

## WEICHE MATERIE

## Emulsionströpfchen kontrolliert stabilisieren und aufbrechen

*Mikrogele bilden eine dünne Schutzschicht um ein Tröpfchen und stabilisieren diese. Sobald jedoch die Temperatur über 32 °C steigt, schrumpfen die Mikrogele und das Tröpfchen löst sich in der umgebenden Flüssigkeit auf. Nun offenbart sich der zugrunde liegende Mechanismus dieses Prozesses, welcher die gezielte Verabreichung von Medikamenten revolutionieren könnte.*

Öl und Wasser sind von Natur aus nicht mischbar. Eine Möglichkeit, dennoch eine Kombination zwischen ihnen herzustellen, sind Emulsionen. Sie setzen sich aus zahlreichen winzigen Tröpfchen zusammen, die fein in einer Flüssigkeit verteilt sind. Emulsionen sind überall anzutreffen: Milch besteht aus Fetttropfchen, die durch Milchproteine stabilisiert in Wasser schweben; in Mayonnaise wird Öl in Wasser durch das Vermengen mit Eigelb und den darin enthaltenen Proteinen stabilisiert. In vielen technologischen Anwendungen wie der Verabreichung von Medikamenten ist es jedoch entscheidend, die Tröpfchenstruktur nicht nur langfristig stabil zu halten, sondern auch ge-

zielt aufzubrechen, um die eingekapselten Wirkstoffe freizusetzen.

Die Idee unseres internationalen Forschungsteams aus Düsseldorf, Göteborg, Edinburgh, Zürich und Osaka bestand darin, Emulsionen mit speziellen temperaturresponsiven Mikrogelepartikeln zu stabilisieren (Abbildung 1), die ihre Form je nach Umgebungstemperatur anpassen. Mikrogele sind kleine kolloidale Partikel mit einem Durchmesser von etwa 500 nm, die aus einem vernetzten, wasserlöslichen Polymer bestehen.

In unserem Fall benutzen wir Mikrogele aus dem thermoresponsiven Polymer Poly(N-Isopropylacrylamid), das seine Konfiguration mit der Temperatur ändert. Dadurch

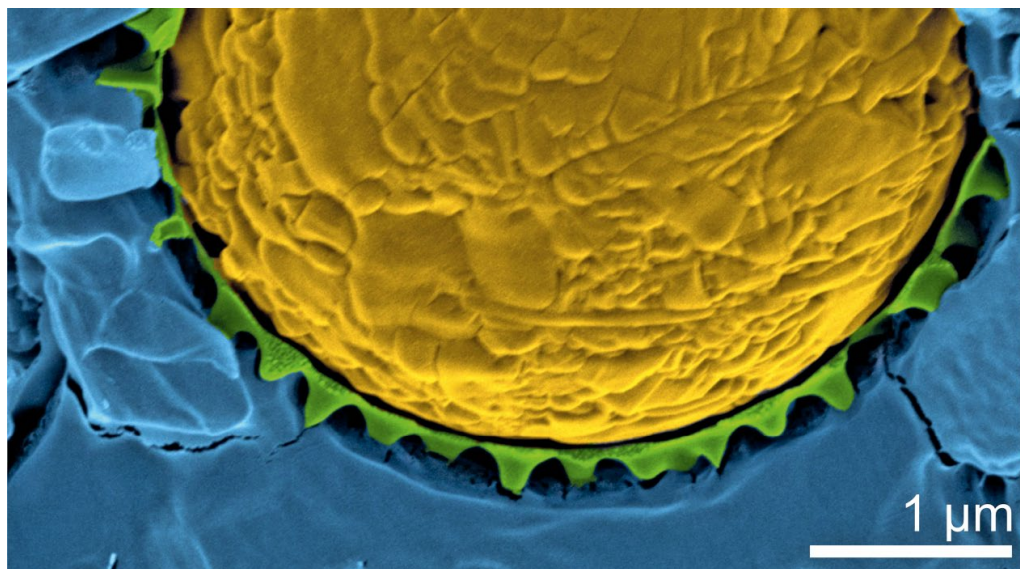
sind diese Mikrogele bei Raumtemperatur aufgequollen und absorbieren Wasser. Doch über 32 °C schrumpfen sie und ziehen sich zusammen. Auf diese Weise können Emulsionen hergestellt werden, die bei Raumtemperatur stabil bleiben, aber bei Erwärmung über 32 °C aufbrechen (Abbildung 2).

Obwohl dieses Phänomen schon länger bekannt ist, haben wir in unserer neuesten Studie den zugrundeliegenden Mechanismus herausgefunden [1]. Bisher wurde angenommen, dass die Mikrogele bei Erhöhung der Temperatur entweder die Öl-Wasser-Grenzfläche verlassen oder seitlich schrumpfen, wodurch sie nicht mehr die gesamte Tröpfchenoberfläche abdecken und stabilisieren können. Um diese Hypothese zu überprüfen, haben wir die mechanischen Eigenschaften der mikrogelebedeckten Grenzfläche mittels Grenzflächenrheologie untersucht.

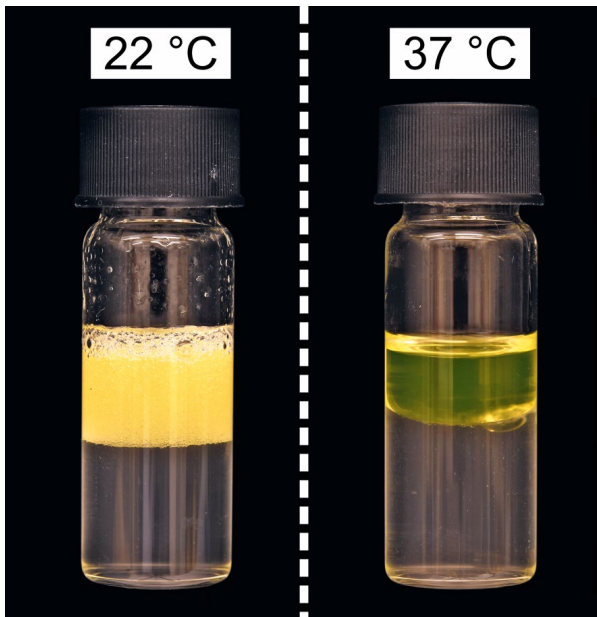
Wenn die bisher angenommenen Mechanismen zutreffen würden, müsste die Grenzfläche bei erhöhter Temperatur aufgrund der verringerten Mikrogelebedeckung entweder flüssig werden oder zumindest eine geringere Steifigkeit aufweisen. Überraschenderweise haben wir jedoch bei erhöhter Temperatur eine höhere Steifigkeit gemessen. Somit konnten die bisherigen Annahmen widerlegt werden.

Die kryogene Rasterelektronenmikroskopie der Öltröpfchen hat den Schlüssel zu diesem Mysterium geliefert (Abbildung 1). Es hat sich gezeigt, dass die Erhöhung der Temperatur zu morphologischen Veränderungen der stabilisierenden Mikrogele führt. Die Mikrogele schrumpfen in Richtung Grenzfläche, was die abstoßenden Wechselwirkungen zwischen den Tröpfchen reduziert und somit zum Aufbrechen der Emulsionen führt [1].

Die Stabilität und das gezielte Aufbrechen der Emulsionen hängen von den Eigenschaften der stabilisierenden Mikrogele ab, die sowohl als Partikel als auch als Polymere betrachtet werden können. Der Parti-



**Abb. 1** Kryogene Rasterelektronenmikroskopie eines Öltröpfchens (gelb eingefärbt), stabilisiert durch temperaturresponsive Mikrogele (grün) in Wasser (blau). Die Mikrogele halten den Öltröpfchen bei Raumtemperatur stabil, bei Erhitzung flacht ihre Form jedoch ab und die Emulsion bricht auf.



**Abb. 2 Links:** Öl-in-Wasser-Emulsionen sind bei Raumtemperatur stabil. Die Öltröpfchen, gelb eingefärbt, schwimmen aufgrund der geringeren Dichte auf dem transparenten Wasser. **Rechts:** Ab 32 °C brechen die Emulsionen auf und es bildet sich eine kontinuierliche Ölschicht auf dem Wasser.

kelcharakter führt zu einer hohen Steifigkeit der Öl-Wasser-Grenzfläche, wodurch eine Abstoßung benachbarter Tröpfchen und somit eine gute Stabilität der Emulsion erreicht wird. Da die Mikrogele jedoch aus kovalent vernetzten thermoresponsiven Polymeren bestehen, zeigt sich auch ihr polymerer Charakter. So können die Mikrogele bei erhöhter Temperatur in Richtung Öl-Wasser-Grenzfläche schrumpfen und das Aufbrechen der Emulsion ermöglichen.

Damit sich die Emulsionen temperaturresponsiv verhalten, ist also ein Kompromiss erforderlich, der einen minimalen Partikelcharakter für die Stabilität und einen hohen polymeren Charakter für ein schnelles und zuverlässiges Aufbrechen der Emulsionen berücksichtigt. In diesem Zusammenhang sind schwach vernetzte Mikrogele ideale Stabilisatoren für responsive Emulsionen.

Da wir nun das kontrollierte Stabilisieren und Aufbrechen der

Emulsionen verstehen, können wir sie an spezifische Anforderungen anpassen. So untersuchen wir aktiv die Entwicklung von mikrogelstabilisierten Emulsionen, die nicht nur auf die Temperatur, sondern auch auf den pH-Wert der Umgebung reagieren. Ziel der Forschung ist es, Medikamente gezielt an erkrankten Bereichen des Körpers freizusetzen, anstatt sie im gesamten Körper zu verteilen. Gezieltes Aufbrechen von Emulsionen lässt hier ein großes Potenzial erwarten. Auch wenn weitere Forschung erforderlich ist, sind erste Einsätze in den nächsten zehn Jahren zu erwarten.

### Literatur

- [1] M. Rey et al., Nat. Comm. **2023**, 14, 6723.

Marcel Rey,  
Universität Göteborg;  
Hartmut Löwen,  
Universität Düsseldorf

## PHYSICS NEWS

**Eine zeitabhängige Variante des Kapitza-Dirac-Effekts** hat ein Team der Goethe-Universität Frankfurt mit Hilfe eines Reaktionsmikroskops nachweisen können. Dabei sorgten Laserpulse, die aus entgegengesetzter Richtung auf ein Xenon-Gas geschossen wurden, zunächst für Ionisation und die Freisetzung von Elektronen. Ein schwächeres, kurz darauf folgendes Pulspar machte dann die Entwicklung der Elektronenphasen sichtbar. (K. Lin et al., Science **2024**, 383, 1467, <https://doi.org/10.1126/science.adn1555>)

+++

**Eine adaptive Optik mit verschränkten Photonen** könnte neue Möglichkeiten in der Bildgebung eröffnen. Die von einem schottisch-französischen Team entwickelte Methode kommt ohne „Leitstern“ aus und kann etwa bei der Abbildung von biologischen Strukturen helfen, Aberrationen zu korrigieren – ein wichtiger Schritt hin zu Quantenmikroskopen. (P. Cameron et al., Science **2024**, 383, 1142, <https://doi.org/10.1126/science.adk7825>)

+++

**Unkonventionelle Supraleitung in einem natürlichen Mineral** konnte von Forschern des Ames National Laboratory in Iowa, USA, jetzt erstmals bei Miassit ( $\text{Rh}_{17}\text{S}_{15}$ ) nachgewiesen werden. Bislang fand sich diese Art der Supraleitung nur bei künstlich erzeugten Materialien. Allerdings weisen die gezüchteten, homogenen Einkristalle sehr viel weniger Kristallfehler auf als natürlich vorkommender Miassit. (H. Kim et al., Commun. Mater. **2024**, 5, 17, <https://doi.org/10.1038/s43246-024-00456-w>)

+++

**Den fraktionalen Quanten-Hall-Effekt** hat ein Team am MIT bei Graphen zeigen können, wobei kein externes Magnetfeld notwendig war. Der Trick bestand darin, das zweidimensionale Material in fünf Schichten zu stapeln und zwischen zwei Lagen aus Bornitrid einzuklemmen. Das entstehende Moiré-Muster sowie sehr tiefe Temperaturen ermöglichten dann den magnetfeldfreien fraktionalen Quanten-Hall-Effekt. (Z. Lu et al., Nature **2024**, 626, 759, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-07010-7>)

+++

**Die Quantenversion des Barkhausen-Effekts** haben Wissenschaftler am Caltech nun zum ersten Mal demonstrieren können. Dabei sorgte der Tunneleffekt für das lawinenartige Umklappen von Domänenwänden in einem rosafarbenen Kristall. (C. Simon et al., PNAS **2024**, 121, e2315598121, <https://doi.org/10.1073/pnas.2315598121>)