

Vögel sehen die Welt bunter

Ein Vogel nimmt mehr Farben wahr als wir – ein altes Erbe, das den Säugetieren verloren ging. Die Primaten fanden dafür nur schwachen Ersatz.

Von Timothy H. Goldsmith

Gern halten wir Menschen unser Sehvermögen für eine Spitzenleistung der Evolution. Dank ihm können wir Dinge auf einige Entfernung sehen, den Raum abschätzen und uns darin ohne anzustoßen bewegen. Auf einen Blick erkennen

wir Personen und oft sogar deren Stimmung. Der Mensch ist in so hohem Grad ein Augentier, dass er sich schlecht in Wesen hineinversetzen kann, die sich anders orientieren, wie etwa Fledermäuse, die ihre Beute anhand des Reflexionsmusters ihrer eigenen Rufe orten.

Doch sogar was unseren eigenen Sehsinn betrifft, fällt es uns schwer, seine Be-

grenztheit im Vergleich zu dem mancher anderen Tiere zu ermessen. Selbst unser Farbsinn, auf den wir uns viel einbilden, wird von dem so mancher Tierart ausgestochen. Das Ausmaß der Unterschiede entdeckten Forscher allerdings erst spät. Denn das meiste Wissen über Farbempfindung beruhte auf Tests an Menschen. Mit ihnen kann man am leichtesten Experimente anstellen – etwa dazu, wie bestimmte Farbmischungen erscheinen, wann beispielsweise zwei verschiedene Mischungen als gleiche Farbnuance wirken.

Zwar studieren Wissenschaftler schon lange, unter anderem mit neurophysiologischen Verfahren und Lerntests, auch die Farbwahrnehmung einer Reihe von Tierarten. Dennoch entdeckten sie erst in den frühen 1970er Jahren, dass viele Wirbeltiere auch im nahen Ultraviolett (unterhalb von 400 Nanometern) Farben erkennen, somit bei für Menschen und die meisten Säuger normalerweise nicht sichtbaren Wellenlängen. Eine UV-Tüchtigkeit scheint in den anderen Wirbeltierklassen so verbreitet vorzukom-

In Kürze

- ▶ Als Sinneszellen für ein Farbsehen dienen den Wirbeltieren die **Zapfen in der Netzhaut**, deren Pigmente unterschiedliche **Lichtwellenlängen** absorbieren. Die meisten Säugetiere verfügen über zwei Zapfentypen, der Mensch und ein Teil der Primaten über drei, die Vögel über vier – wie auch viele Reptilien und Fische.
- ▶ Die Säugetiere verloren in einer frühen Evolutionsphase zwei der ursprünglichen Zapfentypen. Durch eine **Genverdoppelung** entstand bei den Primaten ein neuer dritter Typ.
- ▶ Die Farbwelt der Vögel dürfte recht anders, vor allem reicher, breiter und differenzierter als unsere sein. Vögel sehen auch **nahes ultraviolettes Licht** und für uns unvorstellbare **Mischfarben**. Vielleicht nehmen sie außerdem uns unbekanntes Farbdimensionen wahr.



CORBIS / DPA, BORIS ROSSLER

men, dass die Säugetiere eher als Ausnahme dastehen.

Entdeckt wurde Ultraviolettsehen im 19. Jahrhundert an Insekten. John Lubbock, ein Nachbar und Freund des Evolutionsforschers Charles Darwin, beobachtete um 1880, dass Ameisen ihre Larven retteten, wenn UV-Licht auf diese fiel. Sie schlepten sie ins Dunkle oder dorthin, wo Licht längerer Wellenlänge auftraf. Seit etwa 1950 haben der österreichische, lange Jahre in München lehrende Zoologe Karl von Frisch, seine Schüler und deren Schüler nicht nur nachgewiesen, dass Bienen und Ameisen UV-Licht als eigene Farbe sehen, sondern auch, dass sie die Polarisationsmuster von UV-Licht am Himmel erkennen und als Kompass benutzen.

Verarmte Säugetiere

Bald erwiesen sich immer mehr Insektenarten als UV-tüchtig. Eine Zeit lang glaubten die Forscher, es handle sich um einen spezifischen, gewissermaßen geheimen Sinn der Kerbtiere, der deren

Feinden aus der Vogelwelt nicht offensteht. Doch das war ein Irrtum! In den letzten 35 Jahren wurden UV-Rezeptoren in der Netzhaut nicht nur bei Vögeln nachgewiesen, sondern auch in verschiedenen Zweigen anderer Wirbeltierklassen; etwa bei einigen Reptilien – Eidechsen und Schildkröten – sowie bei vielen Fischen. Die meisten Vögel scheinen im UV-Bereich sehen zu können. Warum ist ausgerechnet die Farbwahrnehmung der Säugetiere in dieser Hinsicht eingeschränkt? Als Wissenschaftler dieser Frage nachgingen, stießen sie auf faszinierende Evolutionszusammenhänge. Zudem lassen die Forschungen zumindest erahnen, wie viel farbreicher als unsere die visuelle Welt der Vögel ist.

Bevor ich Details erörtere, möchte ich ein häufiges Missverständnis ausräumen. Wir lernen in der Schule, dass Objekte bestimmte Wellenlängen vom auftretenden Licht absorbieren und den Rest reflektieren. Was wir als die Farbe einer Sache wahrnehmen, bezieht sich auf den reflektierten Lichtanteil. Jede Farbe be-

▲ Die meisten Vögel, wie auch dieser Flamingo, sehen eine für uns unvorstellbare Farbvielfalt, vermutlich sogar uns fremde Farbqualitäten.

stimmt sich aus reinen oder gemischten Wellenlängen. Das ist so weit richtig. Jedoch ist Farbe, wissenschaftlich betrachtet, weder eine Eigenschaft des Lichts noch eine des Objekts. Vielmehr handelt es sich um eine Wahrnehmung, also um das Ergebnis eines Verarbeitungsprozesses im Gehirn.

Der erste Schritt dieses Vorgangs geschieht in einer Fraktion von Sinneszellen der Netzhaut. Zum Farbsehen benötigen wir die so genannten Zapfen, von denen mehrere Typen oder Klassen vorhanden sind. (Die Fraktion der Stäbchen erlaubt nur Schwarz-Weiß-Sehen und arbeitet bei schwachem Licht.) Jeder Zapfen enthält ein Pigment, das Licht eines Ausschnitts des Spektrums absorbiert (siehe Kasten S. 98). Dieses Pigment – auch Sehfärbstoff genannt – be- ▷



▷ steht jeweils aus einer Variante des Proteins Opsin im Verbund mit Retinal, einem Abkömmling von Vitamin A. Wenn das Pigment Licht absorbiert (korrekter ausgedrückt: Lichtquanten oder Photonen, also diskrete Energiepakete), verändert das Retinal seine Form. Es klappt gewissermaßen ein. Das wiederum setzt in der Sinneszelle eine molekulare Kaskade in Gang, wodurch die Zelle schließlich erregt wird und nun Neuronen in der Netzhaut aktiviert. Diese schicken dann über den Sehnerv Impulse ins Gehirn.

Je intensiver das Licht ist, umso mehr Lichtquanten werden von den Sehpigmenten absorbiert, umso größer ist die Erregung der einzelnen Zapfen und als umso kräftiger und heller wird das Licht empfunden. Allerdings kann ein einzel-

ner Zapfen beziehungsweise Zapfentyp dem Gehirn nicht mitteilen, welche Wellenlänge aus dem Spektrum zu seiner Erregung führte. Denn ein Sehpigment spricht nicht gleich stark auf die verschiedenen Bereiche des Lichtspektrums an, für die es empfänglich ist. Einige absorbiert es besser als andere, und jede Pigmentsorte hat ihr spezifisches Absorptionsmaximum.

Somit hat jeder Zapfentyp eine andere Empfindlichkeitskurve. Zwei unterschiedliche Wellenlängen können beim selben Zapfen unter Umständen eine gleich starke Erregung auslösen, weil die Sinneszelle mit Hilfe ihres Sehfärbstoffs gewissermaßen nur die absorbierten Lichtquanten zählt. Auch kann die Zelle durch intensives Licht einer relativ schlecht absorbierten Wellenlänge eben-

so stark erregt werden wie durch schwaches Licht eines gut absorbierten Bereichs des Spektrums.

Zur Farbwahrnehmung verhilft das Zusammenspiel verschiedener Zapfentypen – das heißt Zapfen mit unterschiedlichen Pigmenten und dadurch unterschiedlichen Absorptionsmustern. Farben erkennt das Gehirn erst, wenn es erfährt – und vergleicht –, wie stark mindestens zwei Zapfentypen reagiert haben. Daran ermisst es Überschneidungen bei den verschiedenen Typen. Zwei in einem Spektrumbereich empfindliche Zapfensorten, sprich Pigmente, genügen im Prinzip schon, um ein paar Farben wahrzunehmen. Jedoch wächst die Farbtüchtigkeit, die Differenzierungsfähigkeit, wenn mehr Typen von Zapfen vorhanden sind. Die Farbpalette wird breiter, nuancierter und reicher. Auch dürften neue Farbqualitäten hinzukommen.

Wie gesagt lassen sich die Zapfensorten durch ihr Sehpigment kennzeichnen. Und zwar unterscheiden sich die einzelnen Sehfärbstoffe im Opsin, der Proteinkomponente. Forscher haben die Gene für die verschiedenen Opsine untersucht und bei unterschiedlichen Wirbeltieren deren Verwandtschaft und Herkunft verglichen. Es gelang ihnen durch Analysen der genetischen Sequenzen, für diese Gene Evolutionsstammbäume zu erstellen (siehe Kasten rechte Seite).

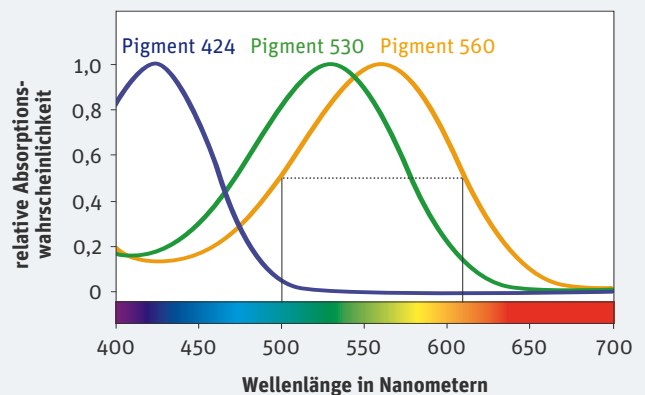
Vier Farbpigmente

Demnach handelt es sich um stammesgeschichtlich alte Proteine. Opsine sind offenbar älter als die heute vorherrschenden Wirbeltiergruppen. Vier Genlinien für Zapfenpigmente – jede für ein anderes

FARBSPIEGEL IM MENSCHLICHEN AUGE

DANK DES ZUSAMMENSPIELS dreier unterschiedlicher Sehpigmente, verteilt auf drei Zapfentypen (einer Fraktion von Sinneszellen) in der Netzhaut, nehmen wir die uns bekannten Farben wahr. Jedes Pigment hat sein Absorptionsmaximum bei einer anderen Wellenlänge des eintreffenden Lichts. Dadurch sind die Zapfentypen für die Wellenlängen unterschiedlich empfindlich.

Wie die Grafik andeutet, müssen für einen eindeutigen Farbeindruck, den das Gehirn ermittelt, mindestens zwei der Zapfentypen zugleich erregt werden. Der Grund: Jeder Typ für sich reagiert in großen Bereichen auf zwei verschiedene Wellenlängen gleich stark.



ALLE ILLUSTRATIONEN DES ARTIKELS: JEN CHRISTENSEN, NACH TIMOTHY H. GOUDSMITH

Pigment – lassen sich weit in die Wirbeltiervergangenheit zurück rekonstruieren. Eines der Pigmente absorbierte am besten langwelliges (gelbes) Licht, eines die mittleren für uns sichtbaren Wellenlängen, eines für uns sichtbares kurzwelliges (blaues) und eines ultraviolette Licht (siehe Kasten auf dieser Seite). Der präzise Absorptionsbereich dieser vier Sehfärbstoffe kann sich im Verlauf der Evolution im Einzelfall etwas verschoben haben.

Außer Zapfen besitzen Vertreter aller großen Wirbeltiergruppen in der Netzhaut auch Stäbchen, die Sehen bei schwachem Licht erlauben. Das lichtempfindliche Pigment der Stäbchen ist das Rhodopsin. In seiner Struktur wie in seinen Absorptionseigenschaften ähnelt es stark den Zapfepigmenten für Wellenlängen im mittleren Bereich des Lichtspektrums. Vor einigen hundert Millionen Jahren muss es aus diesen hervorgegangen sein.

Vögel bilden vier verschiedene Zapfepigmente – und damit Zapfensorten – aus, die sich direkt den vier alten Genlinien zuordnen lassen. Der Großteil der Säugetiere besitzt hingegen nur zwei Zapfepigmente und damit nur zwei Sorten von Zapfen. Einer dieser beiden Sehfärbstoffe absorbiert am besten lange Lichtwellen, der andere kurze im Violetten. Offenbar verloren die Säugetiere in ihrer Frühzeit zwei der Pigmente, die ihre Vorfahren anscheinend noch besessen hatten. Nach den genetischen Vergleichen behielten sie nur die Pigmente für langwelliges und – ursprünglich – für UV-Licht, wobei sich die höchste Empfindlichkeit dieses Sehfärbstoffs mehr ins Violette verschob. (Interessanterweise würden wir ohne Augenlinse, die bei den Säugern UV-Licht filtert, auch nahes UV-Licht sehen.)

Die Wissenschaftler vermuten, dass ein hoch entwickeltes Farbsehen für die frühen Säuger nicht wichtig war. Damals im Erdmittelalter, der Blütezeit der Dinosaurier, waren ihre Arten wohl eher klein, lebten heimlich und schützten sich vor Raubfeinden, indem sie in die Nacht auswichen. Um im Dunkeln gut sehen zu können, entwickelten sie hochsensible Stäbchen. Anscheinend genügte ihnen für das Sehen bei Tag zwei Zapfentypen durchaus.

Erst nach dem Untergang der Dinosaurier vor 65 Millionen Jahren kam die große Zeit der Säugetiere. Sie spalteten sich nun in ganz unterschiedliche Linien

auf und bildeten Gruppen mit völlig verschiedenen, auch neuartigen Lebensweisen. Eine neue Gruppe waren die Primaten. Auch sie lebten ursprünglich nachtaktiv, wie heute noch viele Halbaffen. Aber eine ihrer Linien, aus der auch die Vorläufer der Altweltaffen – und somit der Mensch – hervorgingen, wurde tagaktiv. Früchte, die diese Primaten in den Bäumen fanden, machten einen bedeutenden Teil ihrer Nahrung aus.

Rot und Gelb vor Grün

Uns fallen Blumen und Früchte meist schon deswegen ins Auge, weil sie zum Laub einen Farbkontrast bilden. Sie re-

flektieren andere Lichtwellen als grüne Blätter. Doch Baumtiere mit nur einem Zapfepigment für langwelliges Licht hätten das nicht bemerkt. Für uns heben sich Rot und Gelb vor einem grünen Hintergrund ab. Für diese Tiere wären solche Früchte tarnfarben. Dagegen fand die Evolution bei den Primaten einen Ausweg.

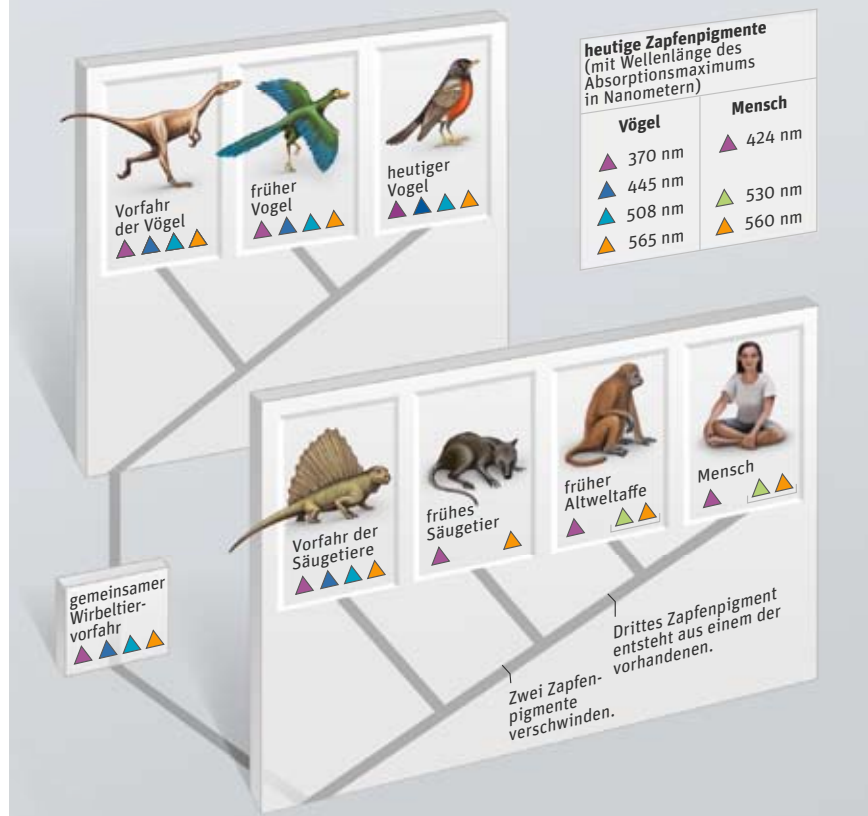
Wenn sich das Erbgut bei der Bildung von Ei- und Samenzellen halbiert und auch ganze Chromosomenabschnitte sich neu sortieren, kommt es vor, dass die Aufteilung ungleich ausfällt, wenn nämlich ein Chromosomenarm etwas zu viel Material erhält. Vielleicht ist an- ▷

VÖGEL – VON DER EVOLUTION BEVORTEILT

GENVERGLEICHE HEUTIGER ARTEN enthüllen die Evolution der Farbtüchtigkeit bei Vögeln und Säugern. Wahrscheinlich besaßen Wirbeltiere früh vier verschiedene Zapfentypen mit jeweils unterschiedlichen Sehpigmenten – hier als verschiedenfarbige Dreiecke symbolisiert (kleiner Kasten links unten). Heutige Reptilien, aber auch Fische bilden diese vier Typen aus.

Die Säugetiere, die wohl zunächst nachtaktiv waren, müssen zwei Zapfentypen beziehungsweise Sehpigmente verloren haben. Ganz anders die aus Dinosauriern hervorgegangenen Vögel: Sie haben alle vier Zapfentypen bewahrt.

Nach dem Untergang der Dinosaurier wagten sich Säugetiere in den Tag hinaus. Bei Ahnen der Altweltaffen dürfte ein neuer Zapfentyp mit einem dritten Sehpigment entstanden sein. Das Gen für eines der beiden vorher vorhandenen Pigmente (gelb) scheint sich verdoppelt zu haben. Dann muss eines hiervon mutiert sein (grün).



▷ schließend ein Gen doppelt vorhanden. Falls dieses nicht wieder verloren geht, kann es im Lauf der Zeit mutieren und unter Umständen schließlich zu einer neuen, nützlichen Eigenschaft verhelfen.

Nach Jeremy Nathans und David Hogness, die früher an der Stanford-Universität (Kalifornien) arbeiteten, geschah etwas Derartiges vor weniger als vierzig Millionen Jahren bei den Ahnen der Altweltaffen mit dem Gen des Pigments für lange Wellenlängen (siehe Spektrum der Wissenschaft 4/1989, S. 68). Das überzählige Gen blieb und mutierte – so entstand ein neues Farbpigment, und jene Primaten, deren Vorfürer sich noch dichromatisch orientierten, entwickelten sich zu so genannten Trichromaten. Auch das neue Pigment schluckt immer noch am besten langwelliges Licht, allerdings hat sich sein Absorptionsmaximum zu etwas kürzeren Wellenlängen in den grünen Bereich verschoben. Dem verdankt auch der Mensch seinen dritten Zapfentyp, seinen Grünrezeptor.

So groß diese Verbesserung sein mag, ist sie doch nur ein eher schwacher Beihelfer verglichen mit dem Farbsinn der Vögel und dem vieler Reptilien und Fische mit ihren vier Zapfensorten und ih-

rem tetrachromatischen Sehen. Überdies können nicht alle Menschen Rot und Grün gut unterscheiden. Vor allem Männer sind betroffen, denn die Gene für beide Pigmente für langwelliges Licht liegen auf dem X-Chromosom, das Männer nur einmal haben. Ist eines dieser Gene nicht in Ordnung, vermag bei Frauen das entsprechende Gen auf dem anderen X-Chromosom den Defekt in der Regel abzufangen. Weil diese Kompensation bei Männern fehlt, sind sie dann rotgrün schwach oder -blind.

Farblupen

Übrigens ging der Netzhaut in der Frühzeit der Säugetiere noch mehr verloren. Die Zapfen von Reptilien und Vögeln enthalten feine Öltröpfchen (siehe Kasten unten). Bei Säugern sind solche Einschlüsse nicht mehr vorhanden. Viele der Tröpfchen erscheinen uns farbig, denn sie enthalten hohe Konzentrationen von Carotinoiden. Licht muss sie passieren, bevor es auf das Sehpigment trifft. Weil diese Öltröpfchen kürzere Wellenlängen wegfiltern, wird der Spektralbereich eingeschränkt, den ein Sehpigment jeweils absorbiert. Das bedeutet, die Zapfen sind nun für einen schmalen Ausschnitt hochempfindlich und ihre Absorptions-

bereiche überlappen weniger. Dank dessen müssten Vögel, so war zu vermuten, mehr Farben unterscheiden können als ohne diese Öleinschlüsse.

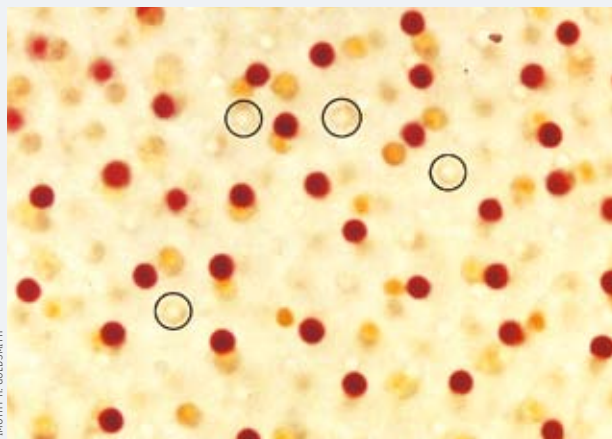
Wie es um ihren Farbsinn wirklich bestellt ist, können wir von diesen Befunden allein aber nicht wissen. Manches lässt sich allerdings mit Verhaltenstests prüfen, bei denen die Vögel zwischen Farben unterscheiden sollen. Bei solchen Versuchen muss der Experimentator unbedingt ausschließen, dass sich der Vogel nach irgendwelchen anderen Merkmalen richtet. Zum Beispiel könnte das Tier allein die Helligkeit zweier Farben bewerten und »richtig« reagieren, obwohl es die Farben selbst gar nicht als unterschiedlich wahrnimmt. Solche Tests zur Farbunterscheidung haben Forscher mit Vögeln schon früher durchgeführt, damals allerdings, ohne an eine UV-Wahrnehmung zu denken. Erst in den letzten Jahrzehnten begannen sie darauf zu achten.

Recht aufschlussreich ist es oft, wenn man reine Spektralfarben gegen Mischfarben setzt und prüft, wann beides dem Tier gleich erscheint. Das haben mein früherer Mitarbeiter Byron K. Butler und ich angewandt, um zu untersuchen, was die vier Zapfentypen für die Wahrneh-

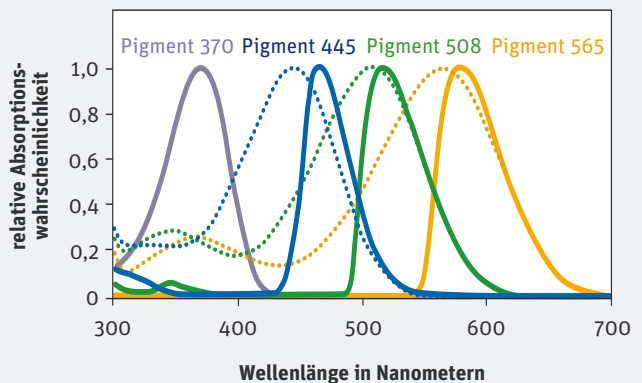
SCHÄRFERE FARBEN DURCH ÖLFILTER

VIELES GING DEN SEHZAPFEN DER SÄUGETIERE VERLOREN. Der bedeutendste Verlust dürfte die Einlagerung von Öltröpfchen gewesen sein. Vogelzapfen enthalten rote, gelbe, fast farblose sowie transparente Öleinschlüsse. Auf dem mikroskopischen Bild von der Netzhaut einer Meise (Foto unten) erkennt man gelbe, rote und farblose Tröpfchen (einige davon hier schwarz umrahmt). Sie alle – abgesehen nur von den total transparenten Tröpfchen – filtern jeweils Licht der kürzeren Wellenlängen, für die ein Pigment

empfindlich ist. Hierdurch wird die spektrale Empfindlichkeit von dreien der vier Zapfensorten der Vögel auf die jeweils längeren Wellenlängen eingeeengt und teils auch etwas hin zu längeren Wellenlängen verschoben. In der Grafik unten ist deren Absorption ohne den Öltröpfcheneffekt als gepunktete, mit dem Effekt als durchgezogene Linie dargestellt. Wegen der Öltröpfchen können Vögel mehr Farben unterscheiden als sie es ohne solche Einschlüsse könnten.



Filtereffekt durch Öltröpfchen



mung der Vögel bedeuten. Am Beispiel des menschlichen Farbensinns sei das Verfahren beschrieben. Auf ein reines gelbes Licht, das heißt Licht einer einzigen Wellenlänge im Gelbbereich, reagieren unsere beiden Zapfentypen für langwelliges Licht. Die gleiche Gelbempfindung lässt sich aber mit einer passenden Mischung aus rotem und grünem Licht erzielen. Das gelingt, wenn die beiden Zapfentypen hiervon jeweils genauso stark erregt werden wie von dem reinen gelben Licht. Subjektiv können wir dann die Mixtur und die reine Wellenlänge nicht unterscheiden. Unser Gehirn macht aus den beiden physikalisch unterschiedlichen Lichtreizen die gleiche Farbe.

Mit demselben Trick lässt sich das Farbsehen von Vögeln prüfen. Bei welchen Mischverhältnissen würde wohl ihr Unterscheidungsvermögen versagen? Anhand der ermittelten Absorptionseigenschaften der vier Zapfentypen – unter Berücksichtigung des Öltröpfcheneffekts – errechneten Butler und ich, wie man rotes und grünes Licht mischen müsste, damit Vögel darin eine bestimmte Farbe aus dem für uns gelben Bereich des Spektrums sehen. Die Mischung musste schon deswegen für Vögel eine andere sein als für uns selbst, weil die einzelnen Sehpigmente bei ihnen etwas andere Absorptionskurven und -maxima aufweisen als bei uns (siehe Kasten linke Seite). Hinzu kommt der Öltröpfcheneffekt. Diesen Test betrachteten wir als Vorversuch. Wir wollten prüfen, ob unsere Messungen zu den Pigmenteigenschaften und der Wirkung der Öltröpfchen stimmten. Anschließend wollten wir in ähnlicher Weise die Wahrnehmung von UV-Licht untersuchen.

Als Versuchstiere wählten wir Wellensittiche. Die Vögel lernten, dass sie bei

gelbem Licht eine Futterbelohnung erhielten. Ein Vogel saß auf einer Stange, und in einem Meter Entfernung leuchteten zwei Lichter auf. Eines davon war das reine Gelb, worauf das Tier dressiert worden war. Das zweite Licht setzte sich aus Rot- und Grünanteilen in unterschiedlicher Mischung zusammen.

Flog der Wellensittich das gelbe Licht an, gab ein Futterspender einen Leckerbissen ab. Beim anderen Licht erhielt der Vogel nichts. Die Seiten des reinen und

gemischten wir blaues und nahes UV-Licht, wobei wir für den UV-Anteil ein breites Band von Wellenlängen verwendeten. Wie beim Gelbttest wussten die Vögel fast alle Mischungen klar vom reinen Violett zu unterscheiden. Aber wenn der Blauanteil ungefähr 92 und der UV-Anteil um die 8 Prozent betrug, gelang ihnen das nicht. Da wählten sie beide Lichter fast gleich oft (siehe Bild unten), genau wie von uns für das gewählte Violett vorausgesagt. Hieraus dürfen wir

UV-Licht sehen Vögel als Farben – die sich mit anderen Wellenlängen zu Mischfarben kombinieren



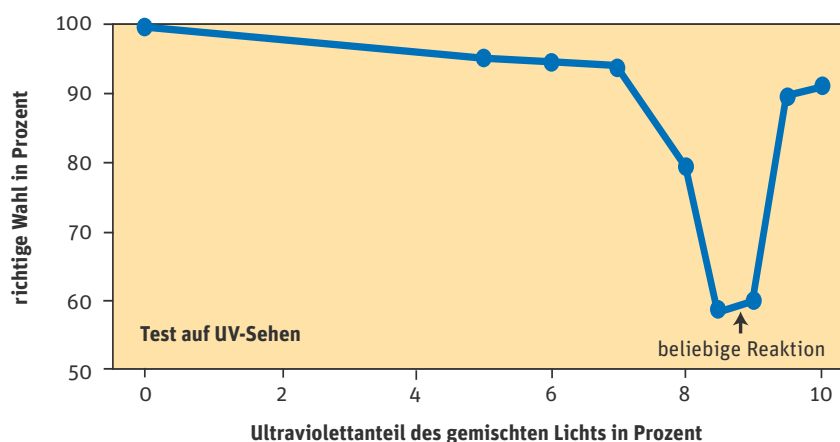
des Mischlichts wechselten nach einem Zufallschema. Auch die Mixturen von Rot und Grün variierten unvorhersehbar. Zudem veränderten wir stets die Intensität des rein gelben Lichts. Wie erwartet wählten die Vögel bei den meisten Mischlichtern unbeirrt das reine gelbe Licht. Nur bei einem Mischungsverhältnis von etwa 90 Prozent Rot und 10 Prozent Grün nahmen sie offenbar keinen Farbunterschied wahr und flogen auch zum Mischlicht. Genau das hatten wir für das gewählte reine Gelb vorausgerechnet.

Auf gleiche Weise konnten wir nun die UV-Tüchtigkeit unserer Versuchstiere erproben. Das war ein entscheidender Test, um zu erfahren, ob Vögel ihre UV-Zapfen bei der Farbwahrnehmung mit einbeziehen, ob sie also wirklich tetrachromatisch sehen. Diesmal dressierten wir die Wellensittiche auf ein violettes Licht. Für den Unterscheidungstest

erstens schließen, dass UV-Wellenlängen für Vögel eigene Farben darstellen, und zweitens, dass das Sehsystem der Vögel bei der Farbwahrnehmung die Erregung des UV-Zapfens berücksichtigt. Vögel sind somit echte Tetrachromaten. Zum Farbsehen nutzen sie tatsächlich alle vier Zapfentypen.

Leider können wir nicht nachvollziehen, welche Farbqualitäten Vögel sehen. Sie erkennen ja nicht nur uns verborgene Wellenlängen im nahen UV-Bereich, sondern sie sehen auch von uns nicht erfahrbare Mischfarben. Die vom Menschen unterschiedene Farbpalette stellen Physiologen gern innerhalb eines Dreiecks dar. Für Vögel müsste man eine Dimension hinzufügen und könnte ein mit Farben gefülltes Tetraeder verwenden (siehe Kasten S. 102). Farben, die darin höher als die Grundfläche liegen, sind der menschlichen Wahrnehmung verschlossen.

Wellensittiche können violettes Licht fast immer von Mischlicht mit einem UV-Anteil gut unterscheiden. Nur bei bestimmten Mischungen versagen die Vögel – in diesem Beispiel bei einem UV-Anteil von gut acht Prozent.



▷ Wozu mag den Vögeln wohl eine so bunte Welt nützen? Zunächst fällt selbst unserem Auge auf, wie viel farbenprächtiger Vogel Männchen oft im Vergleich zu den Weibchen ihrer Art erscheinen. Als sich herausstellte, dass Vögel UV-Licht wahrnehmen, begannen Forscher nach Hinweisen zu fahnden, ob solche Farben die Partnerwahl beeinflussen. Das brachte manches verblüffende Ergebnis.

Weibchen vor sich haben oder ein Männchen.

Jene Federn, die ein Vogel Männchen beim Balzen besonders vorzeigt, reflektieren UV-Licht tatsächlich öfter als Federn anderer Körperpartien. Das entdeckten Franziska Hausmann von der Universität Brisbane (Australien) und ihre Kollegen. In einer umfangreichen Studie hatten die Forscher 108 australische Vogelarten ge-

einflusst sein. Somit könnte das Maß der UV-Reflexion für ein Vogelweibchen einen passablen Indikator für die Gesundheit eines Männchens darstellen. Den vermuteten Zusammenhang bestätigten Amber Keyser von der Universität von Georgia in Athens und Geoffrey Hill von der Auburn-Universität (Alabama) für eine nordamerikanische Vogelart: Die größten Männchen des Blaukardinals oder Azurbischofs (*Guiraca caerulea*), der mit dem bunten Papstfink (siehe Foto im Kasten unten) verwandt ist, tragen ein Gefieder von einem besonders satten, leuchtenden Blau, dessen Farbe zudem den höchsten UV-Anteil von allen Männchen enthält. Solche Exemplare besitzen auch die größten, somit nahrungsreichsten Reviere. In der Tat füttern sie ihre Jungen öfter als weniger prächtige Männchen.

Allgemein dürfte die Fähigkeit, UV-Strahlung sehen zu können, Tieren vielfach die Nahrungssuche erleichtern. Schon vor Jahren wies der Sinnesphysiologe Dietrich Burkhardt von der Universität Regensburg nach, dass die äußere Wachsschicht vieler reifer Beeren und anderer Früchte UV-Licht reflektiert. Der Hintergrund könnte sein,



Nashornvogel

Vogelweibchen nutzen die UV-Reflexion des Gefieders von Männchen als Indikator für deren Gesundheit

So untersuchte Muir Eaton, als er an der Universität von Minnesota arbeitete, 139 Vogelarten, deren Männchen und Weibchen für uns völlig gleich aussehen. Eaton maß, welche Wellenlängen das Gefieder dieser Vögel reflektiert. Das aber war bei der Mehrzahl der Arten für die beiden Geschlechter verschieden. Über neun Zehntel der geprüften Arten, folgerte Eaton, müssten schon allein an der Farbe erkennen können, ob sie ein

prüft. Untersuchungen in England, Schweden und Frankreich zufolge bevorzugten Blaumeisenweibchen wie auch weibliche Stare bei der Paarung Männchen, deren Gefieder in Vergleichstests die meiste UV-Strahlung reflektiert. Tatsächlich ist das sinnvoll. Wie gut das Gefieder diese Wellenlängen zurückwirft, hängt von der mikroskopischen Feinstruktur der Federn ab. Die wiederum dürfte von der Gesundheit des Tiers be-

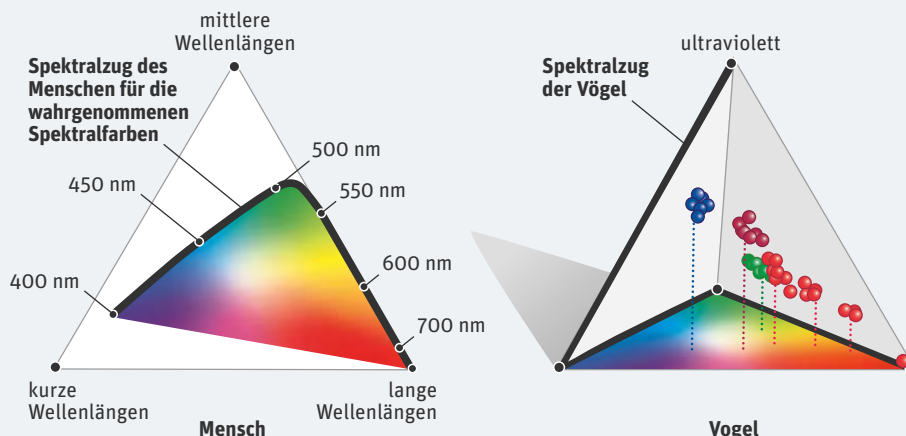
VIRTUELLER ZAUBER IN FARBEN

ALLE VOM MENSCHEN WAHRGENOMMENEN FARBEN lassen sich in der Fläche eines annähernden Dreiecks sortieren (Bild ganz links). Die reinen Spektralfarben sind dabei entlang der dicken schwarzen Linie, dem so genannten Spektralzug, angeordnet. Die Mischfarben bis hin zu Weiß finden sich im Innern des Dreiecks.

Um die Farben zu arrangieren, die ein Vogel sieht, benötigt man wegen der UV-Wahrnehmung eine weitere Dimension. Plausibel ist die Anordnung in einem Tetraeder (zweites Bild). Die Farben, die nicht den UV-Rezeptor aktivieren, würden sich am Boden des Tetra-

eders verteilen. Allerdings lägen sie oft ziemlich am Rand der Fläche – wegen der eingegrenzten Empfindlichkeit der Sinneszellen durch eingelagerte Öltröpfchen.

Interessant wird es, wenn UV-Sehen dazukommt. Im Tetraeder wächst der Anteil an UV-Licht zur Spitze hin. Wie sehen die Weibchen einer in den USA vorkommenden Kardinalart – des Papstfinks (*Passerina ciris*, drittes Bild), englisch »painted bunting« – wohl ihre tuschkastenbunten Männchen? Deren Federkleid reflektiert zusätzlich nahes ultraviolettes Licht, aber nicht etwa an den roten,



Papstfink-Männchen

▶ Auch wenn niemand weiß, wie zum Beispiel Blumen für Vögel aussehen, so regen diese Fotos doch unsere Fantasie an. Andrew Davidhazy vom Rochester-Institut für Technologie (US-Bundesstaat New York) fotografierte den Sonnenhut einmal so, wie wir ihn sehen (links), dann aber mit einer Spezialkamera, die nur im UV-Bereich ablichtet (rechts).



ANDREW DAVIDHAZY, ROCHESTER INSTITUTE OF TECHNOLOGY (RIT)

das Tiere daran die Reife erkennen und die Samen verbreiten helfen. Doch auch Fleischfressern kann das UV-Sehen nützen. Wie Jussi Viitala von der Universität Jyväskylä (Finnland) und seine Kollegen entdeckten, sehen Turmfalken auf die Weise die Spuren von Wühlmäusen. Viele Nager scheinen mit UV-reflektierendem Harn und Kot Duftspuren anzulegen. Vor allem im Frühjahr, wenn die Vegetation sol-

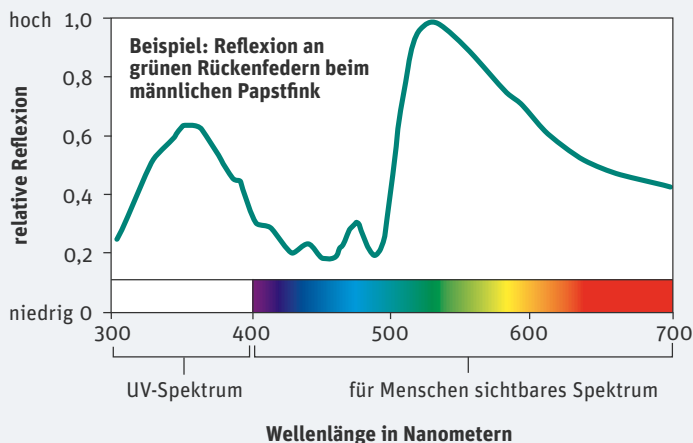
che Spuren noch nicht verdeckt, erkennen Raubvögel daran offenbar, wo Beute zu erwarten ist.

Oft fragen mich Laien nach dem Nutzen des UV-Sehens der Vögel. Nicht selten klingt dann durch, wie ulkig sie das Phänomen finden, eine reine Spielerei, auf die ein ordentlicher Vogel durchaus müsst verzichten können. Bei aller Fantasie sind wir doch in der Welt unserer Sinne gefangen. Was es bedeutet,

das Augenlicht zu verlieren, können wir uns vielleicht vorstellen – und wir fürchten es. Aber eine visuelle Welt jenseits der unseren übersteigt unsere Fassungskraft. Evolutionäre Perfektion – oder was wir in unserer beschränkten, voreingenommenen Sicht dafür halten – ist stets nur eine Laune des Augenblicks. Zu erkennen, dass sich mehr tut, als wir durch unsere Brille wahrnehmen, lehrt Bescheidenheit. ◁

blauen oder grünen Partien jeweils einheitlich viel, sondern in variierenden Mengen. Im Tetraeder symbolisieren das die im Raum stehenden Punktehaufen, die wegen des wechselnden UV-Gehalts etwas streuen, besonders für rote Federn. Das Weibchen dürfte somit nicht einen einfarbigen Kopf oder eine einfarbige Brust wahrnehmen, sondern unterschiedliche Nuancen.

Misst man die Reflexion der grünen Rückenfedern des Papstfinks, erkennt man, dass diese Federn auch im UV-Bereich stark reflektieren (Grafik rechts unten).



Timothy H. Goldsmith ist Professor emeritus für Molekular-, Zell- und Entwicklungsbiologie an der Yale-Universität in New Haven (Connecticut).

Botschaft im Ultraviolett. Von Georg Pohland und Peter Mullen in: Bild der Wissenschaft 7/2006, S. 45

Farben aus der Vogelperspektive. Von Georg Pohland und Peter Mullen in: Biologie in unserer Zeit, Heft 1/2005, S. 31

Color vision of the budgerigar (*Melopsittacus undulatus*): Hue matches, tetrachromacy, and intensity discrimination. Von Timothy H. Goldsmith und Byron K. Butler in: Journal of Comparative Physiology A, Bd. 191, Heft 10, S. 933, Oktober 2005

Farben. Spektrum der Wissenschaft – Spezial 5/2004

Ultraviolet signals in birds are special. Von F. Hausmann, K. E. Arnold, N. J. Marshall und J. P. F. Owens in: Proceedings of the Royal Society B, Bd. 270, Heft 1510, S. 61, 7. Januar 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/858958.