

FARBEN

Wie sie entstehen, wie wir sie sehen

Insekten

Lebendige
Juwelen

Synästhesie

Mit den Ohren
sehen

Evolution

Der merkwürdige
Farbensinn der Primaten





Antje Findeklee
E-Mail: findeklee@spektrum.de

Folgen Sie uns:



Liebe Leserin, lieber Leser,
ein Käfer erzeugt das weißeste Weiß, Materialwissenschaftler erschufen das schwärzeste Schwarz – doch im Großen und Ganzen ist unsere Welt vor allem eines: bunt. Für unsere Augen zumindest, denn andere Organismen sehen ihre Umgebung anders als wir. Und auch die menschliche Farbwahrnehmung ist keine rein rationale Angelegenheit: Unser Gemütszustand beeinflusst ebenfalls, wie gelb ein Gelb erscheint. Für manche Synästheten sind sogar Zahlen oder Töne farbig.

Kommen Sie mit auf eine Reise in die Welt der Farben:
wie sie entstehen, und wie wir sie wahrnehmen.

Eine spannende Lektüre wünscht Ihnen

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 29.08.2016

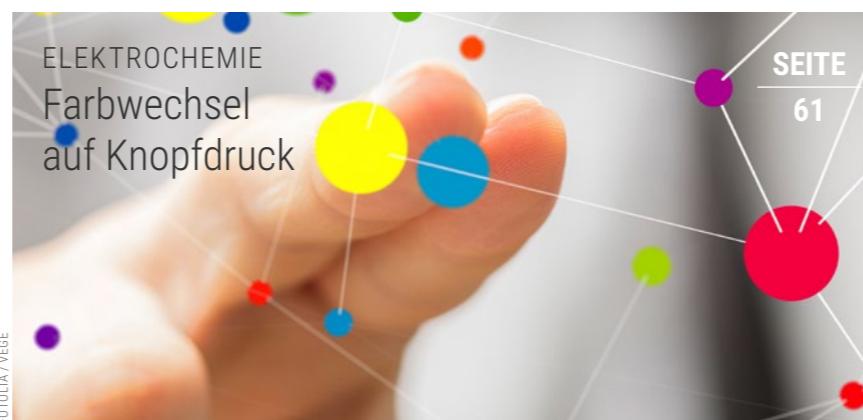
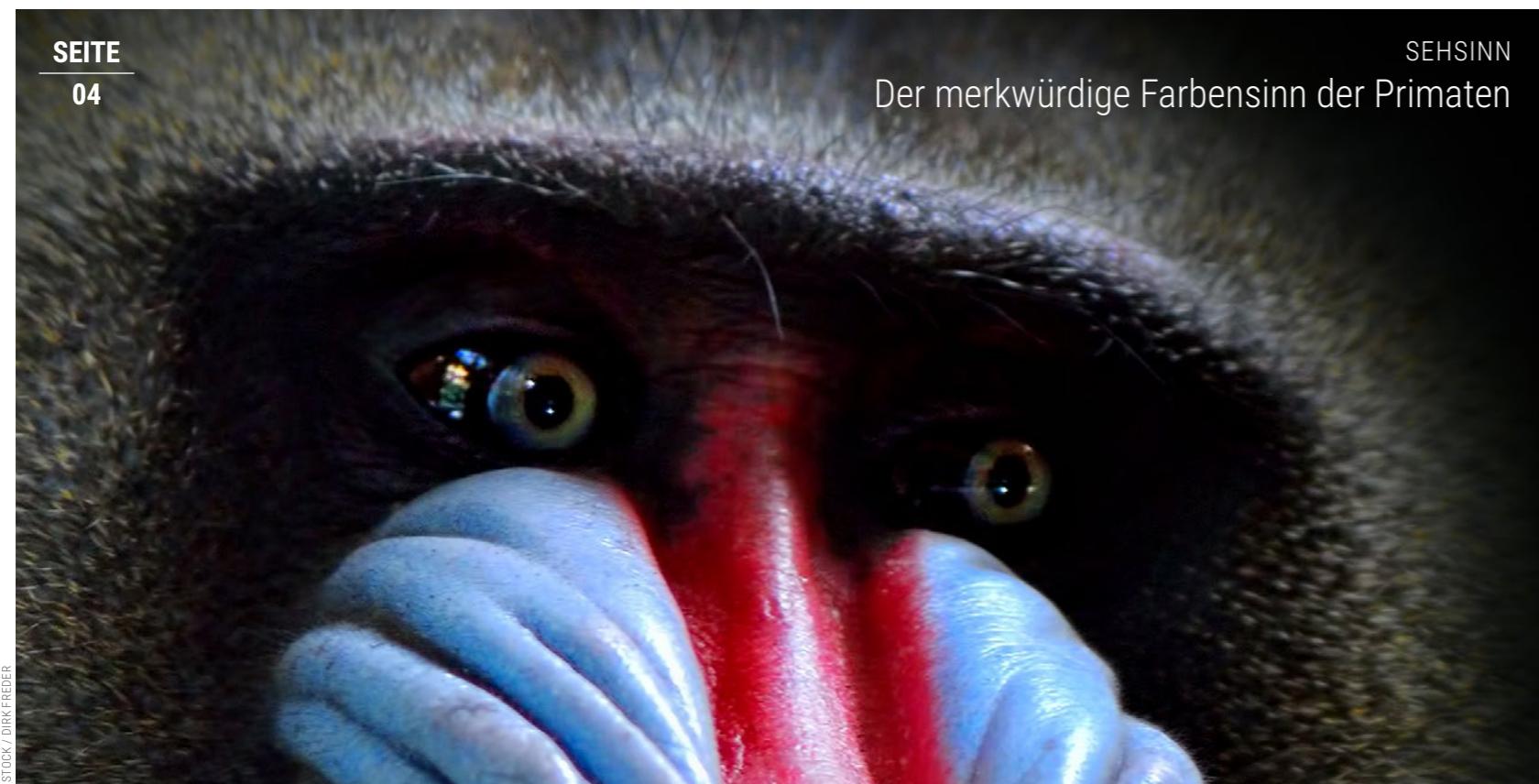
IMPRESSIONUM

CHEFREDAKTEURE: Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.), Dr. Uwe Reichert
REDAKTIONSLINTER: 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
PRODUKTMAGERIN DIGITAL: Antje Findeklee
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 Rechtsinhaberschaft 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.



- 19 PSYCHOLOGIE
Traurigkeit beeinflusst
die Farbwahrnehmung
- 21 WAHRNEHMUNG
Gelb sieht im Winter anders aus
- 23 PLASMONISCHE FARBE
So drückt man den kleinsten
»Monet« der Welt
- 30 SIMULTANKONTRAST
Eingebildete Farben
- 34 SYNÄSTHESIE
Mit den Ohren sehen
- 48 ESSAY
Das schöne Schwarz der Nacht
- 52 STRUKTURFARBEN
Lebendige Juwelen
- 56 CHITIN
Käfer streuen Licht für das weißeste Weiß
- 59 VANTABLACK
Dunkelstes Material jetzt noch schwärzer



SEHSINN
DER
MERKWÜRDIGE
FARBENSINN DER
PRIMATEN

von Gerald H. Jacobs und Jeremy Nathans

Im Vergleich zu vielen anderen Wirbeltieren erkennen die meisten Säugetiere nur wenige Farben. Die Primaten haben diese Wahrnehmung wieder verbessert – auf unterschiedliche Weisen.

Die Welt erscheint uns in einer schier unermesslichen Farbenvielfalt: vom Dottergelb der Ringelblume bis zum Silbergrau eines Autos, vom fahlblauen Winterhimmel bis zum grün funkelnenden Smaragd. Umso erstaunlicher ist, dass nur drei verschiedene Lichtwellenlängen genügen, um daraus jede von uns wahrgenommene Farbe zu mischen. Sinnesphysiologen sprechen vom trichromatischen Sehen. Tatsächlich benutzt unsere Netzhaut (Retina) für das Farbensehen lediglich drei unterschiedliche Licht absorbierende Sehpigmente oder -farbstoffe. (Ein weiteres Pigment, das Rhodopsin, dient dem Helldunkelsehen bei Dämmerlicht.) Deswegen lässt sich auch auf einem Bildschirm allein mit roten, grünen und blauen Punkten oder Pixeln unser gesamtes Farbenspektrum darstellen.

Auch viele Affen sehen trichromatisch, doch Gleiches gilt für das übrige Tierreich keineswegs. Andere Säugetiere besitzen gewöhnlich nur zwei Pigmente zum Farbenerkennen – sie sind so genannte Dichromaten. Ein paar nachtaktive Arten haben sogar nur ein einziges Farbsehpigment. Reicher ausgestattet als wir sind dagegen

Vögel, Fische und Reptilien: Viele von ihnen verfügen über gleich vier Farbsehpigmente; sie sehen damit auch im Ultravioletten.

Folglich erscheint der trichromatische Farbensinn der Primaten als etwas Ungewöhnliches. In Jahrzehntelangen genetischen, molekularbiologischen und neurophysiologischen Studien haben wir und andere Forscher vieles über seine Evolution, aber auch Flexibilität entdeckt.

Über ein halbes Jahrhundert ist es her, seit Forscher erstmals untersuchten, auf welche Anteile des Lichtspektrums die Farbsehpigmente des Menschen reagieren. Heute kennen wir ihre jeweilige spektrale Empfindlichkeit sehr genau. Jedes der drei Pigmente absorbiert nur Licht eines bestimmten Spektralbereichs, und jedes lässt sich anhand derjenigen Wellenlänge charakterisieren, auf die es am stärksten anspricht. Eines dieser Pigmente reagiert besonders gut auf ungefähr 430 Nanometer, eines auf annähernd 530, das dritte auf 560. Physiologen sprechen von Pigmenten für kurz-, mittel- und langwelliges Licht oder abgekürzt von S-, M- und L-Pigmenten (S nach englisch short = kurz). Als »normales« Blau, Grün und Gelb empfinden

AUF EINEN BLICK

Bunte Welt dank drittem Pigment

- 1 Menschen und viele andere Primaten **sehen die Welt farbiger** als die übrigen Säugetiere.
- 2 Unser Farbensinn beruht auf drei lichtempfindlichen **Pigmenttypen** in der Netzhaut: Wir sind so genannte **Trichromaten** – im Gegensatz zu den dichromaten Säugern mit nur zwei Pigmenttypen.
- 3 Die Gene für diese Pigmente erzählen von der Evolution unserer Farbwahrnehmung.
- 4 Mäuse, die ein zusätzliches menschliches Pigmentgen erhielten, erkennen mehr Farben als ihre Artgenossen. Offenbar ist ein **Säugerhirn plastisch** genug, um mit einer mutationsbedingten neuen Sinnesdimension umgehen zu können.

viele Menschen übrigens die Wellenlängen 470, 520 und 580 Nanometer.

Solch ein Farbsehpigment besteht aus einem Protein, das mit einem Licht absorbierenden Vitamin-A-Abkömmling in einem Komplex verbunden ist. Es liegt in der Außenmembran der so genannten Zapfen – einer Sorte von lichtempfindlichen Zellen oder Fotorezeptoren in der Netzhaut. Der Name bezeichnet ihre sich verjüngende Gestalt (dem Dämmerungssehen dienen die so genannten Stäbchen). Absorbiert ein Sehfarbstoff Licht, löst das eine Kaskade molekularer Ereignisse aus und versetzt die betreffende Zelle in Erregung. Das wiederum aktiviert andere Neurone in der Netzhaut. Über sie entsteht schließlich ein Signal, welches über den Sehnerv ins Gehirn gelangt.

Zwar waren die Absorptionsspektren der drei Zapfenpigmente des Menschen

SCHIMPANSE VOR ABSTRAKTEM GEMÄLDE

Schimpansen erkennen wie wir mehr Farben als die meisten Säugetiere. Was wir bei einem abstrakten Bild sehen, beruht auf Eigenschaften der Malfarben, den Lichtverhältnissen – und auf unserem Sehsystem.



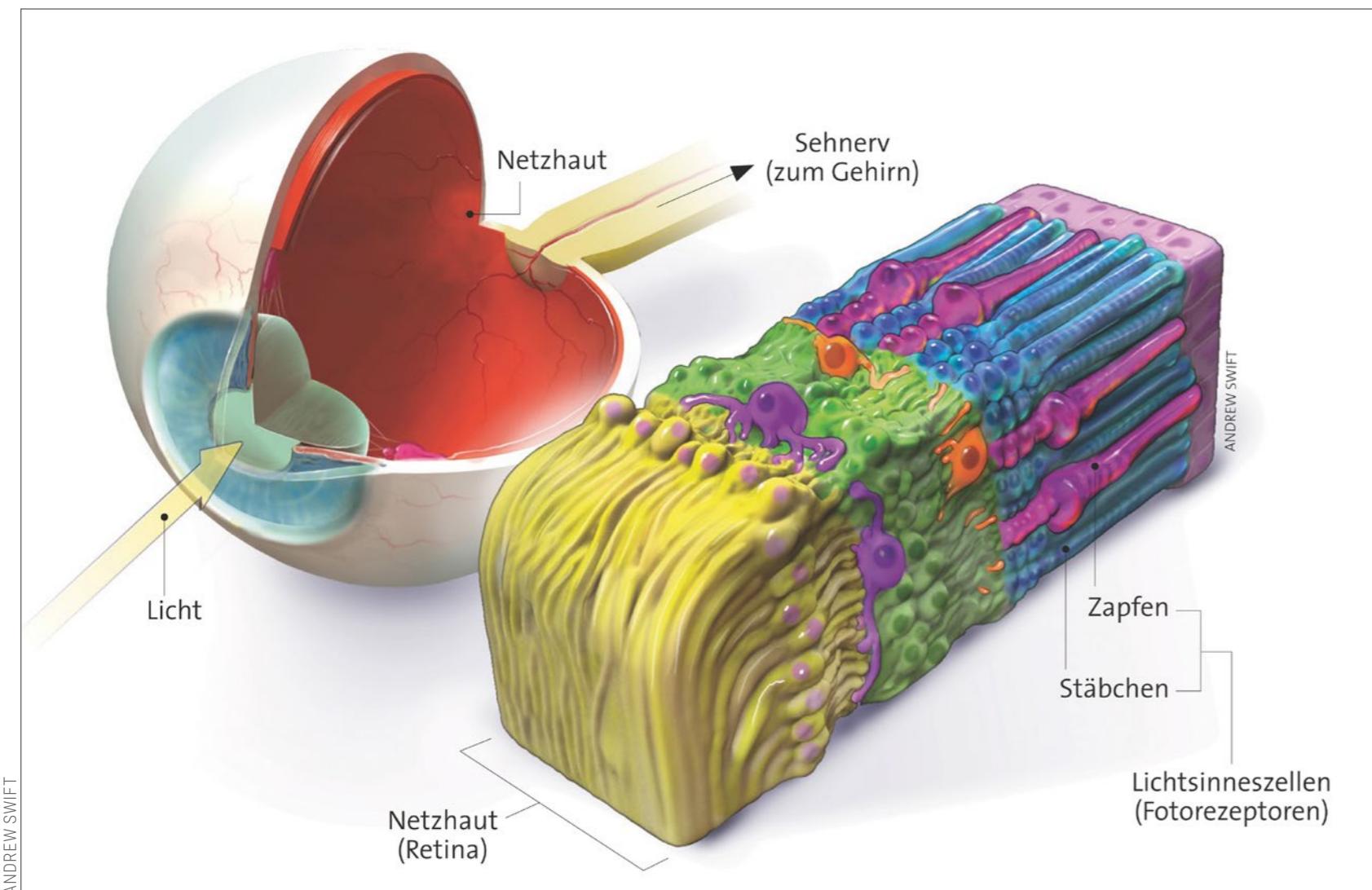
schon länger bekannt, nicht aber die Pigmente selbst. Erst in den 1980er Jahren hat einer von uns (Nathans) die Gene für diese drei Proteine identifiziert. Anhand von deren DNA-Sequenzen (Nukleotidsequenzen) erstellte er dann die Abfolge der Aminosäuren (also die Kette der Bausteine) dieser Proteine. Die M- und L-Pigmente (für mittel- und langwelliges Licht) gleichen sich demnach fast völlig. Weiteren Studien

zufolge beruht ihre unterschiedliche spektrale Sensitivität auf nur drei – von insgesamt 364 – ausgetauschten Aminosäuren.

Wie sich auch herausstellte, liegen die Gene für diese beiden Sehfarbstoffe nebeneinander auf dem X-Chromosom. Letzteres überraschte die Forscher nicht – schließlich tritt die recht häufige so genannte Rotgrünblindheit bei Männern (die nur ein X-Chromosom besitzen) viel öfter

auf als bei Frauen. Zudem spricht der Erbgang für eine solche Lokalisation. (Bei Frauen kann das Gen des anderen X-Chromosoms den Ausfall kompensieren, sie können die Farbschwäche aber vererben.) Das Gen für das S-Pigment (für kurze Wellenlängen) liegt dagegen auf dem Chromosom 7. Dessen Sequenz deutet nur auf eine entfernte Verwandtschaft mit den beiden anderen Sehfarbstoffen hin.

Viele Anhaltspunkte zur Geschichte dieser drei Farbsehpigmente hatten Forscher bis Mitte der 1990er Jahre durch Vergleiche mit der Ausstattung anderer Tiere gewonnen. So wussten wir damals schon, dass fast alle Wirbeltiere Gene aufweisen, die der menschlichen Erbsequenz für das S-



NETZHAUT

Die Netzhaut mit ihren verschiedenen Nervenzelltypen liefert dem Gehirn über den Sehnerv visuelle Informationen. Als Sinneszellen zum Farbensehen dienen die so genannten Zapfen. Sie besitzen Pigmente, die jeweils von Licht eines bestimmten Wellenlängenbereichs aktiviert werden. Die Stäbchen arbeiten dagegen bei schwachem Licht; am Farbensehen sind sie in der Regel nicht beteiligt.

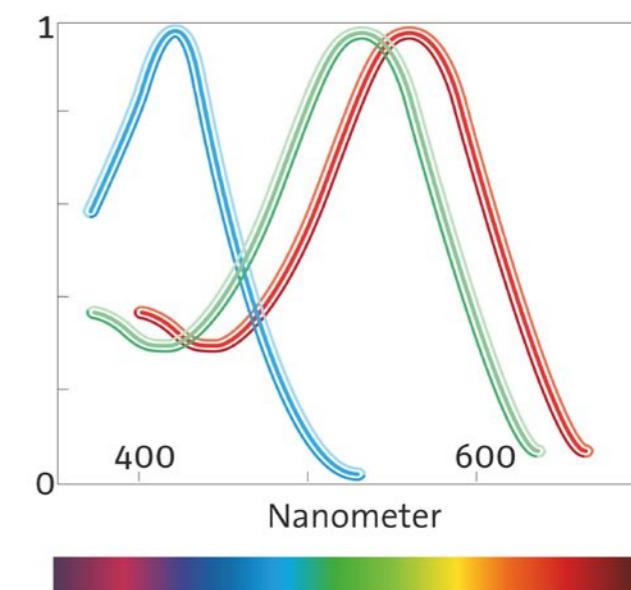
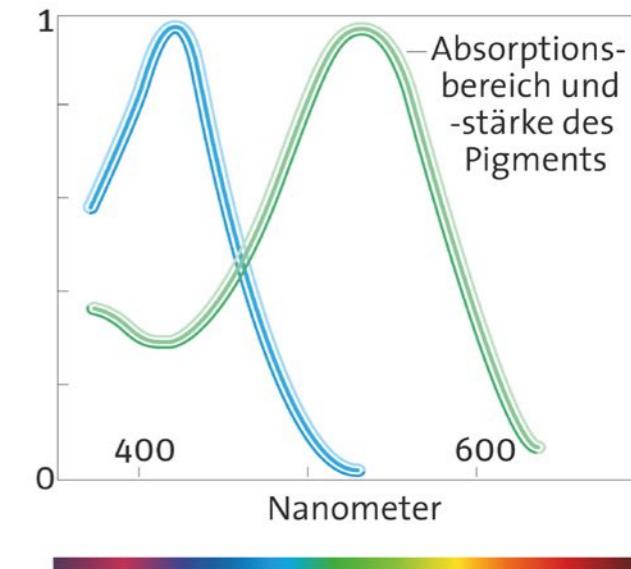
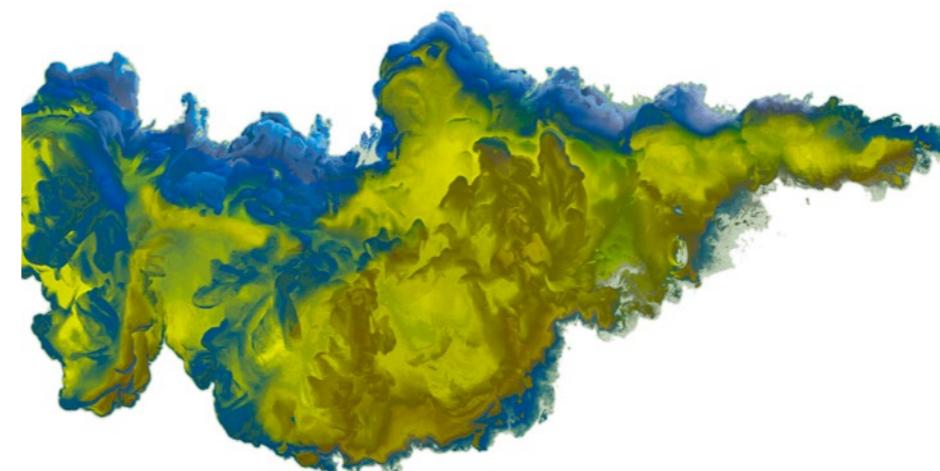
Pigment auf Chromosom 7 stark ähneln. Demnach dürfte ein Sehfarbstoff für kürzere Wellenlängen ein altes Element des Farbensehens sein. Ebenso tauchen bei den Wirbeltieren verbreitet Sehfarbstoffe auf, die verwandt sind mit den beiden (ihrerseits ja ganz nah verwandten) Primatenpigmenten für längere Wellenlängen, deren Gene auf dem X-Chromosom sitzen. Auch solche Pigmente haben also wohl einen frühen Ursprung. Auffälligerweise besitzt unter den Säugetieren aber offenbar kein einziger Nichtprimate sowohl ein M- als auch ein L-Pigment. Diese Differenzierung müsste demnach neuer sein.

Zuerst eine falsche Fährte

Der einzige Sehfarbstoff für langwelliges Licht, mit dem sich die Mehrheit der Säugetiere begnügen muss, gleicht stark den M- und L-Pigmenten der Primaten, und das Gen dafür liegt bei Ersteren ebenfalls auf dem X-Chromosom. Die Forscher erklärten sich die zwei X-Chromosom-Gene bei den Primaten mit einer Genverdoppelung in ihrer frühen Evolution: Infolge einer Mutation hätte ein X-Chromosom versehentlich zwei Gene für ein L-Pigment erhalten. Anschließend wäre eines dieser Gene mehr-

Rotgrünblinde und rotgrünstarke Säugetiere

Die meisten Säugetiere sehen dichromatisch: Zum Farbenerkennen verwenden sie zwei verschiedene Sehpigmente mit überlappendem Empfindlichkeitsbereich, eines für kurz- und das andere für langwelliges Licht (oben). Der Mensch und viele andere Primaten haben für Farben noch ein drittes Sehpigment im langwelligen Spektralbereich: Sie können somit trichromatisch sehen – und dadurch viel mehr Farben unterscheiden (unten).



mals mutiert, oder vielleicht sogar beide. So könnten schließlich zwei Pigmente mit zwei leicht verschiedenen spektralen Fenstern entstanden sein.

Das ist ein gängiger Evolutionsmechanismus. Genverdoppelungen kommen vor, wenn Ei- oder Samenzellen entstehen und gleiche Chromosomen Abschnitte untereinander austauschen. Das geschieht nicht immer ganz sauber: Manchmal erhält ein Tauschpartner zu viel Material; unter Umständen besitzt er nun ein oder sogar mehrere Gene doppelt. Sofern die Extragene günstig mutieren, können Selektionskräfte für ihren Fortbestand sorgen, und die neuen Gene verbreiten sich in der Population. Hierfür gibt es eine Menge Beispiele: Die Gene für das fetale Hämoglobin und den roten Blutfarbstoff von Erwachsenen etwa dürften auf eine Genverdopplung mit anschließenden Mutationen zurückgehen. (Das fetale Blut muss Sauerstoff stärker binden, um es dem mütterlichen zu entziehen.) Oder die so genannten Immunglobuline – die Proteine für die Vielfalt der Antikörper: Ihre Gene entstammen vermutlich einem einzigen Gen, das sich duplizierte.

Für die Lebensweise der Primaten müssen drei Farbsehpigmente statt zweien

mancherlei Vorteil gebracht haben. Die Affen entdeckten nun etwa viele reife Früchte leichter schon an der Farbe. Vermutlich, so überlegten die Forscher, setzte sich die neue Anpassung darum bald durch.

So plausibel der beschriebene Evolutionsweg zunächst wirkte – neuere Entdeckungen scheinen diesem Ablauf zu widersprechen. Bei genauerem Hinsehen verlief die Evolution komplizierter und damit noch interessanter. Denn erstaunlicherweise benutzen die Primaten zwei verschiedene Methoden, um mehr Farben unterscheiden zu können. Die Genverdopplung passt ganz gut auf die so genannten Altweltaffen – die Arten Afrikas und Asiens, also unter anderem Paviane, Makaken, Meerkatzen und Menschenaffen –, und damit auch auf den Menschen. Die Neuweltaffen in Mittel- und Südamerika – Krallenaffen, Tamarine, Totenkopfäßchen – verwenden zur Verblüffung der Forscher eine andere Lösung.

Bei den Altweltaffen können gewöhnlich alle Individuen trichromatisch sehen, auch die Männchen. Doch die Neuweltaffen sind schlechter dran, wie einer von uns (Jacobs) in den letzten Jahrzehnten entdeckte: Trichromatisch sehen bei ihnen

nur etwa zwei Drittel der Weibchen; den übrigen Weibchen sowie allen Männchen fehlt das Differenzierungsvermögen im Rotgrünbereich. Sie sind offenbar nur Dichromaten.

Wie erklärt sich ein so gemischtes Bild? Verschiedene Forscher haben sich die verantwortlichen Gene der Neuweltaffen genauer angeschaut. Demnach besitzen die meisten ihrer Arten wirklich nur zwei Gene für Farbsehpigmente, und zwar eines für ein Pigment für kurze Wellenlängen und ein zweites für längere. Ersteres dürfte auf einem Nichtgeschlechtschromosom liegen. Das andere Gen, das hier interessiert, befindet sich auf dem X-Chromosom. Wie so sehen manche Neuweltaffenweibchen trotzdem trichromatisch?

Die Antwort mag erstaunen: Von dem Gen auf dem X-Chromosom existieren in den Populationen mehrere Varianten, sprich Allele, mit leicht voneinander abweichenden DNA-Sequenzen. So etwas ist an sich nicht ungewöhnlich, bewirkt aber selten Funktionsunterschiede der Genprodukte. Doch in diesem Fall ist das anders, denn die einzelnen Varianten ergeben Pigmente mit unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit. Der Genpool etwa von To-

tenkopfaffen oder anderen typischen amerikanischen Arten enthält drei verschiedene Allele vom X-Chromosom-Gen. Eines der resultierenden Pigmente ähnelt dem mittleren des Menschen, ein anderes unserem für langwelliges Licht, das Absorpti-

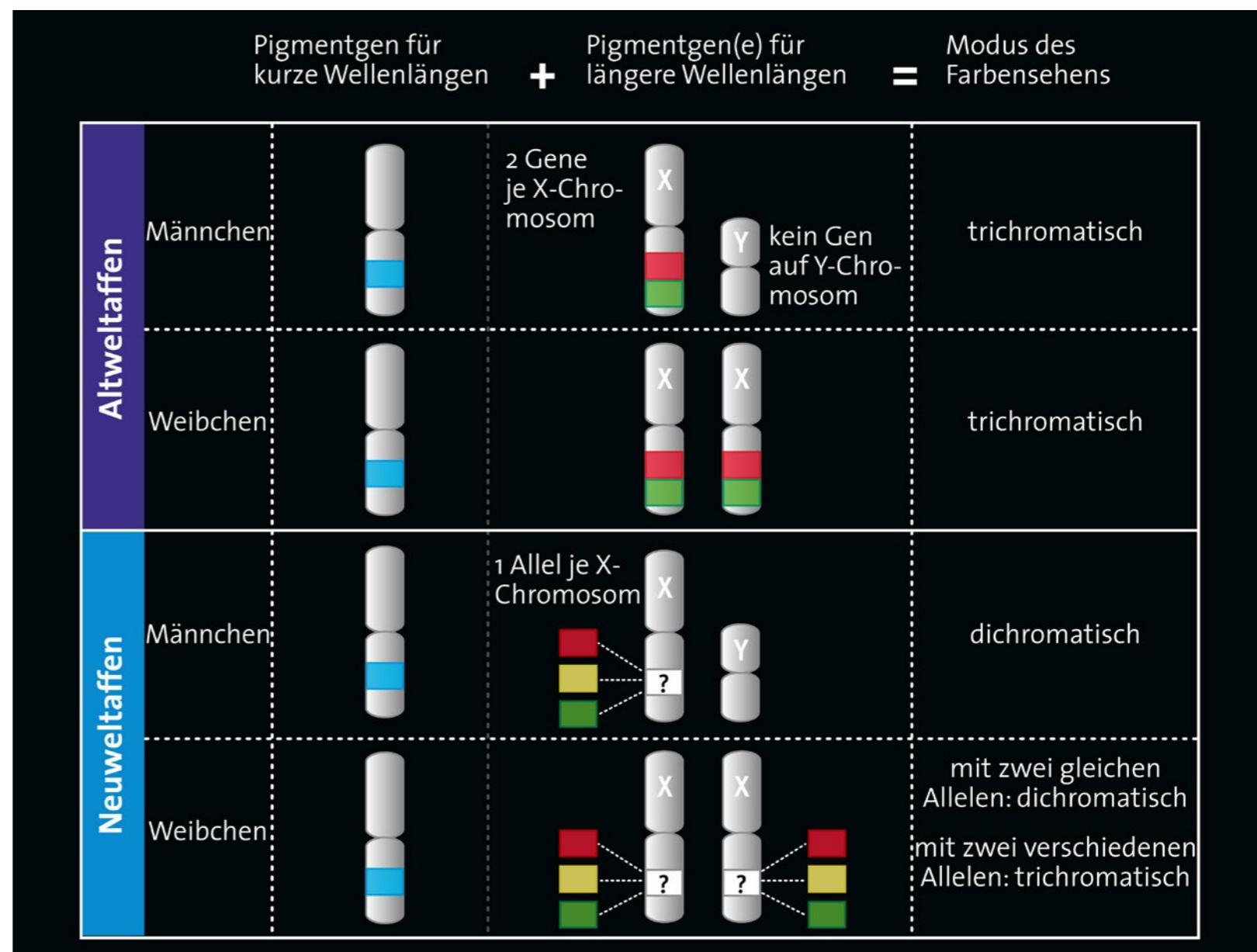
onsvermögen des dritten liegt ziemlich in der Mitte zwischen diesen beiden.

Jetzt wird klar: Mit ihren zwei X-Chromosomen haben nur die Weibchen eine Chance, zwei verschiedene Allele dieses Gens zu erben, die dann beide in Funktion

treten und ihnen ermöglichen, Farben besser aufzulösen. Alle anderen Artgenossen müssen sich als Dichromaten durchs Leben schlagen. Gewissermaßen sind die Neuweltaffen nur mit einer Sparversion für trichromatisches Sehen ausgestattet.

Zwei verschiedene Lösungen

Trichromatik ist bei Alt- und Neuweltaffen genetisch unterschiedlich geregelt. Bei beiden liegt auf einem Nichtgeschlechtschromosom ein Gen (blau dargestellt) für ein Pigment, das auf kurze Wellenlängen anspricht. Die Altweltaffen tragen außerdem auf jedem X-Chromosom zwei verschiedene Pigmentgene (rot und grün dargestellt), deren Proteine versetzte Bereiche von längerwelligem Licht erfassen. So erkennen auch die Männchen, trotz nur eines X-Chromosoms, Rot und Grün. Das X-Chromosom der Neuweltaffen weist dagegen nur ein solches Pigmentgen auf. Allerdings gibt es dieses Gen in verschiedenen Varianten (Allelen; rot, gelb und grün dargestellt). Auf ihren beiden X-Chromosomen können Weibchen zwei verschiedene Allele tragen – und dann trichromatisch sehen.

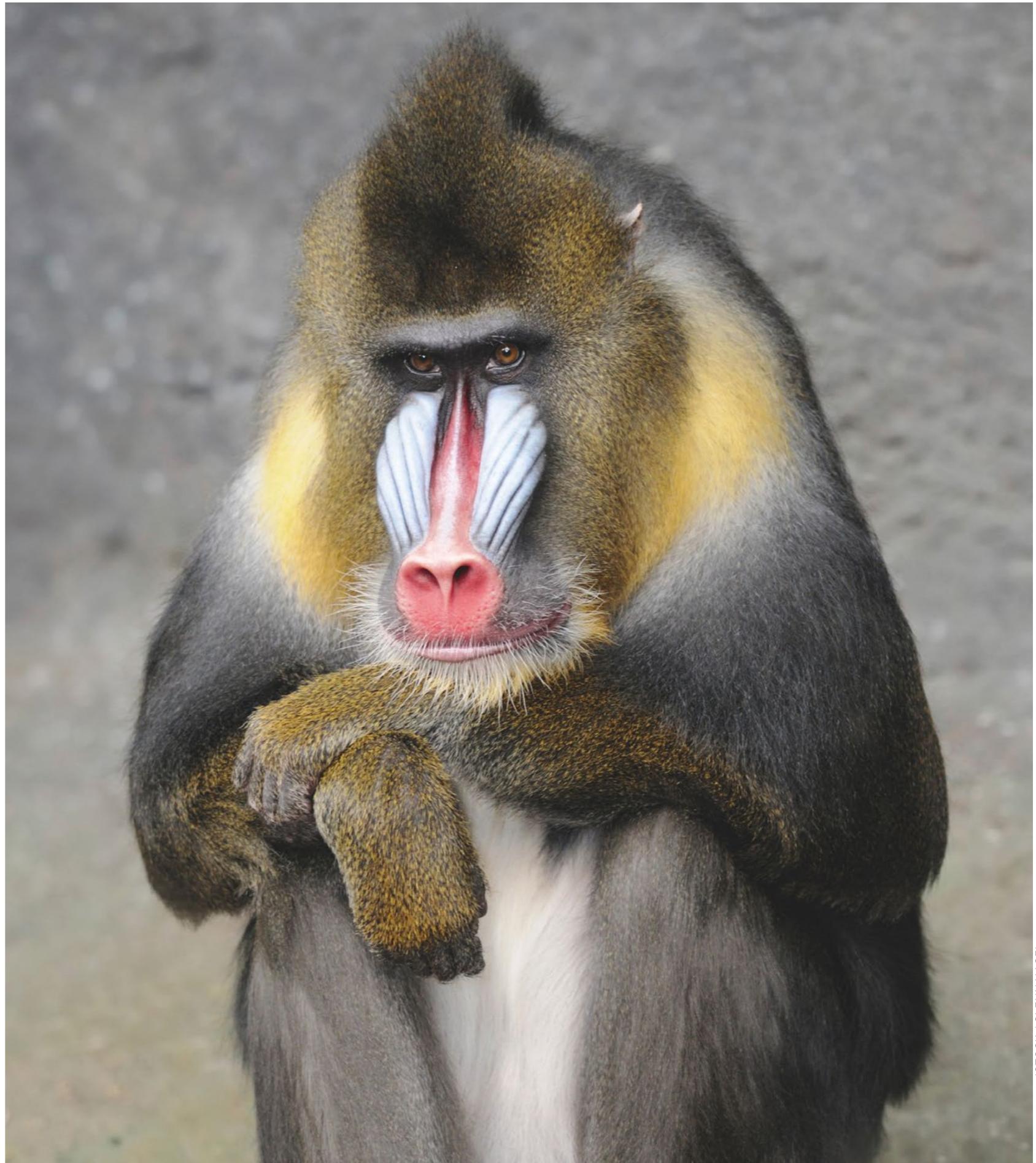


Als Afrika und Südamerika in der Erdgeschichte auseinanderwichen, trieb das Meer einen Keil zwischen die beiden Kontinente. Seit vermutlich rund 40 Millionen Jahren sind die Alt- und Neuweltaffen genetisch voneinander isoliert. Zunächst lag es nahe, anzunehmen, dass die Primaten bis zur Trennung noch Dichromaten waren und erst danach ihre jeweilige Farbenkompetenz erwarben – die eine Gruppe durch Genverdoppelung mit anschließender Auseinanderentwicklung der beiden Gene, die andere durch einfachere kleine Mutationen im gleichen Gen, was mehrere Varianten herbeiführte. Doch offenbar verlief die Evolution anders.

Denn ein molekularer Vergleich der Pigmente der X-Chromosom-Gene beider Gruppen erzählt eine neue Geschichte. Er-

ALTWELTAFFEN (SCHMALNASEN)

Sie entwickelten sich in Afrika und Asien, seit Südamerika und Afrika vor rund 40 Millionen Jahren getrennte Kontinente wurden. Hierzu gehören neben dem Menschen die Menschenaffen sowie unter anderem Makaken und Paviane. Der Mandrill (im Bild), ein Hundsaffe, ist mit den Meerkatzen verwandt.



staunlicherweise haben die Pigmente für mittlere Wellenlängen bei den Alt- und Neuweltaffen ihre höchste Empfindlichkeit bei 530 Nanometern. Noch erstaunlicher ist, dass dies auf dem gleichen Set von drei geänderten Aminosäuren in den Proteinen beruht. Auch die L-Pigmente weisen bei beiden Primatengruppen drei – andere – übereinstimmende Aminosäuren auf, die dieses Pigment für 560 Nanometer höchstempfänglich machen. So viel Gleichheit wäre gar nicht nötig, denn Forscher haben ausgetüftelt, dass ein Austausch etlicher anderer Aminosäuren ebenfalls Verschiebungen der spektralen Fenster bewirken würde. Dass die beiden Affengruppen jede für sich dieses gleiche Muster entwickelten, ist somit unwahrscheinlich.

NEUWELAFFEN (BREITNASEN)

Sie sind in Mittel- und Südamerika zu Hause. Im Schnitt sind sie eher klein, einige Arten sogar sehr klein. Hierzu gehören unter anderem Krallenaffen, Kapuziner- und Totenkopfaffen, Springtamarine, Klammer- und Brüllaffen. Im Bild sieht man einen Rotgesichtsklammeraffen



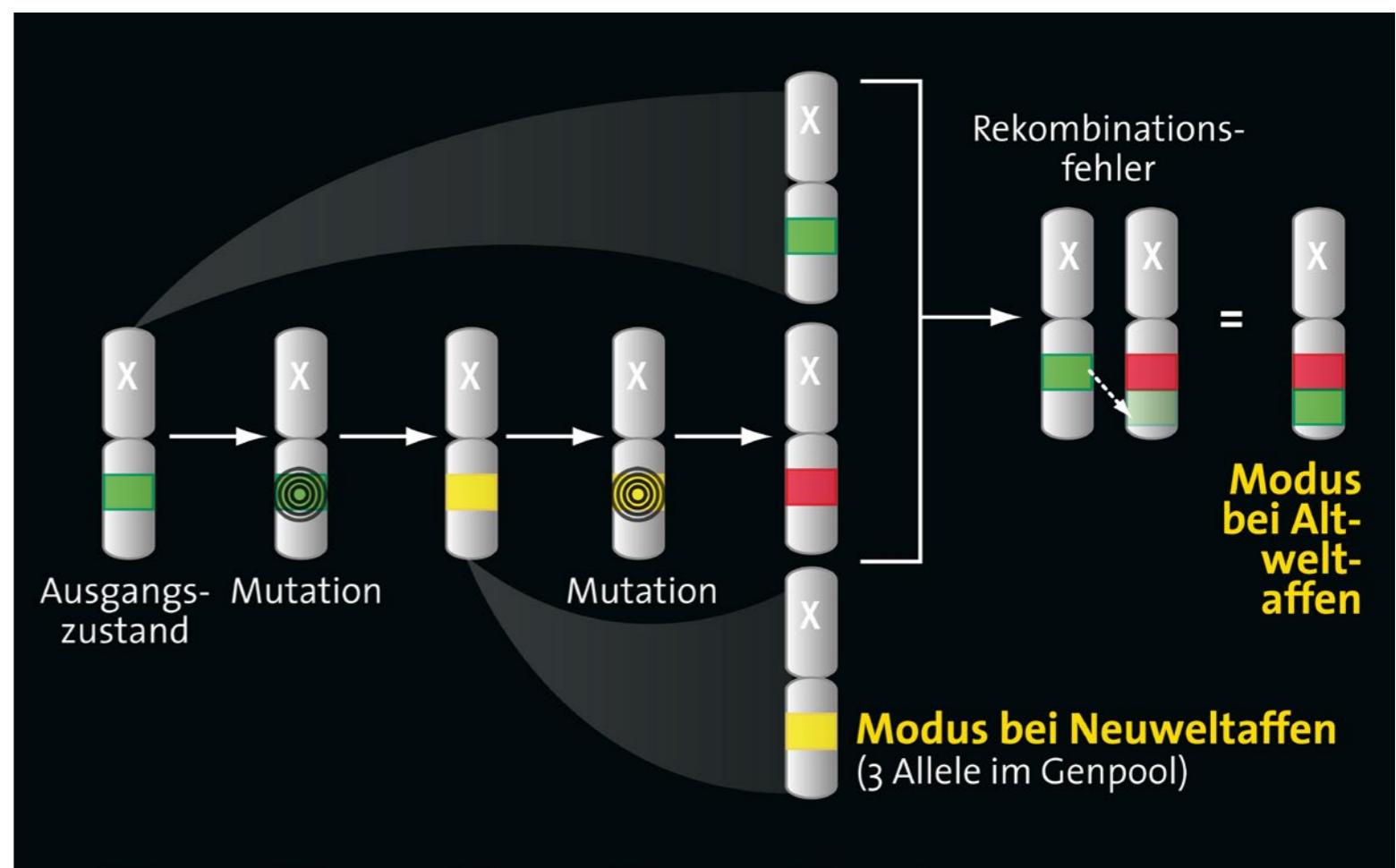
Plausibler wäre eine gemeinsame Basis. Vielleicht besitzen die Neuweltaffen noch das ursprüngliche System mit mehreren Genvarianten, das schon gemeinsame Vorfahren beider Primatengruppen benutzten – damals der erste Schritt zum trichromatischen Sehen. Die Varianten des X-Chromosom-Gens wären dann schon vor der Trennung durch wiederholte kleinere Mutationen entstanden und mit ihnen eine differenziertere Wahrnehmung im langwelligen Bereich. (Auch das »mittlere« Allel der Neuweltaffen könnte schon dazugehört haben. Das Pigment trägt einige von den entscheidenden Aminosäuren, durch die sich die M- und L-Pigmente unterscheiden; und sein Absorptionsspektrum liegt gewissermaßen auf halbem Weg dazwischen.)

Gleichberechtigung für Männer

Erst nach der Spaltung der Primaten in zwei Gruppen hätte sich bei den Altweltaffen die vermutete Genduplikation ereignet, mit einem wichtigen Unterschied zum weiter vorn beschriebenen Verlauf: Bei einem Affenweibchen der Alten Welt trat ein Fehler bei der Chromosomenpaarung auf, woraufhin ein X-Chromosom nun zwei Pigmentgene aufwies. Allerdings muss die-

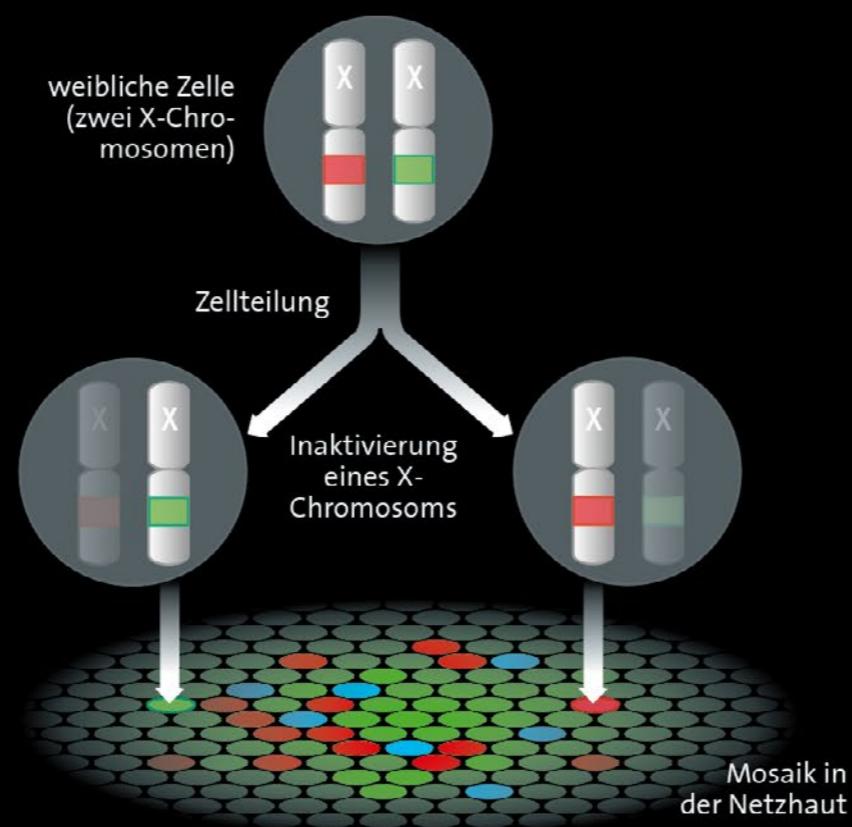
Das neue Evolutionsmodell

Genvergleiche lassen annehmen, dass die Trichromatie der Altweltaffen aus einer Situation heraus entstand, wie sie bei den Neuweltaffen noch heute herrscht. Ein gemeinsamer Vorfahr der Alt- und Neuweltaffen trug auf dem X-Chromosom ein einziges Gen für ein Farbsehpigment im langwelligen Bereich (links). Dieses Gen mutierte verschiedentlich und trat schließlich in mehreren Varianten (Allelen) auf, deren Pigmente auf versetzte Wellenlängen ansprachen: die Situation der Neuweltaffen bis heute (Mitte). Bei den Altweltaffen trafen später – durch einen Fehler beim Herstellen von Keimzellen – zwei der Allele auf einem X-Chromosom zusammen (rechts). Offenbar war das so vorteilhaft, dass sich dieser Zustand bei diesen Affen durchsetzte.



Das Mosaik der Netzhaut

Bei den unterschiedlichen Zapfentypen in der Netzhaut spielen Zufallsprozesse mit. Jede dieser Sinneszellen enthält ja alle drei Gene für unsere drei Farbsehpigmente – doch nur je eines darf arbeiten. Über die Entscheidung für den Typ für kurzwelliges Licht ist nicht viel bekannt. Die Auswahl zwischen den beiden anderen Typen scheint Zufallsmechanismen zu folgen, ebenso deren Verteilung in der Netzhaut.

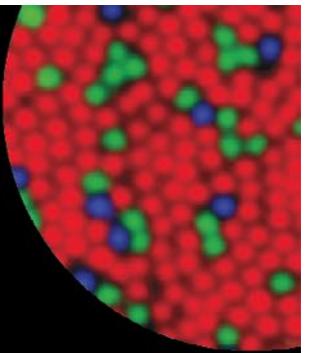


Neue Welt: zufällige Chromosomenwahl

Bei den Neuweltprimaten fällt die Entscheidung für eines der Allele für langwelliges Licht mit der zufallsgesteuerten Ausschaltung eines der beiden X-Chromosomen (X-Inaktivierung genannt) bei einzelnen Zellen. Das geschieht schon in der frühen Embryonalentwicklung der Weibchen. Trägt das Weibchen auf seinen beiden X-Chromosomen unterschiedliche Pigmentallele, entsteht durch die Inaktivierung jeweils eines X-Chromosoms ein Mosaik aus beiden Zapfentypen.

Alte Welt: außerdem Zufallsentscheidung für ein Gen

Auch in weiblichen Zellen von Altweltaffen ist eines der beiden X-Chromosomen stillgelegt. Doch jedes X-Chromosom – auch in männlichen Zellen – besitzt zwei Pigmentgene, darum muss sich die Zelle für eines davon entscheiden. Dafür sorgt ein Genregulator, die Locus-Kontrollregion. Er schaltet jeweils nur eines der Gene ein. Wiederum entsteht nach einem Zufallsprinzip ein Typenmosaik in der Netzhaut.



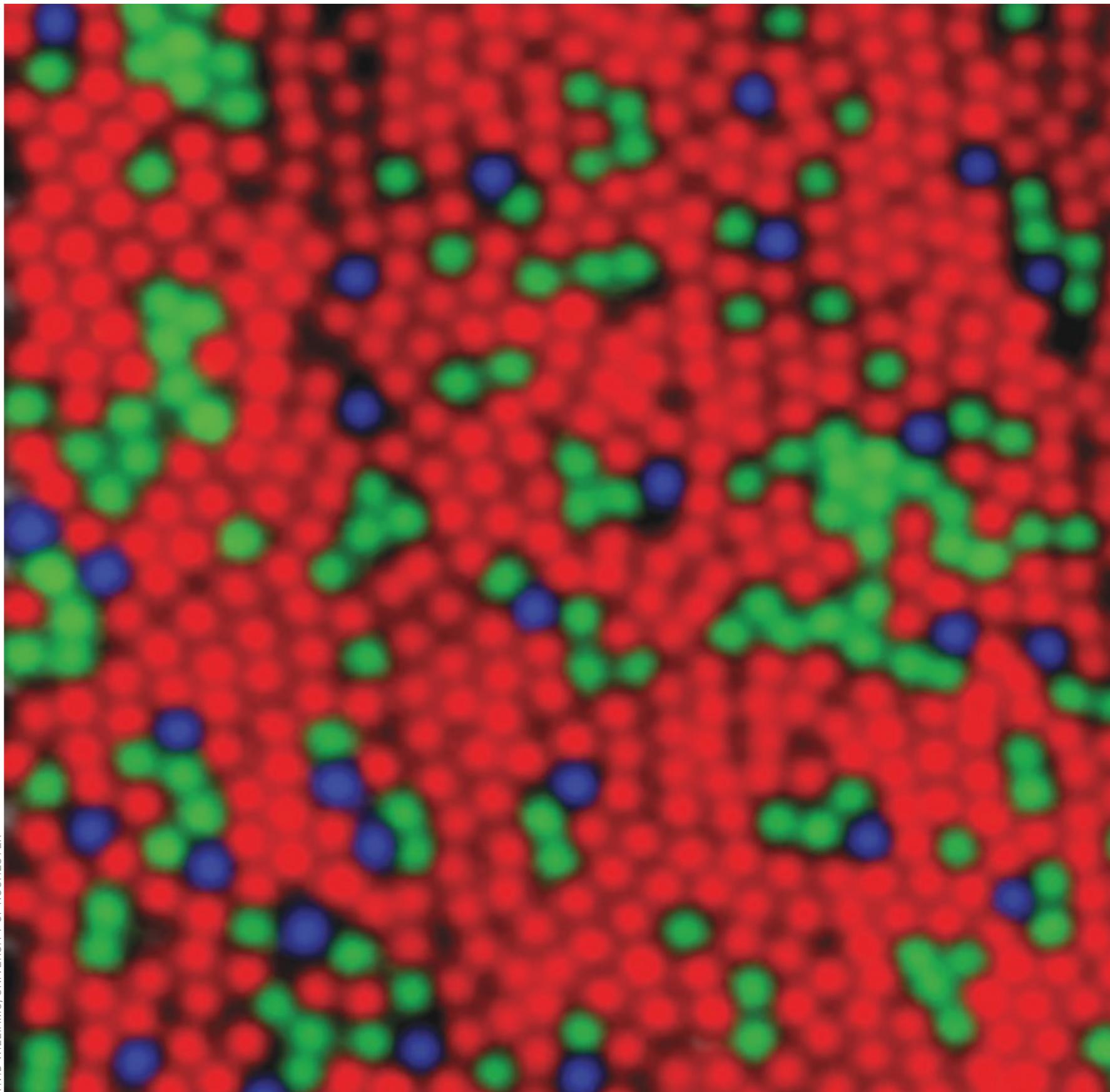
ses Tier davon schon vorher zwei verschiedene Varianten besessen haben, denn das neue X-Chromosom trug nun von vornherein ein M- und ein L-Allel. Diese besondere Mutation ermöglichte fortan auch Männchen trichromatisches Sehen, wenn sie das Chromosom erbten. Die verbesserte Farbwahrnehmung erwies sich offenbar als dermaßen günstig, dass X-Chromosomen mit nur einem Pigmentgen mit der Zeit aus dem genetischen Repertoire der Altweltaffen verschwanden. Lediglich die Neuweltaffen behielten das einfachere System.

Zufälle halfen nicht nur bei der Evolution des Farbsinns. Der Zufall greift noch auf einer ganz anderen Ebene – bei jedem von uns, und sogar bei jeder sich entwickelnden Zapfenzelle in der Netzhaut. Das ist für eine differenzierte Farbwahrnehmung sogar wesentlich. Hierzu muss man sich klarmachen, welche Informationen die einzelnen Zapfen dem neuronalen Verrechnungsapparat überhaupt liefern.

VERTEILUNGSMUSTER IN DER NETZHAUT

Die Verteilung der unterschiedlichen Zapfentypen in der Netzhaut scheint Zufallsmechanismen zu folgen.

DAVID WILLIAMS, UNIVERSITY OF ROCHESTER



Drei Pigmenttypen für unterschiedliche Spektralbereiche sind für trichromatisches Sehen nur eine Grundvoraussetzung. Mittels dieser Pigmente reagieren die Zapfen in der Netzhaut jeweils auf spezifische Anteile des Lichts und erzeugen Signale, denn jeder besitzt nur einen Pigmenttyp. Ein einzelner Zapfen liefert aber keine spezifische Information über die Wellenlänge, beziehungsweise die Farbe. Schwaches Licht in ihrem höchsten Empfindlichkeitsbereich löst in der Sinneszelle unter Umständen ein gleich starkes Signal aus wie starkes Licht im Grenzbereich. Gleiches gilt für bestimmte Werte ober- und unterhalb des Maximums. Die Farbwahrnehmung kommt nur zu Stande, wenn das visuelle System die Signale benachbarter verschiedener Zapfentypen vergleichen kann.

Damit dies sauber funktioniert, muss gewährleistet sein, dass jeder Zapfen wirklich nur einen Pigmenttyp aufweist. Andererseits müssen unterschiedliche Zapfentypen wie in einem Mosaik dicht nebeneinander positioniert werden. Solche Bedingungen sind in der Primatennetzhaut tatsächlich erfüllt – obwohl jede der Sinneszellen bei den trichromaten Altweltaffen natürlich alle drei Pigmentgene besitzt.

Wie sich die einzelne Zelle für einen einzigen Pigmenttyp entscheidet, ist noch nicht völlig geklärt. Aber wir kennen Mechanismen, die das ermöglichen.

Zum Anschalten von Genen bedienen sich Zellen so genannter Transkriptionsfaktoren: spezieller Proteine, die sich in der Nähe von Promotoren (Regulationsabschnitten) an die DNA anlagern. Über verschiedene weitere Schritte wird das Gen dann abgelesen und das Protein (hier das Pigment) hergestellt. Bei Zapfen für kurzwelliges Licht scheinen Transkriptionsfaktoren das gewünschte Gen (für das S-Pigment) schon beim Fötus zu aktivieren. Zugleich werden in diesen Zellen die Pigmentgene des X-Chromosoms auf noch nicht verstandene Weise gehemmt.

Bei Zapfen für längere Wellenlängen wird es komplizierter. Zunächst zu den Neuweltaffen: Auch bei Weibchen, deren X-Chromosomen zwei verschiedene Allele tragen, enthält trotzdem jeder Zapfen für längerwelliges Licht nur einen Pigmenttyp. Der Hintergrund dafür ist: Generell wird in weiblichen Zellen eines der beiden X-Chromosomen stillgelegt (durch so genannte X-Inaktivierung) – welches, entscheidet sich im Einzelfall in der frühen

Embryonalentwicklung in einem Zufallsprozess. Infolgedessen bildet jeweils ungefähr die Hälfte jener Zapfen entweder die eine oder die andere Pigmentsorte, und beide Zellsorten verteilen sich dicht gemischt auf der Netzhaut.

Bei den Altweltaffen genügt die Stilllegung eines X-Chromosoms allein nicht, denn jedes trägt ja zwei Gene für langwelliges Licht. Studien von einem von uns (Nathans) lassen ahnen, wie die Zelle eines der beiden Gene auswählt: Eine nahe gelegene DNA-Sequenz, als Locus-Kontrollregion bezeichnet, bestimmt darüber, wahrscheinlich schon während der Embryonalentwicklung. Die Locus-Kontrollregion steuert dann ausschließlich einen der beiden benachbarten Promotoren für diese beiden Gene an. So wird nur eines der Gene angeschaltet. Noch ist der Vorgang nicht in allen Einzelheiten erforscht, es scheint sich aber wiederum um ein Zufallsprinzip zu handeln.

Wenn diese Überlegungen stimmen, sollten bei Altweltaffen die beiden Zapfensorten für langwelliges Licht auf jedem kleinen Fleck der Netzhaut in einem Zufallsmuster verteilt sein. Untersuchungen von David R. Williams von der University

of Rochester (New York) und seinen Kollegen deuten genau hierauf hin, zumindest soweit sich die Zapfenverteilung mit derzeit verfügbaren Methoden erfassen lässt.

Unerwartet plastisches Gehirn

Und was geschieht weiter mit den Zapfensignalen? Studien zum neuronalen Hintergrund der Farbwahrnehmung bei Primaten sprechen dafür, dass sich bestimmte Mechanismen in Netzhaut und Gehirn höchst plastisch verhalten. Das betrifft die differenzierte Wahrnehmung von langwel-

ligem Licht. Zwar sind Schaltkreise vorgegeben, in denen Signale (visuelle Informationen) von Zapfen für kurzwelliges Licht pauschal mit Signalen verglichen werden, die von beiden Zapfentypen für den längerwelligen Bereich stammen. Aber wenn es um den Vergleich zwischen M- und L-Zapfen geht, scheinen Netzhaut und Gehirn mehr zu improvisieren. Genauer gesagt muss das visuelle System anscheinend erst aus der Erfahrung lernen, um welchen der beiden Typen es sich im Einzelnen jeweils handelt.

Überdies sieht es so aus, als ob der wichtigste Verrechnungsweg, der Informationen von diesen beiden Zapfentypen übermittelt, gar nicht allein für Farbensehen zuständig ist. Möglicherweise kam er zu dieser Aufgabe durch einen glücklichen Zufall. Den Rahmen dafür bot ein altes neuronales System für hochauflösendes räumliches Sehen. Es entwickelte sich, damit die Abgrenzungen von Gegenständen und ihre Entfernung vom Betrachter präzise wahrgenommen werden können. Wie John Mollon von der University of Cambridge deutlich machte, sind bei Primaten die Zapfen für langwelliges Licht zugleich für scharfes räumliches Sehen zuständig. Die Information wird sogar nach dem gleichen Prinzip verarbeitet wie bei der Farbwahrnehmung im langwelligen Bereich: Auch



FRAUEN MIT FARBENSINN?

Manche Frauen besitzen wegen einer Mutation in einem der Gene für den langwelligen Bereich sogar vier verschiedene Farbsehpigmente. Dadurch verschiebt sich die spektrale Empfindlichkeit der Netzhaut nachweislich. Ob diese Frauen mehr Farbtöne erkennen – also Tetrachromaten sind –, ist noch strittig.

beim räumlichen Sehen wird die Erregung eines M- oder L-Zapfens damit verglichen, wie stark seine vielen M- und L-Nachbarn durchschnittlich ansprechen. Bisher fanden die Neurophysiologen keinen eigenen Schaltkreis für dieses Farbensehen. Vielleicht ist überhaupt keiner notwendig. Dann wäre unser trichromatisches Sehen ein erfreuliches Nebenprodukt des genauen räumlichen Sehens.

Uns verführte das zu einem spannenden Experiment. Die Frage dahinter war: Konnte jenes frühe Affenweibchen, das erstmals zwei verschiedene Allele für langwelliges Licht besaß, damit überhaupt etwas anfangen? Vermochte das damalige Primatenhirn diese Informationsquelle gleich zu nutzen, ohne dass sich erst ein neuer Nervenschaltkreis entwickeln musste? Genügte also ein dritter Pigmenttyp, um dem Farbensehen eine weitere Dimension hinzuzufügen?

Das wollten wir an einem dichromaten Säugetier ausprobieren – an Labormäusen. Wir erstellten gentechnisch ein Maus-X-Chromosom, welches statt für das mauseige M-Pigment nun für ein menschliches L-Pigment kodierte. Somit gab es in der Zuchtpopulation jetzt zwei verschiedene

Allele (auf verschiedenen X-Chromosomen) für längere Lichtwellen, ähnlich wie wir es für frühe Primaten vermuten. Mäuse mit dem menschlichen Gen exprimierten dieses, wie sich zeigte, tatsächlich in Zapfenzellen der Netzhaut. Auch fanden wir, dass der von ihnen gebildete menschliche Sehfarbstoff Signale vergleichbar gut übermittelte wie das Maus-M-Pigment. Zudem nahmen die manipulierten Mäuse erwartungsgemäß ein breiteres Lichtspektrum wahr als ihre normalen Artgenossen.

Was würde geschehen, wenn ein Mausweibchen zwei verschiedene Allele besaß – wenn die Netzhaut ein Mosaik mit M- und L-Zapfen aufwies (weil mal das eine, mal das andere X-Chromosom ausgeschaltet war)? Benutzt solch ein Tier die beiden Zellsorten nur undifferenziert zum Sehen oder vermag es im langwelligen Bereich zwischen mehr Farben zu differenzieren? Kurz gesagt: Ja, die Maus sieht mehr Farben.

Es gelang uns, solche Mäuseweibchen darauf zu dressieren, grüne, gelbe, orange und rote Scheiben auseinanderzuhalten. Normale Mäuse lernen das nicht, denn für sie wirken die Scheiben völlig gleich. Mit dem L-Pigment erwarben die Tiere anschei-

nend eine zusätzliche Dimension des Sehens. Demnach ist das Sägerhirn offensichtlich fähig, auch neuartige, qualitativ andere Formen visueller Eindrücke auszuwerten.

Dieser Schluss hat einige Tragweite für unsere Vorstellungen zur Evolution von Sinnessystemen generell. Es könnte bedeuten, dass ein veränderter »Anfang«, ein veränderter »Eingang« eines Sinnessystems, die Evolution des gesamten Systems voranzutreiben vermag. Wenn Gene für Sinnesrezeptoren mutieren, schlägt der Effekt womöglich schnell durch. Vielleicht sah gleich das erste Affenweibchen mit zwei Pigmenten für langwelliges Licht die Welt in völlig neuen Farben.

(Spektrum Spezial Biologie – Medizin – Hirnforschung, 1/2014)

Jacobs, G. H.: Primate Color Vision: A Comparative Perspective. In: Visual Neuroscience 25, S. 619 – 633, 2008

Jacobs, G. H. et al.: Emergence of Novel Color Vision in Mice Engineered to Express a Human Cone Pigment.

In: Science 315, S. 1723 – 1725, 2007

Nathans, J.: The Evolution and Physiology of Human Color Vision: Insights from Molecular Genetic Studies of Visual Pigments. In: Neuron 24, S. 299 – 312, 1999

PSYCHOLOGIE

TRAURIGKEIT BEEINFLUSST DIE **FARBWAHRNEHMUNG**

von Daniela Zeibig

Wer Trübsal bläst, für den sieht die Welt sprichwörtlich grau aus. Nun zeigt sich: Traurige Menschen können tatsächlich Gelb- und Blautöne nicht mehr so gut erkennen.



Unsere Gemütslage verändert auch unsere visuelle Wahrnehmung – das konnten bereits in der Vergangenheit unterschiedliche

Studien zeigen. So führt etwa eine depressive Stimmung im Zweifelsfall dazu, dass wir Kontraste nicht mehr so gut wahrnehmen können. Wie Wissenschaftler um Christopher Thorstenson von der University of Rochester berichten, **beeinflusst sie aber offenbar auch unsere Fähigkeit, Farben zu erkennen**. Die Forscher bestellten insgesamt 127 Studenten in ihr Labor und zeigten ihnen entweder ein Comedy-Video, das die Stimmung der Probanden deutlich hob, oder einen traurigen Filmclip, der sie betrübt machte. Anschließend sahen die Teilnehmer nacheinander 48 Flecken, deren Farbton allerdings ein wenig gedämpft worden war, und mussten angeben, ob diese rot, grün, gelb oder blau waren.

Dabei entdeckten Thorstenson und sein Team, dass die Studenten nach dem traurigen Video schlechter dazu in der Lage waren, die Farben korrekt zu identifizieren – aber nur, wenn es um gelbe oder blaue Flecken ging. Bei Rot und Grün zeigten sich

keine Unterschiede. Ein weiterer Versuch mit 130 anderen Teilnehmern, bei dem die Kontrollgruppe keinen lustigen Film, sondern einen neutralen Bildschirmschoner zu sehen bekam, bestätigte das Ergebnis.

Wie genau dieser Effekt zu Stande kommt, wissen die Forscher noch nicht, dafür sind weitere Untersuchungen nötig. Sie vermuten aber, dass er etwas mit dem Neurotransmitterhaushalt der Probanden zu tun hat. So fanden einige Studien Hinweise darauf, dass bei Unterscheidungen im blauen und gelben Farbspektrum vor allem der Botenstoff Dopamin eine Rolle spielt. ↵

(Spektrum.de, 3. September 2015)

Psycho & Logisch

Experten berichten über die neuesten Erkenntnisse aus Psychologie, Hirnforschung und Medizin. Lernen Sie sich kennen – es lohnt sich!



Gehirn & Geist
Wissen ist Kopfsache.

JETZT TESTEN!



WAHRNEHMUNG

Gelb

sieht im Winter anders aus

von Lars Fischer

Die Wahrnehmung der Farbe Gelb orientiert sich wohl am Farbschema der Umwelt, nicht an der Physiologie des Auges.

Das menschliche Sehsystem nimmt die Farbe Gelb je nach Jahreszeit unterschiedlich wahr – zu diesem Schluss kommt die Forscherin Lauren Welbourne von der University of York anhand einer Untersuchung an 67 Männern und Frauen aus Großbritannien. **Demnach verschob sich deren Farbwahrnehmung jahreszeitlich systematisch um einen bestimmten Betrag.** Die Forscherin sieht darin einen Beleg, dass der Wert der Farbe Gelb anhand der Farbpalette in der Umgebung feinjustiert wird: Ursache seien die reichhaltigen Grüntöne im britischen Sommer. In anderen Regionen sähe die Farbwahrnehmung je nach den lokalen Jahreszeiten anders aus, spekuliert Welbourne.

Im Unterschied zu anderen Farben weisen Menschen unabhängig von Herkunft und anderen Faktoren reinem Gelb den gleichen Farbwert zu. Das Experiment bestand darin, die Versuchspersonen in einem schwach beleuchteten Raum einen Lichtfleck anhand eines Drehknopfes auf reines Gelb ohne eine Spur von Grün oder Rot zu lassen – wie sich zeigte, wichen die Durchschnittswerte je nach Jahreszeit von-

einander ab. Als Ursache vermuteten Fachleute schon lange, dass die Farbe Gelb nicht von der Physiologie des Auges bestimmt, sondern flexibel an der Umgebung justiert wird. Das Experiment von Welbourne und ihrer Arbeitsgruppe erhärtet nun diese Vermutung. ↪

(Spektrum.de, 5. August 2015)



Spektrum
der Wissenschaft

KOMPAKT

FÜR NUR
€ 4,99

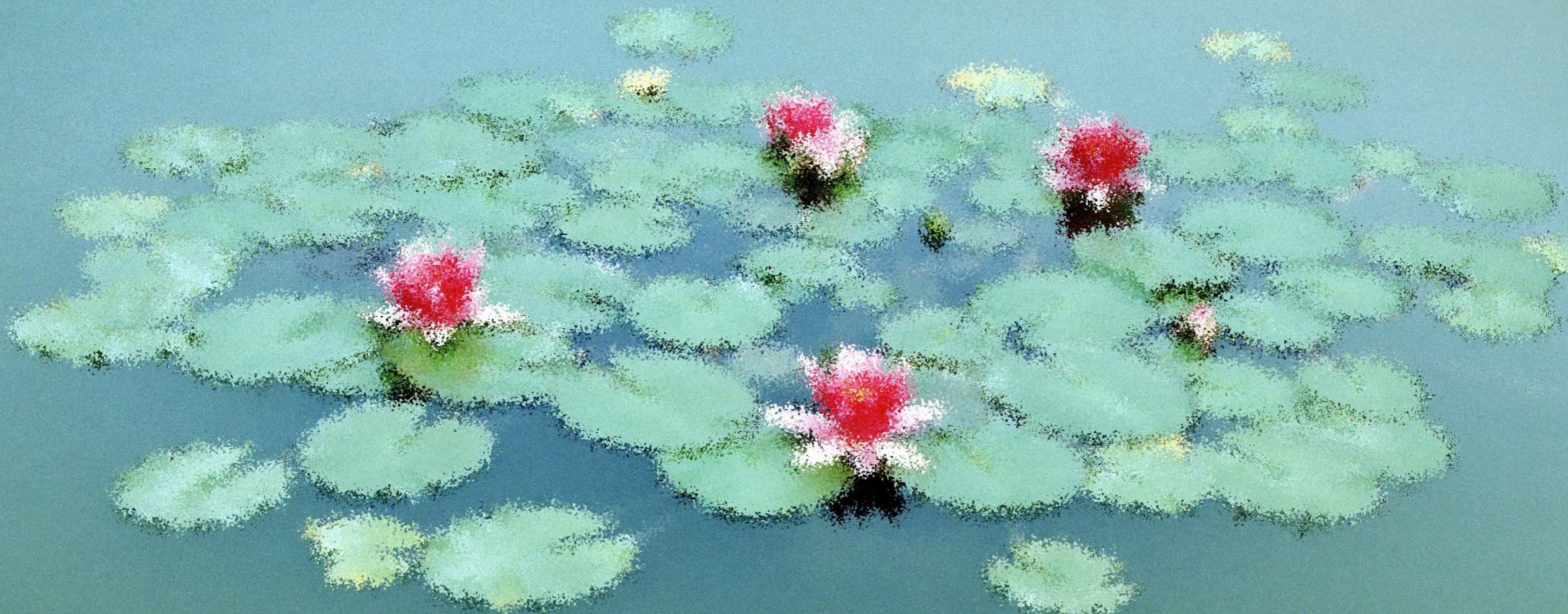
ACHTSAMKEIT UND EMPATHIE

Die Wissenschaft der Wertschätzung

Mindfulness | Der Wert des Augenblicks
Mitgefühl | Stress hemmt Sinne für andere
Meditation | Drei Wege ins Nirwana

HIER DOWNLOADEN

FOTOLIA / PSDESIGN1



PLASMONISCHE FARBE

So druckt man den kleinsten »Monet« der Welt

von Jan Dönges

Statt Pigmente erzeugen bei diesem Verfahren winzige Säulen den farbigen Eindruck. Dadurch lässt sich die Abbildung extrem verkleinern.

Forscher um [Joel Yang](#) von der Singapore University of Technology and Design haben ihr Verfahren, mit Hilfe winziger Säulen farbige Bilder zu erzeugen, drastisch verbessert: [Insgesamt 300 verschiedene Töne](#) können sie jetzt aufbringen. Ihre Reproduktion von Claude Monets berühmtem Bild »Impression, Sonnenaufgang« wirkt dadurch vergleichsweise originalgetreu – vor allem wenn man bedenkt, dass sie gerade einmal 0,3 Millimeter in der Breite misst.

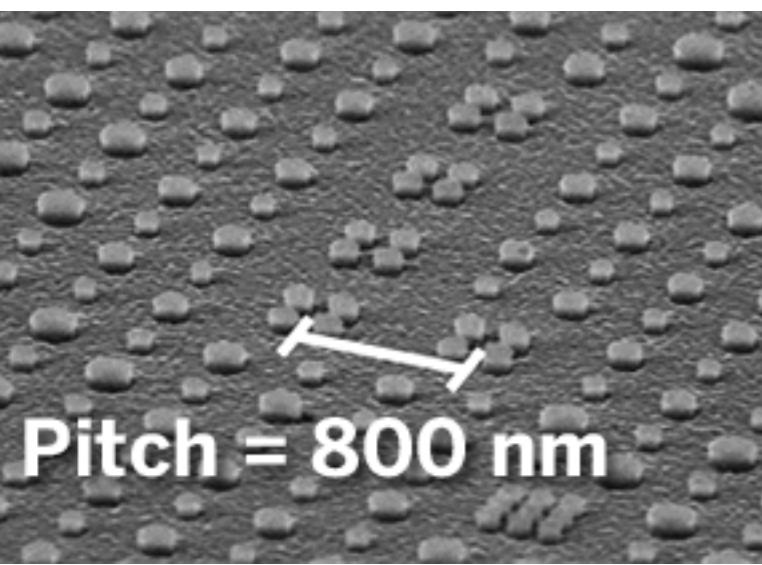
Die Pixel bei Yangs Verfahren bestehen aus wenigen Nanometer großen Siliziumsäulen, an deren Spitze die Forscher Aluminiumendkappen anbrachten. Treffen Photonen auf diese Kappen, lösen sie dort Vibrationen der Elektronen, so genannte

Plasmonen, aus, die dafür sorgen, dass nur noch Licht bestimmter Farbe zurückgestrahlt wird. Durch Variation der Säulen- ausmaße und deren geschickte Anordnung sowie Kombination gelang es den Forschern, eine 300 Farben umfassende Palette zusammenzustellen.

Hergestellt werden die Säulen mit Hilfe der Elektronenstrahl-Lithografie, was vergleichsweise aufwändig ist. Im Prinzip dürften die Strukturen jedoch auch mit Verfahren produzierbar sein, die sich für die Serienproduktion besser eignen, überlegen Yang und Kollegen. Die Haltbarkeit der Säulen wird mit »über sieben Monaten« angegeben. Für ihre Technik sehen die Wissenschaftler künftige Einsatzgebiete beispielsweise als Sicherheitsmerkmal bei Dokumenten oder Banknoten. Dafür müsste allerdings die Dauerhaftigkeit des Säulenarrangements noch stark verbessert werden. ↗

(Spektrum.de, 7. Juli 2014)

SÄULEN MIT HÜTCHE
Größe, Kombination und Anordnung der Säulen erzeugen die Farbigkeit eines Pixels. Vier der Säulen bilden zusammengenommen einen Bildpunkt.



TAN, S.J. ET AL.: PLASMONIC COLOR PALETTES FOR PHOTOREALISTIC PRINTING WITH ALUMINUM NANOSTRUCTURES. IN: NANO LETTERS 14, S. 4023–4029, 2014, FIG. 5E



TAN, S.J. ET AL.: PLASMONIC COLOR PALETTES FOR PHOTOREALISTIC PRINTING WITH ALUMINUM NANOSTRUCTURES. IN: NANO LETTERS 14, S. 4023–4029, 2014, FIG. 1

MONET AUF 300 MIKROMETERN
Die Pixel dieses Bilds bestehen ursprünglich aus wenigen Nanometer großen Säulen. Schwingungen der Elektronen in den Säulen reflektieren selektiv das Licht und erzeugen so den farbigen Eindruck.



OPTISCHER EFFEKT

Schönheit

im Auge des Betrachters

von H. Joachim Schlichting

Manche farbenprächtige Erscheinung lässt sich nur beschreiben, jedoch nicht direkt fotografieren – denn sie entsteht erst in unserem Sehorgan selbst.

Als ich vor einiger Zeit mit noch künstlich geweiteten Pupillen von einer Untersuchung beim Augenarzt kam, blendeten mich helle Lichtquellen fast schmerzlich. Der einzige Trost in dieser Situation war die Schönheit eines hellen Lichthofs mit einem regenbogenartigen Band um sie herum. So etwas war mir bislang nur im Dunkeln beim Blick auf ferne Leuchtpunkte begegnet.

Die seltsame Erscheinung unterscheidet sich von den bekannten farbigen Ringen, die man zuweilen sieht, wenn man durch eine beschlagene Fensterscheibe eine Laterne betrachtet. Dieses Phänomen verursachen winzige Wassertröpfchen zwischen Lampe und Auge, die das Licht beugen. Auch beim Blick durch dünne Schleierwolken auf Sonne und Mond können solche Farbkreise auftauchen, die Koronen heißen.

Hier allerdings füllte der farbige Hof die ganze Fläche um ein helles Zentrum. Es befand sich auch nichts zwischen Lichtquelle und Auge, was ich für den Effekt hätte verantwortlich machen können. Das zeigte ein einfacher Trick: Ich blickte mit einem Auge auf die ferne Laterne und blendete sie –

nicht aber den verbleibenden Teil des umgebenden Lichthofs – mit dem Finger meines ausgetreckten Arms aus. Sobald das eigentliche Leuchten abgedeckt war, verschwand schlagartig auch der Regenbogenkranz. Das Phänomen musste also etwas sein, was mit meinen Augen zu tun hatte und was nur bei weit geöffneten Pupillen auftritt.

Augenheilkundler erkannten schon gegen Ende des 19. Jahrhunderts den Effekt von ringförmig angeordneten, radial orientierten Zellfasern, die bei der Bildung der Augenlinse entstehen und an ihrem äußeren Rand liegen. Die Gewebestrukturen wirken wie ein optisches Gitter, welches das Licht einer weit entfernten und daher fast punktförmigen Quelle beugt. Die gebogenen Wellen überlagern sich auf der Retina zu einem farbigen Bogen, dem so genannten Linsen-Halo. Tagsüber wirkt dieses Gitter nicht, weil dann die klein gestellte Pupille die Augenlinse vom Rand her abdeckt. Daher sieht man den Halo nur bei Dunkelheit – oder wenn die medikamentös erweiterte Pupille das Beugungsgitter freigibt.

Dieser Linsen-Halo ist aber nur ein Teil dessen, mit dem sich sehr helle Lichtquel-

»Alles, was wir
sehen, könnte auch
anders sein«

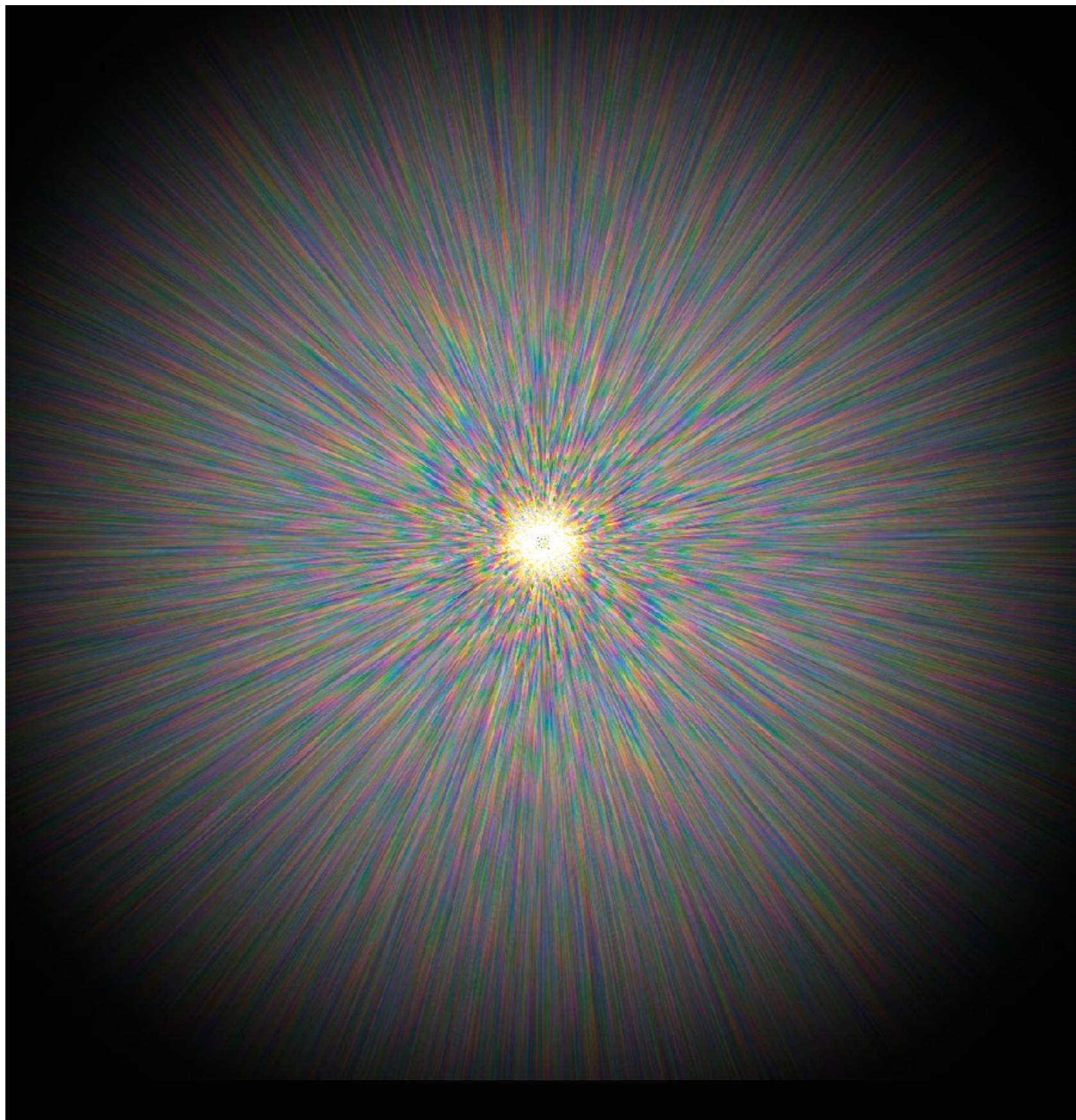
[Ludwig Wittgenstein (1889-1951)]

len zu schmücken scheinen. Wesentlich stärker noch machen sich farbig irisierende Strahlen bemerkbar, die vom Zentrum der Lichtquelle radial nach außen gehen. Man kann sie auch am Tag sehen, etwa dann, wenn man in eine helle Halogenlampe oder LED blickt.

Bunte Nadelstreifen aus dem Inneren der Linse

Dieses Phänomen erwähnte bereits René Descartes (1596–1650). Es wird heute als Ziliar-Korona bezeichnet und wird nach neueren Erkenntnissen vermutlich von kleinen Teilchen verursacht, die in der Augenlinse eingelagert sind. Sie wirken ähnlich wie die winzigen Wassertröpfchen bei einer Sonnen- oder Mondkorona. Anders als dort ergeben sich hier aber keine Ringe, sondern in der Farbe variierende radiale Strahlen. Wie kommt es dazu? Im Normal-

KORONA UM EINE ENTFERNTEN LICHTQUELLE
So in etwa sieht die Korona um eine entfernte Lichtquelle durch weit gestellte Pupillen aus.
Das Bild ist das Ergebnis einer Computersimulation, denn fotografieren lässt sich dieser subjektiv wahrgenommene Effekt nicht.





BLICK DURCH EINE BESCHLAGENE FENSTERSCHEIBE AUF EINE STRASSENLATERNE

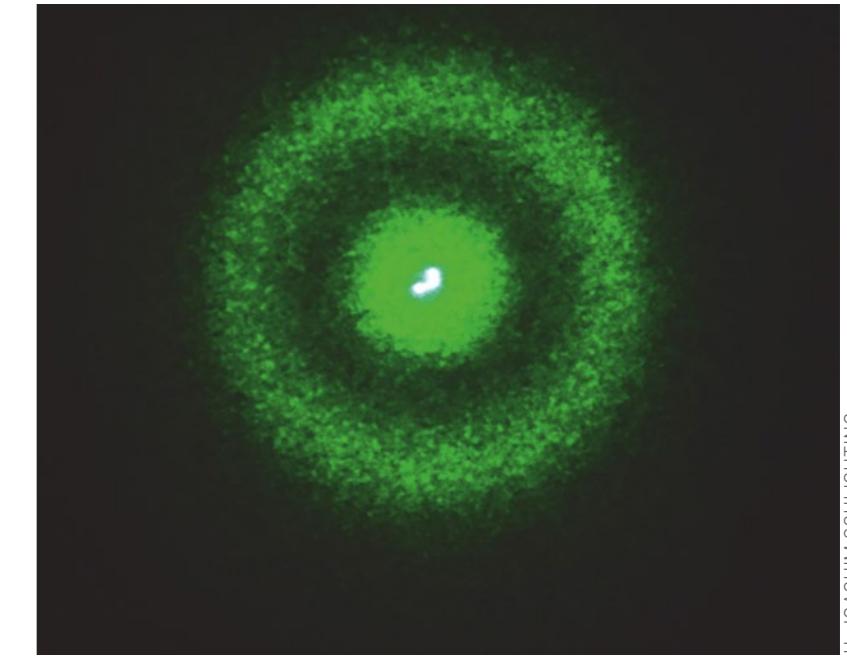
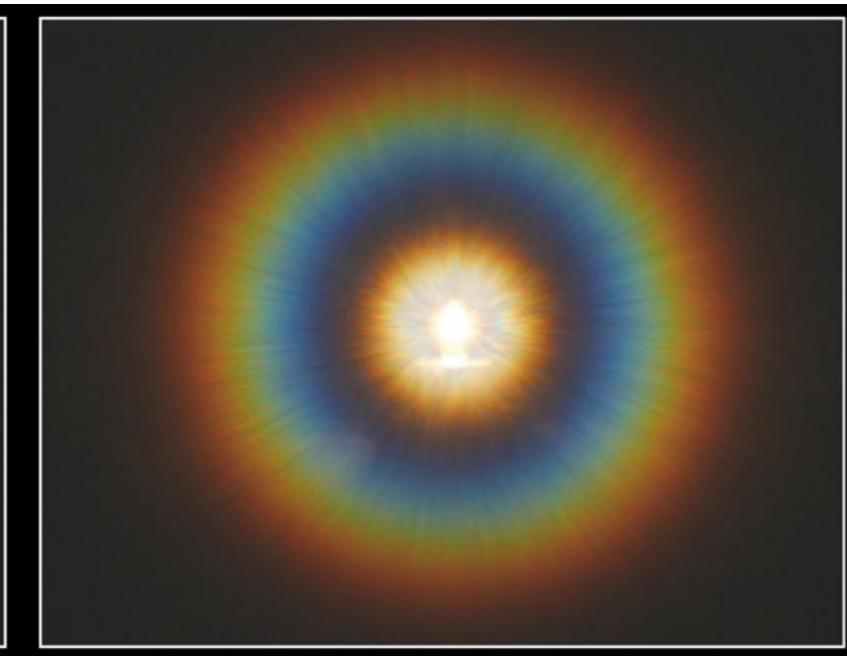
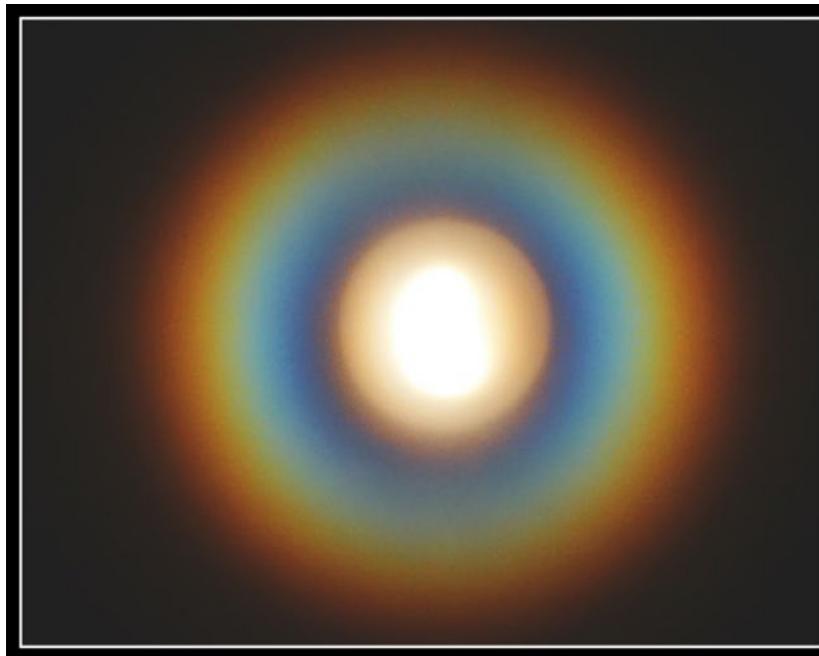
fall ist die Ziliar-Korona nicht besonders lichtstark. Um sie dennoch eingehender zu untersuchen, lässt sich die Zahl der beugenden Teilchen künstlich vergrößern. Dazu muss man nur durch eine geeignete Folie für Tintenstrahldrucker blicken. Denn manche Fabrikate enthalten kleinste Teilchen, die einen ähnlichen Beugungseffekt bewirken wie die Wassertröpfchen einer dünnen Wolke oder die Partikel in unserem Auge.

Haben wir es mit einer ausgedehnten Lichtquelle zu tun, sehen wir die typischen Farbringe einer Korona. Beispielsweise funktioniert das bei einer matten Glühlampe bis zu einer Entfernung von etwa acht Metern. Dieser Abstand entspricht bei einer Größe des Leuchtkörpers von rund vier Zentimetern einem Sehwinkel von zirka 0,3 Grad. Erscheint er bei größerer Entfernung unter kleinerem Winkel, fransen diese Ringe immer mehr aus und gehen schließlich in eine Strahlenstruktur über. Diese tritt offenbar nur unterhalb von 0,3 Grad auf und ist umso ausgeprägter, je kleiner der Sehwinkel wird. Daher kann man bei Sonne und Mond, die am Himmel unter 0,5 Grad erscheinen, keine Strahlen in der Korona sehen. Bleibt zu klären, was diesen Unterschied bewirkt.

Um farbige Ringe hervorzurufen, genügt im Prinzip ein einziger winziger Wassertropfen. Er beugt das Licht und zerlegt es in viele Teilwellen, die je nach ihrer Wellenlänge in leicht verschiedene Richtungen laufen. Auf der Netzhaut des Auges oder auf dem Chip einer Kamera überlagern sie sich. Es muss nicht unbedingt ein Tropfen sein – ein Loch vom selben Querschnitt ruft ein ganz ähnliches Farbmuster



DURCHSTRAHLEN EINES WINZIGEN LOCHS EINER PUNKTLICHTQUELLE
Dieses farbige Ringsystem entstand in einem Freihandexperiment beim Durchstrahlen eines winzigen Lochs mit weißem Licht einer Punktlichtquelle.



ZILIAR-KORONA

Der Effekt einer Ziliar-Korona, nachgestellt durch eine Druckerfolie. Bei einem großen Sehwinkel ergeben sich verschwommene Farbringe (links), bei einem kleinen zerfallen sie in einzelne radiale Strahlen (rechts).

hervor. Piekst man über einer festen Unterlage mit einer spitzen Nähnadel in eine Haushaltsalufolie und blickt durch die einzige Öffnung auf eine Punktlichtquelle, umgibt diese ein solches Ringsystem.

Jeder Tropfen beziehungsweise jedes Streuzentrum erzeugt ein eigenes ringförmiges so genanntes Beugungsscheibchen, das sich mit den anderen überlagert. Bei den ausgedehnten Lichtquellen wie Sonne

und Mond addieren sich dabei nur die Farben, so dass lediglich deren Intensität zunimmt. Im Fall eines kleineren Winkels hingegen ist das Licht immer noch weitgehend kohärent, was bedeutet, dass die einzelnen Wellen beim Betrachter abermals interferieren können. Dadurch wird das Beugungsscheibchen feiner strukturiert. Mit Hilfe von kohärentem Laserlicht kann man diese Details zumindest einfarbig sichtbar machen. Auf dem Schirm zerfällt dann das ringförmige Beugungsbild in ein granuläres Muster.

Bei weißem Licht werden die verschiedenen Wellenlängen mehr oder weniger stark vom Zentrum des Ringsystems weg beziehungsweise zum Mittelpunkt hin abgelenkt. Die körnigen Lichtflecke spreizen sich

BEUGUNGSBILD EINES EINFARBIGEN LASERS

Das Beugungsbild eines einfarbigen Lasers wird körnig, wenn die gebeugten, aber immer noch kohärenten Teilwellen sich im Auge oder auf dem Kamerachip erneut überlagern.

also in radialer Richtung. Das führt schließlich zu den schillernden Farbstrahlen, die wir bei einer Ziliar-Korona sehen. ↗

(Spektrum der Wissenschaft, 8/2015)

Van den Berg, T. et al.: The Ciliary Corona: Physical Model and Simulation of the Fine Needles Radiating from Point Light Sources. In: Investigative Ophthalmology & Visual Science 46/7 2627 – 2632, 2005



SIMULTANKONTRAST

Eingebildete **FARBEN**

von H. Joachim Schlichting

Weil unser visuelles System uns
gerne weiße Wände vorgaukelt,
kommen gelegentlich unerwartete
Farben zum Vorschein.

Sie sind doch Physiker, Sie können uns sicher helfen!«, hieß es, als ich jüngst zu Besuch in einem Verlag war. Die Redakteure waren gerade in ein neues Gebäude umgezogen und konfrontierten mich mit einem unerwarteten Problem. Die Bildschirme ihrer Computer wiesen einen schwachen Orangeschimmer auf, der sich einfach nicht beseitigen ließ. Man habe bereits die Techniker kommen lassen, doch die hätten versichert, dass alles in Ordnung sei. Ein Rätsel!

Kurz zuvor war ich vor einem ähnlichen Problem gestanden. Ich hatte nach einer Methode gesucht, Studierenden einen anschaulichen Zugang zu Kegelschnitten zu verschaffen, und dazu eine Kerze in ein Wasserglas gestellt, das ich dann vor einer weißen Wand plazierte. Das Glas war grün gefärbt, damit es das Licht ein wenig dämpfte. Die kleine Kerzenflamme sandte ihr Licht radial in alle Richtungen aus. Aus diesem Lichtkontinuum schnitt der obere Rand des Glases einen auf der Spitze stehenden Kegel heraus, der von ungefiltertem weißem Licht erfüllt war. Dort, wo dieses auf die Wand traf, hinterließ es eine hyperbelförmige Aufhellung. Das restliche

Licht, grün gefärbt und stark gedämpft, erreichte die übrige Wand und den Tisch.

Dass die hyperbelförmige Aufhellung von dunkleren und helleren Streifen begrenzt erscheint, ist leicht einsichtig. Wie eine Sammellinse fokussiert die Krümmung des Glasrands nämlich einen Teil des Lichts und lenkt ihn ein wenig nach unten ab. Dort entstehen helle Streifen. An anderer Stelle fehlt dieses Licht hingegen, so dass dort dunkle Streifen auftauchen. Auch warum die Kerzenflamme weiß erscheint, obwohl sie durch das grüne Glas hindurchstrahlt, ist schnell erklärt. Hier spielt die so genannte Irradiation hinein, auch »Blooming« genannt. Bei Intensitäten, die im Vergleich zur übrigen Szenerie sehr hoch sind, können unsere Augen – ebenso wie Kamerasensoren – Farben nicht mehr unterscheiden.

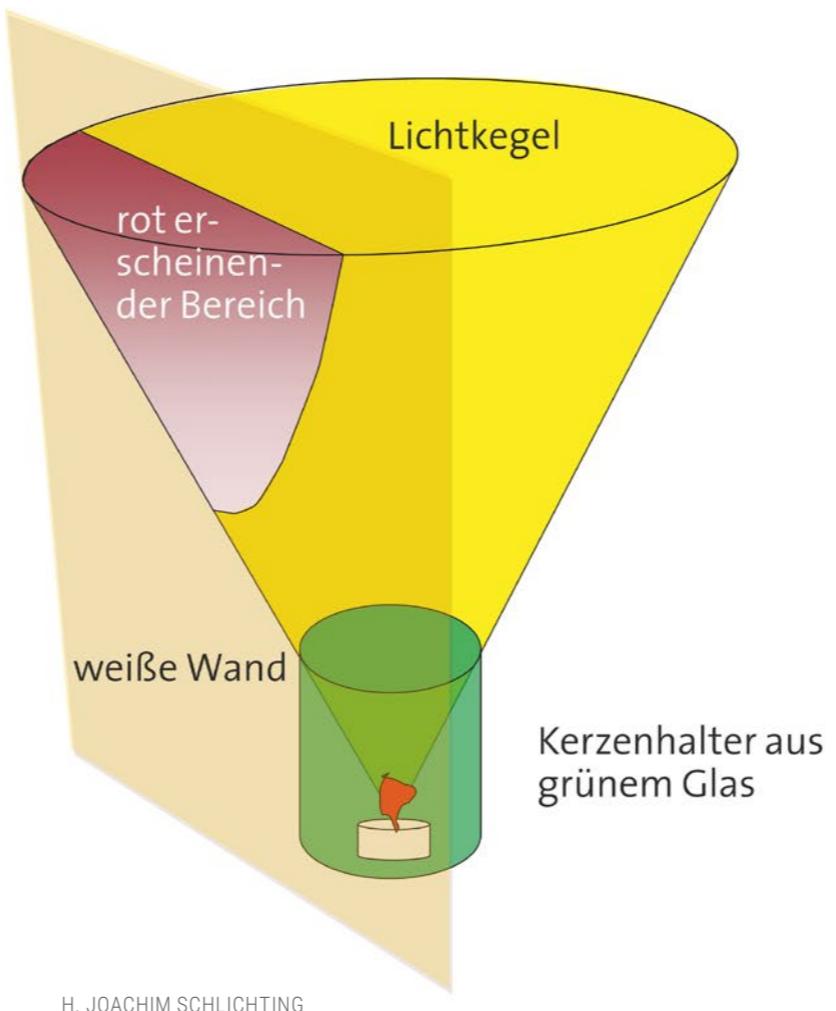
Einen zufällig hinzukommenden Kollegen fesselte hingegen ein ganz anderes Phänomen. Sollte er wirklich an der Unbestechlichkeit seiner eigenen Augen zweifeln? Denn die »weiße« Wand erschien just in dem Bereich rötlich, der durch reines, ungefiltertes weißes Kerzenlicht ausgeleuchtet wurde! Das war in der Tat überraschend. Er war indessen nicht der Erste, den

»Dass man alles grünlich sieht, wenn man lange durch ein rotes Glas gesehen, und umgekehrt, rötlich, wenn man lange durch ein grünes gesehen hat, ist ein merkwürdiger Umstand«

[Georg Christoph Lichtenberg
(1742 – 1799)]



H. JOACHIM SCHLICHTING



H. JOACHIM SCHLICHTING

das Phänomen verblüffte. Ein verwandtes Experiment mit ebenfalls »merkwürdigem« Ergebnis beschrieb schon Georg Christoph Lichtenberg, der erste deutsche Professor für Experimentalphysik, in den oben zitierten Zeilen. Auch Lichtenbergs Zeitgenossen Graf Rumford (1743–1814) beschäftigte der Effekt. 1794 beleuchtete dieser ein zylinderförmiges Objekt mit dem Licht zweier Kerzen, so dass die entstehenden Schatten auf ein weißes

Blatt Papier fielen. Als er vor eine der Kerzen einen Gelbfilter hielt, tönte sich der von der anderen Kerze geworfene Schatten wie erwartet gelblich. Doch der ungefärbte Schatten, den die nun gelb leuchtende Kerze warf, erschien auf einmal bläulich.

Erhellender Blick in die Röhre

Die Verblüffung der Beteiligten ist verständlich, schließlich treten Farben auf, die objektiv gar nicht vorhanden sind. Rum-

OPTISCHE TÄUSCHUNG

Wo das Licht der Kerzenflamme direkt auf die weiße Wand fällt, erscheint uns diese überraschenderweise rötlich. Die optische Täuschung zeigt sich auch auf Fotografien, denn Kameras, zumindest wenn sie im Automatikmodus arbeiten, »verschieben« ein allzu grünes Bild ebenfalls in Richtung der Komplementärfarbe Rot. Ursprünglich sollte das Experiment Studierenden anhand der Kontur, die in der Schnittebene von Wand und Lichtkegel entsteht, die Entstehung einer Hyperbel vorführen.

ford überzeugte sich davon mit einem einfachen Hilfsmittel: Er betrachtete den vermeintlich bläulichen Schatten durch ein Rohr – und schon verschwand die Färbung.

Dieses auch als Simultankontrast bekannte Phänomen hat einen physiologischen Hintergrund. Betreten wir etwa ein grün erleuchtetes Zimmer, reduziert sich die Empfindlichkeit der für die Grünwahrnehmung zuständigen Zapfen unserer Augen im Verhältnis zur Empfindlichkeit des

Auges für die anderen Farbanteile. Anschaulicher gesagt: Unser visuelles System »möchte« eine vermeintlich weiße Wand als möglichst weiß wahrnehmen. Infolge dieser chromatischen Adaption erscheinen uns die grünen Wände daher weniger grün, als sie »in Wirklichkeit« sind. Noch auffälliger ist der Effekt, wenn man aus dem grün erleuchteten Raum heraus in ein weiteres Zimmer blickt, dessen Wände weiß sind. Auch deren Grünanteile nehmen wir dann vermindert wahr und sehen stattdessen Rot, die Komplementärfarbe von Grün. Komplementärfarben ergänzen sich in der Mischung zu Weiß. Umgekehrt bleibt die Komplementärfarbe übrig, wenn man eine gegebene Farbe von Weiß »abzieht«.

Bei meinem Verlagsbesuch hatte ich all diese Überlegungen zum Glück noch frisch im Gedächtnis. Was also, wenn die Bildschirme in der Redaktion aus demselben Grund orange leuchteten, wie die Wand im Kerzenversuch rot erscheint? Dann müsste die weiße Wand einen Farbstich in der Komplementärfarbe dieses Orangetons haben, also ins Bläuliche changieren. Versuchsweise schlug ich vor, die Fenster zu öffnen – und tatsächlich flog die optische

Täuschung sofort auf. Zunächst erschien uns die gesamte Umgebung in unnatürlichen Farben. Doch baldstellten sich unsere Augen um, und wir entdeckten, dass die Scheiben mit einer bläulich schimmenden Beschichtung versehen waren. Sie hatte auch die Zimmerwände bläulich gefärbt. Weil der Blauschimmer jedoch nur schwach war, war unserem visuellen System die Täuschung perfekt gelungen: Die Wände erschienen trotzdem weiß. Nur die Computermonitore hatten plötzlich einen Farbstich ...

Der Simultankontrast besitzt schon in Goethes Farbenlehre, die physikalischen und physiologischen Aspekten einen ähnlich hohen Rang beimisst, große Bedeutung. Auch in der modernen Malerei und Lichtkunst spielt er eine wichtige Rolle, weil er in verschiedenen Farbumgebungen den Gesamteindruck eines Werks maßgeblich verändern kann. So schuf der Lichtkünstler James Turrell 2009 im Kunstmuseum Wolfsburg einen riesigen begehbaren Raum mit changierender Beleuchtung, der seine Besucher ebenso sehr beeindruckte wie irritierte. Über eine abwärtsführende Rampe betrat man das violett erleuchtete Zimmer und blickte an dessen

Ende durch eine große, rechteckige Öffnung in einen weiteren hellen Raum. Wie der Simultankontrast den Gesamteindruck beeinflusst, bleibt zwar das Geheimnis des Künstlers. Dass er aber eine erhebliche Rolle spielt, merkt man spätestens, wenn man sich draußen wieder an die alten Farbverhältnisse gewöhnen muss.

Mit ein wenig Glück erlebt man den Effekt übrigens auch ohne experimentelle Vorkehrungen. Wer bei Mondlicht an einer gelb leuchtenden Straßenlaterne vorübergeht, wird entdecken, dass der von der Laterne hervorgerufene eigene Schatten leicht ins Bläuliche changiert. Gelegentlich reicht es sogar, sich ans Fenster zu stellen. Denn der aufmerksame Beobachter wird schnell bemerken: Schon wenn der Mond mit dem Licht einer Glühbirne konkurriert, darf man seinen eigenen Augen nicht mehr vorbehaltlos trauen.

(Spektrum der Wissenschaft, 11/2011)

Schlichting, H. J.: Lichtkegel und Schattenhyperbeln.

In: MNU 56/6, S. 348 – 350, 2003





A E p H K A Q
E y @ l U \$ &
y @ l P O S B f

SYNÄSTHESIE

Mit den Ohren sehen

von Jeffrey Gray

Manche Menschen sehen unwillkürlich Farben, wenn sie bestimmte Worte hören. Inzwischen kennt man die biologischen Grundlagen dieser erstaunlichen Gabe: Normalerweise getrennt verlaufende sensorische Bahnen sind miteinander verschaltet.

In seinem Gedicht beschwört Arthur Rimbaud (1854-1891) ein Phänomen, das die Literaten seiner Zeit liebten: die Synästhesie. Der Begriff stammt aus dem Griechischen und bedeutet gleichzeitiges Empfinden, gebildet aus »syn« und »aisthesis«. Bei Menschen mit diesem besonderen Talent ruft eine sensorische Stimulation nicht nur in »ihrem« Sinneskanal einen Eindruck hervor, sondern systematisch auch immer in einem zweiten.

Dabei sind bei jedem Synästhetiker verschiedene Sinne beteiligt. In einem Fall lassen beispielsweise Klänge oder Wörter farbige visuelle Empfindungen entstehen, in einem anderen hat ein Geschmack eine »Form« oder eine Farbe einen charakteristischen »Geruch«. Auch Schmerzen oder ein Orgasmus können dazu führen, dass ein Synästhetiker Farben wahrnimmt. Am häufigsten kommt die Form der Synästhesie vor, bei der Wörter oder Zahlen in geschriebener oder gesprochener Form Farben erscheinen lassen. Dabei stimmen zwei Personen nie darin überein, »welche Farbe sie mit demselben Wort assoziieren«, wie der britische Arzt und Naturforscher Francis Galton, einer der Wegbereiter der

modernen Psychologie, bereits 1907 bemerkte.

Synästhetiker machen nur einen kleinen Teil der Bevölkerung aus. Wahrscheinlich ist etwa eine von 2000 Personen mit dem Talent ausgestattet, allerdings gehen die Schätzungen weit auseinander. Es gibt rund sechsmal mehr weibliche Synästhetiker als männliche, und oft findet man in derselben Familie mehrere befähigte Personen. Das war auch Galton aufgefallen, und er kam zum Schluss: »Diese Tendenz ist stark von der Vererbung abhängig.« Wie man heute weiß, wird die Mischsinnigkeit sehr wahrscheinlich über die Mutter weitervererbt.

Alle Synästhetiker berichten, ihre Erfahrungen mit den außergewöhnlichen Sinnesindrücken reichten so weit zurück, wie sie sich erinnern können. Auch wenn manche Betroffenen nicht darüber zu sprechen wagen, empfinden viele ihre Gabe als positiv. Andere wiederum behaupten nur, sie seien Synästhetiker. Vor allem Künstler wie Maler, Schriftsteller und Musiker geben oft an, sie gehörten zu dieser Gruppe – nur dass es sich dabei meist um Männer handelt, obwohl die weit überwiegende Anzahl der Synästhetiker Frauen sind! Rimbaud

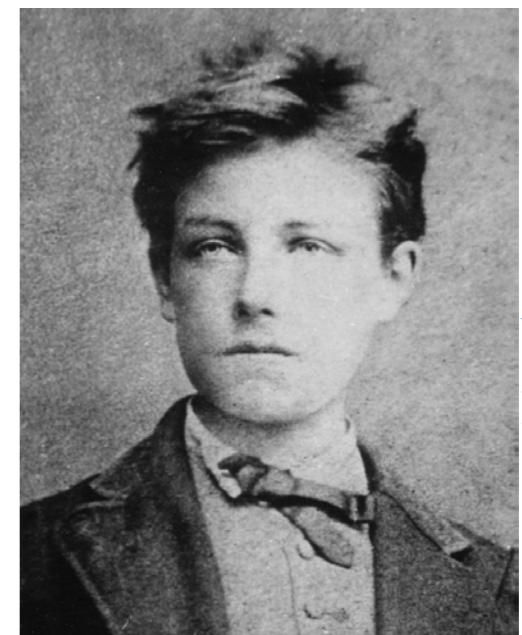
**A schwarz E weiß I rot U grün
O blau – vokale Einst werd
ich euren dunklen ursprung
offenbaren:**

A: schwarzer samtiger panzer dichter
mückenscharen Die über grausem stanke
schwirren · schattentale.

E: helligkeit von dämpfen und gespannten
leinen · Speer stolzer gletscher · blanker
fürsten · wehn von dolden.

I: purpur ausgespienes blut gelach der
Holden Im zorn und in der trunkenheit der
peinen ...

Les voyelles (Die Vokale), von Arthur Rimbaud
Übertragung von Stefan George



MARCELO NOAH / ARTHUR RIMBAUD [1872] – FOTO DE ÉTIENNE CARJAT / CC BY 2.0

ARTHUR RIMBAUD

Vorgaukeln zwischen Sinnessystemen

- 1 So genannte Synästhetiker empfinden bei manchen Wahrnehmungen zugleich »unpassende« Eindrücke, die zu einem anderen Sinn gehören, etwa Farben, wenn sie Töne hören.
- 2 Diese Fähigkeit kann man nicht erlernen. Vielmehr entsteht in der frühen Entwicklung eine sonst nicht vorhandene neuronale Verbindung zwischen den betreffenden Hirnregionen.

war trotz seines wunderbaren Gedichts keiner; er suchte nur nach besonders aussagekräftigen Assoziationen.

Natürlich gibt es unter Künstlern auch echte Synästhetiker, wie den russischen Romanautor Vladimir Nabokov. Die Malerin Carol Steen beispielsweise, Präsidentin der US-amerikanischen Vereinigung der Synästhetiker, setzt ihre Erfahrungen exzellent in Bilder um.

Zahlreiche Erfahrungsberichte und Untersuchungen Betroffener haben inzwischen klar gezeigt, dass es sich bei der Verschmelzung der Sinne keineswegs um eine dichterische Erfindung oder eine Ausgeburt der Fantasie handelt. Vielmehr haben wir es mit Sinneserfahrungen zu tun, die einem gewöhnlichen Menschen völlig fremd sind. So geht bei einem »geborenen Synästhetiker« beispielsweise die Verbindung von Wörtern und Farben weit über die Art und Weise hinaus, in der andere Menschen entsprechende Sinneseindrücke »assoziiieren«. Bei ihm verfärbt sich das Gesichtsfeld tatsächlich rot, wenn er etwa das Wort »Treppe« hört, oder gelb, wenn er »Freiheit« vernimmt. Offensichtlich mischen und überlagern sich hier verschiedene Ebenen des Bewusstseins.

Im Jahr 1993 konnten Simon Baron-Cohen und seine Kollegen vom Institut für Psychiatrie des King's College London nachweisen, dass Synästhetiker zuverlässig immer dieselben Wörter und Farben miteinander verknüpfen. Sie lasen Versuchspersonen eine Liste mit Begriffen vor und batte sie, die jeweils zugehörigen Farben zu beschreiben. Bei einer Wiederholung des Versuchs ein Jahr später ordneten die Versuchspersonen diesen Worten immer noch dieselben Farben zu. Dabei wussten sie beim ersten Mal nicht, dass sie erneut getestet würden, und keiner von ihnen hatte versucht, sich die Worte oder die Farben zu merken.

In einem anderen Versuch präsentierten Vilayanur Ramachandran und Edward Hubbard von der University of California in San Diego ihren Probanden eine Ansammlung aus lauter Zweien und Fünfen, und zwar in einer Schriftart, in der die zwei das Spiegelbild der fünf darstellen. Die Fünfen waren weit in der Überzahl und bildeten eine Art homogenen Hintergrund. Die wenigen Zweien in dem Zahlenfeld waren so angeordnet, dass sie ein Dreieck formten. Nichtsynästhetiker hatten Schwierigkeiten, die Formation der Zweien zu entde-

cken. Anders dagegen Synästhetiker, die Zahlen und Buchstaben farbig wahrnehmen und dabei Zweien und Fünfen in verschiedenen Tönungen empfinden: Sie sehen augenblicklich das für sie farbige Zahlendreieck aus einem andersfarbigen Hintergrund herauspringen.

Versuche wie diese bestätigten jedenfalls eindeutig, dass Synästhesie ein reales Phänomen des menschlichen Bewusstseins darstellt. Es ging also nunmehr darum, mit Hilfe moderner bildgebender Verfahren zu untersuchen, in welcher Weise sich die Verschmelzung der Sinne im Gehirn niederschlägt. Diese Verfahren ermöglichen es, ihm sozusagen bei der Arbeit zuzusehen. So lässt sich beispielsweise herausfinden, welche Bereiche bei einer bestimmten Denk- oder Wahrnehmungsaufgabe in Aktion treten.

ERSCHEINUNGSBILD EINES KREUZWORT-RÄTSELS FÜR SYNÄSTHETIKER

Ein Synästhetiker empfindet bestimmte Wörter als farbig. Für ihn erscheint ein schwarz-weißes Kreuzworträtsel ganz bunt. Dabei verfügt jeder Synästhetiker über seinen eigenen Wort-Farb-Kode, der von bestimmten Verknüpfungen in seinem Gehirn abhängt.



1995 beobachteten Eraldo Paulesu und sein Team an der Abteilung für funktionelle Bildgebung der Wellcome-Laboratorien in London die Hirnaktivität von Synästhetikern, denen man eine Liste von Wörtern vorsprach. Die Beispiele waren so gewählt, dass sie bei den Synästhetikern Farbempfindungen hervorriefen, während sie bei gewöhnlichen Menschen allenfalls Assoziationen zu einigen dieser Farben weckten. Die Hirnaktivität wurde mit der so genannten Positronenemissionstomografie (PET) erfasst. Resultat: Bei den Synästhetikern – und nur bei diesen – wurde die Sehrinde aktiviert, genauer die Assoziationsregionen des visuellen Systems, also die »höchsten« Instanzen, wo die verschiedenen optischen Informationen integriert werden.

Die Psychologen Peter Grossenbacher und Chris Lovelace von der Naropa University in Boulder (Colorado) sehen darin ein Indiz für ihre Hypothese zur Entstehung synästhetischer Wahrnehmungen: In visuellen Netzwerken »höherer Ordnung« werde eine sonst unterdrückte Rückkopplung zu einem der Verarbeitungswege aktiv, der dann eine konkurrierende Repräsentation im neuronalen Netzwerk erzeuge.

Am Londoner Institut für Psychiatrie haben wir weitere bildgebende Experimente mit solchen Synästhetikern durchgeführt. Dabei verfuhren wir praktisch genauso wie das Team von Paulesu, bedienten uns jedoch der funktionellen Magnetresonanztomografie (fMRT), da sie eine bessere zeitliche und räumliche Auflösung hat. Das Verfahren ist auch als funktionelle Kernspintomografie bekannt. Wir achteten darauf, unsere Testgruppen homogen zusammenzusetzen. Sie umfassten jeweils nur Frauen, gleich viele Links- und Rechtshänderinnen, und alle verfügten über eine ähnliche verbale Intelligenz. Die Probandinnen hörten eine Reihe von Wörtern und sinnlosen Lauten, und wir verglichen die hierbei gemessene Hirntätigkeit mit der Aktivierung des Gehirns durch reale Farben. Letztere wird durch einen Standardtest mit einem bunten Patchwork aus Rechtecken unterschiedlicher Größe erfasst, wie in den Gemälden von Piet Mondrian (1872–1944). Um die gesamte Farbkomponente der Wahrnehmung zu extrahieren, lässt man Versuchspersonen einmal solche »Mondriane« betrachten, ein andermal gleiche, aber schwarz-weiße Motive.

Kann man Synästhesie lernen?

In einer Hinsicht kamen wir zum selben Ergebnis wie Paulesus Team: Die Wörter mobilisierten bei den Synästhetikerinnen das visuelle System, bei der Vergleichsgruppe dagegen nicht. Die von uns beobachtete Aktivierung entsprach jedoch einem früheren Schritt bei der Verarbeitung der Seheindrücke. Das betreffende Areal ist für die Analyse von Farben an sich zuständig. Es umfasst einen Teil der so genannten fusiformen Windung, bekannter unter der Bezeichnung V4- oder V8-Region. Dies stärkte nun die Hypothese, dass die synästhetischen Farbempfindungen gleich zu Beginn des entsprechenden Verarbeitungsprozesses entstehen. Außerdem bekräftigte der Befund, dass es sich um eine wirkliche Wahrnehmung handelt.

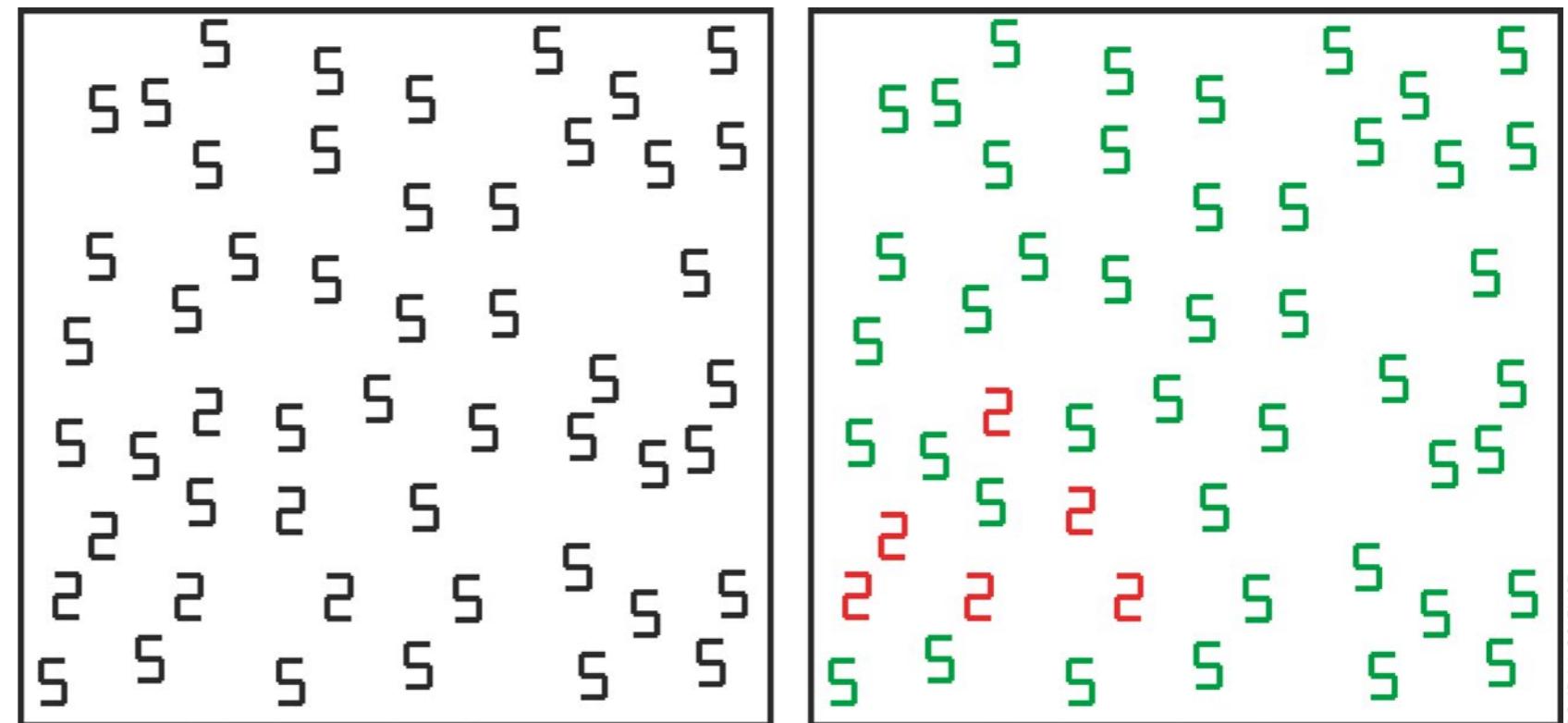
Doch woher röhrt diese zusätzliche Aktivierung? Bilden Synästhetiker schon in ganz früher Kindheit außergewöhnlich starke und dauerhafte Assoziationen zwischen Wörtern und Farben aus? In diesem Fall läge die Ursache im assoziativen Lernen.

Oder enthält das Gehirn der Synästhetiker von vornherein feste anomale Nervenverbindungen zwischen dem sensorischen

System, in dem der auslösende Reiz eigentlich verarbeitet wird, und demjenigen, in dem der zusätzliche Sinneseindruck entsteht? Dann müsste bei Wort-Farb-Synästhetikern eine Verbindung bestehen von den Verarbeitungsbereichen für gehörte oder gelesene Wörter hin zu den visuellen Regionen der Farbwahrnehmung, also zu V4/V8. Diese anomale Bahn sollte im Gehirn von Nichtsynästhetikern fehlen, ebenso bei Menschen mit anderen Synästhesien. Ihr würde eine genetische Mutation zu Grunde liegen, die dazu führt, dass sich diese Querverbindung entweder ausbildet oder während der Hirnreifung in frühester Kindheit nicht beseitigt wird. In dieser Phase werden routinemäßig nicht benötigte Verknüpfungen eliminiert.

Die Hypothese einer anomalen anatomischen Verbindung lässt sich heute noch nicht direkt experimentell überprüfen. Um jedoch den Ursachen der Synästhesie näherzukommen, haben wir die andere Annahme getestet: dass hinter allem ein assoziatives Lernen steckt. Sollte sie sich nicht bestätigen, wäre dies ein indirektes Indiz zu Gunsten der anderen Hypothese.

Hierzu trainierten wir Nichtsynästhetiker, Assoziationen zwischen Wörtern und



Farben herzustellen. Dies funktionierte folgendermaßen: Die Teilnehmer saßen vor einem Bildschirm, auf dem in einem Tablau acht Farben angezeigt wurden. Klickten sie auf eines der farbigen Felder, erschien die Farbe auf der gesamten Bildschirmfläche – und über Kopfhörer ertönte ein Wort. Dieser Teil der Aufgabe wurde so lange wiederholt, bis sich feste Assoziationen zwischen Farben und Wörtern gebildet hatten. Der Lernerfolg war daran zu erkennen, dass der Prüfling im nachfolgenden Test immer die richtige Farbe anklickte, wenn er die Wörter einzeln und in zufälliger Reihenfolge hörte. Danach absolvierte

ZWEIEN UND FÜNFEN IM VERGLEICH
Für gewöhnliche Menschen sind die schwarzen Zweien unter den schwarzen Fünfen schwer auszumachen (links). Für einen Synästhetiker dagegen treten die Zweien augenblicklich aus dem Wald von Fünfen hervor, da er sie zum Beispiel in Rot sieht, während die Fünfen grün erscheinen (rechts).

er die Aufgaben im MRT-Gerät, damit er sich an die ungewohnte Versuchsumgebung gewöhnen konnte.

Schließlich, im eigentlichen Test, registrierte der MRT-Scanner die Hirnfunktion

der Versuchsperson, während die Testwörter ertönten. Um die Chance zu verbessern, visuelle Prozesse im Gehirn zu entdecken, bat man die Versuchsteilnehmer, teils die Farbe zu benennen, die sie mit dem jeweiligen Wort zu assoziieren gelernt hatten, teils sollten sie sich diese vorstellen und vor ihr geistiges Auge führen. Hätten Synästhetiker tatsächlich nur gelernt, Wörter besonders eng mit Farben in Verbindung zu bringen, sollten unsere nichtsynästhetischen Probanden nach dem intensiven Training nun ebenfalls eine Aktivierung der Region V4/V8 zeigen.

Doch das Übungsprogramm hatte nichts genützt: Bei unseren normalen Versuchspersonen reagierte das »Farbareal« V4/V8 immer noch nicht auf die Wörter im Kopfhörer. Dabei hatte die akustische Stimulation an sich durchaus funktioniert, denn die Hörrinde, das Broca-Areal und andere Sprachregionen unserer Versuchspersonen sprangen auf den Reiz an. Es lag also sehr wohl eine kognitive Verarbeitung der Begriffe vor. Hieraus lässt sich schließen, dass synästhetische Wahrnehmungen wahrscheinlich nicht auf einem assoziativen Lernen beruhen, das zu besonders starken Verknüpfungen geführt hat. Ander-

falls hätte nach dem intensiven Training auch bei den Nichtsynästhetikern die V4/V8-Region auf das Hören der Wörter anspringen müssen.

Keine Sache von Begabung

Was wäre jedoch, wenn Synästhetiker einfach effizienter lernen? Wenn sie viel schneller und intensiver Assoziationen bilden als ein Durchschnittsmensch? In diesem Fall könnten wir durch unser Farb-Wort-Training nämlich gar nicht ausschließen, dass Mischsinnigkeit auf diesem Mechanismus beruht. Daher stellten wir einen zweiten, ähnlichen Versuch an. Statt Wort-Farb-Paaren mussten die Teilnehmer nun Kombinationen aus Melodien und Farben lernen. Wir wählten Tonfolgen aus klassischen Werken, zum Beispiel von Chopin oder Mozart. Jede wurde vier Sekunden lang über Kopfhörer eingespielt, und eine halbe Sekunde nach ihrem Einsetzen erschien zusätzlich die entsprechende Farbe auf dem Computerbildschirm. Diesmal mussten nicht nur »Normalpersonen« in dieser Weise üben, sondern auch Synästhetiker – und zwar solche, die von Natur aus Wörter, nicht aber Töne mit Farben assoziieren. Der Gedanke dahinter: Wenn Letzte-

re besonders erfolgreiche Assoziationslerner sind, dann müsste ihre V4/V8-Region nach der Übungsphase außer auf Wörter auch auf Melodien ansprechen.

Wie die Magnetresonanzbilder jedoch zeigten, sprangen während des Versuchs bei allen Teilnehmern nahezu dieselben Hirnbereiche an, nie aber sonderlich stark die V4/V8-Region. Somit besitzen Synästhetiker keine besondere Begabung für das Erlernen von Assoziationen.

Das Areal auf der fusiformen Windung springt insgesamt bei Wort-Farb-Synästhetikern sowohl auf Wörter als auch auf Farben an, nicht aber – ganz wie bei gewöhnlichen Menschen – beim bloßen Vorstellen oder Erinnern von Farben. Demnach ist eine synästhetische Farberfahrung tatsächlich eine echte Wahrnehmung und nicht das Ergebnis einer überschäumenden Vorstellungskraft. Sie ist mehr mit Nachbildern oder illusorischer Bewegung verwandt. So sieht man manchmal ein rotes Nachbild, wenn man nach längerer Zeit den Blick von einem grünen Fleck abwendet. Oder man sieht nach längerem Blick auf einen Wasserfall einen neutralen Untergrund sich fortbewegen wie die stürzenden Wassermassen, allerdings in Gegenrichtung.

Alle unsere Experimente deuten darauf hin, dass bei Synästhetikern tatsächlich von Geburt an Hör- und Sehwahrnehmung miteinander verbunden sind. Dies führt zu einer neuen Frage: Wie sieht diese angeborene »Leitung« genau aus? Wie wir glauben, handelt es sich um eine Art neuronalen Nebenweg zwischen den entsprechenden Hirnregionen. Bei der von uns untersuchten Form der Synästhesie entsteht die Farbempfindung durch Wörter, entweder in gesprochener oder geschriebener Form. Die hierfür zuständige Nervenbahn dürfte daher von denjenigen Regionen ausgehen, wo solche »Phoneme« und »Grapheme« akustisch respektive visuell repräsentiert werden. Durch weitere fMRI-Studien konnten wir den Verlauf dieser vermuteten Bahn dann präziser bestimmen.

Das Gehirn der Synästhetiker reagierte in unseren Versuchen auf gesprochene Worte, indem es jene Region seines Sehsystems aktivierte, die für Farbwahrnehmung zuständig ist. Vorgeschaltete Areale des visuellen Systems, etwa die Region V1 (die primäre Sehrinde) oder V2 (ein Bereich der sekundären Sehrinde), blieben dagegen stumm. Präsentierte man den Versuchs-

personen jedoch farbige Sehreize, traten diese Bereiche in Aktion. Genau dieselben Verhältnisse beobachtet man bei farbigen Nachbildern. Auch dort werden höhere Stationen der Sehbahn mobilisiert, während die Regionen V1/V2, anders als bei »echten« Farben kaum aktiviert werden. Sich Farben, nur vorzustellen, genügt nach unseren Versuchsergebnissen dagegen nicht, um V1/V2 oder V4/V8 zu mobilisieren.

Das scheint eine Hypothese zu bestätigen, die von Neuropsychologen und Experten für visuelle Wahrnehmung vertreten wird, unter anderem von Semir Zeki von der Universität London und Dominic Ffytche vom Londoner Institut für Psychiatrie: Damit wir ein bestimmtes visuelles Merkmal bewusst wahrnehmen, genügt es, wenn allein das dafür zuständige Modul des visuellen Systems aktiviert wird. Im Fall der Region V4/V8 wird dann beispielsweise eine Farbempfindung erzeugt, im Fall von V5 der Eindruck von Bewegung. Es ist also nicht nötig, dass auch frühere Instanzen der Sehbahn beteiligt sind.

Halluzinationen nach Verlust der Sehkraft
Damit ließen sich auch die Symptome des so genannten Charles-Bonnet-Syndroms

Was Synästhetiker erleben

- **ICH ERINNERE MICH NOCH GUT** an ein Erlebnis, als ich zwei Jahre alt war. Mein Vater stand auf einer Leiter und strich eine Mauer. Die frische Farbe roch blau, aber die Wand wurde weiß. Ich denke immer wieder an diesen Tag und frage mich, warum die Farbe weiß war, während sie doch einen blauen Geruch verströmte.
- **WAS MICH AN EINEM MENSCHEN** als Allererstes in Bann schlägt, ist die Farbe seiner Stimme. V. hat eine gelbe, bröckelige Stimme, wie eine Flamme, aus der winzige Feuerfäden herausfasern. Manchmal bin ich davon so gefesselt, dass ich den Inhalt der Worte nicht erfasse.
- **GRÜNE MINZE** hat einen Geschmack, der an kühle Säulen erinnert, an Säulen aus Glas. Die Zitrone besitzt eine spitze Form, die mir auf Gesicht und Handflächen drückt. Es ist, als ob ich meine Hände auf ein Nagelbrett legen würde.
- **WERBEANZEIGEN** sind für mich eine einzige Enttäuschung, weil die Buchstaben und die Zahlen immer die »falsche« Farbe haben.

erklären. Dieses trifft Menschen, die beispielsweise durch eine Netzhautablösung oder ein Glaukom plötzlich an Sehkraft verloren haben. Sie erfahren dann starke visuelle Halluzinationen, deren Inhalt sich von Person zu Person unterscheidet. Ffytche und seine Kollegen forderten solche Patienten im Kernspintomografen auf, ihre Trugbilder zu beschreiben und deren Einsetzen und Ende anzugeben. Die Art der »Wahrnehmung« stand dabei hervorragend im Einklang mit der natürlichen Funktion der jeweils aktiven Region des Sehsystems.

Farbhalluzinationen zum Beispiel gingen mit einer Aktivierung der Region V4 einher, Objekthalluzinationen mit neuronaler Tätigkeit in einem anderen Bereich der fusiformen Windung. Trugbilder von Gesichtern entstanden, wenn eine für die Gesichtserkennung zuständige Hirnpartie ganz in der Nähe der Windung ansprang. Die primäre Sehrinde der Halluzinierenden spielte dagegen zu keinem Zeitpunkt mit. So gesehen könnte man die Wort-Farb-Synästhesie als eine optische Täuschung betrachten, bei welcher der auslösende Reiz – hier bestimmte Worte – viel häufiger vorkommt als bei Täuschungen wie farbi-

gen Nachbildern oder dem Wasserfalleffekt. In all diesen Fällen entsteht der trügerische Eindruck genau dann, wenn die entsprechende Instanz des Sehsystems aktiv ist: die Region V4/V8 für Farbe und die Region V5 für Bewegung.

In einem Punkt müssen wir das bisher Gesagte über die neuronale Verbindung zwischen Seh- und Hörarealen noch präzisieren: Unsere Versuche zeigen, dass die synästhetische Aktivierung des Gehirns bei der Wort-Farb-Form des Phänomens ausschließlich in der V4/V8-Region der linken Hirnhälfte erfolgt. Auch das Team von Pauls war in seiner PET-Studie auf eine linksseitige, unterschwellige Mobilisierung der V4/V8-Region gestoßen. Vielleicht erklärt dies, dass die Farbempfindungen eher durch Wörter als durch beliebige Töne hervorgerufen werden, denn in der linken Hirnrinde liegt auch unser Sprachsystem.

Vor diesem Hintergrund können wir die vermutete »synästhetische Bahn«, die Wörtern Farbe verleiht, genauer eingrenzen: Sie verläuft vom Sprachsystem im Kortex der linken Seite zur V4/V8-Region derselben Hemisphäre, und zwar so, dass die vorgeschalteten Regionen des Sehsystems nicht erregt werden.

Hierzu passt es gut, dass die linksseitige V4/V8-Region von Synästhetikern nicht auf wirkliche Farben reagiert. Offensichtlich liegt hier eine klare Aufgabenteilung vor: Während normalerweise beide Hirnhälften in gleicher Weise echte Farben verarbeiten, kümmert sich bei Synästhetikern die rechte Hemisphäre um reale Farben und die linke um die »Wortfarben«. Demnach könnte die postulierte, vom Sprachsystem links einlaufende synästhetische Bahn die linke V4/V8-Region daran hindern, ihre eigentliche Funktion zu erfüllen, sprich die Wahrnehmung realer Farben zu ermöglichen. Kurzum: Wenn die Betreffenden ein Wort hören oder lesen, aktiviert diese Bahn nun die Region der Farbwahrnehmung. Das genügt, um ein bewusstes Farberleben zu erfahren. Die genaue Art dieser Empfindung hängt davon ab, welche Neuronen der V4/V8-Region dabei erregt werden.

Es gibt keinerlei Hinweis darauf, dass die synästhetischen Farben bei der auditiven oder visuellen Verarbeitung der Wörter einen Vorteil bieten. Ganz im Gegenteil: Synästhetiker werden manchmal von einer störenden »Doppelwahrnehmung« verwirrt. Dies ist dann der Fall, wenn die

Hirnaktivität	Reiz	reale Farben	visualisierte Farben	Worte
Synästhetiker linke V4/V8-Region	—	—	+	
Synästhetiker rechte V4/V8-Region	+	—	—	
Vergleichspersonen linke V4/V8-Region	+	—	—	
Vergleichspersonen rechte V4/V8-Region	+	—	—	

Bezeichnung einer Farbe die Wahrnehmung einer anderen Farbe auslöst. So kann zum Beispiel das Wort »Rot« grün gefärbt erscheinen, und das Wort »Gelb« rot. Je nach Person unterliegen alle oder nur ein Teil der Farbnamen diesem »Falschfarbeneffekt«.

Ebenso wie die Synästhesie an sich scheint dieses verwirrende Phänomen von frühester Kindheit an zu bestehen. Dennoch ist es im Alltag kaum zu bemerken. Synästhetiker lernen ganz normal die Namen der Farben; ihre Farbwahrnehmung ist offensichtlich in Ordnung, und sie können eine reale Farbe korrekt bezeichnen. Wir vermochten den Falschfarbeneffekt jedoch durch ein Experiment zu demonst-

rieren. Hierzu ordneten wir Wort-Farb-Synästhetiker nach ihrer Empfindlichkeit gegenüber dem Effekt, indem wir für jeden von ihnen bestimmten, bei welchem Anteil aller Farbnamen ein Konflikt zwischen der bezeichneten und der wahrgenommenen Farbe auftritt. Dann präsentierten wir unseren Probanden verschiedene Farben und maßen, wie schnell sie diese benennen konnten.

Wenn Gesprochenes, Gedachtes und Gesehenes kollidieren

Man muss hierzu wissen, dass es unserem Gehirn schwerfällt, die Farbe eines farbig geschriebenen Worts zu identifizieren,

REIZ UND HIRNAKTIVITÄT

Je nach Stimulus werden bei Synästhetikern und Nichtsynästhetikern verschiedene Regionen des Sehsystems aktiviert. So erregen Worte die linke V4/V8-Region der Synästhetiker, Farben tun das dagegen nicht. Die rechte V4/V8-Region der Synästhetiker reagiert dafür auf Farben, jedoch nicht auf Worte. Bei gewöhnlichen Menschen zeigen Wörter weder rechts noch links Wirkung.

wenn dieses selbst eine andere Farbe bezeichnet, wenn beispielsweise das Wort »Rot« in Grün geschrieben ist. Das Gehirn braucht hierzu länger, als um die Farbe einer zufälligen Abfolge von Buchstaben zu erkennen. Im Fall der Synästhetiker sollte dieser Störeffekt auch auftreten, wenn ein Wort etwa einen Roteindruck hervorruft.

Genau diese Verzögerung haben wir bei Synästhetikern beobachtet, bei denen der Falschfarbeneffekt auftritt. Sie brauchten länger, um bei einer Buchstabenreihe aus X die jeweilige Druckfarbe zu benennen, wenn deren Bezeichnung eine andere synästhetische Farbe hervorruft. Allein der Gedanke an die Farbbezeichnung lässt eine

Farbempfindung entstehen, die von der Buchstabenfarbe abweicht. Dadurch entsteht ein bewusster Konflikt, und die Farbe wird langsamer identifiziert.

Unsere Ergebnisse bestätigen den Falschfarbeneffekt genau so, wie er von den Betroffenen beschrieben wird. Auch vor diesem Hintergrund erscheint es nicht plausibel, dass die Synästhesie eine Folge assoziativen Lernens ist. Sie muss vielmehr tief im Gehirn verwurzelt sein, so dass sie zwei Sinnesfunktionen in ein und demselben Bewusstseinszustand zusammenfließen lassen kann. Diese Erkenntnis hat weitreichende Folgen für die Beziehung zwischen neuronalen Funktionen und Bewusstsein.

Wie entsteht ein solcher Zustand? Neurobiologen erklären die Tatsache, eine Farbe wie Rot zu sehen, als das Ergebnis einer Reihe von neuronalen Reaktionen. Nach diesem Modell beruht die Wahrnehmung eines Lauts ebenfalls auf der Aktivität von Nervenzellen. Nun sind aber der Laut und die Farbe Rot »in den Augen des Bewusstseins« etwas qualitativ Verschiedenes. Diese subjektiven Wirkungen bezeichnet man auch als Qualia, vom lateinischen »qualis« (wie beschaffen). Um sie zu definieren, ge-

nügt es nicht, die physiologischen Abläufe zu beschreiben, die mit ihnen assoziiert sind.

Eine Reihe von Philosophen und Biologen – um die Wahrheit zu sagen: die große Mehrheit – wollen die Qualia bei der Erforschung des Bewusstseins ausklammern. Diese seien zu subjektiv, als dass sie Gegenstand objektiver wissenschaftlicher Betrachtung sein könnten. Solche »Funktionalisten« streichen die Empfindung, die zum Beispiel Rot oder Grün verursachen, aus ihren Überlegungen. Sie konzentrieren sich auf die Verhaltensreaktionen, durch die ein Mensch Rot und Grün unterscheidet. Die Person wird als funktionales System aus Ein- und Ausgängen betrachtet, und einzige deren Kombination sei objektiver Fakt. Das innere Geschehen sei reine Illusion.

Nach dieser Hypothese sind die Qualia nur Epiphänomene, die mit den Funktionen, den Verhaltensleistungen einer Person einhergehen, also etwa mit deren Wörtern, Bewegungen und Handlungen. Daraus folgt, dass zwei unterschiedliche Qualia, die vollständig durch diese Funktionen definiert sind, zwei verschiedenen Input- und Output-Funktionen entsprechen müssen.

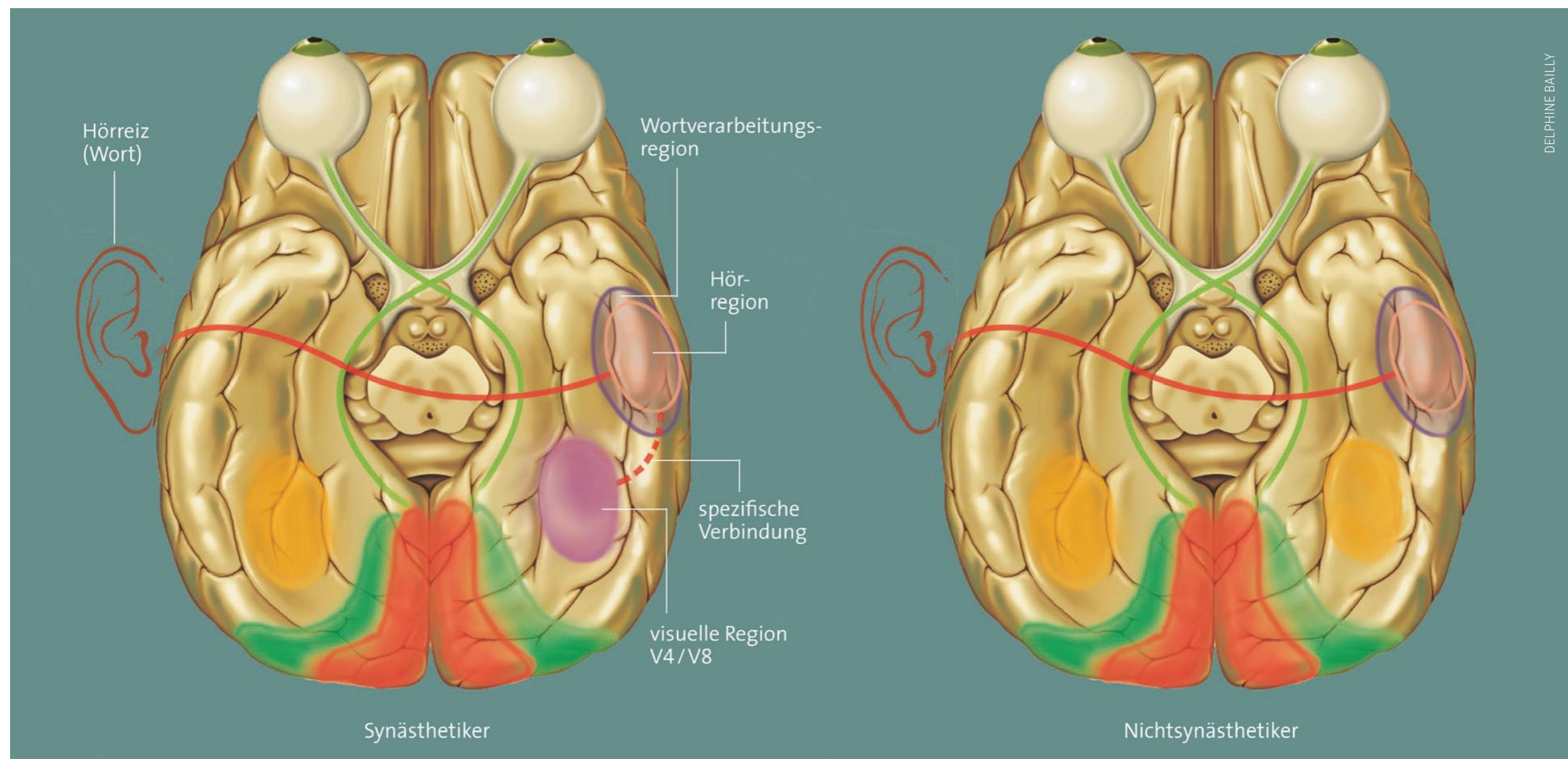
Umgekehrt sollten zwei verschiedene Funktionen mit zwei verschiedenen Qualia assoziiert sein.

Die Synästhesie zeigt aber genau das Gegenteil. Wenn eine visuelle und eine auditive Funktion auf dasselbe Quale konvergieren – in diesem Fall die Wahrnehmung einer Farbe –, kann man unmöglich weiter behaupten, dass die Qualia nichts weiter seien als die ihnen zu Grunde liegenden Funktionen und Prozesse. Genauso absurd wäre es zu sagen, die Temperatur sei identisch mit dem Flüssigkeitsstand in einem Thermometer. Alles deutet vielmehr auf eine eigenständige Existenz der Qualia hin. Dies konnten bereits die Wahrnehmungpsychologen Ramachandran und Hubbard illustrieren, als sie einen farbenblinden Synästhetiker untersuchten, der angab, Zahlen bunt zu sehen, aber in »marsianischen« Farben, anderen als in der Außenwelt. Dieser außergewöhnliche Fall zeigte, dass die »Farbzentren« im Gehirn offenbar immer noch arbeiteten, obwohl sie ihrer eigentlichen Funktion – Farbwahrnehmung – entfremdet wurden. Demnach existiert der bewusste Zustand »Sehen« auf irgendeine Weise per se, unabhängig von der visuellen Wahrnehmung durch das Auge.

Akustische Reizverarbeitung

Hört ein Synästhetiker ein Wort, das bei ihm eine Farbempfindung verursacht, wird die zum visuellen System gehörige Region V4/V8 angesprochen. Der akustische Reiz aktiviert zunächst die Hörregionen, und von dort geht eine Meldung – wahrscheinlich über eine postulierte »spezifische Verbindung« – an die V4/V8-Region der

linken Hirnhälfte (im Bild rechts, da das Gehirn von unten betrachtet wird). Nichtsynästhetikern fehlt diese Bahn, und daher wird ihr V4/V8-Areal ausschließlich durch Farbinformationen stimuliert, die über die Sehbahn einlaufen.



Welchen biologischen Sinn hätten Wortfarben?

Insgesamt könnte man also sagen: Die Evolution hat die Entstehung neuronaler Strukturen begünstigt, durch die wir aus unserer Umwelt Informationen über das Licht entnehmen können; gleichzeitig sind diese Strukturen aber in der Lage, Bewusstseinszustände hervorzubringen, die für sich allein existieren und jederzeit auch mit einem anderen Aspekt der Realität verknüpft werden können. Man weiß derzeit noch nicht, ob wortbedingte und objektbedingte Farbwahrnehmung exakt dasselbe sind. Daher arbeiten wir mit einer kleinen Gruppe von Synästhetikern, die Farben hören und geschickt genug sind, den entstehenden Eindruck zu malen. Die funktionelle MRT soll dann einmal zeigen, wie weit ein Wort und das ihm entsprechende Bild die V4/V8-Region in ähnlicher Weise aktivieren. Dieses Unterfangen ist schwierig, bei den derzeitigen technischen Grenzen der bildgebenden Verfahren vielleicht sogar unmöglich. Dennoch hoffen wir, dass sich unsere Hypothese auf diesem Wege objektiv bestätigen lässt: dass bei der Wort-Farb-Synästhesie das Wort und die entsprechende Farbe in ähnlicher oder gar identi-

scher Weise bewusst wahrgenommen werden – obwohl die jeweilige Wahrnehmung über verschiedene funktionelle Bahnen erfolgt.

Gegen diese Interpretation könnte man anführen, dass die V4/V8-Region der linken Hirnhälfte bei den Wort-Farb-Synästhetikern für synästhetische Farben zuständig ist, die rechtsseitige V4/V8-Region dagegen für visuell wahrgenommene Farben. Funktionalisten stellen sich auf den Standpunkt, dass die beiden Funktionen – ob sie nun auf dem Hören von Wörtern oder dem Sehen von Farben beruhen – sich ja nicht denselben bewussten Zustand teilen, da die eine mit Zuständen einhergeht, die in der linken V4/V8-Region entstehen, und die andere mit solchen in der rechten V4/V8-Region.

Das Problem für die Vertreter dieser Sichtweise liegt jedoch darin, dass beide zu einer Farbempfindung führen. Diese Rollenverteilung würde zwei vollkommen getrennten physischen Substraten – in einem Fall dem Ensemble aus Netzhaut, Sehnerv, Sehrinde und rechter V4/V8-Region, im anderen Fall aus Ohr, Hörnerv, Hörrinde, synästhetischem Trakt und linker V4/V8-Region – denselben Zustand bewusster

Wahrnehmung zuordnen. Damit wäre der eindeutige Zusammenhang zwischen einer gegebenen Funktion und einem bestimmten Bewusstseinszustand verletzt.

Es bleibt umstritten, ob man bewusste Zustände bestimmten biologischen »Substraten« zuschreiben kann. Im Lauf der Evolution hat sich das Gehirn der Hominiden weiterentwickelt, und dabei ist auch die Anzahl bewusster Zustände unaufhörlich gestiegen. Wie die Erforschung verschiedener Synästhesietypen gezeigt hat, könnte die Auslese der Qualia anderen Gesetzen folgen als die der Verhaltensfunktionen. Denn: Welchen evolutionären Vorteil hätte beispielsweise der Falschfarbeneffekt? Das Verständnis der Sprache spielt für das Überleben ganz offenkundig eine wichtige Rolle, ebenso das Farbensehen. Für eine neuronale Verbindung, welche die Wahrnehmung von Wörtern mit der von Farben verknüpft, ist jedoch kein biologischer Sinn ersichtlich. Eine solche Veranlagung ist bestenfalls funktionell neutral, im Fall des Falschfarbeneffekts sogar nachteilig.

Gehen wir einmal davon aus, die Fähigkeit, Farben »sprachlich« über die Hörbahn wahrzunehmen, sei genetisch bedingt. Dann hatten die negativen Folgen dieses

Gens vielleicht nur noch keine Zeit gehabt, eine wie immer geartete Selektion zu bewirken. In diesem Fall würden Qualia und biologische Funktionen jeweils ihrer eigenen evolutiven Dynamik folgen.

Auch das Argument, die synästhetische Wahrnehmung besitze nur den Charakter einer optischen Täuschung, zieht hier nicht. Man geht nämlich davon aus, dass Farben als solche keine Eigenschaften des als farbig wahrgenommenen Objekts sind. Es handelt sich vielmehr um die Spektralanteile des Lichts, das von ihrer Oberfläche reflektiert wird. Es gibt eine Korrelation zwischen den Wellenlängen des reflektierten Lichts – die an den Oberflächen gemessen oder durch das Gehirn verarbeitet werden – und dem bewussten Eindruck, den ein Individuum davon hat, also den Qualia. Demnach ist es nicht absurd, Farben zu »hören«, als sie zu »sehen«. Logisch betrachtet haben Wort-Farb-Synästhetiker vielleicht nur den ersten Schritt einer evolutiven Entwicklung hinter sich gebracht, durch die es zukünftig ganz normal wird, Wörtern Farbqualia zuzuordnen – wenn dieser Weg nicht bereits mit der Entstehung des Sehsinns begonnen hat.

Die Erforschung von Synästhesien macht deutlich, dass sich die Beziehung zwischen Gehirn und bewussten Zuständen ganz konkret im Labor untersuchen lässt, und nicht nur durch Gedankenexperimente. Sie offenbart vor allem, dass die Bewusstseinszustände wahrscheinlich eine eigenständige Existenz führen und ihrer eigenen evolutiven Dynamik unterliegen, zwar mit der Evolution biologischer Funktionen verknüpft sind, aber nicht in notwendiger oder unveränderlicher Weise. Möglicherweise haben wir mit den Qualia eine Terra incognita vor uns, deren Erforschung gerade erst beginnt – und die Synästhesie lässt uns ahnen, was dort auf uns wartet.



(Spektrum Spezial Biologie – Medizin – Hirnforschung, 3/2016)

Gray, J. et al.: Implications of Synesthesia for Functionalism: Theory and Experiments. In: *Journal of Consciousness Studies* 9, S. 5 – 31, 2002

Nunn, J. et al.: Functional Magnetic Resonance Imaging of Synesthesia; Activation of V4/V8 by Spoken Words. In: *Nature Neuroscience* 5, S. 371, 2002

Spektrum
der Wissenschaft
KOMPAKT

FÜR NUR
€ 4,99

INTELLIGENZ

Was kluge Köpfe auszeichnet

- > Versteckspiel im Genom
- > Anlage kontra Umwelt – ein unsinniger Streit
- > Kann man Intelligenz trainieren?

[HIER DOWNLOADEN](#)

ESSAY

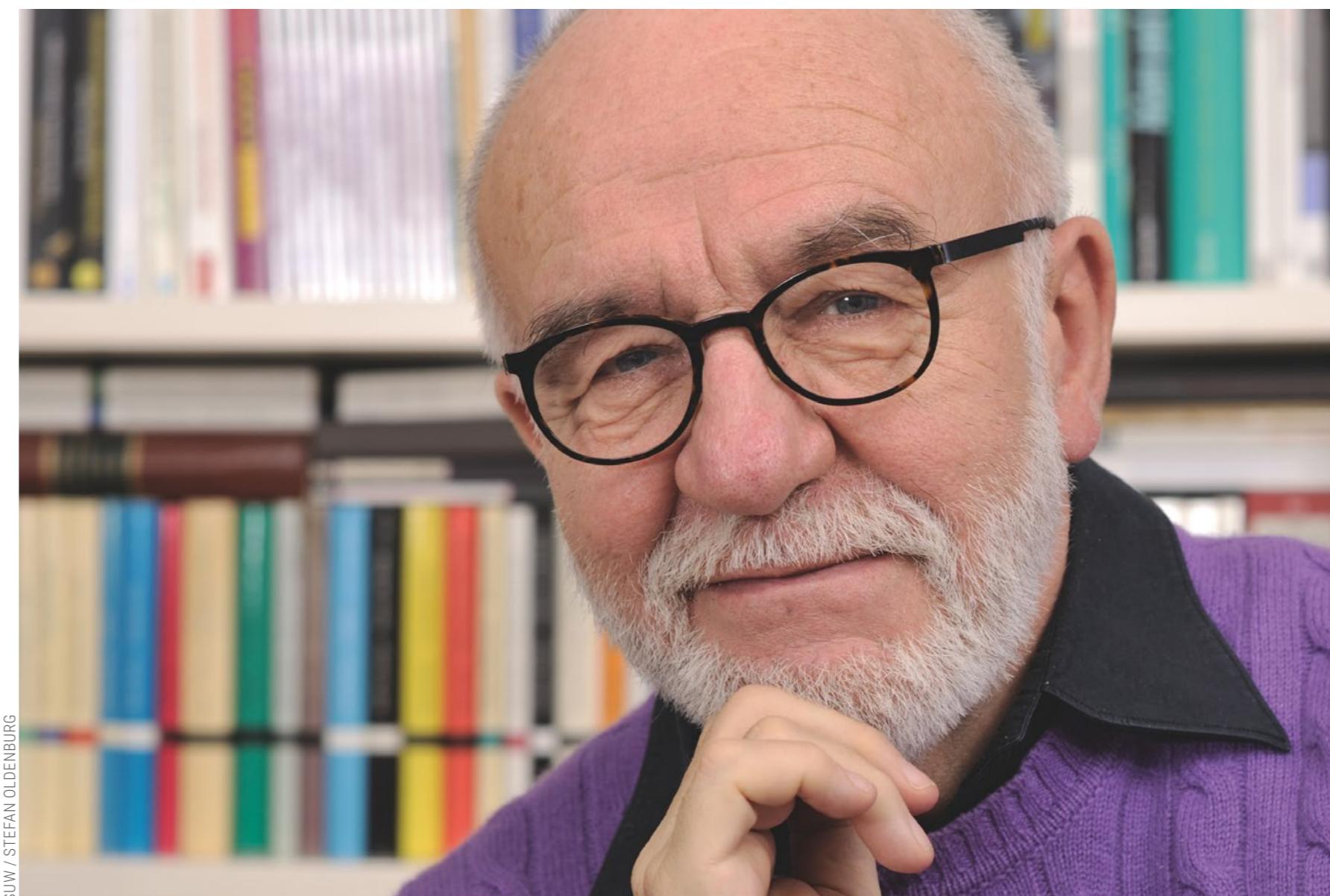
Das schöne Schwarz der Nacht

von Ernst Peter Fischer

Für einige ist Schwarz eine Farbe, für andere einfach die Abwesenheit sichtbaren Lichts. Vor dem Hintergrund der geistigen und biologischen Evolution des Menschen betrachtet, entsteht der Eindruck, »schwarz« sei eine für uns gemachte Eigenschaft des Kosmos.

Wer nachts in den Himmel schaut, sieht die Farbe der Nacht, also Schwarz. Schwarz fasziniert die Biologie innen und die Astronomie außen, wobei zum einen die Welt im Kopf und zum zweiten die Welt über den Köpfen gemeint ist. Dort, wo Menschen sehen – im Gehirn –, ist es ebenso dunkel und schwarz wie dort, wo ihre Augen hinsehen, wenn sie sich nach dem Untergang der Sonne dem Himmel zuwenden und dabei viele Sterne und Planeten als kleine Lichtpunkte mit großen schwarzen Zwischenräumen erkennen. Die »Farbe Schwarz« dominiert, wenn sich die Mitternacht nähert, und eine schöne Frage lautet: Warum ist das äußere Weltall vor allem schwarz und ähnlich lichtlos wie das innere Weltall, das Gehirn?

Das Spannende an der Schwärze steckte ursprünglich in der Frage, wie man etwas sehen kann, das entweder kein Licht ist oder von dem kein Licht ausgeht. Offenbar denken einige Menschen bis heute, die »Farbe Schwarz« so charakterisieren zu können. Noch zu Zeiten Isaac Newtons vermuteten einige Wissenschaftler, dass »schwarzes Licht« überhaupt keine Fre-



quenz habe und somit kein Licht im physikalischen Sinn sei. Und in einem berühmten Begriff der Gegenwart, dem Schwarzen Loch, steckt natürlich genau dieselbe Idee, dass sich von diesem Gebilde keinerlei Licht lösen und zu einem Beobachter gelangen kann. Schließlich hat sich an einer solchen (nach wie vor hypothetischen)

ERNST PETER FISCHER

Ernst Peter Fischer, geboren 1947 in Wuppertal, studierte Mathematik, Physik und Biologie. Heute lehrt er Wissenschaftsgeschichte an den Universitäten Konstanz und Heidelberg.

Stelle des Universums so viel Materie auf kleinem Raum angesammelt, dass es selbst Lichtstrahlen unmöglich ist, über einen vorgegebenen Horizont hinaus zu kommen und in ein menschliches Blickfeld zu treten.

Übrigens: Der Begriff »Schwarz« ist bei Forschern sehr beliebt, da sie nicht nur von Schwarzen Löchern schwärmen, sondern zudem die Idee der »Black Box« ersonnen haben, um die Steuerung der Lebensvorgänge mit einem theoretischen Gerüst erfassbar zu machen. Der schwarze Kasten bleibt dabei allen neugierigen Blicken verschlossen und kann nur durch Ein- oder Ausgaben analysiert werden. Und die nachhaltigste Entwicklung der Physik, der Umsturz des klassischen Weltbilds, kam zu Stande, weil um die Wende zum 20. Jahrhundert jemand hartnäckig probiert hat, die Strahlung eines so genannten Schwarzen Körpers zu verstehen, die von ihm bei steigender Temperatur ausgeht. Das Licht, das ein immer weiter erhitzter »black body« nach und nach ausstrahlt, muss er selbst produzieren, was genauer heißt, dass es seine Atome tun müssen.

Die Frage der Physik lautete um 1900, ob sich quantitativ sagen lässt, wie dieser

Prozess im Detail abläuft, und die seltsame Antwort mit revolutionären Konsequenzen hieß, dass es in den Atomen Quantensprünge geben muss, um Licht freizusetzen. In den Atomen setzen Elektronen sprunghaft Energie frei, die in neuer Form als Licht in Erscheinung tritt und sich zum Beispiel auf den Weg in ein menschliches Auge macht und es genau dort erreicht, wo es schwarz ist.

Bitte beachten: Menschen sehen gerade da, wo ihr Auge schwarz ist. Es ist nicht sein Weiß, das zum Sehen beiträgt, sondern seine schwarze Mitte, in der das Licht verschwindet, um den Glaskörper und viele Zellschichten zu durchlaufen, bevor es auf der Rückwand – der Netzhaut – eingefangen wird. Es kommt hier dem inneren Schwarz nahe, von dem die Rede war.

Dass die kosmischen Räume maßlos dunkel sind, haben alle Erdbewohner sehen können, als vor einer Generation mit US-amerikanischer Hilfe der Blick vom Mond möglich wurde, der eine blaue Erde als farbige Heimat in einer sonst tief-schwarzen Welt erkennen ließ. Doch wie kann das sein? Wie kann das Universum schwarz sein, wenn seine Struktur homogen ist und die Erde darin keine besondere

»Die Farbe des
Nachthimmels ist der
Evolution eine
Herzensangelegenheit«

Position einnimmt, wie von allen Wissenschaftlern vorausgesetzt wird? Müsste ein Auge nicht überall einen Stern finden – so, wie ein Blick durch einen Wald letztlich immer auf einen Baum trifft, wenn es davon ausreichend viele gibt? Ausreichend viele Sterne sollten aber das Merkmal eines grenzenlosen Universums sein, was die oben gestellte Frage in der neuen Form aufwirft, warum der Nachthimmel nicht weiß ist.

Mit diesem Rätsel befassen sich Menschen seit Jahrhunderten, und die Antwort lautet in ihrer knappsten Fassung, dass die kosmische Nacht schwarz erscheint, weil das Universum – obwohl grenzenlos – nicht unbegrenzt ist. Was im Deutschen unsinnig klingen mag, lässt sich in einer Sprache wie dem Englischen besser ausdrücken, die zwei Formen von Grenzen unterscheiden kann, und zwar die »boundary«, die man überschreiten kann, und das »limit«, bei dem dies nicht möglich ist. Der Kosmos hat nun ein »limit«: Er ist nicht unendlich ausgedehnt –, aber wer ihn durchfährt, trifft dabei nie an eine Grenze (boundary). Dies lässt sich durch eine Reise auf einer Kugeloberfläche veranschaulichen, die begrenzt abläuft, ohne auf eine Grenze zu treffen.

Wer genauer erkunden will, was den Nachthimmel schwarz sein lässt, muss sich einen Kosmos vorstellen, der mit einem Urknall begonnen hat und der 300 000 Jahre nach dem Ereignis eine heiße und undurchsichtige Wand mit einer Temperatur von etwa 3000 Grad Celsius zu Stande gebracht hat. Nachts an den Himmel zu schauen, bedeutet auf diese schwarze Wand zu blicken, die zeigt, dass es die Sterne nicht seit Ewigkeiten gibt und dass sich die Welt ausdehnt. Das lässt sich erkennen, wenn man seine Augen zum Nachthimmel richtet und keine Laternen oder andere künstliche Lichtquellen den Blick in die große Dunkelheit versperren.

Wer noch weiter über das Wahrnehmen von Schwarz nachgrübeln will, wird bald merken, dass dazu höchst raffinierte Mechanismen im zentralen Nervensystem eingesetzt werden. Die biologische Natur gibt sich große Mühe, den dunklen Himmel schwarz erscheinen zu lassen. Die Evolution unternimmt eine Menge, um Menschen den Gefallen zu tun, der mit dem Erleben von Dunkelheit verbunden ist. Die Natur hat nicht einfach nichts getan, denn dann würden Menschen dort auch nichts sehen, wo ihnen jetzt das Etwas begegnet,

das sie Schwarz nennen. Die Farbe des Nachthimmels ist der Evolution eine Herzensangelegenheit, und sie hat alles getan, um Menschen dieses Erlebnis zu verschaffen. Schwarz ist also für uns einen gemacht, und ich vermute, dass alle dies fühlen und diese Farbe uns deshalb so fasziniert – auch oder gerade dann, wenn vor ihrem Hintergrund die Sterne funkeln. ↗

(Sterne und Weltraum, 2/2016)



STRUKTURFARBEN

LEBENDIGE JUWELEN

von H. Joachim Schlichting

Im Sonnenlicht erstrahlen viele Insekten in buntem metallischen Glanz. Er kommt nicht etwa von Farbpigmenten, sondern von dünnen Strukturen im Panzer und den Flügeln.

Viele finden Fliegen lästig und würdigen sie kaum eines Blickes. Wer hingegen genau hinschaut, entdeckt die Farbenpracht, mit der sie und andere Insekten oft wie krabbelnde und schwirrende Edelsteine aus ihrer Umgebung hervorstechen. Der Effekt ist so überzeugend, dass beispielsweise die Schmeißfliege *Lucilia sericata* auch Goldfliege heißt. Je nach Perspektive changiert ihr Funkeln in der Sonne: Unter kleinem Einfallsinkel betrachtet schimmert das Insekt golden bis grünlich, während seitlich gesehen eher kürzere Wellenlängen und damit blaue Töne dominieren.

Weder diese Wandelbarkeit noch der metallische Glanz ist uns von den gewöhnlichen Farben vertraut. Diese entstehen meist einfach durch chemische Stoffe, die bestimmte Wellenlängen des weißen Lichts absorbieren und nur die entsprechenden Komplementärfarben zurückstreuen. Bei-

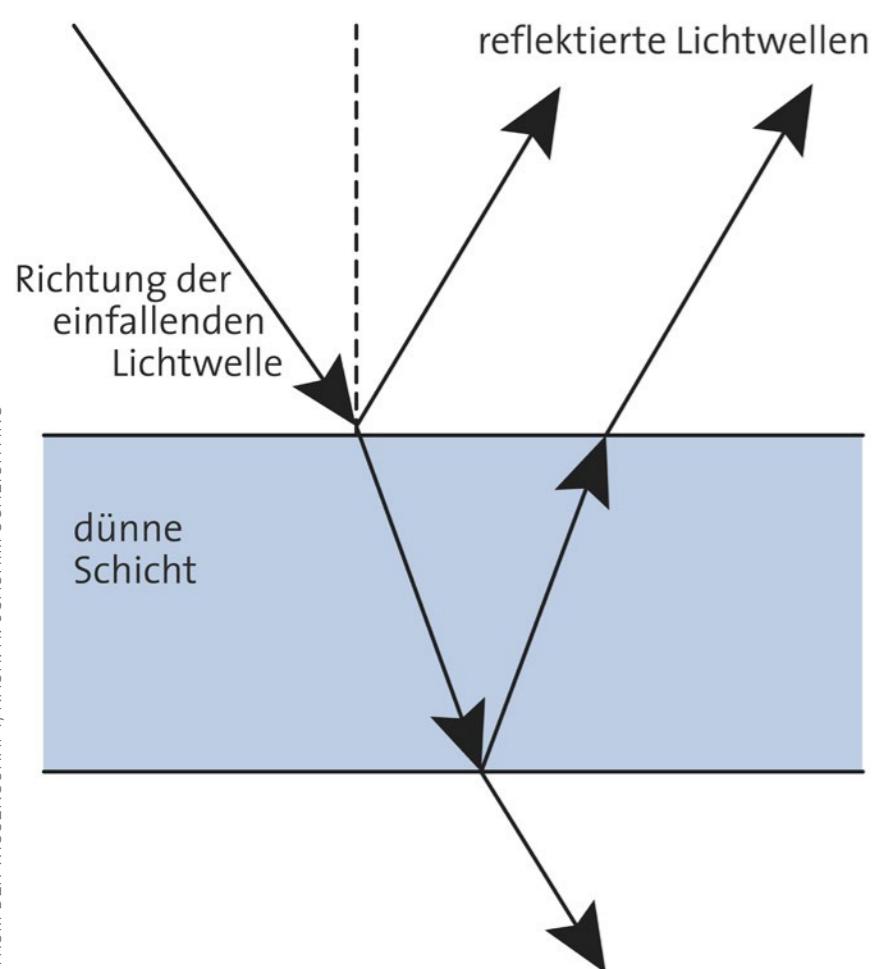
spielsweise liegt die grüne Farbe von Pflanzen am Chlorophyll, das vor allem Blau und Rot aufnimmt. Und die unterschiedlichen Brauntöne der menschlichen Haut und des Haares hängen von der Konzentration des Pigments Melanin ab.

Demgegenüber haben wir es bei Insekten mit komplizierteren optischen Vorgängen zu tun. Hier spielen Interferenzeffekte eine Rolle, wenn Licht innerhalb einer mikroskopisch feinen Struktur mehrfach gebrochen und reflektiert wird. Daher spricht man auch von Strukturfarben. Manchmal treten sie gemeinsam mit Pigmenten auf; dann sieht man als Ergebnis die entsprechende Mischung. Erzeugt also beispielsweise das spezielle Oberflächengefüge eines Objekts eine blaue Interferenzfarbe und enthält selbst gelbe Pigmente, ergibt sich eine grüne Tönung.

Das Sonnenlicht wechselwirkt in der Insektenhaut mit einzelnen Lagen, deren Dicke eine ähnliche Größenordnung hat wie

»Ich kann nicht die Intensität erreichen, die sich vor meinen Sinnen entwickelt, ich besitze nicht jenen wundervollen Farbenreichtum, der die Natur belebt.«

[Paul Cézanne (1839–1906)]



LICHTWELLE AUF FLIEGENFLÜGEL

Trifft eine Lichtwelle auf den dünnen Fliegenflügel, wird sie teilweise gebrochen und zurückgeworfen (Pfeilrichtungen).

die Wellenlängen des sichtbaren Lichts. Das verändert letztlich die Intensität der einzelnen Farbanteile. Im einfachsten Fall kann bereits eine dünne transparente Schicht bunt schimmern. Wenn Licht beispielsweise auf die filigranen durchsichtigen Flügel einer Fliege trifft, wird es im Inneren wegen der unterschiedlichen optischen Eigenschaften von Luft und Flügelmaterial gebrochen und teilweise zurückgeworfen. Dabei kommt es beim reflektierten Teil zu einer Verschiebung von einer halben Wellenlänge, das heißt, die Wellenberge und -täler verschieben sich entsprechend. Das restliche Licht trifft auf die untere Grenzschicht und wird dort abermals teils reflektiert, allerdings ohne einen solchen Gangunterschied, da dieser nur beim Übergang in ein dichteres Medium auftritt. Dieser zurückgeworfene Anteil läuft in dieselbe Richtung wie die obere Reflexion und überlagert sich im Auge oder auf dem Chip der Kamera mit ihr.

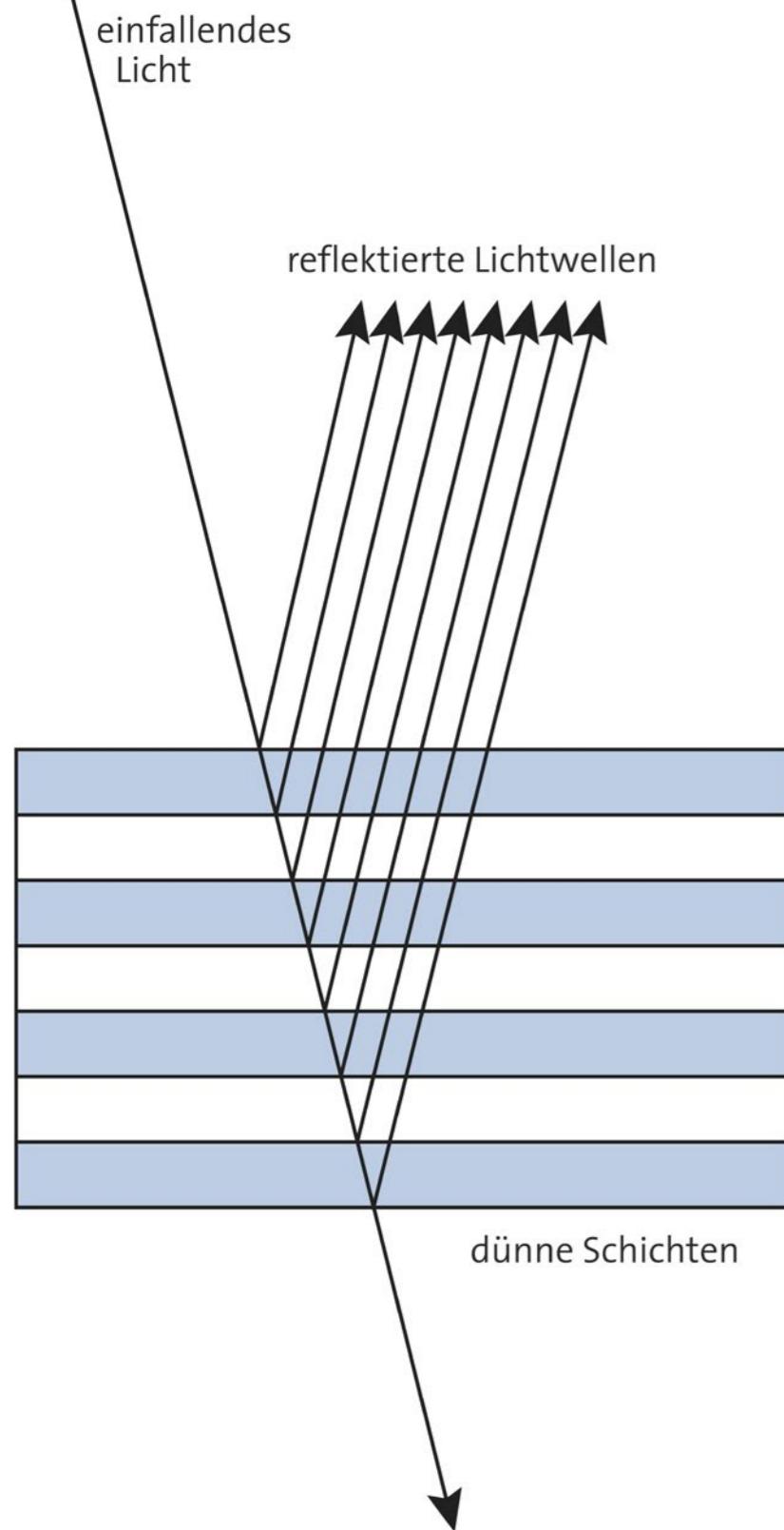
Wegen des Gangunterschieds der Teilwellen stellt sich zwischen beiden eine Phasenverschiebung ein. Das bedeutet anschaulich, dass die Wellenberge gegeneinander versetzt werden und bei der Überlagerung ein neuer Farbeindruck ent-

steht. Dieser hängt von der Flügeldicke, dem Brechungsindex des Flügelmaterials, dem Einfallswinkel und der Wellenlänge des Lichts ab.

Das Geheimnis des Funkelns steckt im Hautgefüge

Beträgt die Dicke der Schicht gerade ein Viertel der Wellenlänge einer bestimmten Lichtfarbe, summieren sich der doppelte Weg im Material und der Gangunterschied bei der oberen Reflexion gerade zu einer ganzen Wellenlänge: Es kommt zur konstruktiven Interferenz. Dabei werden die Berge höher und die Täler tiefer – die entsprechende Farbe erscheint deutlich gesättigter und intensiver. Andere Wellenlängen hingegen werden teilweise oder ganz ausgelöscht. Bei weißem Sonnenlicht, das alle Farben enthält, ist daher an einer Stelle des Flügels unter einem bestimmten Betrachtungswinkel stets nur eine Tönung zu sehen. Etwaige Farbunterschiede erlauben Rückschlüsse auf eine variierende Flügeldicke.

Der metallisch-bunte Glanz des Fliegenkörpers ist ebenfalls eine Strukturfarbe. Das verwundert erst einmal, schließlich ist der Panzer viel dicker als ein Flügel.



Aber die Körperoberfläche der Goldfliege besteht aus einer geordneten Abfolge paralleler, etwa 150 Nanometer dünner durchsichtiger Chitinebenen, die durch rund zehnmal feinere Luftschichten von einander getrennt sind. Unregelmäßigkeiten der Chitinlagen wirken wie winzige Abstandshalter und erzeugen die Zwischenräume.

Wenn Licht diesen Stapel durchläuft, trägt jede der Ebenen zur konstruktiven Interferenz bei (siehe Grafik links). Infolgedessen strahlt der Rumpf der Goldfliege noch intensivere Farben aus, als es bei einer einzelnen dünnen Schicht und erst recht bei Pigmentfarben möglich wäre.

Zahlreiche Insekten haben an verschiedenen Körperstellen unterschiedliche Panzerstrukturen, bei denen beispielsweise die

LICHTWELLEN AUF INSEKTENRUMPF

Die mehrschichtige Oberfläche des Insektenrumpfs verstärkt beim reflektierten Licht den Effekt einer einzelnen Lage (die Verschiebung der hindurchlaufenden Lichtwellen durch Brechung in den einzelnen Ebenen wurde nicht eingezeichnet).

Schichtdicken voneinander abweichen. Das verstärkt jeweils andere Anteile aus dem Spektrum des weißen Lichts, und das Tier erscheint bunt. Ein Prachtexemplar mit intensiven Strukturfarben ist die Goldwespe, deren faszinierende Erscheinung so gar nicht zu ihrer parasitären Lebensweise zu passen scheint. Es ist eben nicht alles Gold, was glänzt.

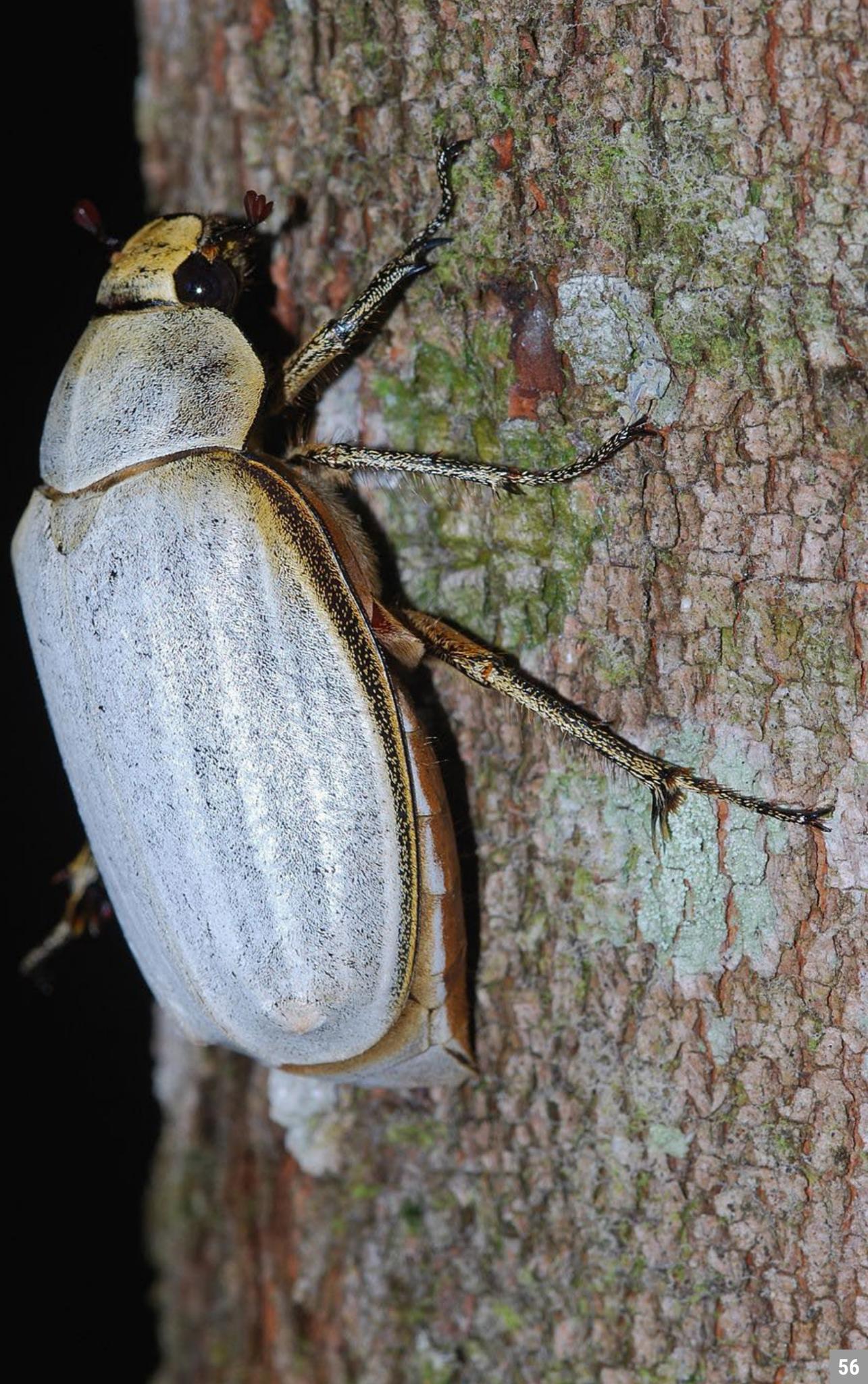
Biologen rätseln bei vielen Insekten noch über den Zweck der auffälligen Färbung. Sie könnte der Kommunikation dienen – etwa zwischen Individuen der Art oder dazu, Fressfeinden Ungenießbarkeit zu signalisieren. Vielleicht ist es aber auch nur ein Epiphänomen, das sich zufällig aus dem Aufbau ergibt, der ganz anderen Zwecken wie der Wärmeregulation dienen könnte. Jedenfalls interessieren sich inzwischen ebenfalls Wissenschaftler anderer Fachrichtungen für die Strukturfarben von Tieren und versuchen, sie besser zu verstehen. Denn sie sind nicht nur schön anzusehen, sondern auch eine ergiebige Inspirationsquelle für zahlreiche nanotechnische Anwendungen.

(Spektrum der Wissenschaft, 5/2016)

CHITIN Käfer streuen Licht für das **weißeste** Weiß

von Jan Osterkamp

Der Chitinpanzer eines grellweißen Käfers bricht Licht raffinierter als Materialien, die wir derzeit nachbauen können: Die Oberfläche ist komplex und Material schonend zugleich.



Die Oberfläche der *Cyphochilus*-Käfer Südostasiens reflektiert hocheffizient sämtliche Lichtwellenlängen und erscheint dadurch in strahlendem ultraweiß – ein Strukturfarben-Trick, den die Insekten mit einer besonders komplex organisierten Orientierung der Chitinmoleküle in ihrem Hautpanzer erreichen, wie Forscher jetzt beschreiben. Die flugfähigen Käfer sparen mit ihrer dünnen Strukturfarben-Beschichtung dabei zudem an Material, um ihr Startgewicht zu optimieren.

»Derart weiße und dünne Oberflächenschichten wie die der Käfer können wir auf dem derzeitigen Stand der Technik nicht nachbauen«, staunt die Studienleiterin Silvia Vignolini von der University of Cambridge, nachdem ihr Team die optischen Eigenschaften des Käferchitins analysiert hat. Bei extrem geringem Materialverbrauch streut es Licht dabei mit einem Konstrukt aus selbst nicht besonders weißen Einzelbausteinen. Die geometrisch exakte Ausrichtung der einzelnen Chitinmoleküle sei aber entscheidend, nicht ihre optischen Eigenschaften. Die Forscher wollen nun die Lichtausbreitung im Material noch



genauer untersuchen, um den Trick der Natur vielleicht einmal kopieren zu können. Dem Käfer nützt seine weiße Oberfläche übrigens wohl vor allem auf seinem Lieblingsaufenthaltsort: ebenso weißen Pilzen, auf denen ein Farbtupfer wohl zu auffällig wäre. ↪

(Spektrum.de, 15. August 2014)

WEISSE KÄFER

Der **Mikroskopblick** auf weiße Käfer wie *Cyphochilus* (im Bild) oder seinen Zwilling *Lepidiota stigma* zeigt die Oberflächenstruktur – weiß erscheint sie wegen der besonderen lichtstreuenden Orientierung der Chitinmoleküle, aus der sie aufgebaut ist. Der Käfer tarnt sich mit der Farbe in seiner südostasiatischen Heimat auf weißen Pilzen, die er gerne zum Fressen aufsucht.



PARADIESVÖGEL

Fedriges Farbenfeuerwerk

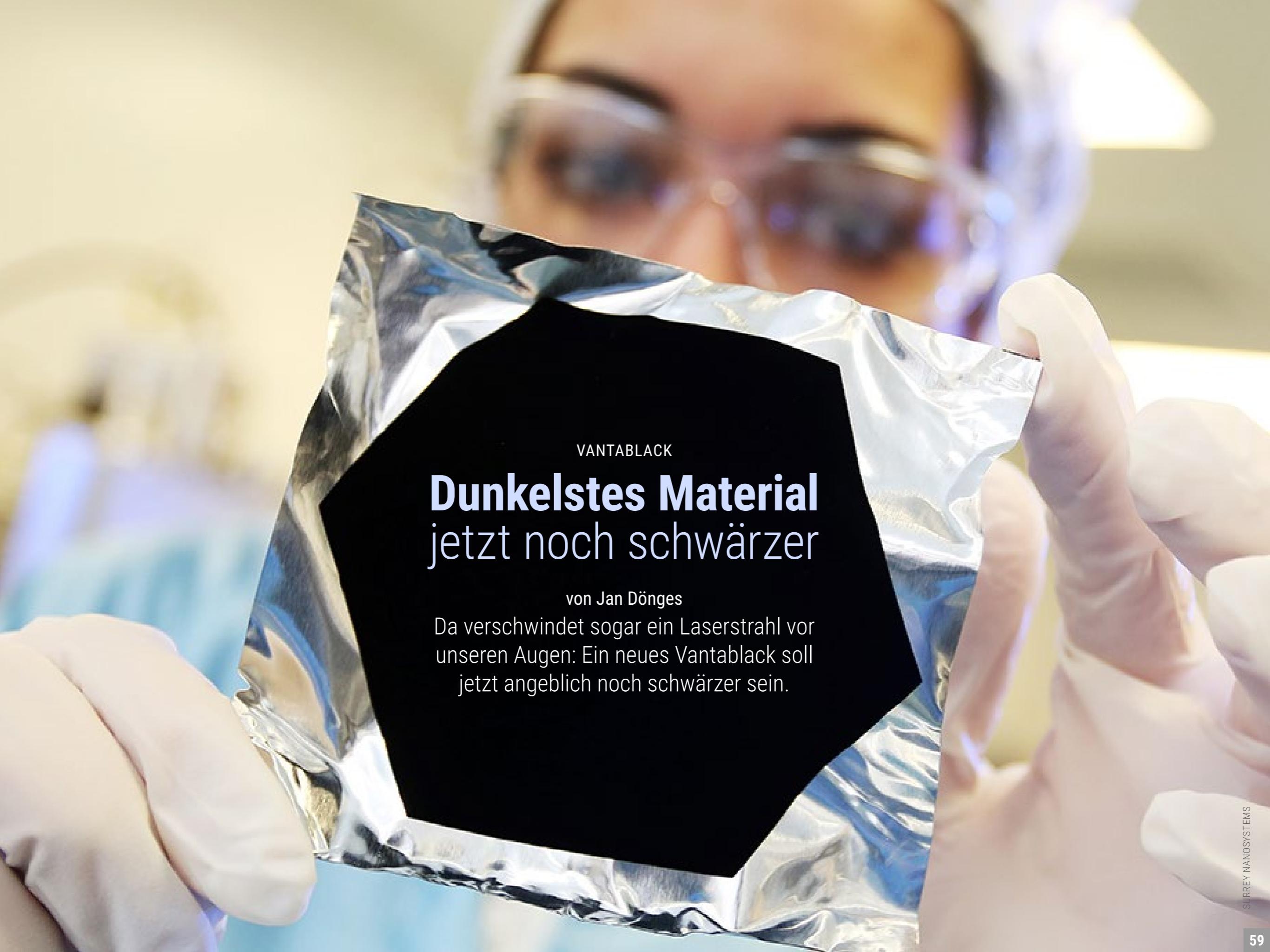
von Antje Findeklee

Männliche Lawes-Strahlenparadiesvögel bezirzen ihre Artgenossinnen mit farbenprächtiger Brust.

Sie tanzen vor kritischem Publikum. Darum präsentieren männliche Lawes-Strahlenparadiesvögel (*Parotia lawesii*) ihren Zuschauerinnen neben kunstvollen Schrittfolgen auch ein wahres Feuerwerk an Farben auf der Brust. Die Federn der auf Neuguinea heimischen Vögel weisen für diesen Zweck eine einzigartige Struktur auf: Die in den »Seitenästen« abzweigenden Hakenstrahlen sind wie Bumerangs gebogen und reflektieren die einfallende Strahlung in unterschiedlichen Wellenlängen, je nach Winkel des einfallenden Lichts. So sorgen mal die zentralen Abschnitte für Gelb- und Orangetöne, mal die gebogenen Enden für schillerndes Blau. Am Waldboden mit seinen stark unterschiedlichen Lichtverhältnissen können die Freier so dramatische Farbspektakel bieten – und beispielsweise die schillernden Gefieder von Kolibris oder die Schuppen von Schmetterlingen weit in den Schatten stellen. ↵

(Spektrum der Wissenschaft, 2/2011)

JUSTIN MARSHALL, UNIVERSITY OF QUEENSLAND



VANTABLACK

Dunkelstes Material jetzt noch schwärzer

von Jan Dönges

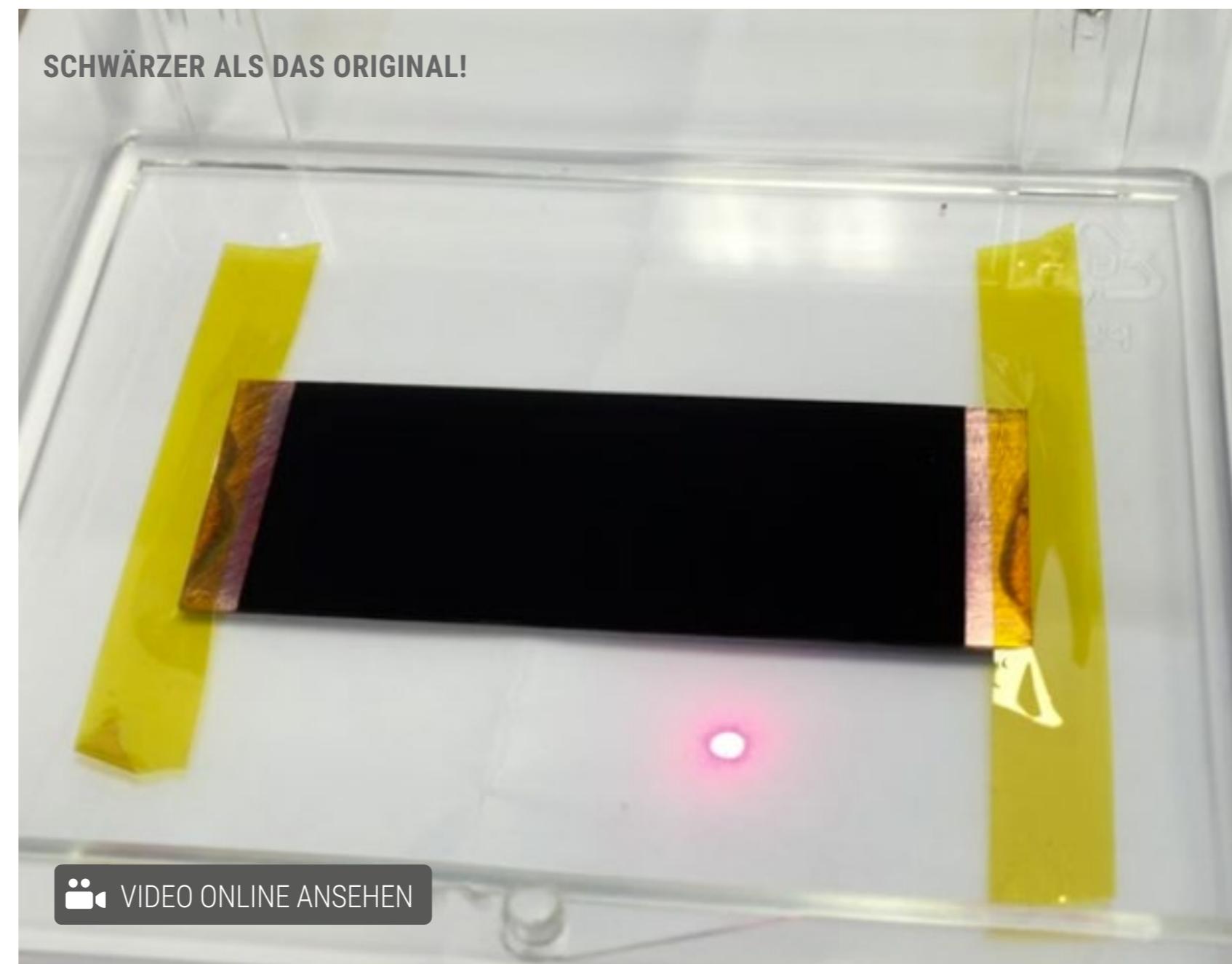
Da verschwindet sogar ein Laserstrahl vor
unseren Augen: Ein neues Vantablack soll
jetzt angeblich noch schwärzer sein.

Im Jahr 2014 präsentierte Surrey NanoSystems sein extrem reflexionsarmes Schwarz namens Vantablack. Das Material absorbiert nach Angaben der Firma 99,96 Prozent des Lichts. Jedes Objekt, das damit beschichtet ist, verliert seine inneren Konturen – wird sozusagen zum strukturlosen Loch in der Landschaft.

Dann hatte die Firma mit der Meldung auf sich aufmerksam gemacht, [sie habe die exklusiven künstlerischen Nutzungsrechte an den Künstler Anish Kapoor abgetreten](#). Und legte anschließend noch eins drauf, mit einem bei Youtube hochgeladenen Video: Dort stellt ein Mitarbeiter der Firma ein Vantablack zweiter Generation vor, das das erste noch einmal in puncto Lichtabsorption übertreffen soll.

Die Beschichtung wird hergestellt, indem Kohlenstoffnanoröhrchen – im Prinzip aufgerolltes Graphen – senkrecht zu einer Art Wald angeordnet werden. Auftreffendes Licht bleibt in diesem dichten Forst hängen. Der Name Vantablack ergibt sich aus diesem Verfahren, es ist ein Akronym von »vertically-aligned nanotube array«.

Die Beschichtung von Objekten mit Original-Vantablack ist ausgesprochen auf-



wändig und verlangt einen speziellen Reaktor, in dem die Nanoröhrchen direkt auf der gewünschten Oberfläche wachsen. Praktikabler soll nun allerdings ein weiteres Produkt sein, dem die Entwickler den Namen [Vantablack S-VIS](#) gaben. Es lässt

sich offenbar mit einem handelsüblichen Sprühgerät auftragen, reicht aber nicht ganz an die Absorptionseigenschaften des Originals heran. ↵

(Spektrum.de, 9. März 2016)



ELEKTROCHEMIE

FARBWECHSEL AUF KNOPFDRUCK

von Roger J. Mortimer

Materialien mit elektrisch umschaltbarer Farbe eröffnen viele faszinierende Anwendungsmöglichkeiten – angefangen vom Blendschutz über preiswerte Displays bis hin zu anpassungsfähiger Tarnkleidung.

Bei Anlegen einer elektrischen Spannung ändern manche Materialien ihre Farbe – ein als Elektrochromie bezeichnetes Phänomen. Wie kommt der Effekt zu Stande? Jede chemische Verbindung absorbiert elektromagnetische Strahlung ganz bestimmter Wellenlängen. Wenn sie Elektronen abgibt oder aufnimmt – Chemiker sprechen von einer Oxidation oder Reduktion –, ändert sich dieses charakteristische Absorptionsspektrum. Bei elektrochromen Stoffen betrifft die Änderung den sichtbaren Spektralbereich, so dass die Farbe wechselt.

Damit der Effekt auftritt, muss das Material in eine elektrochemische Zelle integriert sein. Entweder befindet es sich als Beschichtung auf einer Elektrode – eventuell auch auf beiden –, oder es liegt in gelöster Form im Elektrolyten vor. Das Laden und Entladen der elektrochemischen Zelle geht mit der Oxidation oder Reduktion des

Materials und dem entsprechenden Farbumschlag einher.

Es gibt bereits erste kommerzielle elektrochrome Geräte oder kurz ECDs (nach englisch: electrochromic devices). Dazu gehören Autospiegel mit automatisch funktionierendem Blendschutz oder Flugzeugfenster, die sich per Knopfdruck abdunkeln lassen. Zahlreiche andere Geräte sind in Entwicklung – darunter vielfarbige Displays, Sonnenbrillen, Tarnanzüge und Gewebe mit chamäleonartigen Eigenschaften. Elektrochrome Materialien könnten auch Energie sparen helfen, indem sie etwa als Beschichtung auf dem Dach eines Gebäudes zwischen einer Wärme absorbierenden dunklen Farbe im Winter und einer reflektierenden hellen im Sommer wechseln.

Ein Vorteil von ECDs ist ihr niedriger Energieverbrauch. Nach dem Farbwechsel bleibt der neue Oxidationszustand völlig ohne oder mit nur sehr geringer Energiezufuhr erhalten. Zudem ist meist ein stu-

AUF EINEN BLICK

Elektrochromie

1 Elektrochrome Stoffe lassen sich elektrisch zwischen verschiedenen Farben hin und her schalten. Der Effekt beruht auf einer Änderung der **Lichtabsorption** durch **strominduzierte Oxidations- oder Reduktionsprozesse**.

2 Inzwischen decken elektrochrome Stoffe das gesamte Farbspektrum ab. Außerdem sind sie **preiswert** und **verbrauchen wenig Strom**. Das macht sie für viele Anwendungen attraktiv. Allerdings sind ihre Schaltzeiten noch relativ lang.

3 Zu den **ersten kommerziellen Produkten** zählen Rückspiegel mit automatischem **Blendschutz** und Flugzeugfenster, die sich **elektrisch abdunkeln** lassen.

fenloser Übergang zwischen einzelnen Farbschattierungen oder -intensitäten möglich, wozu sonst ganze Serien von Farbfiltern nötig wären. Dank jüngster Fortschritte in der Elektrodentechnologie ließen sich die Schaltzeiten auf bis zu 0,2 Sekunden verkürzen, was für viele praktische Zwecke ausreicht.

Übergangsmetalloxide und Viologene

Die Elektrochromie ist schon seit dem frühen 19. Jahrhundert bekannt. Doch erst in den 1960er Jahren gelang es, den genauen Mechanismus aufzuklären. Seither wurden fünf verschiedene Klassen von elektrochromen Werkstoffen entwickelt: Metalloxide, Viologene, konjugierte Polymere, Koordinationsverbindungen und Substanzen, die sich vom Berliner Blau ableiten.

Die Oxide einiger Übergangsmetalle – sie stehen in den Nebengruppen im mittleren Teil des Periodensystems – lassen sich elektrochemisch zwischen blassen und farbintensiven Zuständen umschalten. Bei letzteren handelt es sich in der Regel um die reduzierte Form.

Das Paradebeispiel für diese Klasse elektrochromer Werkstoffe ist Wolframoxid (WO_3). Darin hat Wolfram formal sechs

Elektronen an die drei Sauerstoffatome abgegeben und liegt deshalb in der Oxidationsstufe +VI vor. Tatsächlich aber sind diese Elektronen nur teilweise auf den Bindungspartner übergegangen. Das Wolfram trägt also in Wahrheit eine deutlich geringere positive Ladung als +VI. Um eine Verwechslung zu vermeiden, schreiben Chemiker die Oxidationsstufe deshalb mit römischen Ziffern als W^{VI} .

WO_3 ist als dünne Schicht blassgelb, weil seine energetisch tiefste elektronische Absorptionsbande im ultravioletten Bereich liegt. Durch die elektrochemische Reaktion werden einige Wolframatome reduziert. Sie nehmen dabei ein Elektron auf, so dass ihre Oxidationsstufe sinkt und sie in den Zustand W^{V} übergehen. Dieses Elektron kann nun auf ein benachbartes W^{VI} -Atom wechseln. Dazu muss es allerdings ein Lichtquant aus dem sichtbaren Spektralbereich absorbieren. Aus diesem Grund erscheint das reduzierte Oxid farbig.

Wenn nur wenige Wolframatome in der Oxidationsstufe V vorliegen, erscheint eine dünne WO_3 -Schicht tiefblau und lässt sich durch Anlegen einer entgegengesetzten elektrischen Spannung wieder entfärben. Bei höheren Anteilen von W^{V} entsteht da-

gegen irreversibel eine metallisch glänzende rote oder goldene »Bronze«. Ihre Farbe röhrt hauptsächlich von der Rückübertragung des Elektrons auf das ursprüngliche W^{V} her, bei der ein Lichtquant etwas größerer Wellenlänge ausgesendet wird, als bei der Abgabe zuvor absorbiert worden ist.

Eine weitere wichtige Klasse elektrochromer Substanzen sind die Viologene. Es handelt sich um salzartige Verbindungen, die sich vom 4-4'-Bipyridin ableiten. In dieser organischen Verbindung sind zwei benzolartige Sechsringe miteinander verknüpft, die jeweils fünf Kohlenstoffatome und ein Stickstoffatom enthalten. Dessen Position wird durch die Zahlen wiedergegeben, wobei die Nummerierung jeweils an der Verknüpfungsstelle der beiden Ringe beginnt.

Neben ihrem elektrochromen Verhalten haben Viologene weitere nützliche Eigenschaften. So wirken sie herbizid; Viologen zählt unter dem Handelsnamen Paraquat zu den weltweit meistverwendeten Herbiziden.

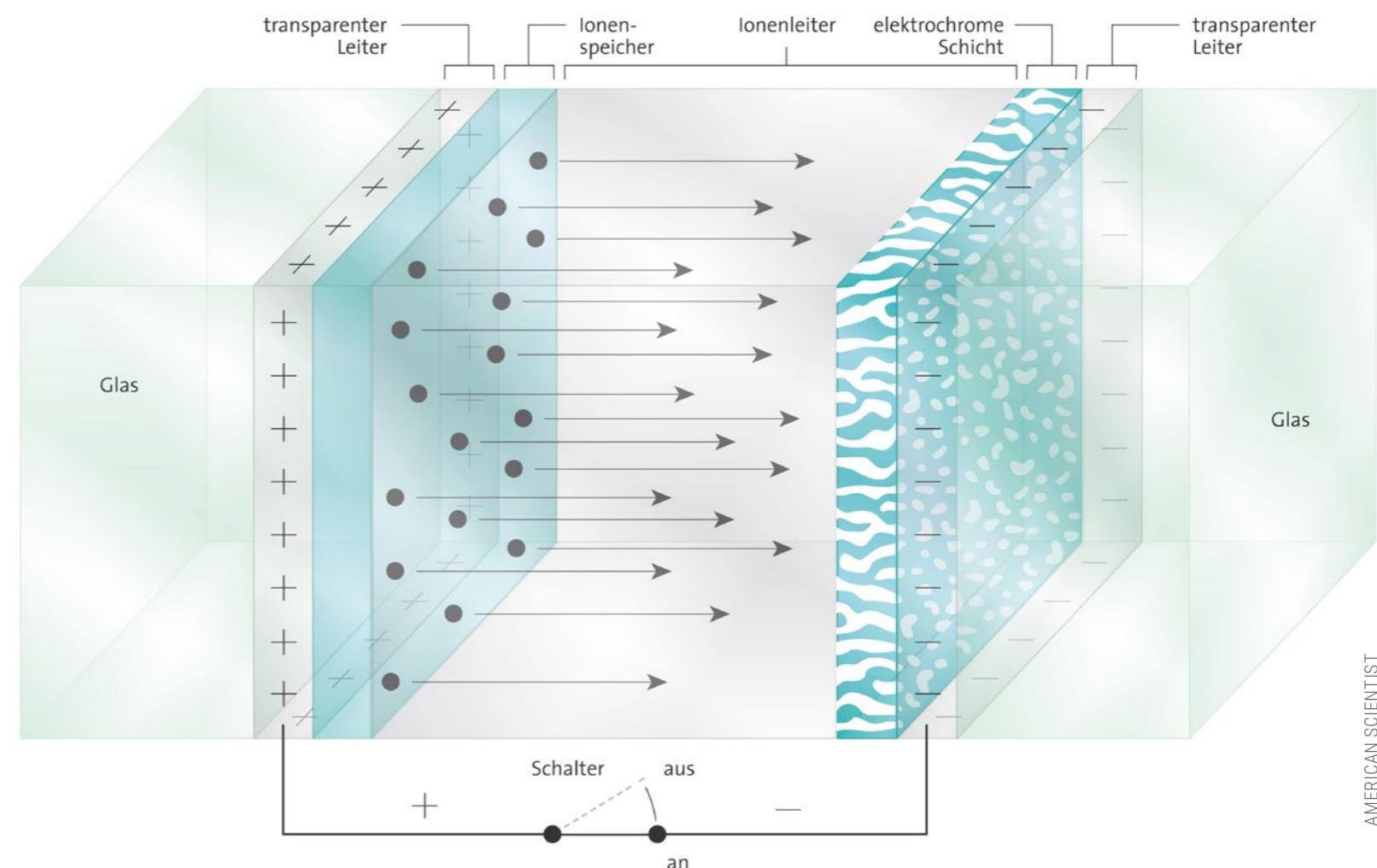
4-4'-Bipyridin ist leicht herstellbar und einfach zu handhaben, weshalb die elektrochromen Viologene intensiv erforscht wurden. Ihre Stammverbindung ist das

Methylviologen, genauer das N-N'-Dimethyl-4-4°-bipyridylium-Ion. Darin tragen die beiden Stickstoffatome jeweils eine Methylgruppe (CH_3) sowie eine positive Ladung. Andere einfache, symmetrische Bipyridylium-Verbindungen werden substituierte Viologene genannt, da in ihnen die Methylgruppen durch andere Alkylgruppen – sie haben die allgemeine Zusammensetzung $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}$, also etwa C_2H_5 oder C_3H_7 – ersetzt sind.

Von den drei üblichen Oxidationszuständen ist das Di-Kation – mit zwei positiven Ladungen – in reinem Zustand farblos. Reduktion führt zunächst zu einem so genannten Radikalkation, das ein ungepaartes Elektron enthält. Üblicherweise sind solche Verbindungen hochreakтив. In diesem Fall erweist sich das Radikal jedoch als recht beständig. Wegen der besonderen Bindungsverhältnisse innerhalb der beiden Sechsringe ist das ungepaarte Elektron nämlich frei darin beweglich. Außerdem verteilt sich die verbleibende einfach positive Ladung gleichmäßig auf beide Stickstoffatome. Das ergibt eine ausgewogene Elektronenstruktur und erklärt die ungewöhnliche Stabilität des Moleküls. Wegen der Beweglichkeit der Ladung sowie des un-

Schichten eines elektrochromen Geräts

Ein elektrochromes Gerät oder kurz ECD (nach englisch: electrochromic device) besteht aus mehreren Schichten. Im hier gezeigten Fall arbeitet es im absorbierenden/transmittierenden Modus, und die Substanz, welche die Farbe wechselt, liegt in Form eines Feststoffs vor. Als Elektroden dienen transparente Leiter wie Indiumoxid auf einer glasartigen Unterlage. Auf einer von ihnen wird das elektrochrome Material aufgetragen, auf die andere eine Schicht, die Ionen aufnehmen und abgeben kann. Zwischen beiden befindet sich ein Elektrolyt. Durch ihn wandern die Ionen (schwarze Punkte) beim Schließen des Stromkreises von der positiven zur negativen Elektrode. Dabei ändern sie die Farbe der elektrochromen Schicht.



gepaarten Elektrons sind die Radikalkationen der Viologene außerdem intensiv gefärbt, absorbieren also sichtbares Licht einer bestimmten Wellenlänge sehr stark. Durch passende Wahl der am Stickstoff hängenden Atomgruppen, welche die Energieniveaus für die Molekülorbitale beeinflussen, lässt sich die Farbe des Radikalkations variieren. Methyl- oder andere Alkylgruppen ergeben eine blauviolette Farbe. Eine Zyanophenylgruppe ($C_6H_4 - C \equiv N$) sorgt dagegen für ein intensives Grün. Allerdings ist darauf zu achten, dass die Viologene nicht über das Radikalkation hinaus zu einer neutralen chinonartigen Verbindung reduziert werden. Diese ist nämlich wieder farblos, weil sie weder eine verschiebbare Ladung noch ein frei bewegliches unpaareres Elektron enthält.

Auch Kunststoffe können elektrochrom sein, wenn sich darin Einfach- und Doppelbindungen regelmäßig abwechseln. Eine Doppelbindung zwischen zwei Kohlenstoffatomen besteht aus einer Sigma-Bindung, in der sich zwei so genannte sp^2 -Orbitale – Hybride aus einem s- und zwei p-Orbitalen – frontal durchdringen, und einer Pi-Bindung, in der zwei hantelförmige p-Orbitale seitlich überlappen.

Konjugierte leitfähige Polymere

In einem organischen Molekül mit abwechselnden Einfach- und Doppelbindungen verschmelzen die p-Orbitale der beteiligten Kohlenstoffatome zu einem großen gemeinsamen Aufenthaltsraum, in dem sich die betreffenden p-Elektronen frei bewegen können. Die Bindungsverhältnisse in einem solchen »konjugierten Pi-System« lassen sich dann nur noch durch Grenzformeln beschreiben, zwischen denen das Molekül quasi oszilliert – eine Besonderheit, welche die Chemiker als Resonanz oder Mesomerie bezeichnen. Sie senkt die Energie des Systems und stabilisiert damit das Molekül.

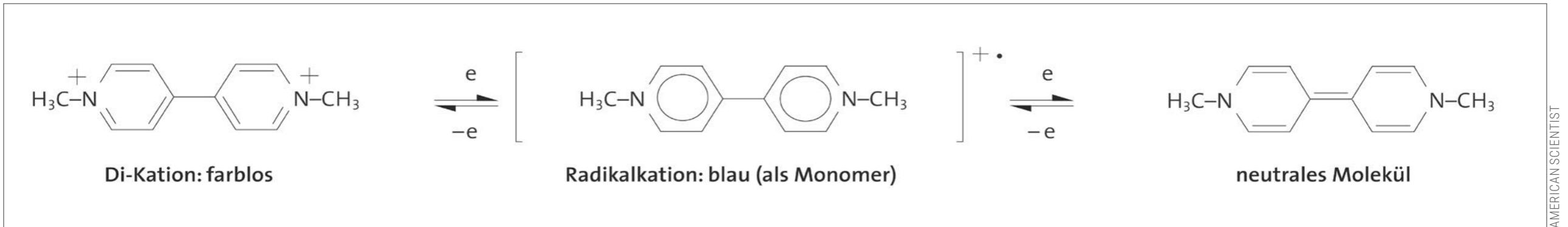
Das Paradebeispiel solcher resonanzstabilisierten Moleküle mit konjugierten Doppelbindungen sind die aromatischen Verbindungen mit Benzol als Prototyp. In dessen Sechsring wechseln sich drei Einfach- mit drei Doppelbindungen ab. Die zuvor erwähnten Viologene enthalten dasselbe konjugierte Pi-System, das sich hier sogar über zwei Sechsringe erstreckt. Dass jeweils ein Kohlenstoff- durch ein Stickstoffatom ersetzt ist, stört die Resonanz nicht.

Ein konjugiertes aromatisches Pi-System findet sich auch in Fünfringen, die aus

vier Kohlenstoffatomen und einem anderen Atom wie Schwefel (im Thiophen), Stickstoff (im Pyrrol) oder Sauerstoff (im Furan) bestehen. Das Gleiche gilt für Verbindungen, in denen zwei Ringe über eine gemeinsame Kante verknüpft sind – etwa Indol (ein Benzolring plus ein Pyrrol), Carbazol (zwei Benzolringe mit einem Pyrrol dazwischen) und Azulen (ein Sieben- plus ein Fünfring). Ein weiteres Beispiel für ein konjugiertes, resonanzstabilisiertes System ist Anilin, in dem ein Benzolring eine Aminogruppe (NH_2) trägt. Durch chemische oder elektrochemische Oxidation dieser Substanzen erhält man konjugierte, elektrisch leitfähige Kunststoffe.

Viele dieser Substanzen sind als dünne Schichten elektrochrom, wobei das Hauptinteresse in den letzten Jahren auf den Polymeren der Thiophene und Pyrrole lag. Im oxidierten, leitenden Zustand enthalten sie »delokalisierte« positive Ladungen, die sich frei durch das Pi-System bewegen können. Negative Gegenionen gleichen die Ladungsbilanz aus.

Die Polymere lassen sich elektrochemisch reduzieren, wenn man sie in Kontakt mit einer Elektrolytlösung bringt, so dass die Gegenionen dorthin entweichen



oder Kationen daraus einwandern können. Dabei wird das Molekül zum Isolator, weil die Delokalisation der Elektronen – und damit die Resonanz – verloren geht.

Welche Farben die beiden Formen haben, hängt von der Energiedifferenz zwischen dem höchsten besetzten und dem tiefsten unbesetzten Elektronenniveau in der reduzierten Verbindung ab. Beträgt sie drei Elektronvolt oder mehr, kann nur ultraviolettes Licht mit einer Wellenlänge von 400 Nanometern oder weniger ein Elektron aus dem besetzten in das unbesetzte Niveau anheben. Deshalb erscheint die reduzierte Form farblos und transparent. In der oxidierten Form dagegen ist die Energiedifferenz wegen der Resonanzstabilisierung geringer. Daher absorbiert diese Form im Allgemeinen sichtbare Strahlung und ist intensiv gefärbt.

Beträgt die Energiedifferenz zwischen dem höchsten besetzten und tiefsten un-

besetzten Elektronenniveau dagegen nur 1,7 bis 1,9 Elektronvolt, so kann auch sichtbares Licht einer Wellenlänge von 650 bis 730 Nanometern ein Elektron anheben. In diesem Fall ist die reduzierte Verbindung also farbig. Bei der Oxidation verringert sich auch hier die Energiedifferenz, so dass selbst Infrarotstrahlung zur Anregung ausreicht. Zugleich ändert sich die Absorption im gesamten sichtbaren Bereich, weshalb die Verbindung bei der Oxidation eine andere Farbe annimmt.

Metallkomplexe und Berliner Blau

Auch so genannte Metallkomplexe sind teilweise elektrochrom. Mitglieder dieser Substanzklasse bestehen aus einem Metallion, um das sich in streng geometrischer Anordnung nichtmetallische Atome oder Moleküle gruppieren. Diese »Liganden« stellen einem leeren Orbital des zentralen Metallions ein einsames Elektronenpaar

UMFÄRBUNG VON VIOLOGEN

Viologen färbt sich beim Anlegen einer elektrischen Spannung. Das symmetrische Molekül enthält zwei gekoppelte Benzolringe, in denen jeweils ein Kohlenstoff- durch ein Stickstoffatom (N) mit angehängter Methylgruppe (CH_3) ersetzt ist. Jedes Stickstoffatom trägt eine positive Ladung (links). Wird Viologen reduziert, nimmt es ein Elektron auf und wird zu einem Radikalkation: einem einfach positiv geladenen Ion mit einem ungepaarten Elektron. Dieses hat ebenso wie die positive Ladung keine feste Position, sondern verteilt sich über das gesamte Doppelring- system (Mitte). Das Radikalkation erscheint blau. Die weitere Reduktion mit einem zweiten Elektron ergibt ein chinonartiges neutrales Molekül (rechts), das wie das Viologen selbst farblos ist.

zur Verfügung. Chemiker sprechen von koordinativer Bindung. In elektrochromen Metallkomplexen fungiert meist ein 2-2'-Bipyridin als Ligand, das sich vom Grundgerüst der Viologene nur durch die Position des Stickstoffatoms in den beiden verknüpften Sechsringen unterscheidet. Als Metalle können beispielsweise Eisen, Ruthenium oder Osmium dienen, die dann in der Oxidationsstufe II vorliegen.

Metallkomplexe sind oft farbig und lassen sich problemlos oxidieren oder reduzieren, ohne dass sich dabei ihre Zusammensetzung und Struktur ändert. Die Energiebarrieren für die Anregung von Elektronen sind niedrig, so dass meist sichtbares Licht absorbiert wird. Die stärksten »Absorptionsbanden« entsprechen so genannten Charge-Transfer-Übergängen, bei denen ein Elektron vom Zentralatom zum Liganden, von einem Liganden zum anderen oder von einem Metallion zum benachbarten wechselt. Durch Oxidation oder Reduktion eines Metallkomplexes ändern sich die Anregungsenergien, so dass sich die Absorptionsbanden verschieben. Manchmal findet danach überhaupt keine Absorption im sichtbaren Bereich mehr statt – etwa wenn nach Erhöhen der Oxida-

tionsstufe des Zentralatoms von II auf III kein Charge-Transfer vom Metall zum Liganden mehr möglich ist und die entsprechende Absorptionsbande verschwindet.

Zu den elektrochromen Metallkomplexen gehören auch Pigmente aus der industriell bedeutsamen Klasse der Metallophthalocyanine. Sie sind eng mit natürlichen Farbstoffen wie Hämoglobin oder Chlorophyll verwandt. Das als Ligand fungierende Phthalozyanin sieht aus wie ein vierblättriges Kleeblatt. Allerdings ist es innen hohl. Am Rand dieses Hohlraums sitzen vier Stickstoffatome, die eine koordinative Bindung mit dem Zentralatom eingehen. Ein Beispiel für einen solchen Metallkomplex ist das Lutetium bis phthalozyanin. Dünne Schichten dieses Materials zeichnen sich durch das seltene Phänomen der Polyelektrochromie aus: Bei Oxidation wechselt ihre Farbe von einem intensiven Grün zu Gelbbraun und Rot. Reduktion lässt die Substanz blau und schließlich blauviolett werden.

Einer der wichtigsten elektrochromen Metallkomplexe ist das schon seit Anfang des 18. Jahrhunderts bekannte Berliner Blau. Als erstes modernes synthetisches Pigment hat es eine lange Geschichte bei

der Herstellung von Anstrichfarben, Lacken, Druckfarben, Schreibmaschinenbändern und Kohlepapier. Seine chemische Formel lautet $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$. Als Metallkomplex enthält es das Hexacyanoferrat-Anion, in dem sich sechs Cyanoliganden, die aus Kohlenstoff und einem dreifach daran gebundenen Stickstoff bestehen, um ein Eisenion gruppieren.

Im Berliner Blau liegt wie im reduzierten WO_3 das Metall in zwei verschiedenen Oxidationsstufen vor, nämlich II und III. Chemiker sprechen von einer gemischtvalenten Verbindung. Der Übergang eines Elektrons von Fe^{II} auf Fe^{III} ist für die intensive blaue Farbe des Pigments verantwortlich. Bei Oxidation oder Reduktion bleicht es aus und erscheint grünlich gelb. Auch andere Pigmente aus der Gruppe der Metallcyanometallate sind gemischtvalent und elektrochrom.

Die Geschichte der Elektrochromie

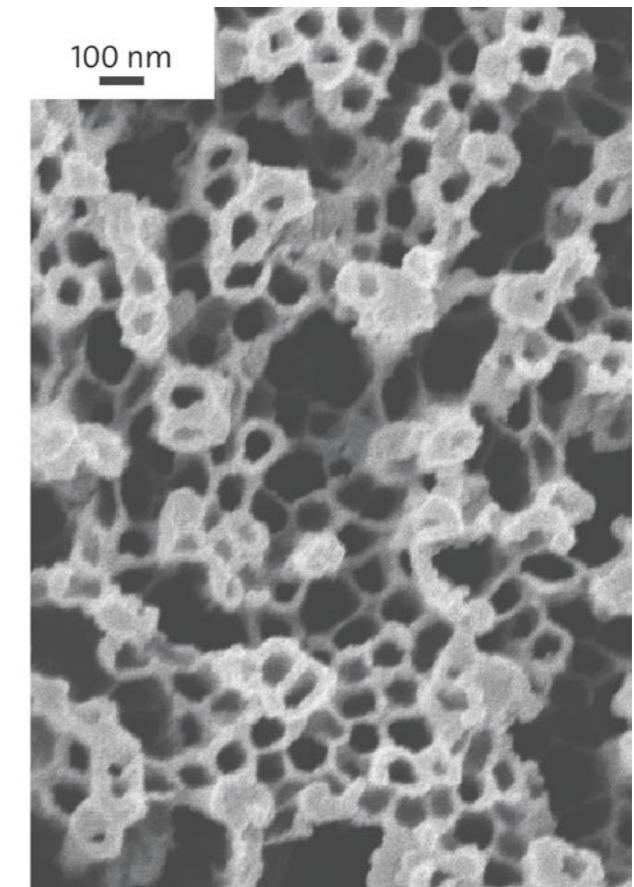
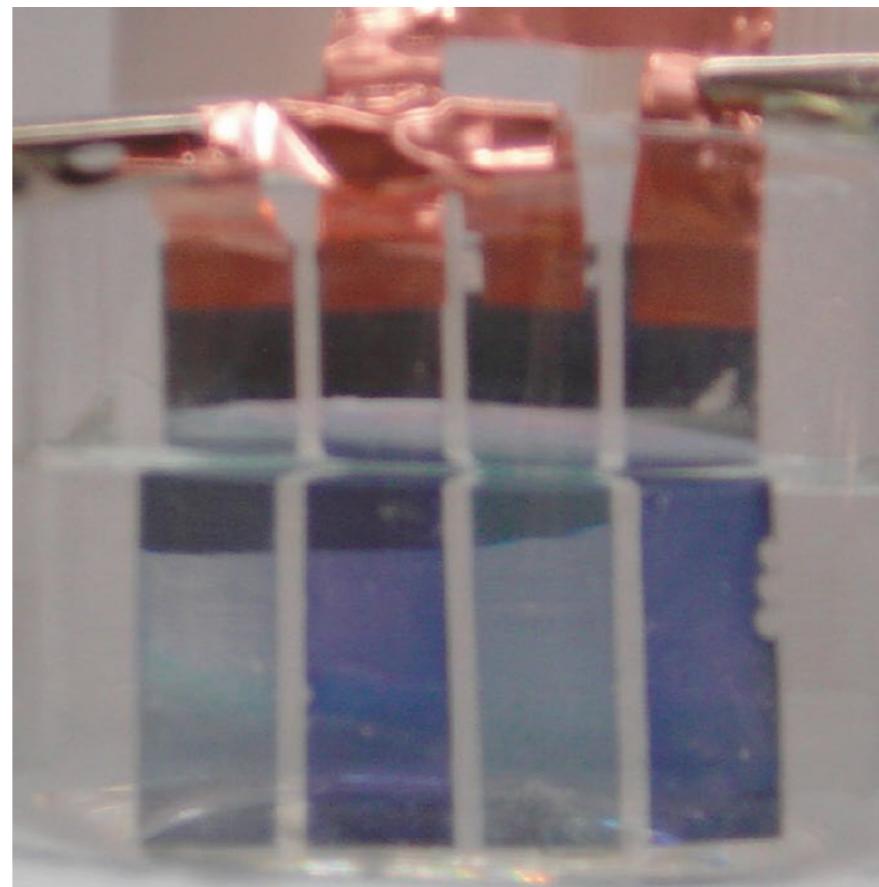
Werkstoffe, die bei Zufuhr oder Entzug von Elektronen die Farbe wechseln, sind schon seit dem frühen 19. Jahrhundert bekannt. Der schwedische Chemiker Jöns Jacob Berzelius (1779–1848) berichtete 1815, dass sich Wolframoxid tiefblau färbt, wenn man es

in einem trockenen Wasserstoffstrom erwärmt. 1824 erreichte sein jüngerer deutscher Kollege Friedrich Wöhler (1800–1882) denselben Farbumschlag durch Zugabe von metallischem Natrium. Nach modernem Verständnis handelt es sich in beiden Fällen um eine Reduktion. Wöhler stellte auch fest, dass das Reaktionsprodukt bei der Umsetzung mit Lithium metallisch glänzt. Als Grund vermutete er fälschlich die Bildung einer Metallegierung und sprach deshalb von »Wolframbronzen« – in Anlehnung an die aus Kupfer und Zinn bestehende Bronze, die zu den wichtigsten und bekanntesten Metallegierungen zählt. Dieser eigentlich unzutreffende Begriff hat sich bis heute gehalten.

Im Jahr 1834 ließ der schottische Uhrmacher und Erfinder Alexander Bain (1811–1877) eine primitive Form der Faxübermittlung patentieren, der die elektrochemische Erzeugung von Berliner Blau zu Grunde lag. Dabei ruht ein Stift aus reinem Eisen auf Papier, das mit einer Lösung von gelbem Blutlaugensalz – Kaliumhexazyanoferrat(II) – getränkt war. In einem Stromkreis bilden sich durch Elektrooxidation an der als Pluspol (Anode) geschalteten Eisenspitze Eisen(III)-Ionen, die sich

Elektrochrome Polymere (oxidiert und reduziert)

Per Walzdruckverfahren beschichtete Reynolds' Gruppe eine PET-Folie, die zwei aufgedruckte Photovoltaikzellen für die Energieversorgung enthielt, mit einem elektrochromen Polymer. Im neutralen Zustand ist es magentafarben, bei Oxidation bleicht es aus. Der Farbwechsel beschleunigt sich, wenn elektrochrome Polymere als hohle Nanoröhren – rechts in einer rasterelektronenmikroskopischen Aufnahme – auf den Elektroden aufgewachsen sind. Auf dem Foto links tauchen vier mit solchen Nanoröhren beschichtete Kupferbleche in einen Elektrolyten ein. Jeweils zwei sind mit dem Plus- beziehungsweise Minuspol einer Batterie verbunden. Erstere liegen dadurch im blassgrauen oxidierten und Letztere im dunkelblauen reduzierten Zustand vor.



CHO, S. I. ET AL.: ELECTROCHEMICAL SYNTHESIS OF POLY (3,4-ETHYLENEDIOXYTHIOPHENE) NANOTUBES TOWARDS FAST WINDOW-TYPE ELECTROCHROMIC DEVICES. IN: NANOTECHNOLOGY 18, S. 405705, 2007; MIT FRDL. GEN. VON IOP PUBLISHING

mit den Hexacyanoferrat(II)-Ionen im Papier zu Berliner Blau verbinden. Auf diese Weise hinterlässt die positive Eisenelektrode bei jeder Berührung auf der Unterlage eine dunkelblaue Spur.

Ähnlich funktionierte die Cyanotypie: eine frühe Form der Fotografie, die Sir John Frederick William Herschel (1792-1871) 1842 entwickelte. In abgewandelter Form findet sie sich später in der Diazotypie, die Ingenieure und Architekten ab den 1880er Jahren in großem Umfang einsetzten, um Konstruktionspläne und Bauzeichnungen zu kopieren. Das Verfahren, das sich bis ins späte 20. Jahrhundert hielte, wurde unter dem Namen »Blaupause« bekannt – ein Begriff, der noch heute als Synonym für Plan steht.

Aus dem Jahr 1930 stammt der erste Bericht über die Blaufärbung von Wolframoxid durch elektrochemische – und nicht wie bis dahin chemische – Reduktion an einer Kathode. 1942 wurde ein Patent für elektrochromes Drucken erteilt. Das dazu verwendete »Elektrolyt-Schreibpapier« war mit Wolfram- und/oder Molybdän-oxidteilchen imprägniert. Dabei wirkt die Elektrode wie ein Stift und erzeugt beim Gleiten über das Papier ein blaugraues Bild.

Im Jahr 1951 gelangen Eugene O. Brimm und seinen Kollegen von der Union Carbide & Carbon Corporation in New York reversible Farbwechsel mit in wässrige Säure getauchtem Natriumwolframoxid. Zwei Jahre später präsentierte Thaddeus Kraus bei der Balzers AG in Liechtenstein einen Bildschirm, der auf dem reversiblen Farbwechsel von Wolframoxid beruhte.

Den Begriff Elektrochromie prägte 1961 John R. Platt von der University of Chicago. Allerdings bezeichnete er damit ein anderes Phänomen: die Verschiebung und Aufspaltung der Absorptionslinien von Molekülen durch Anlegen eines starken elektrischen Felds, gemeinhin als Stark-Effekt bekannt.

Als erste Firma arbeitete Philips ab den frühen 1960er Jahren an einem kommerziellen elektrochromen Produkt und sicherte sich dafür 1973 ein Patent. Es handelte sich um einen Bildschirm, der ein organisches Viologen namens 1-1'-n-Heptyl-4-4'-bipyridium in wässriger Lösung verwendete.

Heute schreibt man das erste ECD meist dem Amerikaner Satyen K. Deb zu. Er erzeugte 1969, damals bei der American Cyanamid Company in Stanford (Kalifornien), eine blaue Farbe, indem er an eine dün-

ne, durch Vakuumabscheidung auf Quarz hergestellte Schicht von Wolframoxid ein starkes elektrisches Feld von 1000 Volt pro Zentimeter anlegte.

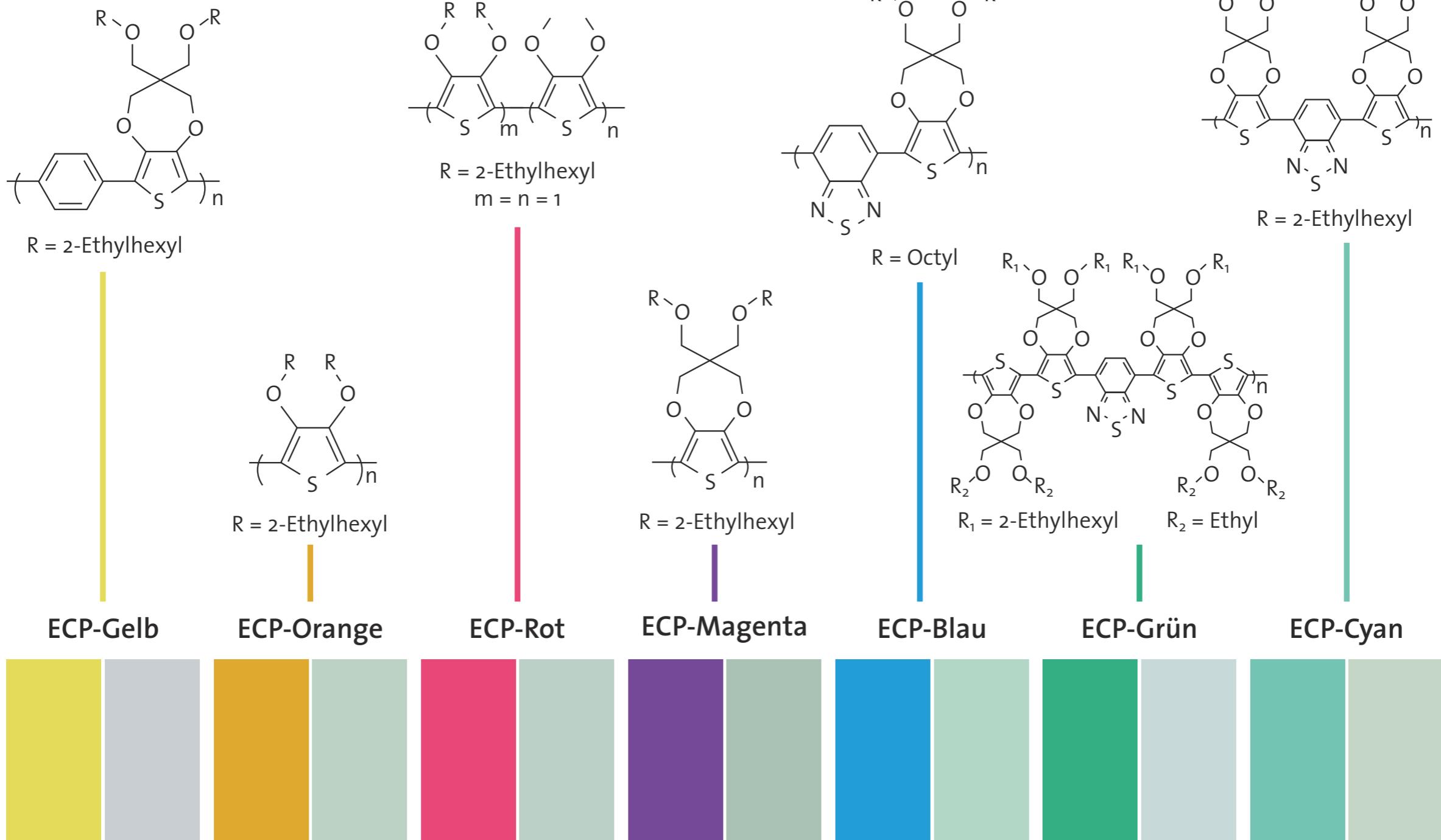
Deb nannte den Effekt Elektrofotografie. Seine Erklärung dafür war allerdings falsch. Er führte die Farbe auf Leerstellen in den Kristallen zurück, an denen sich statt eines Sauerstoffions ein Elektron befindet. Solche so genannten F-Zentren absorbieren sichtbares Licht und waren von Metallhalogeniden – zu denen etwa das Natriumchlorid (Kochsalz) gehört – schon länger bekannt. Dort sorgen sie für eine Verfärbung beim Bestrahlen oder Erhitzen in einem starken elektrischen Feld.

Wegen der falschen Interpretation des ersten Versuchs gilt heute meist Debs spätere Publikation von 1973 als wahre Geburtsstunde der Elektrochromie; denn dort beschreibt der Wissenschaftler eine elektrochrome Vorrichtung, in der eine in einen Elektrolyten getauchte Wolframoxidschicht elektrochemisch reduziert wird. Seit den 1970er Jahren sind solche Systeme Gegenstand eingehender Forschung. Insbesondere wurden mit ihnen diverse Prototypen von »intelligenten« Fenstern entwickelt.

Erzeugung jeder beliebigen Farbe durch elektrochrome Polymere

Durch Kombination der von John Reynolds und seinem Team am Georgia Institute of Technology in Atlanta geschaffenen Serie elektrochromer Polymere lässt sich beim Anlegen einer Spannung jede be-

liebige Farbe erzeugen. Der Komplexitätsgrad der Substanzen variiert stark (siehe Strukturformel). Sie sind im neutralen Zustand farbig und im oxidierten blassgrau (siehe Farbkästen).



Als Vernon D. Neff von der Kent State University in Ohio 1978 die Herstellung dünner Filme aus Berliner Blau und ihre elektrochemischen Farbänderungen beschrieb, weckte er das Interesse an den Cyanometallaten. In die späten 1970er Jahre fallen auch frühe Untersuchungen zur Elektrochromie organischer Materialien. So erschien 1979 die erste Veröffentlichung über konjugierte leitende Polymere, in der G. Brian Street und seine Mitarbeiter bei IBM in San José die Elektrosynthese einer dünnen Schicht aus Polypyrrol beschrieben. Solche Polymerfilme lassen sich inzwischen allerdings besser durch elektrochemische Oxidation des gelösten Monomers oder Polymers herstellen, wobei sich das letztgenannte Verfahren besonders für die Massenproduktion eignet.

Mit ihnen beschäftigte sich seit den 1980er Jahren vor allem die Forschungsgruppe um John Reynolds, heute am Georgia Institute of Technology in Atlanta. Das Team ergründete systematisch die Zusammenhänge zwischen Struktur und Eigenschaften elektrochromer Polymere – speziell solchen auf Thiophenbasis. So schuf es durch gezielte Variation der Zusammensetzung vor drei Jahren erstmals einen Satz

derartiger Werkstoffe, der die gesamte Palette möglicher Farben abdeckt – ein Durchbruch, der eine Fülle preiswerter elektronischer Displays und getönter Scheiben für den täglichen Gebrauch erwarten lässt.

Elektrochrome Geräte

ECDs funktionieren als wiederaufladbare elektrochemische Zellen mit mindestens zwei Elektroden. Diese sind durch einen Elektrolyten in flüssiger, gelartiger oder fester Form getrennt. Der Farbstoff kann entweder gelöst oder als dünne Schicht vorliegen, und der Farbwechsel findet durch Zufuhr oder Entzug von Elektronen beim Anlegen einer geeigneten Spannung statt.

Eine der Elektroden muss stets transparent sein. Üblicherweise besteht sie aus dotiertem Indiumoxid, das als dünne Schicht auf Glas oder den flexiblen Kunststoff Polyethylenterephthalat (PET) aufgebracht wird. Bei Geräten wie Brillen, Sonnenblenden in Autos oder intelligenten Fensterscheiben, die im absorbierenden/transmittierenden Modus arbeiten, muss auch die zweite Elektrode Licht durchlassen. Dagegen besteht sie bei reflektierenden ECDs – wie Displays und blendfreien Spiegeln –

meist aus poliertem Metall wie Chrom oder Silber.

In absorbierenden/transmittierenden Geräten vollzieht sich der entscheidende Farbwechsel an der so genannten Primärelektrode. An der Sekundärelektrode befindet sich dann entweder gar kein Farbstoff oder einer, der synchron mit dem ersten annähernd dieselbe Farbe annimmt, was den Kontrast zwischen dunklem und hellem Zustand des ECDs erhöht. Eine solche Kombination kann beispielsweise aus Polyethylendioxathiophen (PEDOT) und Polybutylviologen bestehen; denn das Erste schlägt bei der Oxidation an der Anode von hell- nach dunkelblau um und das Zweite bei der komplementär dazu stattfindenden Reduktion an der Kathode von farblos nach purpur. Ein weiteres solches Paar sind Berliner Blau und Wolframoxid – mit einem Farbwechsel von farblos nach blau bei Oxidation beziehungsweise Reduktion.

Mit dieser Kombination arbeitet zum Beispiel das intelligente Fenster der Firma Gesimat in Berlin-Köpenick, dessen elektrochrome Schichten durch Polyvinylbutyral – einen festen Polymerelektrolyten – getrennt sind. Wenn die mit Berliner Blau beschichtete Elektrode als Anode und die

mit Wolframoxid als Kathode geschaltet ist, befinden sich beide Materialien in ihrem blauen Zustand. Kehrt man die Polarität um, entfärben sie sich. Kürzlich hat Ge simat eine Pilotfertigungsstraße für die Herstellung bis zu 2,4 mal 1 Meter großer elektrochromer Glasbeschichtungen in Betrieb genommen.

Das bislang kommerziell erfolgreichste ECD ist ein sich automatisch verdunkelnder Rückspiegel der Gentex Corporation aus Zeeland (Michigan). In dem Blendschutzsystem namens Night Vision Safety (NVS) bilden ein mit zinndotiertem Indiumoxid beschichtetes Glasplättchen und eine reflektierende Metallocberfläche die beiden Elektroden. Ihr Abstand beträgt nur Bruchteile eines Millimeters. Den schmalen Raum dazwischen füllt ein gelartiger Elektrolyt mit zwei elektrochromen Komponenten. Über deren genaue Zusammensetzung schweigt sich die Firma aus, doch dürfte die eine ein substituiertes Viologen sein, das sich bei Reduktion blau färbt. Bei der anderen handelt es sich vermutlich um einen Farbstoff, der sich vom Thiazin oder Phenylendiamin ableitet – Benzolringen, bei denen entweder ein Kohlenstoffatom durch Schwefel und das gegenüberliegen-

de durch Stickstoff ersetzt ist oder an zwei gegenüberliegenden Ecken Aminogruppen sitzen. Er erscheint im oxidierten Zustand grün.

Beim Anlegen einer Spannung wandern die elektrochromen Komponenten zu ihren jeweiligen Elektroden, wo sie reduziert beziehungsweise oxidiert werden. Dadurch färbt sich der Spiegel intensiv blaugrün. So vermindert sich die Lichtintensität, während zugleich gewisse Wellenlängenbereiche komplett herausgefiltert werden. Nach dem Ausschalten der Spannung wandern die Oxidations- und Reduktionsprodukte von ihrer jeweiligen Elektrode zurück ins Innere des Gels. Dort treffen sie aufeinander und verwandeln sich durch Elektronenaustausch wieder in ihre ursprüngliche, farblose Form. Diese Art von ECD benötigt daher einen ständigen geringen Stromfluss, damit der farbige Zustand bestehen bleibt. Zum Ausgleich dafür ist keine Entfärbung auf elektrischem Weg erforderlich, da sie beim Ausschalten von allein stattfindet. Dies steht in Einklang mit US-Vorschriften, wonach der Spiegel bei Stromausfall den ungetrübten Zustand annehmen muss.

Glossar

ORBITAL:

Aufenthaltsraum eines Elektrons; s-Orbitale sind kugel-, p-Orbitale hantelförmig

OXIDATION:

Abgabe von Elektronen

REDUKTION:

Aufnahme von Elektronen

ELEKTROLYT:

Ionen leitendes Medium; kann eine Lösung, ein Gel oder ein Festkörper sein

Die automatische Regelung beim NVS-Spiegel arbeitet mit zwei Detektoren. Einer ist nach hinten gerichtet und registriert Blendlicht. Damit das Gerät nicht tagsüber anspringt, ermittelt der zweite Detektor, ob auch von vorne Helligkeit einfällt. Solange dies der Fall ist, bleibt das Verdunkelungssystem abgeschaltet.

In allen Farben des Regenbogens

In Kooperation mit der Firma PPG Aerospace in Pittsburgh (Pennsylvania) hat Gentex inzwischen seine Produktpalette um abdunkelbare Fenster für Flugzeuge erweitert. Sie sollen die herkömmlichen Plastikjalousien ersetzen und so mehr Komfort bieten. PPG Aerospace vermarktet das erste elektrochrome Fenster der Welt unter dem Namen Alteos Interactive Window Systems. Es lässt sich per Knopfdruck stufenlos zwischen einem hellen, klaren und einem völlig dunklen Zustand umschalten. Eingebaut ist es im Boeing 787 Dreamliner und im Hawker Beechcraft King Air 350i, einem Geschäftsflugzeug.

Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet elektrochromer Werkstoffe schreiten rapide voran. Das gilt sowohl für die Palette der Materialien und Gerätedesigns als

auch für die Bandbreite der Anwendungen. Im Vordergrund der Bestrebungen stehen derzeit großflächige abdunkelbare Fenster, die sich preiswert in hohen Stückzahlen herstellen lassen. Sie könnten den enormen Energieverbrauch von Klimaanlagen in Büros senken helfen – und das bei mehr Komfort.

Verschiedene Gruppen arbeiten seit einiger Zeit daran, die Transparenz elektrochromer Fenster im farblosen Zustand zu verbessern. So haben Kuan-Jiuh Lin und seine Kollegen an Taiwans Nationaluniversität Chung Hsing eine Methode entwickelt, in einem einzigen Schritt Nanodrähte aus Titanoxid auf Glas zu züchten, die so porös sind, dass der Brechungsindex der Fenster niedrig bleibt und sie hochgradig lichtdurchlässig sind. Im abgedunkelten Zustand erscheinen die Scheiben dagegen blassgrau.

Früher galt die Elektrochromie als aussichtsreiche Option für Bildschirme. Aber mit den Flüssigkristallen, die inzwischen den Markt beherrschen, kann sie in absehbarer Zukunft wohl nur bedingt konkurrieren. So sind etwa für Fernseher die Schaltzeiten zu lang. Dennoch könnte die Elektrochromie bei vielfarbigen Displays für

andere Anwendungen wie elektronisches Papier, Schilder oder wiederverwendbare Preisetiketten eine kostengünstige Lösung bieten.

Zum Beispiel gelang es der Gruppe von Reynolds, mit Airbrush-Spritzpistolen oder Tintenstrahldruckern schnell und einfach ECDs herzustellen. Indem die Forscher Lösungen ihrer verschiedenfarbigen elektrochromen Polymere durch Masken sprühten, erzeugten sie mehrlagige Substratmuster, die eine Reihe von Farbtönen darstellen konnten. Vor wenigen Jahren beschichteten Reynolds und seine Kollegen zudem flexible PET-Folien, die gedruckte Photovoltaikmodule enthielten, per Walzdruckverfahren mit ihren Polymeren. So entstand ein biegbares Display, das sich in einer hellen Umgebung selbst mit Strom versorgt.

Die Schaltzeit eines ECDs wird durch die Diffusionsgeschwindigkeit der Gegenionen beim Redoxprozess bestimmt. Sie verkürzt sich folglich, wenn man die Dicke der elektrochromen Schichten und damit die Diffusionsstrecke der Ionen verringert. Bei dünneren Filmen ist der Kontrast jedoch zu gering für eine gut sichtbare Färbung. Sang Bok Lee und seine Kollegen von der

University of Maryland in Baltimore haben jüngst eine Lösung für dieses Problem gefunden. Sie lassen auf der Elektrode hohle Röhren aus elektrochromen Polymeren wachsen, die nur 10 bis 20 Nanometer dicke Wände haben, selbst aber mehrere hundert Nanometer lang sind.

Für die Redoxreaktion brauchen die Ionen lediglich durch die dünnen Wände zu diffundieren. Das führt zu Schaltzeiten in der Größenordnung von zehn Millisekunden. Zugleich besteht dank der Länge der Nanoröhren ein guter Farbkontrast. Um ihn weiter zu erhöhen, entwickelte Lees Gruppe vor zwei Jahren eine Methode zur Erzeugung von Hybridnanoröhren, die aus mehreren Polymeren bestehen. Solche Schichten funktionieren sowohl im reflektierenden als auch im absorbierenden/transmittierenden Modus, wodurch sie sich für Bildschirme und Fenster gleichermaßen eignen. Zu den faszinierenden potenziellen Anwendungen der Elektrochromie gehören auch Textilien, die chamäleonartig ihre Farbe wechseln können – sei es für Tarnkleidung, am Körper tragbare Displays oder schlicht als Modegag. Weil elektrochrome Polymere löslich sind, kann man leicht Gewebe damit einfärben. Den gerin-

gen Strombedarf für den Farbwechsel können biegsame Dünnschichtzellen decken.

Gregory A. Sotzing und seine Gruppe an der University of Connecticut in Storrs haben ein elektrochromes Elastan entwickelt, dessen Farbintensität sich beim Strecken ändert. Der hochgradig dehnbare Kunststoff kann als Elektrode fungieren, wenn er mit leitfähigen Polymeren getränkt wird. Die Forscher trennten zwei Lagen des Gewebes durch einen Film aus Elektrolytgel und bedruckten sie beidseitig mit elektrochromen Polymeren. Das so behandelte Elastan zeigte außen und innen Muster aus unterschiedlichen, reversibel umschaltbaren Farben.

All dies macht deutlich, welches enorme Potenzial in elektrochromen Materialien steckt. Von Anfang an zeichneten sie sich durch geringen Energieverbrauch und niedrige Materialkosten aus. Mit der Erweiterung ihrer Farbpalette, kürzeren Schaltzeiten und einfacheren Herstellungsverfahren konnten sie nun weitere entscheidende Pluspunkte für sich verbuchen. Und so erscheint ihre Zukunft buchstäblich in leuchtenden Farben. ↵

(Spektrum Spezial Physik – Mathematik – Technik, 1/2014)

Deb, S.: Reminiscences on the Discovery of Electrochromic Phenomena in Transition Metal Oxides.

In: Solar Energy Materials & Solar Cells 39, S. 191 – 201, 1995

Granqvist, C. G.: Oxide Electrochromics: An Introduction to Devices and Materials.

In: Solar Energy Materials & Solar Cells 99, S. 1 – 13, 2011

Monk, P. M. S. et al.: Electrochromism and Electrochromic Devices. Cambridge University Press, 2007

Mortimer, R. J.: Electrochromic Materials.

In: Annual Review of Materials Research 41, S. 241 – 268, 2011

Mortimer, R. J. et al.: Electrochromic Organic and Polymeric Materials for Display Applications.

In: Displays 27, S. 2 – 18, 2006

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!

