in Verbindung setzen. Ohne dieses Training ist auch ein Mensch nicht in der Lage, Gerüche zu erkennen.

Schnüffelroboter als Krisenhelfer

Eine Vorversion der CNT-Riechsensoren hat bereits ab 2019 Aufmerksamkeit erregt, nämlich als Bestandteil des sogenannten Sniff-Bot-Projektes an der TU Dresden. Die Sniff-Bots sollen in Zukunft als ferngesteuerte Roboter in gefährlichen Umgebungen giftige Gase erschnüffeln. Ihr Geruchssinn ermöglicht es, sie bis an die Quelle ausströmender Gase zu steuern, um dort beispielsweise ein Leck direkt zu versiegeln. Die Gassensorik zur Erkennung von giftigen Gasen und VOCs ist damit eine zentrale Aufgabe dieser neuartigen Krisenhelfer. Zudem sollen sie in Schwärmen kooperieren können, was einen Vorteil bietet, wenn man nach der größten VOC-Konzentration in einem Raum sucht.

Inzwischen hat SmartNanotubes seine Sensortechnik weiterentwickelt.

KIT-Vorläufer mit Nanofasern

Bereits 2019 haben KIT-Forscher (Karlsruher Institut für Technologie) gemeinsam mit dem Unternehmen Smelldect auf der Hannover Messe einen Sensorchip einer elektronischen Nase vorgestellt. Das Team um Dr. Martin Sommer am Institut für Mikrostrukturtechnik hatte den Chip mit 16 Nanofasern aus Zinndioxid als Einzelsensoren entwickelt. Wie beim Smell Inspector aus Dresden rufen Moleküle gasförmiger Stoffe an den Nanodrähten unterschiedliche Änderungen des elektrischen Widerstands hervor. So lässt sich ein geruchstypisches Signalmuster der 16 Einzelsensoren erkennen und mit den Mustern anderer Gerüche vergleichen. Allerdings arbeitet diese elektronische Nase bisher nicht mit künstlicher Intelligenz.



Bild: Smelldect

Eine E-Nase als Modul für den industriellen Einsatz besteht aus einem Sensorchip, Elektronik und Lüftung.

Die Forscher suchen zum Beispiel fortlaufend nach neuen CNT-Sensoren, die möglichst unterschiedlich auf VOCs ansprechen und sich in ihrem Verhalten von bisherigen Sensoren deutlich unterscheiden. Trotz prinzipieller Ähnlichkeiten zu dem Riechvorgang in der menschlichen Nase sind bisher qualitative Unterschiede geblieben. Manche Gerüche können die künstlichen Geruchssensoren besser aufspüren, aber gerade wenn es um feine Unterschiede bei den Gerüchen von Lebensmitteln geht, liegt noch die menschliche Nase vorn.

Ein ungelöstes Problem sind überlagerte Gerüche, also das Zusammenkommen unterschiedlicher VOCs. Da die KI einen Geruch als eine mehrdimensionale Matrix aus den elektrischen Widerständen einer Vielzahl von CNT-Sensoren interpretiert, ergibt eine Geruchsmischung für sie einen ganz neuen Geruch. Die Aufspaltung der Sensorergebnisse in Einzelbestandteile gelingt mit diesem technischen Ansatz nicht. Wenn sich also deutliche Geruchsüberlagerungen nicht vermeiden lassen, kann dieses Verhalten die Zahl der KI-Klassifizierungen aufblähen.

Zwar hat man sich mit dem iX16-Chip auf ein bestimmtes Design in der Produktion festgelegt, aber die dort eingesetzten CNTs lassen sich je nach Anwendungsfall auswählen und gezielt aufbringen. Bezugly weist aber darauf hin, dass es derzeit nicht geplant ist, eine elektronische Nase für alle denkbaren Fälle zu bauen – auch wenn die Natur uns das so vorlebt. Handhabbare, auf eine spezielle Anwendung ausgelegte Detektoren und vor allem eine KI, mit der sich Gerüche in Echtzeit klassifizieren lassen, stehen im Vordergrund.

Das ist auch der Grund, weshalb die Forscher in absehbarer Zeit wohl keine Gesamtdatenbank für sämtliche bisher klassifizierte Gerüche zusammenstellen. Je nach Anwendung werden unterschiedliche Smell-Chips und damit modifizierte CNT-Sensoren zum Einsatz kommen. Und jeder dieser Chips beziehungsweise jedes Device mit seinen spezifischen Sensoren wird auch eine spezifische KI aufbauen. Die Messungen der unterschiedlichen Sensor-Arrays würden selbst bei gleichen Gerüchen ganz unterschiedlich ausfallen.

Entwickler-Kit ab Dezember

Inzwischen hat das Start-up ein Developer-Kit namens Smell Inspector vorge-

Ein ferngesteuerter Sniff-Bot der TU-Dresden ist mit Geruchssensoren auf Basis von Kohlenstoffnanoröhren ausgestattet und soll in gefährlichem Terrain gesundheitsschädliche Gase erschnüffeln.

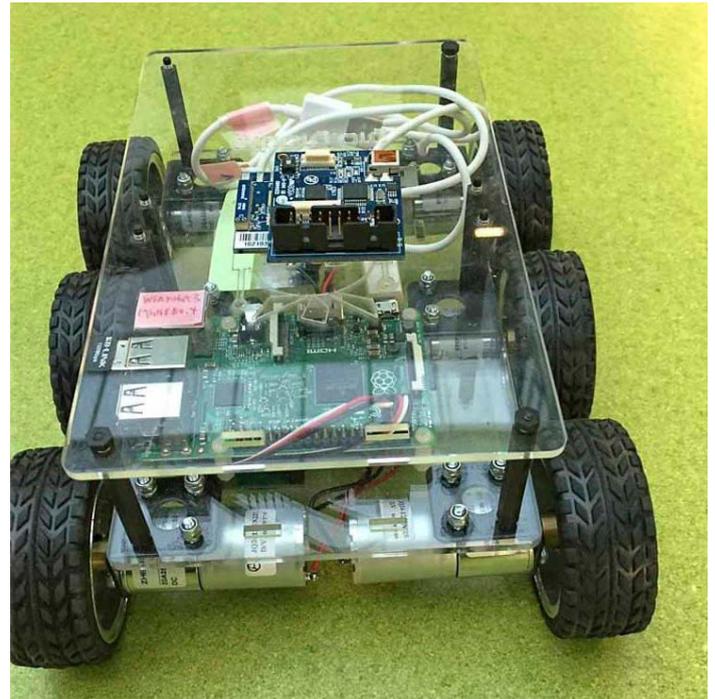


Bild: Wälfenigus Dargie / TU Dresden

stellt. Der daumengroße Apparat soll im Dezember herauskommen. Interessenten können das Kit schon heute auf der Website des Start-ups für 298 Euro vorbestellen. Das Gerät beinhaltet überraschenderweise vier iX16-Chips. Das kann redundante Messungen ermöglichen, es können dort aber auch vier Chips mit modifizierten CNT-Sensoren eingesetzt werden, sodass dann bis zu 64 unterschiedliche Gasdetektoren in einem Smell Inspector auf Moleküljagd gehen.

Zusätzlich hat das Start-up die Software Smell Annotator entwickelt, die das Riechtraining begleitet, eine KI aufbaut und dem Anwender eine Rückmeldung gibt, mit welcher Sicherheit inzwischen die Klassifizierung bestimmter Gerüche gelingt. Derzeit läuft diese Software auf Windows- und Linux-Systemen; Android- und iOS-Versionen hat der Hersteller angekündigt. Der Anwender kann dann seinen Smell Inspector direkt am Laptop anschließen oder ihn per Bluetooth beispielsweise auch mit dem Smartphone verbinden. Gemeinsam mit dem strategischen Partner Turck duotec will Smart-Nanotubes das Entwickler-Kit vermarkten und zudem nach spezialisierten Anwendungsfeldern suchen.

Erste Machbarkeitsstudien hat es bei industriellen Anwendern gegeben, die beispielsweise damit die Kaffeeröstung beobachtet haben. Derartige Studien ließen sich voraussichtlich auf viele weitere Pro-

duktionsprozesse ausweiten, in denen der Maschinenführer eine Nase für den optimalen Umschaltzeitpunkt haben muss. Zudem hoffen die Hersteller, zahlreiche bisher in der Industrie eingesetzte spezialisierte Sensoren etwa für Ammoniak, Schwefelwasserstoff, Wasserstoffperoxid oder Stickstoffdioxid zugleich ersetzen zu können.

Ein Gadget für den Privatgebrauch?

Auch im Haushalt gäbe es viele denkbare Stellen, an denen eine zusätzliche Nase helfen könnte. Sie könnte im Heizungskeller vor giftigen Gasen warnen, in der Dunstabzugshaube Tipps beim Kochen geben oder in der Garage auf ein Ölleck aufmerksam machen. Es käme nur darauf an, ob die Preise für die CNT-Technik in den Riech-Chips mit zunehmender Verbreitung der Technik fallen. Spezialisierte elektronische Nasen in Textilien könnten auf Schweißgeruch hinweisen oder in der Kopfstütze den Fahrer vor einer zu hohen Kohlendioxidkonzentration warnen.

Mit dem Entwickler-Kit wird es eine erste Möglichkeit geben, eine elektronische Nase mit selbst ausgewählten Gerüchen zu trainieren und somit ganz eigene Anwendungen zu finden. Es soll schon Anfragen gegeben haben, ob die E-Nase aus Freital auch bei der Suche nach Trüffeln im Wald helfen kann. (agr@ct.de) **ct**