

**Spektrum**  
der Wissenschaft

**KOMPAKT**

# FARBEN

Wie sie entstehen, wie wir sie sehen

## **Insekten**

Lebendige  
Juwelen

## **Synästhesie**

Mit den Ohren  
sehen

## **Evolution**

Der merkwürdige  
Farbensinn der Primaten



Antje Findekle  
E-Mail: [findekle@spektrum.de](mailto:findekle@spektrum.de)

Liebe Leserin, lieber Leser,  
ein Käfer erzeugt das weißeste Weiß, Materialwissen-  
schaftler erschufen das schwärzeste Schwarz – doch  
im Großen und Ganzen ist unsere Welt vor allem eines:  
bunt. Für unsere Augen zumindest, denn andere Organis-  
men sehen ihre Umgebung anders als wir. Und auch die  
menschliche Farbwahrnehmung ist keine rein rationale  
Angelegenheit: Unser Gemütszustand beeinflusst eben-  
falls, 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

Folgen Sie uns:



**CHEFREDAKTEURE:** Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.), Dr. Uwe Reichert  
**REDAKTIONSLEITER:** Christiane Gelitz, Dr. Hartwig Hanser,  
Dr. Daniel Lingenhöhl  
**ART DIRECTOR DIGITAL:** Marc Grove  
**LAYOUT:** Oliver Gabriel  
**SCHLUSSREDAKTION:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies,  
Katharina Werle  
**BILDREDAKTION:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe  
**PRODUKTMANAGERIN DIGITAL:** Antje Findekle  
**VERLAG:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,  
Tiergartenstr. 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600,  
Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114,  
USt-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](mailto:service@spektrum.de)

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperations-  
partner 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](mailto: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  
autorisieren (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist  
die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzu-  
nehmen: © 2016 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesell-  
schaft 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.

SEITE  
04

SEHSINN  
Der merkwürdige Farbensinn der Primaten



ISTOCK / DIRK FREDER

SEITE  
25

OPTISCHER EFFEKT  
Schönheit im Auge  
des Betrachters



ISTOCK / MOTIVE56

PARADIESVÖGEL  
Fedriges Farbenfeuerwerk

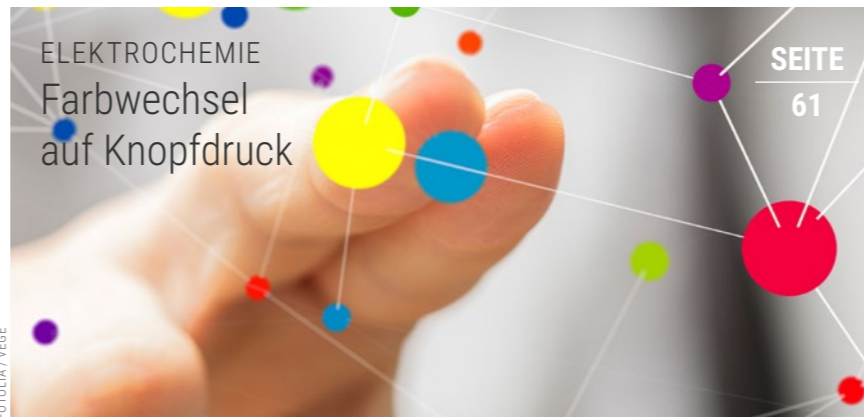
SEITE  
58



JUSTIN MARSHALL, UNIVERSITY OF QUEENSLAND

ELEKTROCHEMIE  
Farbwechsel  
auf Knopfdruck

SEITE  
61



FOTOLIA / VECE

- 19 PSYCHOLOGIE  
Traurigkeit beeinflusst  
die Farbwahrnehmung
- 21 WAHRNEHMUNG  
Gelb sieht im Winter anders aus
- 23 PLASMONISCHE FARBE  
So druckt 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.

**D**ie Welt erscheint uns in einer schier unermesslichen Farbenvielfalt: vom Dottergelb der Ringelblume bis zum Silbergrau eines Autos, vom fahlblauen Winterhimmel bis zum grün funkelnden 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 Farbsehen 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 Farberkennen – 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

## Buntere 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.**



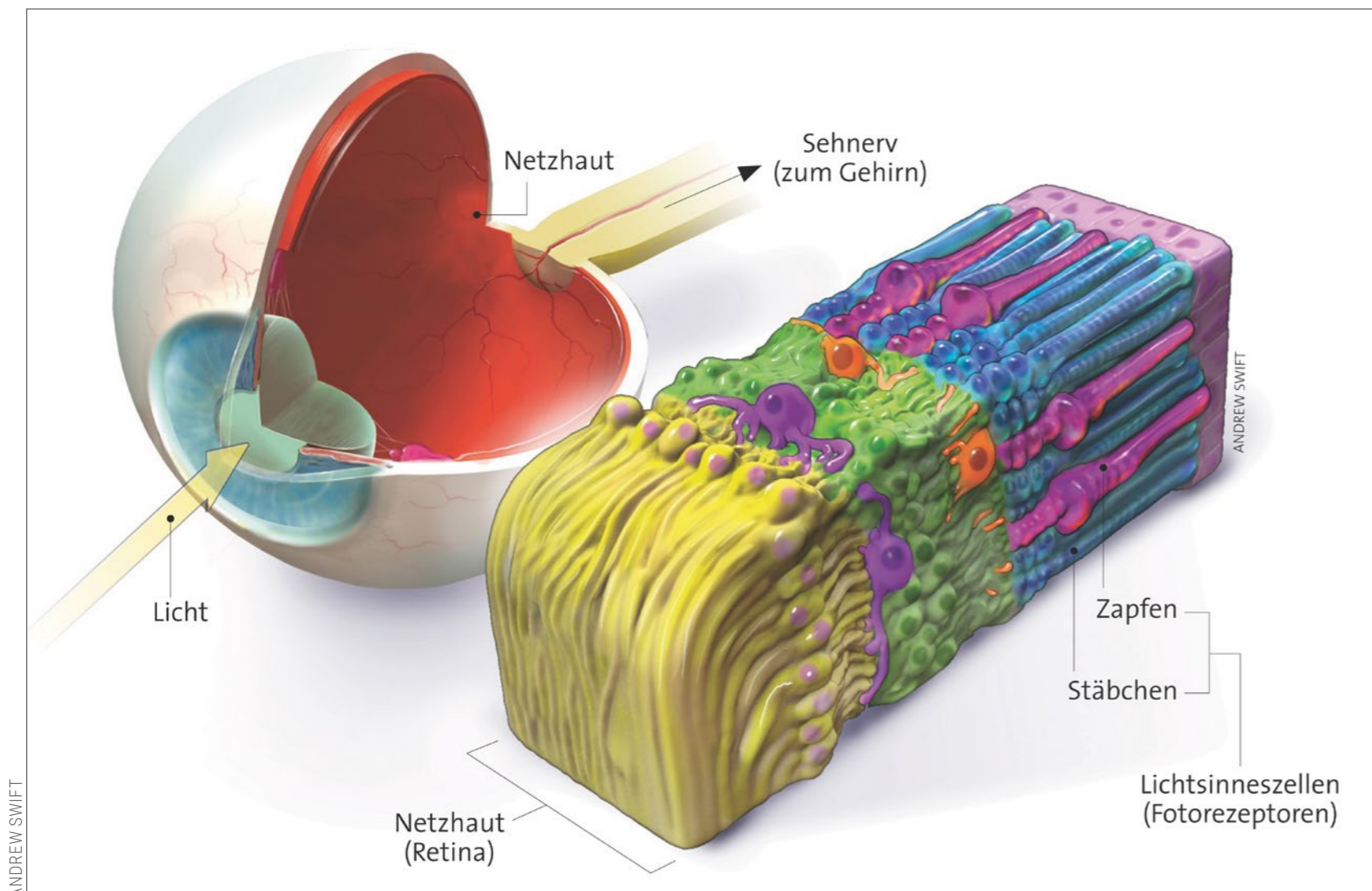
schon länger bekannt, nicht aber die Pigmente selbst. Erst in den 1980er Jahren hat einer von uns (Nathans) die Gene für diese drei Proteine identifiziert. Anhand von deren DNA-Sequenzen (Nukleotidsequenzen) erstellte er dann die Abfolge der Aminosäuren (also die Kette der Bausteine) dieser Proteine. 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 Sehfärbstoffe 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 Sehfärbstoffen hin.

Viele Anhaltspunkte zur Geschichte dieser drei Farbpigmente 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 Farbsehen 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 Farbsehen sind sie in der Regel nicht beteiligt.**

Pigment auf Chromosom 7 stark ähneln. Demnach dürfte ein Sehfarbstoff für kürzere Wellenlängen ein altes Element des Farbsehens 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 Nichtprimat 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).

