

RUBIN

WISSENSCHAFTSMAGAZIN



ALLES NUR GEKLAUT?

Stibitzt: Nährstoffklau unter Bakterien

Abgesaugt: Sterne mopsen Materie

Umgedeutet: Narrative und Macht

WENN LASER- LICHT^T NACH REGELN TANZT

„Computer, einen Becher Kaffee, schwarz.“ Die Luft beginnt zu leuchten, die Strahlen verdichten sich und nehmen die Form eines Bechers an, der sich schließlich mit klaren Konturen materialisiert und mit einer dunklen Flüssigkeit gefüllt ist. Die Replicator-Technologie ist vermutlich eine der begehrtesten Erfindungen der Serie „Star Trek“. Auf Wunsch bereitet das Gerät allerlei Speisen und Getränke in wenigen Sekunden zu. Was nach purer Science-Fiction klingt, hat Forschende an der Ruhr-Universität Bochum zu einem ambitionierten Projekt inspiriert.

Prof. Dr. Ömer Ilday und Prof. Dr. Serim Ilday arbeiten an einem atomaren 3D-Drucker. Er soll Materialien in eine von vielen möglichen atomaren Anordnungen lenken, zum Beispiel eine Honigwabenstruktur oder eine würfelförmige Anordnung. „Natürlich werden wir nicht in fünf Jahren einen fertigen Drucker hier stehen haben“, bremst Ömer Ilday die Erwartungen. „Uns geht es nicht darum, zu kontrollieren, wo jedes einzelne Atom landet; das ist vermutlich sowieso unmöglich. Wir wollen die Atome in eine beliebige ihrer möglichen atomaren Strukturen bringen – und dafür haben wir schon einige gute Ideen.“

Das Prinzip der Selbstorganisation

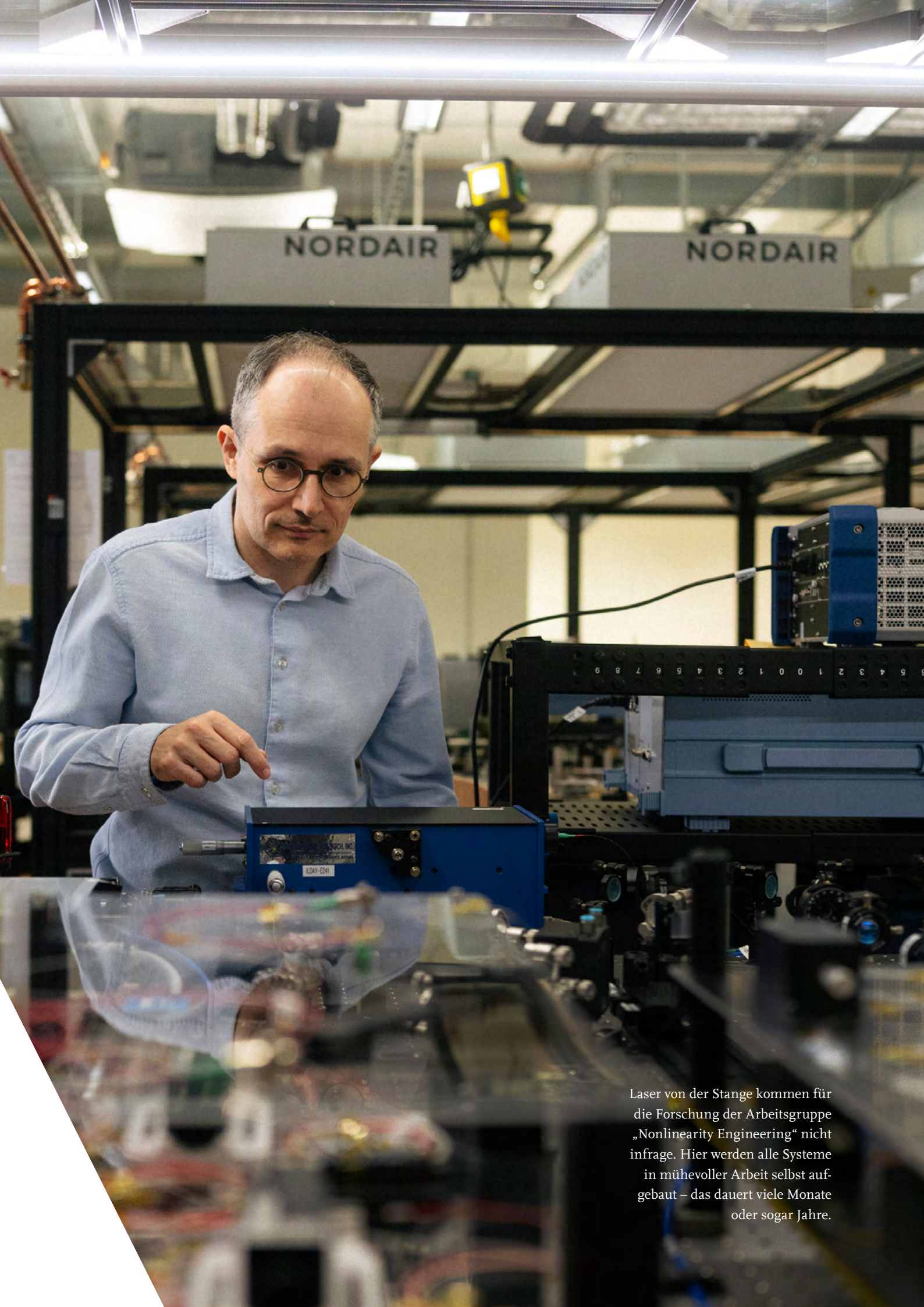
Im Rahmen einer renommierten Humboldt-Professur kam Ömer Ilday 2023 aus Ankara an die Fakultät für Elektrotechnik der Ruhr-Universität Bochum. Er ist Spezialist für Laser-Entwicklung und Laser-Materie-Wechselwirkungen und Gründer des Center for Complex Interactions an der Ruhr-Universität. Das Schlüsselwort in seiner Forschung lautet Selbstorganisation. Ilday ergründet die Prinzipien, nach denen sich die Bestandteile eines Systems von allein in eine Struktur organisieren, welche ein anderes Verhalten zeigt als die Einzelteile – seien das Lichtteilchen in einem Laser, Atome in einem Material oder Zellen in einem Organismus.

„Seit meinem zweiten Semester im Studium fasziniert mich das Prinzip der Selbstorganisation“, erzählt Ömer Ilday. „Die Tatsache, dass Selbstorganisation in der Natur auftritt, beweist, dass sie möglich ist.“ Die zugrunde liegenden Mechanismen möchte der Forscher verstehen, und sie auf neue Anwendungen übertragen.

Die Natur organisiert sich selbst: Aus einzelnen Zellen wird etwa ein Organismus. Forschende übertragen die Prinzipien der Selbstorganisation auf technische Anwendungen. Sie wollen einen atomaren 3D-Drucker entwickeln.

i CENTER FOR COMPLEX INTERACTIONS

Die Aufgabe des Center for Complex Interactions, kurz CCI, besteht darin, das grundlegende Verständnis, die Vorhersage und die Steuerung nichtlinearer, rückkopplungsgetriebener komplexer Wechselwirkungen in physikalischen, biologischen und technischen Systemen zu fördern. Es bringt Forschende aus Physik, Ingenieurwissenschaften, Chemie und verwandten Disziplinen zusammen. Sie ergründen, wie komplexe Wechselwirkungen für die Entwicklung neuer Materialien, Fertigungsprozesse und Technologien genutzt werden können. Das Center ist ein Schlüsselement des Potenzialbereichs „Engineering Complexity“, der Teil des gemeinsamen Exzellenzstrategieantrags für das „Ruhr Innovation Lab“ der Ruhr-Universität Bochum und der TU Dortmund ist.



Laser von der Stange kommen für die Forschung der Arbeitsgruppe „Nonlinearity Engineering“ nicht infrage. Hier werden alle Systeme in mühevoller Arbeit selbst aufgebaut – das dauert viele Monate oder sogar Jahre.

Die gesamte Forschung in Ildays Arbeitsgruppe „Nonlinearity Engineering“ dreht sich um Laser, also Quellen, die sehr energiereiches, gebündeltes Licht erzeugen – und sich mithilfe der Selbstorganisation optimieren lassen könnten. Viele Gruppen weltweit suchen nach Möglichkeiten, Laser leistungsstärker und schneller zu machen, wobei schneller bedeutet, dass sie Lichtpulse in immer kürzeren Abständen aussenden. Ein Ansatz dafür ist, ein bestimmtes Bauteil des Lasers, den sogenannten Resonator, immer kleiner zu machen. Aber irgendwann ist eine physikalische Grenze für den kleinstmöglichen Resonator erreicht. „Außerdem ist es sehr schwer, hohe Energien mit kleinen Resonatoren zu erzielen“, so Ilday.

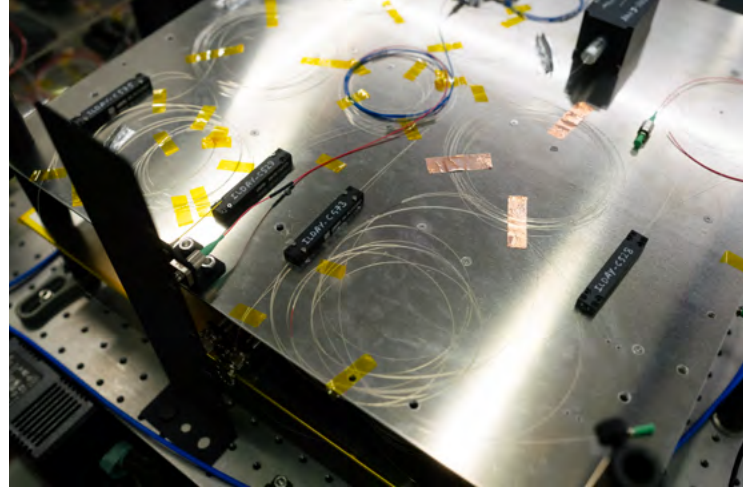
Die Bochumer Forschenden erzeugen ultrakurze Laserpulse nicht mit möglichst kleinen Resonatoren, sondern mithilfe von Selbstorganisation. Sie nutzen einen relativ großen Resonator, in dem sich das Lichtfeld in eine Sequenz von Pulsen mit regelmäßigen Abständen organisiert – wie Perlen auf einer Kette, die sich durch die Zeit erstreckt, nicht durch den Raum. Die einzelnen Lichtperlen treten schließlich in Form von kurzen energiereichen Lichtpulsen aus dem Laser aus.

i RESONATOR

Der Resonator eines Lasers besteht aus zwei gegenüberliegenden Spiegeln, von denen einer halbdurchlässig ist. Lichtteilchen, die im Resonator erzeugt und verstärkt werden, bewegen sich im Resonator umher und durchlaufen dabei immer wieder ein Lasermedium, in welchem sie Atome anregen und zur Emission weiterer Lichtteilchen bringen. Dadurch nimmt die Anzahl der Lichtteilchen lawinenartig zu. Ein Teil des so verstärkten Lichts tritt durch den halbdurchlässigen Spiegel als Laserstrahl aus.

Aus dem Nichts versammeln sich Lichtteilchen allerdings nicht an bestimmten Orten. „Wenn man den Laser einschaltet, sind sie erst einmal zufällig verteilt“, erklärt Ömer Ilday. „Wir bauen in unser System gewisse Regeln ein, die dazu führen, dass die Lichtteilchen sich selbst in die gewünschte Struktur organisieren. Wie das gelingen kann, in diese Frage investieren wir eine Menge Hirnschmalz.“

Ömer Ildays Team baut in den Laser ein nicht-lineares Gatter ein: Schwaches Licht, das das Gatter passiert, erleidet hohe Verluste, starkes Licht weitaus geringere. „Man kann es sich wie eine Absperrung vorstellen, die einzelne Personen nicht überwinden können“, vergleicht der Forscher. „Wenn aber eine Gruppe von Leuten gegen die Absperrung drückt, können sie sie durchbrechen.“ Das System gehorcht vereinfacht gesagt zwei Regeln. Erstens: Schwaches Licht wird an dem nicht-linearen Gatter stark gedämpft, während intensives Licht mit deutlich geringeren Verlusten passieren kann. Zweitens: Der Laser füllt das verbleibende Licht kontinuierlich über sein Verstärkungsmedium wieder auf, sodass stärkere Impulse bevorzugt aufrechterhalten werden.



In Ömer Ildays Labor wird statt von Friday (Freitag) scherzhaft gern vom Fryday (Brutzeltag) gesprochen. Denn die Laser werden zu so starken Leistungen gepusht, dass auch mal ein paar Komponenten durchschmoren. Die hier gezeigte Metallkonstruktion soll die entstehende Hitze aus den Fasern ableiten.

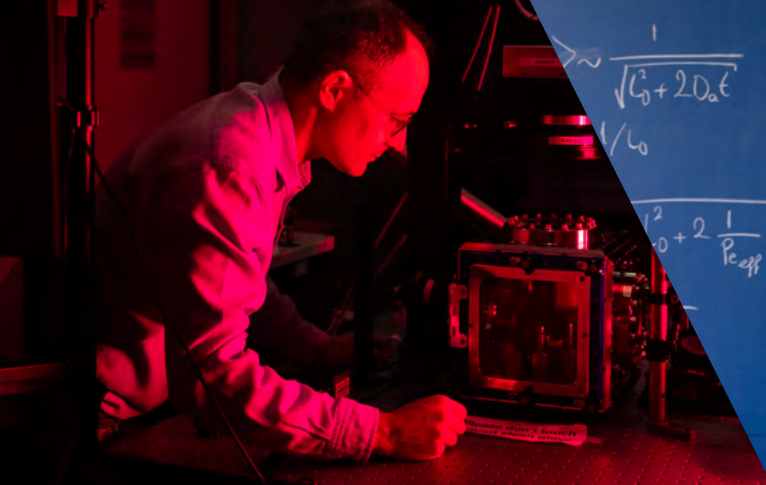
Im Laser-Resonator stehen die Lichtteilchen niemals still; sie drehen ihre Runden und gelangen dabei immer wieder an das nicht-lineare Gatter. Wenn Schwankungen zu einer lokal höheren Lichtintensität führen, erleidet dieser Teil des Lichts geringere Verluste am nicht-linearen Gatter und wird bevorzugt verstärkt. Verteilte Lichtteilchen werden weitgehend ausgelöscht. Durch diese Rückkopplung organisiert sich das Lichtfeld selbst zu kurzen, intensiven Pulsen, die sich in regelmäßigen Abständen wiederholen.

Das Zauberwort für diesen Prozess der Selbstorganisation lautet Feedback. Denn das Ergebnis – in diesem Fall die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Lichtteilchen die Barriere passieren kann – ist abhängig von vorherigen Ereignissen – nämlich davon, ob mehrere Lichtteilchen sich als Kollektiv zusammengeschlossen haben.

Schnell und leistungsstark – aber auch stabil?

Ein Ultrakurzpuls laser, der auf einem solchen Prinzip basiert, wäre nicht nur potenziell schneller als Systeme, die auf besonders kleine Resonatoren setzen, sondern könnte auch leistungsstärker sein. Wobei die Forschenden bei der praktischen Umsetzung gelegentlich auf Hürden stoßen. „Wir bauen unsere Lasersysteme alle selbst und treiben sie zu immer höherem Leistungsvermögen an“, erzählt Ömer Ilday. „Die Energien sind teils so hoch, dass sich die Technik selbst grillt – das ist normal und gehört dazu. Aber man muss aufpassen, dass es keine Kettenreaktion gibt, die einem ein Bauteil nach dem anderen killt.“

Aber nicht nur die technische Realisierung der Konzepte ist eine Herausforderung. Die Idee, eine große Zahl ultrakurzer Pulse innerhalb desselben Resonators zu erzeugen, gibt es schon seit Jahrzehnten, und genauso lange beißen sich Forschungsgruppen weltweit bereits die Zähne daran aus. Denn das Timing und die Wechselwirkungen zwischen den Pulsen lassen sich nur schwer stabilisieren, und bislang funktionieren die Systeme nicht über längere Zeiträume zuverlässig. „Ich denke, dass wir dieses Problem zeitnah in den



In dieser Kammer erproben die Forschenden die Grundlagen eines atomaren 3D-Druckers. Ein Laserstrahl wird in zwei Bündel aufgeteilt, die auf ihrem Weg zur Kammer unterschiedlich modifiziert werden. Das eine Bündel verdampft die Atome eines festen Materials, während das andere Bündel steuern soll, wie sich die verdampften Atome neu anordnen.

Griff bekommen werden“, prognostiziert Ömer Ilday. „Wir haben bereits deutliche Fortschritte erzielt.“

Mittlerweile konzentriert sich Ömer Ildays Forschung nicht mehr nur auf Laser, sondern auch auf die Wechselwirkungen zwischen Lasern und Materie – eine Idee, auf die ihn seine Frau und Kooperationspartnerin Serim Ilday brachte. Die Prinzipien der Selbstorganisation sind dabei die gleichen wie im Laser selbst: Feedback, Nichtlinearität oder Fluktuationen im Rauschen spielen eine große Rolle. Zudem ist eine hierarchische Organisation wichtig; mehrere Ebenen der Selbstorganisation führen letztendlich zu komplexem Verhalten. Im Fall des oben beschriebenen Lasersystems sorgt beispielsweise eine Hierarchie-Ebene dafür, dass sich Lichtteilchen zu einem bestimmten Zeitpunkt versammeln, eine weitere Hierarchie-Ebene bewirkt, dass sie sich in gleichen Abständen wie an einer Kette aufreihen.

Hat man die grundlegenden Prinzipien der hierarchischen Selbstorganisation in einem System verstanden, kann man sie auf ein anderes System übertragen. Und genau daran arbeiten die Gruppen von Serim und Ömer Ilday nun, um den atomaren 3D-Drucker zu realisieren.

Ein Becher Kaffee wird in ihren Laboren sicher nicht so schnell aus dem Nichts auftauchen. Aber darum geht es den beiden auch nicht: „Wir wollen nichts Bestimmtes drucken“, sagt Ömer Ilday. „Uns interessieren die wissenschaftlichen Fragen, die wir stellen müssen, um den atomaren 3D-Drucker eines Tages Wirklichkeit werden zu lassen: Was braucht es, damit es möglich ist, und wo sind physikalische Grenzen?“ Ildays Herz schlägt dabei für die Theorie, die Formeln. „Mein Job ist mein Hobby und mein Hobby ist mein Job – ich liebe, was ich tue, und bin sehr dankbar dafür, dass ich die Möglichkeit dazu habe“, schwärmt er. „Jeden Tag, an dem ich über die Konzepte der Selbstorganisation nachdenken und mich mit den Formeln beschäftigen kann, bin ich ein glücklicher Mensch.“

Text: jwe, Fotos: tk

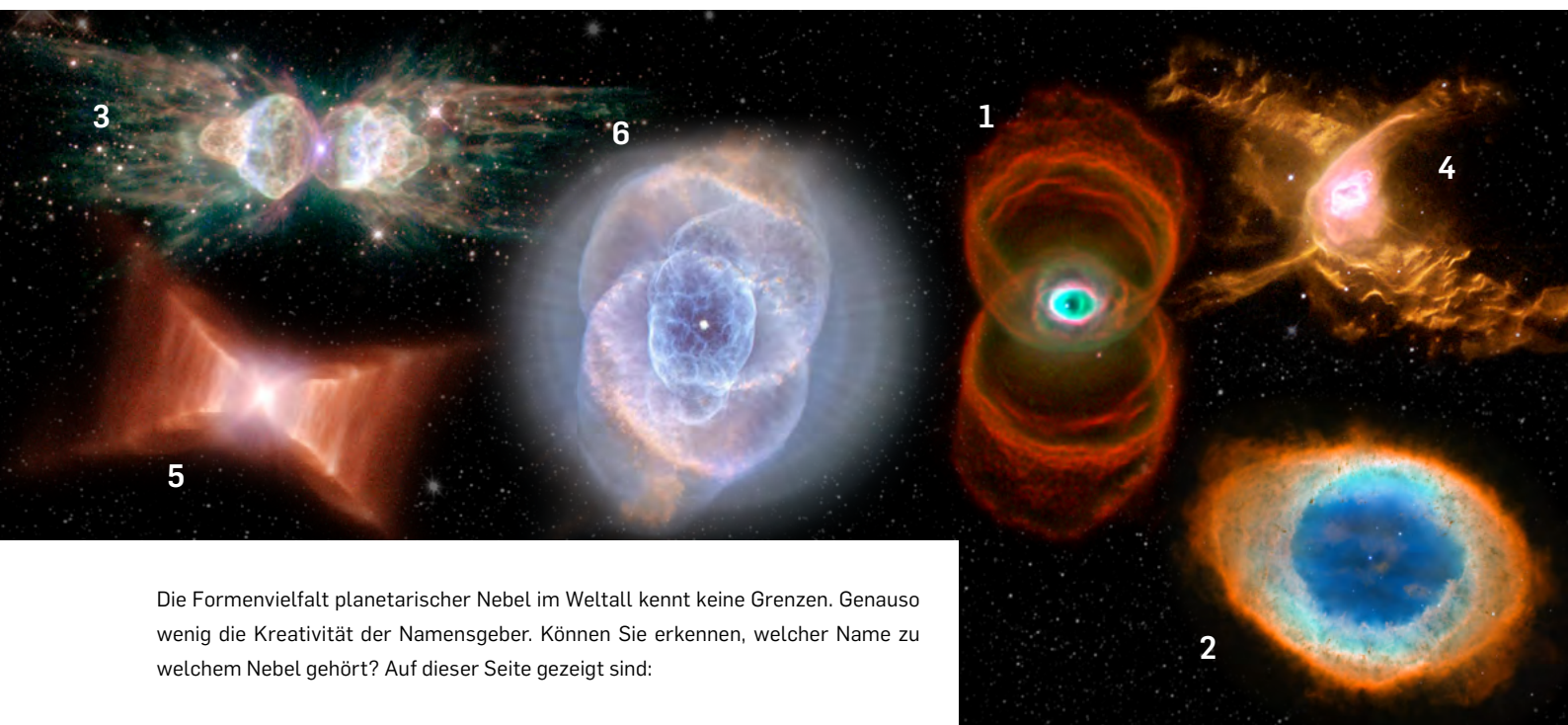
Ömer Ilday wechselte gemeinsam mit seiner Frau Serim Ilday, Leiterin des „Simply Complex Lab“, an die Ruhr-Universität Bochum. Dort, wo die Forschungsbereiche der beiden aufeinandertreffen, entstehen visionäre Projekte wie der atomare 3D-Drucker.

”
DIE TATSACHE,
DASS SELBST-
ORGANISATION
IN DER NATUR
AUFTRITT,
BEWEIST,
DASS SIE
MÖGLICH IST.



Ömer Ilday

REDAKTIONSSCHLUSS



Die Formenvielfalt planetarischer Nebel im Weltall kennt keine Grenzen. Genauso wenig die Kreativität der Namensgeber. Können Sie erkennen, welcher Name zu welchem Nebel gehört? Auf dieser Seite gezeigt sind:

- | | |
|----------------------|-------------------------|
| a) Katzenaugen-Nebel | d) Stundenglas-Nebel |
| b) Ameisen-Nebel | e) Ring-Nebel |
| c) Rote-Spinne-Nebel | f) Rotes-Rechteck-Nebel |

Die Formen der Nebel sind übrigens keine reinen Zufallsprodukte. Aus manchen Strukturen können Forschende Rückschlüsse auf Vorgänge ziehen, die zur Entstehung der Nebel geführt haben. Mehr dazu auf Seite 48.

Lösungen unten auf dieser Seite.

Aufnahmen:

- 1) Raghvendra Sahai and John Trauger (JPL), the WFPC2 science team, and NASA/ESA
- 2) NASA, ESA, and C. Robert O'Dell (Vanderbilt University)
- 3) NASA, ESA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA); Acknowledgment: R. Sahai (Jet Propulsion Lab) and B. Balick (University of Washington)
- 4) ESA & Garrelt Mellema (Leiden University, the Netherlands)
- 5) NASA/ESA, Hans Van Winckel (Catholic University of Leuven, Belgium) and Martin Cohen (University of California, USA)
- 6) NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

IMPRESSUM

HERAUSGEBER: Rektorat der Ruhr-Universität Bochum in Verbindung mit dem Dezernat Hochschulkommunikation der Ruhr-Universität Bochum (Hubert Hundt, vi.S.d.P.)

WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT: Prof. Dr. Birgit Aпитzsch (Sozialwissenschaft), Prof. Dr. Thomas Bauer (Fakultät für Wirtschaftswissenschaft), Prof. Dr. Christoph Bühnen (Sportwissenschaft), Prof. Dr. Elena Enax-Krumova (Medizin), Prof. Dr. Anna Franckowiak (Physik und Astronomie), Prof. Dr. Constantin Goschler (Geschichtswissenschaften), Prof. Dr. Markus Kaltenborn (Jura), Prof. Dr. Kristina Liefke (Philosophie und Erziehungswissenschaft) Prof. Dr. Günther Meschke (Prorektor für Forschung und Transfer), Prof. Dr. Martin Muhler (Chemie), Prof. Dr. Ines Mulder (Geowissenschaft), Prof. Dr. Franz Narberhaus (Biologie), Prof. Dr. Nils Pohl (Elektro- und Informationstechnik), Prof. Dr. Tatjana Scheffler (Philologie), Prof. Dr. Sabine Seehagen (Psychologie), Prof. Dr. Roland Span (Maschinenbau), Prof. Dr. Marc Wichern (Bau- und Umweltingenieurwissenschaft), Prof. Dr. Peter Wick (Evangelische Theologie)

REDAKTIONSANSCHRIFT: Dezernat Hochschulkommunikation, Redaktion Rubin, Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum, Tel.: 0234/32-25228, rubin@rub.de, news.rub.de/rubin

REDAKTION: Dr. Julia Weiler (jwe, Redaktionsleitung); Meike Drießen (md); Dr. Lisa Bischoff (lb); Raffaella Römer (rr)

FOTOGRAFIE: Damian Gorczany (dg), Schiefersburger Weg 105, 50739 Köln, Tel.: 0176/29706008, damiangorczany@yahoo.de, www.damiangorczany.de; Tim Kramer (tk) und Katja Marquard (km), Agentur für Markenkommunikation, Ruhr-Universität Bochum

COVER: Adobe Stock, irinakuz9

BILDNACHWEISE INHALTSVERZEICHNIS: Teaserfoto für Seite 12: Adobe Stock, Kara; Seite 34: Hermann Kohlstedt; Seite 56, 62: RUB, Tim Kramer

GRAFIK, ILLUSTRATION, LAYOUT UND SATZ:

Agentur für Markenkommunikation, Ruhr-Universität Bochum, www.einrichtungen.rub.de/de/agentur-fuer-markenkommunikation. Bei der Bearbeitung einzelner Motive kam generative KI (Adobe Firefly) zum Einsatz.

DRUCK: Kern GmbH, In der Kolling 120, 66450 Bexbach, kerndruck.de, info@kerndruck.de

ANZEIGEN: Dr. Julia Weiler, Dezernat Hochschulkommunikation, Redaktion Rubin, Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum, Tel.: 0234/32-25228, rubin@rub.de

AUFLAGE: 3.700

BEZUG: Rubin erscheint zweimal jährlich und ist erhältlich im Dezernat Hochschulkommunikation der Ruhr-Universität Bochum. Das Heft kann kostenlos abonniert werden unter news.rub.de/rubin/abo. Das Abonnement kann per E-Mail an rubin@rub.de gekündigt werden.

ISSN: 0942-6639

Nachdruck bei Quellenangabe und Zusenden von Belegexemplaren

Die nächste Ausgabe von RUBIN erscheint am 1. Dezember 2026.