

■ Ordnung aus Unordnung

Neue Experimente zeigen, dass Nichtgleichgewichts-Systeme eine Koexistenz selbstorganisierter Zustände mit unterschiedlicher Orientierungssymmetrie erlauben.

Vor hundert Jahren war das Studium von Fisch- und Vogelschwärmen allein eine Aufgabe der Biologie. Doch solche biologischen Systeme sind auch attraktiv für das Studium von Nichtgleichgewichtssystemen. Besonders interessant ist die Frage, wie sich die zum Teil sehr großen, synchron „wabernenden“ Wolken von Fischen oder Vögeln ausbilden. Seit zwanzig Jahren widmet sich auch die Physik diesen so genannten „Aktiven Materialien“, die unser Verständnis der Musterentstehung in Nichtgleichgewichtssystemen bereichern. Der Begriff „Aktives Material“ umfasst dabei alle Systeme, die aus vielen Objekten bestehen, die kontinuierlich Energie konsumieren, um sich zu bewegen oder mechanische Kräfte zu generieren. Der damit einhergehende dauerhafte Energiefluss bewirkt, dass sich die Systeme kontinuierlich fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht bewegen.

Dazu untersuchte die Gruppe von Andreas Bausch an der TU München Komponenten des zellulären Zytoskeletts, welches als Modellsystem leichter zu kontrollieren und manipulieren ist als die Tierschwärme. Das Zytoskelett umfasst auch Aktin, das längliche Filamente ausbildet, und Myosin, einen molekularen Motor. Myosin

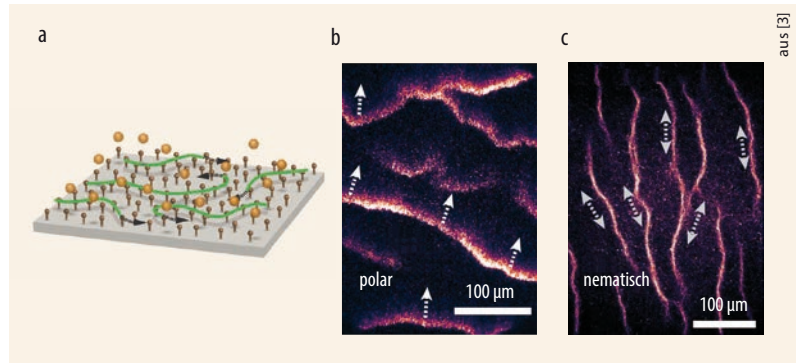


Abb. 1 Die Myosin-Motoren (a, braun) sind auf einer Glasoberfläche (grau) fixiert. Die Aktin-Filamente (grün) gleiten, angetrieben vom Myosin, über die Oberfläche. Die Konzentration von Polyethyl-

englycol (orange) reguliert die Zahl der Kollisionen der Filamente und steuert so, ob sich Mischungen von rein polarer (b) oder rein nematischer Bewegung (c) ausbilden.

verbraucht chemische Energie, um Aktin-Filamente zu verschieben und somit mechanische Kräfte und Transport zu erzeugen. Fixiert man zahlreiche Myosin-Motoren auf einer Glasoberfläche (Abb. 1a), treibt das Myosin die Aktin-Filamente an: Das Aktin gleitet dadurch kontinuierlich über die Glasoberfläche. Diese zweidimensionalen aktiven Systeme zeigen interessante Eigenschaften [1]: Beim Erhöhen der Dichte der Aktin-Filamente steigt die Wahrscheinlichkeit für Kollisionen untereinander, die zu Richtungsänderungen führen können. Ab einem kritischen Schwellenwert entstehen selbstorganisierte polare Strukturen oder „polare Cluster“,

also Schwärme von hochkonzentrierten Aktin-Filamenten mit im wesentlichen gleicher Bewegungsrichtung (Abb. 1b). In den Aktin-Myosin-Systemen sind sowohl Mikro- als auch Mesozustand relativ gut zugänglich. In Bezug auf den Mikrozustand lassen sich die räumliche Verteilung einzelner Filamente, deren Geschwindigkeit sowie die Streuwinkel bei Kollisionen der Filamente messen. Der Mesozustand charakterisiert „Schwärme von Filamenten“ auf größeren Längenskalen. Deren dynamische Eigenschaften, also ihre mittlere Geschwindigkeit, die Ausrichtung ihrer Geschwindigkeitsvektoren oder ihre Lebensdauer, sind ebenfalls direkt bestimmbar. Dabei zeigte sich, dass polare Cluster in den Aktin-Myosin-Systemen schon bei relativ schwachen kollisionsbedingten Richtungsänderungen auftreten und wohl auch Kollisionen zwischen mehr als zwei Filamenten benötigen [2]. Unklar ist jedoch weiterhin, welche Interaktionsregeln aktiver Materialien auf der Mikroskala die Emergenz von spezifischen Mustern auf der Mesoskala bedingen.

Eine kürzlich veröffentlichte Arbeit der Gruppen von Erwin Frey (LMU München) und Andreas Bausch hat hier einen bedeutenden Schritt vorwärts geleistet [3]: Die Streuwinkel bei der Kollision von

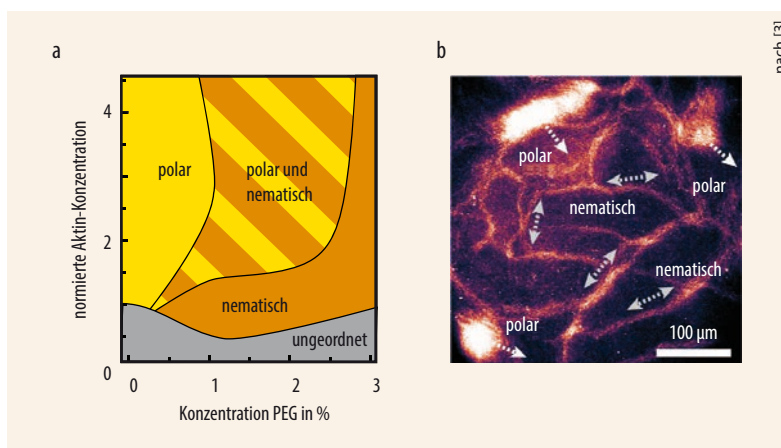


Abb. 2 Abhängig von der Konzentration der Aktin-Filamente und des Polyethylenglycols (PEG) ergeben sich Bereiche ungeordneter, polarer und nematischer

Bewegung (a). Über einen großen Bereich treten polare und nematische Bewegungen gleichzeitig auf (b).

Aktin-Filamenten ließen sich experimentell präzise kontrollieren und insbesondere die Richtungsänderung der Filamente bei Kollisionen verstärken. Der differentielle Streuquerschnitt zeigt nun interessanterweise keine eindeutige Symmetrie, sondern eine Mischung von nematischer und polarer Streusymmetrie. Die verstärkten Richtungsänderungen wirken sich auch auf das selbstorganisierte Muster auf der Mesoskala aus. Anstelle polarer Strukturen treten nun statische, nematische Strukturen auf, die an „Ameisenstraßen“ erinnern (Abb. 1c). Die Orientierung der Filamente ist stark korreliert, die Geschwindigkeitsvektoren richten sich aber nicht alle aus [3, 4]. Beide Geschwindigkeitsrichtungen kommen gleich häufig vor, sodass sich die Filamente in beide Richtungen bewegen. Bei stärkeren Richtungsänderungen dominieren nematische Muster, während schwächere Richtungsänderungen Muster mit polarer Ordnung erzeugen. Die

Kontrolle des differentiellen Streuquerschnitts erlaubt es auch, eine bislang experimentell nicht zugängliche Frage zu beantworten: Lässt sich die Richtungsänderung bei der Kollision graduell ändern, während die Symmetrie der Mesostrukturen von polar nach nematisch übergeht? Tatsächlich stellt sich für einen relativ breiten Parameterbereich von Kollisionsinteraktionen eine dynamische Koexistenz beider Strukturen ein (Abb. 2). Eine agentenbasierte Modellierung erklärt, auf welchen Eigenschaften des Systems die Koexistenz der Strukturen beruht. Numerische Berechnungen reproduzieren die dynamische Koexistenz und zeigen, dass die Koexistenz bei hinreichend großem Streuquerschnitt verschwindet.

Ob der Zusammenhang zwischen Mischsymmetrie in mikroskopischen Interaktion und Koexistenz mesoskopischer Muster grundsätzlich ist, bleibt ebenso zu klären wie die Frage, ob solche Systeme helfen können, eine generelle

Beschreibung koexistierender Phasen in Nichtgleichgewichtssystemen zu erarbeiten.

Musterbildung in Nichtgleichgewichtssystemen tritt in der uns vertrauten Welt aber nicht nur bei Tierschwärmen auf. Räumliche Ordnung und komplexe Muster finden sich auf allen Längenskalen, von der kosmologischen mit Myriaden von Galaxien und ihren Clustern bis zum Mikrokosmos des Lebens. Alle diese Systeme zeichnet aus, dass sie nur fernab des thermodynamischen Gleichgewichts existieren können. Die beeindruckenden Experimente und Analysen der beiden Gruppen aus München helfen dabei, die Physik, welche der Musterbildung in Nichtgleichgewichtssystemen zugrunde liegt, besser zu verstehen.

Peter Groß und Stephan Grill

- [1] V. Schaller et al., *Nature* **467**, 73 (2010)
- [2] R. Suzuki et al., *Nat. Phys.* **11**, 839 (2015)
- [3] L. Huber et al., *Science* **361**, 255 (2018)
- [4] D. Inoue et al., *Nanoscale* **7**, 18054 (2015)

Dr. Peter Groß und Prof. Dr. Stephan Grill, BIOTEC – Biotechnologisches Zentrum, TU Dresden, Tatzberg 47/49, 01307 Dresden