

## Visuelle Schärfe

### Standortbestimmung – Was ist visuelle Schärfe?

Die Helligkeit eines Lichtreizes können wir in  $\text{cd/m}^2$  messen, seine Farbigkeit über die Wellenlängenstruktur bestimmen, aber Schärfe ist eine rein wahrgenommene Eigenschaft einer visuellen Szene, die wir nicht direkt bestimmen können. Sie liegt nur im Auge des Betrachters. Allgemein bezeichnen wir einen visuellen Eindruck als scharf, wenn die Objekte klar voneinander abgegrenzt sind. Damit ist

Visuelle Schärfe ist ein Abfallprodukt jenes Prozesses, in dem das visuelle System die Objektwahrnehmung realisiert.

visuelle Schärfe im Gegensatz zur geschmeckten oder gerochenen Schärfe jenes Empfindungsmaß, anhand dem wir die Klarheit oder Deutlichkeit der Objektkanten bemessen. Diese Kanten und Grenzflächen zu erfassen ist von hohem Interesse für das visuelle System, denn wie der erste Band dieser Reihe gezeigt hat organisiert es an ihnen die Objektwahrnehmung: Die Gegenstände einer Szene werden nicht vollständig erfasst, sondern anhand der wahrgenommenen Kanten

einzelnen konstruiert. 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 Eindruck 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

## Standortbestimmung – Was ist visuelle Schärfe?

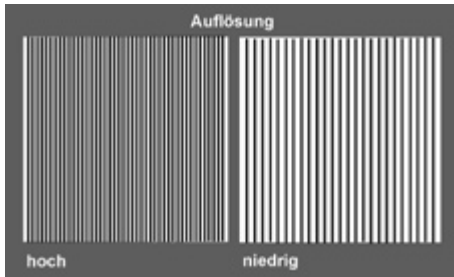


Abb. 6-1: Konzept Auflösung

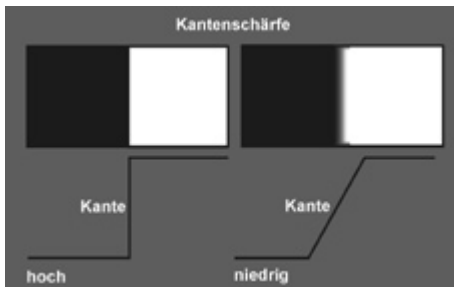


Abb. 6-2: Konzept Kantenschärfe

der Grenzflächen zwischen Bereichen unterschiedlicher Farbe und Helligkeit strukturiert und unterscheidet, ist einfach: Wirtschaftlichkeit, Effektivität und geringer Energieverbrauch. Diese Zusammenhänge beschreibt der Abschnitt „Zweiter Schritt – Beginn der Informationsverarbeitung“ (S. 20 ff) ausführlich.

Um möglichst viele Kanten möglichst genau erfassen zu können, müssen Auge und Gehirn das Blickfeld so detailliert wie möglich rastern

und die Grenzflächen dann isolieren. Das ist eine ziemlich ambitionierte Aufgabe und unser visuelles System bewältigt sie in mehreren Stufen. Zur präzisen Abtastung benutzt es eine große Anzahl Photorezeptoren. Ihr Abstand zueinander bestimmt neben ein paar anderen Faktoren, die wir

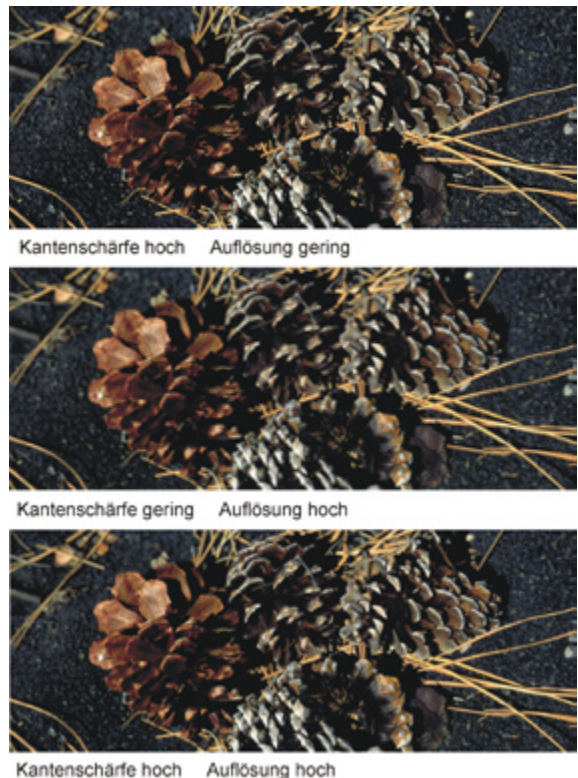


Abb. 6-3: Die Kombination von Auflösung und Kantenschärfe bestimmt über unseren visuellen Schärfeeindruck

## Visuelle Schärfe

weiter unten kennenlernen werden, über das **Auflösungsvermögen** des Sehapparats.

Um die Objektkanten in dem so produzierten Bild zuverlässig isolieren zu können, verfügt das visuelle System über die bemerkenswerte Fähigkeit, die aus der Belichtung der Photorezeptoren resultierenden Nervenimpulse (quasi seine visuellen Daten) wie ein Computer verarbeiten zu können. Dazu dient ihm ein bestimmter Typ Ganglienzellen, die physiologisch in Zentrum und Peripherie gegliedert sind. Beide sind so verschaltet, daß sie sich wechselseitig hemmen. Dieser Zellaufbau wird **Center/Surround Organisation** (siehe Abb. 1-6 auf S. 19) genannt und dient dazu, Unregelmäßigkeiten, eben Objektgrenzen, herauszufiltern. Je härter die Kontur ist, je unmittelbarer ihr Übergang, umso größer ist das Ausgabepotential so einer Center/Surround Zelle und unser daraus entstehender **Schärfeeindruck der Kante**.

Mit dem **Auflösungsvermögen** und der **Kantenschärfe** haben wir nun also die beiden Konzepte herausgearbeitet, die ursächlich für unseren Schärfeeindruck verantwortlich sind. Sie wollen wir im Folgenden genau beleuchten.

## Das Auflösungsvermögen des visuellen Systems

Auflösung meint das Maß, mit dem das visuelle System eine Szene rastert. Sie entspricht der Packungsdichte der Photorezeptoren, die in der Sehgrube (Fovea centralis) am größten ist (siehe „Die Anordnung der Photorezeptoren auf der Netzhaut“). Man kann sagen, daß das Auflösungsvermögen in der Fovea so hoch ist, damit wir möglichst viele Kanten möglichst präzise erfassen können.

Unser Schärfeeindruck einer natürlichen Szene oder einer Photographie ist umso größer je mehr Einzelheiten wir wahrnehmen. Darüber, wie viele Details wir auffassen, bestimmt das Auflösungsvermögen unseres visuellen Systems. Dies können wir auf verschiedene Wahrnehmungsleistungen beziehen: Wir können bestimmen, wie groß der Abstand zwischen zwei Objekten mindestens sein muss, damit sie als getrennt aufgefasst werden. Das wird **Auflösungs-Sehschärfe** genannt. Wir können bestimmen, wie groß ein Objekt mindestens sein muss, damit es noch erkannt wird. Das wird **Erkennungs-Sehschärfe** genannt. Wir können die kleinste Ob-

jektgröße bestimmen, die gerade noch wahrnehmbar ist. Das wird **Minimalkennbare-Sehschärfe** genannt. Und wir können den geringsten wahrnehmbaren Versatz zwischen zwei Linien bestimmen. Das wird dann **Hyper-Sehschärfe** oder **Vernier-Sehschärfe** genannt. Für unserer photographisch orientierte Betrachtung ist die **Auflösungs-Sehschärfe** relevant. Sie hängt von mehreren Faktoren ab, die sich zu einem Maß ergänzen das eine Abbildung nicht zu überschreiten braucht, um einen scharfen Eindruck zu machen. Sie werden wir in den folgenden Abschnitten genau unter die Lupe nehmen.

### Die Beugung als physikalische Einschränkung

Lichtwellen verlaufen normalerweise geradlinig durch den Raum. Treffen sie auf ein Hindernis oder passieren ein solches sehr nah („nah“ meint im Bereich weniger Wellenlängen), so werden sie aus dieser geraden Richtung abgelenkt. Diesen Vorgang nennen wir **Beugung**. Er ist ein unvermeidbarer physikalischer Effekt und unabhängig von der Qualität der Optik. Je kleiner die Öffnung, umso größer ist die Beeinträchtigung der Abbildung durch die Beugung.

Aufgrund dieser Zerstreuung in unterschiedliche Richtungen legen

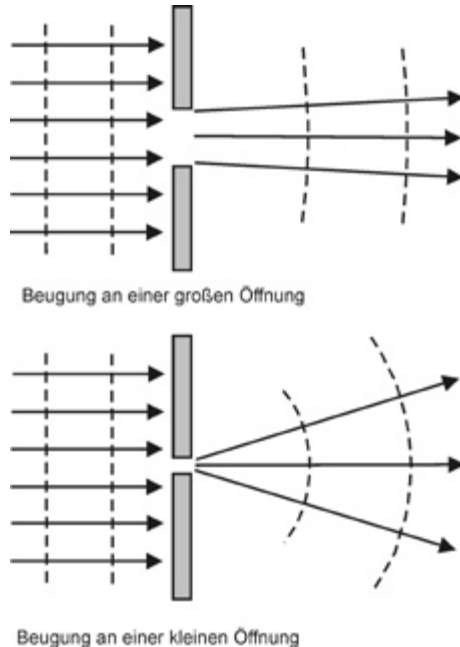


Abb. 6-4: Beugung von Lichtstrahlen an einer großen Öffnung bzw. einer kleinen Öffnung

die Lichtwellen dann nicht mehr alle dieselbe Entfernung zurück, sondern verlassen zum Teil ihre ursprüngliche Schwingungsrichtung. Das führt dazu, daß sie sich an einer Stelle überlagern und ergänzen bzw. an einer anderen ganz oder teilweise auslöschen. Diese Überlagerung (**Interferenz**) produziert ein **Beugungsmuster**, das die höchste Intensität dort aufweist, wo sich die Wellen addieren und die geringste, wo sie sich auslöschen.

## Visuelle Schärfe

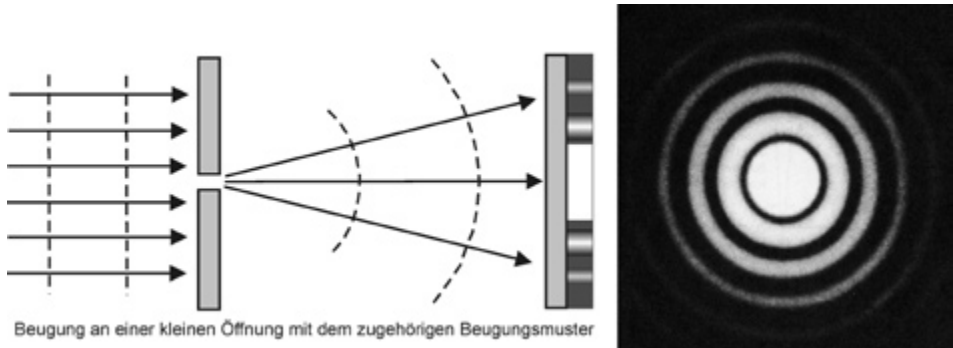


Abb. 6-5: Beugung von Licht an einem Spalt und das daraus resultierende Beugungsmuster

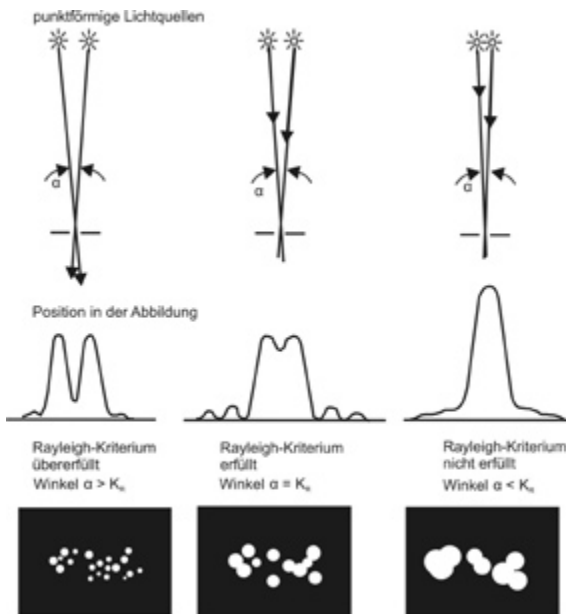


Abb. 6-6: Rayleigh-Kriterium und Auflösung

Würden wir die Stärke an jeder Position einer geraden Linie messen, so ergäbe sich ein Band ähnlich dem, das Abb. 6-5 zeigt.

Eine perfekt runde und daher ideale Blende würde ein Beugungsmuster produzieren, das nach seinem Entdecker, dem britischen Astronomen Sir George Biddell Airy (1835-1892), als **Airy-Scheibchen** (auch **Airy Disk**) bezeichnet wird. Auf einen praktischeren Fall übertragen können wir uns die Beugung wie bei einem Wasserschlauch vorstellen. Genügend Druck vorausgesetzt verlässt ihn das Wasser als nahezu runder Strahl. Wenn wir die freie Öffnung aber mit den Fingern ein wenig zusammendrücken, wird der Strahl zu einem mehr oder weniger breiten Fächer auseinandergezogen.

Da wir keine unendlich großen Optiken konstruieren können, ist jedes optische Gerät, unser Auge eingeschlossen, zwangsläufig im Hinblick auf seine Öffnung begrenzt. Sei es durch den Außendurchmesser oder die Größe einer eingebauten Blende. An diesem Flaschenhals wird das Licht abgelenkt und so kann die Optik eine entfernte punktförmige Lichtquelle selbst dann niemals in eben einem solchen Punkt abbilden, wenn alle sonstigen Abbildungsfehler beseitigt wären. Statt dessen fällt die Abbildung abhängig von der Öffnungsgröße mehr oder weniger unscharf aus und das Bild spiegelt in der Brennebene das allgemeine sogenannte **Fraunhofersche Beugungsmuster** wider. In vielen Fällen ist dieser Effekt so gering, daß er vernachlässigt werden kann, aber grundsätzlich verhindert er die Abbildung sehr feiner Details und damit die Vergrößerung eines Bildes über ein gewisses Maß hinaus.

Um das Auflösungsvermögen einer Optik zu beschreiben, benutzen wir das nach seinem Entdecker John William Strutt (1842-1919), dem 3. Lord Rayleigh, benannte **Rayleigh-Kriterium ( $K_R$ )**. Es besagt, daß zwei Lichtpunkte als aufgelöst gelten, wenn das Hauptmaximum des ersten das erste Minimum des zweiten nicht unterschreitet.

Maximum und Minimum der Lichtquellen müssen also durch eine Entfernung getrennt sein, die proportional zum Quotienten aus Lichtwellenlänge und Öffnungsdurchmesser ist. Damit ist klar, daß eine größere Öffnung auch feinere Details auflösen kann. Diesen Zusammenhang drückt die Formel für eine runde Öffnung aus:

#### Formel 1

$$\alpha_{Grenz} = 0,206 \frac{\lambda}{D}$$

$\alpha_{Grenz}$  = Auflösungsvermögen in Bogensekunden

$\lambda$  = Lichtwellenlänge

D = Öffnungsdurchmesser

Für das Auflösungsvermögen unserer Augen gilt das Rayleigh-Kriterium ebenfalls als grundsätzliche Richtmarke und mit der eben eingeführten Formel können wir das theoretisch maximal erreichbare Auflösungsvermögen berechnen. Dazu gehen wir von einem Pupillendurchmesser für das vollständig helladaptierte Auge von durchschnittlich  $D = 3$  mm und der Wellenlänge = 550 nm aus, für die der Rezeptorapparat des Auges am empfindlichsten ist:

## Visuelle Schärfe

$$\alpha_{Grenz} = 0,206 \frac{\lambda}{D}$$

$$\alpha_{Grenz} = 0,206 \cdot \left( \frac{550}{3} \right)$$

$$\alpha_{Grenz} = \frac{113,3}{3}$$

$$\alpha_{Grenz} = 37,7666'' = 0,6294' = 0,0105^\circ$$

Theoretisch können wir bei Tageslicht also zwei Punkte unterscheiden, die gerade 0,6294 Bogenminuten auseinander liegen. Anders ausgedrückt müssen die beiden Punkte 1 mm voneinander entfernt sein, damit wir sie aus 57 cm Entfernung als getrennt wahrnehmen.

Je größer die Blendenzahl, desto größer das Beugungs- oder Airy-Scheibchen. Die Frage, die sich nun stellt, ist, ab wann die Beugung zum begrenzenden Faktor für die Detailwiedergabe, also die Auflösung, wird. Dazu ist zunächst einmal zu betrachten, ab wann der Mensch die Beugungsscheibchen als getrennte Punkte wahrnimmt. Diese Untersuchung wurde 1879 von Lord Rayleigh durchgeführt und veröffentlicht. Sie zeigt, daß die Intensität des Bereiches zwischen zwei Airy-Scheibchen auf 81% der Maximalintensität abgefallen sein muss, damit die Scheibchen mit dem Auge als getrennt wahrgenom-

men werden können. Dieses ist genau dann der Fall, wenn die Maxima der Beugungsscheibchen einen Abstand haben, der dem Radius eines Scheibchens entspricht.

### Die Anordnung der Photorezeptoren auf der Netzhaut

Die Retina ist mit rund 110 Millionen Stäbchenrezeptoren und gut 6 Millionen Zapfenrezeptoren besetzt, die nicht gleichmäßig über die Netzhaut verteilt sind, sondern sich in bestimmten Bereichen konzentrieren und in anderen spärlicher vertreten sind. Drei Begriffe, die in diesem Zusammenhang wichtig sind, lauten Fovea centralis (auch Sehgrube), Blinder Fleck und Netzhautperipherie. Die **Fovea centralis** befindet sich genau in der Blicklinie, so daß ein Objekt welches wir direkt fixieren, exakt auf sie fällt. Der **Blinde Fleck** ist jener Ort, an dem der Sehnerv die Netzhaut verlässt und die **Netzhautperipherie** bezeichnet die verbleibende Fläche der Retina.

Aus der Abb. 6-7 können wir herauslesen, daß der Blinde Fleck als einzige Stelle völlig frei von Photorezeptoren beider Arten ist und sich die für das Nachtsehen verantwortlichen Stäbchenzellen mit von innen nach außen abnehmender Anzahl über die

## Das Auflösungsvermögen des visuellen Systems Die Anordnung der Photorezeptoren auf der Netzhaut

Netzhaut verteilen. Sie erreichen ihre größte Dichte in einem Kreis von  $20^\circ$  um die Fovea und sorgen so für eine auch bei geringer Beleuchtungsstärke ausreichende optische Auflösung. Über die anschließende erste Hälfte der Netzhaut bleibt die Anzahl der Stäbchen dann relativ konstant hoch, bevor sie zum Rand hin deutlich abnimmt. Die für das farbige Tagsehen zuständigen Zapfenzellen konzentrieren sich in auffälliger Weise in der **Fovea centralis** und sind ab einer Position von  $10^\circ$  in gleichbleibender Anzahl über die Netzhautperipherie verteilt. Daraus können wir einen wichtigen Zusammenhang ableiten, denn wenn Sie einmal den Blick heben und ein Objekt in Ihrer Umgebung fixieren, stellen Sie sicher fest, daß Sie dies klar und deutlich und scharf wahrnehmen, diese Deutlichkeit und Schärfe aber zum Rand des Gesichtsfeldes hin rapide abnimmt. Diese Verteilung des Schärfeeindrucks korrespondiert mit der Verteilung der Photorezeptoren, wie wir sie gerade herausgearbeitet haben und sagt uns unmissverständlich, daß die große Anzahl Zapfenrezeptoren in der Fovea centralis, auf die ein direkt fixiertes Objekt fällt, für unseren schärfsten Seheindruck verantwortlich sein muss. Aus diesem Grund wollen wir die folgende

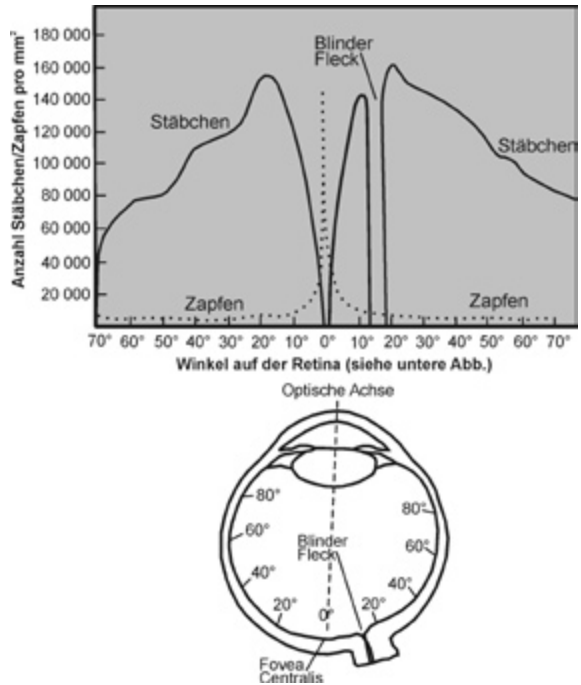


Abb. 6-7: Verteilung der Photorezeptoren auf der Netzhaut (1)

Betrachtung unseres visuellen Auflösungsvermögens ganz auf die Zapfen beschränken.

Der lichtempfindliche Durchmesser eines Zapfens beträgt rund  $1,5 \mu\text{m}$  und der Abstand zwischen den Zentren zweier Zapfen liegt bei circa  $2,5 \mu\text{m}$ . Dieser außerordentlich geringe Abstand wird erreicht, weil die Fovea ausschließlich mit den besonders schlanken M- und L-Zapfen bestückt ist, die für den mittelwelligen- bzw.



## Visuelle Schärfe

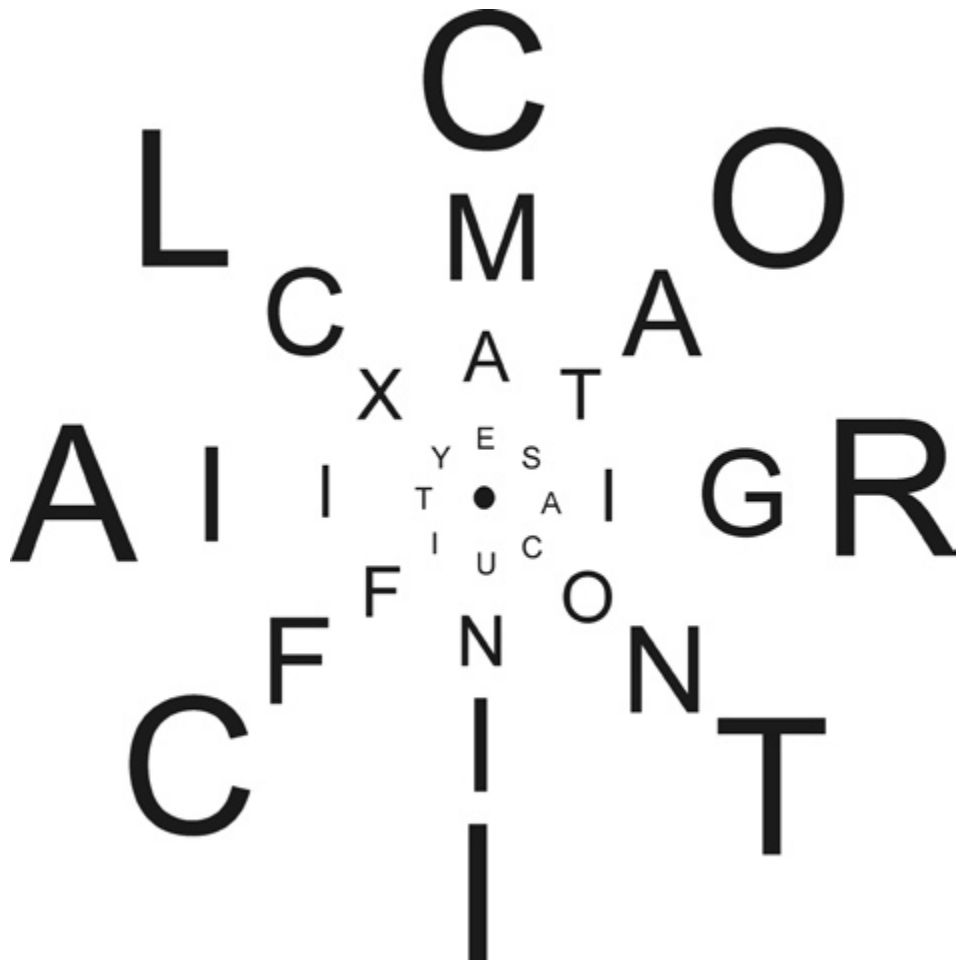


Abb. 6-8: Die Buchstabengrößen verdeutlichen, wie sehr unser Auflösungsvermögen vom Sehzentrum zur Peripherie hin nachläßt

langwelligen Teil des Spektrums empfindlich sind. Der Grund dafür liegt in den Problemen, die die chromatische Aberration mit sich bringt (siehe „Helligkeit und Farbe – Unsere Vorliebe für die warmen Farben“). Die geringfügig breiteren K-Zapfen, deren Sensibilität auf das kurzwellige Spektrum beschränkt ist, und natürlich auch die Stäbchenzellen fehlen hier ganz.

Das durch die Anordnung der Photorezeptoren in der Fovea definierte Auflösungsvermögen errechnen wir wie folgt: Die Brennweite des Auges beträgt ziemlich genau 25 mm. Wir dividieren den Rezeptorabstand von  $2,5 \mu\text{m}$  durch diese 25 mm und erhalten den Wert von 100 Mikroradian ( $=0,0001$  Radiant). Auf einen Radiant entfallen  $(180/\pi) \cdot 3600 = 206264,81$  Bogensekunden. Wir multiplizieren diesen Wert mit  $0,0001$  Radiant und erhalten  $20,626481$  Bogensekunden  $= 0,3437746$  Bogenminuten  $= 0,0057295$  Grad. Dieser Wert ist nur halb so groß, wie das durch das Rayleigh-Kriterium vorgegebene theoretische Maximum und ein weiterer Vergleich zeigt, daß mehr tatsächlich nicht geht. Denn wenn wir die theoretisch maximal erreichbare Auflösung von  $\alpha_{\text{Grenz}} = 0,0105^\circ$  zugrunde legen, bedeutet dies, daß die Beugungsbilder zweier punktförmiger Licht-

quellen auf der Netzhaut mindestens  $4 \mu\text{m}$  auseinander liegen müssen, um aufgelöst zu werden. Auf dieser Strecke befinden sich aufgrund ihrer eingangs festgestellten Größe drei Zapfenrezeptoren und dies ist gerade genug, um zwei Lichtquellen und

Der Radiant (Einheitenzeichen rad) dient zur Angabe der Größe eines ebenen Winkels. Er ist eine abgeleitete Einheit im SI-Einheitensystem. Der ebene Winkel von 1 Radiant umschließt auf der Umfangslinie eines Kreises mit 1 Meter Radius einen Bogen der Länge 1 Meter. Der Vollwinkel umfasst  $2\pi$  Radiant:

1 Vollwinkel =  $2 \pi$  rad.

(Deutsche Wikipedia)

das dunkle Stück zwischen ihnen zu erkennen. Eine größere Anzahl Zapfen ist unnötig, da diese zwar mehr Einzelheiten des Beugungsmusters, aber nicht der Lichtquellen auflösen würden. Umgekehrt würde eine geringere Anzahl Zapfen nicht die im Netzhautbild enthaltenen Details auflösen. Damit ist die Struktur der Netzhaut nahezu perfekt an das theoretisch maximal erreichbare Auflösungsvermögen angepasst.

## Visuelle Schärfe

### Die neuronale Verschaltung der Photorezeptoren

Neben ihrer Verteilung auf der Netzhaut unterscheiden sich die Photorezeptoren auch in ihrer Verschaltung mit den nachfolgenden Neuronen und auch dies hat Einfluss auf die Sehschärfe. Von vorn nach hinten wird die Signalmenge der rund 120 Millionen Photorezeptoren stufenweise verringert und auf die 1 Million Ganglienzellen zusammengeführt, deren Verlängerung als Sehnerv aus dem Auge hinaus führt. Dabei laufen aufgrund der größeren Menge durchschnittlich 120 Stäbchen, aber nur sechs Zapfen in je einer Ganglienzelle zusammen. Diese Diskrepanz wird unter der Be-

rücksichtigung der Tatsache, daß viele Zapfenzellen der Sehgrube exklusiv mit einer Ganglienzelle verschaltet sind, noch größer.

Abb. 6-9 illustriert den praktischen Effekt der Konvergenz. Aus der Erregung der zwei Stäbchenrezeptoren und der Reizantwort der Ganglienzelle, in der sie gemeinsam mit drei anderen zusammenlaufen, kann das visuelle System unmöglich auf das tatsächliche Vorhandensein von zwei getrennten Lichtreizen schließen. Die Zapfenrezeptoren der Fovea centralis sind dagegen exklusiv mit jeweils einer Ganglienzelle verbunden und deshalb wird die Reizantwort von zwei separaten Rezeptoren auch als solche wahrgenommen.

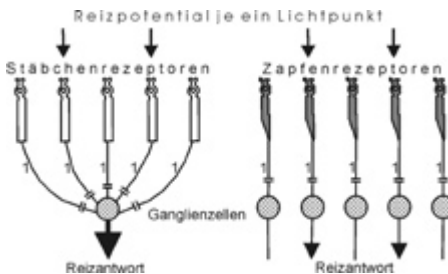


Abb. 6-9: Neuronale Verschaltung u. Sehschärfe. In diesem Fall wirkt sich die große Konvergenz der Stäbchen negativ aus, denn die Reizreaktion der einen Stäbchenganglienzelle gibt keinen Hinweis auf die erregenden zwei Lichtpunkte. Die exklusive Verschaltung der Zapfen ist hier im Vorteil und erhöht deren Fähigkeit zur räumlichen Auflösung.

### Die Qualität der Augenoptik

Damit überhaupt ein scharfes Bild auf der Netzhaut entstehen kann, müssen die lichtbrechenden Einheiten des Auges perfekt zusammenspielen. Dies sind **Hornhaut** und **Linse**. Ihre Aufgabe ist es, die aus unterschiedlichen Winkeln eintreffenden Lichtstrahlen zu bündeln und so zu brechen, daß sie sich nicht einfach geradeaus weiter fortsetzen, sondern in der Fovea centralis zusammentreffen. Die in Dioptrien (dpt, der Kehrwert der Brennweite  $dpt=1/f$ ) angegebene Brechkraft beträgt

für die Hornhaut etwa 43 dpt und für die Linse ungefähr 19 dpt. Daraus ergibt sich für das normalsichtige Auge eine Gesamtbrechkraft von 65 Dioptrien. Wird diese Brechkraft krankheitsbedingt unter- oder überschritten, ist das Netzhautbild nicht scharf definiert und mit dieser Unschärfe sinkt das Auflösungsvermögen des visuellen Systems. Die häufigsten Augenkrankheiten, die dies nach sich ziehen, sind im Folgenden kurz skizziert.

Weist die Linse eine zu geringe Brechkraft auf oder ist der Augapfel zu kurz, so entsteht das scharfe Bild im Auge erst hinter der Netzhaut. Dies wird als **Weitsichtigkeit** oder **Hyperopie** bezeichnet. Das jugendliche Auge kann dies sehr lange Zeit durch eine verstärkte Naheinstellung (Akkommodation) ausgleichen. Um aber den durch diese Überanstrengung hervorgerufenen Augen- und Kopfschmerzen vorzubeugen, wird die Weitsichtigkeit durch eine Brille oder Kontaktlinsen korrigiert.

Ist der Augapfel umgekehrt zu lang oder die Brechkraft der Linse zu hoch, so spricht man von **Kurzsichtigkeit** oder **Myopie** und das scharfe Bild entsteht im Auge vor der Netzhaut. Auch diese Fehlsichtigkeit wird mit einer Sehhilfe korrigiert.

Damit wir entfernte und nahe Gegenstände scharf auffassen können,

muss die Linse ihre Form an die jeweilige Entfernung anpassen. Dieser Vorgang wird **Akkommodation** genannt. Zwischen dem 40. und dem 50. Lebensjahr verliert die Linse bei vielen Menschen langsam an der dazu notwendigen Elastizität und dieser normale Alterungsprozess wird **Alterssichtigkeit** oder **Presbyopie** genannt. Muss sich die Linse sehr stark auf kurze Entfernungen einstellen, weil wir z.B. viel Lesen, so kann es passieren, daß sich die Sehschärfe den Tag über verringert, weil sich die Akkommodation aufgrund der mangelnden Elastizität erst über Nacht wieder vollständig löst. In diesem Fall wird die Sehschärfe für Entferntes am Morgen, nach dem Aufwachen, besser sein als am Abend. Natürlich kann auch der umgekehrte Fall vorkommen, in dem sich die Sehschärfe für Nahes durch die Alterssichtigkeit über den Tag verschlechtert. In beiden Fällen leistet eine Lese- bzw. Weitsichtbrille gute Dienste.

**Stabsichtigkeit** bzw. **Astigmatismus** ist eine Augenkrankheit, die durch eine unregelmäßige Hornhautkrümmung zustande kommt. Diese kann wiederum angeboren sein oder durch Narben nach Hornhautverletzungen entstehen. In jedem Fall führt sie dazu, daß die ins Auge fallenden Lichtstrahlen nicht in einem Punkt auf der Netzhaut gebündelt werden können. Aus

## Visuelle Schärfe

diesem Grund wird ein Punkt nicht als Punkt, sondern als verschwommene Linie (Stab) wahrgenommen. Abhilfe schafft eine Brille mit Zylindergläsern oder formstabile Kontaktlinsen.

Die **Trübung der Augenlinse** (Katarakt oder Grauer Star) ist zu 90% eine Alterserscheinung, kann aber auch nach Augenverletzungen, Strahleneinwirkung, als Medikamentennebenwirkung, bei Diabetes mellitus oder angeboren nach einer vorgeburtlichen Infektion (z.B. Röteln) auftreten. Symptome sind langsam zunehmende Sehstörungen und starke Blendungserscheinungen. Außerdem geben die Betroffenen im fortgeschrittenen Stadium an, wie durch ein Milchglas zu sehen. Häufigste Therapie ist die Operation in örtlicher Betäubung.

### Die Helligkeit

Die Helligkeit beeinflusst das Auflösungsvermögen des visuellen Systems gleich in mehrfacher Hinsicht. Zunächst betrifft sie die **Pupillengröße**. Dies ist die freie Öffnung des unmittelbar vor der Augenlinse befindlichen Iris-Muskels. Da die ganz hinten im Auge gelegene Netzhaut, auf der sich das Gesehene Bild abbildet, nur langsam an Änderungen der Leuchtdichte anpaßt, kommt der Pupille die Schutzfunktion einer schnell schließenden Blende zu. Sie kann die Grö-

ße ihrer Öffnung zwischen 2 mm und 8 mm regulieren und die einfallende Lichtmenge damit um den Faktor 16 reduzieren oder erhöhen (zum Vergleich: Die Umfeldleuchtdichten können sich bei Tag – maximal  $10^5$  Candela/m<sup>2</sup> – und bei Nacht – minimal  $10^{-5}$  Candela/m<sup>2</sup> – etwa um den Faktor  $10^{10}$  unterscheiden). Erst nach der Soforteinstellung durch die Pupille gewöhnen sich die Sinneszellen der Netzhaut an die veränderte Leuchtdichte. Neben der Regulierung der Lichtmenge weist die Irisblende noch eine weitere Analogie zur Kamerablende auf. Ihre Verengung vergrößert beim Nahsehen die Schärfentiefe. Damit ergeben sich erheblich schärfere Netzhautbilder und dies ist beim Tagsehen besonders wichtig. Die Öffnungsgröße ist der springende Punkt, denn von ihr hängt, wie im Abschnitt zur Beugung angesprochen, das theoretisch maximal erreichbare Auflösungsvermögen ab. Nun gilt aber in der Praxis nicht der aus diesem Abschnitt abzuleitende Zusammenhang „größere Pupille gleich größeres Auflösungsvermögen“, denn der mit zunehmender Helligkeit abnehmende Pupillendurchmesser reduziert die dem Auge innewohnenden optischen Abbildungsfehler. Ganz so, wie das Abblenden des Objektivs in der Photographie. Aus dieser doppelten Wirkung müssen wir eine Art

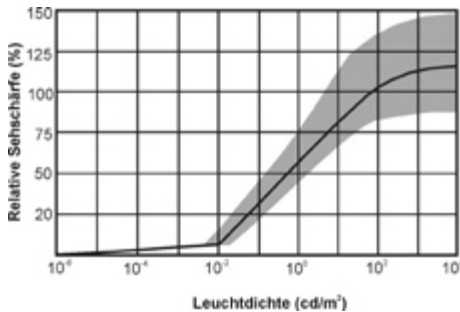


Abb. 6-10: Sehschärfe und Helligkeit  
Grau markiert ist der Streubereich für Beobachter im Alter zwischen 25 und 50 Jahren

„Mischkalkulation“ aufmachen und einen Kompromiss zwischen den Beugungsfehlern bei kleinen Öffnungen und den Aberrationsfehlern bei großen Öffnungen eingehen. Für den großen Durchschnitt normalsichtiger Augen kommt dabei heraus, daß eine mittlere Pupillengröße von 3 mm bis 5 mm Durchmesser (entsprechen 7 mm<sup>2</sup> bis 20 mm<sup>2</sup> Pupillenfläche) die geringsten Nachteile für das Auflösungsvermögen mit sich bringt. Diese Werte werden altersabhängig bei Leuchtdichten zwischen 150 und 300 cd/m<sup>2</sup> erreicht, was ungefähr jener Helligkeit entspricht, die wir zum bequemen Lesen bzw. zur Erledigung präziser Arbeiten in geschlossenen Räumen benötigen.

Die Umgebungshelligkeit entscheidet auch über den **Adaptationszustand** des visuellen Systems. Ob wir also mit den Stäbchen- oder den Zap-

fenrezeptoren sehen. Die für das Farbsehen und die höchste Auflösung verantwortlichen Zapfen sind beim mesopischen Sehen in der Dämmerung und beim photopischen Sehen am Tag aktiv, also bei Leuchtdichten zwischen 0,01 cd/m<sup>2</sup> und 100 000 000 cd/m<sup>2</sup>. Darunter arbeiten die viel geringer auflösenden Stäbchen. Im Hinblick auf die Auflösung ist der weite Bereich der Zapfen-Adaptationsstufe nur bis zu 10 000 cd/m<sup>2</sup> optimal, so daß das Auflösungsvermögen oberhalb dieses Werts blendungsbedingt wieder abfällt.

Zwischen diesen beiden Punkten, im Bereich mittlerer Helligkeit, verhält sich das Auflösungsvermögen nahezu linear zur Lichtintensität, d.h. die Sehschärfe fällt proportional mit der Helligkeit ab, wie Abb. 6-10 zeigt. Für dies Verhalten gibt es zwei unterschiedliche Erklärungsansätze. Der Erste ist, daß innerhalb der Rezeptorpopulation unterschiedliche Empfindlichkeiten vorkommen, die zufällig über die Retina verteilt sind. Bei geringen Umgebungshelligkeiten sollen nur die dafür empfindlichen Rezeptoren aktiv sein, während höhere Helligkeitswerte alle Sehzellen ansprechen und so für die beobachtete hohe Auflösung sorgen. Der zweite Ansatz geht davon aus, daß die Wahrscheinlichkeit ein Lichtquant einzufangen bei geringer Helligkeit

## Visuelle Schärfe

in der Netzhautperipherie aufgrund größerer Fläche und größerer räumlicher Summation am höchsten ist. Da die Photorezeptoren in diesem Bereich aber spärlich vertreten sind, ist die Auflösung gering. Mit zunehmender Helligkeit fangen auch die

im vergleichsweise kleinen Punkt des schärfsten Sehens sitzenden Rezeptoren mehr Lichtteilchen ein und sorgen mit ihrer hohen Dichte auch für hohes Auflösungsvermögen.

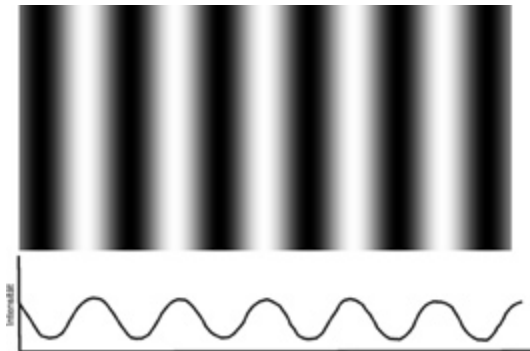


Abb. 6-11: Sinusgittermuster

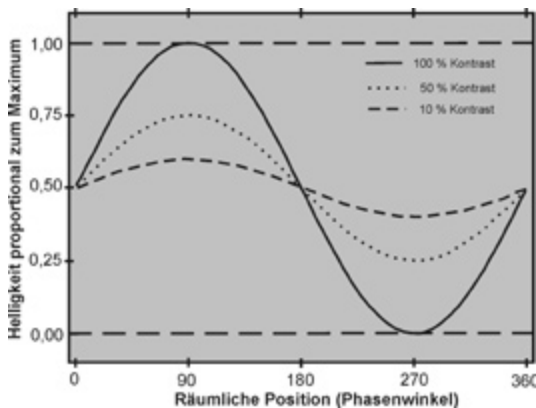


Abb. 6-12: Sinusförmige Helligkeitsverläufe