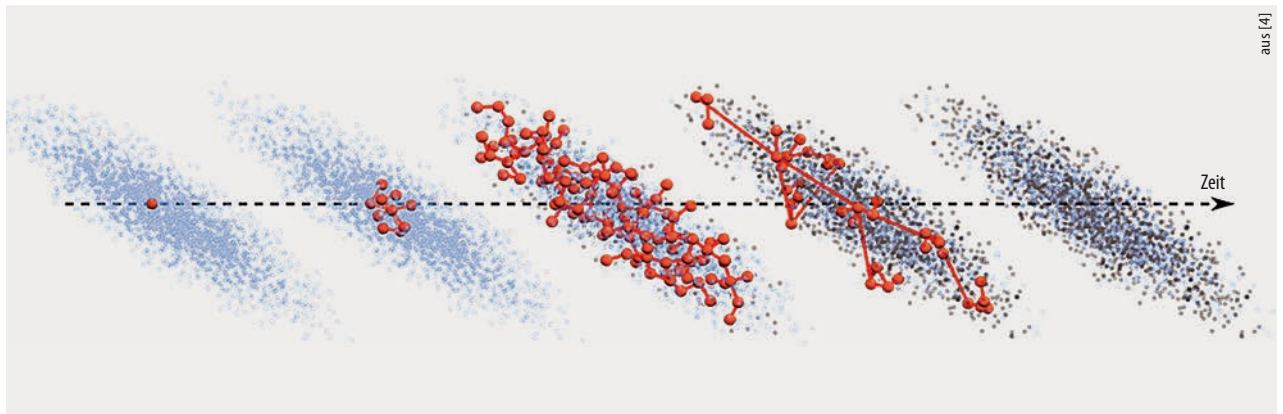


# Kollektiv an den kritischen Punkt

Erstmals ließ sich die sogenannte selbstorganisierte Kritikalität an einem atomaren System mit mikroskopischer Kontrolle beobachten.

Matthias Weidemüller



**Abb. 1** In einer lasergekühlten Wolke aus Atomen tritt selbstorganisiertes Verhalten auf: Laseranregung der Atome in wechselwirkenden Rydberg-Zuständen erzeugt Paar-Korrelationen (rote

Linien), die zu einer kollektiven Dynamik des Systems im Verhältnis der aktiven (Grundzustand: rot, Rydberg-Zustand: blau) zu den inaktiven (grau) Atomen führen.

Die Welt ist komplex. Dennoch können selbst Systeme mit einer großen Zahl von Freiheitsgraden ein überraschendes und offensichtlich universelles Verhalten zeigen, das nicht von den mikroskopischen Details abhängt. Diese „Emergenz“ lässt sich nicht auf fundamentale Symmetrien der reduktionistischen Beschreibung zurückführen. Nahe des Gleichgewichts sind Phasenübergänge wie das Gefrieren von Wasser, das immer bei 0 °C einsetzt, ein erstaunliches Beispiel für kollektives Verhalten. Obwohl sich die Wechselwirkung zwischen den Wassermolekülen und deren Symmetrien nicht ändern, zeigt das System am kritischen Punkt des Übergangs von der flüssigen zur festen Phase eine spontane Brechung der Symmetrie.

Die Entwicklung der Statistischen Physik führte zu einem vereinheitlichenden Konzept von mikroskopischem und makroskopischem Verhalten in der Nähe von Gleichgewichten. Jenseits des Gleichgewichts gestaltet sich die Beschreibung weit aus schwieriger, auch wenn moderne Theorien sehr erfolgreich dabei waren, die Dynamik von Vielteilchensystemen vorherzusagen (siehe z. B. [1]).<sup>1)</sup>

Eine besondere Form emergenten Verhaltens, die „selbstorganisierte Kritikalität“ (Self-Organized Criticality), konnten kürzlich zwei Arbeitsgruppen dank präzise kontrollierbarer atomarer Modellsysteme beobachten [4, 5]. Die Idee hinter der selbstorganisierten Kritikalität ist, dass sich bestimmte getriebene, dissipative, wechselwirkende Systeme emergent zu einem kritischen Punkt hin entwickeln, ohne dass es der äußeren Feinabstimmung bedarf [6, 7]. Diese Form der Universalität unterscheidet selbstorganisierte Kritikalität von Phasenübergängen nahe des Gleichgewichts, die nur für spezielle Werte von Kontrollparametern auftreten. Motiviert wird das Konzept der selbstorganisierten Kritikalität durch die Tatsache, dass sich raumzeitliche Korrelationen in der kollektiven Dynamik vieler scheinbar unzusammenhängender Phänomene durch einfache Potenzgesetze charakterisieren lassen. Dazu zählen die Ausbreitung von Waldbränden, Erdbeben oder Epidemien, das  $1/f$ -Rauschen und das Verhalten neuronaler Netze oder des Börsengeschehens.

Von Beginn an wurde die Bedeutung der selbstorganisierten Kritika-

lität, die Per Bak und andere vor über dreißig Jahren eingeführt haben, kontrovers diskutiert. Das liegt zum einen an der teilweise überzogenen Hoffnung, dass nun ein allumfassender, genereller Zugang zur Komplexität in der Natur gefunden sei. Zum anderen erschwerte die starke Idealisierung die Anwendungen auf reale komplexe Systeme und schränkte die Vorhersagekraft der Theorie ein.

Umso überraschender ist es, dass sich die wesentlichen Signaturen der selbstorganisierten Kritikalität nun beobachten und zugleich mit einem aus den mikroskopischen Grundgleichungen deduzierten Modell vergleichen ließen [4, 5]. Dabei dient die Laseranregung eines atomaren Gases in hochangeregte (Rydberg-)Zustände als Plattform [8], welche die drei zentralen Voraussetzungen für die Phänomenologie der selbstorganisierten Kritikalität [7] zeigt (**Abb. 1**):

■ Eine **nichtlineare Wechselwirkung** manifestiert sich durch di-

<sup>1)</sup> Das obscure Auftreten von Emergenz in komplexen Systemen, wie es Phil Anderson in seinem Essay „More is different“ [2] beschrieben hat, führte Robert Laughlin zu der Überzeugung, dass „alle physikalischen Gesetze, die wir kennen, von kollektivem Ursprung sind, und nicht nur einige von ihnen“ [3].

polare Kräfte zwischen Rydberg-Atomen, von denen die Anregungswahrscheinlichkeit eines Atoms vom Zustand der umgebenden Atome abhängt [9].

- Die **Separation von Zeitskalen** zeigt sich bezüglich des atomaren Zerfalls gegenüber kollektiver Laseranregungsdynamik.
- Ein **Schwellenverhalten** lässt sich beim Teilchenverlust in elektronische Zustände des Atoms, die nicht mehr vom Laser angeregt werden können, beobachten.

Der Kollaboration der Gruppen von Shannon Whitlock (Universität de Strasbourg) und Sebastian Diehl (Universität zu Köln) ist es gelungen, die kollektive Dynamik aus einer direkt über die mikroskopischen Prinzipien gewonnenen Langevin-Gleichung zu entwickeln [4]. Diese sind eng mit dem für selbstorganisierte Kritikalität paradigmatischen Drossel-Schwabl-Modell verwandt, das unter anderem die Ausbreitung von Waldbränden beschreibt. Dieses Modell sagt einen Nichtgleichgewichts-Phasenübergang vorher, in dem das System bei einer kritischen Dichte von einer absorbierenden Phase (keine Atome im Rydberg-Zustand / unversehrte Bäume) in eine aktive Phase (Atome im Rydberg-Zustand / brennende Bäume) übergeht. Unabhängig von der genauen Wahl der Anfangsbedingungen entwickelt sich das System selbstorganisiert immer zu dem kritischen Punkt hin.

Dies ist eine der zentralen Signaturen der selbstorganisierten Kritikalität. Der Verlust der verbrannten Bäume bzw. im Rydberg-System, der Zerfall in Zustände, die nicht mehr vom Laser angeregt werden, stellt dabei den entscheidenden Rückkoppelmechanismus dar. Whitlock, Diehl und Mitarbeiter konnten auch die anderen beiden Signaturen der selbstorganisierten Kritikalität experimentell eindeutig nachweisen und mit Näherungslösungen des Langevin-Modells vergleichen (**Abb. 2**).

Eine Kollaboration der University of Science and Technology of China in Hefei um Guang-Can Duo und der Durham University um Charles Adams verwendete einen ähnlichen experimentellen Ansatz [5]. Dabei kam eine simple Gaszelle bei Zimmertemperatur zum Einsatz. Dieses vergleichsweise einfache und elegante Experiment erlaubt allerdings keinen direkten quantitativen Vergleich mit einem Ab-Initio-Modell. Jedoch fanden sich auch hierbei die Signaturen des kritischen Verhaltens und der lawinenartigen Dynamik mit Potenzverteilungen. Hinzu kommt die Beobachtung von charakteristischem  $1/f$ -Rauschen in den Fluktuationen zwischen den beiden Phasen des Systems.

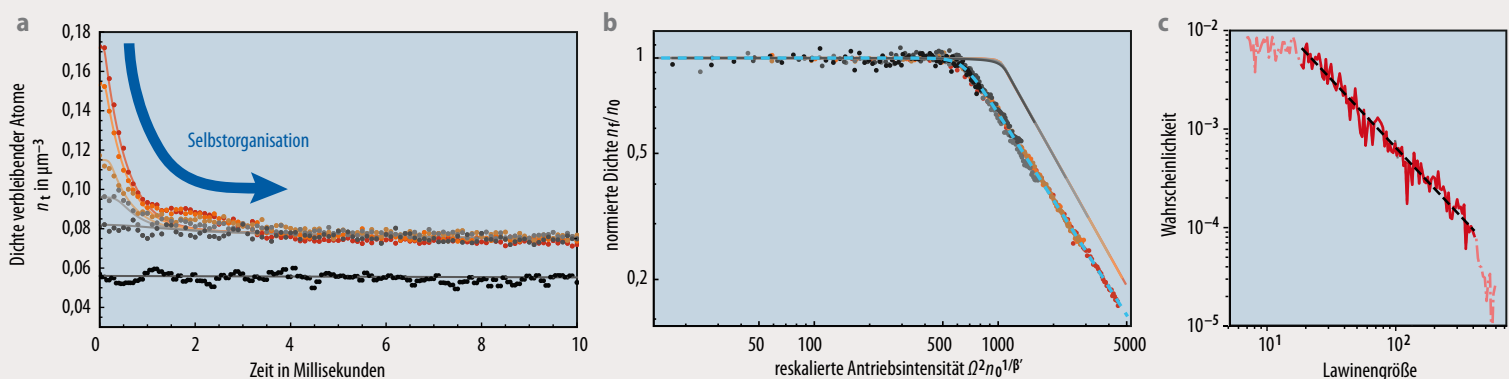
Damit steht erstmals ein prototypisches physikalisches System zur Verfügung, mit dem sich selbstorganisiertes, kritisches Verhalten

untersuchen lässt. Diese Fortschritte könnten zu einem neuen Erblühen des faszinierenden Konzepts der selbstorganisierten Kritikalität führen. Detaillierte Vergleiche von Ab-Initio-Ansätzen mit alternativen theoretischen Zugängen tragen zum Verständnis der Dynamik von Vielteilchensystemen jenseits des Gleichgewichts bei. Vielleicht gelingt es uns auf diese Weise, die uns umgebende Komplexität der Welt mit neuen Augen zu sehen.

- [1] M. Oberthaler, *Physik Journal*, Mai 2020, S. 20
- [2] P. W. Anderson, *Science* **177**, 393 (1972)
- [3] R. B. Laughlin, *A Different Universe*, Basic Books, New York (2005)
- [4] S. Helmrich et al., *Nature* **577**, 481 (2020)
- [5] D.-S. Ding et al., *Phys. Rev. X* **10**, 021023 (2020)
- [6] P. Bak, *How Nature Works*, Springer, New York (1996)
- [7] N. W. Watkins et al., *Space Sci. Rev.* **198**, 3 (2016)
- [8] S. Hofferberth und C. Gross, *Physik Journal*, März 2019, S. 40
- [9] T. Amthor et al., *Phys. Rev. Lett.* **104**, 013001 (2010)

## Der Autor

**Prof. Dr. Matthias Weidemüller**,  
Physikalisches Institut und Zentrum für  
Quantendynamik, Universität Heidelberg,  
Im Neuenheimer Feld 226, 69120 Heidelberg



**Abb. 2** Im Experiment ließen sich die drei Signaturen der selbstorganisierten Kritikalität beobachten und mit den Lösungen eines Langevin-Modells (durchgezogene Linien) vergleichen: Die Selbstorganisation (a) zeigt sich dadurch, dass die Dichte von verbleibenden Atomen immer zum selben Endwert relaxiert, falls die Anfangsdichte über einem kritischen Wert liegt. Unterhalb davon bleibt die Dichte konstant. Die Skaleninvarianz (b) führt dazu, dass die Kurven der Anregungsrate für die verschiedenen Anfangsdichten bei geeigneter Skalierung alle auf eine universelle Kurve fallen. Die lawinenartige Dynamik (c) manifestiert sich schließlich dadurch, dass die Häufigkeit für das Auftreten plötzlicher Veränderungen in der Anzahl an Rydberg-Atomen einem Potenzgesetz folgt [7].