

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

KOMPAKT

H₂O

Struktur

Wasser ist klumpig

Schneeflocken

Kristallene Schönheiten

Paradoxon

Das Rätsel von Mpemba



Lars Fischer
E-Mail: fischer@spektrum.de

Liebe Leserin, lieber Leser,

einst war das Wasser das höchste: Fast 3500 Jahre alte Tontafeln aus Griechenland zeigen den Meeresgott Poseidon als obersten Gott jener Zeit. Auch wenn er diesen Platz später räumen musste, das Wasser hat seine Faszination nie verloren, wie unzählige Geschichten und Kunstwerke bezeugen. Die Erkenntnisse der Wissenschaft, die sich seit der Neuzeit ausführlich mit dem so einfach aufgebauten Molekül befasst, haben den Urstoff des Lebens nicht entzaubert – im Gegenteil. In diesem Kompakt lesen Sie über Forschung aus den letzten Jahren, die immer wieder demonstriert, was für ein eigenwilliger Stoff das Wasser tatsächlich ist. Flüssiges Wasser erweist sich als klumpig, und Quanteneffekte helfen ihm durch feste Kristalle hindurch. Eis – gefrorenes Wasser – gibt es in diversen Kristallvarianten, und schon das uns geläufige Eis steckt voller Überraschungen. Nicht bieten können wir Ihnen allerdings das von Kurt Vonnegut in »Cat's cradle« literarisch verewigte »Eis-IX«. Ich wünsche Ihnen dennoch viel Spaß mit unserem neuen Kompakt »Wasser«.

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 18.07.2016

Folgen Sie uns:



CHEFREDAKTEURE: Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.), Dr. Uwe Reichert
REDAKTIONSLEITER: Christiane Gelitz, Dr. Hartwig Hanser, Dr. Daniel Lingenhöhl
ART DIRECTOR DIGITAL: Marc Grove
LAYOUT: Oliver Gabriel
SCHLUSSREDAKTION: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
BILDREDAKTION: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
PRODUKTMANAGERIN DIGITAL: Antje Findeklea
VERLAG: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Tiergartenstr. 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114, UStd-Id-Nr. DE147514638
GESCHÄFTSLEITUNG: Markus Bossle, Thomas Bleck
MARKETING UND VERTRIEB: Annette Baumbusch (Ltg.)
LESER- UND BESTELLSERVICE: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

BEZUGSPREIS: Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer
ANZEIGEN: Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an anzeigen@spektrum.de.

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2016 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bildnachweise: Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

SEITE
09

FLUIDE
Physiker »verknuten« Wasser



DUSTINKLECKNER, WILLIAM T. M. IRVINE

SEITE
26

SUPERHYDROPHOBER
SCHMETTERLINGSFLÜGEL
Schneller Absprung



ISTOCK / VITALINA RYBAKOVA

WASSER

Warum gefrierende Tropfen ein
spitzes Häubchen kriegen

SEITE
61

FOTOLIA / MYSIOS



LOUCHE-EFFEKT

Warum werden Anisschnäpse milchig,
wenn man sie mit Wasser mixt?

SEITE
72

ISTOCK / GUTZENBERG



- 04 Wasser ist klumpig
- 06 Struktur des kleinsten dreidimensionalen
Wasserclusters aufgeklärt
- 13 Nanoschicht macht Wasser knetbar
- 15 Hüpf, Steinchen, hüpf!
- 19 Klangfiguren unter Wasser
- 22 Wasser tunnelt im Edelstein
- 24 Strömendes Wasser energetisiert
die Oberfläche
- 28 Trocknen im Zickzack
- 29 Schillernde Farben
- 35 Warum sehen wir im Regenbogen
immer gleiche Farben?
- 39 Was wiegt eine Wolke?
- 41 Flüssig bei minus 46 Grad Celsius
- 43 Absoluter Gefrierpunkt von Wasser ermittelt
- 46 Flüssiges Wasser bei 130 Grad unter null
- 48 Eiskristall braucht mindestens
275 Wassermoleküle
- 51 Kristallene Schönheiten
- 57 Forscher erschaffen erstmals
quadratische Schneeflocken
- 59 Wie haariges Eis entsteht
- 63 Glatt daneben
- 68 Das Rätsel von Mpemba



STRUKTUR Wasser ist klumpig

von Lars Fischer

Unter den Lösungsmitteln sticht Wasser heraus, weil es so stabile Strukturen bildet. Versuche zeigen, dass diese Bindungszustände weit länger erhalten bleiben als in anderen Flüssigkeiten.

Wir verdanken unsere Existenz einer chemischen Kuriosität: Wasser. Die auf den ersten Blick so gewöhnlich aussehende Flüssigkeit unterscheidet sich entscheidend von anderen Lösungsmitteln und ermöglicht so Leben, wie wir es kennen. Eine Arbeitsgruppe um Johannes Hunger vom Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz **hat nun eine lange diskutierte Besonderheit des Wassers vermessen**: Nach Analysen von Infrarotspektren, die Auskunft über die Molekülschwingungen geben, sind lokale Strukturen in der Flüssigkeit bei bestimmten Frequenzen weit stabiler als gedacht. Auf den Zeitskalen, in denen chemische Reaktionen ablaufen, ist Wasser deswegen klumpig – ein Umstand, der in Modellen chemischer Abläufe bisher nicht berücksichtigt ist.

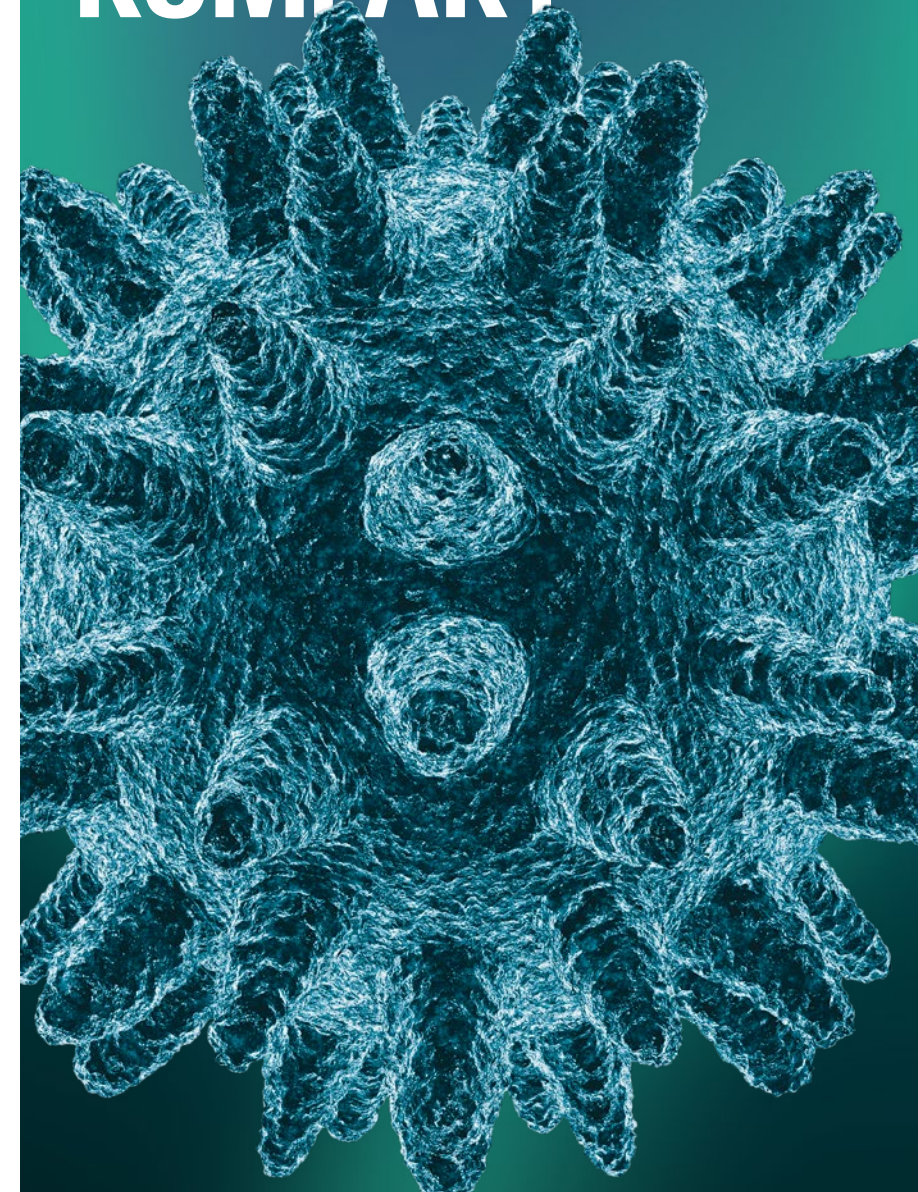
Wassermoleküle binden untereinander über eine spezielle Bindungsform, so genannte Wasserstoffbrücken. Einerseits begünstigt diese vergleichsweise starke Bindung lokale Strukturen, andererseits verschieben sich die Brücken so schnell, dass man Wasser bisher für homogen hielt – also in Maßstäben über zwei, drei Molekü-

le hinaus überall sehr ähnlich. Tatsächlich aber bleiben durch den von Hunger und seiner Arbeitsgruppe entdeckten Effekt auch größere Strukturen für überraschend lange Zeiten stabil – bis zu eine Pikosekunde statt wie bisher vermutet maximal ein Zehntel dieses Wertes. Damit bewegen sich die Lebensdauern dieser Zustände in der gleichen Größenordnung wie die Molekülschwingungen, die den Verlauf chemischer Reaktionen bestimmen. Das hat, vermuten die Forscher, erhebliche Folgen für den Energiehaushalt solcher Reaktionen: »Klumpiges« Wasser kann Wärme unter Umständen nicht so gut abführen wie ein homogenes Lösungsmittel. ↩

(Spektrum.de, 18. September 2015)

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

KOMPAKT



IMMUNSYSTEM

PASSKONTROLLE
IM KÖRPER

FÜR NUR
€ 4,99

HIER DOWNLOADEN



WASSERSTRUKTUR

Struktur des kleinsten dreidimensionalen Wasserclusters aufgeklärt

von Lars Fischer

Wasser bildet auch im flüssigen Zustand kurzlebige geordnete Strukturen. Spektroskopische Messungen zeigen jetzt im Detail, wie sie aussehen.

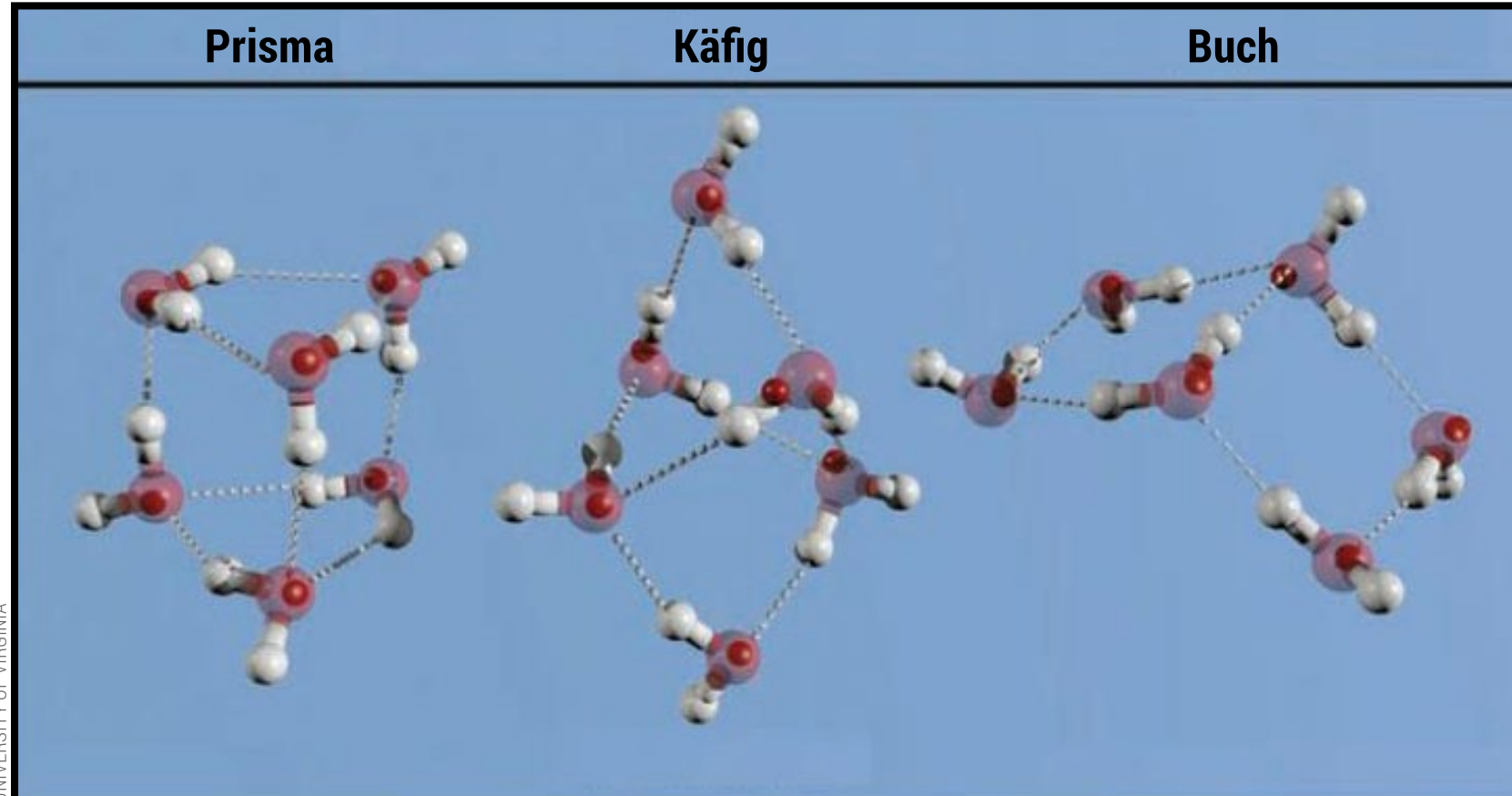
Dank der starken Bindungen der Moleküle untereinander bildet Wasser auch im flüssigen Zustand geordnete Strukturen, die großen Einfluss auf seine chemischen und physikalischen Eigenschaften haben. Wie diese Strukturen aussehen, ist allerdings noch unklar, da sie extrem kurzlebig und schwer zu detektieren sind. Deswegen erforschen Wissenschaftler Cluster aus wenigen Wassermolekülen, um deren jeweils energieärmsten Konfigurationen zu ermit-

teln. Für Cluster von bis zu fünf Wassermolekülen ist das bereits gelungen, diese Gruppen bilden allesamt flache Ringe. Der erste Wassercluster, der sich aus der Ebene heraus in die dritte Dimension erhebt und deswegen Rückschlüsse auf die Struktur realen Wassers erlaubt, ist der Sechser-Cluster, und der hat sich Wissenschaftlern lange entzogen.

Ein Team um Brooks Pate von der University of Virginia hat die Strukturen dieser Wassercluster in einem Überschalljet analysiert. Die stabilste Struktur ist demnach

die Käfigstruktur, gefolgt vom Prisma und der Buch-Struktur. Letztere ist allerdings bei höheren Temperaturen durch ihre höhere Entropie günstiger. Neben diesen Anordnungen fanden die Forscher auch noch Signale, die sie auf Cluster aus sieben und neun Wassermolekülen zurückführen. Für ihre Messungen verwendeten die Forscher Wasser, das sie mit dem schweren Sauerstoffisotop ^{18}O markiert hatten. Dieses konnten sie in Mikrowellen-Rotationsspektren eindeutig identifizieren und jeweils die Position in den Clustern bestimmen. Daraus leiteten sie nicht nur die Form der jeweiligen Cluster ab, sondern auch, wie häufig sie in den Wasserproben auftreten.

Für die theoretische Chemie mit Computermethoden ist der Cluster aus sechs Wassermolekülen ein besonderer Prüfstein, denn es existieren diverse Strukturen mit nahezu minimaler Energie, deren



DREIDIMENSIONALE WASSERCLUSTER

Die drei energieärmsten Strukturen aus sechs Wassermolekülen. Pate und seine Kollegen identifizierten die Cluster mit Hilfe isotonenmarkierter Wassermoleküle und Rotationspektroskopie.

stabilste nur schwer präzise zu ermitteln ist. Selbst gängige Modelle, die in anderen Systemen sehr erfolgreich sind, sagen gelegentlich nachweislich falsche Strukturen voraus. Die von den Forschern gefundenen Strukturen bestätigen, dass die drei von Computersimulationen vorhergesagten Strukturen tatsächlich den Energieminima entsprechen. Damit seien die Forscher auf dem Weg zu einem universellen Computermodell des Wassers einen großen Schritt vorangekommen, schreiben die Chemiker Richard Saykally und David Wales in einem Kommentar zu der Veröffentlichung.

Allerdings sagten die Modelle die Prisma-Struktur als energieärmste Struktur vorher, während im Experiment die Käfigstruktur günstiger ist. Außerdem ist noch unklar, wie die Strukturen dynamisch ineinander übergehen. Die spektroskopischen Daten weisen auf Schwingungszustände hin, die über die kompletten Cluster delokalisiert sind und potentiell Auswirkungen auf deren Eigenschaften haben. ↩

(Spektrum.de, 18. Juni 2012)

Science 336, S. 897 – 901, 2012

Alles, was Sie wissen müssen.
Auf Ihrem Bildschirm.

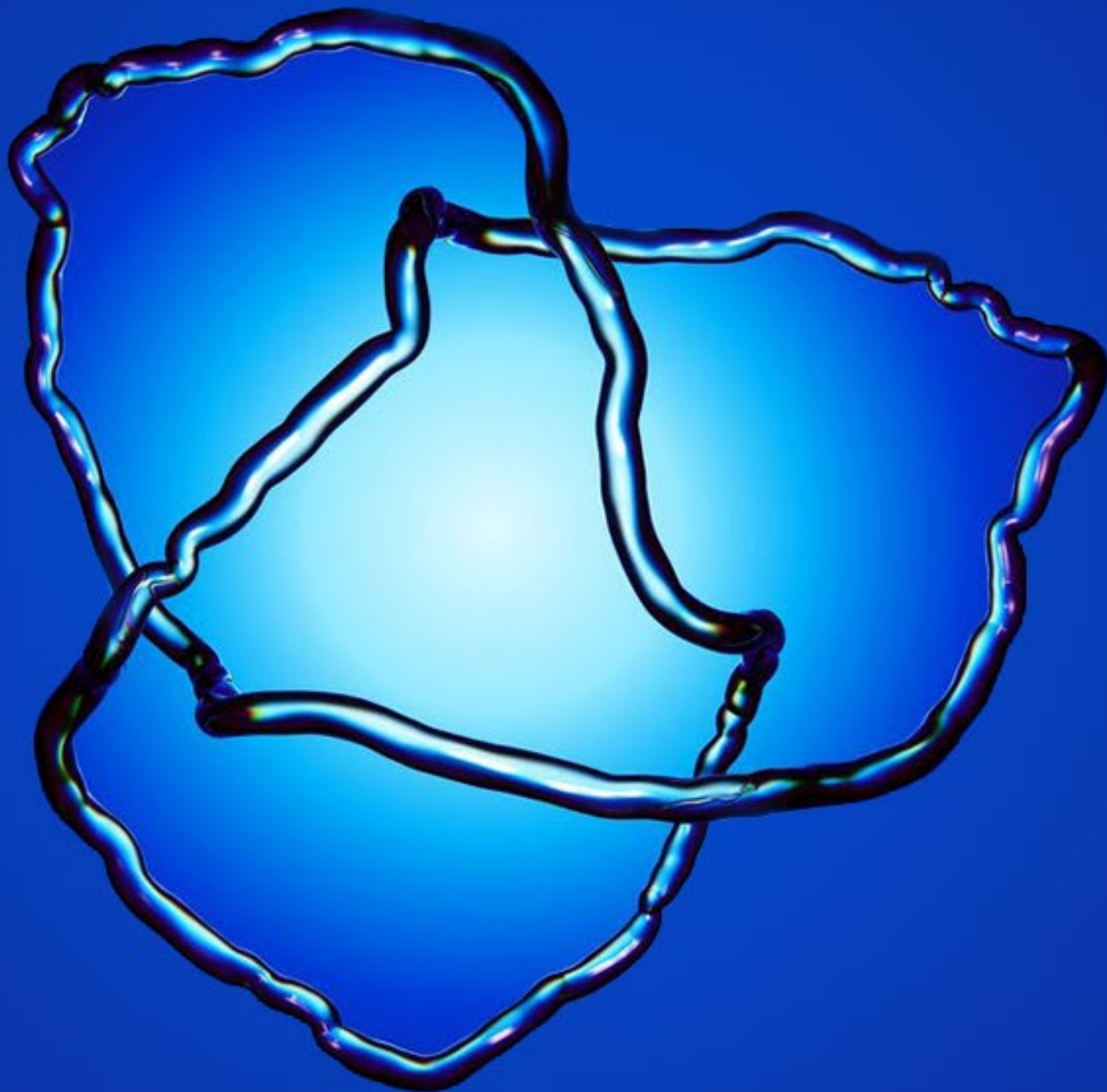


DAS SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT **DIGITALABO**

Wissenschaftler berichten über die aktuellen
Erkenntnisse ihrer Fachgebiete.

Jahrespreis (12 × im Jahr) € 60,-; ermäßigt (auf Nachweis) € 48,-

HIER ABONNIEREN



FLUIDE

Physiker »verknotten« Wasser

von Ron Cowen

Es hört sich unmöglich an: Britischen Forschern gelang es tatsächlich, Wasserwirbel zu verschnüren. Daraus ergibt sich eine Fülle an Experimentiermöglichkeiten.

Über ein Jahrhundert nach den ersten theoretischen Überlegungen haben Physiker herausgefunden, wie man Wasser zu Knoten schnüren kann – zumindest im Labor. Die Entdeckung ebnet nun wahrscheinlich den Weg, Drehungen und Wendungen verschiedenster Phänomene experimentell zu untersuchen – von ionisierten Gasen der äußeren Sonnenatmosphäre, supraleitenden Materialien, Flüssigkristallen und Quantenfeldern in der Teilchenphysik. Ursprünglich gehen diese »Wirbelringe« auf Lord Kelvin zurück, dessen Grundidee zur Entstehung der Knotentheorie als Teil der Topologie mit beitrug. Einen Knoten in einer Flüssigkeit zu schnüren, habe allerdings wenig mit dem Binden von Schuhbändern zu tun, sagen die beiden Physiker Dustin Kleckner und William Irvine von der University of Chicago, denen dies gelang. Das gesamte dreidimensionale Volumen einer Flüssigkeit in einem vorgegebenen Raum – etwa einem Wirbel – muss

3-D-Ansicht eines Wasserwirbelknotens

 VIDEO ONLINE ANSEHEN

dazu verdreht werden. Mit Hilfe der Miniatúrausgabe eines Flugzeugflügels – den sie mit einem 3-D-Drucker entwickelten – gelang dies Kleckner und Irvine letztlich, und sie schufen einen verknoteten Wirbel. Dabei halfen ihnen Gesetzmäßigkeiten der

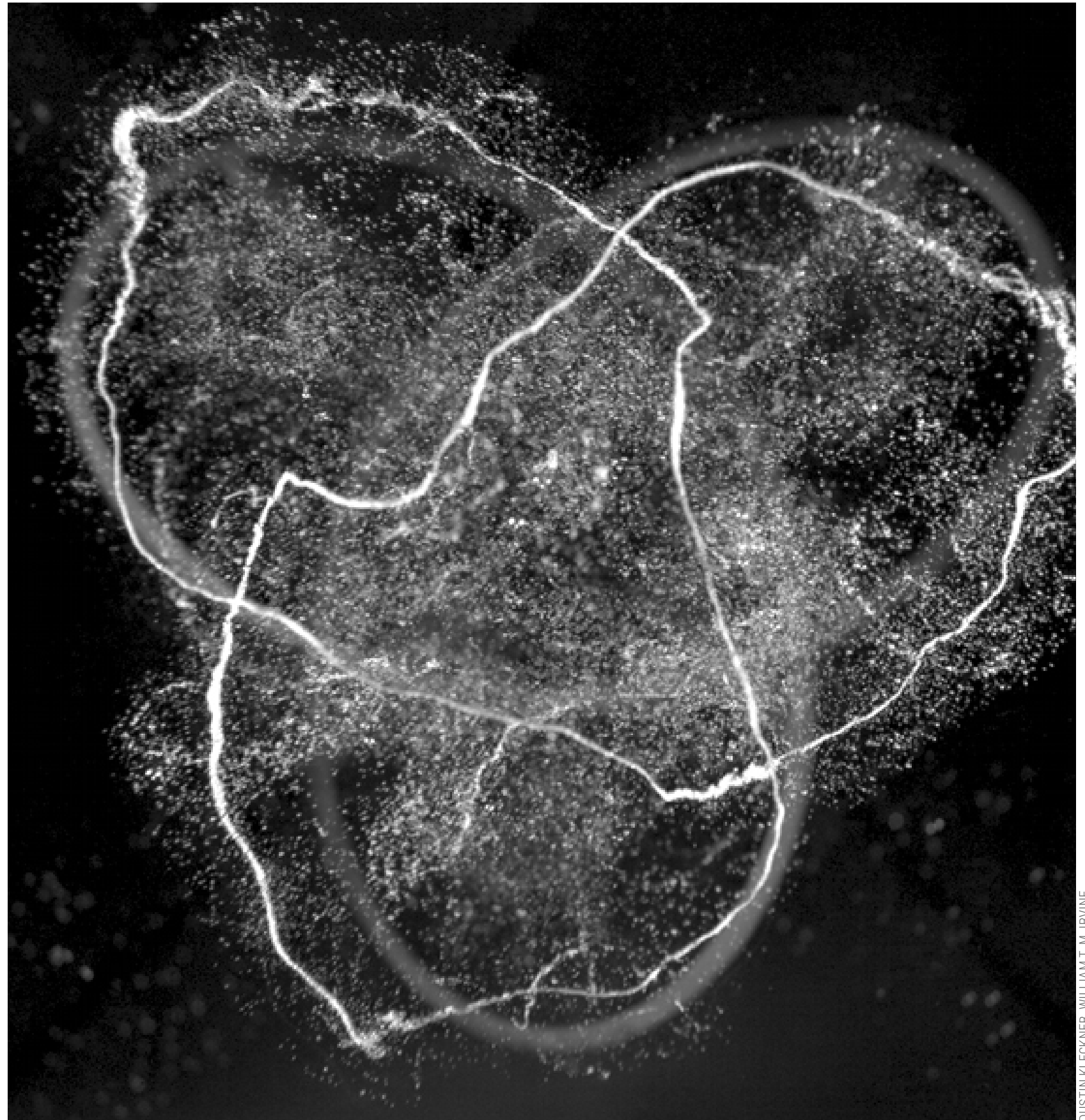
Aerodynamik: Während eines Flugs erzeugen die Flügel eine rotierende, wirbelartige Bewegung der Luftströmung, die dem Flugzeug Auftrieb verleihen. Sobald ein stillstehender Flügel plötzlich beschleunigt – etwa beim Start – entstehen zwei Luftwirbel, die

in entgegengesetzte Richtungen rotieren. Die Forscher tauchten daher ihre Miniflügel in einem Wasserbehälter unter und beschleunigten sie dort schlagartig, um auf diese Weise eine Knotenstruktur zu produzieren.

Eine technische Meisterleistung war jedoch nicht nur das Erzeugen der Wirbel, sondern ebenso ihr Bildnachweis. Normalerweise verwenden Physiker Farbstoffe, um die Bewegung von Flüssigkeiten nachvollziehen zu können. Kleckner und Irvine hingegen leiteten kleinste Gasbläschen ins Wasser, die wegen der auftretenden Auftriebskräfte direkt in den zentralen Knotenbereich gezogen wurden. Ein Hochgeschwindigkeits-Laserscanner, der 76 000 Aufnahmen pro Sekunden machen kann, ermöglichte es den Forschern, das dreidimensionale Gefüge der Bläschen zu rekonstruieren und so die Knoten sichtbar zu

»VERKNOTETES« WASSER

Eine der ersten Schleifen, die den beiden Physikern bei ihren Verwirbelungen gelungen ist. Sichtbar machen konnten sie diese durch zahllose kleine Gasbläschen, die in die Flüssigkeit injiziert wurden.



machen. »Es ist ein bemerkenswerter Erfolg für die beiden, dass sie diese Wirbelknoten ablichten konnten«, bestätigt Mark Dennis von der University of Bristol, dem bereits verknotete Wirbel aus Lichtstrahlen gelungen sind. Diese neue Studie wandle endlich abstrakte Gedankengänge über physikalische Vorgänge in testfähige Experimente um, so der Wissenschaftler. »Verknotete Wirbel stellen ein ideales Modellsystem dar,

mit dem man präzise untersuchen kann, wie sich Knoten in einer realen physikalischen Umgebung auch wieder aufschnüren«, fügt Irvine an. Verknotete Wirbel tauchen in verschiedensten Teilbereichen der Physik auf. Teilchenphysiker beispielsweise vermuten, dass so genannte Glueballs – hypothetische Ansammlungen aus Gluonen – eng verknotete Quantenfelder sind. Vor Kurzem meldeten Wissenschaftler zudem,

dass sie verwirbelnde Magnetfeldlinien auf der Sonne beobachtet hätten, die dazu beitragen, Hitze aus dem Inneren der Sonne in deren Korona zu übertragen. Dies könne erklären, warum das Plasma der Korona so viel heißer ist als die Sonnenoberfläche selbst, so Jonathan Cirtain vom Marshall Space Flight Center der NASA. ↩

(Spektrum.de, 4. März 2013)



VERSCHIEDENE TRAGFLÜGEL

Um die Wasserschleifen zu erzeugen, mussten die Physiker mit verschiedenen Tragflügeln experimentieren. Nur das Modell unten rechts erzeugte tatsächlich Knoten.



FLÜSSIGKNETE

Nanoschicht macht Wasser knetbar

von Jan Dönges

Eine Art »Flüssigknete« lässt sich fast beliebig formen und sogar schneiden, besteht im Innern aber aus reinem Wasser. Möglich macht es eine unsichtbare Deckschicht.

Auf den Namen »liquid plasticine«, zu Deutsch »Flüssigknete«, taufte Wissenschaftler um Xiaoguang Li von der Tongji-Universität in Schanghai ihre Entwicklung: Flüssigkeitstropfen, die durch Nanopartikel in Form gehalten werden. Dank ihrer unsichtbaren Hülle ist es möglich, die Tropfen zu modellieren und sogar zu schneiden – ähnlich wie bei einem Gel, aber ohne im Innern zähflüssig zu sein.

Der Trick gelingt Li und Kollegen mit Hilfe von 20 Nanometer großen Partikeln aus Siliziumdioxid, die sie erzeugen, indem sie ein Silikagel auf einer Glasscheibe trocknen lassen. Wie die Forscher herausfanden, umhüllen die winzigen Teilchen die Tropfen und bilden an deren Oberfläche eine Schicht, die an den meisten Stellen nur ein Teilchen dick ist. Dem Tropfen verleihen sie Formstabilität, indem sie sich zusammenballen und ineinander verkeilen, ergab die Untersuchung der Forscher. Löst man das Teilchenknäuel, zerfließt der Tropfen. Andernfalls lässt er sich mit Hilfe hydrophober Werkzeuge kneten und teilen.

Ganz ähnliche Versuche gibt es bereits seit Anfang der 2000er Jahre. Damals pro-



duzierten Wissenschaftler »flüssige Murmeln«, indem sie eine Flüssigkeit mit einem stark wasserabweisenden Pulver in Berührung brachten. Es entstehen dabei kugelförmige Objekte mit pudriger, undurchsichtiger Hülle.

Das erklärte Ziel von Li und Kollegen war es, dieses »interessante und verblüffende Phänomen« zu verstehen, zu verbessern und womöglich anwendungstauglich zu machen. So erkannten sie, dass der Einsatz der Nanoteilchen zu vielseitigeren Ergeb-

nissen führt. Nun stellen sie sich vor, die »Flüssigknete« als Behälter für chemische Reaktionen einzusetzen oder sie zu Kanälen zu formen, in denen Flüssigkeiten transportiert und gemischt werden. Auch der Einsatz als Linsen komme bei der ein oder anderen Spezialanwendung vielleicht in Frage. Insbesondere dafür sei entscheidend, dass die Teilchenhülle dank des Siliziumdioxids in hohem Maß durchsichtig ist. ↩

(Spektrum.de, 2. Februar 2016)

Treffen flache Kiesel unter kleinem Winkel auf eine Wasseroberfläche, wirkt diese wie eine Sprungschanze. Das kann sich einige Male wiederholen.

Hüpf, Steinchen, hüpf!

von H. Joachim Schlichting



Kinder und Erwachsene haben gleichermaßen Spaß daran, glatte Steine über ein ruhiges Gewässer springen zu lassen. Titschen, Plätteln, Schiefern oder ganz einfach Steinehüpfen sind nur einige der Ausdrücke, mit denen dieses Spiel mit der einfachen Regel, den Stein möglichst oft aufsetzen zu lassen, je nach Region bezeichnet wird. Dass die Wurfobjekte unter gewissen Bedingungen nicht gleich untergehen, ist mindestens seit der Antike bekannt.

Heute gibt es sogar Wettbewerbe, in denen wie bei anderen sportlichen Aktivitäten Bestmarken angestrebt werden. Den Weltrekord stellte 2013 Kurt Steiner mit 88 Sprüngen auf. Dabei überbrückte er eine Distanz von fast 100 Metern. Für jemanden, der es mit Mühe auf einige wenige Hopser bringt, klingt das bewundernswert und ernüchternd zugleich.

Dass man solche Tricks ausgerechnet mit Steinen versucht, die eigentlich dafür bekannt sind, wegen ihrer großen Dichte unterzugehen, hat vor allem schlicht damit zu tun, dass sie sehr häufig am Rand von Gewässern zu finden sind und so förmlich dazu herausfordern, hineingeschleudert zu

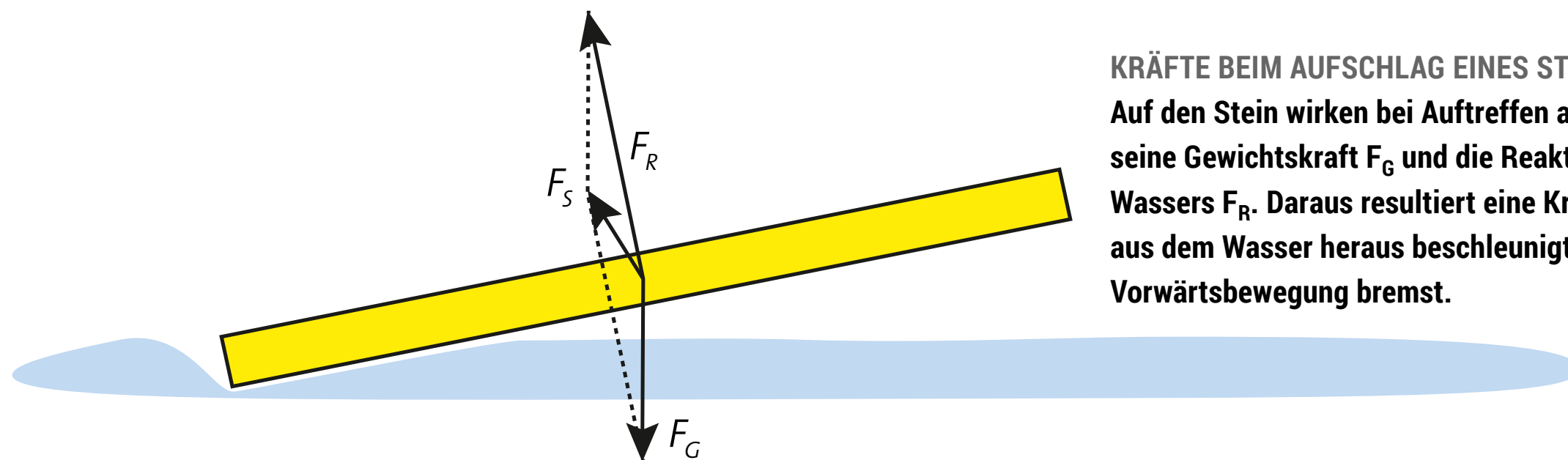
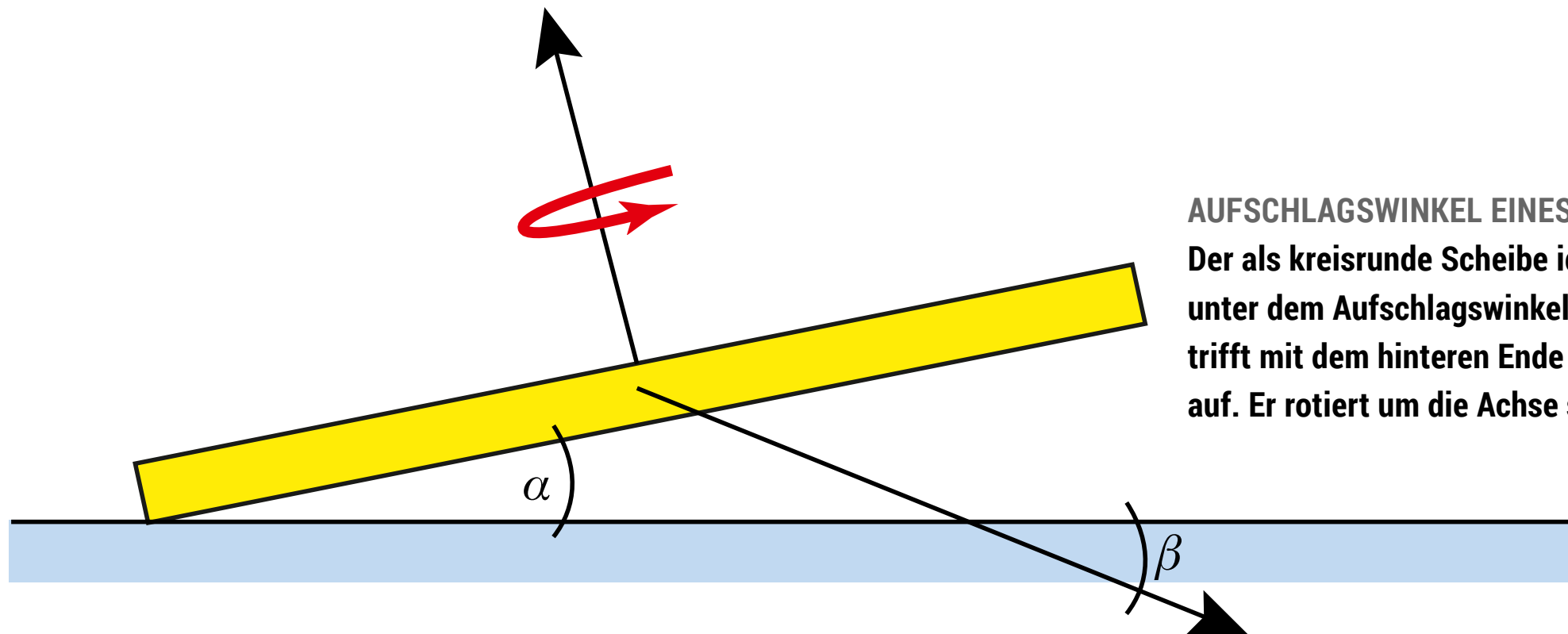
»Es fliegt ein Stein (die Hand warf ihn gut) / Kräftig, waagrecht über die Flut / Eine Säule steigt auf, und der Sonne Schein / Malt einen Regenbogen hinein. Und weiter, ein zweites und drittes Mal, Erhebt sich der siebenfarbige Strahl. Aber je weiter vom Ufer entfernt / Der Stein im Fluge das Fliegen verlernt / Eine Schwere zieht ihn, es ebbt seine Kraft / Der Strahl ermattet und erschlaft / Ein Kräuseln noch einmal, ein Tropfen blinkt, Und dann Ruh' und Stille – der Stein versinkt.«

[Theodor Fontane (1819-1898)]

werden. Außerdem erfüllen Kiesel eine weitere wichtige Bedingung: Das Wurfobjekt muss möglichst glatt und rund sein. Am Ufer liegen die Steine oft bereits geschliffen herum, nachdem die Flüsse sie auf dem Weg ins Tal lange aneinandergerieben haben. Wenn die mitgeschwemmten Felsbrocken dann auch noch aus dünnen Sedimentgesteinsschichten stammen, dominieren flache Kiesel – perfekt zum Titschen.

Um eine solche Scheibe zum Hüpfen zu bringen, kommt es darauf an, ihr durch die Wechselwirkung mit dem Wasser zusätzlich zum Geradeausflug eine Bewegungs-

komponente nach oben zu geben. Das ist nur durch eine entsprechende Kraft beim Auftreffen möglich. Denn von dieser hängt es ab, ob das Plättchen untergeht oder genügend stark abprallt. Dafür muss der Stein üblicherweise mit der flachen Seite leicht zur Horizontalen geneigt auf einer niedrigen Wurfbahn auf das Wasser zufliegen. Es sind also zwei Winkel von Bedeutung: der Aufschlagswinkel, den die Bahn des Steinschwerpunkts im Moment des Auftreffens mit der Wasseroberfläche bildet, und der Neigungswinkel, den seine flache Seite zu der Wasseroberfläche einnimmt.



Pirouetten auf dem Wasser

Um einen relativ konstanten Neigungswinkel zu erzeugen, hilft ein einfacher und wirkungsvoller Trick: Aus dem Handgelenk heraus verleiht man dem Stein eine möglichst schnelle Drehung um seine vertikale Achse. Durch diesen Effekt wird er zum rotierenden Kreisel. Ein solcher Körper behält seine Rotationslage weitgehend bei. So wird es überhaupt erst möglich, beim Abwurf den Neigungswinkel idealerweise für den gesamten Flug festzulegen.

Der so geworfene kreiselnde Stein trifft mit der hinteren Kante zuerst auf. Dabei übt er eine Kraft auf das Wasser aus und setzt es in Bewegung. Dann wirkt eine gleich große Reaktionskraft (Strömungswiderstand), die proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit und zur Größe der gemeinsamen Kontaktfläche ist. Solange die Reaktionskraft wegen der anfangs kleinen Berührungsfläche nicht ausreicht, die Gewichtskraft des Steins aufzuheben, taucht er weiter ins Wasser ein. Infolgedessen wächst der Querschnitt, bis sie so groß ist, dass er nicht nur nicht weiter sinkt, sondern auf der inzwischen entstandenen Wasserrampe nach oben beschleunigt wieder aus dem Wasser herausschießt. Damit

genau das eintritt, müssen der Aufschlagswinkel und der Neigungswinkel im passenden Größenbereich liegen.

Für das erste Abprallen hat man es noch im wörtlichen Sinn ganz in der Hand, die Winkel unabhängig voneinander festzulegen. Danach hängt der Aufschlags- auch vom Neigungswinkel ab, den die Rotation des Steins wiederum weitgehend konstant hält.

Soll das platte Geschoss viele Sprünge machen, benötigt es sowohl eine möglichst große Bewegungs- als auch Rotationsenergie, die jeweils proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit von Translation beziehungsweise Rotation ist. Weil diese durch die Muskelkraft des Werfers hervorgebracht werden sowie durch dessen Geschick, sie optimal umzusetzen, gibt es eine natürliche Grenze für die Anzahl der Hüpfen. Es ist sehr wichtig, die Energieverluste des Steins durch Reibung mit dem Wasser zu minimieren. Das läuft vor allem darauf hinaus, die Kontaktzeiten in einem optimalen Bereich zu halten. Sie sollten so kurz wie möglich sein, um den Kiesel wenig abzubremesen, aber doch lang genug, damit die Reaktionskraft für die Sprünge ausreicht. Um das zu errei-

chen, müssen Aufschlags- und Neigungswinkel so zueinander passen, dass jedes Mal möglichst maximale Absprunggeschwindigkeit und kleinste Kontaktzeit zusammentreffen.

Das Titschen wurde in den letzten Jahren auch Gegenstand systematischer Untersuchungen. Forscher studierten an Modellsteinen aus Aluminiumplättchen bei gegebenen Abmessungen und fester Masse sowohl experimentell als auch theoretisch die optimalen Parameter, um die höchste Anzahl von Sprüngen zu erreichen. So haben sie beispielsweise herausgefunden, dass für einen perfekten Sprung ein Neigungswinkel zur Wasserfläche von etwa 20 Grad nötig ist – und zwar unabhängig von der Translations- und Rotationsgeschwindigkeit. Die wissenschaftlichen Ergebnisse nützen vielleicht auch den Rekordjägern, ihrer Intuition und Erfahrung mit Physik auf die Sprünge zu helfen und aus ihren Würfeln noch mehr herauszuholen. ↩

(Spektrum der Wissenschaft, 4/2016)

Rosellini, L. et al.: Skipping stones. In: Journal of Fluid Mechanics 543, S. 137-146, 2005

AKUSTIK

Klangfiguren unter Wasser

von Caroline Bauer

Musikalische Schwingungen lassen sich
mit Chladni-Figuren sichtbar machen.
Französische Forscher haben sie nun erst-
mals unter Wasser beobachtet.



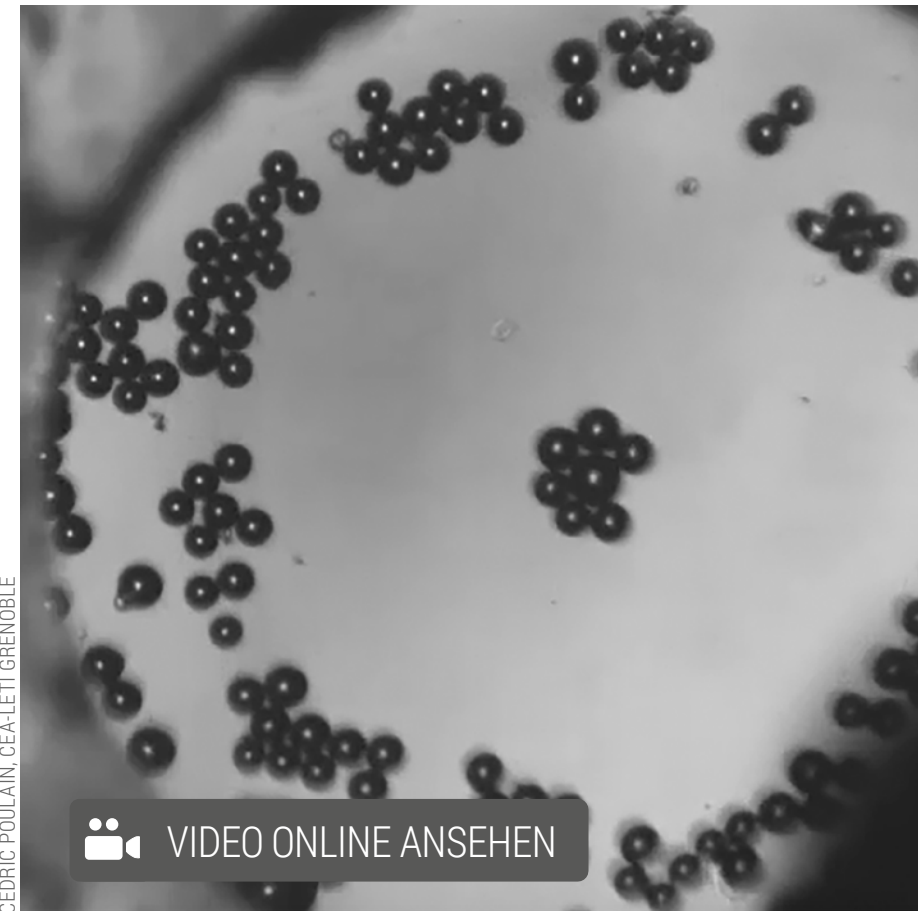
Auf einer in sich schwingenden Platte fängt ein Häufchen Sand wie wild an zu tanzen, doch mit der Zeit wird in der scheinbar chaotischen Bewegung Struktur erkennbar: Die Körner wandern zu den Knotenpunkten der Schwingungen, an denen die Platte ruht. Dadurch entstehen je nach den vorherrschenden Tonfrequenzen verschiedene Muster, die chladnischen Klangfiguren. Forscher um Cédric Poulain vom Nanotechnologie-Institut CEA-Leti in Grenoble **haben solche Muster nun zum ersten Mal mit einer schwingenden Membran unter Wasser erzeugt.** Im Gegensatz zu den klassischen Klangfiguren werden die Partikel dabei jedoch dorthin getragen, wo die Schwingungen am stärksten sind.

Das hat zwei Gründe: Bei den klassischen Chladni-Figuren sorgt die Schwerkraft dafür, dass der Sand am Ende dorthin fällt, wo sich die Platte am wenigsten bewegt. Das sind die Knoten der Schwingungen – sie sind unterschiedlich verteilt, je nachdem, wie hoch der Ton ist oder welche Einzelfrequenzen im Gesamtklang vorherrschen. Unter Wasser aber kann der Auftrieb die winzigen Plastikkugeln von 50 bis

70 Mikrometer Durchmesser, die Poulain und seine Kollegen verwendeten, in der Schwebe halten. Darum kommt dort ein zweiter Effekt zum Tragen: Die wenige Mikrometer dünne, schwingende Membran erzeugt im Wasser Strömungen, die die leichten Plastikkugeln von den Schwingungsknoten weg- und zu den Schwingungsbäuchen hintragen, so dass sie »umgekehrte« Chladni-Figuren erzeugen.

Im 18. Jahrhundert begründete der Wittenberger Jurist und Physiker Ernest Florens Friedrich Chladni mit seinen Klangfiguren die moderne Akustik und nutzte die Visualisierungen, um Musikinstrumente zu erforschen und zu verbessern. Cédric Poulain und seine Kollegen schlagen nun vor, den umgekehrten Effekt zu verwenden, um biologische Zellen nach ihrem Gewicht zu sortieren und zu trennen. Da sich die Muster durch Drehen am Frequenzregler relativ leicht verändern lassen, könnte das einfacher sein, als im Reinraum an der Umgebungsluft so genannte Microarrays zum Positionieren der Zellen herzustellen. Damit die Unterwasserversuche funktionieren, müssen nicht nur die Kugeln leicht genug, sondern auch die Schwingungseigenschaften der Membran und die Tonfre-

CÉDRIC POULAIN, CEA-LETI GRENoble



 VIDEO ONLINE ANSEHEN

VON DER KLANGFIGUR ZUM UNTERWASSERTANZ

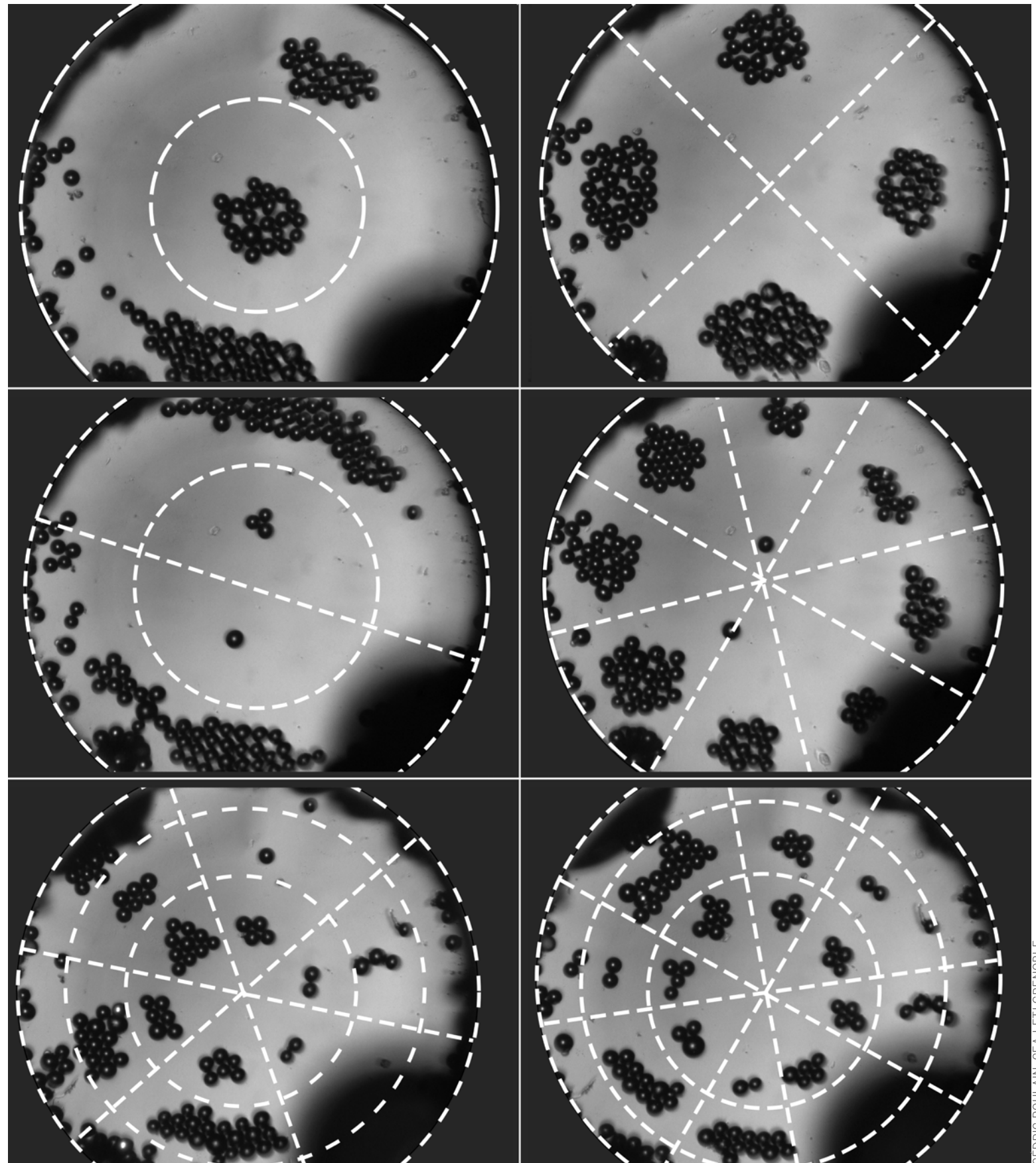
Die Klangfiguren entstehen an den Resonanzfrequenzen des Systems. Drehen die Forscher aber die Frequenz von dort ein wenig nach oben, werden die Figuren instabil und die Plastikkugeln beginnen unter Wasser zu tanzen: Sie hüpfen von Schwingungsbauch zu Schwingungsbauch. Cédric Poulain und seine Kollegen gaben der Bewegung daraufhin den Namen Farandole, nach dem französischen Tanz.

quenzen auf die Flüssigkeit abgestimmt sein. Daher können die Forscher die Unterwasserklangfiguren bisher nur durchs Mikroskop beobachten. Bei **größeren Visualisierungen mit Wasser** bildet die Flüssigkeit selbst die Chladni-Figuren. ↩

(Spektrum.de, 12. Mai 2016)

INVERSE CHLADNI-FIGUREN UNTER WASSER

Ein Blick durchs Mikroskop auf die schwingende Siliziummembran, die bei Ultraschallfrequenzen von 22 (oben links) bis 261 Kilohertz schwingt (unten rechts): Die 50 bis 70 Mikrometer großen Plastikkugeln sammeln sich nicht an den ruhenden Knotenpunkten der Membran (weiß gestrichelt). Stattdessen werden sie von der akustischen Strömung dort gehalten, wo die Schwingungen der 800 Mikrometer weiten Membran am stärksten sind.



CEDRIC POULAIN, CEA-LETI GRENOBLE

QUANTENMECHANIK

Wasser tunnelt im Edelstein

von Caroline Bauer



Beryllkristall

Auf Quantenebene können sich reale Objekte an mehreren Orten zugleich aufhalten. Wassermoleküle nutzen in Beryllkristallen diesen Tunneleffekt zu ihren Gunsten. Forscher sprechen sogar von einem neuen Aggregatzustand von Wasser.

In Wassermolekülen können die Protonen tunneln und sich mithin an mehreren Orten zugleich aufhalten. Das hat nun eine Forschergruppe um Alexander Kolesnikov vom Oak Ridge National Laboratory in den USA an Beryllkristallen experimentell nachgewiesen. Der Tunneleffekt ist eine der Besonderlichkeiten der Quantenphysik: Kleinste Objekte sind im Stande, Barrieren zu überwinden, obwohl ihre Energie dafür eigentlich nicht ausreicht. Das liegt daran, dass sie gleichzeitig Teilchen- und Welleneigenschaften haben und dadurch eine gewisse Unschärfe in ihren physikalischen Eigenschaften besitzen. So sind beispielsweise Elektronen nie ganz genau zu lokalisieren. In bestimmten Molekülkonfigurationen sind sie gar über den Raum »verschmiert« – Physiker sprechen von

Delokalisation. Ihre Aufenthaltswahrscheinlichkeit fällt hinter einer Energiebarriere deshalb nicht abrupt auf null, so dass eine gewisse Chance besteht, das Objekt auf der anderen Seite der Barriere zu finden. In Beryllkristallen machen sich auch die Wasserstoffatome von eingeschlossenen Wassermolekülen diese Delokalisierung zu Nutze.

Beryll, besser bekannt in seinen Varianten Smaragd oder Aquamarin, ist ein Kristall, dessen Atome sich zu einem wabenförmigen Gitter anordnen. Dieses Gitter hat Hohlräume, die gerade genug Platz für ein Wassermolekül bieten. Frühere Experimente mit Terahertzstrahlung hatten gezeigt, dass das in Beryll eingeschlossene Wasser ganz spezielle spektroskopische Eigenschaften besitzt. Man vermutete eine ungewöhnliche Konfiguration der Wasser-

moleküle in den engen Hohlräumen als Ursache. Kolesnikov und seine Kollegen beschossen deshalb einen solchen wasserhaltigen Kristall mit Neutronen. Sie fanden heraus, dass die beiden Wasserstoffatome der eingeschlossenen H_2O -Moleküle nicht mehr an ihrem festen Platz im Molekül waren, sondern in sechs verschiedene Konfigurationen über die gesamte Wabe »verschmiert«, also delokalisiert, so dass sich mittels des Tunneleffekts im Beryllkristall ringförmige Wassermoleküle ausbildeten. Die Forscher sprechen sogar von einem neuen Aggregatzustand von Wasser. Andere Experten sind aber skeptischer und sehen lediglich die zu erwartenden Effekte der Quantenmechanik am Werk. ↩

(Spektrum.de, 3. Mai 2016)

GRENZFLÄCHEN- CHEMIE Strömendes Wasser energetisiert die Oberfläche

von Lars Fischer



Neue Forschungsergebnisse werfen bisherige Annahmen über die chemischen Vorgänge zwischen Wasser und Feststoffen über den Haufen. Die Grenzfläche erweist sich als weit dynamischer als erwartet.

Ob sich Zucker im Kaffee auflöst oder das Auto durchrostet – bei vielen alltäglichen Vorgängen wechselwirken feste Materialien mit flüssigem Wasser. Entscheidend dafür ist die so genannte elektrochemische Doppelschicht: In der Flüssigkeit bildet sich eine bis zu zehn Nanometer dicke Grenzschicht aus, die gelöste Ionen enthält und entgegengesetzt zur Oberfläche geladen ist. Außerdem bilden die Wassermoleküle eine Struktur, die Eis ähnlicher ist als flüssigem Wasser. Bisher ging man davon aus, dass diese Schicht sehr stabil ist – dass zum Beispiel Strömungen sie nicht stören und dass der Feststoff der angrenzenden Oberfläche sehr gut löslich sein muss, um ihre Zusammensetzung merklich zu verändern. Ein Team um Dan Lis von der Universität Namur in Belgien und Mischa Bonn vom Max-Planck-Institut für Poly-

merforschung in Mainz hat jedoch gezeigt, dass diese Annahmen falsch waren – tatsächlich ist die Grenzfläche weit dynamischer, als irgendjemand vermutet hätte.

Das Team um Lis verwendete ein neues Verfahren namens Summenfrequenzerzeugungsspektroskopie (Sum Frequency Generation Spectroscopy), das die Ausrichtung von Wassermolekülen in ebenjener Grenzfläche misst. Flüssiges Wasser erzeugt kein Signal, da die Moleküle zufällig in alle Richtungen zeigen. Die Grenzschicht jedoch, mit ihrer stärkeren Ordnung, ist für das Verfahren sichtbar. Mit dieser Technik untersuchten sie, wie sich die Oberflächenladung von Kalziumfluorid und Glas abhängig von pH-Wert und Strömung verändert. Dabei zeigte sich, dass besonders strömendes Wasser die Chemie an der Oberfläche drastisch verändert.

Der Effekt basiert schlicht darauf, dass fließendes Wasser Teilchen aus der Doppel-

schicht abtransportiert – was man bisher nicht vermutet hatte. Dadurch verändert sich das Gleichgewicht zwischen der Oberfläche und ihren Komponenten, die in der Doppelschicht gelöst sind – und das Ladungsmuster verändert sich gegenüber dem strömungsfreien Zustand erheblich. Bei Kalziumfluorid, das aus zwei unterschiedlichen Atomsorten besteht, löst sich das Fluor besser als das Kalzium. Ohne Strömung spielt das keine Rolle – mit Strömung jedoch führt der Effekt zu einer deutlich positiven Oberflächenladung. Dieser Effekt, der Struktur und Chemie der Doppelschicht deutlich verändert, ist keineswegs klein: In einem Versuch hatte fließendes Wasser den gleichen Effekt wie eine Senkung des pH-Werts um zwei Einheiten – eine Konzentrationsänderung um den Faktor 100. ↪

(Spektrum.de, 6. Juni 2014)

Science 344, S. 1138 – 1142, 2014



SUPERHYDROPHOBER SCHMETTERLINGSFLÜGEL

Schneller Absprung

von Antje Findelee

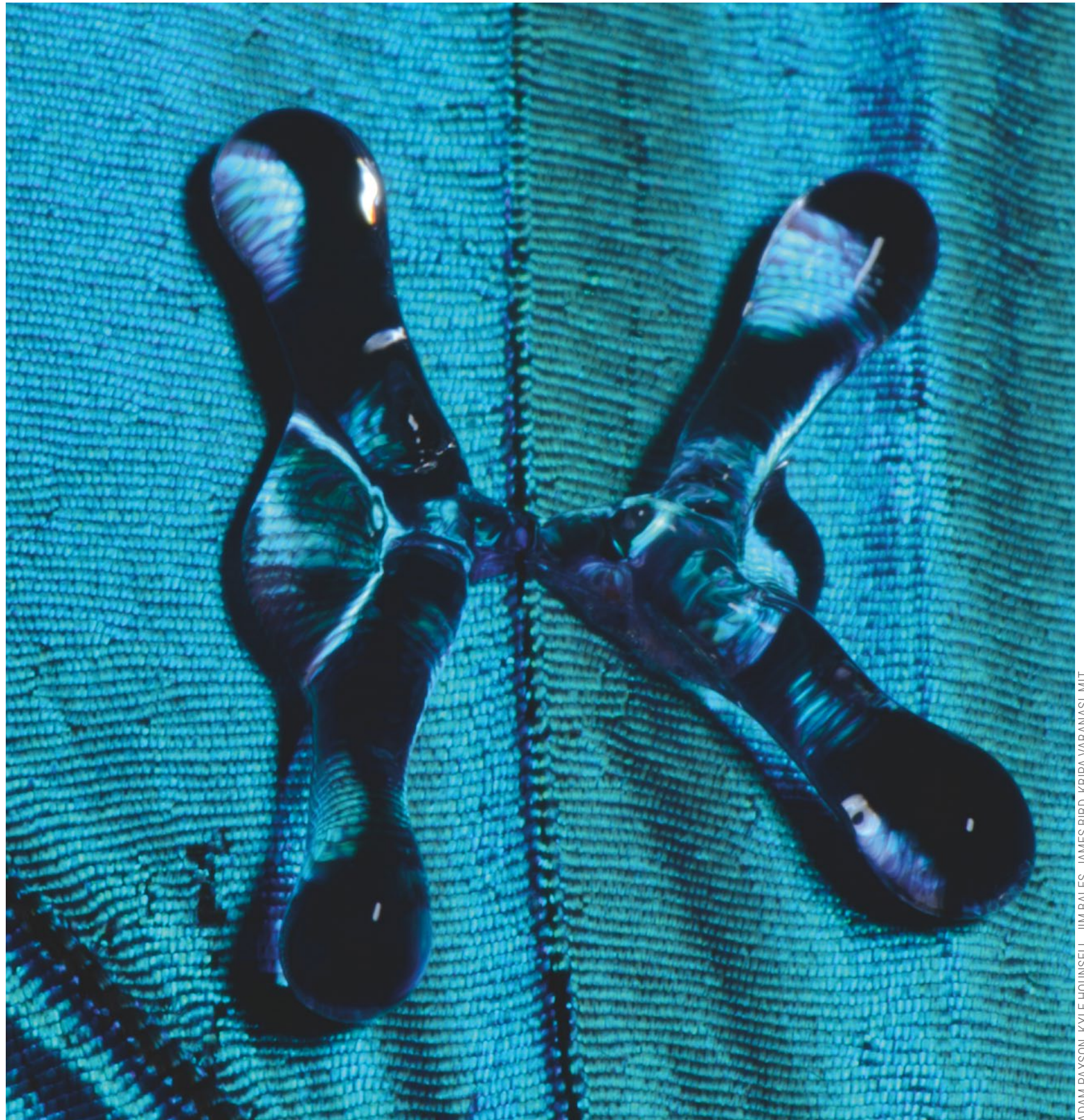
Feine Rippen beschleunigen das Abprallen von Tröpfchen auf stark wasserabweisenden Oberflächen.

ISTOCK / VITALINA RYBAKOVA

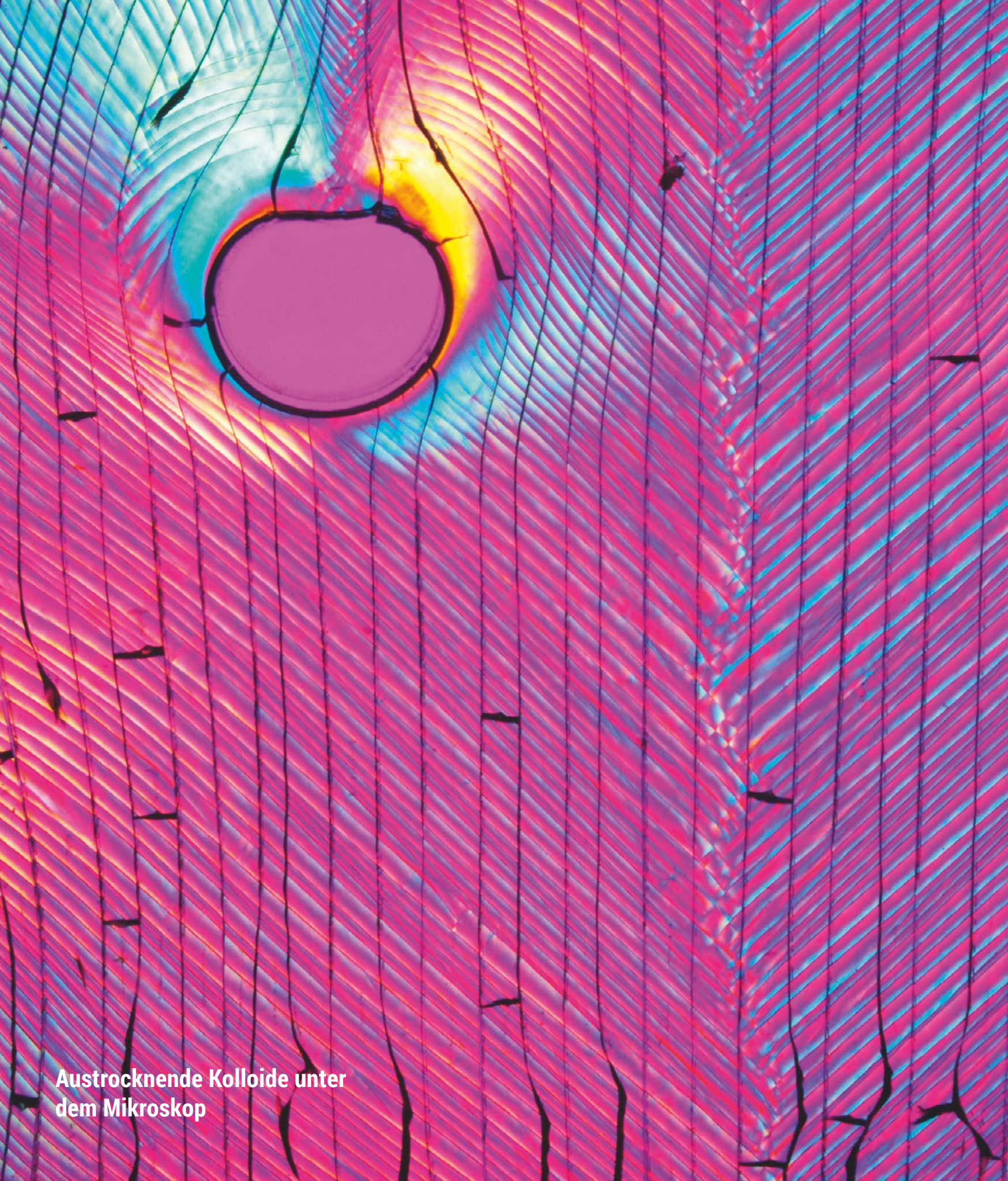
Trifft ein Wassertropfen auf eine superhydrophobe Oberfläche, breitet er sich kurz aus und löst sich dann wieder ab. Diese Mindestkontaktzeit lässt sich nicht weiter unterbieten – dachten Forscher bislang. Doch der Flügel eines Morphofalters zeigt, wie man das Abprallen beschleunigen kann: durch feine Rippen, die den Tropfen zerteilen. Die resultierenden kleineren Tröpfchen ziehen sich schneller wieder zusammen, was die Kontaktzeit verringert. Forscher um Kripa Varanasi vom MIT belegten mit einer Hochgeschwindigkeitskamera, dass ein derart konstruiertes Material auftreffende Tropfen schneller abweist. Das ließe sich etwa für die Turbinenschaufeln moderner Düsenflugzeuge nutzen, die einzufrieren drohen, wenn stark unterkühlte Wassertröpfchen auf sie einprasseln. ↶

Bird, J. C. et al.: Reducing the contact time of a bouncing drop. In: Nature 503, S. 385-388, 2013

Wassertropfen trifft auf Flügel eines Morphofalters



ADAM PAXSON, KYLE HOUNSELL, JIM BALES, JAMES BIRD, KRIPA VARANASI, MIT



KOLLOIDE

Trocknen im Zickzack

von Mike Beckers

Was geschieht, wenn Kolloide austrocknen?

Viele Stoffgemische, etwa Farben oder Kosmetika, bestehen aus feinen Partikeln in einer Lösung. Forscher vom Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen untersuchten, was geschieht, wenn solche Kolloide langsam austrocknen: Der Flüssigkeitsverlust entzieht dem Inneren Wasser und erzeugt so Scherkräfte. Diese produzieren unter der festen Oberfläche charakteristische, diagonale Streifenmuster, wie unter dem Polarisationsmikroskop zu sehen ist. ↻

(Spektrum der Wissenschaft, 10/2015)

Kiatkirakajorn, P.-C. et al.: Formation of Shear Bands in Drying Colloidal Dispersions In: Phys. Rev. Lett. 115, 088302, 18. August 2015

**Austrocknende Kolloide unter
dem Mikroskop**

LUCAS GOEHRING & PREE-CHA KIATKIRAKAJORN / MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR DYNAMIK UND SELBSTORGANISATION



Schillernde Farben

NEBEL

von H. Joachim Schlichting

Die Natur muss erst einmal Wassertröpfchen nach Größe sortieren,
damit wir Farbeffekte in Nebelfahnen beobachten können.

Stellen Sie sich vor, Nebel liegt über dem Land. Myriaden winziger Wassertröpfchen, 10, 20 oder 50 Millionstel Meter groß, schweben in der Luft und streuen Sonnenlicht verschiedenster Wellenlängen in alle Richtungen. Das Ergebnis ist eine triste, grauweiße Lichtmischung; jegliche Farbe der Landschaft scheint verschluckt.

Anders ist es, wenn sich Nebel in größeren Höhen unter weit gehend einheitlichen Bedingungen bildet. Dann besteht er aus etwa gleich großen Tröpfchen. Werden solche dünnen Wolken schließlich von Sonnen- oder Mondlicht durchquert, kann es zu eindrucksvollen Koronen kommen, also zu farbigen Ringsystemen, welche die leuchtenden Himmelskörper umgeben.

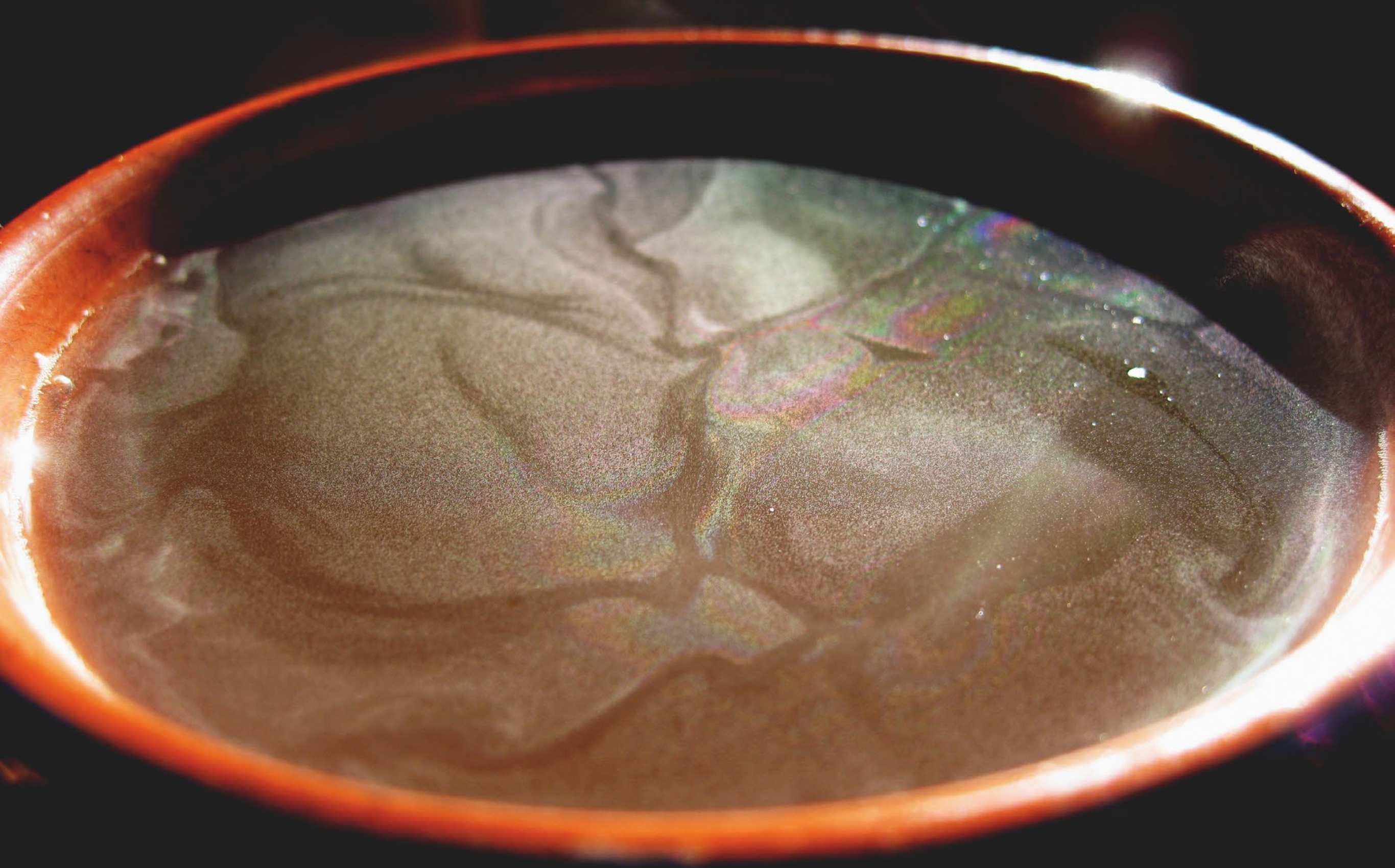
Um solche Phänomene zu sehen, müssen Sie gar nicht warten, bis sich am Himmel etwas tut. Wenn Sie bei tief stehender Sonne, etwa am frühen Morgen, auf Ihrer Terrasse heißen Tee oder Kaffee trinken und in die von der Tasse aufsteigende, lichtdurchflutete Nebelfahne blicken, können Sie auch darin Fetzen farbigen Lichts entdecken. Noch bunter geht es auf der Oberfläche des Getränks zu.

Diese farbigen Erscheinungen sind keineswegs selbstverständlich, schließlich setzen sie gleiche Tröpfchengrößen voraus. Schauen wir uns also genauer an, was passiert. Dass sonnenbeschienene Wassertröpfchen weißes Licht in Farbringe zerlegen, wird Sie nicht verwundern. Denn die winzigen Tröpfchen beugen das auftreffende Licht. Man kann sich das so vorstellen, dass eine Lichtwellenfront einer bestimmten Frequenz am Rand eines Tropfens neue Lichtwellen auslöst – sogenannte Elementarwellen –, die sich dann in unterschiedliche Richtungen ausbreiten.

Überlagern sich zwei von unterschiedlichen Punkten eines Tropfens kommende Lichtwellen auf der Netzhaut des Auges oder auf dem Sensor der Kamera, haben sie im Allgemeinen einen geringfügig unterschiedlichen Weg zurückgelegt. Die Folge ist eine so genannte Phasendifferenz: Wellenberge und Wellentäler sind gegeneinander verschoben. Je nach Größe der Phasendifferenz können sich die Wellen verstärken oder auch auslöschen. Im ersteren Fall werden die zugehörigen Farben verstärkt, im letzteren verschwinden sie. So oder so entsteht durch diese Interferenz farbiges Licht.

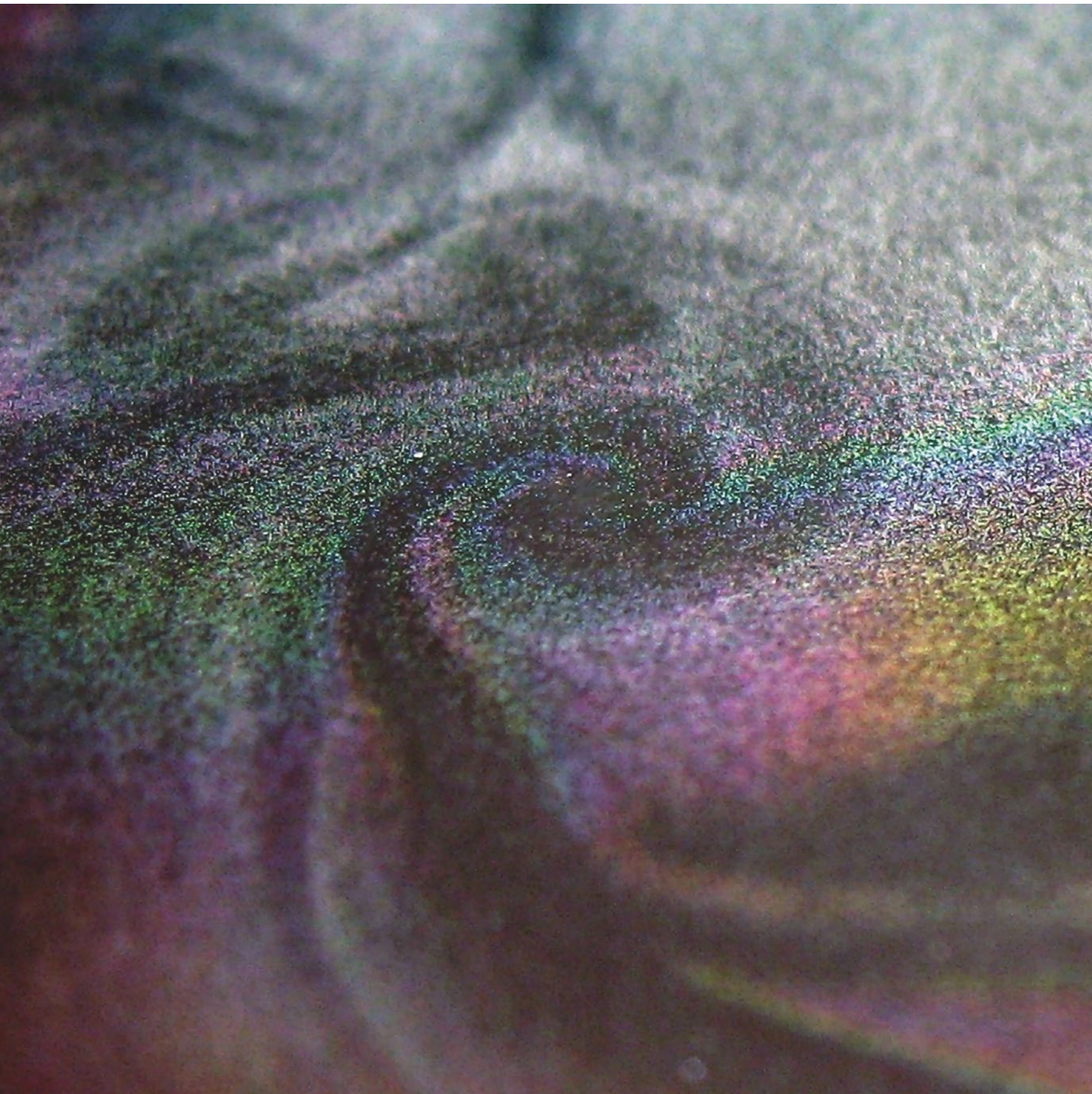
»Aber als ich den Tee
aufgoss / waren schon die
Möglichkeiten / ungeheuer,
wieder vergessen / im
quirrenden Dampf verfang
sich mein Blick / bis er
verschwand, ...«

[Henning Ziebritzki]



TRÖPFCHENINSELN IM TEE

Konvektionsvorgänge in der Flüssigkeit lassen schwebende Tröpfcheninseln entstehen. Die Größe der Tröpfchen darin ist mehr oder weniger identisch – Voraussetzung dafür, dass die Inseln in bunten Farben schimmern.



H. JOACHIM SCHLICHTING

Die ringförmige Struktur der Farben verdankt sich dabei der Kugelsymmetrie der Tröpfchen. Man kann sich für jede Farbe oder Wellenlänge einen Kegel vorstellen, dessen Spitze in unser Auge weist. Licht einer bestimmten Wellenlänge wird dann von allen Tröpfchen aus, die auf dem Kegelmantel sitzen, in das Auge gelangen, so dass wir einen farbigen Kreis wahrnehmen. Doch nur dann, wenn viele ungefähr gleich große Tröpfchen von weißem Licht durchstrahlt werden, addieren sich die Intensitäten des gebeugten Lichts, und es entsteht tatsächlich ein gut sichtbares Ringsystem – sonst bleibt der Nebel grau.

In den turbulenten Nebelschwaden über dem Tee verändern sich die Farbstrahlen ständig. Einheitliche Bedingungen, unter denen sich gleich große Tröpfchen bilden könnten, liegen ganz offensichtlich immer nur kurzfristig vor. Anders ist es bei den Tröpfchen, die schwebende Inseln über der

FARBSTREIFEN IN TRÖPFCHENINSELN

Die Farbstreifen in den Tröpfcheninseln sind in ständiger Bewegung, weil die Tröpfchen durch Luftbewegungen immer wieder verwirbelt werden.

Oberfläche des Tees formen. Denn dank eines subtilen Selektionsprozesses besitzen sie alle etwa dieselbe Größe.

Wassertröpfchen werden in der Schwebe gehalten

Dieser Prozess verläuft so: An der Grenze zwischen heißer Wasseroberfläche und vergleichsweise kalter Luft bildet sich Wasserdampf und steigt so schnell auf, dass die Strömung schon in geringer Höhe turbulent wird. Grund für die starke Beschleunigung der Moleküle ist vor allem die Wärme, die frei wird, wenn ein Teil des heißen Dampfes in der kälteren Luft gleich wieder zu winzigen Wassertröpfchen kondensiert. Diese werden dann als Nebel sichtbar und helfen uns, die schnelle Bewegung des unsichtbaren Dampfes zumindest indirekt zu verfolgen.

Normalerweise entstehen die Tröpfchen in unterschiedlichen Größen. Die größeren und damit schwereren fallen sofort wieder in das Getränk zurück, die kleineren entweichen in den sichtbaren Nebelfahnen. Dazwischen gibt es Tröpfchen, die genau das richtige Gewicht haben, um von dem aufsteigenden Dampfstrom getragen und in der Schwebe gehalten zu werden.

WILFRIED SUHR; MIT FRDL. GEN. VON H. JOACHIM SCHLICHTING



KORONA

Um das an der Flüssigkeit reflektierte Sonnenlicht bildet sich eine Korona, wenn man die Tasse aus etwas größerem Abstand betrachtet.

Diese treibenden Tröpfcheninseln sorgen nicht nur für die beeindruckenden Farben, sondern verraten uns auch etwas über die Dynamik an der Oberfläche des Getränks. Denn sie sind voneinander durch schmale Grenzbereiche getrennt, durch die wir direkt die dunkle Oberfläche des Tees sehen. Die Tröpfcheninseln schweben nämlich genau über jenen Oberflächenbereichen, in denen heiße Flüssigkeit aufsteigt,

sich abkühlend zu den Rändern hinbewegt und schließlich – kühler, also wieder schwerer geworden – erneut absinkt. Sie reichen also nur bis zu jenen Orten, über denen mangels Wärmeenergie kein Dampf und damit auch kein Nebel mehr entsteht.

Noch verstärkt wird diese Konvektion übrigens durch die mit der Temperatur variierende Oberflächenspannung. Heißes Wasser besitzt eine geringere als kaltes; es

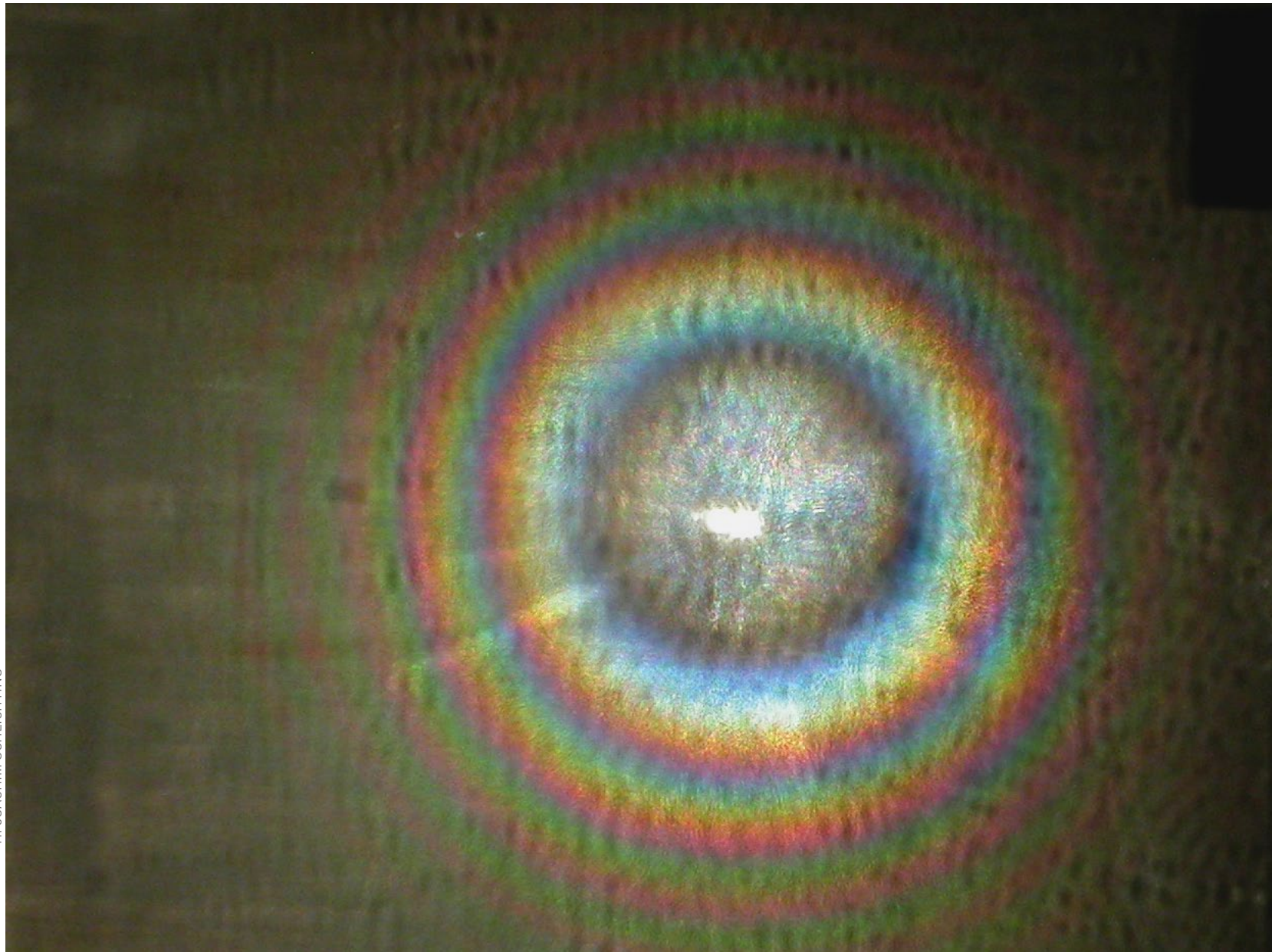
kann also energetisch günstiger sein, die kühlere Oberfläche durch eine heißere zu ersetzen. Auch aus diesem Grund breitet sich die aufsteigende heiße Flüssigkeit in Richtung auf die kühlen Ränder aus.

Am Ende unternehmen wir noch ein kleines Experiment mit unserer Teetasse. Lassen wir das Sonnenlicht so auf die Oberfläche des Tees fallen, dass es eine möglichst ausgedehnte Tröpfcheninsel durchstrahlt, und blicken aus etwas größerem Abstand darauf. So wird die Verwandtschaft des Farbenspiels über dem Tee mit den Lichterscheinungen um Sonne und Mond offensichtlich, denn jetzt setzen sich auch die vereinzelt Farbfetzen über dem Tee zu einer veritablen Korona zusammen. ↶

(Spektrum der Wissenschaft, 9/2012)

KORONA DURCH EINE BESCHLAGENE SCHEIBE

Eine Korona mit ausgeprägten Ringstrukturen kann sich auch dann zeigen, wenn man eine entfernte Lichtquelle durch eine mit kleinen Wassertröpfchen beschlagene Scheibe betrachtet. Die dunkle Sprenkelung ist Folge der Materialstruktur der Scheibe.



LICHTBRECHUNG

Warum sehen wir
im Regenbogen immer
gleiche Farben?

von Laura Hennemann



Im Innern der Regentropfen folgen die Lichtstrahlen den optischen Gesetzen der Brechung. Wo allerdings das Ende des Regenbogens liegt, ist für jeden Betrachter individuell.

Kinder malen die Sonne gelblich. Und tatsächlich dominieren Gelb- und Rottöne im Sonnenlicht minimal. Aber auch alle anderen Farben sind darin enthalten. Anders als auf dem Malblock addieren sich bei Licht alle Farben zusammen zu weißen Strahlen. Daher ist physikalisch betrachtet die Sonne eine weiße Lichtquelle.

Ein Glasprisma fächert diese Farben wieder auf und erinnert uns damit an die Tatsache, dass das Sonnenlicht eigentlich bunt ist. Und Regentropfen machen im Grunde das Gleiche wie das Prisma: Sie brechen das Licht. Was hier geschieht – eine Lichtbrechung –, erklärt am Ende auch die Farbreihenfolge des Regenbogens.

Verlangsamung knickt den Strahl

Zunächst ist Lichtbrechung etwas anderes als Lichtbeugung: Gebeugt wird das Licht immer an der Kante von lichtundurchläss-

sigen Objekten; eine Brechung tritt dann auf, wenn Licht in ein transparentes Medium eindringt – also beispielsweise in das Glas eines Prismas oder in das Wasser eines Regentropfens.

Lichtbrechung funktioniert nur dann, wenn das Licht nicht senkrecht, sondern in einem Winkel auf die Glas- oder Wasserkante trifft. Zoomen wir gedanklich ganz nah an die erste Kante eines Prismas heran und betrachten wir zunächst eine Wellenfront roten Lichts, der von schräg oben einfällt: Der untere Teil tritt etwas früher ins Glas ein als der obere Teil. Nun gilt zwar seit Einstein, dass Licht immer die gleiche Geschwindigkeit hat – allerdings nur im Vakuum. In einem Medium wie Glas wird das Licht deutlich verlangsamt. **Der untere Teil der roten Wellenfront wird also schon langsamer**, während der obere Teil noch in der Luft und damit weiterhin schnell ist. Um als Wellenfront erhalten zu bleiben, »kippt« also der Strahl beim Eintritt ins Medium:

Das Licht läuft nicht geradlinig weiter, sondern knickt beim Übergang ins Glas ab.

Nun ist das, was wir Lichtfarben nennen, physikalisch betrachtet einfach nur Licht unterschiedlicher Wellenlängen. Rotes Licht hat die längste Wellenlänge im sichtbaren Spektralbereich, blaues die kürzeste. Die genaue Lichtgeschwindigkeit in einem Medium hängt von dieser Wellenlänge ab: Blaues Licht wird stärker verlangsamt als rotes. Daher wird blaues Licht beim Eintritt ins Glas stärker geknickt.

Beim Austritt aus dem Prisma, also beim Übergang vom Glas zurück in die Luft, geschieht das Gleiche nochmals: Der obere Teil der Wellenfront tritt früher in die Luft aus und bekommt wieder seine Originalgeschwindigkeit, während der untere Teil noch im Glas festhängt und daher langsamer folgt. So knickt die Front nochmals nach unten. Wieder ist der Effekt beim blauen Licht stärker als beim roten, während alle anderen Farben dazwischen lie-

gen. Hinter dem Prisma sehen wir also immer den gleichen Farbfächer: Rot oben, Blau unten.

Die Situation ist für den Regenbogen im Grunde die gleiche – nur dass das Licht zusätzlich an der Rückseite der Regentropfen einmal reflektiert wird. Am Ende verlässt blaues Licht die Tropfen oberhalb von rotem Licht. (Der Strahlenverlauf im Wassertropfen lässt sich [hier interaktiv verfolgen](#).)

Aber das ist noch immer nicht das Ende der Geschichte. Denn wenn wir einen Regenbogen am Himmel sehen, ist Rot oben und Blau unten. Die Reihenfolge der Farben ist also doch wieder andersherum, als wir es vom einfachen Modell eines einzelnen Regentropfens erwarten würden!

Der eigene Schatten im Zentrum

Die Erklärung hierfür ist, dass Regen nicht aus einem, sondern aus sehr vielen Tropfen besteht. [Für jede Lichtfarbe ist ein anderer Tropfen auf genau der richtigen Höhe, um uns diese Farbe mit maximaler Intensität ins Auge zu schicken](#). Tropfen, die rotes Licht zum Betrachter schicken, sind weiter oben am Himmel als Tropfen, die blaues Licht senden. All dieses Licht, das [aus vielen Regentropfen zugleich ge-](#)

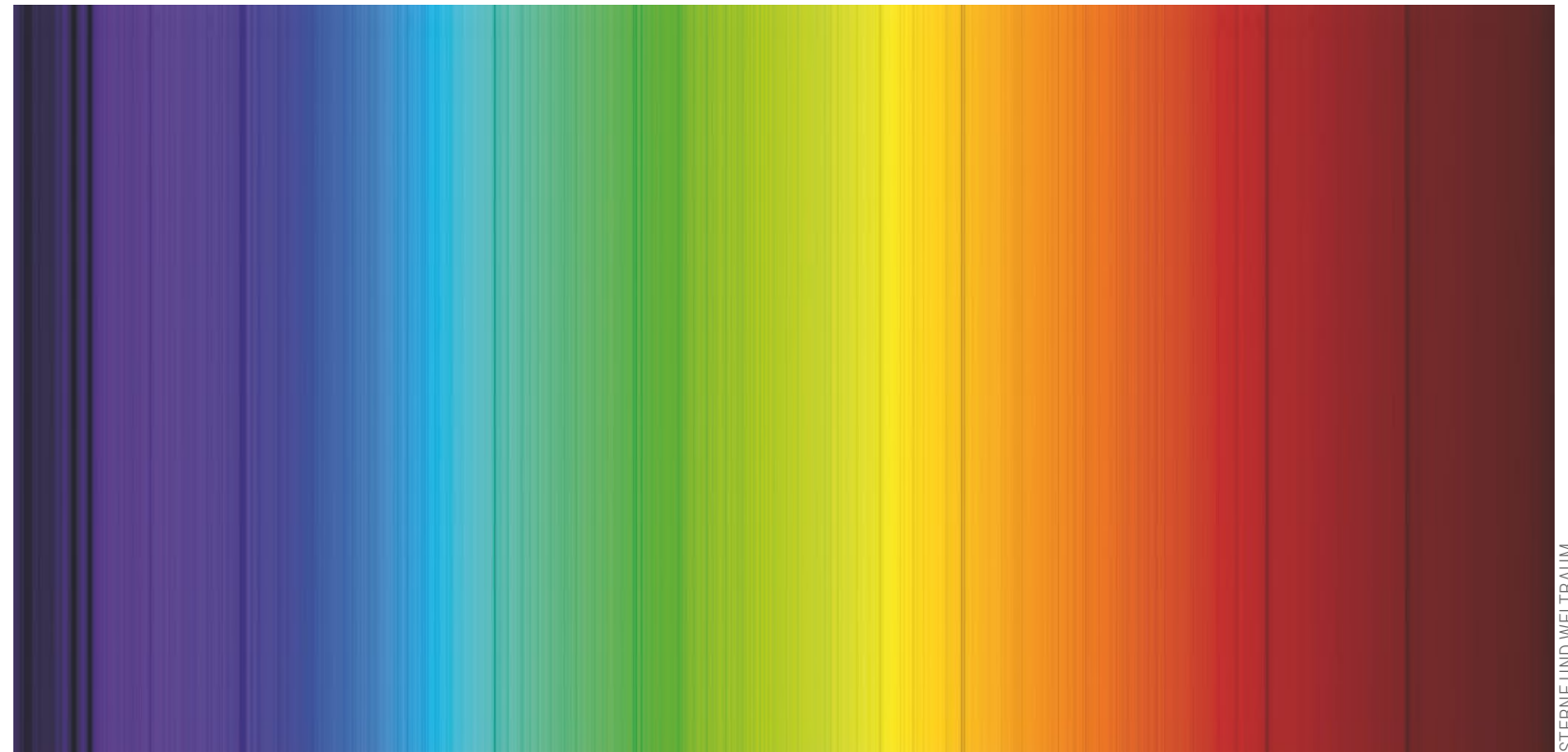
[brochen und reflektiert zurückgeworfen wird](#), erreicht schließlich den Betrachter, der mit dem Rücken zur Sonne steht – und dieser [sieht einen zusammenhängenden Regenbogen](#).

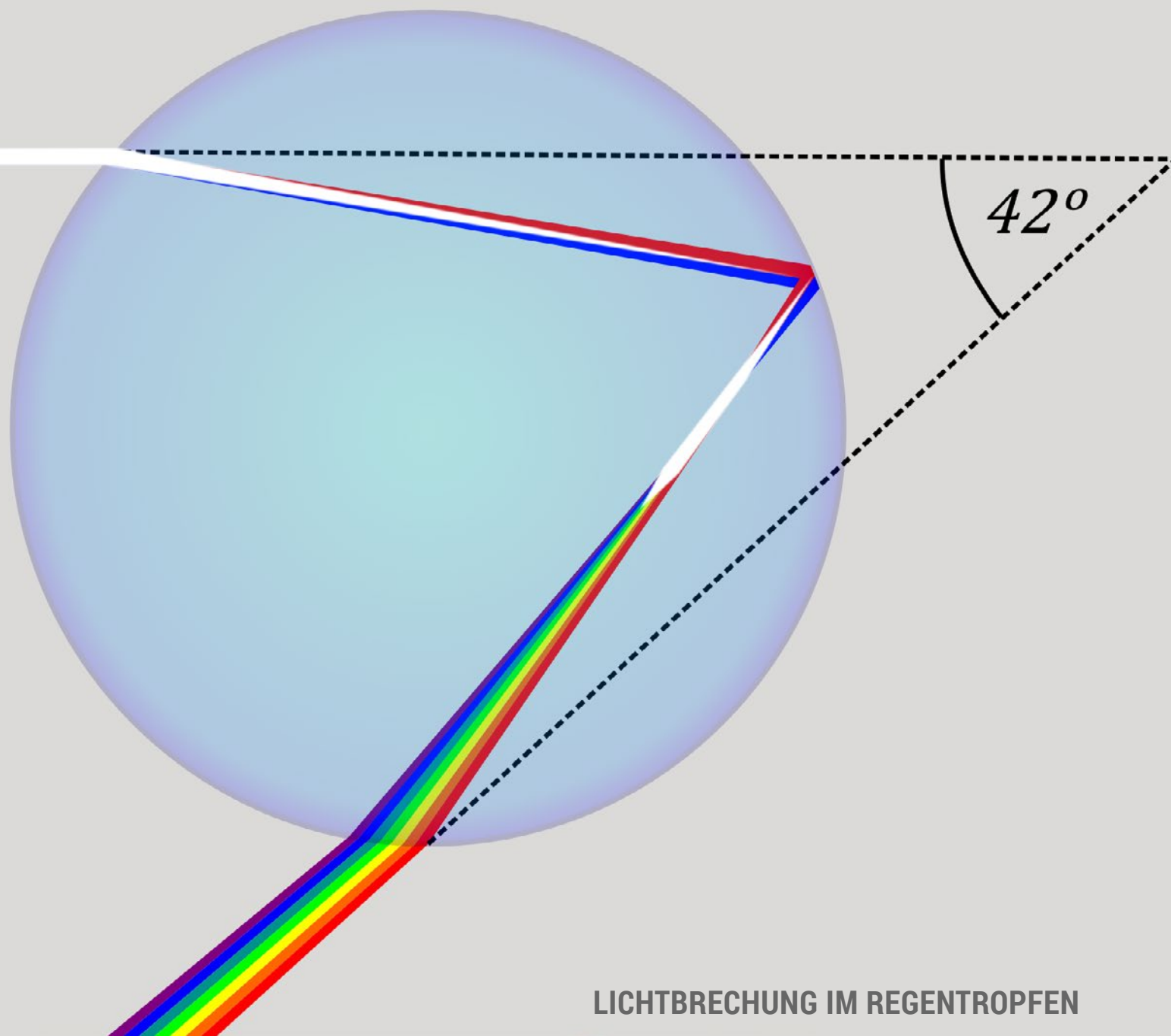
Übrigens sieht jeder seinen eigenen privaten Regenbogen: Die scheinbare Lage

des Regenbogens in der Landschaft hängt nämlich von der Position des Betrachters ab. Der Schatten vom Kopf des Betrachters liegt dabei im Zentrum des Kreises, der der vollständige Regenbogen eigentlich ist. Der Regenbogen selbst befindet sich in dem Bereich zwischen 40 und 42 Grad

Das Spektrum der Sonne

In den Regenbogenfarben des Sonnenlichts – dem Spektrum – sind dünne und dicke schwarze Linien sichtbar. Diese Fraunhoferschen Absorptionslinien entstehen in der Photosphäre der Sonne, einer nur 500 Kilometer dünnen Schicht an der solaren Oberfläche.






LICHTBRECHUNG IM REGENTROPFEN

Die Gesetze der Lichtbrechung und Reflexion beschreiben, welchen Pfad die einzelnen Farben im Innern eines Regentropfens nehmen.

rund um die Linie, die den Kopf des Betrachters und den Schatten seines Kopfes verbindet. Ein kompletter Regenbogenkreis lässt sich manchmal vom Flugzeug aus sehen.

Kurz gesagt liegt die Antwort zur Farbreihenfolge des Regenbogens im physikalischen Gesetz der Lichtbrechung, demzufolge die Lichtfarben in den Wassertropfen unterschiedlich stark verlangsamt und dadurch unterschiedlich stark gebrochen werden. Doch was ist mit Doppelregenbögen? Hier zeigt der zweite, schwächere Regenbogen zwar die gleiche Farbfolge, aber in genau umgekehrter Richtung: Blau ist oben und Rot unten. Das liegt an einer zweiten Reflexion des Lichts im Innern des Tropfens; **wieder mit der Ergänzung, dass Wassertropfen auf verschiedenen Höhen die jeweilige Lichtfarbe zum Betrachter schicken.** Allerdings wird immer nur ein kleiner Teil des Lichts im Tropfen reflektiert, weshalb schon der Hauptregenbogen eine eher schwache Lichterscheinung ist. Der zweite Bogen, für den zwei Reflexionen in jedem Wassertropfen nötig sind, ist daher nochmals blasser. ↩

(Spektrum.de, 10. September 2015)



METEOROLOGIE

Was wiegt eine Wolke?

von Marina Rensch

Kann so etwas Flauschig-Weiches überhaupt viel wiegen? Es kann.
Der federleichte Anblick der Wolken führt uns gewaltig in die Irre.

Sie wirken leicht wie Zuckerwatte, wenn sie am Himmel entlangschweben, und wie ein weiches Nichts, wenn ein Flugzeug sie durchquert: Wolken. Da ist es schwer vorstellbar, dass sie Millionen Tonnen auf die Waage bringen.

Doch wie bestimmt man überhaupt das Gewicht einer Wolke? Meteorologen berechnen mit Hilfe der Größe einer Wolke und der enthaltenen Wassermenge einen Näherungswert. Eine Schönwetterwolke beispielsweise enthält nur ungefähr ein Gramm Wasser pro Kubikmeter. Das klingt erst einmal sehr leicht. Ausschlaggebend ist jedoch die immense Größe des Gebildes. Leider sind Wolkenformen zu komplex, als dass man immer ihre genauen Maße bestimmen könnte. Wenn bei Regenwetter der Himmel mit großen, dunklen Wolken verhangen ist, lässt sich nicht einmal sicher sagen, wo die eine aufhört und die andere anfängt. Und selbst Einzelwolken sind so unter-

schiedlich in ihrer Form, dass pauschale Größen- oder Gewichtsangaben unmöglich sind.

Bleiben wir deshalb beim Beispiel einer Schönwetterwolke, einem Kumulus. Diese Wolken haben meist klare Begrenzungen, was die Schätzungen vereinfacht. »Ein mittlerer Kumulus kann problemlos einen Kubikkilometer groß sein«, sagt Thomas Leisner, Direktor des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung am Karlsruher Institut für Technologie. »Das macht eine Milliarde Kubikmeter mit Wassertropfen, die dann insgesamt 1000 Tonnen wiegen.« Und so wird aus der Zuckerwatte-Wolke eine schwebende Wassermasse fast so schwer wie 800 Autos.

Doch so gewichtig das klingt, es ist fast nichts im Vergleich zu den Wolken tropischer Regionen. Weil dort die Luft wärmer ist, speichern sie mehr Wasser: Bis zu sieben Gramm sind es pro Kubikmeter. Folglich sind sie im Schnitt siebenmal schwerer als Wolken hier zu Lande.

All das verblasst jedoch im Vergleich zu Gewitterwolken, den monströsen **Kumulonimbus**. Sie türmen sich mitunter elf Kilometer hoch auf und messen ebenso viel im Durchmesser. Besonders große Exemplare bringen es dadurch auf mehrere Millionen Tonnen Wasser.

Und wie kommt es, dass diese schweren Ungetüme nicht einfach vom Himmel fallen? Das liegt daran, dass Wolken aus unzähligen winzigen Wassertröpfchen bestehen, die gerade einmal zehn Mikrometer Durchmesser haben. Das ist noch viel feiner als die Tropfen aus einem herkömmlichen Wasserzerstäuber. Allerdings würden auch diese winzigen Tröpfchen langsam zur Erde fallen. Wolken entstehen aber durch warme, aufsteigende Luft, so bekommen sie automatisch Aufwind. Erst wenn die Wolken noch viel mehr Wasser gesammelt haben, werden sie zu schwer und fallen schließlich herab: Es fängt an zu regnen. ↩

(Spektrum.de, 21. November 2014)



UNTERKÜHLTES WASSER

Flüssig bei -46°C

von Daniel Lingenhöhl

Ab minus 38 Grad Celsius gefriert Wasser zu einer glasartigen, nicht-kristallinen Form. Erstmals gelang es Physikern, Wasser dort flüssig zu halten.

Physikern um Anders Nilsson vom [US-Beschleunigerzentrum SLAC](#) ist es gelungen, Wasser auf minus 46 Grad Celsius herunterzukühlen, ohne dass es gefriert, und dessen Struktur mit Hilfe eines starken Röntgenlasers zu untersuchen. Damit stießen sie in eine Art eisiges Niemandsland vor, das sich in einer Temperaturregion zwischen minus 38 und minus 115 Grad Celsius befindet: Wasser erreicht hier eine glasartige, nichtkristalline

Form, was bislang experimentell noch nicht belegt werden konnte. Nun zeigt sich: Die innere Ordnung des unterkühlten Wassers nimmt mit fallender Temperatur kontinuierlich zu, so die Forscher.

Um in diesen Bereich vorzustößen, konstruierten die Wissenschaftler ein spezielles Gerät, das winzige Wassertropfchen in eine Vakuumkammer schießt. Dort verdampft Wasser von der Tropfenoberfläche, wobei die Verdunstungskälte den übrigen Tropfen weiter kühlt. Das un-

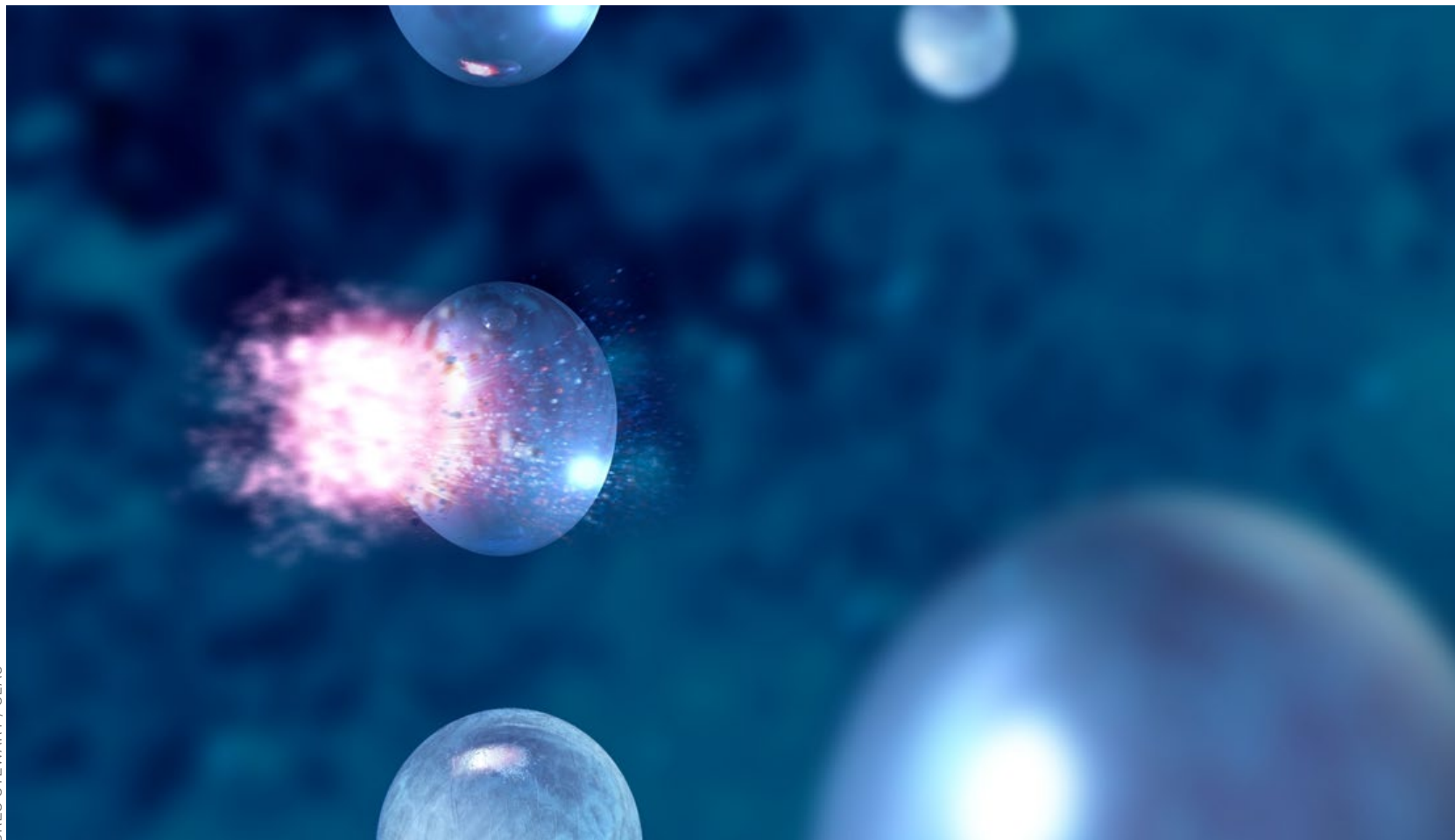
terkühlte Wasser beschossen die Forscher dann mit ultrakurzen und extrem hellen Röntgenlaserblitzen, um die Struktur zu analysieren. »Je kälter die Tröpfchen waren, desto mehr hatten bereits Eiskristalle in sich. Ein nennenswerter Teil blieb jedoch komplett flüssig«, so der beteiligte Anton Barty vom DESY in Hamburg. »Es gibt verschiedene, konkurrierende Theorien dazu, wie Wasser sich in diesem ›Niemandsland‹ verhält. Unsere Ergebnisse zeigen, dass unterkühltes Wasser auf einer lokalen Skala mehr und mehr innere Ordnung gewinnt, dass diese Veränderung kontinuierlich abläuft und sich bei tiefen Temperaturen stark beschleunigt.« Nun wollen die Physiker in noch kältere Regionen vorstoßen. ↩

(Spektrum.de, 23. Juni 2014)

Nature 10.1038/nature13266, 2014

UNTERKÜHLTES WASSER

Künstlerische Darstellung eines LCLS-Röntgenlaserblitzes, der einen unterkühlten Wassertropfen trifft.



A close-up photograph of three ice cubes. The cubes are translucent blue and covered in numerous small, glistening water droplets, suggesting they are melting. They are arranged in a cluster, with one cube in the foreground and two slightly behind it. The background is a plain, light color.

HYDROLOGIE Absoluter Gefrierpunkt von Wasser ermittelt

Ab minus 48 Grad Celsius ist endgültig Schluss mit flüssig:
Bei dieser Temperatur verändert sich die molekulare
Struktur von Wasser und Eis entsteht.

von Daniela Zeibig

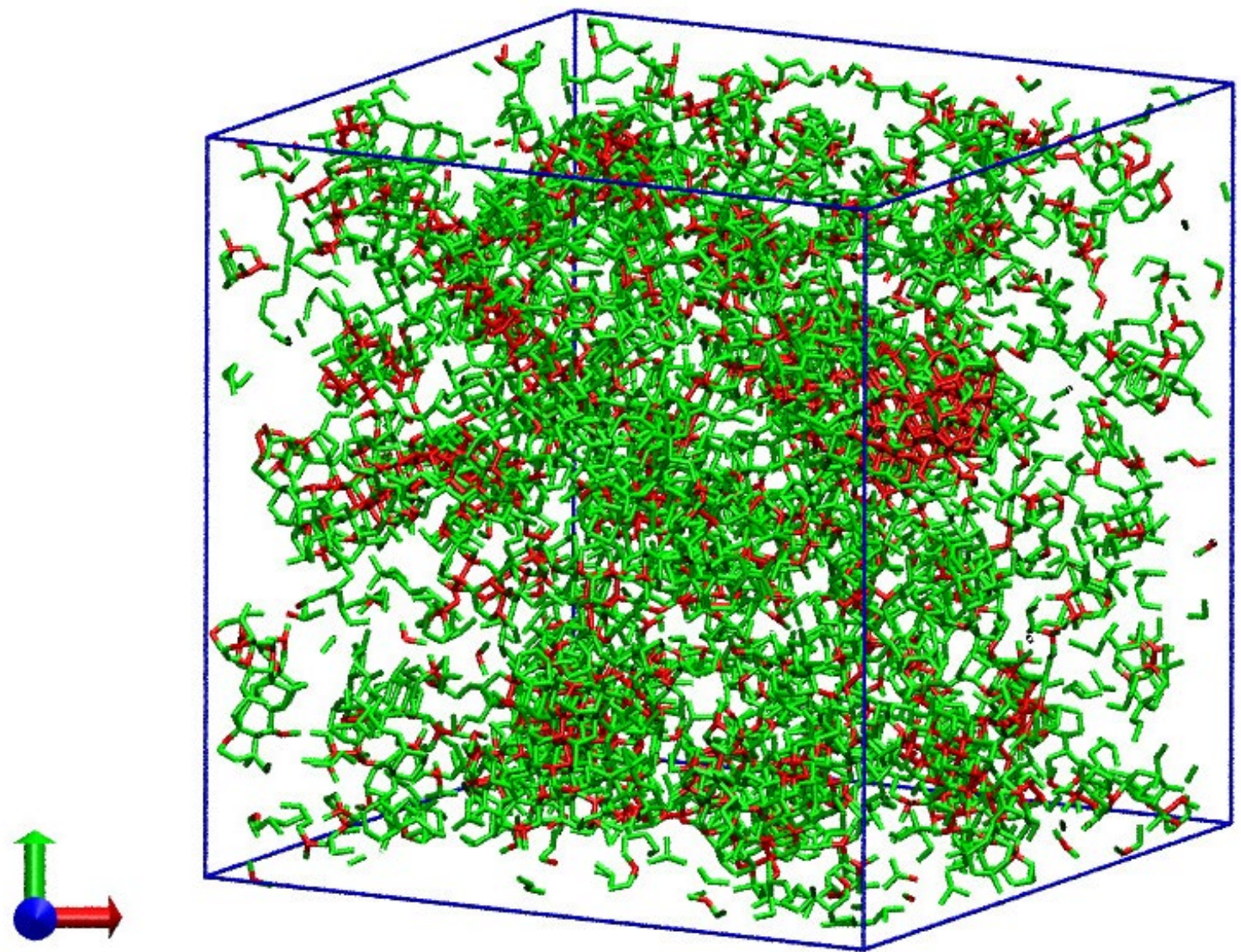
Wasser gefriert längst nicht zwangsläufig ab 0 Grad Celsius zu Eis, wie es gerne vereinfacht vermittelt wird.

Ohne größere Verunreinigungen, die als Kristallisationskeime dienen, kann Wasser noch wesentlich weiter abgekühlt werden, ohne den Aggregatzustand von flüssig zu fest zu wechseln. Die Chemikerinnen Valeria Molinero und Emma Moore von der University of Utah in Salt Lake City haben nun die magische Grenze entdeckt, ab der Wasser sich der Eiswerdung überhaupt nicht mehr entziehen kann: Bei minus 48 Grad Celsius verändert sich seine molekulare Struktur und leitet so den Gefriervorgang zwangsläufig ein.

Flüssiges Wasser ist ein Netzwerk aus Wassermolekülen, die lose über so genannte Wasserstoffbrücken miteinander verbunden sind. Um ihm die regelmäßige, feste Kristallstruktur von Eis zu verleihen, muss sich zunächst ein kleiner, meist nur nanometergroßer Kern aus Eis bilden, der sich dann, wenn er eine bestimmte kritische Größe überschreitet, über das gesamte Volumen ausbreitet.

Von Wasser über intermediäres Eis zu Eis

Wenn unterkühltes Wasser (weiß) gefriert, kann man nur wenig kristallines Eis (rot) beobachten, dafür aber zunehmend so genanntes intermediäres Eis (grün). Die Wassermoleküle bilden Tetraederformen aus und sorgen so ab minus 48 Grad Celsius dafür, dass das Wasser gefrieren muss.



In völlig reinem Wasser kann sich ein solcher Kern laut den Forscherinnen nur durch spontane Strukturveränderungen ausbilden. Und genau das passiert bei minus 48 Grad Celsius: Bei dieser Temperatur bilden die Wassermoleküle vermehrt Tetraeder aus, in denen ein Wassermolekül mit drei anderen verbunden ist. Die Tetraederformen stabilisieren die winzigen Eiskerne und sorgen so dafür, dass das Wasser seine theoretisch höchste Kristallisationsrate erreicht und dadurch frieren muss. Diese Strukturen bezeichnen die Forscherinnen als »intermediäres Eis« – eben weil sie sich zwischen der von Wasser und Eis bewegen.

Um diesen Vorgang auf molekularer Ebene genau beobachten und die exakte Temperatur bestimmen zu können, mussten Molinero und Moore sich allerdings superschneller Computermodelle bedienen, denn ab etwa minus 41 Grad Celsius kristallisiert Eis zu schnell, um verbleibendes Wasser noch messen zu können. Also berechneten sie über Stunden das Verhalten von über 32 000 Wassermolekülen – die letztendlich kaum mehr als einen winzigen Wassertropfen darstellen. Forscher wissen schon lange, dass Wasser im Gegen-

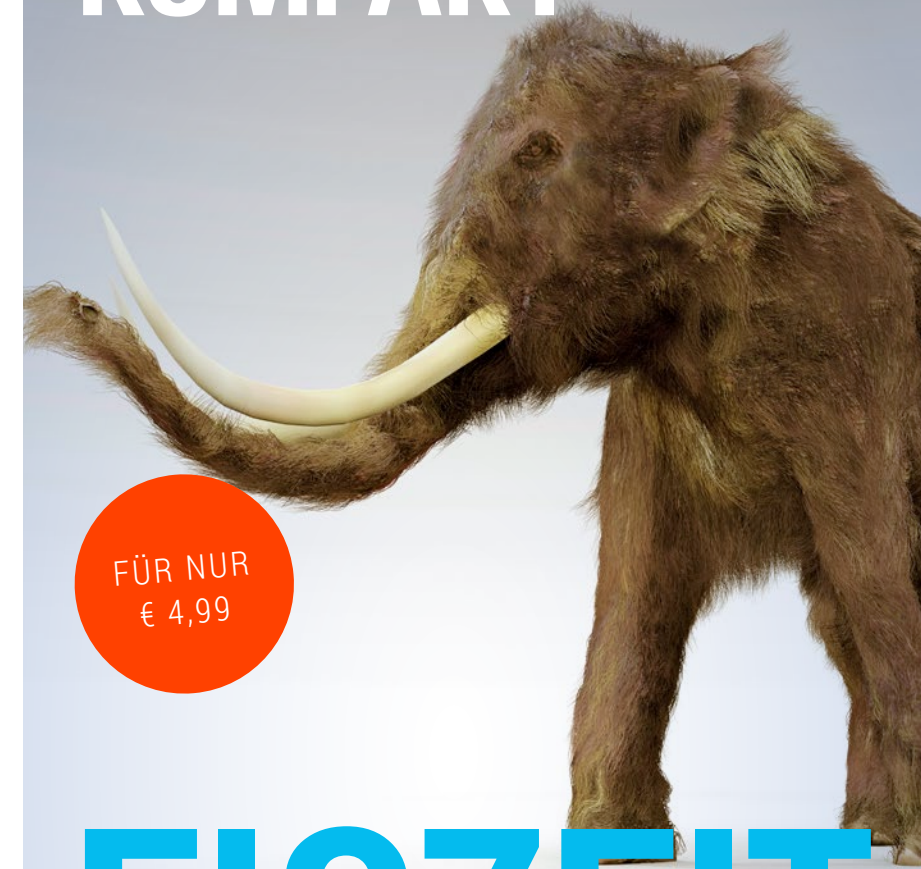
satz zu anderen Flüssigkeiten häufig äußerst spezielles Verhalten an den Tag legt. So ist beispielsweise sehr ungewöhnlich, dass Wasser seine höchste Dichte noch im flüssigen Zustand bei rund 4 Grad Celsius aufweist. Die spontane Strukturveränderung hin zur Tetraederform könnte nun möglicherweise auch eine Erklärung für derartige thermodynamische Besonderheiten liefern.

(Spektrum.de, 24. November 2011)

Nature 479, S.506-509, 2011

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

KOMPAKT



FÜR NUR
€ 4,99

EISZEIT

Leben im Pleistozän

Mammut & Co: Versumpft,
versprengt, verendet

Vorstoß in ein menschen-
leeres Europa

HIER DOWNLOADEN



EISPHYSIK

Flüssiges Wasser bei 130 Grad unter null

von Lars Fischer

Bei tiefen Temperaturen bildet Wasser unter bestimmten Umständen eine zähe Flüssigkeit. Das könnte auch für die Eigenschaften von Kometen bedeutsam sein.

Experimente eines internationalen Forschungsteams um Thomas Lörting von der Universität Innsbruck deuten darauf hin, dass Wasser unter bestimmten Umständen bei sehr tiefen Temperaturen flüssig ist. Demnach existiert unter speziellen Bedingungen bei etwa minus 130 Grad Celsius ein Temperaturbereich, in dem Wassermoleküle sich frei bewegen können. Das Team um Lörting untersuchte eine lange ungeklärte Frage, nämlich die nach dem so genannten Glasübergang: An welchem Punkt wird aus amorphem, also

FOTOLIA / KITE_RIN

unstrukturiertem Eis eine zähe Flüssigkeit? Alle Festkörper ohne Kristallstruktur haben einen Temperaturbereich, in dem ihre Bestandteile sich voneinander lösen und frei zu bewegen beginnen. Das gilt auch für amorphes Eis, das sich bei extrem niedrigen Temperaturen bildet, wie sie zum Beispiel im äußeren Sonnensystem herrschen. Bisher allerdings deutete alles darauf hin, dass sich amorphes Eis schon während dieses Übergangs in einen kristallinen Festkörper umwandelt, so dass bei Temperaturen weit unter minus 100 Grad Celsius nie eine Flüssigkeit entsteht.

Dem widerspricht nun Lörtings Befund: Wie das Experiment zeigt, gibt es unter bestimmten Umständen sehr wohl einen Temperaturbereich, in dem das Wasser eine extrem unterkühlte Flüssigkeit bildet – 130 Grad unter seinem Gefrierpunkt.

Lörtings Arbeitsgruppe wählte eine Heizrate von 0,4 Kelvin pro Minute. Unter diesen Bedingungen begann der Glasübergang bei 121 Kelvin und endete bei 136 Kelvin. Ab diesem Punkt war das Wasser eine unterkühlte Flüssigkeit, zäh wie Honig. Den langsamen Phasenübergang sahen die Forscher um Lörting mit eigenen Augen. Ab dem Beginn des Glasübergangs

verwandelte sich die Probe von einem schrundigen, porösen Material langsam zu einem glatten Block. Neutronenstreuungsexperimente offenbarten, dass die winzigen Hohlräume des Materials langsam in sich zusammensackten, je flüssiger das Eis wurde. Die zylindrischen Poren des amorphen Eises gingen in eine dichtere Lamellenstruktur über. Erst ab 144 Kelvin begann das Wasser zu kristallisieren.

Dieses Verhalten des Wassers betrifft quasi automatisch auch die Astrophysik, denn amorphes Eis entsteht nur bei extrem tiefen Temperaturen im interplanetaren Raum weit jenseits der Sonne – dort, wo die Kometen herkommen. So zeigen Untersuchungen der Rosetta-Mission am Kometen Tschurjumow-Gerassimenko, dass der Kometenkern zwar bei extrem niedrigen Temperaturen um 30 Kelvin entstand, bei den ersten Messungen im Jahr 2014 lag seine Oberflächentemperatur jedoch bei über 200 Kelvin. So könnte in Kometenkernen zeitweilig unterkühltes flüssiges Wasser vorliegen und als Medium für die komplexe Chemie primordialer Lebensbausteine dienen. ↩

(Spektrum.de, 30. Mai 2016)

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

KOMPAKT

Quelle des Lebens

MEERE & OZEANE



FÜR NUR
€ 4,99

- > Der lange Weg des Plastikmülls im Meer
- > Stammt das Meersalz aus Kometen?
- > Haiwanderungen auf der Spur

HIER DOWNLOADEN

PHASENÜBERGANG

Eiskristall braucht mindestens 275 Wassermoleküle

von Maike Pollmann

Mit Hilfe einer neuen Methode konnten Wissenschaftler die
Kristallisation von Wasser mitverfolgen – Molekül für Molekül.



Wie viele Wassermoleküle sind nötig, um die kleinsten Eiskristalle zu bilden? Diese Frage haben **Christopher Pradzynski von der Universität Göttingen** und seine Kollegen nun beantwortet: Es sind rund 275. Bisher schwankte die Angabe zwischen 100 und 1000 Bausteinen. Mit Hilfe der verwendeten Methode ließen sich auch Phasenübergänge von an-

deren Stoffen im Detail studieren, so die Forscher.

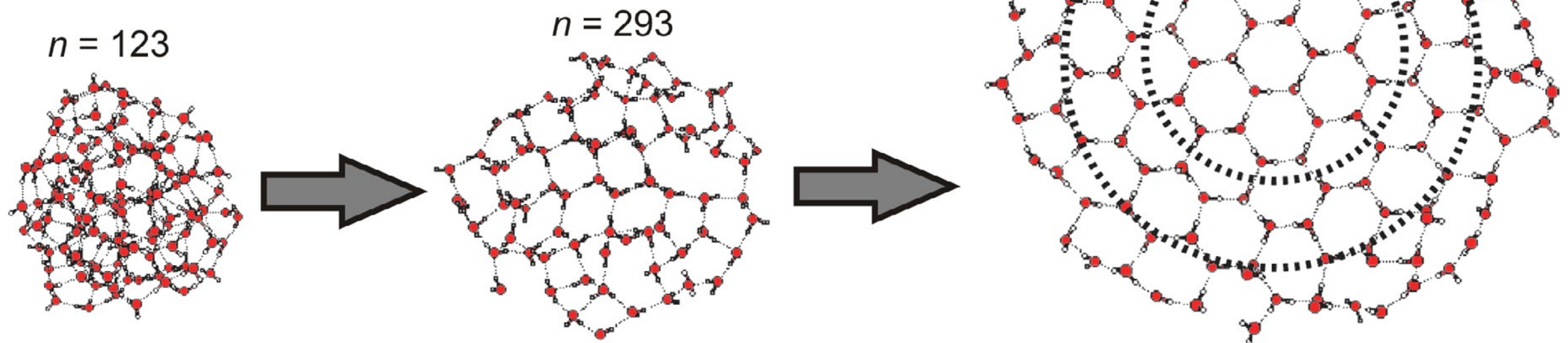
Das Team analysierte in seinen Experimenten die Infrarotspektren von zusammenklumpenden Wassermolekülen, so genannten Clustern, wobei es deren Anzahl zwischen 85 und 475 variierte. In den Spektren konzentrierten sich die Wissenschaftler auf eine Absorptionsbande, die durch eine spezielle Molekülschwingung verursacht wird: Ein Sauerstoff- und ein Wasser-

stoffatom schwingen entlang ihrer Wasserstoffbrückenbindung; dabei dehnt und staucht sich die Bindungsachse. Diese Streckschwingungen hinterlassen einen charakteristischen Fingerabdruck im Spektrum, dessen Maximum sich beim Übergang von einer amorphen, also ungeordneten, zu einer kristallinen Clusterstruktur verschieben sollte.

Tatsächlich wanderte das Maximum ab 275 Molekülen zu größeren Wellenlängen,

Ein Kristall entsteht

Die ersten kristallinen Strukturen entstehen im Zentrum eines Molekülhaufens und bestehen aus einem Ring mit sechs über Wasserstoffbrückenbindungen gebundenen Wassermolekülen. Nimmt die Anzahl der Wassermoleküle zu, wächst der kristalline Kern innerhalb des Clusters allmählich an.



berichten die Forscher, bei 475 Molekülen war der Übergang dann offenbar vollzogen. Anhand ihrer Ergebnisse sowie theoretischen Modellen konstruierten die Wissenschaftler um Pradzynski, wie die Kristallisation in Wasserclustern abläuft: Die erste kristalline Struktur entstehe im Zentrum des Molekülhaufens und bestehe aus einem Ring mit sechs über Wasserstoffbrückenbindungen gebundenen Wassermolekülen. Nimmt die Anzahl der Wassermoleküle zu, würde der kristalline Kern innerhalb des Clusters dann allmählich anwachsen. Bei 475 Molekülen würden die Schwingungen in kristallin angeordneten Bereichen dann die Form des Spektrums dominieren.

Die Experimente liefern wichtige Informationen darüber, welcher Mechanismus die Kristallisation des Wassers vorantreibt. In der Zukunft sei es interessant, so die Forscher, zu untersuchen, inwieweit der Kristallisationsprozess von der Temperatur abhängt. Zudem sollte sich das nun eingesetzte Verfahren auch auf Alkohole und andere Lösungsmittel anwenden lassen.

Während die Strukturen von kleinen H_2O -Clustern mit zwei bis zehn Teilchen sowie Nanopartikeln aus Eis sowohl expe-

rimentell als auch theoretisch gut erforscht sind, war der Größenbereich zwischen 100 und 1000 Molekülen bisher unzugänglich für größenselektive Techniken. Pradzynski und sein Team konnten die Schwingungsspektroskopie nun auch in diesen Bereich ausweiten, indem sie ein Natriumatom in den Clustern deponierten. Dadurch ließen sich die Molekülhaufen nachweisen, ohne dabei auseinanderzubrechen – was früher ein Problem darstellte –, und anschließend mittels Infrarotlasern anregen.

(Spektrum.de, 20. September 2012)

Science 337, S. 1529-1532, 2012

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

KOMPAKT

FÜR NUR
€ 4,99

WETTER UND KLIMA

Wechselspiel in der Atmosphäre

- > Wie Regen, Wind und Sonne unser Gemüt beeinflussen
- > Der Jetstream schlägt Wellen
- > Vorhersage für 2018: Bewölkt mit Rekordhitze

HIER DOWNLOADEN



SCHNEEFLOCKEN

Kristallene Schönheiten

von H. Joachim Schlichting

Damit aus Wasser eine Schneeflocke werden kann, müssen verschiedene Wachstumsprinzipien ineinandergreifen.

Rein physikalisch gesehen sind Eis und Schnee nichts anderes als Wasser, das in den festen Aggregatzustand übergegangen ist, nachdem die Temperatur den Nullpunkt unterschritten hat. Aber was ist damit schon erklärt? Bereits auf die so naheliegende wie simple Frage, woher eigentlich die überbordende Vielfalt von Schneeflockenformen rührt, gibt diese Feststellung keine Antwort. Wie also werden aus amorphem Wasser und Wasserdampf kristallene Schönheiten?

Schneeflocken fallen aus den Wolken und haben einen langen Weg hinter sich, heißt es in einem alten Kinderlied. Wer sie mit der behandschuhten Hand auffängt, so dass sie nicht gleich schmelzen, stellt fest, dass zwar keine Flocke der anderen gleicht, sie aber alle eine sechseckige Grundstruktur gemeinsam haben. Sehr selten findet man drei- oder zwölfzählige Kristalle, aber niemals vier- oder achtzählige. Schon Jahrhunderte vor unserer Zeit-

rechnung erklärte der chinesische Gelehrte T'ang Chin: »Weil Sechs die eigentliche Zahl des Wassers ist, müssen die Blumen, zu der das Wasser gefriert, sechs Spitzen haben.«

In unserem Kulturkreis erlangt die hexagonale Struktur der Schneeflocken erst 1610 einige Aufmerksamkeit, nämlich durch Johannes Keplers Aufsatz »Über die sechszackige Schneeflocke«. Auch René Descartes bewundert in seinen »Météores« (1637), wie Eiskristalle stets das Strukturprinzip der Hexagonalität einhalten: »Das waren kleine Klingen aus Eis, ganz glatt, intensiv poliert, ganz durchsichtig, ungefähr von der Stärke eines Blatts ziemlich dicken Papiers, (...) aber so perfekt in Sechsecke tailliert und deren sechs Seiten so gerade waren, die sechs Winkel so gleich, dass es den Menschen unmöglich ist, etwas so Exaktes zu machen.« Besser verstanden hat man die Wachstumsprinzipien der Schneeflocken aber erst in den letzten drei Jahrzehnten, als Themengebiete wie die frakta-

le Geometrie und die Selbstorganisation von Vielteilchensystemen aufkamen.

Die Natur liebt es hexagonal

Hexagonale Strukturen sind in der Natur nichts Ungewöhnliches. Setzt man gleich große Styroporkügelchen nicht zu weit voneinander entfernt auf eine Wasseroberfläche, beobachtet man, wie sie aufeinander zustreben und meist in hexagonaler Ordnung zu kleinen Flößen zusammenfinden. Grund dafür ist die Vorliebe natürlicher Systeme, immer so viel Energie wie möglich an die Umgebung abzugeben. Den Styroporkugeln gelingt dies dadurch, dass sie hexagonale Strukturen bilden: Sind sie durch jeweils sechs Kugeln umgeben, nehmen sie die geringstmögliche Wasseroberfläche ein und minimieren so die Grenzflächenenergie. Ein vergleichbares Prinzip der Selbstorganisation gilt für Wassermoleküle. Diese binden sich ebenfalls so aneinander, dass sie eine möglichst energiarme Konfiguration einnehmen – und auch



hier ist das Ergebnis ein Kristallgitter mit sechszähliger Symmetrie.

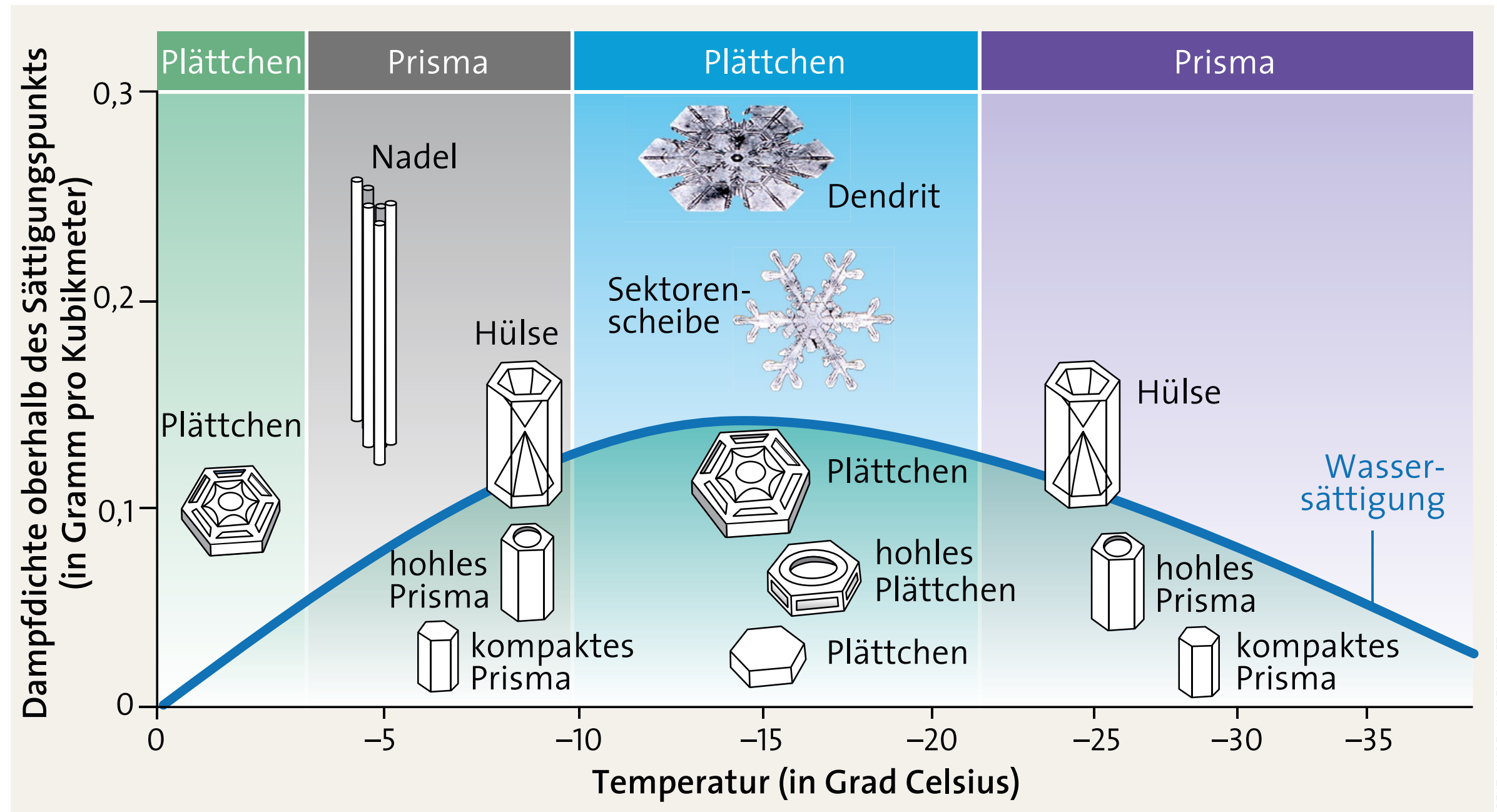
Angenommen, auf einen Minikristall trifft neues Baumaterial in Form von Wassermolekülen. Besitzt er glatte Facetten, docken die Teilchen an beliebigen Orten mit etwa derselben Wahrscheinlichkeit an. Wird er infolge der angelagerten Teilchen rau, nisten sich nachfolgende Moleküle bevorzugt in Stufen und Leerstellen des Kristalls ein. Denn dort ist die Zahl benachbarter Moleküle, welche die Neuankömmlinge anziehen, am größten. Kristalle wachsen also an den rauen Stellen schneller als an den glatten, so dass bevorzugt glatte Flächen entstehen. Zunächst bilden sich dabei hexagonale, also von sechseckigen Grundflächen begrenzte Prismen, die sich je nach Umgebungsbedingungen zu flachen sechseckigen Platten oder zu säulenartigen, ebenfalls hexagonalen Gebilden weiterentwickeln. Die schwachen molekularen Kräfte bestimmen trotz ihrer gerin-

SCHNEEKRISTALL

Schneekristalle – hier mit dem Elektronenmikroskop abgebildet – besitzen meist eine sechseckige Grundstruktur.

Kristallformen

Je nach Temperatur und Feuchtigkeit entstehen unterschiedliche Kristallformen – und nur aus hexagonalen Kristallplatten bilden sich tatsächlich Schneeflocken. Das Diagramm stammt ursprünglich vom Schneeflockenpionier Ukichiro Nakaya.



gen Reichweite also die Geometrie des makroskopischen Kristalls.

Doch wie schlägt sich diese prismatische Grundstruktur in Form und Vielfalt der Schneeflocken nieder? Einer der Pioniere der Schneeflockenforschung, der Japaner Ukichiro Nakaya (1900-1962), fand in den 1930er Jahren heraus, dass die Morphologie der Schneekristalle stark von den Wachstumsbedingungen abhängt, insbesondere von Temperatur und Feuchte. Er entdeckte, dass bei -2 Grad Celsius dünne plattenartige Kristalle entstehen, bei -5 Grad vorwiegend dünne Nadeln und bei -15 Grad wieder vorwiegend Platten. Unterhalb von -25 Grad herrscht schließlich eine Mischung aus dicken Platten und säulenartigen Formen vor. Seine Erkenntnisse stellte Nakaya in einem berühmt gewordenen Morphologiediagramm zusammen.

Die Feuchte wiederum, also die Wasserdampfkonzentration in der umgebenden Luft, bestimmt über den Detailreichtum der Kristallformen. Bei genügender Feuchte, wie sie in dichten Winterwolken herrscht, entwickeln sich hülsenartige Formen, Cluster von dünnen Eisnadeln und plattenartige Kristalle. Erstaunlicherweise können sich aber nur Letztere zu den spektakulä-

ren blumenartigen Ornamenten mit fraktalen Verzweigungen auswachsen, die wir als Schneeflocken kennen. Den Grund dafür kennt bislang niemand. Kenneth G. Libbrecht, Experte für Kristallwachstum und Schneeflocken an California Institute of Technology, hat unumwunden erklärt, dass Forscher selbst heute »immer noch nicht alle Phänomene erklären (können), die dieses einfache Diagramm zeigt«.

Trotzdem wissen wir nun genug, um das kurze Leben einer Schneeflocke zu verfolgen. In ihrer Geburtswolke, bei Temperaturen weit unter null Grad, können Wasserdampf, flüssiges Wasser und Eiskristalle koexistieren, weil Keime fehlen, an denen sich der Wasserdampf niederschlagen könnte. Doch schon kleinste Störungen dieses metastabilen Zustands genügen, um eine spontane Kristallisation auszulösen. Der sich dabei bildende Eiskristall, ein winziges hexagonales Prisma, fungiert im Folgenden als Keim, an den sich weitere Moleküle anlagern. Anschließend hängt alles von den Umgebungsbedingungen ab: Passt die Feuchte und liegt die Temperatur bei etwa -15 Grad, entwickelt er sich zu einer jener hexagonalen Platten, aus denen eine Schneeflocke entstehen kann.

»... unter den Myriaden
von Zaubersternchen ...
war nicht eines dem
anderen gleich ...«

[Thomas Mann]

Befördern Winde die Platte in zunehmend feuchtere Gegenden der Wolke, treffen neue Wasserdampfmoleküle in immer kürzeren Abständen auf den Kristall. Dort bleiben sie vor allem an den exponierten sechs Ecken hängen, aus denen daher nun Äste zu sprießen beginnen. Dieser Prozess verstärkt sich in der Folge selbst. Denn zum einen fangen die wachsenden Äste viele der Moleküle ab, bevor diese zu den glatten Flanken der Kristallscheibe vordringen können. Zum anderen bremst die Wärme, die bei der Kristallisation frei wird, weitere Kristallisationsvorgänge.

Weil die Wachstumsbedingungen für alle sechs Äste praktisch gleich sind, erscheinen sie am Ende nahezu identisch. Dann beginnen sie sich zu verzweigen. Denn je länger sie werden, desto wahrscheinlicher bleiben Wassermoleküle an ihren Flanken hängen und bilden neue Zweige, die in Richtung der größten Wasserdampfkonzentration schräg nach außen wachsen, wie die Zweige eines Baums. So gelingt ihnen das Kunststück, sich einerseits vom eigenen Ast zu entfernen, ohne andererseits konkurrierenden Nachbarästen zu nahe zu kommen. Außerdem

können sie die Kristallisationswärme auf diese Weise besser nach außen abgeben. Schließlich entstehen fraktale Gebilde, deren individuelle Verzweigungen vom Zufall bestimmt sind, die aber ihre hexagonale Grundstruktur bewahrt haben.

Weil Feuchtigkeit und Temperatur mit jedem Windstoß variieren, wird die Struktur des Gebildes bei seinem Fall durch die Wolke zudem immer reichhaltiger. Schließlich ist die Schneeflocke schwer genug, um die Wolke zu verlassen. Während sie sanft auf die Erde hinabsinkt, verhakt sie sich noch mit anderen ihrer Art, so dass am Ende ein luftiges und äußerst komplexes Kunstwerk der Natur auf unserer Hand landet, das dem Zufall nicht weniger als der Notwendigkeit verdankt. ↩

(Spektrum der Wissenschaft, 1/2015)

Libbrecht, K. G.: The Secret Life of a Snowflake.

Voyageur Press, Stillwater 2010

Libbrecht, K. G.: An Edge-Enhancing Crystal Growth

Instability Caused by Structure-Dependent Attachment Kinetics. arXiv:1209.4932, eingereicht am 21. September 2012

Libbrecht, K. G.: Wie Schneekristalle entstehen.

In: Spektrum der Wissenschaft 2/2008, S. 36

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
KOMPAKT

ANTHROPOZÄN

Ein Erdzeitalter für
den Menschen?

FÜR NUR
€ 4,99

HIER DOWNLOADEN



KRISTALLSTRUKTUR VON WASSER

Forscher erschaffen erstmals quadratische Schneeflocken

von Daniela Zeibig

Mit Hilfe von zwei hauchdünnen Schichten aus Graphen gelang Wissenschaftlern ein ganz besonders Kunststück: Sie ließen Wasser zu flachen, quadratischen Eiskristallen erstarren.

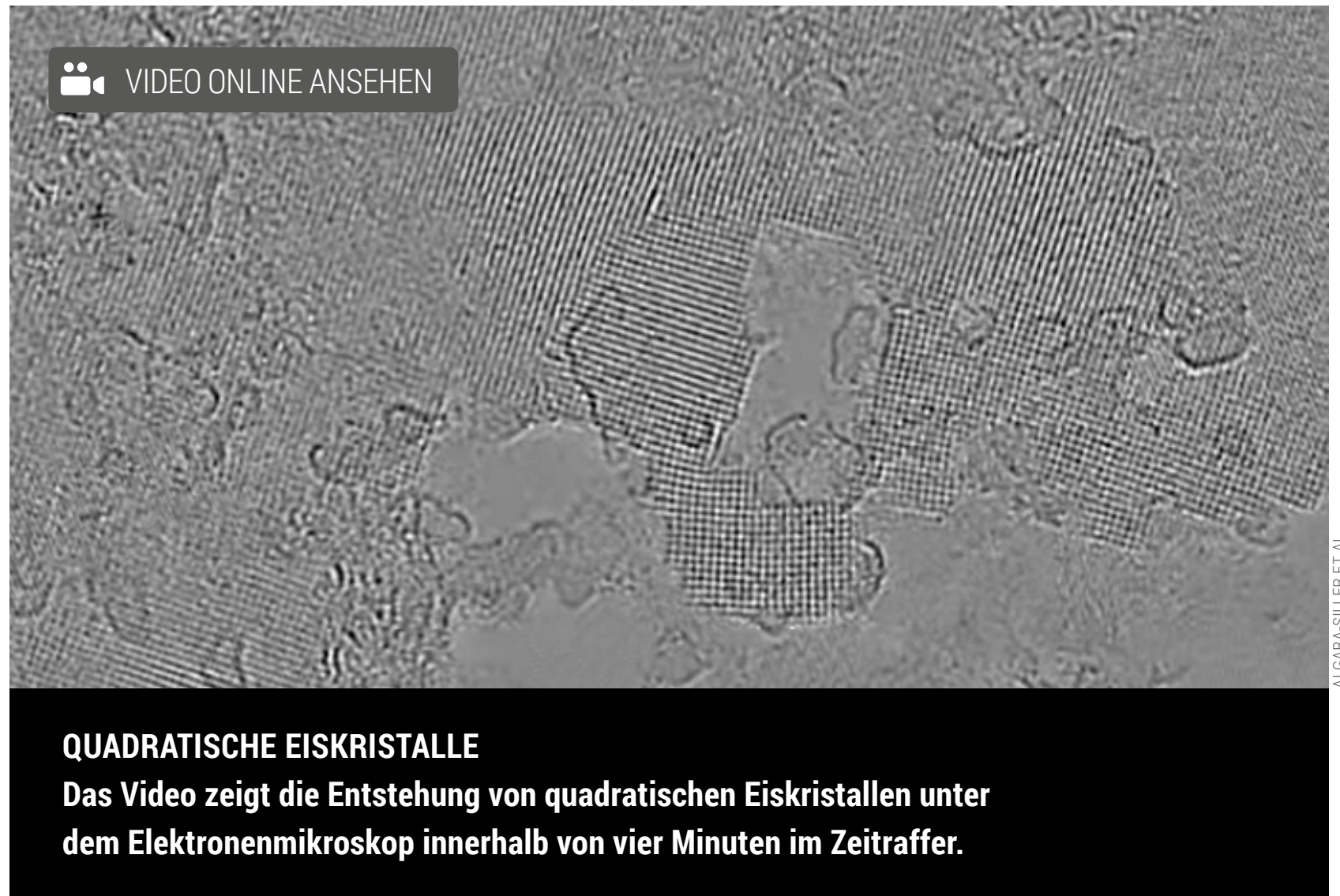
Einem internationalen Forscherteam ist es gelungen, Eiskristalle mit einer flachen, quadratischen Form zu erschaffen, die noch nie zuvor beobachtet werden konnte. Bisher kannten Wissenschaftler rund 15 Kristallstrukturen von Wasser. Natürlicherweise erstarrt es aber in aller Regel hexagonal, indem sich je sechs Wassermoleküle in regelmäßigen Mustern zusammenschließen. Diese Struktur sorgt auf makroskopischer Ebene schließlich für die unverkennbare Form von Schneeflocken.

Um diese Formenvielfalt nun zu erweitern, quetschten die Wissenschaftler winzige Wassermengen zwischen zwei Schichten aus Graphen ein, die gerade einmal ein einziges Kohlenstoffatom dick waren und es dem Team so erlaubten, die Vorgänge im Inneren mit Hilfe eines Elektronenmikroskops zu beobachten. Da die Graphenschichten sich stark anziehen, wenn sie nah genug zusammengebracht werden, konnten die dabei wirkenden Van-der-Waals-Kräfte genügend hohe Drücke erzeugen, um das Wasser selbst bei Raumtemperatur kristallisieren zu lassen – in diesem Fall eben in der bisher unbekannten, sauberen Quadratstruktur.

Anhand von Computermodellen stellten die Forscher außerdem die Theorie auf, dass solche quadratischen Eiskristalle auch ohne Graphen in der Natur vorkommen könnten. Wenn die Wasserschicht dünn genug ist, sollte die exakte chemische Zusammensetzung des Umgebungsmaterials keine Rolle spielen, so die Wissenschaftler. Demnach wäre vorstellbar,

dass Wasser auf diese Weise in Nanoporen und mikroskopisch kleinen Rissen kristallisiert. Damit könnte die Erkenntnis beispielsweise helfen, die Bewegungen von Wassermolekülen innerhalb von Zellmembranen oder Kapillaren besser zu verstehen. ↶

(Spektrum.de, 26. März 2015)



QUADRATISCHE EISKRISTALLE

Das Video zeigt die Entstehung von quadratischen Eiskristallen unter dem Elektronenmikroskop innerhalb von vier Minuten im Zeitraffer.



MYKOLOGIE

Wie haariges Eis entsteht

von Laura Hennemann

Im Winter finden sich im Wald auf totem Holz manchmal bizarre Eisstrukturen, die wie Haarbüschel aussehen. Forscher konnten nun zeigen: Dahinter steckt ein Pilz namens *Exidiopsis effusa*.

FOTOLIA / SCHMUTZLER-SCHAUB

Wenn alle Bedingungen zusammenpassen, kann man in feuchten Wintern im Wald eine skurrile Entdeckung machen: Auf dem toten Holz bestimmter Baumarten finden sich dann Eiskristalle, die dünn wie Haare sind und in ganzen Büscheln aus dem Ast oder Stamm herauswachsen.

Eine Chemikerin, ein Physiker und eine Biologin aus Deutschland und der Schweiz sind durch ihre heimischen Wälder gestreift und haben die Ursache dieser besonderen Eisstrukturen gesucht. Zunächst war klar, dass Haareis in feuchten Wintern entsteht und bei Temperaturen knapp unter null Grad Celsius. Darüber hinaus hatte der deutsche Geophysiker und Meteorologe Alfred Wegener bereits im Jahr 1918 das Haareis mit dem Myzel – den fadenförmigen Zellen eines Pilzes – in Zusammenhang gebracht. Anfang des 21. Jahrhunderts fand zudem der Schweizer Professor Gerhart Wagner, dass Haareis nicht entstehen kann, wenn das Holz mit einem Fungizid behandelt wurde.

Ziel der aktuellen Untersuchung war es nun, die genaue Art des Pilzes ausfindig zu

EISHAARE IM ZEITRAFFER

Im Zeitraffervideo lässt sich verfolgen, wie Eishaare wachsen.

 VIDEO ONLINE ANSEHEN

machen. Nachdem die Forschenden in den Wintern 2012, 2013 und 2014 Holz gesammelt hatten, auf dem Haareis gewachsen war, untersuchten sie die darauf siedelnden Pilzarten. Eine bestimmte Art fand sich auf allen gesammelten Holzstücken; auf mehr als der Hälfte der Stücke war sie sogar der einzige anwesende Pilz: *Exidiopsis effusa*.

Auch die physikalischen Untersuchungen zum Wachstum der fadenförmigen Eisstrukturen sowie chemische Analysen des Wassers geschmolzener Eishaare bestätigten, dass die Pilzfäden die Ursache der

eigentümlichen Struktur sind. Ihre Ergebnisse [publizierten die Forschenden um Diana Hofmann nun im Fachblatt »Biogeosciences«](#).

Dass die Bestätigung von Alfred Wegeners Pilz-Hypothese beinahe 100 Jahre dauerte, erklären die Wissenschaftler durch die Seltenheit des Phänomens. Wer Eishaare in der Natur beobachten will, muss bei geeignetem Wetter früh morgens im Wald unterwegs sein – denn tagsüber schmelzen diese besonderen Eisstrukturen schnell. ↩

(Spektrum.de, 22. Juli 2015)



WASSER

Warum gefrierende Tropfen ein spitzes Häubchen kriegen

von Lars Fischer

Wassertropfen, die auf eine kalte Oberfläche treffen, gefrieren nicht tropfenförmig. Jetzt kennt man die Ursache.

Man kann es sehr leicht selbst zu Hause ausprobieren: Wassertropfen, die auf einer kalten Oberfläche gefrieren, ändern ihre Form – sie laufen konisch zu. Warum das so ist, war bisher nicht so ganz klar. Oscar Enríquez und Jacco Snoeijer von der Universität Twente präsentieren eine überraschend einfache Erklärung

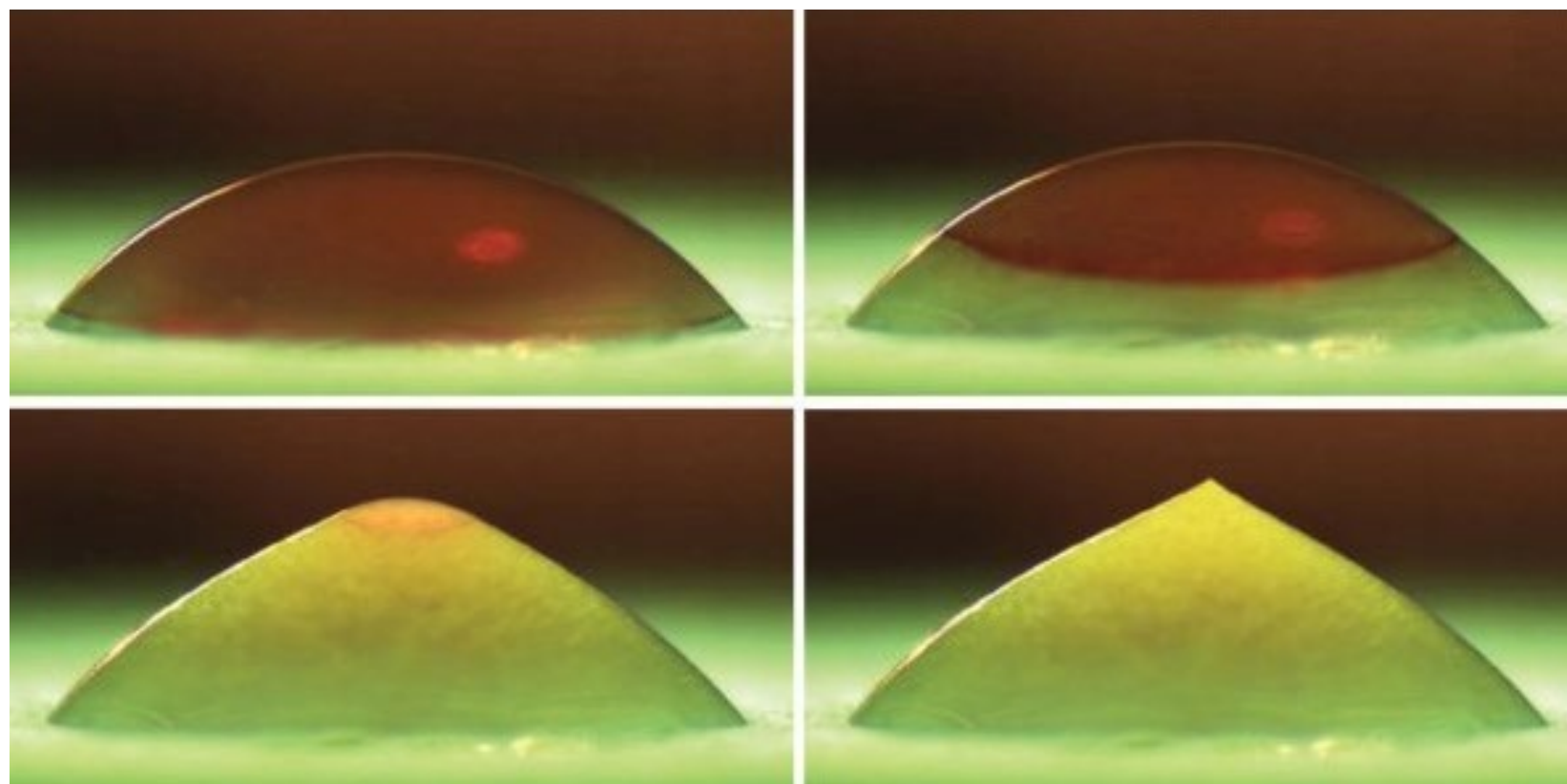
für das Phänomen: Die Gefrierfront in einem Tropfen steht immer senkrecht auf seiner Außenwand.

Die Forscher entdeckten den Effekt mit Hilfe eines Fast-2-D-Tropfens, den sie zwischen zwei Glasscheiben einsperrten, um die Vorgänge besser beobachten zu können. Der Effekt erklärt mühelos die entstehende spitze Form. Da sich Wasser beim Gefrieren ausdehnt, wird der restliche Flüssigkeitstropfen kontinuierlich aus dem bleibenden Hohlraum herausgedrückt – so dass die Oberfläche des gesamten Tropfens nicht mehr abgerundet ist, sondern kegelförmig ansteigt. Der letzte Rest Wasser, der schlussendlich gefriert, bildet die Spitze des Gebildes.

sigkeitstropfen kontinuierlich aus dem bleibenden Hohlraum herausgedrückt – so dass die Oberfläche des gesamten Tropfens nicht mehr abgerundet ist, sondern kegelförmig ansteigt. Der letzte Rest Wasser, der schlussendlich gefriert, bildet die Spitze des Gebildes.

(Spektrum.de, 5. August 2014)

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.054301>



GEFRIERENDER TROPFEN

Wassertropfen, die auf einer kalten Unterlage gefrieren, bilden eine Spitze.



EISLAUFEN

Glatt daneben

von H. Joachim Schlichting

Erst eine dünne Wasserschicht macht Eis wirklich rutschig. Doch wie sie genau entsteht, wissen nur wenige.

Eine gefrorene Wasserpfütze hat einiges mit einer Glasscheibe gemeinsam: Beide sind feste Körper, mehr oder weniger durchsichtig und ziemlich glatt. »Glatt« im Sinn von glitschig ist allerdings nur das Eis, während trockenes Glas dem darüberreibenden Finger erheblichen Widerstand entgegensetzt. Und so verbindet man den Begriff der Eisesglätte kaum mehr mit Ebenheit, vielmehr hat er es geradezu zum Synonym für Glitschigkeit oder Rutschigkeit gebracht. Ist etwas eisglatt, dann scheint die Reibung aufgehoben zu sein, und es gibt kein Halten mehr – zur Freude der Wintersportler und zum Schrecken der Autofahrer.

Warum aber ist Eis glatt – und Glas nicht? Jeder glaubt das zu wissen, doch die meisten liegen mit ihrer Antwort falsch. Unsere Schulweisheit, der zufolge die Eisoberfläche durch den starken Druck etwa von Schlittschuhkufen schmilzt und so ein schmierender Wasserfilm entsteht, stimmt nämlich nicht.

Trotzdem scheint Wasser eine Rolle zu spielen. Aus dem Alltag wissen wir, dass auch bei Temperaturen weit über dem Gefrierpunkt Glitseffekte auftreten, wie

wir sie vom Glatteis kennen; wenn etwa der Fliesenfußboden nass ist. Selbst eine Glasscheibe muss man nur anfeuchten, damit sie extrem glatt wird. Stellen wir also die Hypothese auf, dass Feuchtigkeit ein Grund für Glätte ist. Doch würde flüssiges Wasser auf Eis nicht sofort gefrieren?

Um das Rätsel zu lösen, schauen wir uns erst einmal das Schlittschuhkufenargument näher an. Materie weicht einer Erhöhung des Drucks in der Regel aus, indem sie ihr Volumen verringert; wachsender Druck kann also Stoffe verfestigen. Eis bildet dabei die große Ausnahme: Auf Druck-erhöhung reagiert es ebenfalls mit Volumenabnahme, doch wird es dabei nicht fester, sondern schmilzt vielmehr – denn Wasser ist einer der wenigen Stoffe, die erstarrt ein größeres Volumen als flüssig besitzen.

Diesen Sachverhalt untermauert man gerne durch ein einfaches, aber ein wenig irreführendes Experiment. Dazu legt man einen dünnen Draht über einen Eisquader und belastet ihn mit schweren Gewichten. Unter dem Druck schmilzt das Eis, so dass der Draht allmählich durch den Eisquader hindurchschmilzt, während oberhalb der Eisklotz wieder zusammenfriert.

»Oft wundern wir uns über das Erstaunlichste nicht, weil es uns seit Langem bekannt ist und darum selbstverständlich scheint«

[Carl Friedrich von Weizsäcker]

Das Phasendiagramm des Wassers informiert uns darüber, dass es bei einer Temperatur von -1 Grad Celsius eines Drucks von 14 Millionen Pascal bedarf, um Eis um 1 Grad zu erwärmen und damit zum Schmelzen zu bringen. Da der mechanische Druck p dem Quotienten aus Kraft F und Fläche A entspricht, also $p = F / A$, und die Auflagefläche von Kufen sehr klein ist, üben Schlittschuhläufer recht großen Druck aus. Geht man von einem Menschen mit einer Masse $m = 80$ Kilogramm aus und nimmt die Erdbeschleunigung $a \approx 10$ Meter / Sekunde² hinzu, errechnet sich die Gewichtskraft zu $F = m \cdot a \approx 800$ Newton. Im Fall sehr feiner Kufen mit einer Auflagefläche von 0,0001 Quadratmetern, das ist ein Quadratzentimeter, üben diese dann einen Druck von 8 Millionen Pascal aus. Das ist viel, reicht aber noch lange nicht zum Schmelzen des Eises.

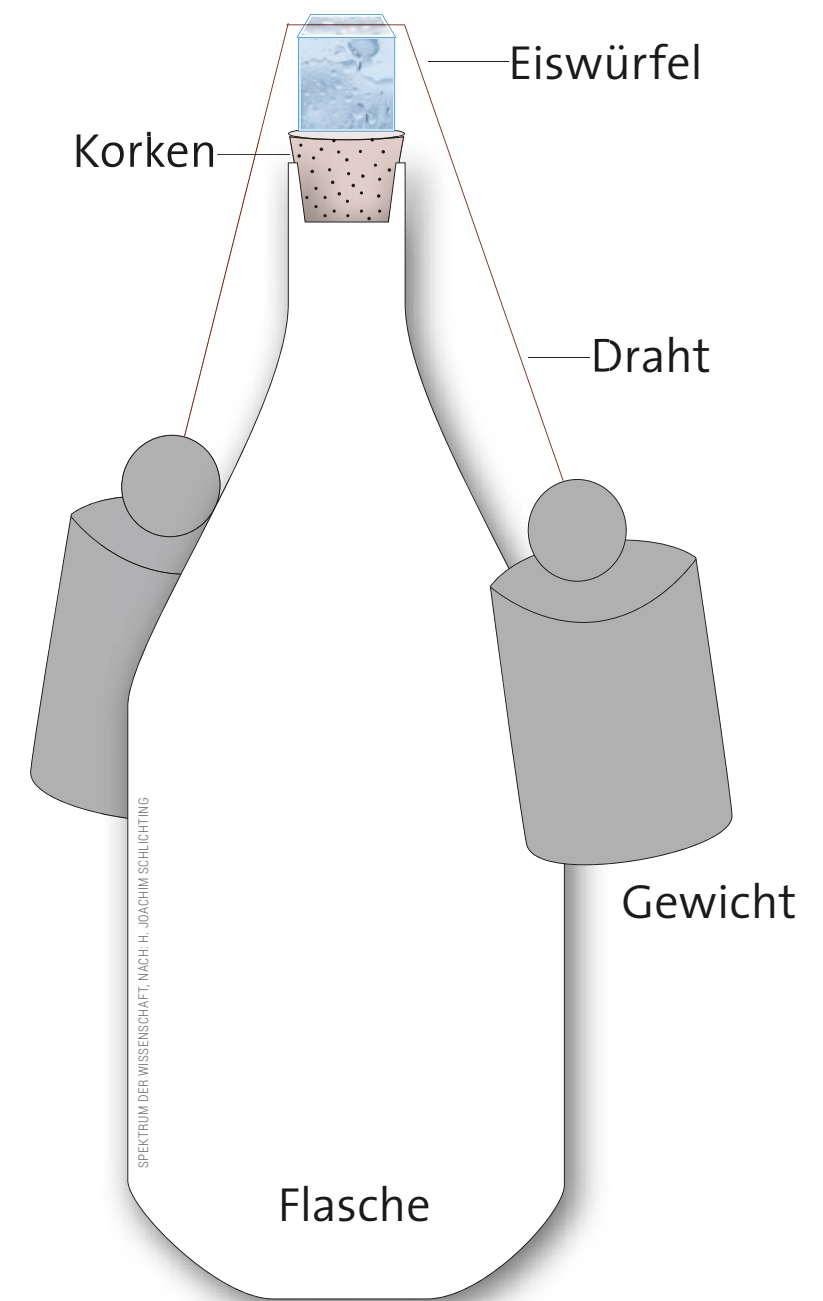
Nicht nur der Druck spielt eine Rolle

Nur bei Eistemperaturen ganz in der Nähe des Nullpunkts könnte sich ein merklicher Effekt ergeben – darin besteht eine weitere, aber meist übersehene Botschaft des Eiskquaderexperiments. Dann ist die zu überwindende Temperaturdifferenz so niedrig,

dass neben dem Druck auch ein zweiter Faktor eine wichtige Rolle spielt, nämlich die Wärmeleitfähigkeit des auf dem Eis aufliegenden Materials. Das Durchschmelzen funktioniert nämlich nur deshalb so gut, weil der Metalldraht Wärme bestens leitet und sie dem Auflagepunkt immer neu zuführt. Ersetzt man ihn durch einen gleich dicken Nylonfaden, läuft der Vorgang wesentlich langsamer ab.

So oder so führt kein Weg an der Erkenntnis vorbei, dass das Druckschmelzen nur bei Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt überhaupt von Belang ist. Daraus folgt umgekehrt, dass Eis bei größerer Kälte stumpf wie eine trockene Glasscheibe sein müsste. Ist es aber nicht: Erfahrungsgemäß liegt die optimale Temperatur für den Eiskunstlauf bei $-5,5$ Grad Celsius, für Eishockey sogar bei -9 Grad. Und selbst wenn die Temperaturen auf -30 Grad Celsius absinken, kann man auf gefrorenen Seen noch Schlittschuh laufen.

Auf der Suche nach besseren Erklärungen stieß man schon bald auf einen weiteren Mechanismus: Könnte Reibungswärme eine wichtige Rolle spielen? In den erhalten gebliebenen Aufzeichnungen von Robert Falcon Scotts Terra-Nova-Expediti-



EXPERIMENT: DRUCK AUF EISWÜRFEL
Beschwert man einen über einen Eiswürfel gespannten Draht, lässt ihn nicht nur der Druck durch das Eis hindurchschmelzen. Auch die durch den Draht zum Auflagepunkt fließende Wärme hilft dabei mit.

on, die 1913 tragisch mit dem Tod aller Teilnehmer endete, berichten die Expeditionsmitglieder von Schnee, der sich bei Temperaturen unter -40 Grad Celsius »sandartig« anfühlte. Zumindest wenn es trocken und sehr kalt ist, setzt also auch Schnee, der seinerseits aus feinen Eiskristallen besteht, dem Darübergleiten erheblichen Widerstand entgegen. Mit Wärme reduziert man diesen tatsächlich: Die Energie, die man zur Überwindung der Reibung aufbringen muss, geht auf den eisigen Untergrund über und trägt dazu bei, dessen Temperatur zu erhöhen. 1997 wiesen Forscher um den US-Amerikaner Samuel C. Colbeck dies auch experimentell nach: Sie versahen Schlittschuhe und Schier mit Wärmefühlern und maßen, wie die Temperatur mit der Geschwindigkeit anstieg.

Unser Problem haben wir damit immer noch nicht gelöst. Denn die Menge an Wär-

EISHOCKEYSPIELER

Schmale Kufen, hoher Druck: Das reicht angeblich, um fast reibungslos über das Eis zu gleiten. Diese Schulweisheit stimmt nur leider nicht. Die Oberfläche von Eis ist immer schon »vorgeschmolzen«.



me, die auf diese Weise entsteht, ist nicht der Rede wert. Vor allem aber bleibt Eis bei Minustemperaturen auch dann glatt, wenn der Schlittschuhläufer sich gar nicht bewegt, sondern einfach nur steht. Letztlich taugen also Druck und Reibung allein nicht zur Erklärung.

Das war schon dem für seine Experimente berühmten englischen Naturforscher Michael Faraday aufgefallen. Um 1850 wies er nach, dass Eisblöcke bei Temperaturen unter 0 Grad Celsius zusammenfrieren, wenn man sie miteinander in Kontakt bringt, und schloss daraus, dass sie mit einem flüssigen Film überzogen sein müssten. Weil es Faraday aber nicht gelang, seine Kollegen zu überzeugen, gerieten seine Erkenntnisse in Vergessenheit. Erst 100 Jahre später erinnerte man sich ihrer wieder, und es gelang mit verschiedenen Methoden, eine Art Vorschmelzen des Eises nachzuweisen – also ein Schmelzen, noch bevor der eigentliche Schmelzpunkt erreicht ist.

Eine präzise Messung dieses so genannten »Premelting«-Effekts gelang Astrid Döppenschmidt und Hans Jürgen Butt von der Universität Mainz im Jahr 1998. Wie sie mit einem Rasterkraftmik-

roskop herausfanden, beträgt die Dicke des Wasserfilms auf Eis bei $-0,7$ Grad Celsius rund 70 Nanometer (milliardstel Meter), während es bei -24 Grad Celsius immerhin noch 12 Nanometer sind. Die Dicke des Wasserfilms – und damit die Glitschigkeit des Eises – nimmt also mit der Temperatur ab. Die Untergrenze ist bei -33 Grad Celsius erreicht; wird es noch kälter – wie am Südpol –, gibt es auch keine Schmelzschicht mehr.

Wie aber lässt diese sich mit dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik in Einklang bringen? Ihm zufolge ist die Natur bestrebt, immer so viel Energie wie möglich an die Umgebung abzugeben. Es wäre also zu erwarten, dass Wassermoleküle eher gefrieren als schmelzen, weil sie auf diese Weise Energie verlieren. Doch für die Energiebilanz spielen auch die Grenzflächen eine Rolle: Offenbar ist mehr Energie erforderlich, eine Grenzfläche zwischen einem perfekten Eiskristall und der Luft zu bilden, als es kostet, die beiden Grenzflächen zwischen Eis und Schmelzschicht beziehungsweise Schmelzschicht und Luft aufrechtzuerhalten. Insgesamt fließt also tatsächlich das Maximum an Energie in die Umgebung. Wer nicht nachrechnen

will, kann sich aber auch anschaulich klar machen, warum Eis zur Ausbildung eines Wasserfilms tendiert: Weil die äußeren Teilchen weniger Bindungen besitzen und daher nicht so fest wie Moleküle im Inneren des Kristalls sitzen, schmilzt die Eisoberfläche schon bei geringeren Temperaturen, als es das Phasendiagramm voraussagt.

Inzwischen haben Forscher in vielen Studien herausgefunden, dass das Phänomen Oberflächenschmelzen nicht nur bei Eis vorkommt, sondern auch bei allen anderen Stoffen. Beispielsweise überzieht sich Blei bereits ab einer Temperatur von 40 Grad unterhalb seines Schmelzpunkts mit einem flüssigen Film. Weil die alltäglicheren Materialien meist recht hohe Schmelzpunkte haben – der von Blei liegt bei $327,5$ Grad Celsius –, weiß das aber kaum jemand. Winterliche Eisesglätte wird uns also auch weiterhin das beste Anschauungsmaterial liefern. ↩

(Spektrum der Wissenschaft, 2/2014)



GEFRIERPROZESS

Das **Rätsel** von **Mpemba**

von H. Joachim Schlichting

Wenn eine warme Flüssigkeit schneller gefriert als eine kalte, spielen möglicherweise Strömungsbewegungen die entscheidende Rolle.

Sagt Ihnen Mpemba etwas? Hinter dem fremdartigen Namen steckt das ungewöhnliche Phänomen, dass heißes Wasser unter sonst gleichen Bedingungen schneller gefriert als kaltes. Der »Mpemba-Effekt« scheint der physikalischen Intuition zu widersprechen. Denn zuerst denkt doch wohl jeder an ein Szenario wie dieses: Zwei gefüllte Behälter, die sich nur in der Wassertemperatur unterscheiden (zum Beispiel 20 und 70 Grad Celsius), werden zeitgleich abgekühlt. Das zu Beginn 70 Grad heiße Wasser wird nach einiger Zeit bei 20 Grad angekommen sein. Ab da hat es noch denselben Weg vor sich, den der Inhalt des Gefäßes mit anfangs 20 Grad bereits ein Stück weit hinter sich hat. Also wird das wärmere Wasser später gefrieren – logisch, oder?

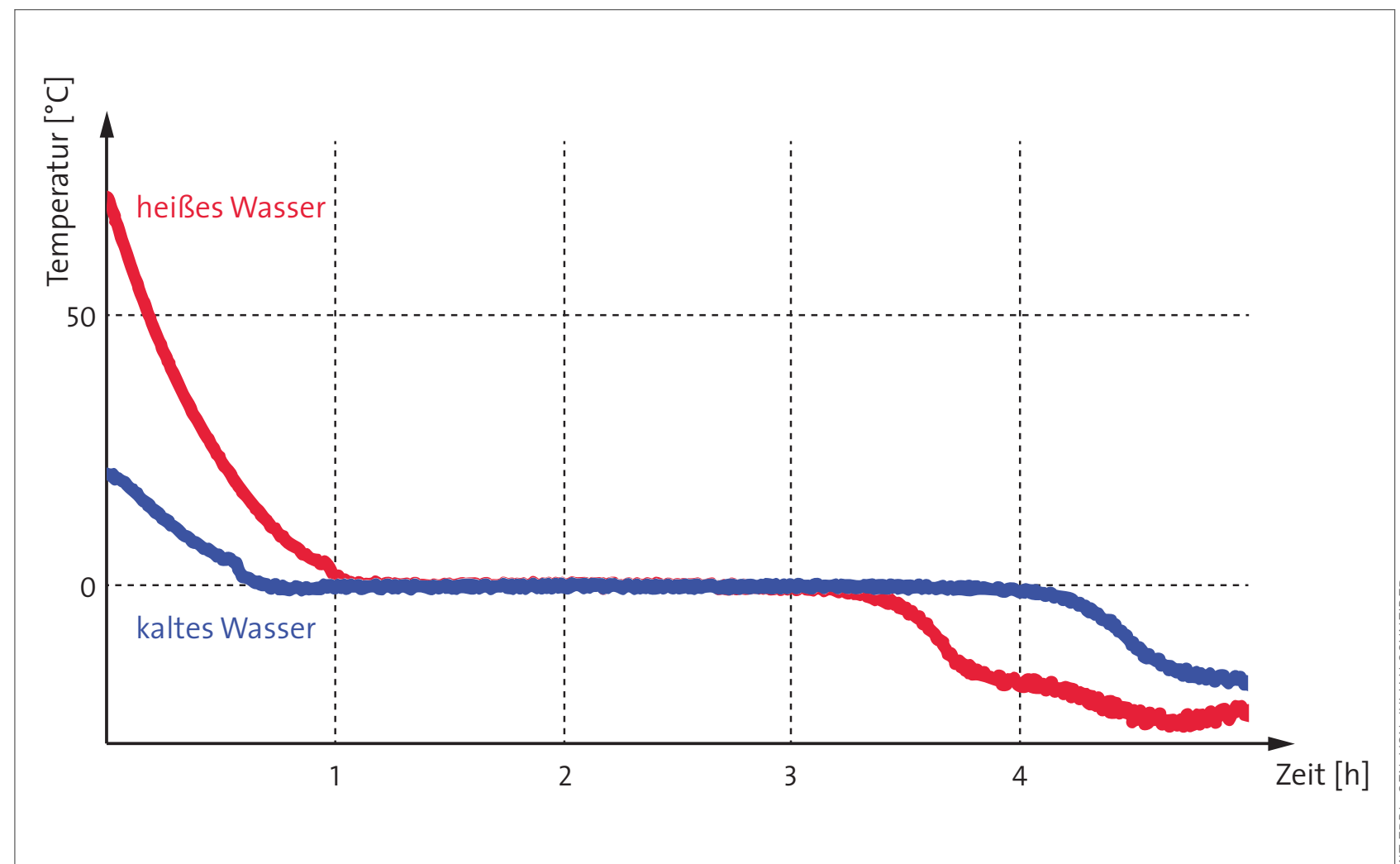
Bereits Aristoteles bemerkte das merkwürdige Geschehen. Seitdem äußerten sich immer wieder Naturforscher dazu, etwa Roger Bacon (1214-1292) und René Descartes (1596-1650). Auch dem ersten deutschen Professor für Experimentalphysik Georg Christoph Lichtenberg (1742-1799) war bekannt, dass »gekochtes Wasser, welches sehr warm in ein kleines Zuckerglas

gegossen und mit ungekochtem kaltem Wasser zugleich der Kälte ausgesetzt wurde, eher gefror als das letztere«.

In der Moderne geriet die Erscheinung wieder in Vergessenheit, bis der tansanische Schüler Erasto Mpemba in den 1960er Jahren beim Eismachen den fortan nach ihm benannten Effekt wiederentdeckte. Zahlreiche Untersuchungen folgten. Diese haben zwar vor Augen geführt, wie komplex das Problem ist – von einer einheitli-

ABKÜHLGESCHWINDIGKEIT BEI WARMEM UND KALTEM WASSER

Werden 72 Grad Celsius heißes (rote Kurve) und 20 Grad kaltes Wasser (blau) gleichzeitig abgekühlt, sinkt die Innentemperatur der anfangs wärmeren Flüssigkeit früher unter null Grad, sie ist also zuerst vollständig gefroren. Die Messwerte entstanden bei einer Versuchsreihe im Rahmen eines »Jugend forscht«-Projekts des Schülers Julian Schneider.

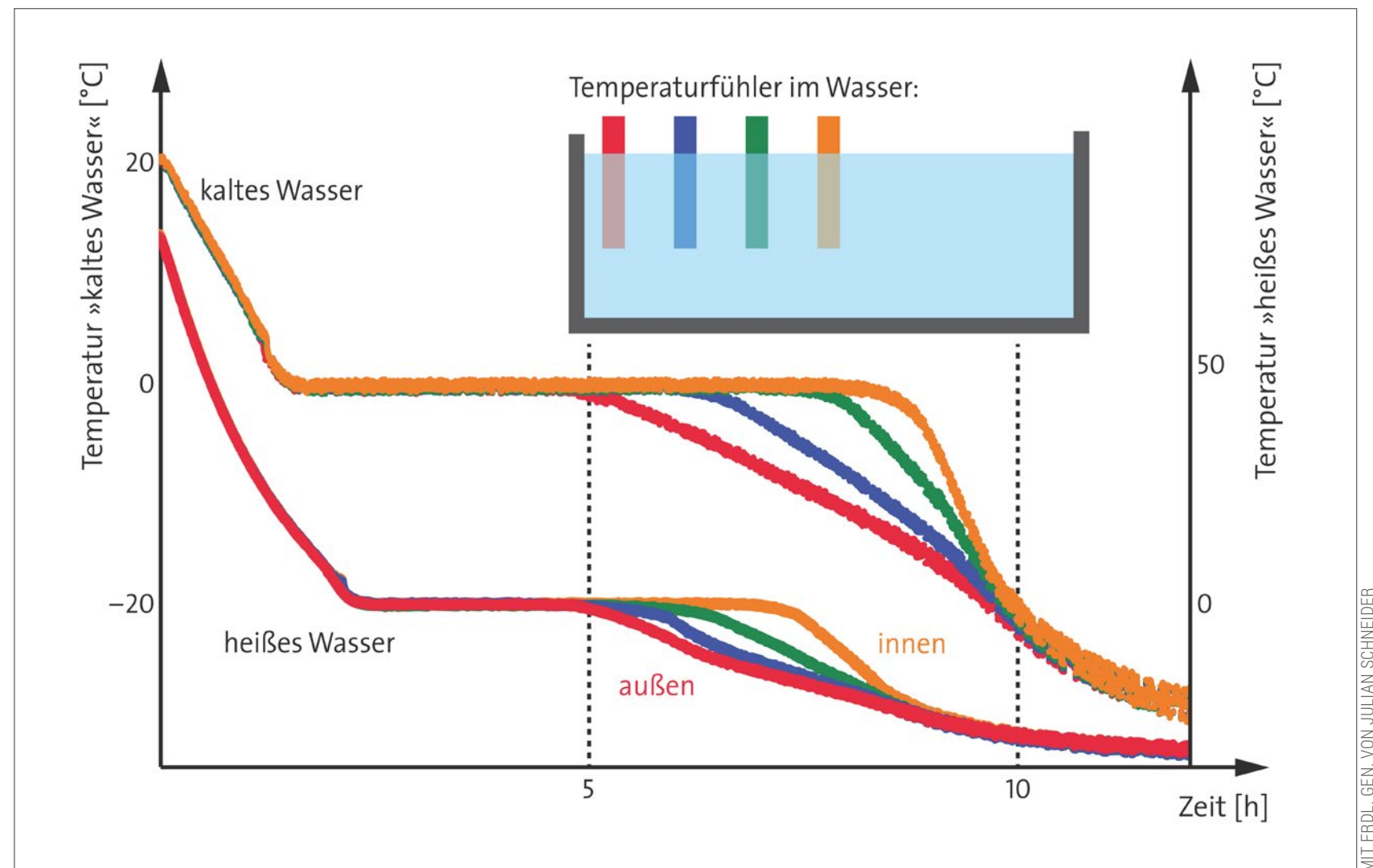


chen, allgemein akzeptierten Erklärung kann aber nach wie vor nicht die Rede sein.

Die Hauptschwierigkeit dabei, die Ursache zu finden, besteht darin, die zahlreichen Einflussfaktoren experimentell unter Kontrolle zu bringen und die wesentlichen zu identifizieren. Einige Wissenschaftler hielten die stärkere Verdunstung des heißen Wassers und den entsprechenden Flüssigkeitsverlust für entscheidend. Man kann jedoch den Mpemba-Effekt ebenso in abgedeckten Behältern messen, so dass dieses Argument nicht überzeugt. In anderen Arbeiten halten Forscher im Wasser gelöste Stoffe – wie etwa Luft – für ausschlaggebend. Doch diese These ist nicht stichhaltig, weil sich das Phänomen bei vorher gekochtem und demineralisiertem Wasser ebenfalls zeigt.

Aus innerem Antrieb umgewälzt

Häufig friert Wasser nicht genau bei null Grad, sondern erst bei tieferen Temperaturen. Mancher wird das von Mineralwasser kennen, das im Eisfach gelegen oder in einer frostigen Winternacht auf dem Balkon gestanden hat. Der Kristallisationsvorgang beginnt oft erst beim Öffnen der Flasche, vollzieht sich dann aber ziemlich flott. Ei-



nige Arbeiten zum Mpemba-Effekt kommen daher zu dem Ergebnis, das ursprünglich heiße Wasser werde weniger unterkühlt und somit zuerst fest. Doch dagegen spricht, dass das anfangs heiße Wasser auch dann früher gefriert, wenn keine Unterkühlung auftritt oder diese verhindert wird.

Schließlich gibt es noch einen wesentlichen Unterschied zwischen heißem und

DIAGRAMM: MPEMBA-EFFEKT

Mit mehreren Temperatursensoren im Gefäß lässt sich nachverfolgen, dass in beiden Behältern das Wasser zuerst am Rand gefriert und zuletzt in der Mitte. Beim anfangs heißeren Wasser (Temperaturskala rechts) vollzieht sich das aber wesentlich schneller, vermutlich, weil lange nachwirkende Konvektionsströme den Wärmeaustausch begünstigen.

kaltem Wasser: In ersterem beeinflusst die Konvektion den Wärmeaustausch viel stärker. Das sind schwerkraftbedingte Strömungen, bei denen das an der Oberfläche gekühlte Wasser absinkt, weil es dichter ist (jedenfalls solange das Wasser wärmer als vier Grad Celsius ist, wo es seine größte Dichte hat). Aufsteigendes heißes Wasser ersetzt es. So hält sich an der Oberfläche ständig eine höhere Temperaturdifferenz und damit ein stärkerer Wärmestrom zur Umgebung.

Das kennt jeder, der schon einmal etwa seine Suppe durch Rühren heruntergekühlt hat. Bei der heißen Wasserprobe läuft der Mechanismus gleichsam selbst organisiert ab. Aus diesem Grund halten es einige Wissenschaftler für möglich, dass die Konvektion allein in der Lage sein könnte, den Mpemba-Effekt hervorzurufen. Einen Beweis dafür gab es bislang aber noch nicht.

Vielleicht ist es dem Schüler Julian Schneider aus Rottweil im Rahmen seines Projekts für »Jugend forscht« jetzt gelungen, diesen Nachweis zu führen. Jedenfalls demonstrierte er mit ausgeklügelten Experimenten die überragende Rolle der Konvektion im anfangs heißen Wasser.

Systematisch konnte er zunächst einige Vorgänge ausschließen, die bis dahin als Favoriten für die Ursache des Mpemba-Effekts galten.

Um die inhomogene Temperaturschichtung zu dokumentieren, hat Julian Schneider mit speziellen Messfühlern Werte an verschiedenen Stellen im Behälter aufgezeichnet. Dabei zeigte sich, dass wegen der von Anfang an vorhandenen kräftigen Konvektion das heiße Wasser selbst dann noch schneller abkühlte, als es sich bereits unterhalb der Starttemperatur des kalten Wassers befand. So gefror es rascher vollständig. Auch unterhalb von vier Grad Celsius, wo sich die Dichteverhältnisse im Wasser umkehren, dominierte die Konvektion in der ehemals heißen Flüssigkeit.

Doch wie ist es möglich, dass sich das ursprünglich warme Wasser, wenn es selbst abgekühlt ist, sogar dann noch schneller bewegt als das kalte? Dazu muss man sich die Wärmeverteilung etwas genauer ansehen. Obwohl die Durchschnittstemperatur dieselbe ist, herrscht ein größerer Unterschied zwischen innen und außen als beim kälteren Wasser. Daher bewegt sich letzteres langsamer und kristallisiert schneller an den Wänden, was wachsende isolieren-

de Eisschichten erzeugt. Wir haben es hier also mit der paradox erscheinenden Situation zu tun, dass das kühlere Wasser unter anderem deshalb langsamer durchfriert, weil es an den Grenzschichten zur Luft früher gefriert.

Dieser Einfluss der Wasserbewegung auf den Wärmeaustausch führt offenbar dazu, dass sich der scheinbare Vorteil der niedrigeren Starttemperatur beim kalten Wasser schließlich als Nachteil erweist. Ob mit Julian Schneiders Erklärung der Mpemba-Effekt nun aber endgültig entzaubert ist, bleibt abzuwarten. Schließlich war das Phänomen schon einige Male für Überraschungen gut. ↩

(Spektrum der Wissenschaft, 9/2015)

Jeng, M.: The Mpemba Effect: When can Hot Water Freeze Faster than Cold? In: American Journal of Physics 74, S. 514-522, 2006

Schneider, J.: Der Mpemba-Effekt und seine Ursache. Ausarbeitung für »Jugend forscht«, Rottweil 2014

LOUCHE-EFFEKT

Warum werden Anisschnäpse
milchig, wenn man sie mit Wasser mixt?

von Joachim Schüring

Ob Ouzo, Raki, Pastis oder Absinth, alle anishaltigen Schnäpse sind in ihrer Flasche und bei Zimmertemperatur klar und durchsichtig. Mischt man allerdings Wasser dazu, wird das Getränk schlagartig milchig weiß und trübe.

Für die Eintrübung sind die im Anis enthaltenen ätherischen Öle verantwortlich. Diese aromatischen Verbindungen aus der Gruppe der Terpene – zu denen auch Kautschuk, die Bitterstoffe des Hopfens und manches Insektengift gehören – sind kaum oder gar nicht wasserlöslich.

Kommen diese Öle mit Wasser in Kontakt, formen sie somit Myriaden winziger Tropfen und bilden zusammen eine Emulsion, die den Drink trübe macht.

Liebhabern solcher Getränke hilft dieser Louche-Effekt (»louche«, französisch: zwielichtig, undurchsichtig) bei der Qualitätsbeurteilung: je trüber das Glas, umso höher der Anisgehalt.

Übrigens ist der Louche-Effekt auch bei niedrigen Temperaturen zu beobachten – und zwar weil sich die ätherischen Öle im kalten Anisschnaps schlechter lösen. ↩



Spektrum
DER WISSENSCHAFT

DIE WOCHE

DAS WÖCHENTLICHE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

Das Kombipaket im Abo: App und PDF

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur 0,92 € pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur 0,69 €.

JETZT ABONNIEREN!

