

MUSEION 2000

KULTURMAGAZIN GLAUBE, WISSEN, KUNST IN GESCHICHTE UND GEGENWART

Mahatma Gandhi

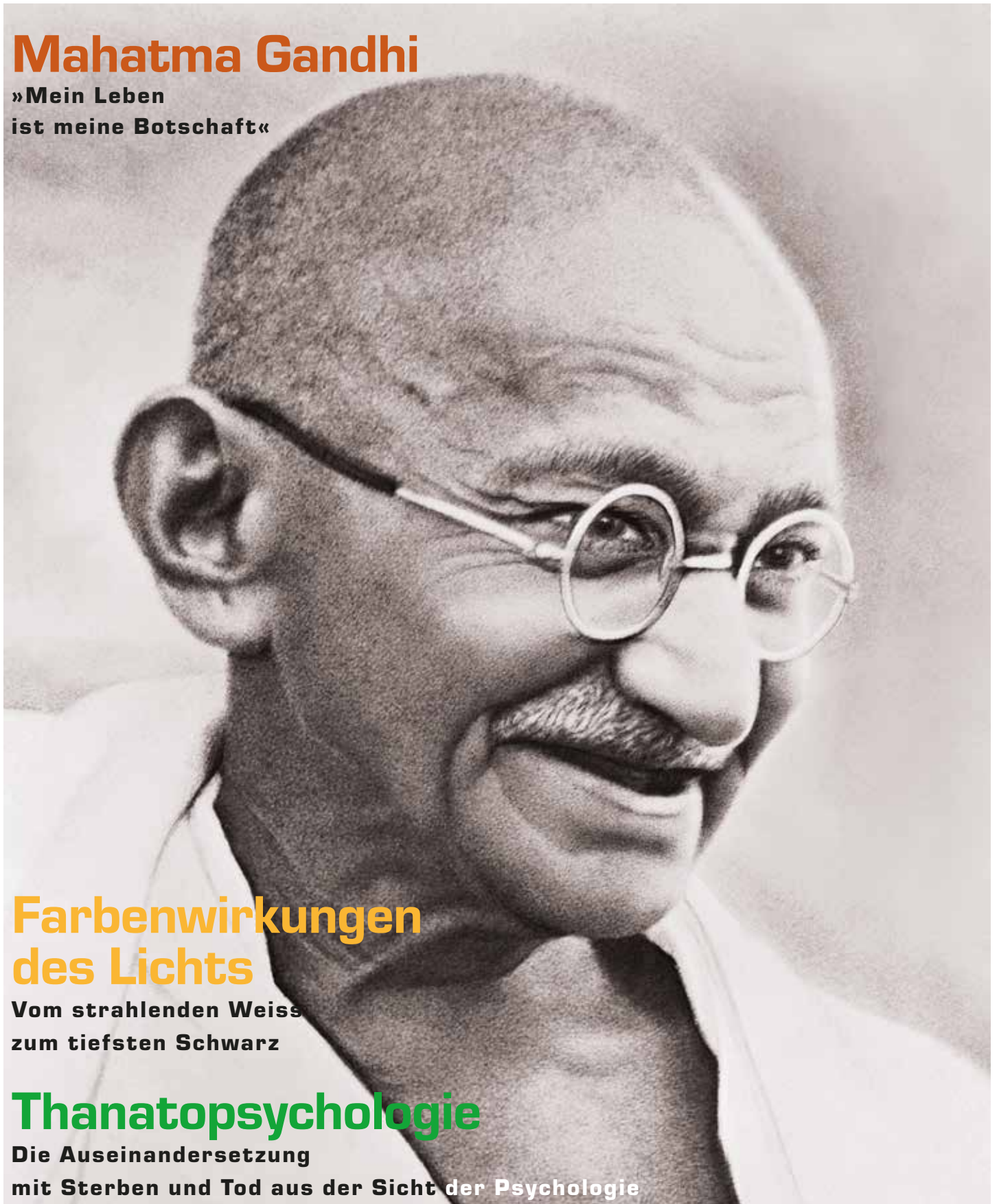
»Mein Leben
ist meine Botschaft«

Farbenwirkungen des Lichts

Vom strahlenden Weiss
zum tiefsten Schwarz

Thanatopsychologie

Die Auseinandersetzung
mit Sterben und Tod aus der Sicht der Psychologie





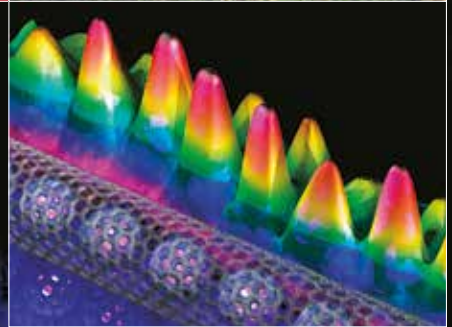
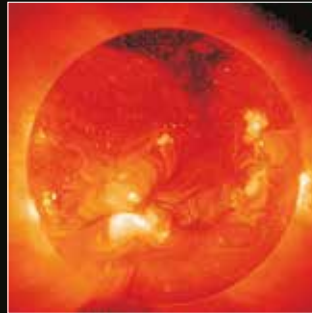
Farbenwirk

Vom strahlenden Weiss zum tiefsten Schwarz

Das Spannungsverhältnis Licht – Finsternis wird einem besonders in der Tiefsee offenbar, dem weitaus grössten Lebensraum der Erde. Je mehr das Sonnenlicht schwindet, umso grösser wird die Finsternis beziehungsweise umso stärker verringert sich die Farbenwirkung des Lichts.

Das Sinnessystem des Menschen und vieler Tiere kann optische Reize in Form von elektromagnetischen Wellen empfinden und wahrnehmen. Daher kommt dem Licht beziehungsweise seinen Wirkmechanismen eine ganz entscheidende Bedeutung zu.

ungen des Lichts



Wirkweise des Lichts

Licht ist für uns ein selbstverständlich gewordenes Gut – es spendet nicht nur Energie beziehungsweise Kraft, sondern bildet zusammen mit der Natur eine *existenzielle* Lebensgrundlage. Ein Wirken in völliger Dunkelheit wäre für den Menschen, die Pflanzen und eine Grosszahl der Tiere undenkbar. Der Wirkmechanismus Licht ist somit ein ganz entscheidender Einflussfaktor. Ihm messen die Wissenschaften, im Besonderen die *Physik*, aber auch, um ein weiteres Beispiel zu nennen, wenn es um den Einfluss des Lichts auf den Menschen geht, die *biologische Psychologie*, einen wichtigen Stellenwert bei. Indes ist das Thema Licht und seine Wirkweise nicht nur eine rein naturwissenschaftlich fassbare Angelegenheit: Das altgriechische Wort *phos* bedeutet nebst *Licht* auch *Tageslicht* oder sogar *Lebenslicht*. Im Althebräischen heisst Licht *or* und wird sinngemäss auch für *Glück* oder *Gerechtigkeit* verwendet.

Aus diesem Blickwinkel betrachtet, liegt der eigentlichen Wirkung des Lichts nicht nur eine *physische* Ursache zugrunde, durch die uns beispielsweise etwas sichtbar wird, sondern das Licht ist im philosophischen Sinn *Gegensatz* und *Spannungsbegriff* zur Finsternis. Interessanterweise lässt sich dies auf naturwissenschaftlicher Basis anschaulich mit Hilfe der Entwicklungsgeschichte der irdischen Lebewelt nachvollziehen: Existieren doch gerade in den Wassern der Tiefsee unzählige Tiere, zu denen nie ein Lichtstrahl dringen kann, und findet sich auf dem Festland ein Pflanzenreich oder eine Tierwelt, die – von wenigen Ausnahmen abgesehen – ohne Licht nicht leben können. Die Hintergründe dieser Gegebenheit möchten wir gerne im zweiten Teil dieses Aufsatzes näher ausleuchten. Doch zuvor einige naturwissenschaftliche Grundlagen über das Licht im Allgemeinen.

Wie entstand einst Licht? Astronomische Erkenntnisse verhelfen zur Klärung

Spricht man vom Licht beziehungsweise von seinen Wirkmechanismen auf Pflanze, Tier und Mensch, so geht es in erster Linie um natürliches Licht, das *Sonnenlicht*. Da dieses für die Entfaltung von Leben einen entscheidenden Stellenwert einnimmt, möchten wir der Entstehungsgeschichte und bestimmten Wirkmechanismen von Sternen beziehungsweise der Sonne, gewissermassen einleitend zum Thema Licht, ein vertiefteres Augenmerk schenken. Das enorme Wissen der Naturwissenschaft erlaubt uns eine relativ genaue Rekonstruktion elementarer Entstehungsvorgänge – auch im All, wobei uns diesbezüglich *astronomische Erkenntnisse* besonders dienlich sind. Man weiss heute, wann Licht in der Form, wie wir es mit unseren Sinnen wahrnehmen können, erstmals auftrat. Um es vorwegzunehmen: Licht ist ein sehr alter und beständiger Faktor; um näheren Aufschluss darüber zu erhalten, muss das Rad der Zeit ganz in die Anfänge der Schöpfungsgeschichte des Universums zurückgedreht werden. Die Materie entstand kurz nach dem Urknall vor etwa 14 Milliarden Jahren im Weltall und wurde mit Hilfe *verschiedener Prozesse* immer wieder neu aufbereitet (vgl. Heft 1/04). Der Urknall brachte für relativ kurze Zeit zum ersten Mal Licht ins Universum – danach folgte, gemäss neuen astronomischen Erkenntnissen, *eine Phase der Finsternis*, die etwa 300 Millionen Jahre dauerte. Erst danach, so wird vermutet, brachten die ersten Sterne, die, wie man heute annimmt, sehr massereich waren, infolge der *Kernfusion* Licht ins Universum. Diese Ursterne hatten ihrer grossen Masse wegen eine relativ kurze Lebensdauer. War ihr Kernbrennstoff aufgezehrt, endete ihre Existenz in einer gewaltigen Explosion (*Supernova*, vgl. *Abbildung 1*). Sternzyklen waren vonnöten, damit eine Neuaufbereitung beziehungsweise Verdichtung der Materie möglich wurde und schätzungsweise vor 12 Milliarden

Jahren aus dem Sternenstaub einst erloschener Sterne das Milchstrassensystem (*Abbildung 2*) entstehen konnte. In dieser Galaxie, die heute *200 Milliarden Sterne* umfasst, entstand vor 4,6 Milliarden Jahren ein ganz besonderer Stern, der für das Leben auf der Erde eine zentrale Rolle spielen sollte: die *Sonne* – eine heisse Gaskugel, in deren Innerem Temperatur und Druck so hohe Werte erreichten, dass Kernreaktionen in Gang kamen.

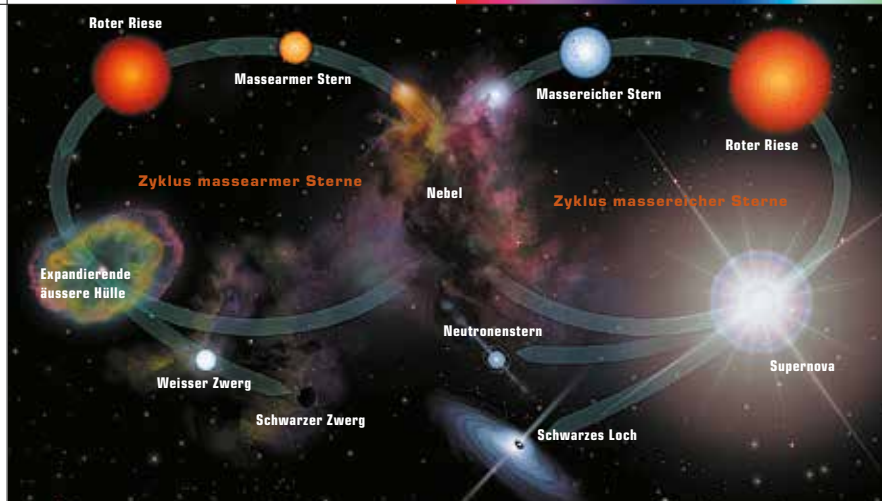
Die Sonne – sie sendet Strahlen in Form von Licht aus

Der Vorgang der Kernfusion ist eine ganz wesentliche Voraussetzung, damit die Sonne in einem breiten elektromagnetischen Spektrum strahlen kann, und zwar geschieht die Energieabgabe zu 41% im sichtbaren, so genannt visuellen Teil, der im Wellenlängenbereich von 400–700 Nanometern liegt, jedoch nur einen winzigen Teil des gesamten elektromagnetischen Spektrums ausmacht (vgl. *Abbildung 3*). Nur in diesem Bereich nehmen wir die Strahlung in Form von Licht wahr. Weiter werden 52% der Sonnenenergie im Infrarotbereich in Form von Wärme abgegeben und 7% im nahen Ultraviolettbereich. Die *harte* Ultraviolett- und Röntgenstrahlung, die ohne Schutzvorkehrung für das Leben auf der Erde sehr gefährlich wäre, ist hingegen verschwindend klein. Fragt man sich, welcher Bereich der Sonne den grössten Teil des sichtbaren Lichts abgibt, könnte man vielleicht meinen, es sei die äusserste Hülle, die so genannte *Korona* beziehungsweise die darunter liegende *Chromosphäre*. Dies trifft aber nicht zu, denn beide sind im Normalfall nicht sichtbar – vielmehr ist es die drittäusserste Schicht, die *Photosphäre* (vgl. *Abbildung 4*). So nennt man den von blosser Augesichtbaren Bereich der Sonne, der uns als sehr helle, weisse Kreisscheibe erscheint. Die Temperatur dieser Licht emittierenden (abgebenden) Schicht beträgt etwa 6400 Grad Kelvin im Innern und 4500 Grad Kelvin am äusseren Rand. Mit ihr ist auch die Helligkeit be-

Sterne finden sich in Galaxien

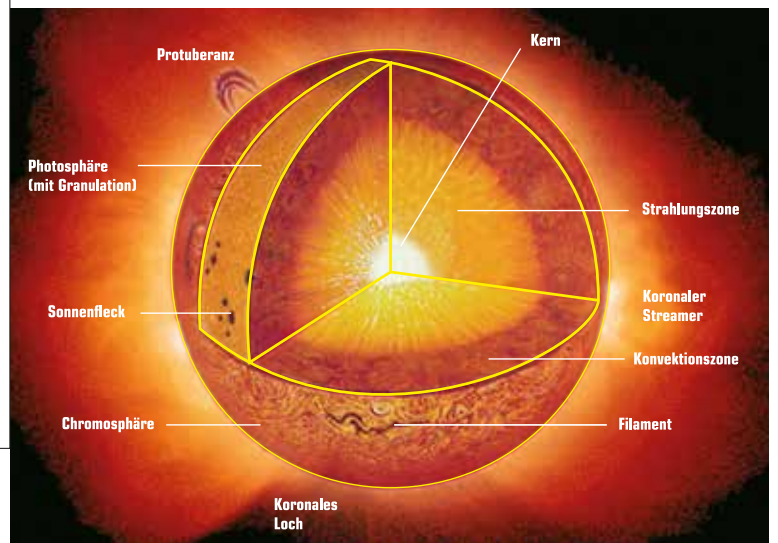
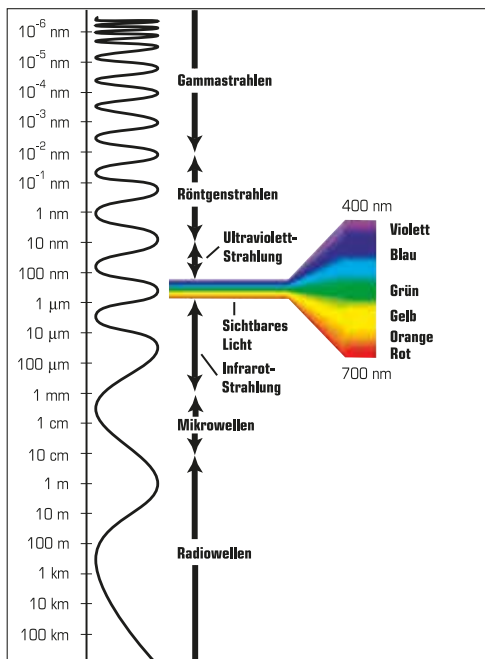
und sind die eigentlichen Lichtträger des Universums

1 Sternzyklen: Nur *massereiche* Sterne erlöschen durch eine gewaltige Explosion, die so genannte »Supernova« (vgl. Zyklus rechts). Kleinere Sterne (vgl. Zyklus links) wie beispielsweise unsere Sonne erfahren ein anderes Ende: Sie leuchten gegen Ende hell auf, werden wie massereiche Sterne zu so genannten »roten Riesen« und können als »weisse Zwerge« enden.



2 Unsere Galaxie, die Milchstraße. Unter 200 Milliarden von Sternen repräsentiert ein winzig kleiner Lichtpunkt unsere Sonne.

3 Die *sichtbare* Strahlung der Sonne ist nur ein winzig kleiner Ausschnitt (farbig markiert) des elektromagnetischen Spektrums.



4 Aufbau der Sonne mit Chromo- und Photosphäre

ziehungsweise *Farbtemperatur* des Weisslichts der Sonne bestimmt. Beispielsweise wäre 9000 Kelvin ein eher *bläuliches* Weiss oder *kaltes* Licht und 5000 Kelvin mehr ein *gelbliches* beziehungsweise *warmes* Licht. Damit uns die Sonne in so hellem Weiss erscheinen kann, sind also hohe Temperaturen von einigen Tausend Grad Kelvin nötig.

Zusammenfassend darf aus Sicht der Physik festgehalten werden, dass Sterne, zu denen auch die Sonne zählt, in Form von *elektromagnetischen Wellen* oder *Schwingungen* Energiestrahlung abgeben, wobei uns nur ein kleiner Ausschnitt des *elektromagnetischen*

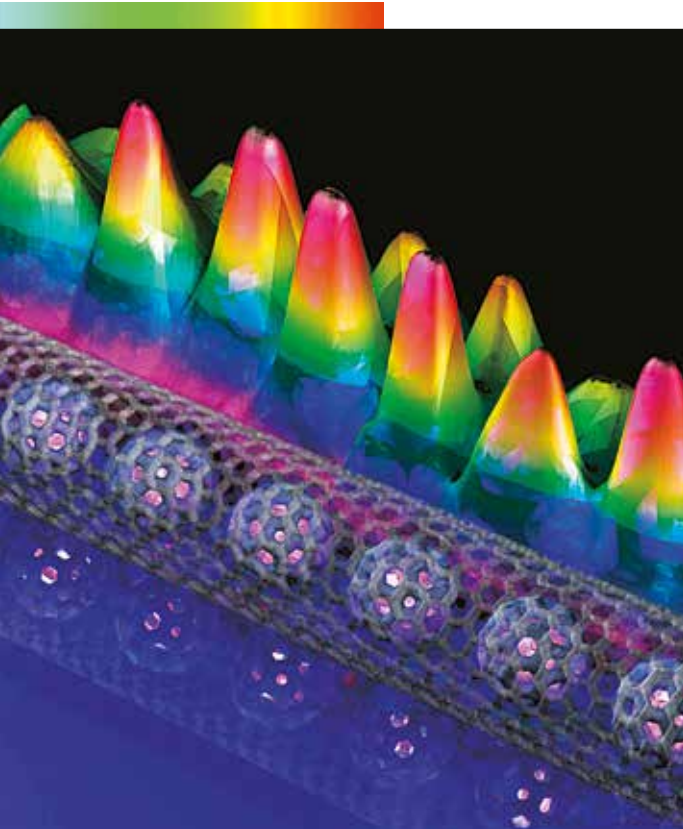
Spektrums als Licht erscheint. Der weitaus grössere Teil, beispielsweise *Röntgenstrahlung* oder *Radiowellen*, kann vom Menschen nicht direkt wahrgenommen werden.

Da wir uns gerade mit Physik beschäftigen, soll nun ein ganz bestimmtes Verhalten des Lichts etwas genauer betrachtet werden: Die *Relativitätstheorie* sagt aus, dass man Lichtwellen über die Energie eine Masse zuordnen kann, die indes unvorstellbar klein ist. Licht bewegt

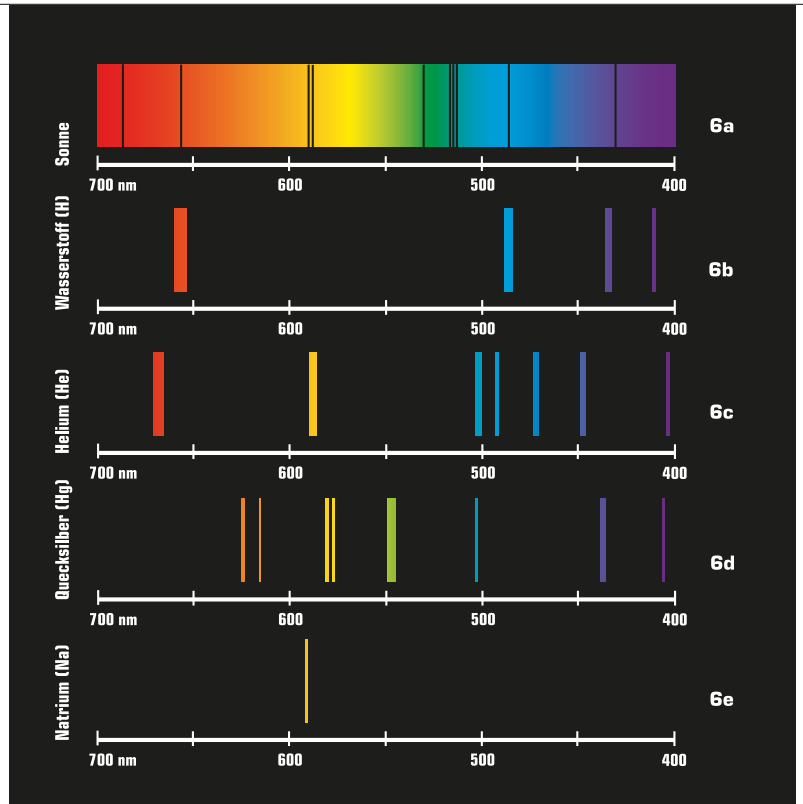
sich mit *Lichtgeschwindigkeit* (300 000 km/s) im Raum fort, und die Energiestrahlen des Lichts haben zudem die Eigenart, sich mal mehr als *Welle*, dann wieder eher als *Teilchen* (Korpuskel) zu zeigen. Interessanterweise ist das Licht, ob Welle oder Korpuskel, *nie formlos* und hat immer Gestalt in Form von Licht. Auch wenn diese Erkenntnisse der *Quantenphysik* entspringen, so haben sie im Grunde genommen philosophischen Charakter. Der vorhin beschriebene *Dualismus*

Aus Sicht der Physik

kommt der Strahlung, beispielsweise dem Licht,
auch eine Wellenform zu. Alles ist im Schwingen ...



5 Photonen, Elektronen und sogar gewisse Moleküle haben die Eigenart, sich mal als Welle (im Bild oben) und mal als Teilchen (unten) zu zeigen.



6 Spektrallinien der Sonne und vier chemischer Elemente (H, He, Hg und Na) im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums

Welle – Korpuskel ist ein eindrückliches Beispiel (vgl. Abbildung 5). Die Quantenmechanik mag zwar etwas theoretisch und abstrakt erscheinen – ganz generell beschreibt sie aber Gesetzmässigkeiten und Zustände der Materie, die hochinteressant sind. Wenn ein Lichtteilchen als Welle erscheint, erinnert dies an eine Aussage eines Denkers im alten Griechenland: *Panta rhei*, aus dem Griechischen übersetzt, »Alles ist im Fliesen«. Später wurde dies fachlich noch etwas präziser formuliert: »Alles ist im Schwingen.« Strahlung oder Kraftströme in Form von Licht, Elektrizität, Radiowellen, aber auch Töne oder Farben beruhen auf dem Prinzip von Schwingungen, die nach ganz bestimmten Gesetzmässigkeiten verlaufen. Wirklich bewundernswert, wie genau dies alles eingerichtet beziehungsweise aufeinander abgestimmt ist.

Das Licht verrät uns einiges über den Aufbau der Materie

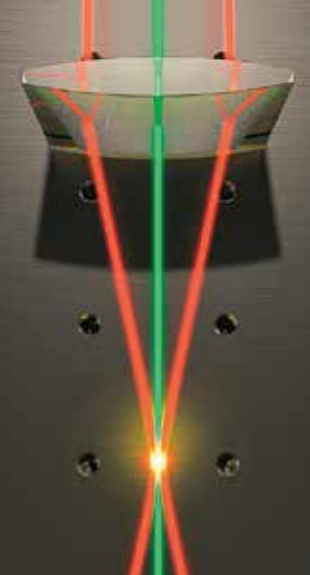
Eine weitere sehr interessante Eigenschaft des Lichts besteht darin, dass es uns einiges über den Aufbau

der Materie verrät. Ein leuchtender gasförmiger Körper kann bezüglich seines Aufbaus genau identifiziert werden. Sein Licht gibt uns gewissermassen seine Zusammensetzung preis, die mit Hilfe der Spektralanalyse bestimmt werden kann. Unsere Materie besteht aus verschiedenen chemischen Elementen. Um auf das Beispiel Sonne zurückzukommen, so lassen sich aus den Spektrallinien des Sonnenspektrums Rückschlüsse auf ihre chemische Zusammensetzung ziehen (vgl. Abbildung 6a). Auf diese Weise kann die Häufigkeit von Elementen in der Sonne bestimmt werden (vgl. Abbildung 10). Es zeigen sich überwiegend Anteile an Wasserstoff und Helium (vgl. Abbildung 6b und 6c). Diese chemischen Elemente kommen praktisch überall vor und sind bei Sternen, auch der Sonne, die häufigsten. Jedes Element weist dabei ein ganz charakteristisches Spektrum auf. Ein Teil davon liegt meistens im sichtbaren Bereich – dazu ein Beispiel zur Veranschaulichung: Jedem Leser ist wohl das gelbliche Licht der Strassenbeleuchtung bekannt. Diese

Leuchtmittel bestehen nicht aus Glühlampen, sondern verwenden ein Gasgemisch. Den Hauptanteil bildet das chemische Element Natrium. In angeregtem Zustand leuchtet das Gasgemisch gelb. Würde man das Gasgemisch anstelle von Natrium (vgl. Abbildung 6e) mit Quecksilber (vgl. Abbildung 6d) anreichern, ergäbe sich eine grelle, bläulich weisse Lichtfarbe. Licht ist demnach auch Informationsträger: Seine Farbe verrät uns, aus welchen chemischen Elementen der jeweilige Stoff aufgebaut ist – immer unter der Voraussetzung, dass der zu identifizierende Stoff unter Zuführung von Energie zum Leuchten gebracht wird.

Licht ermöglicht Farbsehen

Wie wir am vorhergehenden Beispiel feststellen konnten, stehen Licht und Farbe in direktem Zusammenhang. Im Gegensatz zur Natriumdampf Lampe, die nur in einem sehr engen Wellenlängenbereich Licht abgibt – man spricht in diesem Zusammenhang von



7 Bei der additiven Farbmischung entsteht am Kreuzungspunkt der Lichtfarben Rot und Grün ein gelber Lichtfleck.

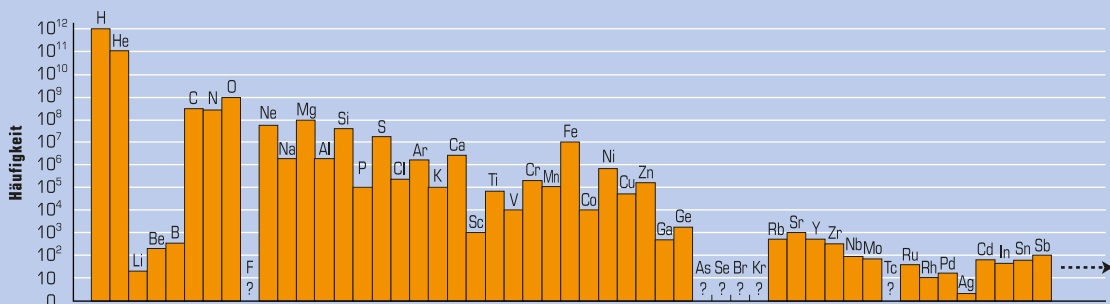


8 Treffen die Primärlichtfarben Rot, Grün und Blau zusammen, entsteht ein weißer Lichtfleck.

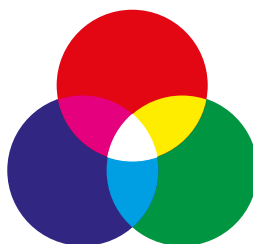


9 Weisses Licht kann in Spektralfarben zerlegt werden, indem es auf optischem Weg gebrochen wird.

10 Mit Hilfe der Spektralanalyse kann die Häufigkeit von chemischen Elementen in der Sonne bestimmt werden. Es zeigen sich überwiegend Anteile von Wasserstoff und Helium. Elemente mit kleinerem Anteil treten auf der unten stehenden Grafik infolge der logarithmisch gewählten Darstellungsweise stärker hervor.



monochromatischem Licht –, ist das Sonnenlicht aus allen sichtbaren Wellenlängen gemischtes Licht. Es beinhaltet sämtliche Farben von Ultraviolett bis Infrarot. Man kann sich die farbliche Zusammensetzung des Lichts auch wie folgt vorstellen: Eine Lichtquelle kann Licht in einer ganz bestimmten Wellenlänge ausstrahlen. Treffen beispielsweise rotes und grünes Laserlicht zusammen, entsteht gelbes Licht (Abbildung 7). Treffen als weiteres Beispiel die Primärlichtfarben Rot, Grün und Blau zusammen, bildet sich im Schnittpunkt der drei Lichtstrahlen ein weißer Lichtfleck (Abbildung 8). Dieser ist umso heller und reiner im Weiss, je kräftiger und gleichmässiger im Farbanteil die einzelnen Primärlichtfarben das Licht emittieren. Umgekehrt ist es auch möglich, weisses Licht in seine Spektralteile zu zerlegen, indem es auf optischem Weg gebrochen wird. Dies geschieht



11 Additive Farbmischung (Lichtfarben). Sie lässt sich mit Hilfe der Primärfarben Rot, Grün und Blau anschaulich darstellen.

natürlicherweise bei der Entstehung des Regenbogens, wenn das Licht der Sonne an den Regentropfen gebrochen wird (Abbildung 9). Die Wassertropfen wirken hier wie ein optisches Instrument, beispielsweise ein Prisma, welches das Licht in seine Spektralfarben zerlegt.

Die bis anhin besprochene Lichtfarbenmischung basiert auf dem Prinzip des so genannten *additiven*



12 Subtraktive Farbmischung. Sie findet in Malerei und Drucktechnik Anwendung (pigmentierte Farben). Als Primärfarben können Cyan, Magenta und Gelb verwendet werden.

Farbmodells (Abbildung 11). Dieses unterscheidet sich ganz wesentlich vom *subtraktiven* (Abbildung 12), welches beim Mischen von Pigmentfarben in der Malerei oder in der Drucktechnik entsteht. In diesem Farbmodell ergibt sich durch Mischen der realen Farben Rot, Grün

und Blau eine *sehr dunkle violettbraune* Farbe, die der Unbuntfarbe *Schwarz* nahe kommt. Das Prinzip der subtraktiven Farbmischung kann rein physikalisch mit Hilfe von Farbfiltern erklärt werden und ist eigentlich nur ein *Abglanz* im Vergleich zur Farbenwirkung des Lichts.

Wir möchten uns in diesem Aufsatz besonders der Lichtfarbenwirkung widmen. Dies ist nicht nur eine physikalische Angelegenheit, sondern ihr liegen in erster Linie *physiologische* Ursachen zugrunde. Angesprochen ist diesbezüglich das Farbsehen von Mensch und Tier – ein sehr vernetztes Thema, denn nun kommen die Fähigkeiten und Empfindungen von Lebewesen ins Spiel. Gerade in der Tierwelt ist der Wahrnehmungsbereich, je nach Entwicklungsstand, von Tiergruppe zu Tiergruppe ganz unterschiedlich; darauf kommen wir noch zurück. Im Folgenden soll nun am Beispiel der *Sinnesphysiologie* beim Menschen den Möglichkeiten des Farbsehens weiter nachgegangen werden.

Einführung in die Sinnesphysiologie

Farben zu sehen, die Welt bunt und nicht nur in Grauabstufungen zu erleben, ist in mehrfacher Hinsicht eine Besonderheit. So besitzen keineswegs alle Tiere, nicht einmal alle Säugetiere, ein Farbsehen, und unter uns Menschen gibt es gar welche, denen die Welt durch Störungen ihres Farbensinns wesentlich unbunter erscheint, als dies bei der Mehrzahl der Menschen der Fall ist. Wissenschaftlich erforscht wird das Farbsehen im Rahmen der Sinnesphysiologie. Wir betrachteten eingangs das Licht beziehungsweise die Lichtfarben vom Gesichtspunkt der Physik aus und stellten fest, dass das sichtbare Licht elektromagnetische Strahlung ist. Der langwellige Teil des sichtbaren Lichts erscheint uns als Rot, der kurzwellige als Violett, die dazwischenliegenden Anteile in einem kontinuierlichen Übergang als Orange, Gelb, Grün und Blau (vgl. Spektralfarbenzug Regenbogenfarben). Es ist ein auf den

englischen Wissenschaftler *Thomas Young* (1773–1829) zurückgehender Befund, dass für den intakt Farbsehenden durch Mischung von zwei Grundfarben viele, aber nicht alle Farben darstellbar sind. Grundsätzlich braucht es mindestens drei Grundfarben, damit alle Farbtöne, so wie wir sie mit dem Lichtsinn aufnehmen, dargestellt werden können. Diese werden als *Primärfarben* bezeichnet; sie genügen beim Menschen mit korrektem Farbsehen, um etwa 7 Millionen verschiedene Farbnuancen oder Farbwerte wahrnehmen und unterscheiden zu können. Diese Mannigfaltigkeit der Farbenwelt entsteht aus Mischung von bunten Farben (Spektralfarben) und verschiedenen Grautönen, die vom strahlenden Weiss bis zum tiefsten Schwarz reichen. So führt beispielsweise die Vermengung von spektralem Rot einerseits mit Weiss zu Rosa und andererseits mit Schwarz zu Braun.

Doch zurück zu den vorhin besprochenen Primärfarben. Sie liegen zwar nicht eindeutig fest, doch ideal sind die Spektralfarben Rot, Grün und Blau. Diese drei Primärfarben sind uns vorhin schon am Beispiel der Farbmischung mit Hilfe von drei verschiedenfarbigen Lasern aufgefallen. Mit ihnen können, wie wir feststellten, alle Spektralfarben inklusive Weisslicht erzeugt werden.

Der Aufbau des Auges

Diese Erkenntnisse helfen nun, die Funktion des menschlichen Sehorgans besser zu verstehen, welches wir im Folgenden etwas genauer anschauen möchten. Die *Abbildung 13* zeigt einen Horizontalschnitt durch das rechte Auge. Deutlich ist die Netzhaut zu sehen, die *Retina*. In ihr liegen etwa 125 Millionen Sehzellen mit den lichtempfindlichen *Stäbchen* und den farbempfindlichen *Zapfen*. Die Stäbchen ermöglichen ein Schwarz-Weiss-Sehen bei Dämmerung bis Nachtdunkelheit. Sie sind etwa 10 000 Mal lichtempfindlicher als die Zapfen und überwiegen am äusseren Rand der Netzhaut. Die Zapfen befinden sich besonders im Zentrum der Netzhaut und gestatten

das Tages- und Farbsehen. Bei den Zapfen sind deren drei Typen unterscheidbar, die jeweils für die Farbeindrücke Rot, Grün oder Blau ihre höchste Empfindlichkeit zeigen (vgl. *Abbildung 15*). Am dichtesten liegen die Zapfen in der *Sehgrube* (*Fovea centralis*), die inmitten des *gelben Flecks* liegt. Es ist bei Tageslicht der Ort der besten Auflösung, Farbunterscheidung und zugleich die Zone der grössten Sehschärfe. Was nun das Farbsehen des Menschen betrifft, ist dieses nicht nur vom kompliziertesten Sinnesorgan, dem Auge, abhängig, sondern von der gesamten *Sehbahn* inklusive des *Gehirns*. Korrekterweise müssten auch *seelische Verarbeitungsprozesse* mit einbezogen werden, denn beispielsweise die Gefühlswelt, aber auch die Wahrnehmungsfähigkeit können doch besonders vom Standpunkt einer *ganzheitlichen Betrachtungsweise* unmöglich eine nur rein biologisch erklärbare Angelegenheit sein. Man betritt derzeit – geht es um die Wechselwirkung von Leib und Seele – aus Sicht der Naturwissenschaft *nahezu* unerforschtes Terrain. Was hingegen bereits möglich ist, betrifft die genaue Beobachtung von Organaktivitäten, die ja auch vom Seelischen beeinflusst werden. Im Zusammenhang mit dem *Sehsinn* beziehungsweise dem Farbsehen möchten wir dies nun etwas genauer betrachten.

Der Mensch hat das Glück, über ein ganz aussergewöhnliches Sehsystem zu verfügen. Es ist indes nicht nur das Wunderwerk *Auge*, welches uns das Farbsehen ermöglicht, sondern es handelt sich um ein komplex vernetztes System. *Abbildung 14* gestattet uns einen schematischen Überblick über den Verlauf der vorhin kurz angesprochenen Sehbahn mit den Sehzentren. Eine bedeutsame Funktion kommt dabei der Sehrinde im hinteren Teil des Gehirns zu, dem so genannten *visuellen Cortex*, der aus sechs unterschiedlichen Bereichen besteht, die wichtige Sehzentren zur Verarbeitung von Informationen *im Gehirn* bilden. Es braucht mitunter *höhere Hirnfunktionen*, damit auch das Farbsehen beziehungsweise

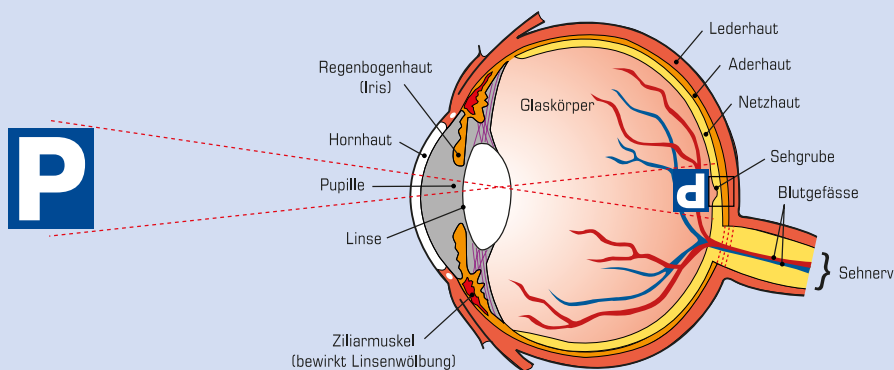
Auge und Sehbahn

des Menschen – ein hochkomplex vernetztes System

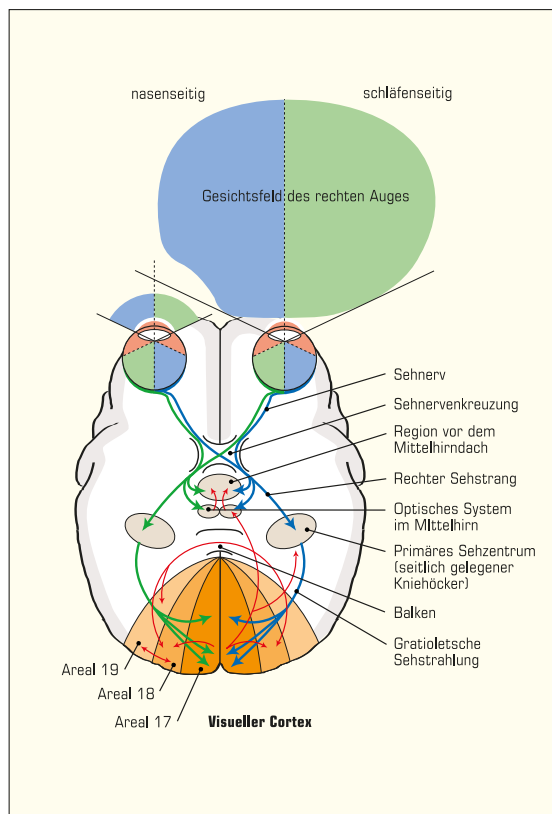
daraus resultierende Sinneseindrücke so differenziert verarbeitet werden können, wie dies dem Menschen gestattet ist. Was es heißt, wenn das Sehvermögen von Geburt an einer Störung unterliegt oder mit zunehmendem Alter durch eine Erkrankung beeinträchtigt wird, ist für einen normal sehenden Menschen nur schwer vorstellbar. *Farbanomalien* und *Farbblindheiten* zählen zu den häufigsten *Farbsinnstörungen* – sie sind meist erblich bedingt. Ein extremes Beispiel stellt die Rot-Grün-Verwechslung dar. Von dieser X-chromosomalen Farbsinnstörung sind 8% der männlichen Bevölkerung betroffen; Frauen leiden sehr viel seltener darunter – es sind weniger als ein halbes Prozent –, da ihr Erbgut aus zwei X-Chromosomen besteht.

Die Welt mit anderen Augen wahrnehmen

Das Sehvermögen kann aber auch durch ein später auftretendes *Augenleiden* stark beeinträchtigt werden. Ein bekanntes Beispiel dafür, wie eine veränderte Sinneswahrnehmung die Werke eines Künstlers beeinflusst, belegt der Fall des französischen Impressionisten *Claude Monet* (1840–1926). Die Sehfähigkeit dieses Künstlers wurde durch den grauen Star stark beeinträchtigt, was ihm erstmals im Alter von ungefähr 70 Jahren auf fiel, als ihm die gewünschte Farbwahl Schwierigkeiten zu bereiten begann. So findet man einen klaren Unterschied zwischen Bildern, die er bis zum Ende des 19. Jahrhunderts malte, und denen, die um 1920 entstanden (*vgl. Abbildungen 16–18*). Im Gegensatz zu seinen früheren Bildern zeigen viele seiner späteren Werke weniger Details – dies fällt einem besonders auf, wenn man die späteren Bilder aus der Nähe betrachtet. Seine Augenlinse hatte sich infolge der Augenkrankheit gelbbraun getrübt. Die veränderten Augenlinsen, durch die er nun sah, filterten violette,



13 Horizontalschnitt durch das rechte Auge. In der Netzhaut liegen etwa 125 Millionen Sehzellen mit sehr lichtempfindlichen Stäbchen (Hell-Dunkel-Sehen) und den farbempfindlichen Zapfen.



14 Sehbahn mit den sechs wichtigen Sehzentren des visuellen Cortex (gelb-orange markiert)

15 Illustration des Aufbaus der Netzhaut mit den Stäbchen (braun) und den Zapfen (rot, grün, blau)





Claude Monet hat die japanische Brücke in seinem Garten in Giverny westlich von Paris mehrfach in Öl festgehalten.

16 Dieses Gemälde entstand in den Jahren 1896–98, ehe sich das Augenleiden bemerkbar machte.

blaue und einige grüne Farbtöne heraus. So enthalten die Gemälde, die Monet in dieser Zeit schuf, im Vergleich weniger von diesen Farben. Mit zunehmendem Alter wurden seine Augen noch schlechter. Die ungefähr zwischen 1898 und 1922 entstandenen Gemälde des Seerosenteichs, der japanischen Brücke oder der Blumentore in seinem Garten zeugen vom traurigen Dahinschwinden seines Sehvermögens beziehungsweise von der wachsenden Farbensinnstörung. 1923 unterzog er sich 83-jährig einer Staroperation auf dem rechten Auge, was mit Komplikationen verbunden war; es brauchte dann auch seine Zeit, bis er sich an die Starbrille gewöhnt hatte. Monet war glücklich, wieder besser sehen zu können, doch war diese Zeit nur kurz bemessen, verstarb er doch 1926.

Ein ähnliches Schicksal traf die impressionistische Malerin

amerikanischer Herkunft, *Mary Cassatt* (1844–1926). Wie Monet litt auch sie im fortgeschrittenen Alter an grauem Star.

Farbensehen in der Tierwelt

Am Beispiel Monets ist es möglich, sich in die Lage hineinzuversetzen, was es bedeutet, wenn Augenlicht und Farbsehen schwinden, ist doch seine verminderte Wahrnehmungsfähigkeit der Nachwelt in Bildern festgehalten. Ein eingeschränktes Farbsehen beziehungsweise eine verminderte Wahrnehmung ist indes auch in der Tierwelt beobachtbar. Zu einem hochauflösenden Farbsehen in dem Sinne, dass die Primärvalenzen Rot, Grün und Blau unterschieden werden können, ist nicht jedes Tier in der Lage. Grundsätzlich verfügen beiden Säugetieren nur insbesondere *Primaten* über ein

derartiges Farbsehen. Viele Säuger sehen weniger Buntfarben, erreichen also mit ihren Augen eine niedrigere Farbauflösung, da in ihrer Netzhaut nur zwei Zapfenarten vorhanden sind, beispielsweise nur Blau und Grün oder Blau und Rot. Da Erstere langwelliges Licht (Rot) nicht wahrnehmen können – dies ist bei gewissen *Raubtierarten* der Fall –, ist es ihnen nicht möglich, zum Beispiel ein rötlich aussehendes Eichhörnchen farblich von der grünen Vegetation des Waldes zu unterscheiden (*Abbildungen 19–21*). *Wale* und *Robben* haben nur Zapfen für Grün, wodurch sie nicht imstande sind, Farben zu unterscheiden. Zudem legen Erkenntnisse aus der artspezifischen Verhaltensforschung nahe, dass das Ursäugetier *Opossum* sowie gewisse *Ratten* und einige *Raubtierarten* gänzlich farbenblind sind. Bei vielen Säugetieren spielt der Gesichtssinn eine



17 Das Fortschreiten einer Augenkrankheit, des grauen Stars, führte bei Monet zu einer starken Farbensinnstörung.

18 In den Jahren 1918–23 schwand infolge der Augenkrankheit das Sehvermögen zusehends. Die starke Trübung der Augenlinse ermöglichte es dem Künstler nun nicht mehr, ein wahrnehmbares Strukturbild der Brücke festzuhalten.



untergeordnete Rolle, dafür verfügen sie über einen ausserordentlich feinen Geruchssinn.

Bei Tieren ist es nicht so einfach, festzustellen, inwiefern die betreffende Art zur Farbenwahrnehmung befähigt ist, das heisst, in welchem Umfang Farben in ihrem Leben eine Bedeutung zukommt. Feststellen lässt sich dies vor allem mit Hilfe von *Dressurversuchen*, wo Tiere durch Belohnung auf das Erkennen einer bestimmten Farbe trainiert werden. Es können auf diese Weise nicht alle Tiere im gewünschten Umfang erfasst werden, denn beispielsweise lässt sich ein *Feuersalamander* nur schwer dressieren. Trotzdem konnte bei derartigen Tieren durch 'spontan' ablaufende Verhaltensweisen das Farbsehen untersucht werden. Umfangreiche Forschungen führten zur Erkenntnis, dass das Farbsehen bei verschiedenen Fischen, einigen Reptilien, einer Vielzahl von Vögeln und sogar gewissen Insekten nicht unterschätzt werden darf.

Soleistenderzeit die Biologin Prof. Christa Neumeyer und ihr Team vom Institut für Zoologie der Universität Mainz auf dem Gebiet des Farbsehens Pionierarbeit. Beispielsweise erwies sich beim *Strauss*, dass er in der Lage ist, alle Farben voneinander und von verschiedenen Graustufen zu unterscheiden. Diese Fähigkeit eignet auch andern Vögeln – eigentlich ein Indiz zu nachstehendem Gedanken: Meister der Lüfte sind ja sehr oft wunderschön bunt gefiedert (vgl. *Abbildung 22*) und geben sich alle Mühe, bei der Balz ihre Farbenpracht ins beste Licht zu

rücken. Es wäre ja wirklich schade, wenn ihr Gegenüber diese Farbenpracht nicht wahrnehmen könnte. Vögel sind generell gesichts- und gehörsinnorientiert und verfügen über ein besseres Farbsehen als eine Vielzahl von Säugetieren.

Weiter möchten wir das Farbsehen zweier ausgewählter Tiere näher betrachten: dasjenige des *Goldfischs* (eines Zierfischs) und das der *Rotwangen-Schmuckschildkröte*. Bei ihnen trat ein überraschender Befund zutage: Es zeigte sich, dass ein *vierter* Zapfentyp, der bislang übersehen worden

Zum Farbsehen einiger ausgewählter Tiere



19 Nicht jedes Säugetier kann ein rotes Eichhörnchen farblich so wahrnehmen, wie dies Menschen können.



20 Offenbar verfügen gewisse Raubtiere über dichromatisches Farbsehen, was beispielsweise mit einer Rot-Grün-Farbenblindheit vergleichbar wäre.



21 Bestimmte Dichromaten können ein rötlich aussehendes Eichhörnchen nur schwer von der grünen Vegetation des Waldes unterscheiden.

22 Die meisten Vögel verfügen über ein ausserordentlich gutes Farbsehen. Ihr Gegenüber können sie in ganzer Farbenpracht wahrnehmen (Rosakakadu-Pärchen beim Kraulen).

war, ihr Wahrnehmungsvermögen entscheidend mit beeinflusst: Ihr Gesichtssinn kann das für unsere Augen *nicht sichtbare Ultraviolettlicht* aufnehmen, was ihnen ein anderes Farbenspektrum erschliesst. Wie das Farbsehen des Goldfisches beruht auch jenes der Schildkröte auf vier Zapfentypen mit Sensibilität in den Bereichen Rot, Grün, Blau und Ultraviolett (*Tetrachromasie*). Auch gewisse Insekten weisen eine Ultraviolett empfindlichkeit auf. Diese Erkenntnis geht vor allem auf den bekannten Bienenforscher *Karl von Frisch* (1886 bis 1982) zurück. Mittels aufwendiger Forschung konnte nachgewiesen werden, dass das Sehorgan von *Honigbienen* die grösste Lichtempfindlichkeit im gelben, blauen und ultravioletten Bereich aufweist. Schwieriger ist die Frage zu beantworten, in welcher Form Vertreter der niederen Tierwelt das

Farbsehen erleben. Niedere Tiere verfügen nachgewiesenermassen kaum über Willensfreiheit, da ihr Tun und Handeln massgeblich triebbedingten Ursprungs ist. Der Bienenforscher von Frisch bringt die Angelegenheit auf den Punkt:

»Was Bienen beim Anblick der Farben wirklich wahrnehmen, davon können wir uns freilich keine Vorstellung machen.«

Vom Licht in die Dunkelheit

Rekapitulieren wir: Nebst der Sehbahn des Menschen haben wir uns im Wesentlichen mit dem Farbsehen von Landgängern, namentlich gewisser Säugetiere, Vögel, Reptilien und Insekten, befasst. Sieht man von nachtaktiven Artgenossen ab, profitieren die genannten Tiere *wesentlich* vom Einflussfaktor Licht. Zudem ist das

Farbsehen in der Regel der jeweiligen Tierart spezifisch angepasst. Das Erkennen von Farben, die Wahrnehmung einer bunten Fauna und Flora, ist in direkter Weise vom Einflussfaktor Licht abhängig, denn in völliger Dunkelheit oder stetiger Dämmerung ist Farbsehen nicht beziehungsweise nur mit Hilfsmitteln möglich. Dies trifft besonders für Tiere des weltweit grössten Lebensraumes zu, der *Tiefsee*. Hierbei handelt es sich um einen weitgehend unbekanntem Ort, obwohl alleine flächenmässig betrachtet mehr als 70% der Biosphäre – unter diesem Begriff wird die Gesamtheit der mit Lebewesen besiedelten Schichten der Erde verstanden – dem Meer zufallen und davon wiederum mehr als 90% auf die Tiefsee beschränkt sind. Sonnenlicht gibt es im Meer nur bis etwa 400m Tiefe, wobei blaues und violettes Licht am weitesten in

die See dringen. Da *Algen* und *viele Bakterien* direkt vom Sonnenlicht abhängig sind, kann dieses Leben nur bis etwa 200m Tiefe existieren. Weiter unten ist Licht nur noch als schwacher Schein wahrnehmbar, und spätestens 1000m unter dem Meeresspiegel herrscht *absolute Dunkelheit*. Doch selbst auf dem Meeresboden in bis über 10000m Tiefe findet sich noch Leben: seien es extrem widerstandsfähige Bakterien, aber auch Tiefseefische, Krebse, Weichtiere, Korallen, wurmartige Tiere und meist sehr kleine Urtierchen mit Schalen, so genannte Kammerlinge oder Foraminiferen (*Abbildung 25*), die als eigene Tiergruppe seit mehreren Hundert Millionen Jahren existieren. Sie entstanden nicht etwa zu späterer Zeit in diesem Lebensraum, sondern sie zählen zum ursprünglichsten beziehungsweise ältestbekanntesten Leben auf dieser Erde. Die Tiefsee ist somit keine junge Erscheinung – im Gegenteil: Aus der Warte der Entwicklungsgeschichte der Erde betrachtet, hat sich erstes Leben auf

unserem Planeten im Wasser entwickelt und blieb über die unvorstellbar lange Zeitspanne von drei Milliarden Jahren nur auf diesen Lebensraum beschränkt, bis vor rund 400 Millionen Jahren ein ganz einschneidendes Ereignis stattfand: die Landnahme durch die Tierwelt.

Bis heute ist es so geblieben, dass ein unvorstellbar grosser Teil stummen Lebens im Wasser verweilt. Allein die Anzahl der Tiefseefische ist enorm, und es finden sich dank aufwendiger Forschungstätigkeit immer wieder neue, ganz unbekannte Arten. Ihr Aussehen ist sehr oft abscheulich, dementsprechend tragen sie Namen wie Viperfisch (*Abbildung 23*), Beilfisch (*Abbildung 24*) oder Drachenfisch (*Abbildung 26*). Wie sieht es mit dem Farbsehen dieser Tiere aus? Wenn man es auch kaum zu glauben vermag – einige Arten haben eine Art Farbsehen, wenngleich nur ein eingeschränktes, und dies dank dem chemischen Verfahren gemäss dem Prinzip der so genannten *Biolumineszenz*. Auf diese Weise kann

ohne Zuführung von natürlichem Licht das Kleid eines Lebewesens zum Leuchten gebracht werden. Das Glühwürmchen ist wohl das bekannteste Lebewesen, welches sich nach diesem Prinzip zu nächtlicher Stunde Licht verschafft. In der Tiefsee existieren viele Lebewesen, so auch Raubfische, die über biolumineszierendes Gewebe verfügen und deren Leuchtorgane die einzigen Lichtquellen in diesem unendlich gross scheinenden dunklen Lebensraum sind. Mit Hilfe dieses Lichtschimmers finden sich die Fische bei der Partnerwahl, locken Beutetiere an oder nutzen die Lichterscheinung zur Nahrungssuche. Meistens lumineszieren sie im blauen Spektralbereich beziehungsweise reagieren auch auf dieses Licht. Der Drachenfisch kann als einer der wenigen Tiefseefische rotes Licht zur Orientierung aussenden. Zu diesem Zweck hat er vor seinem Maul ein rot leuchtendes biolumineszierendes Organ, um diesen Spektralbereich zur Beutejagd nutzen zu können. Da die

In die Dunkelheit der Tiefsee dringt kein Lichtstrahl

Trotzdem verfügen Fische in diesem Lebensraum dank der Biolumineszenz über ein eingeschränktes Farbsehen



25 Fossil einer Foraminifere (Urtierchen) der Tiefsee



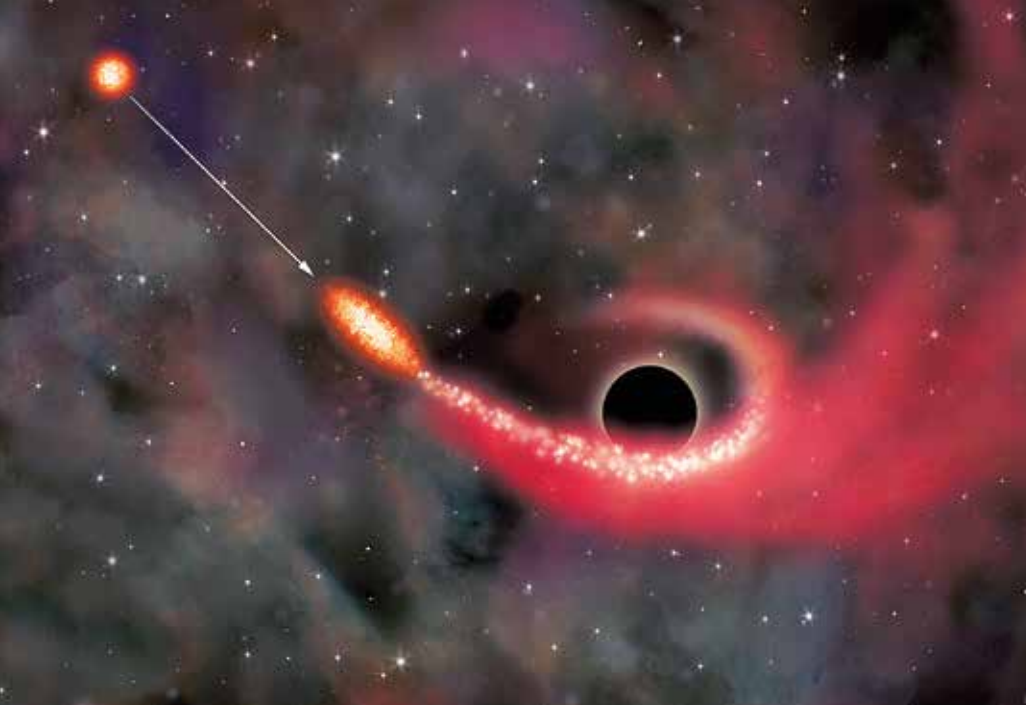
23 Ein Viperfisch schnappt nach einem Beilfisch.



24 Beilfisch auf Beutejagd



26 Drachenfisch mit einem rot biolumineszierenden Leuchtorgan



27 Das Spannungsverhältnis Licht – Finsternis ist auch im All ganz real beobachtbar: Ein Schwarzes Loch verschlingt 'langsam' einen hell leuchtenden Stern in der 700 Millionen Lichtjahre entfernten Galaxie RXJ1242-1119 im Sternbild Jungfrau.

Illustration zu Beobachtungen mit den Röntgenteleskopen Chandra/NASA und XMM-Newton/ESA im Jahre 2001.

meisten Tiefseefischarten nur den blau-grünen Bereich wahrnehmen und daher das rot leuchtende Organ des Jägers gar nicht sehen, endet die Begegnung meist in einer Überraschung unliebsamer Art.

Die Realität des Spannungsverhältnisses Licht – Finsternis

Das Treiben der Kreaturen in der Tiefsee, dem weitaus grössten und ursprünglichsten Lebensraum der Erde, ist ein Thema für sich – eigentlich unglaublich, wie wenig man darüber weiss. Dank grossen Anstrengungen in der Tiefseeforschung wird es möglich, das *Spannungsverhältnis Licht – Finsternis* plötzlich ganz real und rational fassbar zu beschreiben. Es kann heute nicht mehr wegdiskutiert werden, dass unzählige Kreaturen der Tiefsee, die in der Regel beängstigend aussehen, in stetiger tiefschwarzer Dunkelheit leben. Diese Erkenntnis ist zwar nicht ganz neu, aber dennoch bedeutungsvoll, denn bis Mitte des 19. Jahrhunderts war man noch der Meinung, dass unterhalb von 500m Tiefe gar kein Leben existiere. Die Forschung hat uns mittlerweile eines Besseren belehrt, und nun sieht alles ganz anders aus, und es wird sogar in Erwägung gezogen, dass in dieser lebensfeindlichen Umgebung erstes Leben entstanden sein könnte. Ein Indiz sind die 'Urbakterien', die so genannten Archaeobakterien (vgl. Heft 5/2003).

Sie finden sich noch heute in der Tiefsee, beispielsweise in der Nähe grosser Bruchzonen am Ozeanboden, wo weit über 100 Grad heisse Gase aus meterhohen Gesteinskaminen aus dem Boden quellen.

Es war die Absicht, dem Leser den Einflussfaktor Licht beziehungsweise seine Farbwirkungen etwas näher zu bringen. Mit Hilfe eines Streifzugs vom Wissensgebiet der Astronomie über weitere Fachgebiete der Physik bis zum Farbsehen von Mensch und Tier liess sich dies ansatzweise bewerkstelligen. Eines zeichnet sich in diesem Zusammenhang ab: Das Spannungsverhältnis Licht – Finsternis ist eine *entwicklungsgeschichtliche Gewissheit*, die bei genauem Studium kaum übersehbar ist: sei es im All (vgl. *Abbildung 27*) oder in der Tiefsee. Dieses Spannungsverhältnis ist interessanterweise nicht nur ein auf naturwissenschaftlichem Gebiet angebares Thema. Es wurde schon vor vielen Hundert Jahren thematisiert. Beispielsweise in der ältestbekannten abendländischen Weltliteratur der Antike – angesprochen sind die Werke von *Homer* und *Hesiod* –, und es zieht sich wie ein roter Faden durch die Jahrhunderte der Kulturgeschichte bis in die heutige Zeit.

Es resultiert daraus eine elementare Erkenntnis, die sich so beschreiben liesse: Der grösste Gegensatz zu *Schönheit* und *Licht* bedeutet ein Zustand von *Hässlichkeit* und *tiefster Finsternis*. Versucht

man Wissen aus Naturwissenschaft und Philosophie in diesem Punkt auf einen Nenner zu bringen, könnte man es ergänzend so formulieren: Was die Wissenschaft mit dem Begriff *Evolution* umschreibt, ist von der philosophischen Warte aus betrachtet eine gesetzmässig verlaufende Notwendigkeit mit dem *Ziel*, selbst niederstem Leben eine *Höherentwicklung* zu ermöglichen.

Bildquellen

S. 6/7, 7 (4), 10 li. und 11 li.: Focus/SPL. S. 7 (1 und 2), 9 Mitte und 18: NASA. S. 7 (3): M. Becker/visipix.com. S. 9 o. sowie u. und 10 re.: S. Ingold nach NASA. S. 11 o. re.: Corbis. S. 11 Mitte: S. Ingold nach E. Gibson. S. 13 o. und Mitte: S. Ingold nach N. Birbaumer/R. Schmidt. S. 13 u., 16 o. sowie re. und 17 u. re.: Okapia. S. 16 u.: Reuters. S. 17 o.: College of Marine Science. S. 17 u. li. und Mitte: Wildlife. Übrige Bilder: ABZ-Bildarchiv.

Literatur

Jean Audouze et al., *Der Grosse JRO-Atlas der Astronomie*, München 1987. Maria C. Baker et al., *The status of natural resources on the high-seas*, Oceanography Center, Southampton 2000. Niels Birbaumer und Robert F. Schmidt, *Biologische Psychologie*, Berlin 2003. Angelika Brandt, *Biodiversität in der Tiefsee insbesondere des Benthos der Antarktis*, in: *Mitteilungen zur Kieler Polarforschung*, Kiel 2003. Raif Dahm, *Die Welt mit anderen Augen malen*, in: *MaxPlanck-Forschung*, München 2/2003. Hans Günter Dosch et al., *Teilchen, Felder und Symmetrien*, Heidelberg 1986. Karl von Frisch, *Aus dem Leben der Bienen*, Berlin 1977. Christian Gerthsen et al., *Physik*, Berlin 1989. Stefanie Komossa et al., *A huge drop in the X-ray luminosity of the nonactive galaxy RXJ1242.6-1119A, and the first postflare spectrum: Testing the tidal disruption scenario*, in: *The Astrophysical Journal*, Bd. 603, Chicago 2004. Harald Küppers, *Das Grundgesetz der Farbenlehre*, Köln 2002. Philippe Lanthony, *Die Palette fehlsichtiger Maler*, in: *Spektrum der Wissenschaft*, Spezial Farben, Heidelberg 2000. Christa Neumeyer et al., *Vergleichende Physiologie des visuellen Systems*, FB Zoologie Universität Mainz 2003 (Internetversion). Sidney Perkowitz, *Eine kurze Geschichte des Lichts*, München 1998. Walter Pflumm, *Biologie der Säugetiere*, Berlin 1996.