Nature-Publikation: Mechanische Spannungen als Treiber der Evolution

Wenn Embryonen wachsen, stoßen Zellen und Gewebe unaufhörlich aneinander. Dabei entstehen erhebliche mechanische Spannungen, die die Entwicklung des Tieres gefährden könnten. Ein Forschungsteam der Universität Hohenheim in Stuttgart und des japanischen RIKEN Center for Biosystems Dynamics Research in Kobe haben nun entdeckt, dass Fliegenembryonen über raffinierte Strategien verfügen, um mit diesem Druck umzugehen. Dabei haben die verschiedenen Fliegenarten zwei grundlegend unterschiedliche Lösungen entwickelt. Diese Fähigkeit, mechanische Spannungen zu kontrollieren, könnte ein Schlüssel dafür sein, dass im Laufe der Erdgeschichte so viele unterschiedliche Körperbaupläne entstanden sind. Die Ergebnisse sind jetzt im Fachjournal Nature nachzulesen.

Die Entwicklung eines Embryos ist eine präzise choreographierte Abfolge von Prozessen, bei denen Zellen aufeinanderstoßen, Gewebe wachsen, sich verschieben und ineinandergreifen. Dabei entstehen mitunter erhebliche mechanische Spannungen, die die Entwicklung des winzigen Organismus beeinträchtigen können“, beschreibt Studienleiter Professor Steffen Lemke von der Universität Hohenheim.

„Ob sich überhaupt ein lebensfähiges Tier entwickelt, hängt entscheidend davon ab, wie diese Spannungen aufgefangen werden“, fährt der Experte fort. „Bislang war jedoch unklar, ob es besondere Mechanismen gibt, die solche Konflikte zwischen den neu entstehenden Geweben verhindern.“

Entscheidender Entwicklungsabschnitt Gastrulation

Zusammen mit Wissenschaftler:innen des RIKEN-Instituts in Japan haben sich die Forschenden vom Fachgebiet Zoologie an der Universität Hohenheim einen entscheidenden Entwicklungsabschnitt der Embryonalentwicklung in verschiedenen Fliegenarten genauer angesehen: die sogenannte Gastrulation.

In diesem Stadium entstehen aus einfachen Zellschichten die Anlagen für komplexe Gewebe, wie Muskeln, Haut, Nervensystem und Verdauungstrakt. „Dabei befindet sich nahezu jede Zelle des Embryos in Bewegung. Auf den ersten Blick wirkt dieser Prozess chaotisch, tatsächlich ist er jedoch streng koordiniert. Ohne eine präzise Steuerung kommt es zu gefährlichen Verformungen oder Fehlbildungen“, erklärt Verena Kaul, eine an der Studie beteiligte Wissenschaftlerin von der Universität Hohenheim.

Gewebetektonische Kollision

„Würden sich im frühen Fliegenembryo die Gewebe von Kopf und Rumpf ungebremst ausdehnen können, dann käme es unweigerlich zu Kollisionen“, beschreibt sie. „Sehr langsam zwar, aber mit dramatischen Folgen: tiefe Furchen entstehen.“ Ein Vorgang, den die Forschenden anschaulich als „gewebetektonische Kollision“ beschreiben.

„Dieser Prozess ist vergleichbar mit der Kollision von tektonischen Platten in der Erdkruste, die Gebirgszüge und Tiefseegräben entstehen lässt. Etwas, das wir als Einwohner Japans sehr gut kennen“, erläutert Entwicklungsbiologe Yu-Chiun Wang vom RIKEN Center for Biosystems Dynamics Research. Eine solche Kollision führt zu einer plötzlichen Verformung des Bereichs, der Kopf und Rumpf verbindet. Sie kann die Entwicklung massiv stören und endet oft mit dem Tod des Organismus.“

Kopffurche als „mechanisches Auffangbecken“

Das Forschungsteam fand zwei grundverschiedene Strategien, mit denen Fliegenembryonen solche Spannungen auffangen und so eine gesunde Entwicklung sicherstellen. Einige Arten, darunter die bekannte Taufliege (Drosophila melanogaster), bilden vorübergehend eine charakteristische Einkerbung im Gewebe, die sogenannten cephale Furche oder Kopffurche. Sie entsteht durch das Zusammenspiel von genetischer Steuerung und mechanischer Selbstorganisation.

„Diese Kopffurche ist auffällig, weil sie nur vorübergehend vorhanden ist und kein eigenes, charakteristisches Gewebe enthält“, erklärt Bipasha Dey, Wissenschaftlerin im japanischen Team. „Entscheidend ist ihre Funktion: Sie wirkt wie ein mechanisches Auffangbecken, indem sie Druck aus dem wachsenden Gewebe nimmt und gefährliche Kollisionen der Gewebeplatten aus Kopf- und Rumpfregion verhindert.“

Unterdrücken die Forschenden die Bildung der Kopffurche experimentell, stoßen die Gewebe ungebremst aufeinander. Eine Art Ersatzfurche wird gebildet. Ihre Entstehung ist jedoch nicht genetisch gesteuert, sondern beruht auf rein mechanischen Prozessen. Die Folge sind schwere Fehlbildungen im Kopf und im Nervensystem, die für den Embryo meist tödlich sind.

Andere Fliegenarten nutzen eine andere Strategie

Die Embryonen anderer Fliegenarten, wie beispielsweise die zu den Zuckmücken gehörende Art Chironomus riparius oder die Schwarze Soldatenfliege (Hermetia illucens), besitzen diese Kopffurche nicht.

Stattdessen steuern sie den Druck durch eine besondere Ausrichtung ihrer Zellteilungen: Viele Zellen teilen sich nicht – wie bei der Taufliege – innerhalb der Gewebeschicht, sondern in eine schräge oder senkrechte Richtung. Dadurch beanspruchen sie innerhalb der Schicht weniger Platz. Die Folge: Das Gewebe kann sich nur begrenzt ausdehnen, auf die Nachbarzellen wird weniger Druck ausgeübt und die Gefahr unkontrollierter, spontaner Faltungen nimmt ab.

Die Forschenden konnten außerdem zeigen, dass sich die Orientierung der Zellteilungen gezielt verändern lässt. Erhöhten sie in Taufliegenembryonen experimentell die Produktion eines bestimmten Proteins, änderten die Zellteilungen ihre Ausrichtung. Sie ähnelten dann denen der anderen Fliegenarten, wodurch auch spontane Einbuchtungen im Bereich zwischen Kopf und Rumpf teilweise oder ganz ausbleiben – die jungen Embryonen entwickeln sich weitgehend normal.

Arbeitsgruppe am MPI-CBG in Dresden bestätigt Ergebnisse

Lange Zeit war sich das Forschungsteam nicht sicher, ob es seinen Ergebnissen wirklich trauen darf. „Wir waren extrem erleichtert, als bei einem Kongress eine Forschungsgruppe vom Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik (MPI-CBG) in Dresden ihre Arbeiten vorstellte. Sie sind auf einem anderen Weg unabhängig zu ganz ähnlichen Ergebnissen gekommen – eine Bestätigung für unsere Beobachtungen“, freut sich Professor Lemke.

In ihren Untersuchungen befassen sich die Studienleiter Dr. Pavel Tomancak und Dr. Bruno C. Vellutini ebenfalls mit den Mechanismen, wie Embryos von Taufliegen mechanischen Belastungen entgegenwirken. Neben genetischen Analysen entwickelten sie ein Computermodell, das die physikalischen Abläufe in der Kopffurche simuliert. Ihre Ergebnisse werden gleichzeitig mit denen der deutsch-japanischen Arbeitsgruppe in der Fachzeitschrift Nature veröffentlicht.

Mechanische Instabilitäten als Motor der Evolution

„Unsere Ergebnisse zeigen, dass die Evolution mehrere Lösungen für dasselbe Problem hervorbringen kann“, betont der Zoologe Lemke. „Ob durch die Bildung einer Kopffurche oder durch die Neuausrichtung von Zellteilungen – beide Mechanismen sichern das fragile Gleichgewicht zwischen wachsenden Geweben. Diese Vielfalt an Lösungen könnte ein Schlüssel zur Entstehung neuer Formen in der Evolution sein.“

„Bei heute lebenden Tieren, die vor 250 bis 150 Millionen Jahren von der Hauptlinie der Fliegen abgezweigt sind, teilen sich die Zellen außerhalb der Gewebeschicht, um eine Kollision von Kopf und Rumpfgewebe zu verhindern“, berichtet er. „Arten hingegen, die vor etwa 150 Millionen Jahren und später von der Hauptlinie der Fliegen abgezweigt sind, bilden eine Kopffurche.“

„Damit können wir einen neuen, erweiterten Blick auf die Evolution werfen: Vermutlich wird sie nicht ausschließlich durch genetische Veränderungen vorangetrieben. Wie Organismen mit physikalischen Kräften umgehen, scheint ebenfalls wichtig zu sein. Die Fähigkeit, mechanische Spannungen zu kontrollieren, könnte ein Schlüssel dafür sein, dass im Laufe der Erdgeschichte so viele unterschiedliche Körperbaupläne entstanden sind“, schließt Professor Lemke.

Nature-Publikation:
Bipasha Dey, Verena Kaul, Girish Kale, Maily Scorcelletti, Michiko Takeda, Yu-Chiun Wang, Steffen Lemke: Divergent evolutionary strategies pre-empt tissue collision in gastrulation, Nature 3. September 2025, DOI: 10.1038/s41586-025-09447-4

Damit zusammenhängende Publikation:
Bruno C. Vellutini, Marina B. Cuenca, Abhijeet Krishna, Alicja Szałapak, Carl D. Modes, Pavel Tomancak: Patterned invagination prevents mechanical instability during gastrulation. Nature, 3. September 2025, DOI: 10.1038/s41586-025-09480-3

Pressemitteilung

03.09.2025
Quelle: Universität Hohenheim

Weitere Informationen

Kontakt
Prof. Dr. Steffen Lemke
Universität Hohenheim, Fachgebiet Zoologie
Tel.: +49 (0) 711 459 22255
E-Mail: steffen.lemke(at)uni-hohenheim.de

- Universität Hohenheim
- Universität Hohenheim, Institut für Zoologie