

Kontrast und Raumfrequenz

Einzelheiten, die man bei einem Gegenstand wahrnimmt, bestehen oft in einem regelmäßigen Wechsel von hellen und dunklen Flächenelementen. Die Helligkeitsabfolge in solchen Hell-Dunkel-Mustern kann durch ihre räumliche Frequenz beschrieben werden. Wie fein das visuelle System solche Muster auflöst, wird durch die Raumfrequenz bestimmt.

Von Fergus W. Campbell und Lamberto Maffei

Die Fähigkeit des Menschen und anderer Lebewesen, Einzelheiten von Gegenständen und Szenen wahrzunehmen, wird ganz wesentlich dadurch bestimmt, wie gut das visuelle System Kontraste, das heißt Helligkeitsdifferenzen zwischen benachbarten Flächenelementen, unterscheiden kann. Auch die Größe des Netzhautbildes spielt bei der Wahrnehmung von Details eine bedeutende Rolle. Aus Erfahrung wissen wir, daß Details mit geringem Kontrast schwerer erkennbar werden, wenn sich ein Objekt von uns entfernt und dabei immer kleiner wird. Diese Verschlechterung der Kontrastwahrnehmung beruht nicht darauf, daß sich die relative Helligkeit benachbarter Flächenelemente verändert hätte; vielmehr reagiert das visuelle System weniger empfindlich auf Kontraste, wenn diese in Mustern mit verkleinerten Flächenelementen dichter zusammengedrückt sind. Folgen unterschiedlich helle Flächenelemente in einem regelmäßigen Abstand, so kann man diese Ordnung als Raumfrequenz beschreiben. Es ist bemerkenswert, daß das visuelle System für bestimmte Raumfrequenzen eine viel größere Kontrastempfindlichkeit zeigt als für andere – ähnlich wie das Ohr für bestimmte Tonfrequenzen empfindlicher ist als für andere.

Fourieranalyse im visuellen System?

Das einfachste akustische Signal ist eine reine Sinuswelle. Ihr entspricht bei der visuellen Wahrnehmung ein Streifengitter, dessen Helligkeit sich einfach sinusförmig ändert (Bild 1a). Der Kontrast des Gitters ist durch die Änderung

seiner Helligkeit im Verhältnis zur mittleren Helligkeit des gesamten Musters definiert. Die Raumfrequenz kann als Anzahl der vollständigen Hell-Dunkel-Wechsel (oder der Perioden) innerhalb einer bestimmten Größe eines Bildabschnittes angegeben werden. Untersucht man das visuelle System, so ist es zweckmäßig, die Raumfrequenz eines Streifengitters über die Anzahl von Helligkeitsmaxima (oder -minima) innerhalb eines Sehwinkels von einem Grad zu definieren (Bild 2).

Aus mehreren sinusförmigen Wellenformen lassen sich durch Addition komplexe Wellenmuster aufbauen. Man kann beispielsweise von einem einfachen Sinuswellengitter ausgehen und ihm weitere Sinuswellen überlagern. Durch Hinzufügen der dritten Harmonischen ergibt sich ein Streifengitter mit zusätzlichen hellen und dunklen Streifen wie in Bild 1b. Diese dritte Harmonische hat ein Drittel der Amplitude und die dreifache Raumfrequenz der einfachen Sinuswelle. Die Addition einer fünften, siebten und weiterer ungerader Harmonischer läßt schließlich ein Rechteckwellengitter mit starkem Kontrastwechsel zwischen den dunklen und hellen Streifen entstehen. Wenn man davon ausgeht, daß das visuelle System – ganz analog zur mathematischen Fourieranalyse – eine Raumfrequenz als einfache Summe der in ihr enthaltenen Harmonischen interpretiert und diese auch so zerlegt, muß man als ersten Schritt untersuchen, wie es auf einfache Sinuswellengitter anspricht. Dann wird man vielleicht auch verstehen können, wie das visuelle System mit komplexeren Wellenformen umgeht.

Kontrastwahrnehmung des Menschen

Um die Beziehung zwischen der Breite der Streifen und dem Kontrast zu untersuchen, bei dem sie gerade noch gesehen werden können, ist es zweckmäßig, wie folgt vorzugehen: Man bietet als Reiz ein Streifengitter auf dem Schirm eines Oszilloskops dar und bittet die Versuchsperson, den Kontrast so weit zu verringern, bis sie das Streifengitter gerade nicht mehr sehen kann. Auf diese Weise läßt sich die Kontrastwahrnehmungsschwelle für eine Reihe verschiedener Streifengitter von sehr hohen bis zu sehr niedrigen Raumfrequenzen bestimmen.

John G. Robson, der mit einem von uns (Campbell) im Physiologischen Institut an der Universität von Cambridge (England) arbeitete, fand heraus, daß das visuelle System des Menschen am empfindlichsten für Kontraste ist, wenn diese bei einfachen Sinuswellengittern mit einer Raumfrequenz von etwa drei Perioden pro Sehwinkelgrad auftreten. Setzt man den maximalen Kontrast gleich Eins, so beträgt der Kontrast, der bei dieser Raumfrequenz noch gesehen werden kann, nur 0,003 (siehe Bild 8). Wird die Raumfrequenz des Streifengitters über das Optimum von drei Perioden pro Sehwinkelgrad erhöht, so sinkt die Kontrastempfindlichkeit ab. Die höchste vom menschlichen Auge noch wahrnehmbare Raumfrequenz liegt bei 50 Perioden pro Sehwinkelgrad; sie kann jedoch nur bei sehr hohem Kontrast wahrgenommen werden. Sinkt die Raumfrequenz unter das Optimum von drei Perioden pro Sehwinkelgrad, so nimmt die Kontrastempfindlichkeit ebenfalls ab.

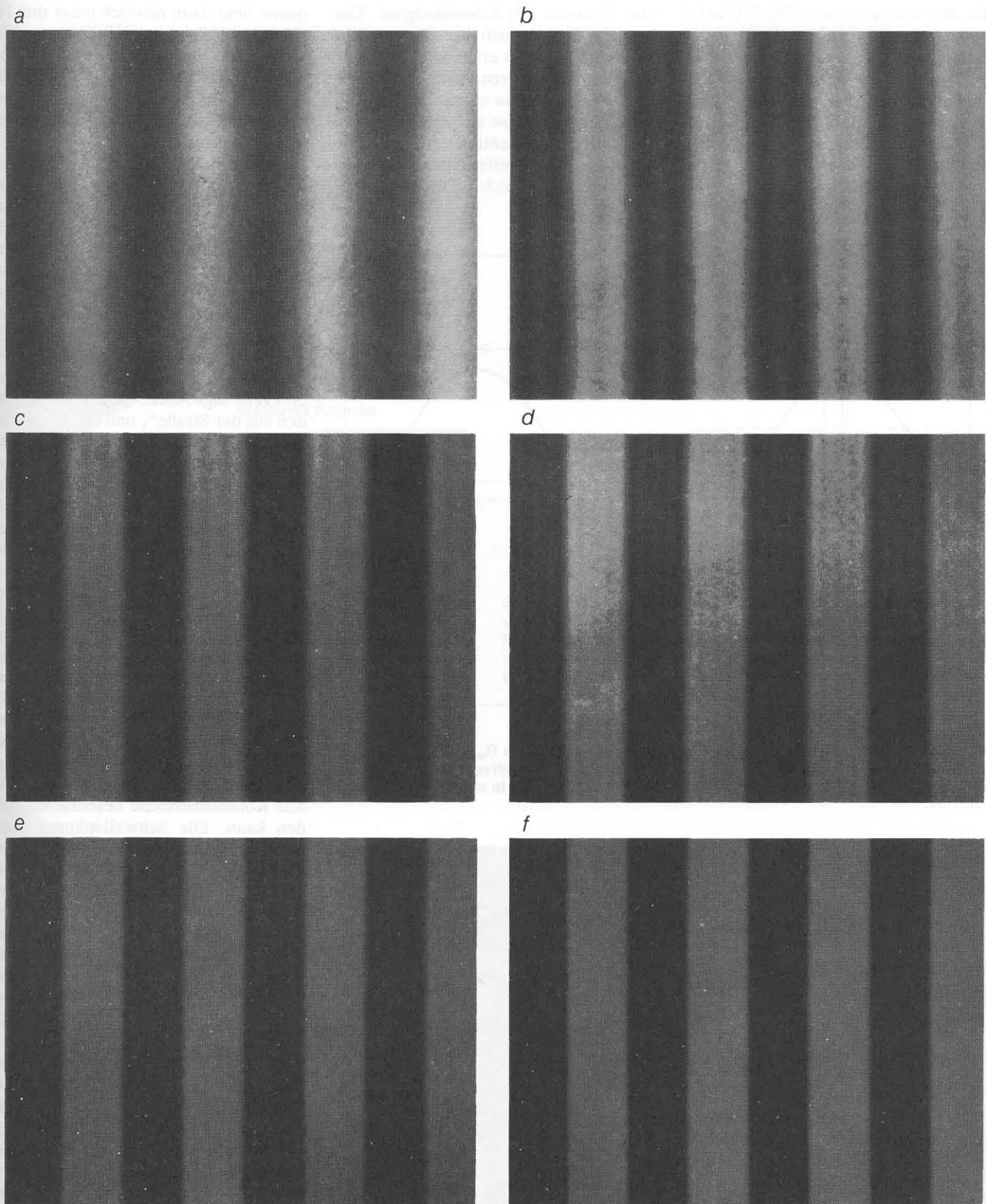


Bild 1: Die hier gezeigten Streifengitter sind Photographien von Mustern, die durch einen Signalgenerator auf dem Bildschirm eines Oszilloskops erzeugt wurden. Ein einfaches Streifengitter (a) wird durch ein einfaches Sinussignal des Signalgenerators erzeugt. Die Helligkeit jedes senkrechten Streifens in diesem einfachen Streifengitter ändert sich sinusförmig in Richtung der waagerechten Achse. Ein komplexeres Streifengitter (b) entsteht durch die Addition der dritten Harmonischen der Grundschwingung. Diese dritte Harmonische hat die dreifache Frequenz und ein Drittel der Amplitude der Grundschwingung. Wenn

die Raumfrequenz der hellen und dunklen Streifen mit der Addition der fünften (c), siebten (d) und neunten (e) Harmonischen ansteigt, werden die einzelnen Streifenteile immer undeutlicher. Nachdem schließlich die 15. Harmonische addiert ist, sieht man nur noch ein Rechteckwellenmuster (f). Untersuchungen zur Kontrastwahrnehmung mit solchen einfachen und komplexen Streifengittern zeigen, daß das visuelle System mehrere getrennte „Kanäle“ besitzt. Jeder einzelne Kanal ist auf einen relativ schmalen Raumfrequenzbereich abgestimmt und besitzt außerdem seine eigene Variationsbreite für die Kontrastempfindlichkeit.

Es mag auf den ersten Blick überraschen, daß das visuelle System für Streifengitter um so weniger empfindlich ist, je größer diese sind. Das läßt sich anschaulich demonstrieren, wenn man das Streifengitter in Bild 3 aus einer Distanz von etwa 90 Zentimetern betrachtet. Bei dieser Entfernung hat das Gitter eine Raumfrequenz von etwa

drei Perioden pro Sehwinkelgrad. Der Leser sollte es auch bei diesem sehr niedrigen Kontrast erkennen können – es ist bis zum oberen Rand wahrnehmbar. Wenn man nun etwas näher herangeht, beispielsweise auf einen Abstand von circa 30 Zentimetern, so verschwindet das Streifengitter im niedrigen Kontrastbereich. Die Raumfre-

quenz liegt dann nämlich unter drei Perioden pro Sehwinkelgrad. Diese Methode zur Messung der Kontrastempfindlichkeit ist sehr ungenau, da die Muster beim Drucken insbesondere bei den höheren Raumfrequenzen einen Kontrastverlust erleiden.

Wenn ein Augenarzt oder ein Optiker unsere Sehschärfe mißt, indem er uns schwarze Buchstaben auf weißem Hintergrund zeigt, bestimmt er nur die Sehschärfe für sehr hohe Kontraste. Das meiste, was wir im täglichen Leben sehen, hat einen viel geringeren Kontrast; er kann sogar auf einen Wert sinken, bei dem wir das Muster oder Objekt nicht mehr erkennen können. In Lewis Carrolls Geschichte *Alice hinter den Spiegeln* sagt Alice: „Ich sehe niemanden auf der Straße“, und der Weiße König erwidert darauf: „Ich wünschte nur, ich hätte solche Augen, um selbst bei dieser Entfernung niemanden sehen zu können.“ Dieser Effekt zeigt sich, wenn man das Muster in Bild 3 aus einer Entfernung von neun Metern betrachtet. Jetzt ist das Streifengitter in keinem Kontrastbereich mehr sichtbar. Nähert man sich dem Streifengitter, so wird der hohe Kontrastbereich am unteren Rand zuerst sichtbar.

Die Kontrastempfindlichkeit ist somit eine Funktion der Raumfrequenz. Sie mit der Technik der Schwellenmessung für Sinuswellengitter zu erfassen, hat den Vorteil, daß diese Leistung des Auges nicht nur für sehr hohe, sondern für alle Kontrastbereiche beschrieben werden kann. Die Schwellenkurve bildet die Grenze zur Welt der niederen Kontraste, die wir nicht sehen können. Neben dieser Methode, in der Personen nach der Sichtbarkeit von Streifenmustern befragt werden, gibt es noch eine andere. Sie besteht darin, kleine elektrische Signale, sogenannte evozierte Potentiale, zu registrieren, die im visuellen Cortex des Gehirns auf der Rückseite des Kopfes entstehen.

Die Versuchsperson schaut dabei auf den Bildschirm des Oszilloskops, auf dem ein Streifengitter achtmal in der Sekunde aufblinkt. Die Gesamthelligkeit des Bildschirms bleibt gleich, unabhängig davon, ob das Streifengitter erscheint oder nicht. Durch jedes Aufblinken wird ein evoziertes Potential ausgelöst. Die einzelnen Potentiale werden durch Signale von anderen Teilen des Gehirns überlagert beziehungsweise verdeckt. Deshalb werden die Signale in einen Computer eingegeben, wo das evozierte Potential schließlich durch eine Mittelungstechnik wiederhergestellt werden kann (Bild 4). Wir registrierten Potentiale, die durch Streifengitter mit niedrigen, mittleren und hohen Raumfrequenzen ausgelöst wur-

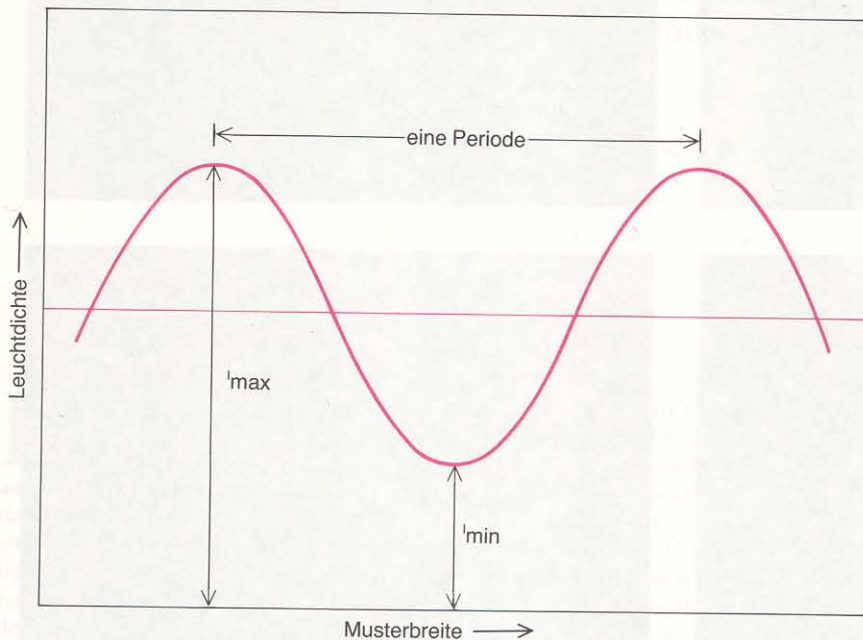


Bild 2: Diese Sinuskurve beschreibt die Helligkeitsschwankungen in einem einfachen räumlichen Sinuswellengitter. Der Kontrast des Strei-

fengitters wird durch $(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ definiert. Die Raumfrequenz ist dabei die Anzahl von Perioden in einem Sehwinkelgrad.

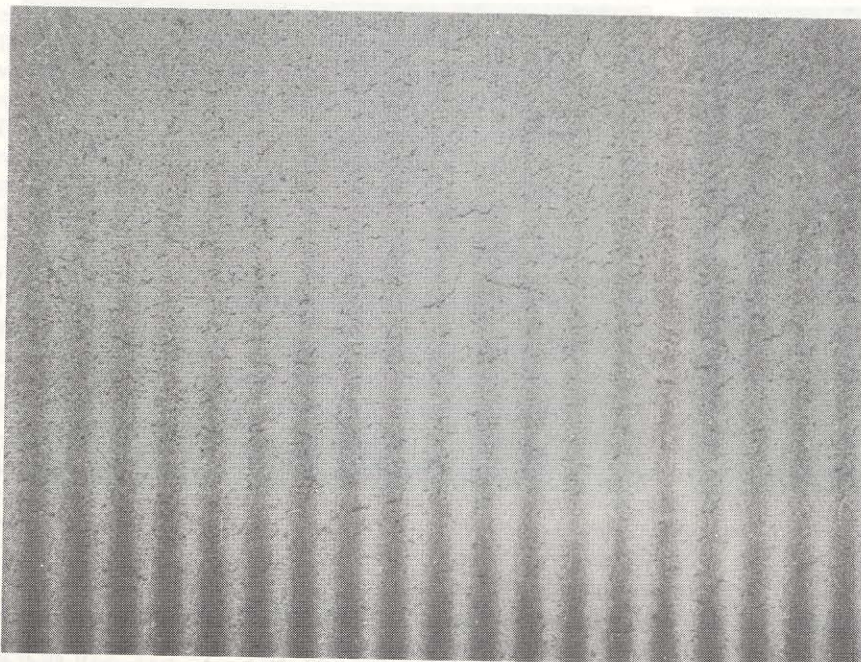


Bild 3: Der Kontrast dieses Sinuswellengitters nimmt vom unteren zum oberen Rand des Musters logarithmisch ab. Betrachtet man das Streifengitter aus einer Entfernung von 90 Zentimetern, bei der es eine Raumfrequenz von drei Perioden pro Sehwinkelgrad hat, so

ist das Streifengitter bis zu sehr niedrigen Kontrasten sichtbar. Betrachtet man das Streifengitter aus 30 Zentimeter Entfernung oder weniger, so ist die Raumfrequenz viel geringer; das Streifengitter ist im niedrigen Kontrastbereich am oberen Rand nicht mehr sichtbar.

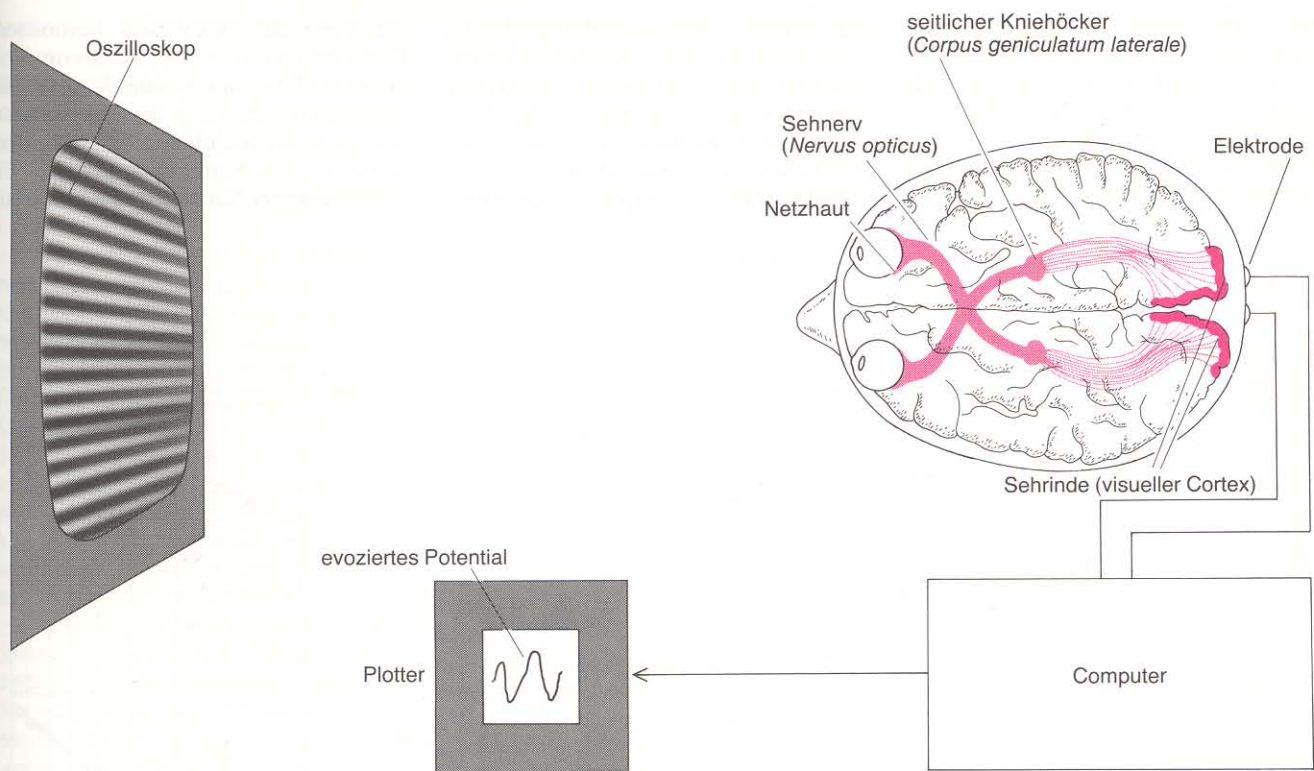


Bild 4: Versuchsanordnung zur Messung elektrischer Potentiale, die im Gehirn durch das Sehen eines Streifengitters ausgelöst wurden. Wenn ein Streifengitter achtmal in der Sekunde auf dem Bildschirm aufblinkt, entsteht im visuellen Cortex ein charakteristisches evoziertes Potential. Diese Potentiale sind klein und werden von elektrischen Signalen aus

anderen Teilen des Gehirns überlagert. Elektroden auf der Hinterseite des Kopfes nehmen diese Signale auf und leiten sie zu einem Computer, der das evozierte Potential aus dem Hintergrundrauschen (durch eine Mittelungstechnik) herausrechnet. Dessen Amplitude ist bei vorgegebener Raumfrequenz proportional zum Kontrast des Streifengitters.

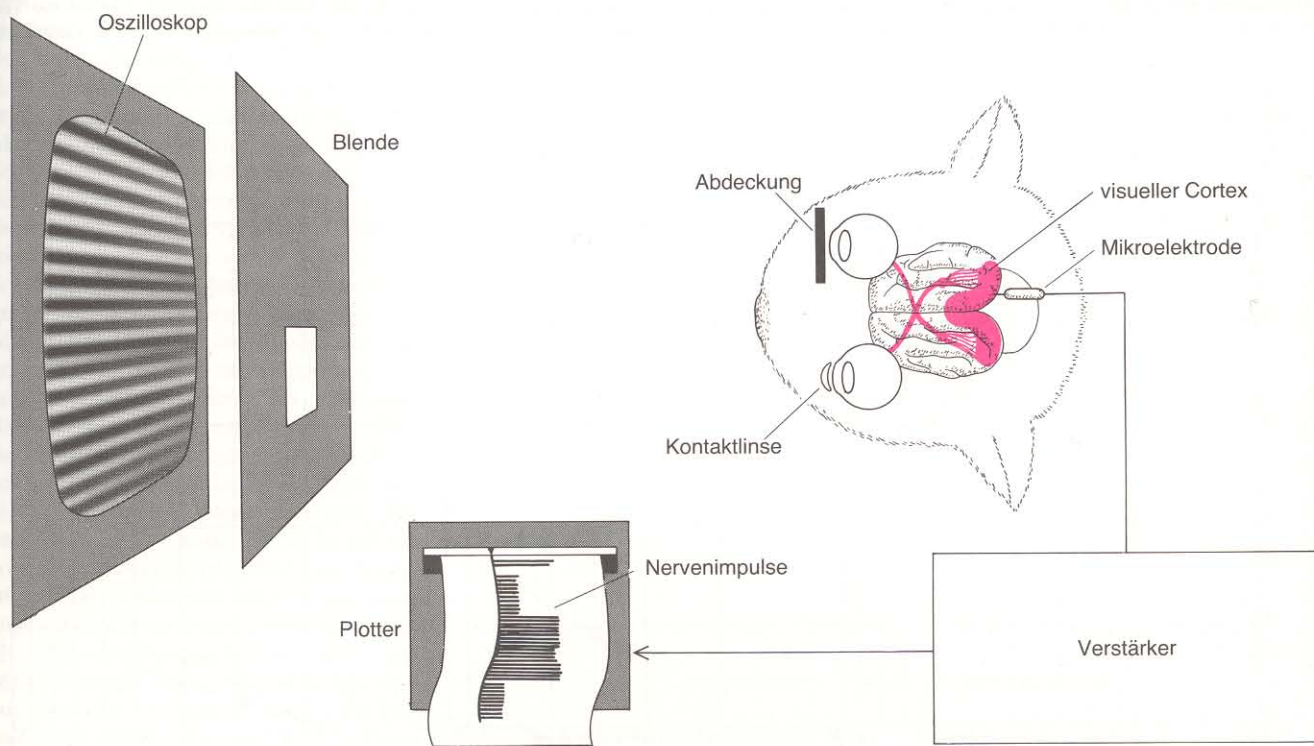


Bild 5: Dargestellt ist die Anordnung, mit der Reaktionen von Zellen im visuellen Cortex einer Katze während der Reizung mit Streifengittern gemessen wurden. Die Mikroelektrode ist hier nicht oberflächlich angelegt wie bei Versuchen mit Menschen, sondern reicht bis in den visuellen Cortex. Sie wurde unter Narkose operativ eingesetzt. Während die Kat-

ze ein Streifengitter auf dem Oszilloskop sieht, werden die elektrischen Spannungen einzelner Zellen von einer Mikroelektrode aufgenommen, verstärkt und aufgezeichnet. Die Ergebnisse mehrerer derartiger Untersuchungen zeigen, daß es im visuellen Cortex der Katze Zellen gibt, die jeweils auf einen schmalen Bereich von Raumfrequenzen reagieren.

den. Dabei wurde für jedes einzelne Streifengitter der Kontrast von hohen bis zu niedrigen Werten variiert. Wir fanden heraus, daß die Höhe der Amplitude des evozierten Potentials mit der Stärke des Kontrastes ansteigt. Noch wichtiger war die Entdeckung, daß sich

ein linearer Zusammenhang ergibt, wenn man bei einer gegebenen Raumfrequenz die gemessenen evozierten Potentiale zum Logarithmus des Kontrastes in Beziehung setzt (Bild 6). Wenn man diese Geraden bis zum Amplitudennullwert extrapoliert, kann man

die Schwelle theoretisch bestimmen. Diese extrapolierten Stellenwerte stimmen ziemlich gut mit jenen überein, die man durch Befragung der Versuchsperson nach der Sichtbarkeit des Streifengitters erhielt. Somit kann man also die Schwelle einer Versuchsperson objektiv

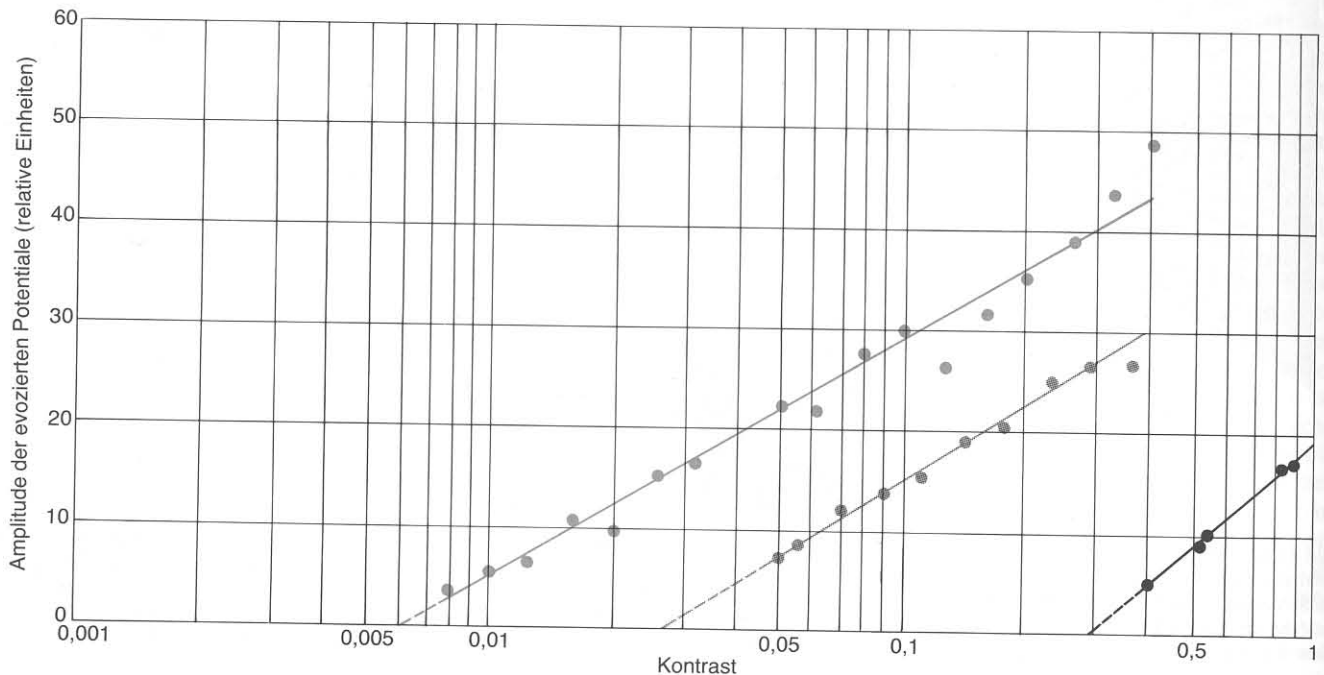


Bild 6: Dargestellt sind evozierte Potentiale vom Menschen bei drei verschiedenen Raumfrequenzen. Ihre Amplitude sinkt mit abnehmendem Kontrast. Die evozierten Potentiale wurden gemessen, während die Versuchspersonen Streifengitter mit Raumfrequenzen von 3,5 Perioden pro Sehwinkelgrad (farbig), neun Perioden pro Sehwinkelgrad (grau) und

18 Perioden pro Sehwinkelgrad (schwarz) ansahen. Die Verlängerung der Kurven zum Amplitudennullwert liefert einen theoretischen Schwellenwert für jede einzelne Raumfrequenz. Diese extrapolierten Schwellen stimmen gut mit den subjektiven Schwellen überein, wie sie die Versuchspersonen beim Betrachten der Streifengitter selbst einstellen.

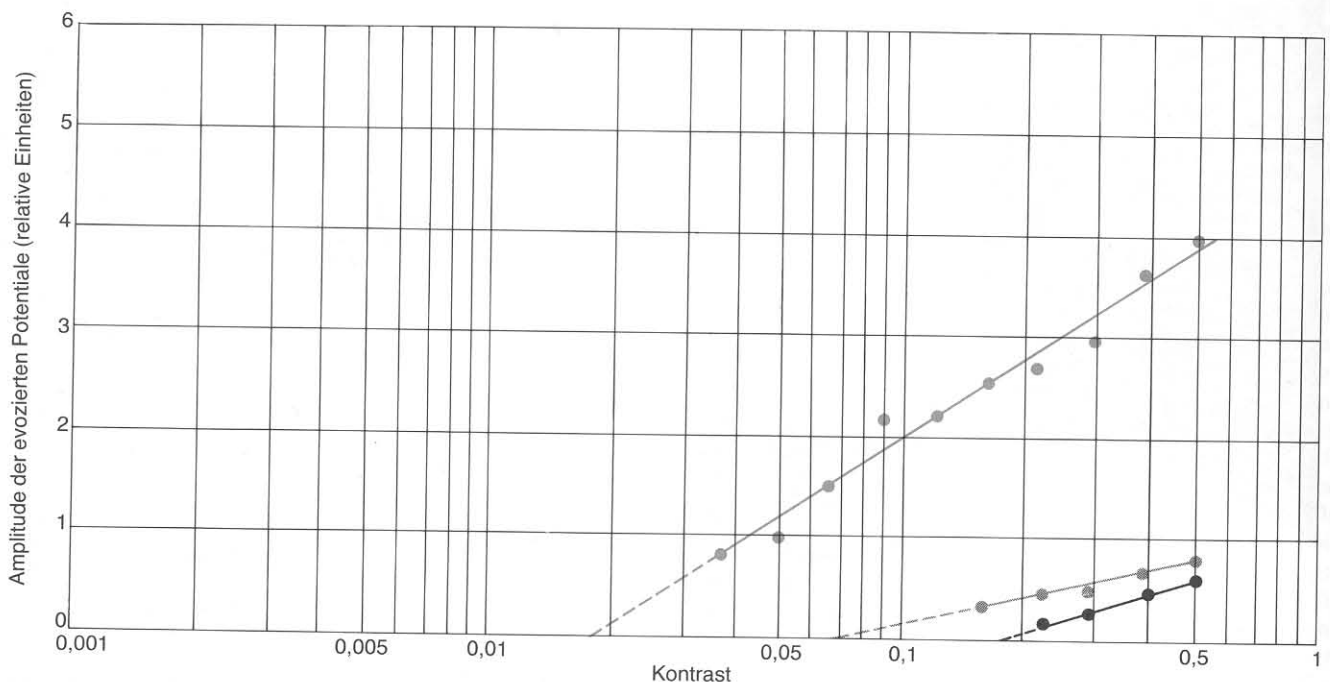


Bild 7: In der Abbildung sind die evozierten Potentiale von Katzen gegen den Logarithmus des Kontrastes der Streifengitter aufgetragen und bis zum Amplitudennullwert extrapoliert (gestrichelte Geradenabschnitte). So kann die Kontrastempfindlichkeit der Katze für jede Raumfrequenz

bestimmt werden. Die dargestellten evozierten Potentiale wurden von Katzen abgenommen, welche Streifengitter mit 0,6 Perioden pro Sehwinkelgrad (farbig), drei Perioden pro Sehwinkelgrad (grau) beziehungsweise 0,15 Perioden pro Sehwinkelgrad (schwarz) ansahen.

bestimmen, das heißt, ohne sie zu befragen. Auf diese Weise betreibt man sozusagen Psychophysik ohne Psychologie.

„Kontrastwahrnehmung“ der Katze

Diese Art, Schwellen zu bestimmen, mag als komplizierter Umweg erscheinen, aber wir sind nicht nur daran interessiert zu wissen, wie Menschen Kontraste sehen, sondern auch, wie dies Tiere tun können. Alice klagte über die Katzen: „Wenn sie bloß schnurrten für ‚ja‘ und miauten für ‚nein‘ oder sich an irgendeine solche Regel hielten, so daß man sich mit ihnen unterhalten könnte! Aber wie kann man sich mit jemandem unterhalten, wenn er immer dasselbe sagt?“

Die Anwendung der Technik der evozierten Potentiale bei Katzen (Bild 5) erbrachte einige interessante Resultate. Die Amplituden der gemessenen Potentiale wurden graphisch gegen den Logarithmus vom Kontrast des entsprechenden Streifengitters aufgetragen. Wir extrapolierten die so erhaltenen Kurven bis zum Amplitudennullwert und nahmen an, daß diese extrapolierten Kontrastwerte die Schwelle sowohl für Katzen als auch für Menschen darstellen (Bild 7). Werden die Kontrast-schwellen für Katzen (Bild 9) und für Menschen (Bild 8) graphisch dargestellt, so ist der Verlauf der Kurven sehr ähnlich. Die Kontrast-schwellenkurve der Katze ist lediglich zu niedrigeren Raumfrequenzen hin verschoben. Während die Kontrastempfindlichkeit für Menschen bei etwa drei Perioden pro Sehwinkelgrad am höchsten ist, liegt dieser Wert für Katzen bei etwa 0,3 Perioden pro Sehwinkelgrad. Bei Raumfrequenzen oberhalb von 0,5 Perioden pro Sehwinkelgrad haben Katzen eine geringere Kontrastempfindlichkeit als Menschen. Katzen können also bei höheren Raumfrequenzen nur Details mit hohem Kontrast sehen. Bei niedrigen Raumfrequenzen unterhalb von 0,5 Perioden pro Sehwinkelgrad sieht die Katze bereits Details, die der Mensch bei diesem geringen Kontrast noch nicht sehen kann. Man kann diese Resultate wie folgt zusammenfassen: Die Katze ist auf das Sehen von Raumfrequenzen angepaßt, die zehnmal niedriger sind als die Raumfrequenzen, die der Mensch sieht. Bei niedrigen Raumfrequenzen sieht die Katze Details mit geringem Kontrast, die ein Mensch überhaupt nicht wahrnehmen kann.

David H. Hubel und Torsten N. Wiesel implantierten Mikroelektroden ins Gehirn und entdeckten damit im visuellen Cortex von Katzen und Affen Zel-

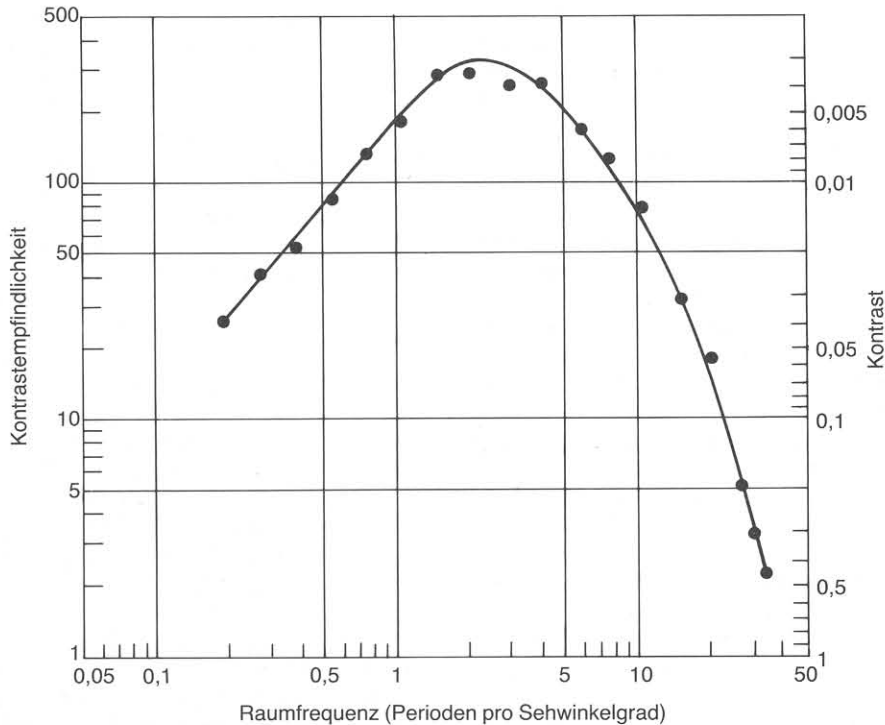


Bild 8: In der Abbildung ist die Kontrastempfindlichkeit des Menschen als Funktion der Raumfrequenz dargestellt. Die Skalen sind logarithmisch. Sehr hohem Kontrast wird der Wert Eins zugeordnet. Die Kontrastempfindlichkeit entspricht dem Kehrwert des Kontrastes. Das visuelle System des Menschen kann den Kontrast bei Sinuswellengittern mit einer

Raumfrequenz von ungefähr zwei oder drei Perioden pro Sehwinkelgrad am empfindlichsten wahrnehmen. Bei höheren oder niedrigeren Raumfrequenzen fällt die Kontrastempfindlichkeit dagegen ab. Die Meßwerte ergeben sich aus Sichtbarkeitsschwellen, die die Versuchspersonen beim Betrachten des Streifengitters selbst einstellen mußten.

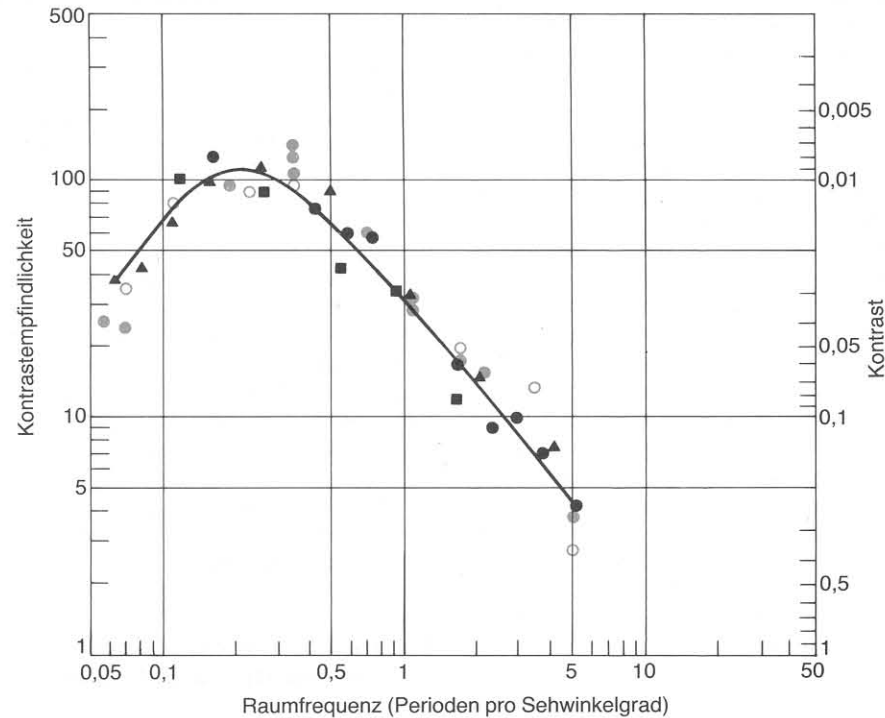


Bild 9: Die Kontrast-schwellenkurve der Katze zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die des Menschen (siehe Bild 8), aber sie ist zum unteren Frequenzbereich hin verschoben. Unterhalb von 0,5 Perioden pro Sehwinkelgrad sieht die Katze Details mit niedrigem Kontrast, die der Mensch nicht wahrnimmt. Oberhalb von 0,5

Perioden pro Sehwinkelgrad kann der Mensch Details mit niedrigem Kontrast erkennen, die für die Katze nicht mehr sichtbar sind. Die gezeigten Meßwerte ergeben sich aus evozierten Potentialen dreier Katzen (schwarze Symbole und Kurve) sowie aus Verhaltensversuchen mit zwei anderen Katzen (farbige Symbole).

len, die besonders stark auf Kanten oder Streifen bestimmter Orientierung oder bestimmter Bewegungsrichtung reagierten (siehe dazu den Beitrag *Die Verarbeitung visueller Informationen* von D. H. Hubel und T. N. Wiesel in diesem Buch). Während J. G. Robson, F. Cooper und einer von uns (Campbell) im Labor von Christina Enroth-Cugell an der Northwestern University arbeiteten, wandten wir die Mikroelektrodenteknik an, um die Reaktion einzelner Nervenzellen im Cortex (und in anderen Teilen des visuellen Systems) der Katze auf Streifengitter verschiedener Raumfrequenzen zu bestimmen. Wir fanden einzelne Zellen im visuellen Cortex der Katze, die auf einen ziemlich engen Bereich von Raumfrequenzen ansprechen. Jede getestete Zelle war auf einen Bereich des Raumfrequenzspektrums abgestimmt, und sie reagierte innerhalb dieses Bereiches auf eine bestimmte Raumfrequenz maximal. Bei Raumfrequenzen, die über oder unter dem Maximum lagen, nahm die Reaktion rasch ab. Wir fanden auch in anderen Teilen des visuellen Systems (dem seitlichen Kniehöcker und der Netzhaut) einzelne Zellen, die auf bestimmte Raumfrequenzen ansprechen.

Wenngleich es unmöglich ist, eine Katze danach zu fragen, was sie sieht, wenn eine bestimmte cortikale Zelle feuert oder wenn ein evoziertes Potential ausgelöst wird, so ist es doch möglich, eine Katze darauf zu trainieren, ein Zeichen zu geben, wenn sie ein Streifengitter auf dem Bildschirm des Oszilloskops sieht. Man kann die Katze mit Futter belohnen, wenn sie richtig reagiert, und ihr kein Futter geben, wenn sie reagiert, obwohl das Streifengitter nicht dargeboten ist. Hat sie dies einmal gelernt, so kann die Schwelle der Kontrastempfindlichkeit bestimmt werden, indem man den Streifengitterkontrast immer stärker verringert. Sylvia Bisti, die mit einem von uns (Maffei) an der Universität von Pisa arbeitete, hat so die Kontrastschwelle für zwei Katzen direkt gemessen. Das Training dauert viele Monate und erfordert Geduld und Ausdauer. Die Resultate, die mit der Technik der evozierten Potentiale in wenigen Stunden gewonnen werden können, stimmen gut mit den Resultaten überein, die mit der zeitaufwendigen Verhaltensmethodik erhoben werden.

Wie läßt sich nun die visuelle Welt der Katze mit unserer vergleichen? Da die Kontrastempfindlichkeit der Katze im Vergleich zu jener des Menschen um den Faktor 10 zu niedrigeren Raumfrequenzen hin verschoben ist, könnte man meinen, daß die Katze zum Erkennen eines kleinen Objektes zehnmals näher

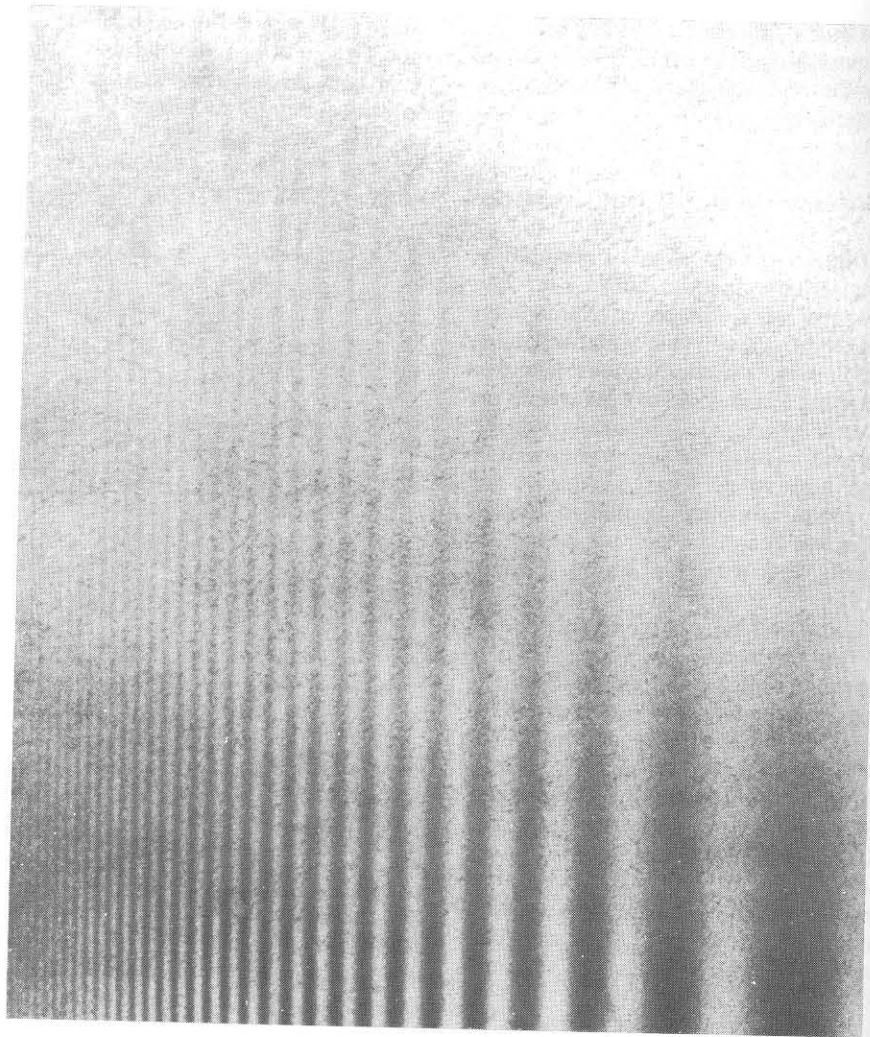


Bild 10: Sinusförmiges Streifengitter mit logarithmischer Veränderung in Raumfrequenz und Kontrast. Es soll die Kontrastabnahme bei niedrigen und hohen Raumfrequenzen demonstrieren. Der Kontrast nimmt von unten nach

oben ab, ist jedoch in jeder gegebenen Höhe für alle Raumfrequenzen gleich. Mittlere Raumfrequenzen sind für den Betrachter bis zu einem viel geringeren Kontrast sichtbar als hohe und niedrige Raumfrequenzen.

herangehen müßte als ein Mensch. Dieser Unterschied könnte auf die geringe Größe des Katzenauges zurückzuführen sein. Doch ist das Netzhautbild eines gegebenen Objektes in einer bestimmten Entfernung bei der Katze nur 1,3mal kleiner als beim Menschen. Demnach lassen sich die Unterschiede in der Wahrnehmung der Raumfrequenz durch die unterschiedliche Größe der Augen nicht erklären.

Vergleich der Kontrastempfindlichkeit von Mensch und Katze

Um die visuelle Welt der Katze zu verstehen, gehen wir von folgender Situation aus: Wir blicken aus sechs Metern Entfernung auf eine Sehtesttafel. Wenn wir die sogenannte Sechs-Meter-Zeile lesen können, so besitzen wir eine normale Sehschärfe (6/6). Da die Katze

ein zehnfach geringeres Auflösungsvermögen besitzt, sollte sie nur die großen Buchstaben auf der 60-Meter-Zeile „lesen“ können (Visus 6/60). Wir könnten nun das Sehen der Katze simulieren, indem wir vor unsere Augen Linsen setzen, die uns so kurzsichtig machen, daß wir nur mehr die 60-Meter-Zeile bei sechs Metern zu unterscheiden vermögen. Betrachten wir mit diesem Grad der Kurzsichtigkeit weiter entfernte Szenen, so erscheint alles ziemlich verschwommen, sogar Objekte, die wir als solche noch unterscheiden können. Die myopischen Linsen wirken als räumliches Filter, das hohe Raumfrequenzen mehr dämpft als niedrige. Der verschwommene Eindruck entsteht dadurch, daß diejenigen visuellen Nervenzellen weniger aktiv sind, die auf höhere Raumfrequenzen ansprechen. Die Katze besitzt jedoch keine so abgestimmten Nervenzellen. Deshalb führt

das Verfahren, den Menschen künstlich kurzsichtig zu machen, zu keiner richtigen Simulation des Sehens der Katze.

Wir müssen also nach einer realistischeren Simulation suchen. Anstatt unser Sehen durch Linsen unscharf zu machen, blicken wir durch zwei Ferngläser mit zehnfacher Vergrößerung auf die Sehtesttabelle. Drehen wir die Ferngläser um und schauen aus einer Entfernung von sechs Metern auf die Tabelle, so können wir nur die 60-Meter-Zeile lesen; der Rest der Tabelle erscheint dabei aber nicht unscharf. Zum Lesen der Sechs-Meter-Zeile müßten wir um das Zehnfache näher herankommen, also auf eine Entfernung von 60 Zentimetern und dabei natürlich die Ferngläser neu scharf stellen. Obwohl die Analogie mit dem umgekehrten Fernglas das Sehen der Katze besser beschreibt als die Analogie mit den Linsen, die das Auge kurzsichtig machen, ist es doch nicht gänzlich zufriedenstellend, weil sie einen Wechsel in der Perspektive bewirkt. Die verkehrten Ferngläser machen alles zehnmal kleiner. Ob die Katze auch alles zehnmal kleiner sieht, wissen wir aber nicht. Die neuronale Grundlage ihres peripheren Sehens könnte ja so sein, daß ihre Perspektive der unsrigen entspricht.

Man kann annehmen, daß die Katze genauso scharf und klar sieht wie wir, nur mit dem Unterschied, daß sie im Nahbereich am besten sieht. Sie kann nämlich Details bei niedrigen Raumfrequenzen bereits bei geringem Kontrast sehen. Ein leicht durchführbares Experiment kann die Sehleistung der Katze anschaulich demonstrieren. Man läßt einen kleinen weißen Ball, der am Ende eines schwarzen Fadens befestigt ist, vor einer verspielten Katze hin und her schwingen. Hat der Ball einen Durchmesser von etwa einem Zentimeter, so wird die Katze schon aus mehreren Metern Entfernung auf ihn zuspringen und ihn fangen. Wenn wir den Ball wegschwingen, so wird die Katze ihm nachjagen, und das sogar dann noch, wenn wir ihn über eine beträchtliche Weite entfernen. Tauschen wir diesen Ball gegen einen mit nur vier Millimetern Durchmesser aus, so zeigt sich, daß sich die Katze dem schwingenden Ball nicht nähert, bis er weniger als einen Meter von ihr entfernt ist. Viel beeindruckender ist es jedoch, wenn man die Katze eine Weile mit dem kleinen Ball spielen läßt und den Ball dann plötzlich auf etwa einen Meter Entfernung wegschwingt. Die Katze wird dann aufhören zu spielen und nach dem Ball Aus-

schau halten, jedoch ohne Erfolg. Im Vergleich dazu müßte sich eine normal-sichtige Person auf acht Meter entfernen, bevor ein bewegter Vier-Millimeter-Ball für sie unsichtbar würde.

Gehen wir einmal davon aus, daß die Katze am Tage wegen der erhöhten Helligkeit etwas besser sieht und ein Objekt mit starkem Kontrast und einer Größe von zehn Sehwinkelminuten erkennen kann. Sie sollte dann fähig sein, einen fliegenden Vogel mit einer Flügelspannweite von 20 Zentimetern aus einer Entfernung von 60 Metern zu erkennen, obwohl die Details des Vogels für sie dabei nicht mehr sichtbar sein werden. Bei anbrechender Dunkelheit sollte die Katze den Mond ziemlich klar als Scheibe sehen, da er eine Größe von 30 Sehwinkelminuten hat. Sie dürfte jedoch keine Einzelheiten auf der Mondoberfläche erkennen können.

Wir haben jetzt eine erste Vorstellung davon, wie die visuelle Welt der Katze ungefähr aussieht. Für die weitere Forschung wäre es jedoch von großem Nutzen, mit Hilfe der Technik der evozierten Potentiale die Kontrastempfindlichkeit auch bei anderen Tieren zu messen, insbesondere dann, wenn man (wie etwa beim Adler) eine höhere Sehschärfe vermutet als beim Menschen.