

Kontrastwahrnehmung

Warum Kontrast für unsere Visualität entscheidend ist

Das visuelle System konstruiert und organisiert unsere Welt und die Objekte darin anhand der Kanten und Grenzflächen zwischen den Dingen: Die Gegenstände einer Szene werden nicht vollständig erfasst, sondern anhand der wahrgenommenen Kanten einzeln konstruiert. Dies hat der erste Band dieser Reihe zur visuellen Bildentstehung ausführlich deutlich gemacht. Dieser Prozess ist aufwendig und in seinem genauen Ablauf unter den Wissenschaftlern noch umstritten.

Ohne die Registrierung der Objektgrenzen könnte keine visuelle Wahrnehmung entstehen. Dass das stimmt, ist praktisch bereits mit dem folgenden Versuch simuliert worden. Stellen Sie sich zum Beispiel ein rotes Quadrat vor in dessen Mitte sich ein kleineres, grünes Quadrat befindet. Wenn Sie die Grenze zwischen beiden Flächen künstlich auf ihrer Retina stabilisieren, verlieren Sie zunächst die Wahrnehmung des grünen Quadrats und es bleibt nur die rote Fläche des Hintergrunds übrig. Nach ungefähr einer Sekunde ohne jede Bewegung relativ zur Retina löst sich dann auch dieser Ein-

druck auf und sie sehen nichts mehr. Das ist der Fall, weil uns die Photorezeptoren nur Potentialunterschiede, nicht aber absolute Potentialniveaus melden, was ebenfalls der Effizienzsteigerung dient. Damit uns die Wahrnehmung nicht verloren geht, wenn der Blick längere Zeit auf einem Punkt verweilt, führen die Augen mehrmals pro Sekunde unbewußte und in der Richtung zufällige Bewegungen aus, sogenannte **Mikrosakkaden**.

Die Antwort darauf, warum unser visuelles System die Objekte anhand der Grenzflächen zwischen Bereichen unterschiedlicher Farbe und Helligkeit strukturiert und unterscheidet, ist einfach: Wirtschaftlichkeit, Effektivität und geringer Energieverbrauch. Es ist sehr sinnvoll, weil ökonomisch, daß das visuelle System die Objekte anhand der Unterbrechungen der Lichtmuster verarbeitet, denn so braucht es nur jene Bildteile zu codieren, an denen sich etwas verändert und nicht etwas das Bild als Ganzes. Kanten und Grenzflächen sind die einzig wichtigen Informationen, die der Apparat in unseren Köpfen braucht, um die Formen, die Gestalten der Dinge in unserer Umwelt zu konstruieren. Es ist unnötig, Helligkeit und Farbe an jedem einzelnen Punkt eines beispielsweise durchgehend roten Gegenstands zu definieren. Statt dessen reicht es völlig aus dies überall dort zu

tun, wo sich etwas ändert. Und das ist eben an einer Kante oder Grenzfläche der Fall. Auf diese Weise reduziert sich die zu übertragende und zu verarbeitende Informationsmenge erheblich. Diese Zusammenhänge beleuchtet der Abschnitt „Zweiter Schritt – Beginn der Informationsverarbeitung“ (S. 20 ff) ausführlich.

Angeichts dieser Zielsetzung ist es natürlich wichtig für uns, den Kontrast an einer Objektkante über einen möglichst weiten Helligkeitsbereich hinweg unterscheiden zu können. Wie groß das Kontrastvermögen des visuellen Systems ist und mit welchen Mitteln es den Dynamikbereich überbrückt, darum geht es in diesem Kapitel.

Der Dynamikbereich des visuellen Systems

Vom sternenlosen Nachthimmel mit einer Lichtstärke von $4 \cdot 10^{-6}$ cd/m² (=0,000004 cd/m²) bis zur im Zenit stehenden Sonne, die eine Lichtstärke von $3,2 \cdot 10^6$ cd/m² (= 320 000 000 cd/m²) besitzt, ergibt sich der gewaltige Wert von 12 log₁₀ Einheiten, in dem unser visuelles System arbeitet. Eine log₁₀ Einheit umfasst rund 3 Belichtungsstufen, also sind dies gute 36 Belichtungsstufen.

Die Lichtstärkenangaben sind etwas abstrakt, was? Um es nachvollziehbarer zu machen: Der Vollmond erzeugt auf einem Stück Papier beispielsweise eine Leuchtdichte von 0,0001 cd/m². Die Grenze zum normalen Farbsehen liegt bei einer Leuchtdichte von circa 0,01 cd/m². Bequem lesen können wir in der Regel ab einer Leuchtdichte von 1 cd/m² und ein unbedeckter Tageshimmel erzeugt eine Leuchtdichte von ungefähr 1 000 000 cd/m². Diese Werte sind der pure Wahnsinn, wenn wir an unsere analogen und digitalen Aufnahmematerialien denken. Umkehrfilm kann in der Projektion einen im Gegensatz dazu bescheidenen Kontrastumfang von 1:64 oder sechs Belichtungsstufen wiedergeben, Negativmaterial beherrscht gute zehn Stufen und die digitale Technik hat nun gute 12 Belichtungsstufen erreicht. Es ist also kein Wunder, daß wir so oft von unseren Bildergebnissen enttäuscht sind und einen zu hellen Himmel mit dem Grauverlauffilter zurückhalten müssen, um die Details des schon im Schatten liegenden Vordergrundes zu erhalten.

Das visuelle System erreicht dieses große Maß durch die Kombination mehrerer unterschiedlicher Faktoren. Die Signalisierung eines bestimmten

Kontrastwahrnehmung

Kontrastumfangs durch die Photorezeptoren ist einer davon. Die Fähigkeit des visuellen Systems seine Empfindlichkeit auf unterschiedlichen Ebenen anzupassen ein Anderer.

Der Antwortbereich der Photorezeptoren

Auf der untersten Ebene sind die Photorezeptoren für die Wahrnehmung der Helligkeiten und Helligkeitsunterschiede verantwortlich. Um ihre Reaktion auf einen Helligkeitsreiz darzustellen, nutzen wir die Charakteristik-Kurve. Sie stellt den auf der x-Achse in \log_{10} Einheiten abgetragenen Reizhelligkeiten die linearen Rezeptorantworten auf der y-Achse gegenüber. Letztere geben den Anteil zwischen minimalem- und maximalem Ansprechwert an. Um eine Charakteristik-Kurve für die Photorezeptoren zu erstellen, bediente sich die Wissenschaft des Tierversuchs. *In vivo*, also an einer intakten Retina, ermittelt, ergibt sich eine Kurve wie in Abb. 5-1.

An ihr fällt zuerst die S-Form auf, die sie mathematisch als **Sigmoidfunktion** ausweist und die uns Photographen von den Tonwertkurven unserer Bildträger her sehr vertraut ist. Hier geht sie auf die nichtlineare synaptische Übertragung zurück: Die Ausschüttung des Transmitters an der Synapse (der Kon-

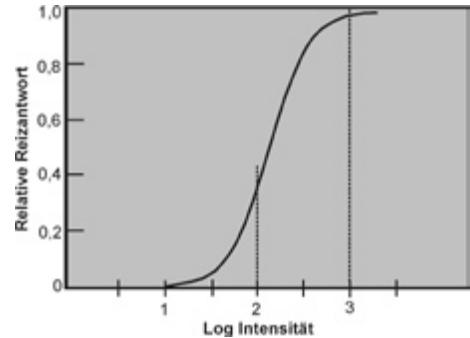


Abb. 5-1: Charakteristik-Kurve der Zapfenrezeptoren

taktstellen zwischen den Nervenzellen und anderen Zellen) folgt der Depolarisation des Rezeptors (quasi dem vor-synaptischen Potential) in exponentieller Weise. Ein Depolarisationswert von beispielsweise 1,50 mV produziert auf der anderen Seite der Synapse einen um den Exponenten e höheren Leitwert ($1,50^e$). Diese Art der Verarbeitung minimiert den Rauschpegel und hat den angenehmen Nebeneffekt, daß ein weicher, kaum spürbarer Übergang zu den beiden Enden des Dynamikbereichs einsetzt. Beides, weicher Übergang, um Tonwertabrisse zu vermeiden und Rauschminderung werden uns sowohl im analogen als auch im digitalen Kontrastverhalten wiederbegegnen. Weiter ist an der Kurve abzulesen, daß die Rezeptoren Helligkeiten im Bereich von 3 \log_{10} Einheiten retinaler Beleuchtungsstärke (Troland) verarbei-

ten, was einem Kontrastverhältnis von 1000:1 entspricht (= 8,5 Belichtungsstufen) und daß die Helligkeitsunterschiede in einem Bereich von $1 \log_{10}$ Einheit (entspricht einem Kontrastverhältnis von 10:1 oder 3,3 Belichtungsstufen [$\log 2 = 0,3$, $10/0,3 = 3,3$]) linear umgesetzt und über bzw. unter diesem Bereich komprimiert werden. In diesem linearen Bereich ist die Unterscheidungsfähigkeit am besten ausgeprägt. Die hohe Steigung der Kurve (ihr Gammawert) in diesem linearen Bereich sagt, daß der Kontrast erhöht wird. Die wahrgenommenen Helligkeitsunterschiede sind also größer als die tatsächlichen Intensitätsunterschiede.

Diese Zahlen spiegeln die perfekte Anpassung des visuellen Systems an unsere Lebensumgebung wider, denn die meisten voll beleuchteten Objektoberflächen (mit Ausnahme von Glanzlichtern, Reflexionen oder den Lichtquellen selbst) besitzen ein Kontrastverhältnis von nur 20:1 bis 80:1. Schattenpartien können die Oberflächenhelligkeiten um rund $1 \log_{10}$ Einheit reduzieren und setzen die Anforderung so auf 200:1 hoch.

Die Hell-/Dunkel-Adaptation

Aber unsere Augen verfügen über nicht nur eine Art Photorezeptoren, sondern zwei und einer ihrer spannendsten Eigenschaften ist die unter-

schiedlichen Empfindlichkeiten. In der Analogie zur Photographie weist die Retina zwei Filmarten auf: einem empfindlichen SW-Film (die Stäbchenrezeptoren) und einem weniger empfindlichen Farbfilm (die Zapfenrezeptoren). Die unterschiedlichen Empfindlichkeiten haben beide dem ihnen jeweils innewohnenden Pigment zu verdanken. Das Rhodopsin in den Stäbchen zerfällt schon bei geringen Lichtstärken, das Iodopsin der Zapfen braucht dazu mehr Energie. Aus diesem Grund sind die Stäbchenzellen vor allem bei geringer Beleuchtungsstärke aktiv. Am Abend und in der Nacht zum Beispiel. Die Zapfenzellen arbeiten dagegen fast nur am Tag und ermöglichen uns das Sehen bei hellem Licht. Die Empfindlichkeitsanpassung des Stäbchen- und Zapfenapparats an veränderte Helligkeiten nennen wir Hell- bzw. Dunkel-Adaptation. Beide sind der Rhodopsin-Regeneration und damit verbundenen chemischen Prozessen zu verdanken. Innerhalb der Adaptation können wir drei Hauptzustände unterscheiden:

Das **skotopische Sehen** (Nachtsehen), für das bei Leuchtdichten zwischen $3 \cdot 10^{-6}$ cd/m² und $3 \cdot 10^{-2}$ cd/m² (=0,000003 bis 0,03 cd/m²) die Stäbchenrezeptoren zuständig sind ($4 \log_{10}$ Einheiten)

Kontrastwahrnehmung

Das den Übergang zwischen den beiden Hauptadaptationsstufen markierende **mesopische Sehen** (Dämmerungssehen) bei Leuchtdichten zwischen $3 \cdot 10^{-2} \text{ cd/m}^2$ bzw. $3 \cdot 10^0 \text{ cd/m}^2$ bis $3 \cdot 10^1 \text{ cd/m}^2$ ($=0,03$ bzw. 3 cd/m^2 bis 30 cd/m^2), bei dem sowohl Zapfen als auch Stäbchen aktiv sind (je 1 \log_{10} Einheit für Stäbchen und Zapfen)

Das **photopische Sehen** (Tagesehen), das die Zapfenrezeptoren bei Leuchtdichten zwischen $3 \cdot 10^0 / 3 \cdot 10^1$ und $3 \cdot 10^6 \text{ cd/m}^2$ ($= 3/30 \text{ cd/m}^2$ bis 3 000 000 cd/m^2) leisten (6 \log_{10} Einheiten). Die angegebenen Grenzen sind fließend und individuell verschieden.

Mit dem Übergang vom photopischen Stäbchensehen zum skotopischen Zapfensehen stellen wir also einen großen Adaptationssprung fest, durch die Empfindlichkeitsanpassung

der Rezeptoren innerhalb dieser beiden Stufen viele zusätzliche kleine. Den ersten Fall können wir uns etwa wie folgt vorstellen: Nehmen wir an, Sie begeben sich aus der strahlenden Helligkeit eines Sommertags in Ihren dunklen Keller. Vielleicht wollen Sie Ihr Fahrrad holen, um ins Freibad zu fahren. Im ersten Moment ist es zu dunkel, als das Sie irgendwas erkennen könnten und Sie stoßen sich wahrscheinlich an einem herumstehenden Möbelstück. Nach und nach aber findet die Empfindlichkeitsanpassung an die veränderte Allgemeinhelligkeit statt und Sie sehen zuerst Einzelheiten, später dann immer mehr allerdings farblose Details in der dunklen Umgebung. Ein eigentlich schwacher Lichtreiz, wie der rot glimmende Not-Aus-Schalter neben der Tür zum Heizungskeller, wird Ihnen während dieser Adaptationsphase nach und nach immer heller erscheinen.

Auf der Ebene der Rezeptoren geschieht dabei folgendes: Im allerersten Moment der Dunkelheit sehen Sie gar nichts, weil die zuvor wirkende Belichtung die Empfindlichkeit von Stäbchen und Zapfen weit herabgesetzt hat. Nach dieser „Schrecksekunde“ nutzen beide Rezeptorarten die Gunst der Stunde, um ihr Pigment zu regenerieren. Bei den Zapfen geht dies am schnellsten

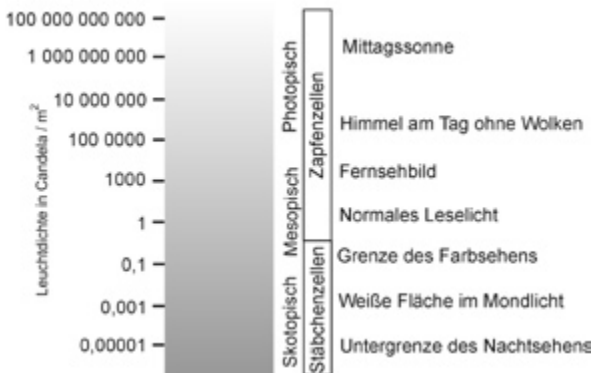


Abb. 5-2: Vergleich verschiedener Leuchtdichtewerte

und ihre leicht gesteigerte Empfindlichkeit bringt die zunächst schemenhaften Umrisse hervor. Nach fünf bis zehn Minuten, wenn die Zapfen ihre Empfindlichkeit nicht weiter erhöhen können, haben sich die Stäbchen so weit regeneriert, daß sie beginnen ihren Teil beizusteuern. In dem Maß, in dem sie adaptieren, wird unsere Wahrnehmung nun von ihren Eigenschaften bestimmt, so daß wir mit der Zeit immer mehr Einzelheiten erkennen können, diese aber nahezu farblos bleiben.

Begeben Sie sich nach einiger Zeit wieder nach draußen, wird Sie die große Helligkeit zunächst für einen Moment blenden. In dieser kurzen Zeitspanne wird der Großteil des Rhodopsin-Vorrats der Stäbchen gebleicht und kann, solange die photopischen Bedingungen andauern, nur unvollständig regeneriert werden. Sie sind quasi gesättigt und ohne Pigment, das zerfallen kann, und so geben die Rezeptoren natürlich auch kein Signal ab. Doch nun ist wieder genug Licht vorhanden, um die Zapfen in Aktion zu setzen, die uns mit den für die Wahrnehmung von Farben nötigen Informationen versorgen.

Der zweite Fall, die Adaptation innerhalb einer der beiden Hauptzustände, findet statt, wenn die Umgebungshelligkeit nicht ins völlige Gegenteil umschlägt, trotzdem aber

spürbar wechselt. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn wir aus dem hellen Tageslicht in den Schattenbereich eines großen Baums treten. Proportional zur Helligkeitsänderung kann nun Pigment regeneriert werden, so daß die Lichtempfindlichkeit der Rezeptoren ansteigt.

Um die Empfindlichkeit der Rezeptoren innerhalb der Adaptationszustände anzugeben, können wir die Helligkeit eines gerade wahrnehmbaren Lichtreizes vermessen und als Kurve über der Zeitachse einzeichnen. Das daraus resultierende Diagramm wird als **Adaptationskurve** bezeichnet (Abb. 5-3). Seine vertikale Achse gibt die Helligkeit des Lichtreizes an. Da die Spanne unserer Empfindlichkeit sehr groß ist, benutzen wir hier eine logarithmische Skala. Werte am oberen Ende stehen für große Reiz-Helligkeiten und bedeuten, daß unsere Empfindlichkeit gering ist. Solche am unteren Ende repräsentieren geringe Helligkeiten, aber umgekehrt große Empfindlichkeit. Die horizontale Achse gibt die Zeit in der Dunkelheit in Minuten an. Von links nach rechts gelesen sagt uns die Abbildung, daß, wenn wir uns just vom Hellen ins Dunkle begeben haben, ein starker Helligkeitsreiz nötig ist, um wahrgenommen zu werden. Während der folgenden Minuten steigern die

Kontrastwahrnehmung

Rezeptoren ihre Empfindlichkeit und die Helligkeitsschwelle zur Wahrnehmung sinkt zunächst sehr schnell und dann langsamer. In dieser Phase, während der ersten fünf bis zehn Minuten, können wir durchaus noch die Farbe des aufgefassten Lichtreizes angeben und das ist ein sicheres Zeichen dafür, daß unsere Zapfenzellen noch aktiv sind. Dann ändert die Kurve ein wenig ihre Richtung und die Empfindlichkeit steigt wiederum sprunghaft an. Nach diesem markanten Punkt (dem sogenannten **Kohlrausch-Knick**) sind zwar nur noch schwächere Lichtreize nötig, um wahrgenommen zu werden,

aber wir können deren Farbe nicht mehr auffassen, denn jetzt hat das System auf die Stäbchen umgeschaltet. Die Kurve fällt dann immer weiter ab bis sie nach rund 30 Minuten den Boden erreicht hat und nur noch gerade verläuft. Nach dieser langen Zeit in der Dunkelheit sind wir fähig einen so schwachen Lichtreiz zu entdecken, wie er einer einzelnen Kerze aus 16 km Entfernung entspricht!

Das flexible System der Adaptation stellt sicher, daß unsere Augen immer mit der richtigen Empfindlichkeit arbeiten, so wie wir in der Photographie auch die Filmempfindlichkeit an die Umgebungshelligkeit anpassen. Und genau wie dort tauschen wir auch in unserer visuellen Wahrnehmung Auflösung und Detailschärfe gegen Empfindlichkeit, denn wie der vorangegangene Abschnitt gezeigt hat, besitzt der Ort des schärfsten Sehens (die Fovea centralis) keine Stäbchenrezeptoren und darüber hinaus nimmt ihre Dichte zu den Rändern der Retina hin ab. Zudem lässt das visuelle System beim skotopischen Sehen die Farbe „hinten ‘runter fallen“. Dieses Opfer müssen wir in der Aufnahmetechnik heute nicht mehr so wie früher bringen, als die höchstempfindlichsten Filme immer schwarzweiß waren.

Aber der Wechsel vom skotopischen zum photopischen Sehen (von den

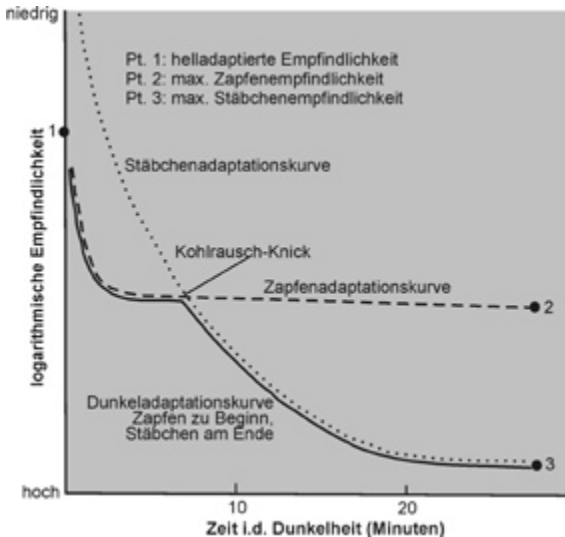


Abb. 5-3: Adaptationszustände

Stäbchen zu den Zapfen) hat noch eine andere Konsequenz als die reine Absenkung oder Anhebung der generellen Empfindlichkeit und wir haben sie oben bereits ansatzweise erwähnt. Abb. 5-4 zeigt, daß beide, Stäbchen und Zapfen, für verschiedene Wellenlängenbereiche des Spektrums unterschiedlich empfindlich sind. Die Stäbchen reagieren am besten auf den kurzwelligen blauen Bereich, die Zapfen dagegen auf den eher langwelligen roten. Sehen wir also unter photopischen Bedingungen mit den Zapfen, wird uns ein rotes Objekt heller erscheinen als ein objektiv gleich helles blaues. Unter skotopischen Bedingungen verhält sich dies genau umgekehrt. Diesen Wechsel in der wahrgenommenen Helligkeit unterschiedlicher Farben wird nach seinem Entdecker **Purkinje-Phänomen** bzw. **Purkinje-Shift** genannt (Abb. 5-5).

Die laterale Hemmung

Ein Anpassungsmechanismus, der wiederum auf der Ebene der einzelnen Rezeptoren wirkt, ist die **laterale Hemmung** (seitliche) **Hemmung**. Ohne sie wäre der weite Dynamikbereich der Photorezeptoren nicht darstellbar. Abb. 5-6 illustriert die Funktionsweise. Alle Photorezeptoren sind über die Amakrin- und Horizontalzellen der

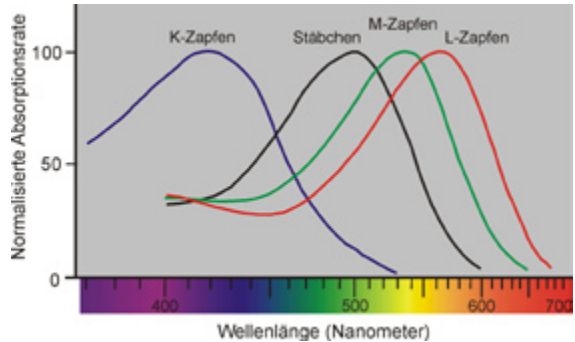


Abb. 5-4: Normalisierte Absorptions-Spektren der Stäbchen- und Zapfenzellen (1).

Retina rückgekoppelt und so in der Lage, sich gegenseitig in ihren Ausgabepotentialen zu beeinflussen. Wenn jeder Rezeptor durch seinen



Abb. 5-5: Purkinje-Shift. Die Abbildung simuliert den Wechsel der wahrgenommenen Farbigkeit zwischen dem mesopischen Sehen links und dem skotopischen Sehen rechts.

Kontrastwahrnehmung

Nachbarn gehemmt wird, nimmt sein Ausgabepotential einen Wert an, der dem Logarithmus seiner eigenen Beleuchtungsintensität minus dem hemmenden Effekt entspricht. Weist die Hemmung einen Wert > 0 auf wird das Ausgabepotential geringer sein als es aufgrund der Beleuchtungsintensität eigentlich sein müsste und es

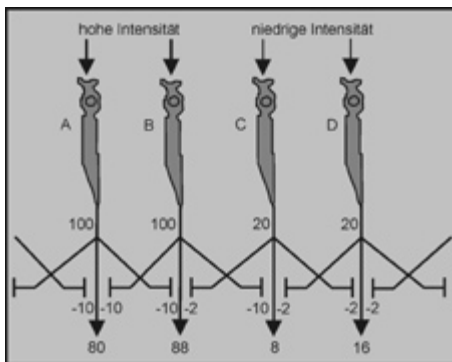


Abb. 5-6: Laterale Hemmung

Zapfenrezeptoren erregen primär die mit ihnen verbundene Horizontalzelle. Zugleich sind sie aber auch über Kreuz mit der Horizontalzelle des jeweils anderen Rezeptors verbunden und üben dort eine hemmende Wirkung aus. Nimmt nun die globale Beleuchtungsstärke und damit die primäre Erregung zu, so vergrößert sich auch die hemmende Wirkung und der Wechsel der Beleuchtung wird nahezu ignoriert. Erhält dagegen nur einer der Rezeptoren mehr Licht, so verstärkt sich sein erregendes Signal einseitig, die hemmende Wirkung des zweiten Rezeptors bleibt unverändert.

ist mehr Licht erforderlich, um diese Reizgröße zu erreichen. Als Resultat erhalten wir einen größeren Abstand zwischen der geringsten und der größten Helligkeitsintensität, die der Rezeptor verarbeiten kann, und damit einen größeren Dynamikbereich. Diese Art der Verschaltung spielt eine eminent wichtige Rolle in der Funktion unseres visuellen Systems. Sie ist mit unterschiedlichen Verrechnungsweisen in verschiedenen digitalen Bildträgern implementiert worden und hat zu echten Steigerungen des Dynamikumfangs geführt (2).

Übertragen auf die gesamte Netzhaut bedeutet dies, daß die Rezeptoren bei lokal unterschiedlichen Helligkeiten auch auf **lokal unterschiedliche Adaptationsniveaus** gehoben oder gesenkt werden. Demzufolge können wir eine große Anzahl einzelner Adaptationsstufen ausmachen, die dafür sorgen, daß der Dynamikbereich der Retina stets optimal an die Helligkeitsmuster einer Szene angepasst ist. Für die Photographie hieße dies wir hätten für die Schatten und die Lichter eines Motivs unterschiedlich empfindliche Bereiche innerhalb des zu belichtenden Bildträgers. Und wirklich gibt es unter anderem von *Fuji* Farbnegativfilme, die einen Mix aus hoch- und niedrigempfindlichen

Silberhalogenid-Kristallen in ihren Schichten vereinen und damit für einen gesteigerten Dynamikumfang und verbesserte Zeichnung in den Schatten sorgen. Diese Idee hat *Fuji* auch auf die Digitaltechnik übertragen und seine *Super-CCD SR Sensoren* mit zwei ebenfalls unterschiedlich empfindlichen Photodioden innerhalb eines Pixels ausgestattet. Weitere technische Umsetzungen dieses Zusammenhangs finden sich in (3) und (4).

Dynamische Verstärkung

Ein weiterer mitspielender Mechanismus ist noch spekulativ. Er geht davon aus, daß die **Verstärkung der Ausgabegrößen jedes einzelnen Rezeptors in Abhängigkeit der Beleuchtungsintensität** direkt an der in Folge des Pigmentzerfalls einsetzenden Enzymkaskade geregelt werden kann. In nicht zu den Säugetieren zählenden Wirbeltierarten, wie den Schildkröten, ist ein solcher auf Kalzium basierender Vorgang zumindest im äußeren Segment der Stäbchenrezeptoren nachgewiesen worden (5). Für uns Menschen bleibt dies zwar noch Spekulation, aber in der digitalen Aufnahmetechnik ist etwas ähnliches schon realisiert. Forscher vom *Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme* haben 1999 einen Sensorchip und

ein digitales Kamerasystem entwickelt, die auch bei großen Helligkeitsdifferenzen gute Bilder liefern. Prinzip des Systems: Jedes Pixel wird zunächst mit bis zu vier verschiedenen Belichtungszeiten ausgelesen, aus denen dann die jeweils günstigste gewählt wird. Im zweiten Schritt folgt die je nach Signalwert unterschiedliche Verstärkung der Bildsignale bereits auf dem Chip. Niedrige Pegel, etwa die Schattenbereiche einer Aufnahme, werden angehoben, die aus der Lichterzone stammenden hohen Pegel bleiben dagegen unverändert. Im Zusammenhang sorgen beide Methoden dafür, daß eine Übersteuerung der Pixel bei zu großer Helligkeit weitgehend vermieden wird. Nach dem Auslesen der Bildsignale werden den digitalen Werten die vom Chip ausgewählte Verstärkung sowie die entsprechende Belichtungszeit hinzugefügt. Aus diesen Informationen ermittelt eine spezielle Software dann für jeden Pixel den richtigen Helligkeitswert. Das Komplettsystem gestattet die Darstellung von 1 Million unterschiedlichen Helligkeitswerten.