

**Effiziente Schwimmer:**  
Quallen bewegen sich mit  
sehr wenig Energieauf-  
wand durchs Wasser. Ihr  
Antrieb dient daher als  
Vorbild für Schwimm-  
roboter.



# EINE QUALLE STEHT MODELL

TEXT: TIM SCHRÖDER

Sie gelten nicht als Sympathieträger der Meere, doch in puncto Unterwasserantrieb setzen sie Maßstäbe: Nicht zuletzt weil Quallen besonders effizient schwimmen, hat ein Team des Max-Planck-Instituts für Intelligente Systeme in Stuttgart einen Roboter nach dem Vorbild der Nesseltiere konstruiert. Jellyfish-Bots könnten in Zukunft helfen, besonders empfindliche Ökosysteme wie Korallenriffe von Plastikmüll zu befreien.

Quallen haben etwas Meditatives, wenn sie sich langsam pulsierend durchs Wasser bewegen, ihren Schirm zusammenziehen und geräuschlos und gemächlich dahingleiten. Ihre elegante Bewegung hat weltweit schon verschiedene Forschungsgruppen inspiriert, in ihren Laboren Quallen nachzuahmen. In der Regel sind dabei Apparate herausgekommen, die störende Geräusche verursachen und deren Mechanik relativ viel Energie verbraucht. In Sachen Eleganz und Leichtigkeit können sie echten Quallen bislang nicht das Wasser reichen. Ein Team des Max-Planck-Instituts für Intelligente Systeme in Stuttgart

ist dem natürlichen Vorbild jetzt aber sehr nahe gekommen. Die Forscher haben einen leichten, geräuschlosen und sparsamen Quallenroboter konstruiert, der mit sanften Schlägen durch das Wasser rudert. In einer Sekunde kommt der Jellyfish-Bot sechs Zentimeter voran – das ist nun nicht rasend schnell, aber ein durchaus typisches Quallentempo.

Der Jellyfish-Bot kann aber mehr, als bloß durch das Wasser paddeln. Statt eines geschlossenen Schirms hat das etwa handtellergroße Maschinchen sechs Arme, die gezielt angesteuert werden können. Damit kann es zugleich schwimmen und Gegenstände greifen. „Unser Ziel war es, einen Quallenroboter zu entwickeln, mit dem wir Plastikmüll und andere Abfälle aus dem Meer fischen können“, erklärt der Robotikexperte Tianlu Wang, der in Stuttgart als Postdoc in der Abteilung „Physische Intelligenz“ bei Metin Sitti forscht. „Natürlich

werden wir mit solchen Geräten nicht die vielen Millionen Tonnen Plastikabfall aus dem Meer holen können. Wir denken da viel eher an einen Einsatz in besonders empfindlichen Ökosystemen, zum Beispiel in Korallenriffen.“ Da sich der Jellyfish-Bot geräuschlos fortbewegt, schreckt er Fische und andere Tiere nicht auf. Schwimmversuche im Teich hinter dem Institutsgebäude haben das bereits gezeigt: Die Forscher setzten die Quallen ins Wasser, ließen sie ein wenig absinken und lösten dann per Fernbedienung die Schwimmbewegung aus. Prompt ruderten die Quallen flüsterleise zurück an die Oberfläche, ohne dabei die Tiere im Teich zu irritieren. Der Quallen-Robi besteht aus leichtem Kunststoff. Schäden an Korallen sind damit so gut wie ausgeschlossen.

Herzstück des Jellyfish-Bots sind sogenannte Hasel-Muskeln. „Hasel“ steht für *hydraulically amplified self-healing*



*electrostatic actuators* – hydraulisch verstärkte, selbstheilende elektrostatische Aktuatoren –, ein ziemliches Wortungetüm für eine im Grunde einfache elektrotechnische Angelegenheit. Denn bei Hasel handelt es sich um kleine, mit Flüssigkeit gefüllte Plastiksäckchen, die unter Stromspannung zusammengepresst werden und dabei ihre Form verändern. Sie wurden vor einigen Jahren von einer Gruppe um Christoph Keplinger entwickelt, dem derzeitigen geschäftsführenden Direktor des Stuttgarter Instituts. Letztlich funktionieren die Säckchen nach dem Kondensatorprinzip. Ein Kondensator ist ein elektrisches Bauteil und besteht aus zwei Elektroden, die durch eine isolierende Schicht, das Dielektrikum, getrennt sind. Liegt an dem Kondensator eine Spannung an, lädt sich die eine Elektrode positiv auf, die andere negativ, und zwischen den beiden durch das Dielektrikum getrennten Elektroden entsteht ein elektrisches Feld. Diesen Effekt machen sich Forscher bei den Hasel-Muskeln zunutze: Die Plastiksäckchen sind auf beiden Seiten mit einer hauchdünnen Elektrode beklebt. Die Flüssigkeit im Inneren dient als isolierendes Dielektrikum. Unter Spannung ziehen die positiv und die negativ geladene Elektrode einander

an wie die entgegengesetzten Pole zweier Magnete – und das weiche Säckchen wird zusammengequetscht. Die Kunst besteht darin, die Säckchen so zu gestalten, dass sie beim Anschalten und beim Abschalten des Feldes genau definierte Bewegungen vollführen.

Beim Jellyfish-Bot klappt das hervorragend. Die Arme des Quallenroboters bestehen aus mehreren Segmenten, die beweglich miteinander verbunden sind. Jedes dieser Segmente ist mit einem Hasel-Muskel ausgestattet. Legen die Forscher eine Spannung an, verkürzen sich die Muskeln und krümmen den Quallenarm wie einen Finger. Durch rhythmisches An- und Abschalten streckt und krümmt sich der Arm – die perfekte Schwimmbewegung!

„Die Sache war allerdings die, dass Hasel-Muskeln zuvor noch niemals unter Wasser eingesetzt worden waren“, sagt Wangs Kollege Hyeong-Joon Joo, der in der Abteilung „Robotische Materialien“ arbeitet. „Wir mussten die Elektronik daher erst einmal wasserdicht machen.“ Hyeong-Joon Joo entschied sich für alltägliche und vor allem billige Werkstoffe – die entscheidende Voraussetzung dafür, dass die

Roboter in Zukunft auch tatsächlich zum Einsatz kommen können. So hat er die Arme und das Innenleben des Quallenroboters beispielsweise mit Folie aus dem Alltagskunststoff und Plastikflaschen-Material PET umhüllt. Für die dielektrische Flüssigkeit in den Hasel-Muskeln nutzt er Silikonöl. In Zukunft ließen sich verschiedene Materialien verwenden, um Robustheit und Lebensdauer des Roboters zu steigern. Auch könnte man biologisch abbaubare Substanzen verwenden.

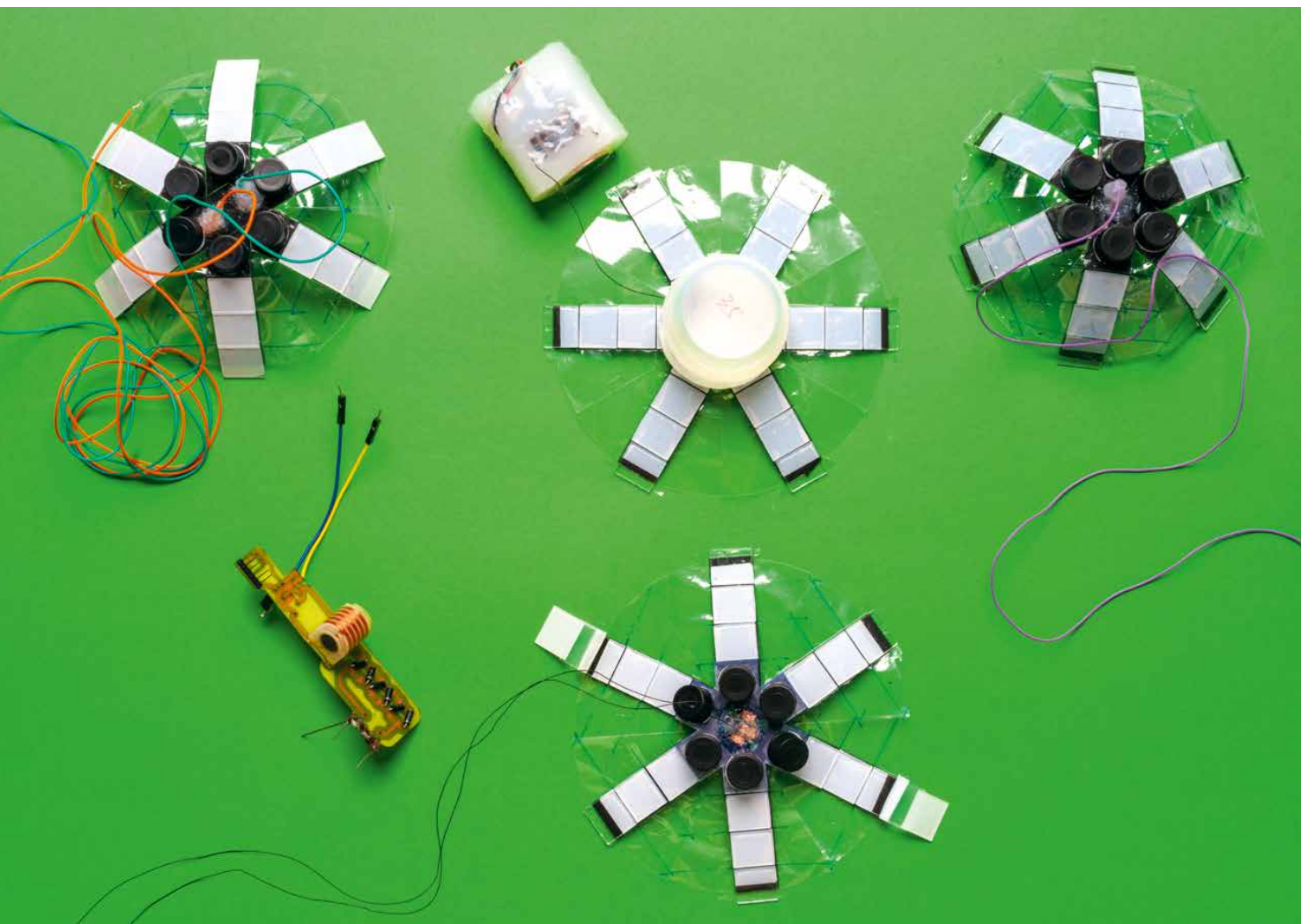
## Foliensandwich mit Elektroantrieb

Alles in allem besteht der Quallenroboter aus mehreren Schichten: aus einer Folie, die den Armen Steifheit verleiht und dafür sorgt, dass sie sich wieder strecken, wenn das elektrische Feld abgeschaltet wird; den flexiblen Elektroden; den Polymerfolien, die das flüssige Dielektrikum umhüllen; und der wasserdichten PET-Folie. Zudem sitzen in der Mitte der Qualle kleine Schwimmkörper und auch ein kleines Gewicht, das die Qualle wie ein Stehaufmännchen aufrecht hält. Mit Energie versorgt und gesteuert haben die Forscher die Quallenroboter in den meisten Experimenten über Kabel, weil die Bordbatterie nur ganz kurze Schwimmausflüge erlaubt.

Es brauchte einiges, um dieses Foliensandwich zum Schwimmen zu bringen, sagt Tianlu Wang, der für den elektrotechnischen Teil zuständig war. So reichte es beispielsweise nicht, einfach einen Kondensator einzubauen. Schaltet man den Strom ab, entlädt sich ein Kondensator nämlich nicht sofort vollständig. Das bedeutet, dass sich auch die Arme nicht sofort wieder gänzlich strecken. Schaltet man einen Kondensator einfach nur an und aus, endet die Bewegung in einem krampfhaften Zittern. In die Qualle mussten daher zusätzliche Widerstände eingebaut werden, durch die sich der Kondensator schnell entlädt. Eine der größten Herausforderungen aber war es, den nur 16 Zentimeter breiten Jellyfish-Bot unter Hochspannung zu setzen. Denn um ein elektrisches Feld zu



Kombinierte Kompetenz: Der Robotikexperte Tianlu Wang (links) und Hyeong-Joon Joo, der die künstlichen Hasel-Muskeln unter anderem für den Unterwassereinsatz weiterentwickelt hat, haben den Jellyfish-Bot zum Schwimmen gebracht.



75

Roboterzoo: Das Stuttgarter Team hat diverse Varianten eines Quallenroboters entwickelt. In der Basisversion werden alle Arme gemeinsam gesteuert (rechts oben), in zwei Weiterentwicklungen erfolgt die Steuerung der Arme in zwei Gruppen (links oben und unten Mitte) – ein Teil der Tentakeln lässt sich zum Schwimmen und ein Teil zum Greifen nutzen. Für die Steuerung über Kabel verwenden die Forscher externe Elektronik (links unten), der Jellyfish-Bot kann aber auch drahtlos navigiert werden (oben Mitte).

---

## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Mithilfe von Hasel-Muskeln kann ein Roboter – ein Jellyfish-Bot – nach dem Vorbild von Quallen energieeffizient schwimmen.

Da Jellyfish-Bots aus weichen Komponenten bestehen und geräuschlos angetrieben werden, könnten sie sich gut eignen, um Plastikmüll in besonders empfindlichen Ökosystemen wie Korallenriffen und Mangrovenwäldern aufzusammeln oder meeresbiologische Proben zu nehmen.

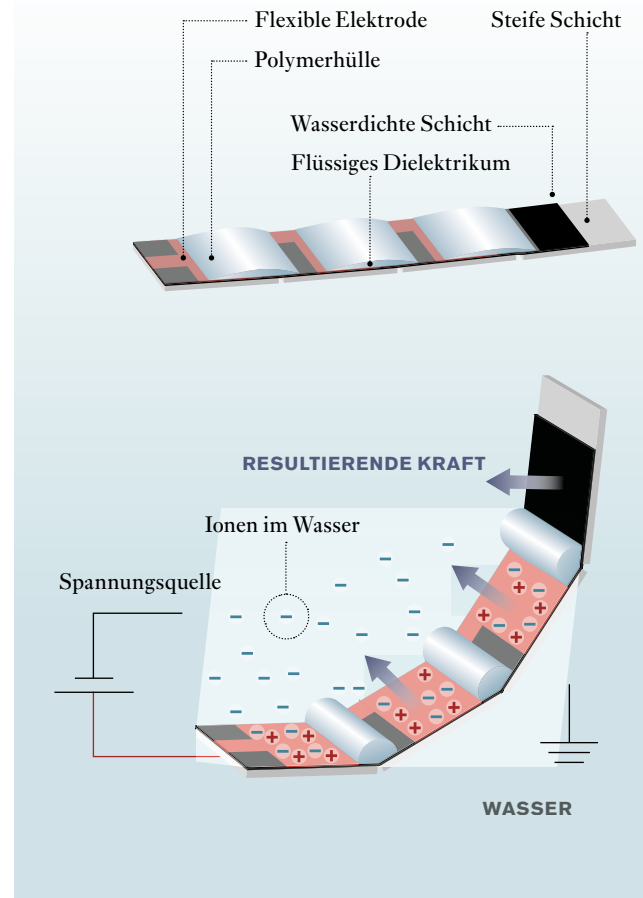
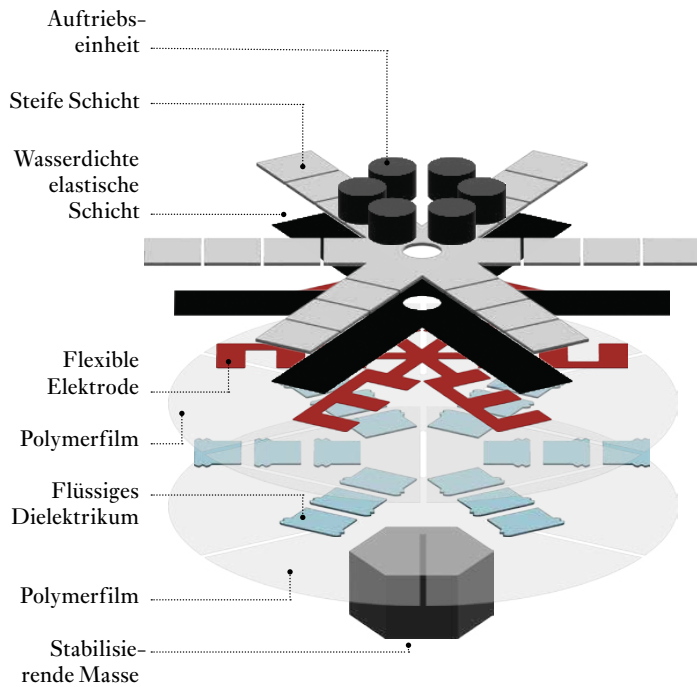
---

erzeugen, das stark genug ist, die mit Flüssigkeit gefüllten Säckchen zu quetschen, ist eine Spannung von rund 10 Kilovolt nötig – Werte, die man eher in den Motoren von Elektroautos und –rollern kennt. „Dafür mussten wir alles perfekt anpassen“, sagt Tianlu Wang: „Die Dicke des Dielektrikums, damit es keinen Funkenüberschlag zwischen den Elektroden gibt, die Stärke der Folien und einiges mehr.“

Üblicherweise, sagt Wang, wurden für Fisch- oder Quallenroboter bislang kleine Elektromotoren verwendet, die

lediglich mit Spannungen von wenigen 100 Volt arbeiten. Allerdings verbrauchen diese Motoren deutlich mehr Strom. Der Jellyfish-Bot hingegen arbeitet zwar mit Hochspannung, benötigt aber nur ein elektrostatisches Feld, das die Bewegungen auslöst. Dafür reicht ihm eine geringe Leistung von rund 100 Milliwatt – so viel wie bei einem Spielzeugauto. „Sonst wäre auch die Gefahr eines Stromschlags viel zu groß“, sagt Wang. Trotz der geringen Leistung vollbringt ein Jellyfish-Bot einiges. Da sich seine Arme gezielt ansteuern lassen, kann er beispielsweise mit zwei

→



76

Ein bewegliches Sandwich: Der Quallenroboter ist unter anderem aus wasserdichter Folie, flexiblen Elektroden und einem Dielektrikum wie Silikonöl konstruiert. Die Kombination aus Auftriebseinheit und stabilisierender Masse hält ihn im Wasser aufrecht. Seine Arme krümmen sich, wenn an dem Dielektrikum eine Spannung anliegt (rechts). Ionen im Wasser, aber auch die polaren Wassermoleküle, die sich an die Arme anlagern, verstärken das elektrische Feld und damit die Kontraktion der künstlichen Muskeln.

Armen nach Gegenständen greifen, während er mit den anderen rudert. Darüber hinaus kann der Roboter mit seinen Armen fächeln und damit kleine Gegenstände herbeiholen. Das könnte nicht nur beim Aufräumen, sondern auch bei Forschungsarbeiten im Meer helfen. Beispielsweise könnten Meeresbiologen damit zukünftig Fischeier oder andere Proben einsammeln.

Für anspruchsvollere Unterwassereinsätze müssten die Forscher die Quallenroboter noch mit einer eigenen Energieversorgung – etwa Solarzellen auf den Ruderärmchen – sowie Mikrochips für die Steuerung und Signalverarbeitung ausstatten. Wang: „Die entsprechende Technik gibt es heute schon für wenig Geld zu kaufen.“ Dann könnten die Schwimm-

roboter autark arbeiten, also ohne Kabel. Vermutlich werden sie auf absehbare Zeit allerdings noch über Funk ferngesteuert. Denkbar ist aber auch, dass sie mit einer entsprechenden Programmierung irgendwann selbstständig agieren.

## Softrobotik agiert per se sanft

Nicht zuletzt für die Unterwasserforschung sei der Jellyfish-Bot vielversprechend, erklärt die Luftfahrttechnikerin Victoria Gerrlich vom Bremer Zentrum für Marine Umweltwissenschaften (Marum). Derzeit entwickelt sie in einem Projekt des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt selbst einen weichen „Softrobotik“-

Greifer. Dieser soll künftig im Weltall für wissenschaftliche Beobachtungen in Gewässern unter Eispanzern eingesetzt werden – etwa auf dem Jupitermond Europa, unter dessen Eismasse Geologen flüssiges Wasser vermuten. Der Greifer soll einmal unter dem Eis ein mit empfindlichen Sensoren bestücktes Unterwasserfahrzeug aussetzen und wieder einfangen. „Softrobotik für den Einsatz unter Wasser ist etwas absolut Neues“, sagt Gerrlich. „Insofern kann ich erahnen, welch langen Weg die Kollegen in Stuttgart mit ihrem Jellyfish-Bot gegangen sind.“ Zwar sei zum Thema Softrobotik für Unterwassereinsätze schon mancher Fachartikel veröffentlicht worden. „Am Ende ist das aber so neu, dass man im Grunde alles selbst entwickeln, bauen und testen muss.“ Für die Meeresforschung

seien solche Greifer essenziell – nicht nur zum Auflösen von Abfall, sondern auch um Proben von Pflanzen oder Tieren zu nehmen. Gerrlich: „Bislang werden dafür harte Greifer eingesetzt. Die sind zwar mit Sensoren ausgestattet, damit sie sanft greifen. Softrobotik aber agiert per se sanft und kann im Grunde kaum Schaden anrichten. Ich finde es spannend, dass die Stuttgarter in dieser Richtung arbeiten.“ Wichtig sei es jedoch, für solche Roboter zukünftig biologisch abbaubare Materialien zu verwenden, damit sie das Meer nicht selbst verschmutzen, sollten sie einmal ausfallen oder verloren gehen. Tatsächlich arbeitet Materialexperte Hyeong-Joon Joo vom Stuttgarter Max-Planck-Institut daran bereits.

In anderer Hinsicht ist das Stuttgarter Team schon einen Schritt weiter: Tianlu Wang ist besonders stolz darauf, dass es ihm und seinen Elektrotechnikkollegen gelungen ist, mehrere ferngesteuerte Quallenroboter miteinander schwimmen zu lassen. „Tatsächlich können unsere Quallen sogar kooperieren“, sagt er. Er öffnet ein paar Fotos auf seinem Bildschirm. Zu sehen sind zwei Jellyfish-Bots, die gemeinsam eine Coronamaske vom Boden eines Aquariums aufnehmen und damit fortschwimmen. Auf

die Idee zu diesem Experiment kamen die Stuttgarter, als sie während der Coronapandemie in den Medien Bilder von Korallenriffen sahen, in denen sich neben dem üblichen Plastikabfall mehr und mehr Coronamasken sammelten. Tianlu Wang: „Ich denke, es ist durchaus möglich, künftig mit einem Trupp von Jellyfish-Bots Meeresabschnitte zu säubern. Nicht überall, aber doch in Ökosystemen, die besonders empfindlich sind.“

Laut einer aktuellen Studie in der Fachzeitschrift *Nature* hat ein internationales Forscherteam in 90 Prozent der untersuchten Korallenriffe Plastikmüll gefunden. Ein besonderes Problem stellen Reste von Kunststoffnetzen dar, die sich in Korallen verfangen und diese abbrechen können. Korallenriffe, die mit Plastiktüten und -folien bedeckt sind, werden zudem schlechter mit Licht, Nährstoffen und Sauerstoff versorgt. Und einer Studie des Alfred-Wegener-Instituts zufolge sind sie 20- bis fast 90-mal häufiger mit Krankheitserregern infiziert. Auch in Mangrovenwäldern, die oft an Flussmündungen in den Tropen vorkommen, schadet Plastikmüll besonders. So wachsen etwa die Bäume dieser Ökosysteme nicht mehr richtig, wenn ihre im Wasser stehenden Wurzeln mit Plastikmüll be-

deckt sind. Bis Schwärme von Jellyfish-Bots in empfindlichen Ökosystemen aufräumen können, dürfte es allerdings noch ein paar Jahre dauern. Das nächste Ziel ist es daher, die Jellyfish-Bots mit Bordstrom zu versorgen. Dann wird vielleicht bald der erste Trupp zum Großreinemachen im Meer starten können.

←

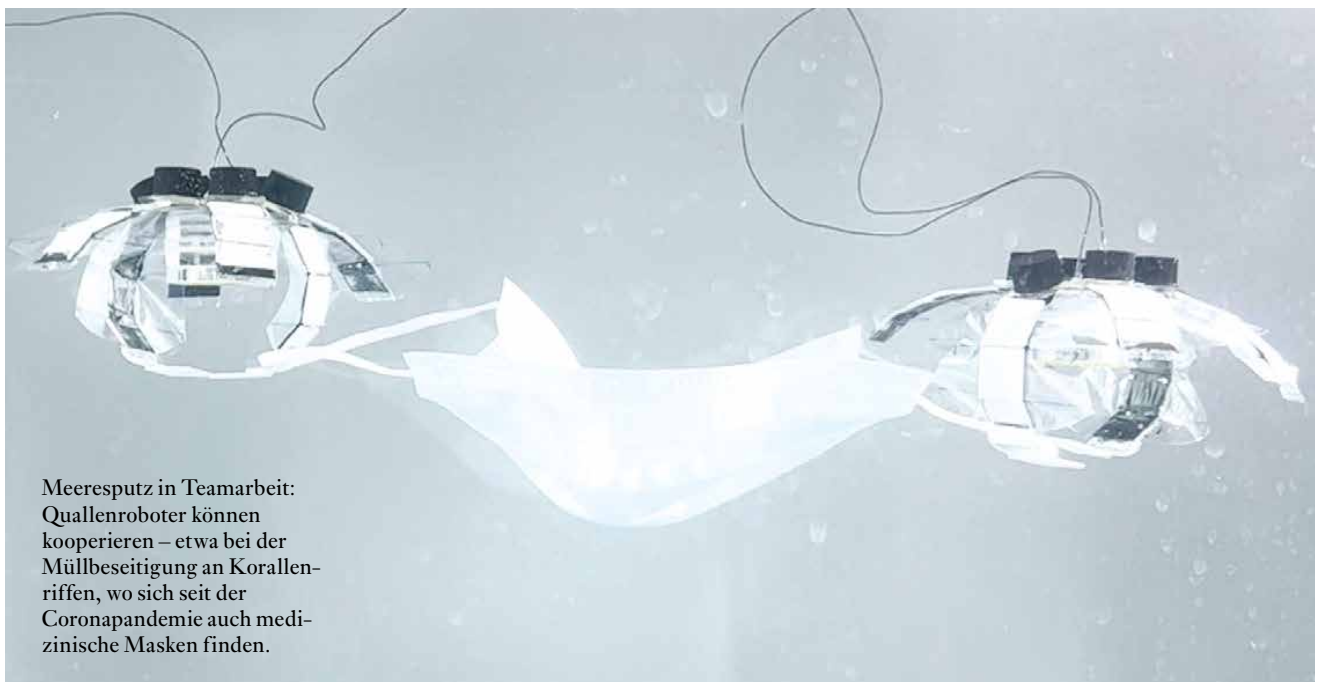
## GLOSSAR

*HASEL* steht für *hydraulically amplified self-healing electrostatic actuators*. Es handelt sich um synthetische Muskeln, die bewegt werden, indem ein mit Flüssigkeit gefülltes Säckchen durch die Anziehungskraft zwischen zwei Kondensatorelektroden zusammengequetscht wird. Hasel-Muskeln ermöglichen Robotern weiche Bewegungen etwa im Umgang mit Menschen oder in empfindlichen Umgebungen.

77



FOTO: WANG ET AL., SCI. ADV. 9, EADG0292 (2023)



Meeresputz in Teamarbeit: Quallenroboter können kooperieren – etwa bei der Müllbeseitigung an Korallenriffen, wo sich seit der Coronapandemie auch medizinische Masken finden.