

Physik: Universelle Struktur außergewöhnlicher Punkte in nichtlinearen Systemen entdeckt

23.7.2026 - Stefan Schumacher | Universität Paderborn

Außergewöhnliche Punkte, auf Englisch „Exceptional Points“ oder kurz EPs, gehören zu den Phänomenen moderner Physik. Dabei handelt es sich um besondere Punkte oder Orte, an denen sich die Eigenschaften von Materie, Raum oder Zeit verändern. In einer neuen theoretischen Arbeit zeigen Forschende des Instituts für Photonische Quantensysteme (PhoQS) der Universität Paderborn gemeinsam mit Forschenden der University of Arizona nun, dass „Exceptional Points“ in nichtlinearen Systemen einer universellen geometrischen Ordnung folgen - das war bislang nicht klar. Ihre Ergebnisse wurden jetzt in der renommierten Fachzeitschrift „Nature Communications“ veröffentlicht.

„Exceptional Points“ sind Punkte in physikalischen Systemen, an denen nicht nur zwei Eigenwerte, sondern auch die zugehörigen Zustände verschmelzen. Solche Phänomene treten in sogenannten nicht-hermiteschen Systemen auf, die etwa durch Verstärkung, Verlust oder Wechselwirkungen mit ihrer Umgebung geprägt sind. Sie werden unter anderem in der Optik, in Lasern, in Quantensystemen und in polaritonischen Kondensaten intensiv erforscht. Bisher wurden EPs vor allem in linearen Systemen untersucht. In solchen Systemen lassen sie sich häufig als isolierte Punkte im Parameterraum beschreiben. Viele reale physikalische Systeme sind jedoch nichtlinear: Ihre Eigenschaften hängen von der Intensität, Besetzung oder dem Zustand des Systems selbst ab.

„Wir konnten zeigen, dass nichtlineare ‚Exceptional‘ Points keiner beliebigen Geometrie folgen“, erklärt Prof. Dr. Stefan Schumacher, in dessen Arbeitsgruppe die Forschung mit entstanden ist. Die theoretische Studie wurde maßgeblich von Prof. Dr. Nai Kwong von der University of Arizona sowie Jan Wingebach in Schumachers Arbeitsgruppe und Dr. Laura Ares in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Jan Sperling, ebenfalls von der Universität Paderborn, vorangetrieben. Essenziell für den Erfolg der Arbeit war die enge Kooperation mit Prof. Dr. Rolf Binder und Prof. Dr. Nai H. Kwong der University of Arizona. Zu den Ergebnissen sagt Jan Wingebach: „Die Entdeckung einer universellen Kegel-und-Kuspen-Struktur war eine Überraschung. Sie zeigt, dass wir die Physik nichtlinearer ‚Exceptional Points‘ nun viel besser verstehen können. Das ist ein entscheidender Schritt, um diese Phänomene für künftige Anwendungen zum Beispiel in der Sensorik oder in funktionalen photonischen Systemen gezielt zu nutzen.“ Prof. Schumacher ergänzt: „Sehr unterschiedliche physikalische Systeme können in der Nähe eines ‚Exceptional Points‘ dieselbe charakteristische Struktur zeigen. Diese universelle Topologie liefert eine Art Landkarte, um solche Punkte künftig gezielter zu finden, zu verstehen und für Anwendungen nutzbar zu machen.“

Damit liefert die Studie eine neue Sichtweise auf bekannte lineare EPs und zeigt, wie sie in nichtlinearen Systemen eingebettet sind. „Exceptional Points“ gelten als vielversprechend für hochempfindliche Sensoren, weil Systeme in ihrer Nähe besonders stark auf kleine Störungen reagieren können. Gleichzeitig ist bei nichtlinearen Systemen entscheidend, zu verstehen, welche Verstärkung tatsächlich erreichbar ist und wo fundamentale Grenzen liegen. Die neue topologische Beschreibung kann helfen, solche Grenzen mathematisch sauber zu bestimmen und robuste, hochempfindliche Bauelemente für verschiedene physikalische Plattformen zu entwerfen. Langfristig weist die Arbeit damit auf eine tiefere Einheit nichtlinearer nicht-hermitescher Physik hin: Unterschiedliche Systeme können trotz verschiedener mikroskopischer Details dieselbe universelle

topologische Signatur aufweisen.

Das Paper ist aufrufbar unter: <https://www.nature.com/articles/s41467-026-72854-2>

<https://www.uni-paderborn.de/nachricht/160245>