

# RUBIN

WISSENSCHAFTSMAGAZIN



## ALLES NUR GEKLAUT?

Stibitzt: Nährstoffklau unter Bakterien

Abgesaugt: Sterne mopsen Materie

Umgedeutet: Narrative und Macht

# WACHSENDE SCHALTKREISE FÜR NEUE COMPUTER

Wer einen klassischen Computer bauen will, entwirft zunächst einen Schaltplan und verdrahtet die elektronischen Komponenten dann streng nach Konzept. Es gibt jedoch Rechenmaschinen auf diesem Planeten, die auf ganz andere Weise entstehen: biologische Nervensysteme. Die Natur zeigt, dass auch aus lokalen Regeln, Fluktuationen und millionenfachen Wechselwirkungen funktionierende Netzwerke erwachsen können. Genau diese Prinzipien wollen Forschende um Prof. Dr. Karlheinz Ochs an der Ruhr-Universität Bochum für neue elektronische Systeme nutzbar machen. „Die Natur ist sehr effizient darin, Intelligenz selbstständig und ohne großen Energieaufwand hervorzubringen“, sagt Ochs vom Lehrstuhl für Digitale Kommunikationssysteme.

Statt auf immer größere, energiehungrigere Rechenzentren zu setzen, erforscht Ochs eine andere Richtung: elektronische Systeme, die Struktur, Speicher und Rechenprozess enger miteinander verschränken und energieeffizient arbeiten. Solche Architekturen könnten besonders bei komplexen Optimierungsaufgaben von Vorteil sein. Also dort, wo klassische digitale Rechner viel Aufwand treiben müssen.

Der Schlüssel für die Realisierung solcher Systeme ist, zu verstehen, wie die Natur mit physikalischen Prozessen rechnet. Dabei helfen Modellorganismen – und selbst von einfachen Kreaturen lässt sich viel lernen. Obwohl der Schleimpilz *Physarum* ein einfacher einzelliger Organismus ist, kann er einen Weg durch ein Labyrinth finden. „Rechnen beginnt hier schon auf der Ebene von Material, Fluss und Rhythmus – ganz ohne Nervenzellen“, sagt Ochs.


## Von einzelligen zu komplexeren Modellorganismen

Auch der Fadenwurm *C. elegans* mit seinen nur 302 Nervenzellen lieferte dem Forscher wichtige Erkenntnisse. Er erstellte einen digitalen Zwilling des Systems, der ihm erlaubte, Netzwerke im Modell zu verändern und so Beziehungen zwischen Struktur und Funktion systematisch zu untersuchen. Auch für die Hydra, einen Süßwasserpolyphen, interessierte sich der Wissenschaftler, weil ihr Nervensystem sich immer wieder erneuert, was zeigt, wie trotz eines ständigen Umbaus Funktion erhalten bleiben kann.

Gemeinsam mit dem Biologen Prof. Dr. Robin Hiesinger von der Freien Universität Berlin untersucht Karlheinz Ochs derzeit die Entwicklung des visuellen Systems der Fruchtfliege *Drosophila*. Die beiden interessieren sich dafür, wie sich ▶

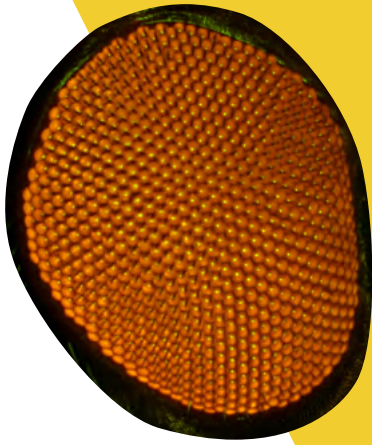
*Elektronik, die ohne vorgegebenen Schaltplan von allein in funktionale Strukturen wächst – die Natur macht vor, wie es geht.*

Mit diesem Organismus fing alles an: Der erste digitale Zwilling, den Karlheinz Ochs erstellte, repräsentierte einen Schleimpilz. (Foto: Karlheinz Ochs)

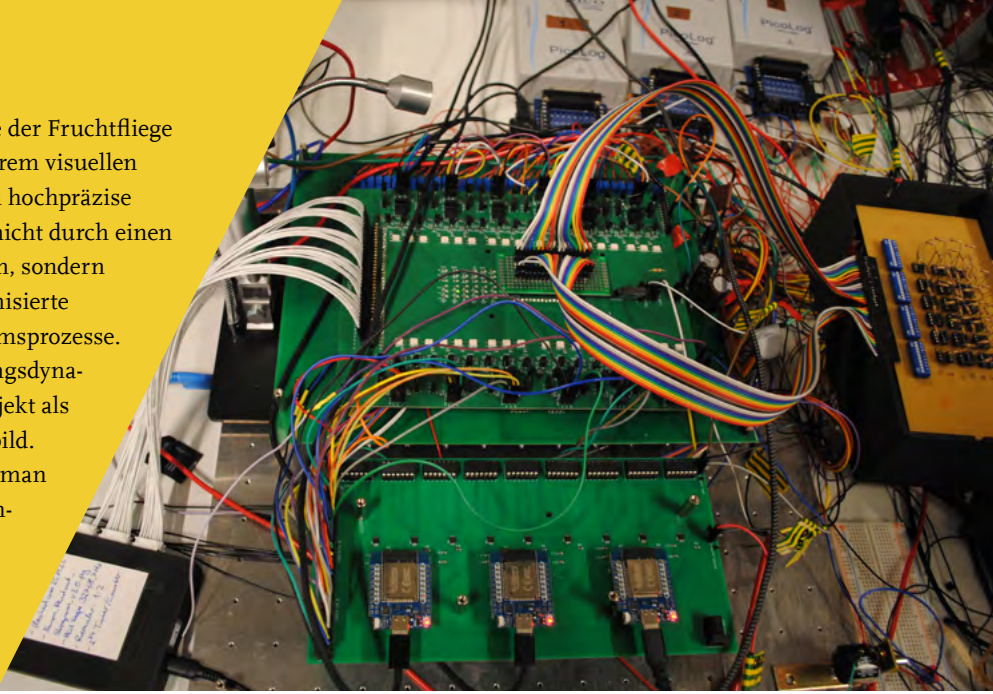
A close-up photograph of a piece of weathered wood. The wood is dark brown and has several holes. On the surface of the wood, there are several large, bright yellow, fuzzy patches. These patches are interconnected by a fine, white, web-like network of fibers. The overall appearance is that of a biological growth, possibly a type of fungus or lichen.

” ICH GLAUBE,  
WIR STEHEN AM  
ANFANG EINER  
NEUEN KLASSE  
INTELLIGENTER  
SYSTEME. “

Karlheinz Ochs



Das Facettenauge der Fruchtfliege *Drosophila*: In ihrem visuellen System entstehen hochpräzise Verschaltungen nicht durch einen zentralen Bauplan, sondern durch selbstorganisierte axonale Wachstumsprozesse. Diese Entwicklungsdynamik dient im Projekt als biologisches Vorbild. (Bild: Ayse Kahraman und Robin Hiesinger, Division of Neurobiology, FU Berlin)



Diese Ising-Maschine konstruierten Kieler Materialwissenschaftler gemeinsam mit dem Bochumer Team. (Foto: Hermann Kohlstedt)

die Sehsinneszellen des Auges ohne zentralen Plan mit den Nervenzellen des Gehirns verdrahten. Es geht ihnen nicht um ein Abbild des Facettenauges selbst, sondern um die Dynamik, mit der sich die Verschaltung zwischen Sinneszellen und nachgeschalteten Nervenzellen entwickelt. Diesen Prozess wollen die Forschenden mathematisch beschreiben, elektrisch nachbilden und als digitalen Zwilling emulieren.

„Wenn wir alle diese Beispiele zusammennehmen, sehen wir, dass biologische Systeme nicht nur mit Signalen rechnen, sondern zum Beispiel auch mit Materialzuständen, Rhythmen oder Schwankungen“, sagt Ochs. „Man könnte meinen, dass die Biologie mit ungenauen Bausteinen arbeitet. Das Erstaunliche ist aber, dass daraus hochfunktionale und oft sehr präzise Systeme entstehen. Die Parameterschwankungen, die in der klassischen Elektronik oft als Störung gelten, können in biologischen Systemen funktional sein. Fluktuationen, Variabilität und lokale Ungenauigkeiten helfen dabei, den Lösungsraum zu erkunden. Sie machen Selbstorganisation, Anpassung und das Auffinden günstiger Konfigurationen überhaupt erst möglich.“

Diese Prinzipien möchte sich Karlheinz Ochs' Gruppe zunutze machen. Sie besetzt dabei eine Schnittstelle zwischen Biologie und Materialwissenschaft. „Diese Disziplinen sprechen nicht die gleiche Sprache“, sagt der Bochumer Forscher. „Wir leisten die Übersetzungsarbeit.“

Das Team überführt biologische Prozesse zunächst in mathematische Modelle, oft in Form von Differentialgleichungen. Daraus leiten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler gleichwertige elektrische Ersatzschaltungen ab. Mithilfe der sogenannten Wellendigital-Emulation lassen sich diese Schaltungen anschließend als digitale, energetisch konsistente Echtzeitmodelle umsetzen. Es entstehen virtuelle Bauteile, die mit realer Hardware gekoppelt werden können – ein Verfahren, das als Emulation bezeichnet wird.

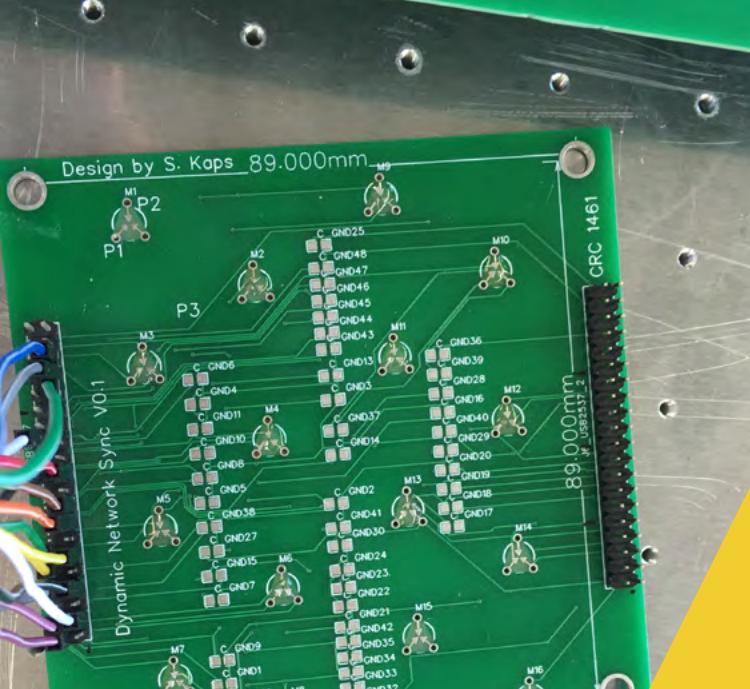
### i EMULATION VS. SIMULATION

Eine Simulation berechnet das Verhalten eines Systems numerisch. Eine Emulation geht einen Schritt weiter: Sie ersetzt eine reale Komponente durch ein Modell, das sich gegenüber der übrigen Hardware möglichst so verhält wie das Original. Wellendigital-emulierte Schaltungen können dabei oft in Echtzeit laufen und direkt in größere elektronische Umgebungen eingebunden werden

In der Emulation kann das Team etwa untersuchen, wie sich veränderte Materialparameter oder unterschiedlich starke Kopplungen zwischen Bauteilen auf das Verhalten eines Netzwerks auswirken. Das Ergebnis sehen die Forschenden in Echtzeit. So können sie schnell diverse Parameter durchspielen und vielversprechende Konfigurationen für die erdachte Komponente finden.

### Kooperation mit Materialwissenschaft

Manchmal bringt die Emulation besondere Wünsche hervor, zum Beispiel, dass Materialien mit bestimmten Eigenschaften benötigt werden. Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 1461 Neuroelektronik arbeitet Karlheinz Ochs mit Materialwissenschaftler Prof. Dr. Hermann Kohlstedt von der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel zusammen. Desse Team entwickelt Werkstoffe, mit denen die von der Natur abgeschauten Prozesse elektrotechnische Realität werden können. Derzeit erweitern die beiden Wissenschaftler gemeinsam eine bereits aufgebaute Ising-Maschine, ein Computersystem, das darauf spezialisiert ist, bestimmte kombinatorische Optimierungsprobleme in die Dynamik eines physikalischen Systems zu übersetzen. Es ersetzt zwar keine



Was hier aussieht wie herkömmliche Elektronik, ist eine grundlegend neue Technologie, deren Rechenprinzipien von der Natur abgesehen sind. (Foto: Hermann Kohlstedt)

Professor Karlheinz Ochs ist Forscher am Lehrstuhl für Digitale Kommunikationssysteme an der Ruhr-Universität Bochum. Er ist fasziniert von den Funktionsmechanismen der Natur. (Foto: privat)

Universalrechner, könnte aber für ausgewählte schwierige Aufgaben energieeffiziente Alternativen bieten.

### Eine neue Klasse intelligenter Systeme

Schlüssel zum Erfolg sind sogenannte memristive Materialien – elektronische Bauelemente, deren Leitfähigkeit von ihrer Strom- und Spannungsgeschichte abhängt. Während gewöhnliche elektronische Kopplungen durch feste Widerstände realisiert werden, verwenden Kohlstedt und Ochs Materialien, in denen sich leitende Pfade dynamisch ausbilden können: Verbindungen wachsen, verschwinden und reorganisieren sich abhängig von ihrer bisherigen elektrischen Aktivität. „Nicht wir Ingenieure entwerfen das optimale Netzwerk. Es entsteht selbst“, erklärt Karlheinz Ochs. Solche Elemente lassen sich modellieren, emulieren und in ersten Hardware-Demonstratoren untersuchen.

Dass die memristiven Elemente im Prinzip funktionieren, hat das Bochumer Team bereits gezeigt. Die Forschenden kombinierten sie mit elektronischen Oszillatoren, also Schaltungen, die rhythmische Aktivität erzeugen. Werden viele solcher Oszillatoren gekoppelt, entstehen kollektive Dynamiken wie Synchronisation oder Clusterbildung. Solche Effekte lassen sich in Demonstratoren bereits für Klassifikations- und Optimierungsaufgaben nutzen.

Langfristig geht es Karlheinz Ochs darum, eine neue Art von Hardware zu entwickeln, die er als neuromorph bezeichnet. Darin sollen Rechnen, Speichern und Anpassungsprozesse enger miteinander verbunden sein als in klassischen Computern. Das ermöglicht neue energieeffiziente Rechenarchitekturen, die Informationen lokal verarbeiten. Dadurch ergeben sich auch Vorteile bei der Datensicherheit, weil eine Cloud-Speicherung nicht mehr nötig wäre, und neue Anwendungsfelder, etwa im medizinischen Bereich der Hirnprothesen. „Ich glaube, wir stehen am Anfang einer neuen Klasse intelligenter Systeme“,

meint Ochs. „In zehn Jahren könnten wir eine Technologie zur Verfügung haben, die nicht mehr vollständig programmiert wird – sondern wächst und sich anpasst. Vielleicht sprechen wir dann nicht mehr von künstlicher, sondern von physikalischer Intelligenz.“

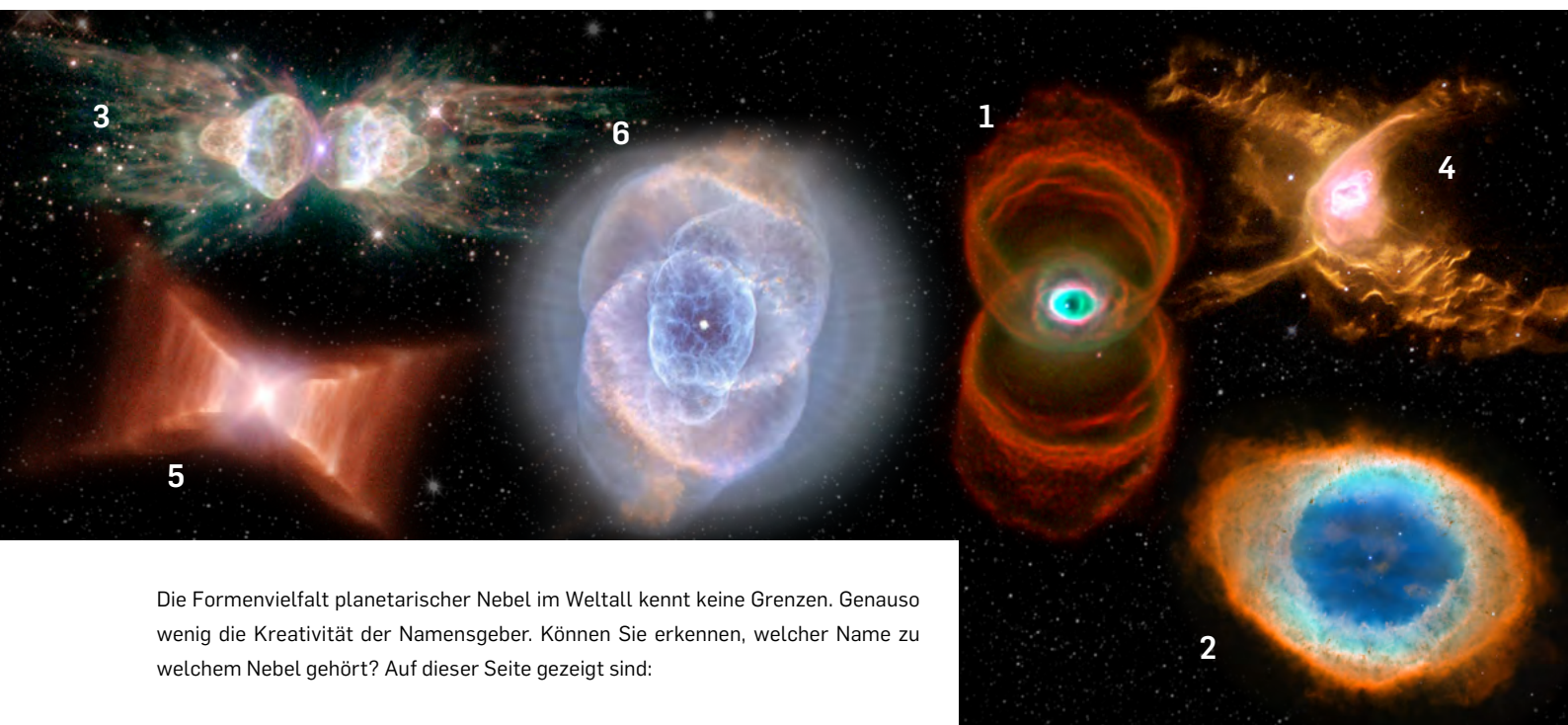
„Egal, ob wir von Schleimpilzen, Hydra oder memristiven Materialien sprechen: Es geht letztendlich immer darum, dass Rechnen nicht nur in Programmen stattfindet, sondern auch in Material, Struktur und Dynamik“, resümiert Karlheinz Ochs. Diese Forschung begeistert ihn: „Wenn ein Netzwerk plötzlich ein Muster erkennt, eine optimale Lösung findet oder seine Struktur selbst reorganisiert – ohne dass jemand es explizit dafür programmiert hat – dann merkt man, dass etwas Grundlegendes passiert. Es fühlt sich an wie eine Entdeckungsreise zum natürlichen Ursprung von Intelligenz.“

jwe

### i GEMESYS

Einige der im Forschungsumfeld entwickelten Ideen zu neuartigen, vom Gehirn inspirierten Rechnerarchitekturen werden inzwischen auch unternehmerisch weitergedacht. Das Start-up GEMESYS wurde von Doktoranden der Arbeitsgruppe „Digitale Kommunikationssysteme“ der Ruhr-Universität Bochum gegründet. Sie entwickeln eine Computerarchitektur, die vom menschlichen Gehirn inspiriert ist. Das neuartige Chipdesign verspricht eine gesteigerte Rechenleistung bei gleichzeitig geringerem Energieverbrauch im Vergleich zu herkömmlichen Chips. GEMESYS ist eines der erfolgreichsten Start-ups des Worldfactory Start-up Centers der Ruhr-Universität und hat sich bereits in mehreren Wettbewerben durchgesetzt.

# 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.