

Zilien aus Hydrogel setzen neue Maßstäbe in der Mikrorobotik

Forschende entwickeln sehr realistische künstliche Flimmerhärchen

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Intelligente Systeme, der Hong Kong University of Science and Technology und der Koç University in Istanbul haben aus Hydrogel gefertigte künstliche Zilien entwickelt, die sich fast genauso bewegen können wie echte Flimmerhärchen – die bisher beste künstliche Nachahmung. Die Forschenden können jede mikrometerkleine Zilie so programmieren, dass sie sich frei im Raum bewegt – genau wie Zilien im menschlichen Körper. Die Forschungsarbeit wird am 14. Januar 2026 im Fachjournal Nature veröffentlicht.

Bitte Embargo beachten:

“3D-printed low-voltage-driven ciliary hydrogel microactuators” wird am 14. Januar 2026 um 17:00 Uhr deutsche Zeit bzw. am 14. Januar 2026 um 11:00 Uhr US-Ostküstenzeit (US Eastern Time) in Nature veröffentlicht. Zu diesem Zeitpunkt wird die Sperrfrist aufgehoben.

Videolink: https://www.youtube.com/watch?v=NalZmgF_u8o

Stuttgart – Zilien sind mikrometerkleine biologische Strukturen, die häufig in der Natur vorkommen. Die für sie typischen hochfrequenten, dreidimensionalen Schlagbewegungen (5 – 40 Hz) spielen im Körper eine unverzichtbare Rolle. Im menschlichen Gehirn ist die Bewegung der Zilien entscheidend für die Reifung der Nervenzellen, in der Lunge sind die Härchen für die Reinigung der Atemwege unerlässlich und im weiblichen Fortpflanzungssystem transportieren Zilien die Eizelle vom Eierstock in den Eileiter. Umgekehrt können beeinträchtigte oder beschädigte Zilien zu neurologischen Entwicklungsstörungen, Atemwegsstörungen, Unfruchtbarkeit sowie Fehlbildungen des Embryos führen.

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Abteilung für Physische Intelligenz am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme (MPI-IS) in Stuttgart, der Hong Kong University of Science and Technology und der Koç University in Istanbul haben künstliche Zilien aus Hydrogel gefertigt, die sie einzeln oder in der Gruppe mittels eines elektrischen Feldes bewegen können. Ihre bahnbrechende Arbeit wird am 14. Januar im Fachjournal Nature mit dem Titel „3D-printed low-voltage-driven ciliary hydrogel microactuators” veröffentlicht.

Jedes der künstlichen Härchen ist gerade mal 18 Mikrometer lang mit einem Durchmesser von etwa 2 Mikrometern – also fast so klein wie ein echtes Zilium. Die Forschenden platzierten Hunderte dieser Mikroantriebe bzw. Mikroroboter auf ein flexibles Substrat ähnlich einer Folie, das über integrierte Elektroden verfügt. Um jede Zilie herum platzierten sie vier kleine Elektroden. Schaltet man die Elektroden ein, erzeugen sie um die Zilie herum ein elektrisches Feld, das die Ionen innerhalb des Hydrogels in Bewegung versetzt. Diese kontrollierte Ionenwanderung bringt die Zilien in Bewegung.

Je nachdem, wie die Forschenden die Elektroden mit Strom versorgen, biegen oder drehen sich die Hydrogel-Zilien. Durch Einschalten der Elektroden auf einer Seite werden die Ionen im Gel in diese Richtung geschoben, wodurch sich die Zilie zu dieser Seite hinbiegt. Um die Zilie zu drehen, werden die vier Elektroden nacheinander eingeschaltet, wodurch sich die Ionen kreisförmig bewegen. Die gesamte Zilie folgt dann dieser Drehbewegung.

„Im kleinen Maßstab hat sich die Verwendung elektrischer Signale zur Steuerung der Ionenbewegung als äußerst effektive und effiziente Methode erwiesen. Der menschliche Körper beispielsweise nutzt elektrische Muskelsignale, um die Verteilung von Ionen im Muskelgewebe zu steuern, wodurch Bewegung erzeugt wird“, sagt Zemin Liu, der Erstautor der Studie. „Inspiriert von diesem Prinzip haben wir mikrometerkleine, ionengetriebene Hydrogele entwickelt. Genau wie menschliche Muskeln bewegen sich diese Hydrogele, wenn elektrische Signale die Ionen in ihrem Inneren steuern. Bei unserer Forschungsarbeit haben wir lediglich 1,5 Volt verwendet, was unterhalb der Elektrolyse-Schwelle in wässrigen Umgebungen liegt und damit völlig sicher ist, beispielsweise bei einer Anwendung im menschlichen Körper.“

Um die winzigen Härchen zu bauen, wandten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler eine Methode namens Zwei-Photonen-Polymerisation an, auch bekannt als 2PP. Das Team druckte die Hydrogel-Zilien Nanometer-Schicht für Schicht, um die Hydrogel-Netzstruktur und damit die Leistung zu optimieren.

„Die Flüssigkeit in unserem Hydrogel bewegt sich sehr schnell, da wir winzige nanometerkleine Poren im gesamten Material geschaffen haben. Diese Poren wirken wie Miniaturautobahnen, auf denen die Flüssigkeit schneller und in größeren Mengen fließen kann, was zu stärkeren und effektiveren Bewegungen führt“, sagt Wenqi Hu, der die Bioinspired Autonomous Miniature Robot Group am MPI-IS geleitet hat und nun Assistenzprofessor an der Hong Kong University of Science and Technology ist. „Mit unserer Fertigungstechnik reicht bereits eine sehr niedrige Spannung aus, um ein starkes elektrisches Feld zu erzeugen, das die Ionen zu einer schnellen Bewegung antreibt. Dank der Porenstruktur und des starken elektrischen Feldes können unsere künstlichen Zilien extrem schnell reagieren.“

Das Team testete seine mikroskopisch kleinen Roboter-Zilien mehr als 330 000 Mal. Die winzigen Strukturen zeigten fast keine Abnutzungserscheinungen. Die hohe Anzahl an Zyklen entspricht etwa einem ganzen Tag kontinuierlicher Bewegung mit 5 Hz – ungefähr der natürlichen Lebensdauer echter Zilien. Die Forscher zeigten auch, dass ihre künstlichen Zilien in verschiedenen Flüssigkeiten funktionieren, darunter biologische Flüssigkeiten wie menschliches Serum oder Mausplasma.

„In der Vergangenheit konnten Forschende nur beobachten, wie sich natürliche Zilien verhalten. Jetzt haben wir endlich eine Roboterplattform, mit der wir Zilien in Aktion untersuchen können: wie sie sich bewegen, wie sie als Gruppe zusammenarbeiten und welche Arten von Flüssigkeiten sie transportieren oder mischen können“, sagt Metin Sitti, der die Abteilung für Physische Intelligenz am MPI-IS leitete und heute Präsident der Koç-Universität in Istanbul ist. „Diese Hydrogel-Zilien könnten eines Tages in der Biomedizin eingesetzt werden, um beschädigte Zilien wiederherzustellen oder zu ersetzen. Als wichtiger Fortschritt in der Mikroantriebstechnik eröffnen sie auch neue Möglichkeiten für die Konstruktion von Miniaturrobotersystemen, wie beispielsweise der flatternden Mikromaschine, die wir in dieser Arbeit vorgestellt haben.“

Was könnte diese Zilien-Technologie also in der realen Welt ermöglichen? Die Forschungsarbeit bahnt den Weg für mehrere vielversprechende zukünftige Anwendungen:

(1) Eine neue Plattform zur Untersuchung der Funktionsweise biologischer Zilien: Forschende können nun diese künstliche Anordnung der Zilien nutzen, um sorgfältig zu testen, wie sich natürliche Zilien bewegen, wie sie zusammenarbeiten und wie sie bei wichtigen Aufgaben wie der Entwicklung, der Wahrnehmung der Umgebung und der Bewegung von Flüssigkeiten helfen.

(2) Mögliche medizinische Anwendungen: Die weichen, steuerbaren Hydrogel-Zilien könnten Inspiration für zukünftige therapeutische Geräte liefern, die dazu dienen, beschädigte Zilien im menschlichen Körper zu ersetzen oder zu unterstützen, insbesondere bei Erkrankungen, bei denen

natürliche Zilien in unseren Atemwegs- und Fortpflanzungssystemen sowie in den Hirnventrikeln nicht mehr richtig funktionieren.

(3) Eine Grundlage für Mikroroboter der nächsten Generation: Die in dieser Arbeit vorgestellte schnelle und spannungsarme Betätigung könnte zur Entwicklung neuer Arten von winzigen Robotern, mikrofluiden Werkzeugen und fortschrittlichen technischen Systemen im kleinen Maßstab genutzt werden.

Publikation:

Zemin Liu, Che Wang, Ziyu Ren, Chunxiang Wang, Wenkang Wang, Jongkuk Ko, Shanyuan Song, Chong Hong, Xi Chen, Hongguang Wang, Wenqi Hu und Metin Sitti

DOI: 10.1038/s41586-025-09944-6

“3D-printed low-voltage-driven ciliary hydrogel microactuators”