

# hoch<sup>3</sup>FORSCHEN

Das Medium für Wissenschaft

Sommer 2019



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## Impressum

### Herausgeber

Der Präsident  
der TU Darmstadt

### Redaktion Stabsstelle

Kommunikation und Medien  
der TU Darmstadt:

Jörg Feuck (Leitung, Vi.S.d.P.)  
Ulrike Albrecht (Grafik Design)  
Patrick Bal (Bildredaktion)

### Gestalterische Konzeption

conclouso GmbH & Co. KG, Mainz

### Titelbild Katrin Binner

### Druck Druckerei Petzold,

Darmstadt  
gedruckt auf 100 g/m<sup>2</sup>  
PlanoScript, FSC-zertifiziert

### Auflage 5.000

Nächste Ausgabe  
15. September 2019

### Leserservice

presse@pvw.tu-darmstadt.de

ISSN 2196-1506



Möchten Sie die nächste Ausgabe der hoch<sup>3</sup>FORSCHEN gerne in digitaler Form erhalten? Dann senden Sie bitte eine E-Mail an [presse@tu-darmstadt.de](mailto:presse@tu-darmstadt.de)

— 1 **Kernphysik**: Verzögerter Beta-Zerfall in Atomkernen — 2 **Informatik**: Simulation neuronaler Netze  
— 3 **Politikwissenschaft**: Klimaschutz mit dem globalen Süden — 4 **Elektrotechnik**: Neue Methoden der Lichtmikroskopie

# Simulierte Synapsen

*Mit einem Trick aus der Astrophysik berechnen Informatiker der TU Darmstadt die Vernetzung der Nervenzellen im Gehirn. Ihr Modell soll Neurochirurgen unterstützen und die Weiterentwicklung der künstlichen Intelligenz antreiben.*

— Von Uta Neubauer

Der Blick in die Sterne hat schon manchen bei der Lösung eines Problems geholfen – nicht nur spirituell angehauchten Zeitgenossen, sondern auch Professor Felix Wolf und seinem Mitarbeiter Sebastian Rinke aus dem Fachbereich Informatik der TU Darmstadt. Die beiden Forscher wollen das menschliche Gehirn, oder genauer, die Vernetzung seiner etwa 100 Milliarden Nervenzellen, berechnen. Kein leichtes Unterfangen, denn jede Nervenzelle verfügt über eine Art Kabel namens Axon mit tausenden Endköpfchen. Sie schütten chemische Botenstoffe aus oder senden elektrische Impulse an andere Neuronen, wie Nervenzellen auch genannt werden. Für den Empfang dieser Signale besitzt jedes Neuron fein verästelte Antennen, die sich mit tausenden Axon-Enden anderer Neuronen zu Synapsen verknüpfen. „Mit der Berechnung eines solchen Netzwerks ist selbst ein Supercomputer überfordert“, sagt Wolf.

**Astrophysiker stehen vor** einem ähnlichen Problem: Unsere Milchstraße etwa zählt mindestens 100 Milliarden Sterne und noch mehr Planeten. Wer die Position eines Himmelskörpers berechnen möchte, muss die von allen anderen ausgehenden Gravitationskräfte berücksichtigen. Da auch diese Rechenaufgabe kein Computer der Welt lösen kann, entwickelten die Astronomen Josh Barnes und Piet Hut schon in den 1980er-Jahren ein Näherungsverfahren. Es vereinfacht die Berechnung, indem es Himmelskörper zu Gruppen zusammenfasst. Man berechnet dann die Wechselwirkungen nicht mehr paarweise, sondern bündelt die Kräfte, die von hinreichend entfernten Objekten ausgehen. „Mit dieser Idee waren wir geimpft und haben die Brücke zu den Neurowissenschaften geschlagen“, sagt Wolf. Zusammen mit Rinke begann er vor fünf Jahren, damals noch an der RWTH Aachen, den Barnes-Hut-Algorithmus für die Berechnung des neuronalen Netzes zu verwenden. Dass zuvor niemand auf diese Idee kam, hat laut Wolf einen Grund: „Neurowissenschaftler reden kaum mit Astrophysikern.“

*„Mit dieser Idee der Astronomen waren wir geimpft und haben die Brücke zu den Neurowissenschaften geschlagen.“*

**Wolf hingegen hat sich nicht** nur von der Sternenkunde, sondern auch von der Hirnforschung inspirieren lassen. Während seiner Zeit an der RWTH Aachen, wo er von 2009 bis 2015 eine Professur innehatte, traf er den Neuroinformatiker Markus Butz-Ostendorf. Ein von ihm maßgeblich mitentwickeltes Computermodell simuliert die Vernetzung von Neuronen und beschränkt sich dabei nicht – wie bisherige Modelle – auf die Verstärkung oder Abschwächung bestehender Synapsen, sondern berechnet zudem neue Verknüpfungen. Diese bilden sich selbst im erwachsenen Gehirn ständig.

**Der neue Ansatz geht davon aus**, dass die Neuronen ein bestimmtes Aktivitätslevel anstreben: Spüren sie zu wenig Input, bilden sie mehr Synapsen. Sind sie überreizt, kappen sie Kontakte. Untersuchungen an Mäusen bestätigten die Aussagekraft des Modells. Mehr als 100.000 Neuronen, der Hirngröße einer Fruchtfliege entsprechend, kann es allerdings nicht verarbeiten, denn der Aufwand wächst quadratisch mit der Zahl der Nervenzellen. Das heißt: Für die doppelte Anzahl dauert die Rechnung schon viermal so lange. Für die fast 100 Milliarden Neuronen des menschlichen Gehirns steigt der Aufwand ins Unermessliche.

**Hier kommt der** Barnes-Hut-Algorithmus ins Spiel, allerdings in abgewandelter Form, wie Rinke erklärt: „Anders als die Astrophysiker berechnen wir keine Kräfte, sondern Verbindungswahrscheinlichkeiten.“ Das ursprüngliche Hirnmodell berechnete die Wahrscheinlichkeit der Synapsenbildung immer für jeweils zwei Neuronen. Das modifizierte Modell hingegen teilt die Nervenzellen zunächst in Gruppen ein und kalkuliert die Verbindungswahrscheinlichkeit eines Neurons zu einer solchen Gruppe. Anschließend zoomt man in die Gruppe hinein, unterteilt sie feiner und wiederholt die Prozedur. „Das mache ich so lange, bis ich wieder zu einzelnen Neuronen komme“, erläutert Rinke. Mit diesem Vorgehen hat er im Rahmen seiner Doktorarbeit ein Netz aus einer Milliarde Nervenzellen – mehr als ein

## Informationen

### Fachgebiet Parallele

### Programmierung

Prof. Dr. Felix Wolf

Telefon: 06151/16-21635

E-Mail:

wolf@cs.tu-darmstadt.de

Dr. Sebastian Rinke

Telefon: 06151/16-21633

E-Mail:

rinke@cs.tu-darmstadt.de

<https://bit.ly/2WgNu4r>

Dr. Sebastian Rinke (li.)  
und Professor Felix Wolf im  
Gebäude des Lichtenberg-  
Hochleistungsrechners der  
TU Darmstadt.



Abbildung: Katrin Birmer

Rattenhirn enthält – simuliert. „Mit Extrapolationen konnten wir zeigen, dass ein hinreichend großer Computer, basierend auf heutiger Technologie, sogar ein Netzwerk aus 100 Milliarden Nervenzellen berechnen kann“, ergänzt Wolf.

**Die Simulation neuronaler Netze** ist von medizinischem Interesse, denn unser Gehirn ist keinesfalls fest verdrahtet: Nach einem Schlaganfall, nach der Amputation von Gliedmaßen, aber auch beim Lernen, Erinnern und vielen anderen Prozessen bilden sich neue Synapsen, während unnütze verschwinden. Ließe sich die Umorganisation vorhersagen, könnten Ärzte Eingriffe am Hirn sowie Therapien von neurologischen Erkrankungen optimieren. Denn Zeitpunkt und Umfang der Behandlung eines Schlaganfallpatienten etwa ließen sich besser planen, wenn man genauer wüsste, wie und in welchem Tempo sich das Gehirn selbst repariert. Neurochirurgen wiederum könnten bei Operationen jene Hirnareale besonders schonen, die sich schlecht regenerieren. Noch sei die klinische Anwendung des Modells aber eine Vision, betont Wolf: „Wir müssen erst einmal herausfinden, wie sich unsere Simulationen zu Patientendaten verhalten.“ Die Darmstädter Informatiker planen bereits eine Zusammenarbeit mit klinischen Partnern, um ihre Berechnungen mit Gehirnschans von Patienten vor und nach einer Operation abzugleichen.

**Die Weiterentwicklung** der künstlichen Intelligenz soll das Modell zukünftig ebenfalls antreiben. „Das Netzwerk in unserem Gehirn ist entscheidend für unsere Lernfähigkeit“, sagt Wolf, „und wenn man die Vernetzung besser versteht, könnte man biologisch inspirierte Lernprozesse und künstliche neuronale Netze optimieren.“ Das sei aber ebenfalls erst eine grobe Idee. Von den potenziellen Anwendungen abgesehen geht es in der Hirnsimulation ohnehin vor allem um eins: um ein tieferes Verständnis der Vorgänge in unserem wichtigsten Organ.

*Die Autorin ist Wissenschaftsjournalistin und promovierte Chemikerin.*

#### Parallele Programmierung

Professor Felix Wolf leitet das Fachgebiet Parallele Programmierung im Fachbereich Informatik der TU Darmstadt. Sein Team entwickelt unter anderem Programme für komplexe Rechenaufgaben, die mehr als einen Prozessor benötigen. Für die Simulation des Netzwerks aus einer Milliarde Neuronen nutzte Sebastian Rinke 250.000 Prozessoren auf einem Supercomputer des Forschungszentrums Jülich. Außerdem führte er Rechnungen auf dem Lichtenberg-Hochleistungsrechner der TU Darmstadt durch. Das sogenannte Grid-Computing hingegen, bei dem verteilte Einzelrechner zu einem virtuellen Supercomputer verknüpft werden, eignet sich in diesem Fall nicht. Da für die Simulation des neuronalen Netzes alle Nervenzellen gleichzeitig betrachtet werden müssen, lässt sich die Rechnung nicht auf verschiedene Arbeitsstationen verteilen. An einem Supercomputer, bei dem die Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Prozessoren eng gekoppelt ist, führt kein Weg vorbei. Die neurowissenschaftlichen Arbeiten der Darmstädter Informatiker werden im Rahmen des Human Brain Project der EU gefördert.

#### Publikationen

S. Rinke et al., A scalable algorithm for simulating the structural plasticity of the brain, *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 120, 251-266 (2018)

S. Rinke et al., Critical periods emerge from homeostatic structural plasticity in a full-scale model of the developing cortical column, 178-200, in: *The Rewiring Brain*, Arjen van Ooyen und Markus Butz-Ostendorf, Academic Press (2017)

# Mehr Power für die grüne Transformation

Internationale Abkommen setzen die Leitplanken, aber die Zukunft unseres Planeten entscheidet sich weitgehend in den Nationalstaaten. Politologen der TU Darmstadt analysieren die Klimaschutzpolitik im globalen Süden.



Abbildung: Katrin Binner

Professor Markus Lederer vom Institut für Politikwissenschaft erforscht Klimapolitik im globalen Süden.

## Informationen

**Arbeitsbereich Internationale Beziehungen**

**Institut für Politikwissenschaft**

Prof. Dr. Markus Lederer

Telefon: 06151/16-57342

E-Mail:

lederer@pg.tu-darmstadt.de

<https://bit.ly/2QbBBat>

— Von Jutta Witte

Klimawandel, Artensterben und Gefährdung der Weltmeere: Von den Folgen der weltweiten Umweltzerstörung sind die Menschen des globalen Südens besonders betroffen. Aber sie zählen auch zu den zentralen Akteuren, die über den Erfolg oder Misserfolg der weltweiten Bemühungen um den Klimaschutz mitentscheiden. Professor Markus Lederer, Leiter des Arbeitsbereichs Internationale Beziehungen an der TU Darmstadt, sieht Entwicklungs- und Schwellenländer nicht nur in der Opferrolle. Denn eine wachsende und immer stärker in globale Konsummuster eingebettete Mittel- und Oberschicht, der Ausbau von Industrie sowie ein extensiver Landraubbau machen sie einerseits zu Mitverursachern des drohenden ökologischen Kollapses. Andererseits entsteht in diesen Staaten gegenwärtig eine Vielzahl von offiziellen Initiativen, die einen nachhaltigen Wandel in der Umweltpolitik vorantreiben sollen.

„Ohne diese Länder werden wir die Klimaproblematik nicht in den Griff bekommen“, betont Lederer. Spätestens seit dem Pariser Abkommen von 2015 sind auch sie völkerrechtlich in der Pflicht, Ziele für eine nachhaltige Klimaschutzpolitik zu formulieren und deren Erreichung kontinuierlich zu überprüfen. „Dies kann den Wandel aber nur anstoßen und es wäre naiv zu glauben, dass ein Klimaabkommen automatisch zu einer besseren Politik führt“, warnt der Experte. Selbst Deutschland könne seine für 2020 gesteckten Klimaschutzziele nicht einhalten. „Und die Länder des globalen Südens befinden sich in einer ungleich komplexeren Lage als wir.“ Wie aber gelingt eine globale Klimaschutzpolitik, die alle ins Boot holt? Lederer und sein Forschungsteam sind überzeugt: Es braucht eine grundlegende grüne Transformation, die Ökologie, Wirtschaft und Soziales umfasst und auf weitreichende Veränderungen in allen Sektoren von der Energieversorgung über die

Landwirtschaft bis hin zur Mobilität hinarbeitet – ein Umbruch, den die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit der industriellen Revolution vergleichen.

**Gemeinsam mit ihrem** Potsdamer Forschungspartner haben sie die Rahmenbedingungen und Umsetzungsstrategien für eine solche Transformation in Indonesien, Indien, Südafrika und Brasilien unter die Lupe genommen. Dabei wollten sie vor allem wissen, wie von der internationalen Ebene ausgehandelte Vereinbarungen und angestoßene Initiativen für den Klimaschutz die Staaten und ihre Verwaltungen sowie die Rolle und das Zusammenspiel unterschiedlicher politischer Ebenen beeinflussen. Zum anderen haben sie die zentral gesteuerte Klima- und Umweltschutzpolitik in Vietnam und Costa Rica untersucht.

**So standen im Fokus** der Forschungen des DFG-Projektes „Globale Klimaschutzinitiativen und der Nationalstaat“ zwei Initiativen mit unterschiedlichen Umsetzungsstrategien. Einmal das inzwischen weitgehend etablierte Konzept REDD+ (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation) zur Reduzierung von Abholzungen und Schädigung von Wäldern. Es setzt als Regulierungsmechanismus „top down“ an und soll über finanzielle Ausgleichsmaßnahmen Anreize geben, die verbliebenen tropischen Waldflächen zu schützen. Demgegenüber fördert das länderübergreifende Netzwerk C40 (Cities Climate Leadership Group), ein Zusammenschluss von mehr als 80 Großstädten und Megacities weltweit, Klimaschutz eher „von unten“, da die Städte dabei mit ihren Projekten potenziell auch die Politik des Zentralstaates beeinflussen können.

**Der Vergleich zwischen** Indonesien, Südafrika, Brasilien und Indien zeigt, dass Mechanismen wie REDD+ den Einfluss von Zentralregierungen wie zum Beispiel der brasilianischen und der indonesischen weiter stärken können, während das C40-Netzwerk zwar in den Metropolen ein „Katalysator“ für einige wenige Klimaschutzinitiativen ist, aber insgesamt kein „Game Changer“ mit Blick auf eine Dezentralisierung oder gar Weiterentwicklung der Klimapolitik. Vor allem aber zeigt sich, dass keine der beiden Strategien der anderen überlegen ist. „Ihre Wirkung hängt ab von den nationalen, regionalen und lokalen Rahmenbedingungen und dabei ganz stark von den handelnden Personen, ihren politischen Möglichkeiten, ihren normativen Vorstellungen und den jeweiligen Eigeninteressen“, betont Chris Höhne, Wissenschaftler am Institut für Politikwissenschaft der TU Darmstadt.

**So fanden zum Beispiel** die Maßnahmen zu einem stärkeren Schutz von Wäldern und Torfmooren

durch REDD+ in der indonesischen Provinz Zentral-Kalimantan ein schnelles Ende, als ein neuer Gouverneur ins Amt kam, dessen Familie stark in den Anbau von Palmölplantagen investierte. Dagegen engagierte sich ein weitblickender Gouverneur in Ost-Kalimantan selbst dann noch für einen starken Ausbau des Waldschutzes als Beitrag zur ökologischen Umorientierung der Provinz, als die nationale Regierung Indonesiens zwischenzeitlich ihre Waldschutzbemühungen zurückfuhr.

**Wie aber setzen Länder**, die den „top down“-Weg wählen, grüne Transformation um? Unter anderem mit dieser Frage befasst sich das Forschungsvorhaben „GreeTS“. So forciert der sozialistische Einparteiensstaat Vietnam, der in Folge eines enormen Wirtschafts- und Bevölkerungswachstums steigenden Umwelt- und Klimaproblemen gegenübersteht, den Wandel im Energiesektor und versucht diesen mit den Zielen eines grünen Wachstums und einer insgesamt nachhaltigeren Entwicklung zu verknüpfen. „Eine ganzheitliche Strategie aber fehlt bislang“, beobachtet Höhne

Forschungskollegin Linda Wallbott. Auch Costa Rica, der demokratische Vorzeigestaat Zentralamerikas, hat sich den Klima-, Umwelt- und Waldschutz auf die Fahnen geschrieben. Trotz erster Erfolge in der Energiepolitik und einer politischen Führung, welche die grüne Agenda unter Einbindung von Wirtschaft und Zivilgesellschaft konsequent mitträgt, bietet „der Blick hinter die Fassade“ ein differenziertes Bild. So wurde zum Beispiel die Abholzung großer Waldflächen für Staudammprojekte gegen den Willen der indigenen Bevölkerung durchgesetzt.

**Beide Projekte zeigen also** nicht nur die komplexe und heterogene Ausgangslage, aus der heraus die Länder des globalen Südens den Klimawandel stemmen müssen. Sie demonstrieren auch, dass es ein global gültiges Patentrezept in der Klimaschutzpolitik nicht gibt. „Der Wandel ist möglich. Aber er verläuft inkrementell und langsam und er ist von starken Akteurs-Konstellationen abhängig“, erklärt Lederer. Ob er gelingt, steht und fällt nach Überzeugung der Fachleute mit der politischen Ökonomie, mit einer über alle Ebenen gut funktionierenden Verwaltungsstruktur, mit einem klaren ökonomischen Nutzen für die betroffenen Länder und mit einem „normativen Wandel in den Köpfen“. Auf der Mikroebene sehen sie viele erfolgreiche Initiativen und zielführende Partnerschaften zwischen Geber- und Nehmerländern. Auf der Makroebene aber fehle bislang der entscheidende Schub für einen wirklich transformativen Umbruch.

*Die Autorin ist Wissenschaftsjournalistin und promovierte Historikerin.*

*„Ohne die Schwellen- und Entwicklungsländer werden wir die Klimaproblematik nicht in den Griff bekommen.“*

#### Kooperationsnetzwerke

Das Projekt „Carbon Governance Arrangements and the Nation State: The Reconfiguration of Public Authority in Developing Countries“ wurde von 2015 bis Ende März 2019 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert. Kooperationspartner der TU Darmstadt ist der Lehrstuhl für Internationale Politik an der Universität Potsdam.

Das Projekt Europe and Green Transformation in the global South (GreeTS) wird bis Ende Juni 2019 von der Volkswagenstiftung, dem Riksbankens Jubiläumsfonds und dem Wellcome Trust finanziert. Unter Federführung der TU Darmstadt beteiligen sich das Tropical Agricultural Research & Higher Education Center (CATIE) in Costa Rica, die School of Oriental and African Studies (SOAS) an der University of London und die Vietnamese Academy of Social Sciences (VASS) in Hanoi an dem Projekt.

#### Weitere Informationen:

[www.politikwissenschaft.tu-darmstadt.de/index.php?id=3561](http://www.politikwissenschaft.tu-darmstadt.de/index.php?id=3561)  
[www.politikwissenschaft.tu-darmstadt.de/index.php?id=3611](http://www.politikwissenschaft.tu-darmstadt.de/index.php?id=3611)

#### Aktuelle Publikationen:

Hickmann, Thomas, Harald Fuhr, Chris Höhne, Markus Lederer, Fee Stehle (2017): „Carbon Governance Arrangements and the Nation-State: The Reconfiguration of Public Authority in Developing Countries“, in: Public Administration and Development 37 (5), S. 331–343.

Lederer, Markus, Linda Wallbott and Frauke Urban (2019 in print): Green Transformations and State Bureaucracy, in Fouquet, Roger (ed.): Handbook on Green Growth, Cheltenham, Edward Elgar.

# Cooler Technik



Abbildung: Katrin Binner

In den Laboren des Fachgebiets Integrierte Mikro-Nano-Systeme verbinden Professor Thomas Burg und sein Team Methoden der Mikrosystemtechnik, Biologie und Chemie.

## Informationen

### Fachgebiet Integrierte Mikro-Nano-Systeme

Prof. Thomas P. Burg, PhD

Telefon: 06151/16-23876

E-Mail: [tburg@micronano.tu-darmstadt.de](mailto:tburg@micronano.tu-darmstadt.de)

<https://bit.ly/2JS3enW>

*Professor Thomas Burg friert lebende Zellen und Organismen ohne Zeitverzögerung unter dem Lichtmikroskop ein. Sein Ziel: eine bessere Verbindung von Licht- und Elektronenmikroskopie.*

— Von Hildegard Kaulen

Der Physiker liebt Extreme. Seine Untersuchungsobjekte sind extrem klein, extrem kalt und extrem schwierig darzustellen. Thomas Burg ist seit einigen Monaten Professor an der TU Darmstadt und leitet das Fachgebiet „Integrierte Mikro-Nano-Systeme“. Er will die Untersuchung zellulärer Prozesse entscheidend voranbringen, denn das Leben ist nicht statisch, sondern dynamisch. Dafür müssen Licht- und Elektronenmikroskopie allerdings noch besser ineinandergreifen als bisher, damit die Vorteile beider Verfahren ohne jede Zeitverzögerung zum Tragen kommen. Dem Europäischen Forschungsrat ERC ist Burgs Forschung in den kommenden fünf Jahren rund zwei Millionen Euro wert.

**Die Lichtmikroskopie** untersucht lebende Zellen und Organismen. Dabei können bestimmte Moleküle gezielt mit Fluoreszenzfarbstoffen markiert und hervorgehoben werden. Allerdings ist die Auflösung der herkömmlichen Fluoreszenz-Lichtmikroskope aufgrund der Wellennatur des Lichts auf etwa 200 Nanometer begrenzt. Zwar kann man seit kurzem mit einem Trick auch höhere Auflösungen erreichen, aber eine detaillierte Strukturaufklärung im Bereich von 0,1 bis 10 Nanometern ist derzeit nur mit der Elektronenmikroskopie möglich. Dafür müssen die Zellen und Organismen fixiert werden. Ganz ohne Schaden gelingt dies nur mit der Kryofixierung. Bei diesem Verfahren werden die Proben blitzschnell auf Temperaturen unter  $-135^{\circ}\text{C}$  gekühlt. Nur so behält das Wasser seine glasartige, ungeordnete Struktur. Die zellulären Strukturen bleiben wegen der ausbleibenden Eisbildung dabei weitestgehend erhalten.

„**Wer dynamische Vorgänge** beobachten will, hat allerdings ein Problem“, sagt Burg, der vor seinem Wechsel an die TU Darmstadt zehn Jahre lang eine Nachwuchsgruppe am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen geleitet hat. „Die im Lichtmikroskop betrachteten Proben müssen für die Kryofixierung umgelagert werden. Es gibt also einen Transferschritt. Der manuelle Transfer dauert manchmal Minuten, je nachdem wie schnell jemand arbeitet. Der automatisierte Transfer dauert ein bis fünf Sekunden. Es bleibt also immer eine zeitliche Lücke zwischen dem letzten Blick auf den dynamischen Prozess im lebenden Objekt unter dem Lichtmikroskop und dem schockgefrorenen Zustand im kryofixierten Objekt. Es fehlt also immer ein Stück der Reaktionskette.“

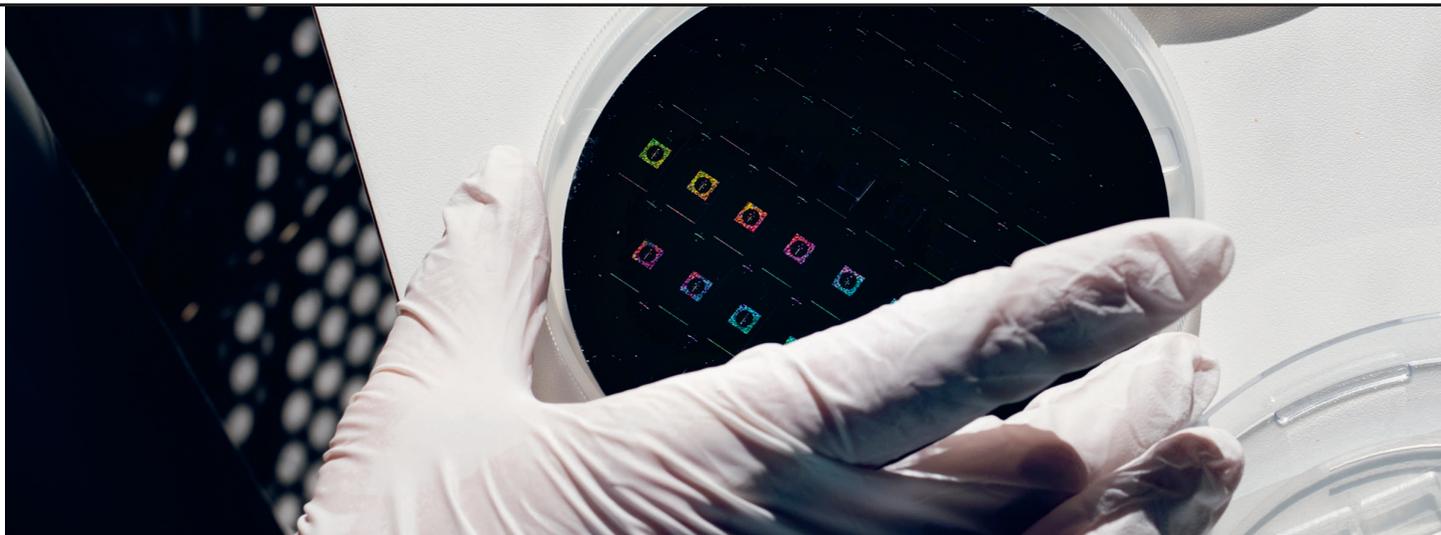


Abbildung: Katrin Binner

Im Reinraum hergestellte Mikrokanäle zum schnellen Einfrieren von Zellen im Lichtmikroskop – hier während eines Zwischenschritts der Fabrikation.

**Burg will die Zellen** und Organismen daher direkt unter dem Lichtmikroskop einfrieren, um sie dann im schockgefrorenen Zustand mit der Licht- und Elektronenmikroskopie zu untersuchen. Dafür muss die Wärme blitzschnell entzogen und die Probe zur weiteren Untersuchung ununterbrochen auf unter  $-135^{\circ}\text{C}$  gekühlt werden, damit sich die Wassermoleküle nicht doch langsam zu Eiskristallen zusammenfinden und die empfindliche Struktur zerstören.

**Burg hat eine wichtige Hürde** auf diesem Weg genommen. Für das Einfrieren unter dem Lichtmikroskop verwendet er Bauelemente aus der Mikrosystemtechnik. Dazu gehört ein elektrisch beheizter Mikrokanal, in dem die Zellen oder Organismen zunächst bei physiologischen Temperaturen beobachtet werden können. Ein unter dem Mikrokanal liegendes Heizelement hat Kontakt zu einem Silizium-Chip, der mit Flüssigstickstoff gekühlt wird. Wenn das Heizelement ausgeschaltet wird, wird die Temperatur blitzschnell über diesen Silizium-Chip abgeleitet. Gleichzeitig friert auch die Probe blitzschnell ein. Dieser Aufbau gibt dem Betrachter die Gelegenheit, die zellulären Prozesse bis zu dem Punkt zu studieren, an dem das Heizelement ausgeschaltet wird und das Temperaturgefälle zwischen Untersuchungsobjekt und Umgebung schlagartig kollabiert und die Proben innerhalb von Millisekunden einfrieren. Anschließend kann das gefrorene Objekt nach entsprechender Vorbereitung auch im Elektronenmikroskop untersucht werden.

**„Durch die Eliminierung** des Transferschritts verbessern wir die Kopplung zwischen Licht- und Elektronenmikroskopie“, sagt Burg. „Aber wir wollen mehr. Wir wollen die kryofixierten Proben auch direkt unter dem Lichtmikroskop betrachten.“ Diese sogenannte Kryo-Lichtmikroskopie steckt allerdings noch in den Kinderschuhen. Eine Herausforderung ist das unvermeidbare Temperaturgefälle zwischen dem Mikroskop bei Raumtemperatur und der auf  $-140^{\circ}\text{C}$  gekühlten Probe. Für die bestmögliche Auflösung muss der Luftspalt zwischen dem Mikroskopobjektiv und der Probe auch mit einer Immersionsflüssigkeit gefüllt werden. Dabei dürfen die empfindlichen Linsen des Objektivs durch die tiefe Temperatur keinen Schaden nehmen, und es darf auch keine zu große Wärme über die Frontlinse in die Probe gelangen. Außerdem brauchen Burg und seine Kollegen eine Immersionsflüssigkeit, die bei dieser tiefen Temperatur den gleichen Brechungsindex hat wie Wasser bei Raumtemperatur.

*„Wir wollen die kryofixierten Proben auch direkt unter dem Lichtmikroskop betrachten. Die Kryo-Lichtmikroskopie steckt aber noch in den Kinderschuhen.“*

**Der Physiker und seine Kollegen** haben das erste Problem gelöst, indem sie die sehr kleine Frontlinse eines hochwertigen Immersionsobjektivs kühlen und sie über eine geschickt beheizte Keramikfassung vom Mikroskop abschirmen. Dadurch werden Frontlinse und Probe wie durch eine Tarnkappe vor den größeren und empfindlicheren Linsen des Mikroskops versteckt. Burg und sein Team haben auch eine geeignete

Immersionsflüssigkeit entdeckt. Sie trägt den Namen Ethoxynonafluorbutan. „Es war nicht einfach, etwas Geeignetes zu finden“, sagt Burg. Es gibt nur sehr wenig Information über den Brechungsindex von Flüssigkeiten bei diesen tiefen Temperaturen. Man findet Angaben bis zu  $-80^{\circ}\text{C}$ , aber nicht tiefer. Wir mussten also sehr viel ausprobieren“. Burg erreicht mit seinem Set-up zur Kryo-Lichtmikroskopie derzeit eine Auflösung von 350 Nanometern. Als nächstes wollen er und sein Team das Verfahren weiter verbessern, es routinetauglicher machen und in Verbindung mit sogenannten Superresolution-Verfahren nutzen, die mit derselben Optik eine bis zu 10-fach höhere Auflösung möglich machen.

**Burg will mit der finanziellen** Unterstützung des Europäischen Forschungsrates auch prüfen, ob Zellen ohne Schaden wieder aufgetaut werden können. „Am besten wäre es, wenn sich die Zellen nach dem Auftauen gar nicht mehr an das Einfrieren erinnern würden, sondern ihre zellulären Aktivitäten einfach dort wieder aufnehmen würden, wo sie durch das Einfrieren zum Stillstand gekommen sind.“ Burg weiß, dass dies noch ferne Zukunftsmusik ist, aber er kennt die Probleme, die zu lösen sind. Man braucht zum Beispiel extrem hohe Kühlraten und muss die Zellen und Organismen mit sehr wenig oder gänzlich ohne Frostschutzmittel eingefrieren. Aber auch bessere Frostschutzmittel wären wünschenswert. Vielleicht gelingt es Burg am Ende, die Zellen unter dem Lichtmikroskop ständig unbeschadet einzufrieren und wieder aufzutauen. Dann könnten dynamische Prozesse nach Belieben betrachtet, angehalten und wieder angestoßen werden. Bis dahin ist es allerdings noch ein weiter Weg.

*Die Autorin ist Wissenschaftsjournalistin und promovierte Biologin.*

# Rätsel um Beta-Zerfall gelöst

*Eine Forschungskollaboration unter Beteiligung der TU Darmstadt hat eine Erklärung geliefert, warum Beta-Zerfälle von Atomkernen langsamer ablaufen, als man das aufgrund des Zerfalls eines freien Neutrons erwarten würde.*

Dank einer internationalen Kollaboration ist es gelungen, ein 50 Jahre altes Rätsel zu lösen. Die Erkenntnisse, veröffentlicht in der Fachzeitschrift *Nature Physics*, schließen eine Lücke im Verständnis des Beta-Zerfalls, der ein wichtiger Prozess in kernphysikalischen Anwendungen und bei der Synthese schwerer Elemente in Sternen ist.

**Der Beta-Zerfall** ist der häufigste Zerfallskanal von Atomkernen: Ein Neutron im Kern wird in ein Proton umgewandelt (oder umgekehrt), wodurch ein anderes Element mit Protonenzahl plus (oder minus) eins entsteht. Auf diese Weise trägt der Beta-Zerfall zur Bildung neuer Elemente im Universum bei. Als Zusammenspiel der starken Kernkraft, die Neutronen und Protonen im Atomkern zusammenhält, und der schwachen Wechselwirkung liefern Beta-Zerfälle außerdem wesentliche Hinweise auf Physik, die über das Standardmodell hinausgeht, und sind seit dem frühen 20. Jahrhundert das Thema konzentrierter Untersuchungen.

**Ein Rätsel hat bisher** jedoch den Untersuchungen der Physiker widerstanden: Die Beta-Zerfälle von im Atomkern gebundenen Neutronen laufen deutlich langsamer ab als dies aufgrund der Zerfallszeiten von freien Neutronen zu erwarten wäre. In der Vergangenheit wurde diese systematische Abweichung durch die Implementierung einer Konstante, genannt „Quenching“, berücksichtigt.

**Dabei handelt es sich** um eine Hilfskonstruktion, um die beobachteten Beta-Zerfallsraten der Neutronen innerhalb und außerhalb des Kerns überein zu bringen. So konnten die theoretischen Modelle mit den experimentellen Messungen sehr gut in Einklang gebracht werden.

„**Lange hat uns** ein grundlegendes Verständnis des Beta-Zerfalls von Atomkernen gefehlt“, erklärt Professor Achim Schwenk von der TU Darmstadt, der Teil der Kollaboration ist. „Wir konnten nun in komplexen mikroskopischen Rechnungen erstmals zeigen, dass starke Korrelationen im Atomkern sowie die starke Wechselwirkung mit einem anderen Neutron oder Proton den Beta-Zerfall im Atomkern verlangsamen. Genau diese Wechselwirkungseffekte werden in effektiven Feldtheorien der starken und schwachen Wechselwirkung vorhergesagt.“

**Um dies zu zeigen**, berechneten die Theoretiker systematisch die Beta-Zerfälle einer Vielzahl leichter und mittelschwerer Kerne, von einem

Kern mit drei Nukleonen bis zu Zinn-100 mit 50 Protonen und 50 Neutronen. Der Beta-Zerfall von Zinn-100 wurde im Jahr 2012 erstmals beim GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung gemessen. Die Ergebnisse der Kollaboration stimmen sehr gut mit experimentellen Daten über-

ein und zeigen, dass der Quenching-Faktor nach Berücksichtigung der starken und schwachen Wechselwirkungseffekte nicht mehr benötigt wird.

**Die Fortschritte**, um von der Berechnung der schwachen Wechselwirkung mit einzelnen Neutronen und Protonen zu großen Atomkernen zu gelangen, wurden sowohl von theoretischen Entwicklungen zur effektiven Feldtheorie, also auch durch enorme Fortschritte in der Vielteilchentheorie, und durch leistungsstarke Berechnungskapazitäten von Supercomputern ermöglicht.

**Neben einem besseren** Verständnis von Beta-Zerfällen für die Synthese schwerer Elemente in Supernovae und Neutronensternverschmelzungen erhoffen sich die Forscher auch neue Einsichten zu doppelten Beta-Zerfällen, insbesondere zum Neutrino-losen doppelten Beta-Zerfall, bei dem ein analoges Quenching-Rätsel die Wissenschaft beschäftigt.



Graphische Darstellung des Beta-Zerfalls eines Neutrons (rot) in ein Proton (blau), das im Atomkern mit einem weiteren Proton (blau daneben) wechselwirken kann. Diese Zweiteilcheneffekte sowie starke Korrelationen im Atomkern führen zu langsameren Beta-Zerfällen, als man das vom Zerfall eines einzelnen (freien) Neutrons erwarten würde.

## Informationen

**Institut für Kernphysik**  
Prof. Dr. Achim Schwenk  
Telefon: 06151/16-21550  
E-Mail: [schwenk@physik.tu-darmstadt.de](mailto:schwenk@physik.tu-darmstadt.de)  
[www.strongint.eu](http://www.strongint.eu)