

Enzyme in Kügelchen für eine nachhaltigere Chemie

Dank der Biokatalyse mit Enzymen kann heute eine enorme Bandbreite an pharmazeutischen Wirkstoffen und anderen komplexen Molekülen umweltfreundlich synthetisiert werden. Forschende des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) haben nun eine Technologie entwickelt, mit der sich Enzyme zu millimetergroßen, lagerfähigen Kügelchen zusammenfügen lassen. Die Enzyme sind dabei nicht nur Katalysatoren, sondern bilden zugleich das Material der Kügelchen. In einer weiteren Variante lassen sich die Enzymnetzwerke mit lebenden Zellen kombinieren. Das Verfahren wurde zum Patent angemeldet.

Bei der Biokatalyse beschleunigen Enzyme die Reaktionen und können anstatt chemischer, oft giftiger Katalysatoren eingesetzt werden. So lassen sich Rohstoffe und Energie einsparen. Damit diese Technologie in der Chemiebranche eine möglichst breite Anwendung findet, ist es allerdings entscheidend, die Biokatalysatoren kontinuierlich und in großen Mengen bereitzustellen. Außerdem müssen sie lagerfähig, transportierbar und gut dosierbar sein. Um all diese Anforderungen zu erfüllen, hat ein Team um Professor Christof Niemeyer vom Institut für Biologische Grenzflächen 1 des KIT das Konzept der sogenannten All-Enzyme Hydrogels (AEHs) weiterentwickelt. Dabei werden Enzyme mit passenden molekularen Bindemodulen ausgestattet. „Treffen die komplementären Bausteine aufeinander, organisieren sie sich selbst zu dreidimensionalen Proteinnetzwerken“, erklärt Niemeyer. „Die Enzyme sind somit gleichzeitig Katalysator und Baustoff der Kügelchen – ein großer Vorteil gegenüber herkömmlichen Verfahren. Wir vermeiden inaktives Trägermaterial und steigern die Effizienz der gewünschten chemischen Reaktion.“

Diese Eigenschaften nutzten die Forschenden, um in zwei Schritten handliche Kügelchen (Englisch: „Beads“) herzustellen. Zunächst brachten sie komplementäre Enzymbausteine in Flüssigkeitströpfchen zusammen und fixierten diese durch schnelles Einfrieren in flüssigem Stickstoff. Durch die anschließende Gefriertrocknung entstanden mechanisch stabile, poröse Proteinkügelchen mit definierter Größe. Die getrockneten Partikel lassen sich wieder in Flüssigkeit geben und für biokatalytische Reaktionen einsetzen.

Baukastensystem aus Enzymen und Zellen

Anhand sehr unterschiedlicher Enzyme und Reaktionstypen zeigte das Team, dass das Verfahren vielseitig einsetzbar ist. Sowohl einzelne katalytische Funktionen als auch Systeme aus mehreren Enzymen – mit oder ohne zusätzliche Hilfsstoffe – ließen sich in den Kügelchen organisieren. „Je nach gewünschter Reaktion kann man die Zusammensetzung des Materials anpassen“, erläutert Niemeyer. „Das ist eine Art Baukastensystem: Wir können unterschiedliche Enzymbausteine über definierte Bindemodule zu katalytischen Netzwerken zusammensetzen und diese anschließend in eine gut handhabbare Partikelform überführen.“ Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler demonstrierten zudem den Einsatz der AEH-Beads über viele Stunden in Durchflussreaktoren.

In weiteren Tests kombinierte das Team die Enzymbausteine mit Zellen des Bakteriums *Escherichia coli* und stellte daraus hybride Kügelchen her. Im Unterschied zu Enzymen können Zellen beispielsweise chemische Energie bereitstellen oder Zwischenprodukte erzeugen. Die hybriden Kügelchen blieben auch nach mehr als vier Wochen trockener Lagerung bei Raumtemperatur katalytisch aktiv. Selbst nach fünf Monaten Lagerung ließen sich die Funktionen des Zell-Enzym-Systems noch nachweisen. Außerdem zeigten die Forschenden, dass sich lebensfähige Zellen aus den Materialien zurückgewinnen lassen, wobei die genetische Funktion erhalten bleibt.

Einsetzbar für Feinchemikalien oder Medikamente

„Mit den Hybridbeads verbinden wir zwei Formen der Biokatalyse, die normalerweise getrennt betrachtet werden“, sagt Niemeyer. „Wir können darin einzelne Enzyme gezielt miteinander kombinieren und zugleich die Fähigkeiten lebender Zellen nutzen. So entsteht ein Material, das beide Ansätze miteinander verbindet und sich einfach handhaben lässt.“ Mögliche Anwendungsgebiete liegen beispielsweise bei der Herstellung von Feinchemikalien, Aromastoffen, pharmazeutischen Wirkstoffbausteinen und anderen hochwertigen chemischen Produkten.

Publikationen

Jennifer Kühne, Julian S. Hertel, André Delavault, Judith Felk, Martin Peng, Lara Reuber, Felix Ott, Kim Wanner, Marc F. Münker, Adrian Neukirch, Alexei Kiselev, Kersten S. Rabe, Christof M. Niemeyer: Programmable Carrier-Free All-Enzyme Beads for Modular Continuous-Flow Biocatalysis. *Advanced Materials*, 2026.
DOI: 10.1002/adma.75120

Marius Stoeckle, Kersten S. Rabe, Christof M. Niemeyer: Self-Assembled Hybrid Cell-Enzyme Materials for Gas-Powered Biocatalysis. *Advanced Functional Materials*, 2026.
DOI: 10.1002/adfm.7817

Pressemitteilung

24.09.2026

Quelle: Karlsruher Institut für Technologie

Weitere Informationen

- [Karlsruher Institut für Technologie \(KIT\)](#)