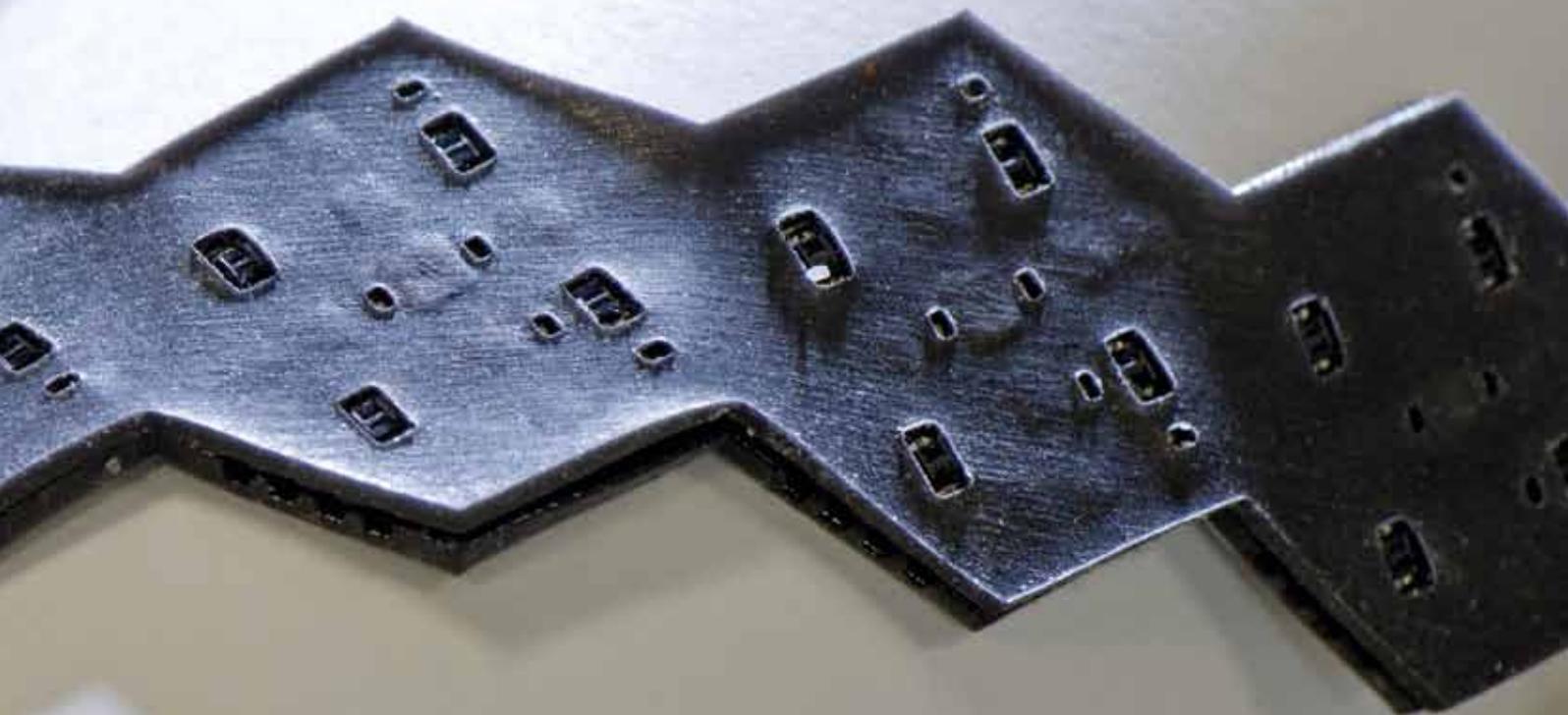


Links

www.ics.ei.tum.de
www.cotesys.org

Dank ihrer Hülle aus Elastomer schmiegen sich die Sensorplättchen wie eine zweite Haut an. Hier testen die Forscher die Biegsamkeit auf einer Papierrolle





Des Roboters neue Haut

Hitze, Vibration oder sanfte Streicheleinheiten werden Roboter bald mit ihrer Oberfläche fühlen können. Forscher des Exzellenzclusters CoTeSys stellen aus sechseckigen Plättchen eine sensible Haut für die Maschinen her. Die wird ihnen nicht nur helfen, sich besser in ihrer Umgebung zurechtzufinden. Sie wird Robotern auch erstmals erlauben, eine Vorstellung von ihrer äußeren Gestalt zu bekommen

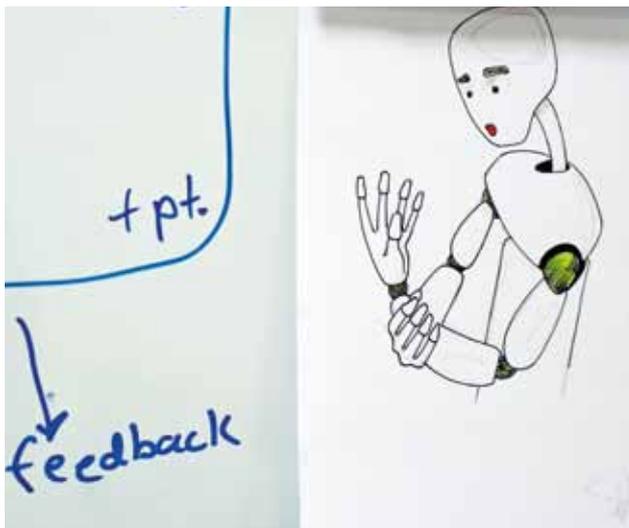
Power on, ein Surren, ein Schwenken, der imposante grüne Roboterarm ruckelt, dreht und verbiegt seine Gelenke mal hierhin, mal dorthin – und schon vorbei. Kurze Stille im großen Labor, dann wirft Philipp Mittendorfer einen prüfenden Blick auf den Monitor: „Na also, hat doch geklappt, alle Segmente richtig zugeordnet“, sagt der Ingenieur am Institute for Cognitive Systems (ICS) der TU München – einem der Projektpartner des Exzellenzclusters CoTeSys (Cognition for Technical Systems). Na schön, denkt der Laie – kennt man aus jeder Produktionsanlage für Automobile, wo solche eisernen Schwenkarme tagein, tagaus schweißen, hämmern oder Schraubchen eindrehen. Und doch trägt der Anschein. Denn während die konventionellen „Kollegen“ auf fest einprogrammierten Bahnen agieren, übt sich Mittendorfers Kunstarm in einer autonomen Lebensweise. Denn die Maschine hat sich gerade selbstständig eine Vorstellung eines kleinen Teils ihrer äußeren Gestalt verschafft. Das sekundenkurze Gezappel diente quasi der Selbstfindung des Roboters. Unverzichtbares Bauteil dafür: Mittendorfer baut den Maschinen nichts Geringeres als eine Haut.

Auf jedem Segment des derzeit achtgliedrigen Roboterarms sitzt dafür mindestens ein ausgetüfteltes Sensorelement, das dem Zentralrechner der Maschine die

lokalen Beschleunigungskräfte meldet, sobald es bewegt wird. Indem die Maschine – das ist ihr noch zuvor programmiert worden – der Reihe nach Segment um Segment dreht und bewegt, kann sie blitzschnell identifizieren, welcher der Sensoren gerade bewegt wird. Dabei hat sie zu Beginn keine Ahnung, wie viele Sensoren sie wo trägt. Beides aber errechnet sie danach blitzschnell selber: Es ist ein Rudiment einer Gestaltwahrnehmung. „Wir wollen schließlich eine Maschine, die selber erkennt, woher sie gerade welche Informationen bekommt, und der wir eben nicht mehr mühsam einprogrammieren müssen – hier sitzt Sensor eins, da Nummer zwei und so fort“, erklärt Mittendorfer. Das Fernziel: der Humanoid – ein Roboter, der sich „kennt“, der ertastet, wo er gerade an einem Gegenstand angestoßen ist und dann auch bitteschön selber dafür sorgt, dass er den geordneten Rückwärtsgang einlegt. So weit ist es noch nicht. Aber Mittendorfers Maschine macht einen Entwicklungssprung in diese Richtung.

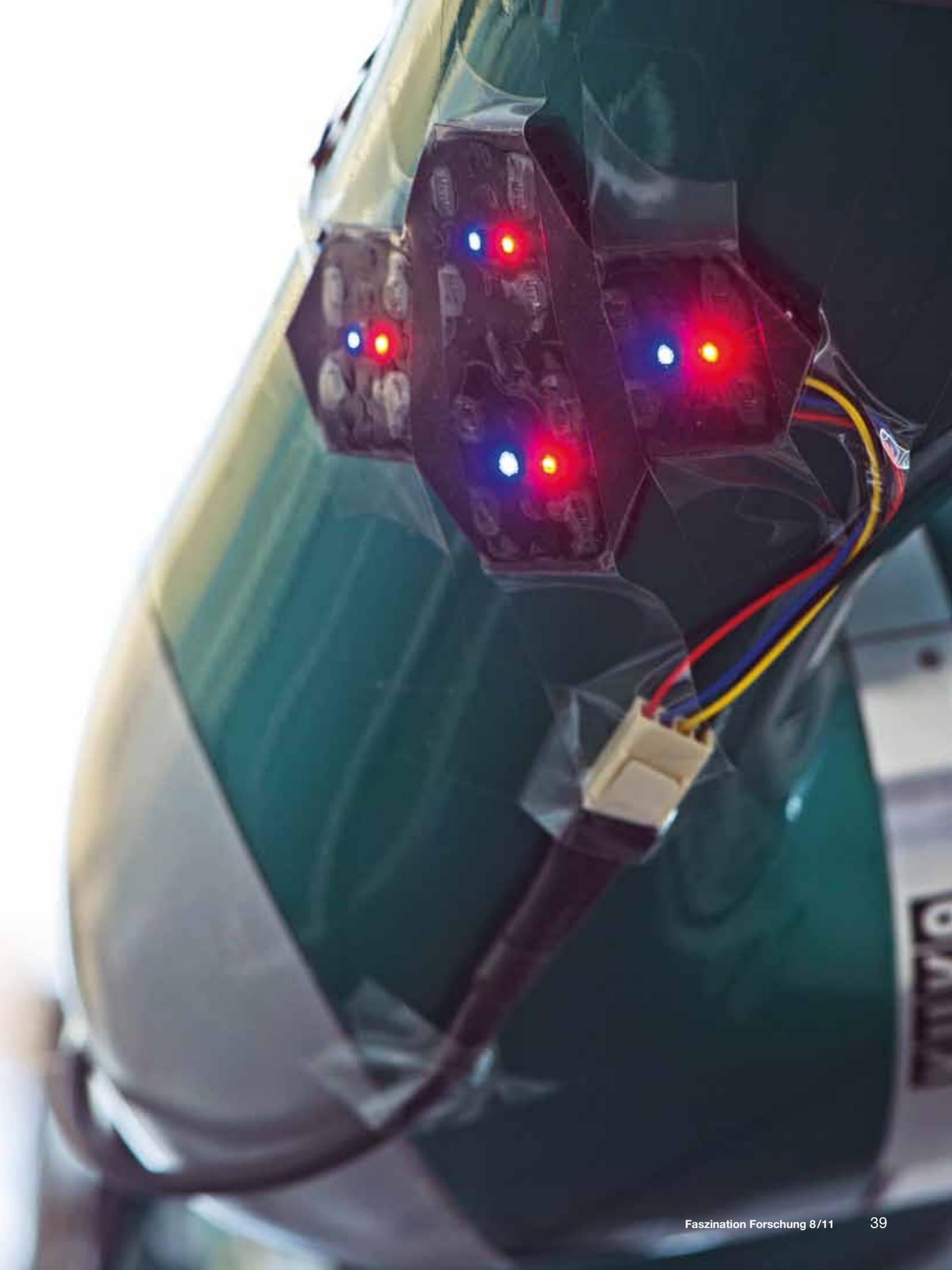
Tastsinn? Fehlanzeige!

Lange Jahre galt bei Robotern eher die Devise: In deren „Haut“ möchte man nicht stecken. In aller Regel, so Mittendorfer, hat die Oberfläche der Maschinen heute so viel Gefühl wie eine Ritterrüstung. Bestenfalls hie und da, vielleicht an der Spitze eines Greifarms oder ▷



Ideensammlung: Auf einem Whiteboard sammeln die Wissenschaftler Ideen und neue Lösungsansätze für ihre Forschung

Auf der gewölbten Segment-Oberfläche des Roboterarms im Versuchslabor haben die Forscher vier Sensormodule angebracht



an dessen Gelenken, platzieren die Entwickler einige Sensoren. Im Rest der stählernen Überzüge herrscht Funkstille. Tastsinn? Fehlanzeige!

Der russische Forscher Vladimir Lumelsky, heute an der University of Wisconsin-Madison in den USA, prägte bereits Anfang der 1990er-Jahre unter dem Begriff „Sensitive Skin“ ein neues Konzept.

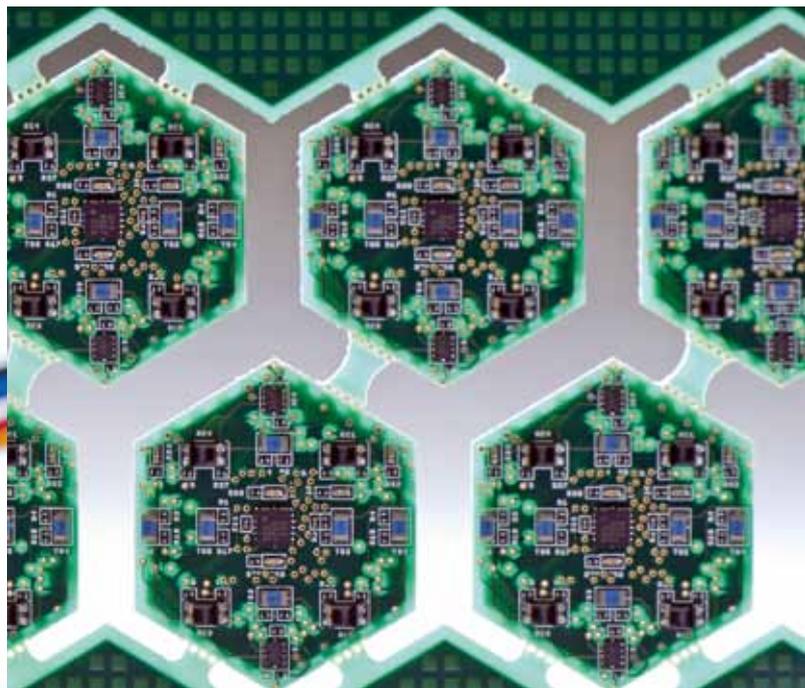
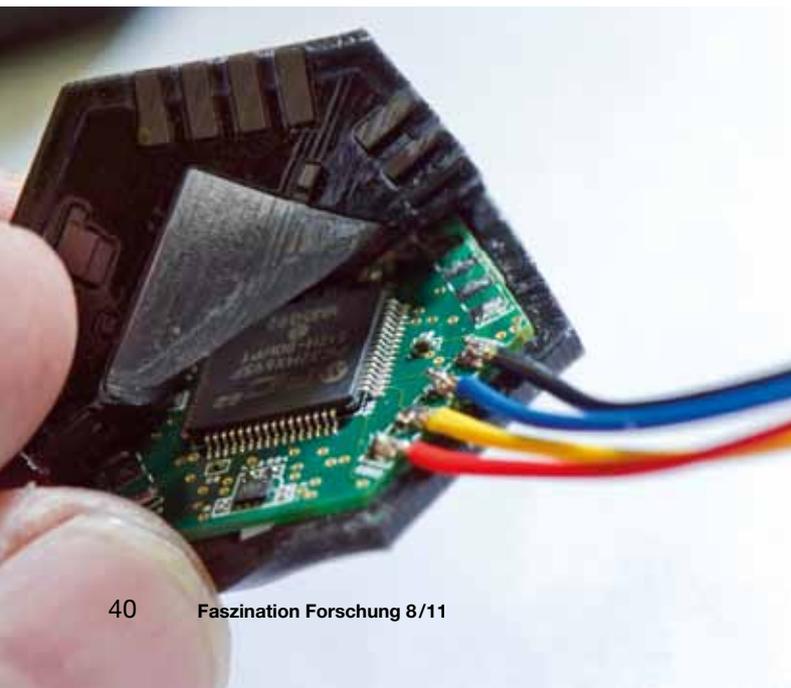
Vorbild ist der Mensch. In unseren zweieinhalb Quadratmetern Haut vermitteln uns an die fünf Millionen freie Nervenendigungen und Endkörperchen Berührung, Druck, Temperatur, feinsten Lufthauch, Vibrationen, Kitzeln oder auch Schmerz. Zugleich ist die Haut das entscheidende Organ, mit dem wir uns von der Umwelt abgrenzen. „Ohne sie keine Unterscheidung von Fremd und Eigen, von Umwelt und Körper – eine fühlende Hülle ist dafür universelles biologisches Prinzip, schon eine einzelne Zelle grenzt sich durch eine sensible Membran voller chemischer Sensoren gegen die Umwelt ab“, argumentiert Mittendorfer. „Wollen wir eine lernende Maschine, die sich selber versteht, braucht sie ein möglichst ebenbürtiges Organ.“ Der 25-jährige Doktorand gehört als Mitglied einer Gruppe um Professor Gordon Cheng am Institute for Cognitive Systems zu einer von über einem Dutzend Arbeitsgruppen weltweit, die an der praktischen Realisierung des Konzepts „Sensitive Skin“ arbeiten.

Einzigartiges Sensorsystem

Herzstück seiner neuen Roboterhaut ist ein gut fünf Quadratzentimeter großes, hexagonales Plättchen HEX-O-SKIN, das die Forscher mit einem IEEE-Journal-Paper (2011) der wissenschaftlichen Öffentlichkeit präsentierten. Auf der kleinen Platine stecken vier „Berührungssensoren“, die durch Infrarotmessung alles registrieren, was einen Abstand von einem Zentimeter unterschreitet. „Wir emulieren damit leichte Berührungen“, erklärt Mittendorfer, „das entspricht der Wahrnehmung, die Sie haben, wenn Sie mit Ihrer Hand vorsichtig die Haare auf dem Arm berühren.“ Hinzu kommen sechs Temperatursensoren sowie ein besonders wichtiger Beschleunigungssensor – er erlaubt es der Maschine, die Bewegungen ihrer einzelnen Segmente genau zu registrieren, damit auch zu lernen, welche Körperteile sie gerade bewegt. Außerdem registriert der Sensor Vibrationen, die beispielweise entstehen, wenn der Roboter an einen Gegenstand stößt. Allein die Kombination der verschiedenen Sensortypen in solch einem Modul macht die neue Maschine einzigartig. „Wir versuchen hier, besonders viele verschiedene Sinnesmodalitäten auf kleinsten Raum zu packen und können jederzeit neue Sensoren in unser System einfügen“, erklärt der Ingenieur. Noch ist die Produktion Handarbeit. Jedes fertige Sensorelement steckt Mit-

Fotos: Heddergott, TUM

Noch finden viele Produktionsschritte in Handarbeit statt: Wenn die fertig bestückten Sensormodule (rechts) aus der Produktion kommen, werden die einzelnen Plättchen von Hand in eine Elastomerschale gesteckt (links)



tendorfer am Ende vorsichtig in eine Tasche aus einem gummiartigen Elastomer. Plättchen für Plättchen aneinandergesteckt – jedes HEX-O-SKIN hat auf vier seiner sechs Seiten Verbindungspunkte, um Kommunikation und Energieversorgung zu Nachbarelementen zu realisieren –, gibt das Ganze ein bienenwabenartiges, flächiges Gebilde: des Roboters neue Haut. Der Elastomerüberzug soll seinen Träger nicht nur schmücken, sondern ihm auch Schutz bieten. „Schließlich“, prophezeit Mittendorfer lachend, „soll so ein Roboter vielleicht auch einmal im Regen laufen können, zumindest muss er es aushalten, wenn ein Forscher versehentlich über ihm die Tasse Kaffee ausleert.“

Großes elektronisches Netzwerk

Damit die Maschine allerdings überhaupt etwas merkt, müssen die Signale der Sensoren in einem Zentralrechner, dem Gehirn der Maschine, verarbeitet werden – und diesen überhaupt erst einmal erreichen. Auch hier setzt die Maschine auf ein neues Konzept. „Die Biologie braucht prinzipiell über weite Strecken eine direkte Verdrahtung. Von jedem Hautsensor führt quasi eine Nervenleitung in die Vermittlungsstationen des Gehirns“, erläutert Mittendorfer. In technischen Systemen macht diese Verschaltung aber Probleme. Eine Einzelverdrahtung von jedem Sensor zum Zentralprozessor würde

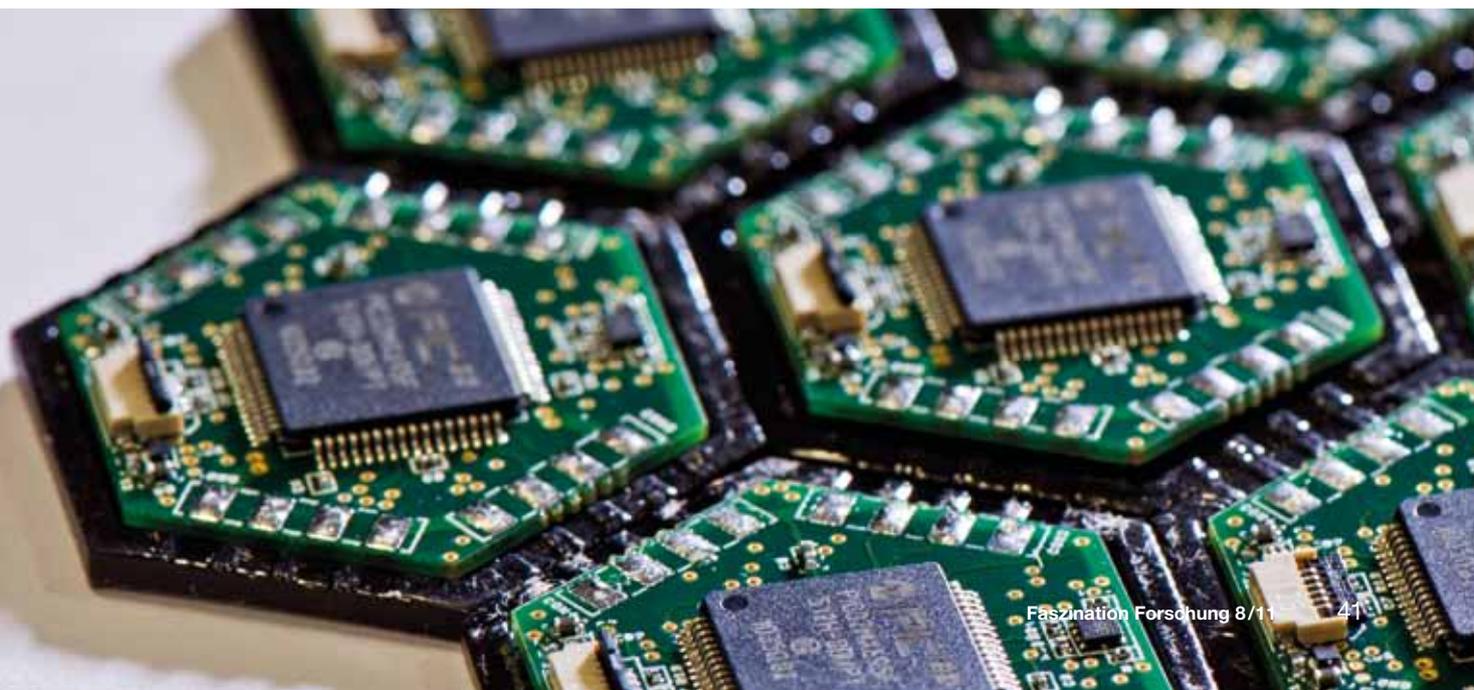
rasch Kabelbäume erfordern, die zu dick, kaum herstellbar oder zumindest sehr teuer gerieten. In der wabenartigen Netzstruktur des CoTeSys-Prototypen leitet hingegen jedes Sensormodul nicht nur eigene, sondern als Knotenpunkt auch Daten anderer Sensorelemente durch. Die Haut ist ein großer Riesensensor und Kabel in einem. Obendrein kann das Netzwerk den Ausfall von Einzelkomponenten gut verkraften. Denn der große Rest an Information umgeht notfalls auf alternativen Bahnen eine defekte Stelle: von großem Vorteil für einen späteren praktischen Einsatz solch einer Maschine, denn Roboter können sich derzeit nicht selbst heilen.

Obendrein, ein ganz besonderer Clou der Verschaltung, arbeitet in jedem HEX-O-SKIN ein eigener Mikroprozessor. Zusammen ergibt dies ein großes elektronisches Netzwerk, das nur noch an ausgewählten Stellen mit dem Computer verbunden werden muss.

Jedes leichte Tätscheln wird wahrgenommen

Der Rest ist Rechenroutine: Mit einem entsprechenden Setup programmiert, sorgt der schlichte Druck auf den Power-on-Schalter dafür, dass das System für jede Sensoreinheit eine Identifikationsnummer festlegt: Sie erlaubt dem zentralen Prozessor die Zuordnung, woher er gerade Sensorinput erhält. Wenige Millisekunden nach einem Neustart hat der Zentralprozessor ge- ▷

Jedes Sensorplättchen hat Verbindungspunkte an vier seiner sechs Seiten. So können die wabenartig verbundenen Elemente Informationen weiterleiten. Auch die Energieversorgung wird über diese Verbindungsstellen sichergestellt



klärt, mit wie vielen Sensoren er im Netzwerk rechnen kann und wie die Signalwege verlaufen. Noch ist allerdings gerade mal ein allererstes kleines Hautstückchen fertig. 15 Sensoren prangen auf dem ersten derart ausgestaffierten Roboterarm. Das reicht bereits für den Proof of Concept: Schon ein leichtes Tätscheln oder Pusten sorgt dafür, dass der Arm eilends in die andere Richtung ausweicht.

„Wir werden die Haut schließen, einen Prototypen generieren, der völlig mit diesen Sensoren umschlossen ist und ganz neu mit seiner Umwelt interagieren kann“, gibt sich Mittendorfers Doktorvater Gordon Cheng überzeugt. „Eine Maschine, die selbst im Dunkeln merkt, wenn man ihr auf den Rücken tippt.“

Eine Vorstellung von sich selber gewinnen

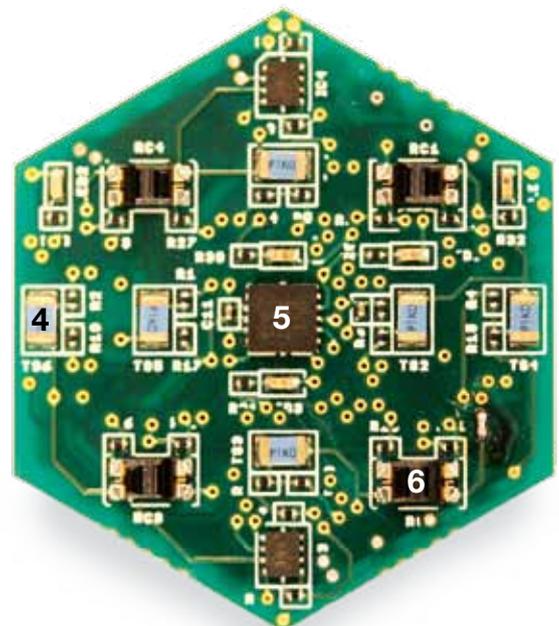
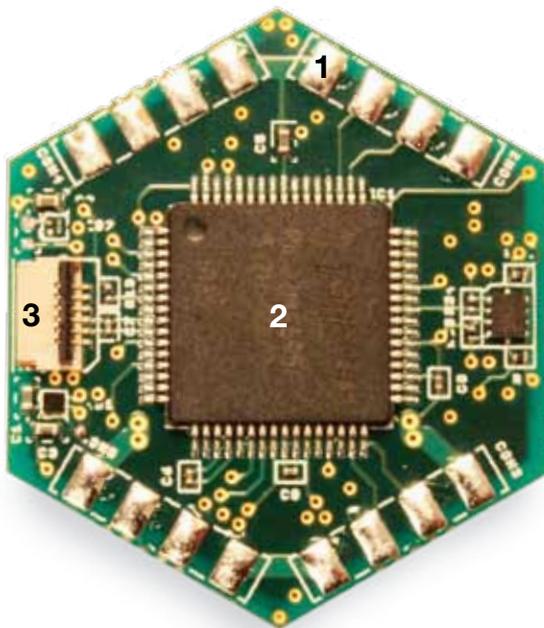
In manchen Leistungen ist das neue System schon heute dem Menschen überlegen. Bei einer Update-Rate von 1000 Hertz landen differenzierte Informationen aus den Sensoren im Abstand von weniger als einer Millisekunde im Zentralrechner der Maschine. Der Mensch ist mit 50 Hertz und 25 bis 250 Millisekunden bei Tasteindrücken mit diskreten Signalen deutlich langsamer. Temperaturunterschiede von 0,06 Grad Celsius könnte

solch ein Humanoid registrieren, der Mensch spürt erst Differenzen von etwa 0,1 Grad. Doch es sind eben nicht die besseren „Sinnesleistungen“ im Detail. Zukunftsweisend am Konzept ist, dass solche Maschinen es einmal mit einer unserer ureigensten neurobiologischen Fähigkeiten aufnehmen könnten: eine Vorstellung von sich selber zu gewinnen.

Endlose Statistik betreibt unser Gehirn bereits im Mutterleib, damit wir uns und unsere Umwelt ertasten und kennenlernen. Der werdende Säugling zappelt herum, stößt an, zappelt erneut. Aus Tausenden solcher taktilen Reize baut sich das Gehirn Karten, lernt, die Lage der Tastsensoren in der Haut zuzuordnen, sortiert, wie weit weg Arme und Beine vom Kopf sind und wie groß Bauch, Arme und Kopf sind.

Ihre so einfache wie raffinierte Architektur erlaubt der neuen Maschine in naher Zukunft etwas Vergleichbares. Binnen weniger Sekunden – das ist jedenfalls das Ziel – soll auch sie sich so eine Karte erstellen. Eine Vorstellung der eigenen Gestalt – noch rudimentär, aber mit jedem Sensormodul mehr, das Mittendorfer hinzufügt, wird sie engmaschiger und präziser. Sein Roboter ist damit ein Stück weiter an den Menschen herangerückt.

Bernhard Epping



- 1 Verbindungsports zwischen den Modulen zur Kommunikation und Energieversorgung (16 Stück)
- 2 Mikrocontroller
- 3 Programmierport
- 4 Temperatursensoren (6 Stück)
- 5 Beschleunigungssensor
- 6 Infrarotsensoren (4 Stück)

Der Roboter „Bioid“ ist mit 31 Sensormodulen, verteilt über den ganzen Körper, bestückt. Auch an ihm testen die Wissenschaftler die HEX-O-SKIN-Module

