

# Kapitel 1

## Indirektes Sehen: Historischer Überblick

Wissen wir heute, wie das indirekte Sehen „funktioniert“? Wie es sich in seiner Funktion vom fovealen Sehen unterscheidet? Seit die Ophthalmologen Hermann Aubert und Foerster im Jahr 1857, also vor fast 150 Jahren, die ersten ausführlichen<sup>1</sup> quantitativen Untersuchungen zum indirekten Sehen – dem Sehen außerhalb des Fixationspunktes – veröffentlichten, ist das indirekte oder periphere Sehen der Gegenstand intensiver Forschungsbemühungen gewesen. In den unterschiedlichsten Disziplinen hat man sich der Erforschung des Sehens zugewandt, in der Sinnesphysiologie und Neuroanatomie, der Ophthalmologie und Neurologie, der Nachrichtentechnik und Kybernetik sowie Wahrnehmungspsychologie, um nur einige zu nennen. Doch trotz der vereinten Bemühungen ist die Grundfrage, die sich von Anfang an stellte, und die vielleicht als Erkenntnismotiv immer im Hintergrund stand, unbeantwortet geblieben: Ist das periphere Sehen dem zentralen gleichartig, oder ist es in irgend einer Weise grundsätzlich andersartig? Es gibt in jedem Fall quantitative Unterschiede in den einzelnen Sehleistungen, das lehrt uns schon die eigene Erfahrung, und man denkt sogleich etwa an die in der Peripherie recht hohe Empfindlichkeit der Bewegungswahrnehmung. Aber sind diese Unterschiede Ausdruck einer grundsätzlichen Andersartigkeit? Die Beobachtung, daß die Sehleistung, je nachdem welchen ihrer Aspekte man bestimmt, jeweils andersartig zur Peripherie hin verändert ist, spricht für eine solche Andersartigkeit. Aber vielleicht gelingt es, eine Ordnung in der Vielfalt der Ergebnisse zu finden und das Sehen modellhaft in einer Weise zu beschreiben, daß nur einige wenige Parameter als vom Gesichtsfeldort abhängig angenommen werden müssen, um den Sehvorgang dennoch allgemein zu beschreiben. Ein rein abstraktes Modell ist dabei noch nicht befriedigend. Die Parameter sollten vielmehr sinnvolle Entsprechungen auf verschiedenen Ebenen der Beschreibung – der neuroanatomischen, der neurophysiologischen, einer formalen, mathematischen und der Wahrnehmensebene – haben; ohne eine solche Beschreibung ist eine Theorie der visuellen Wahrnehmung unvollständig.

1. Die ersten *quantitativen* Untersuchungen zur peripheren Sehschärfe stammen von Hück (1840). Einen Rückblick auf die ältere Literatur bietet Low (1951).

Wie diese Vereinheitlichung herbeigeführt werden kann, ist jedoch bis heute ungelöst. Die Geschichte der Untersuchungen des peripheren Sehens zeigt Versuche der Vereinheitlichung und Nachweise der Unzulänglichkeit dieser Ansätze.

Aubert und Foerster (1857) (Abb. 1.1-1, Abb. 1.1-2) konzentrieren sich zwar auf

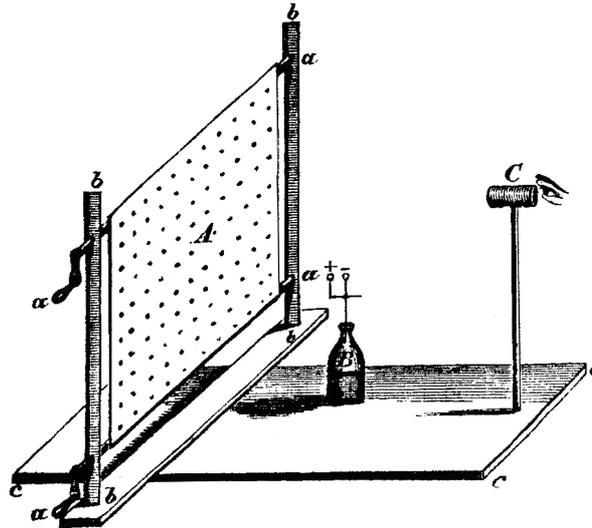


Abb. 1.1-1: Das von den Breslauer Ophthalmologen Hermann Aubert und Foerster 1855 erstmals vorgestellte Perimeter.

„Wir liessen als Objecte auf einen 2 Fuss breiten und 5 Fuss langen Bogen Papier (A) Zahlen und Buchstaben von gleicher Grösse in gleich grossen Zwischenräumen drucken. Dieser Bogen A konnte über zwei horizontal liegende Walzen aaaa (in der Zeichnung längs schraffirt), die in senkrechter Richtung zwei Fuss voneinander entfernt waren, gerollt werden, so dass durch das Drehen der Walzen immer neue Zahlen oder Buchstaben in das Gesichtsfeld gebracht wurden. Die Walzen aa lagerten mit ihren Enden in einem senkrecht stehenden Rahmen bbbb, welcher auf einem Brette cccc verschieblich war, und unserm Auge bis zu 0,1 Mètre genähert und bis zu 1 Mètre von ihm entfernt werden konnte. In immer gleicher Entfernung und Richtung zu dem bedruckten Bogen befand sich die Riesssche Flasche B mit unveränderter Entfernung ihrer beiden Kugeln und gegenüber dem Bogen, am andern Ende des Brettes,“ (in der Zeichnung rechts) „sah einer von uns durch eine entsprechend weite und kurze Röhre C von geschwärztem Papier nach dem Bogen hin.“ – Die Verwendung des Lichtbogens für kurzzeitige Reizdarbietung geht auf Volkmann und, nach ihm, Ernst Heinrich Weber zurück. (Aus: Aubert & Foerster, 1857.)

die Vermessung der quantitativen Unterschiede, aber am Rande vermerken schon sie, im Zusammenhang mit der Zwei-Punkt-Auflösung, eine qualitative, also schwer in Zahlen zu fassende, Andersartigkeit des peripheren Sehens:

„Wenn die zwei Punkte aufhören, als zwei unterschieden zu werden, also jenseits des Gränzpunktes liegen, so sieht man sie nicht als einen Punkt, sondern ganz eigenthümlich unbestimmt als etwas Schwarzes, dessen Form weiter nicht anzugeben ist. Auch auf der Haut machen in den stumpfer fühlenden Gegenden zwei Zirkelspitzen nie qualitativ ganz denselben Eindruck, wie eine einzige Zirkelspitze. ... Man sieht entweder etwas Schwarzes von unbestimmter Form, oder man sieht zwei Punkte.“ (S. 30).

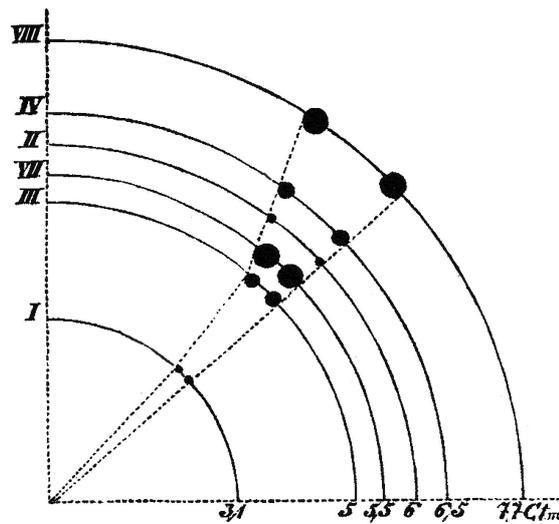


Abb. 1.1-2: Aubert und Foersters (1857) Ergebnisse zur Zwei-Punkt-Auflösung.

Auch der Blick auf die zugrunde liegenden Strukturen erbringt keine einfachen Lösungen, und ich schließe mich Polyak (1941, S. 186) an, der in seinem großen Werk über die Retina zur Sehschärfe schreibt:

„known structures are inadequate to explain the retinal gradient. Even such an apparently elementary problem as to what anatomical factors are responsible for the striking difference between the central and the peripheral acuity ... remains unsolved...“

Pirenne (1962) wehrt sich ebenfalls gegen leichtfertige Vereinfachungen:

„...there are in fact as many different 'visual acuities' as there are types of test objects. A tendency to give visual acuity an ontological status has sometimes led to confusion. (S. 175)

Es hat dabei immer herausragende Beispiele zur Systematisierung der Phänomene gegeben. Einen entscheidenden Beitrag hat etwa Weymouth (1958) geleistet. Es gelang ihm, Gemeinsamkeiten in den experimentellen Ergebnissen zu so unterschiedlichen Maßen wie der Gittersehschärfe, der Noniussehschärfe, der Bewegungsempfindlichkeit, oder der Größe des Panumareals aufzuzeigen, indem er das inverse

Maß zur Sehschärfe, nämlich den kleinsten aufzulösenden Sehwinkel (minimal angle of resolution, MAR) als Vergleichsgrundlage heranzog. Während 1/MAR-Maße nämlich als Funktion der Exzentrizität einen stark gekrümmten (annähernd hyperbolischen) Verlauf zeigen und daher schwer miteinander vergleichbar oder ineinander überführbar sind, folgen viele MAR-Maße in erster Näherung einer linearen Funktion. Im Englischen bezeichnet man solche Maße als „spatial thresholds“; im Deutschen spricht man besser von Auflösungsschwellen, da die direkte Übersetzung „räumlich“ die Konnotation des Dreidimensionalen hat.

### Physiologisches Substrat

Zu der Frage, welche Eigenschaften des physiologischen Substrats den niedrigeren Wahrnehmungsleistungen der Peripherie<sup>2</sup> zugrunde liegen könnten, erkannte bereits Theodor Wertheim in Berlin (1894, S. 186) in seiner Arbeit zur Gittersehschärfe (Abb. 1.1-3), daß die unterschiedliche Dichte der retinalen Rezeptorzellen eine wesentliche Rolle spielen muß. Østerberg (1935) hat dazu ausführliche und noch heute aktuelle neuroanatomische Daten vorgelegt (Abb. 1.1-4). Darüber hinaus kam aber schon Polyak (1932) auf Grund seiner anatomischen Untersuchungen zu dem Schluß, daß eine durch eine mathematische Funktion beschreibbare Projektion von der Retina auf den Kortex existieren müsse. Talbot und Marshall (1941) untersuchten diese im zentralen Teil des Gesichtsfeldes und benutzten dabei einen Abbildungsfaktor, der die Projektionseigenschaften in einer Zahl zusammenfaßte. In den Bemühungen, Verhaltensleistungen und Neurophysiologie miteinander quantitativ in Bezug zu setzen, richtete man aber nach wie vor die Aufmerksamkeit vor allem auf die Rezeptorzellen, wie zum Thema der Sehschärfe etwa Pirenne (1962). Weymouth (1958, S. 107-109) schließt dagegen – auf der Basis seiner extensiven Übersicht zu Sehschärfemaßen und der neurophysiologischen Literatur –, daß nicht die Rezeptor-

2. In einzelnen Leistungen ist die Peripherie – zumindest die nahe Peripherie – der Fovea überlegen, so zum Beispiel in der skotopischen Lichtempfindlichkeit, deren Maximum bei etwa 15° Exzentrizität liegt (Hood & Finkelstein, 1986). Die gelegentlich gehegte Ansicht, die Peripherie könne der Fovea in manchen dynamischen Leistungen, etwa dem Bewegungssehen, überlegen sein, beruht auf der Verwechslung von absolutem und relativem (d.h. auf den Gesichtsfeldort bezogenen) Leistungsvergleich: Da die Empfindlichkeit bei manchen dynamischen Leistungen zur Peripherie hin langsamer abnimmt als die Sehschärfe, kann in der Peripherie eine relative Überlegenheit dieser Leistung entstehen. Bereits Exner (1875) vertrat die Ansicht, daß die Gesichtsfeldperipherie auf das Bewegungssehen spezialisiert sei. Bezüglich einer *relativen* Überlegenheit des Bewegungssehens divergieren die Befunde und Meinungen: Finlay (1982) spricht gegen eine Spezialisierung der Peripherie für Bewegungssehen, Foster et al. (1989) sprechen dafür. Siehe dazu Weymouth (1958, S. 112), Basler (1906), Hartmann et al. (1979) und für Überblicke Finlay (1982) und Foster et al. (1989, S. 1028 ff.). Man beachte dabei, daß in Fovea und Peripherie dynamische Sehleistungen neuronal unterschiedlich repräsentiert sein können: Pöppel et al. (1975) finden durch Vergleich der Leistungen bei verschiedenen Schädigungsorten Evidenz dafür, daß die zentrale (5° Exzentrizität) Flimmerfusionsfrequenz kortikal, die nicht-zentrale (bei 20°) dagegen durch subkortikale Projektionen vermittelt ist.

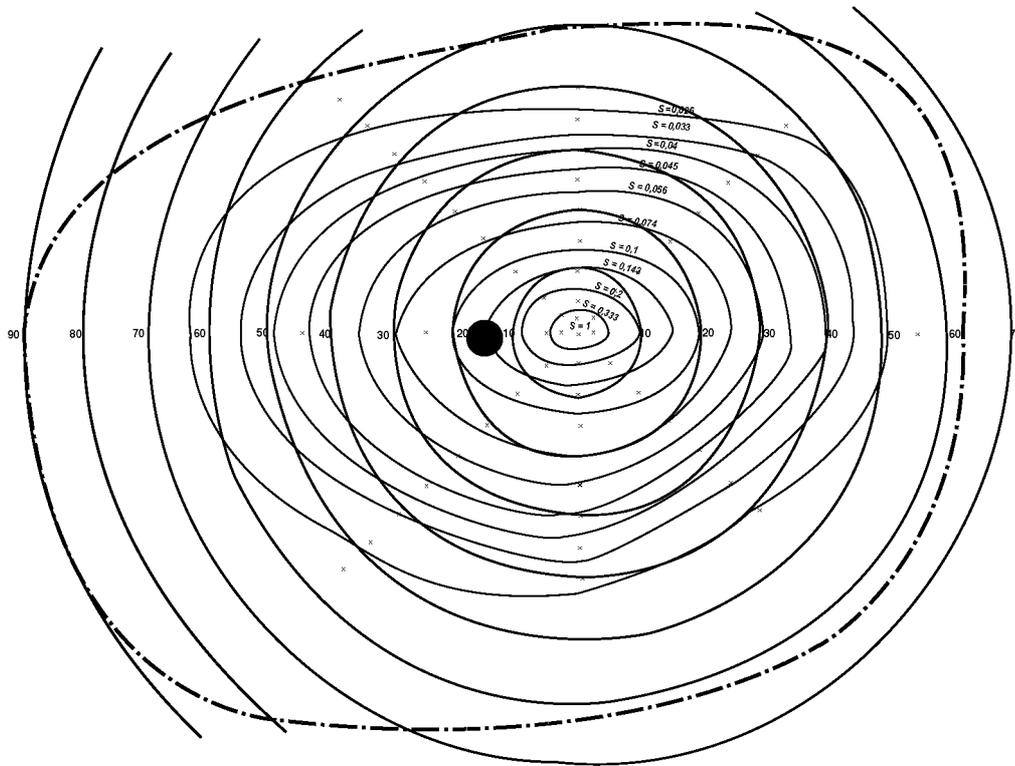


Abb. 1.1-3: Theodor Wertheims (1894) Ergebnisse zur Gittersehschärfe (verkleinerte Originalabbildung).

Die Beschriftung der ellipsenförmigen Linien konstanter Sehschärfe (Isopteren) lautet, von innen nach außen:  $S = 1$ ;  $S = 0,333$ ;  $S = 0,2$ ;  $S = 0,143$ ;  $S = 0,1$ ;  $S = 0,074$ ;  $S = 0,056$ ;  $S = 0,045$ ;  $S = 0,04$ ;  $S = 0,033$ ;  $S = 0,026$ . Es sind relative Angaben, bei der die zentrale Sehschärfe gleich 1 angenommen ist.

zellen sondern die Ganglienzellen der Netzhaut das verantwortliche Substrat sein müssen.

Weymouth zeigt sich damit geneigt, funktionell höhere Strukturen quantitativ in psychophysische Betrachtungen einzubeziehen. Zu seiner Zeit waren verlässliche quantitative Angaben zur Retinotopie im primären visuellen Kortex durch die Pionierarbeiten von Inouye (1909) und die bekannte Holmes'sche Karte (Holmes & Lister, 1916; Holmes, 1945) verfügbar. Den in diesem Sinn nächsten Schritt stellen die Arbeiten von Daniel und Whitteridge (1961) sowie von Cowey und Rolls (1974) dar, in denen die quantitativen Angaben zur Retinotopie primären visuellen Kortex stärker formalisiert werden und der quantitative Bezug zu psychophysischen Ergebnissen hergestellt wird. Daniel und Whitteridge (1961) untersuchen neurophysiologisch und -anatomisch die retinokortikale Projektion und führen dabei den kortikalen Vergrößerungsfaktor  $M$  als Inverses des von Talbot und Marshall (1941) verwendeten

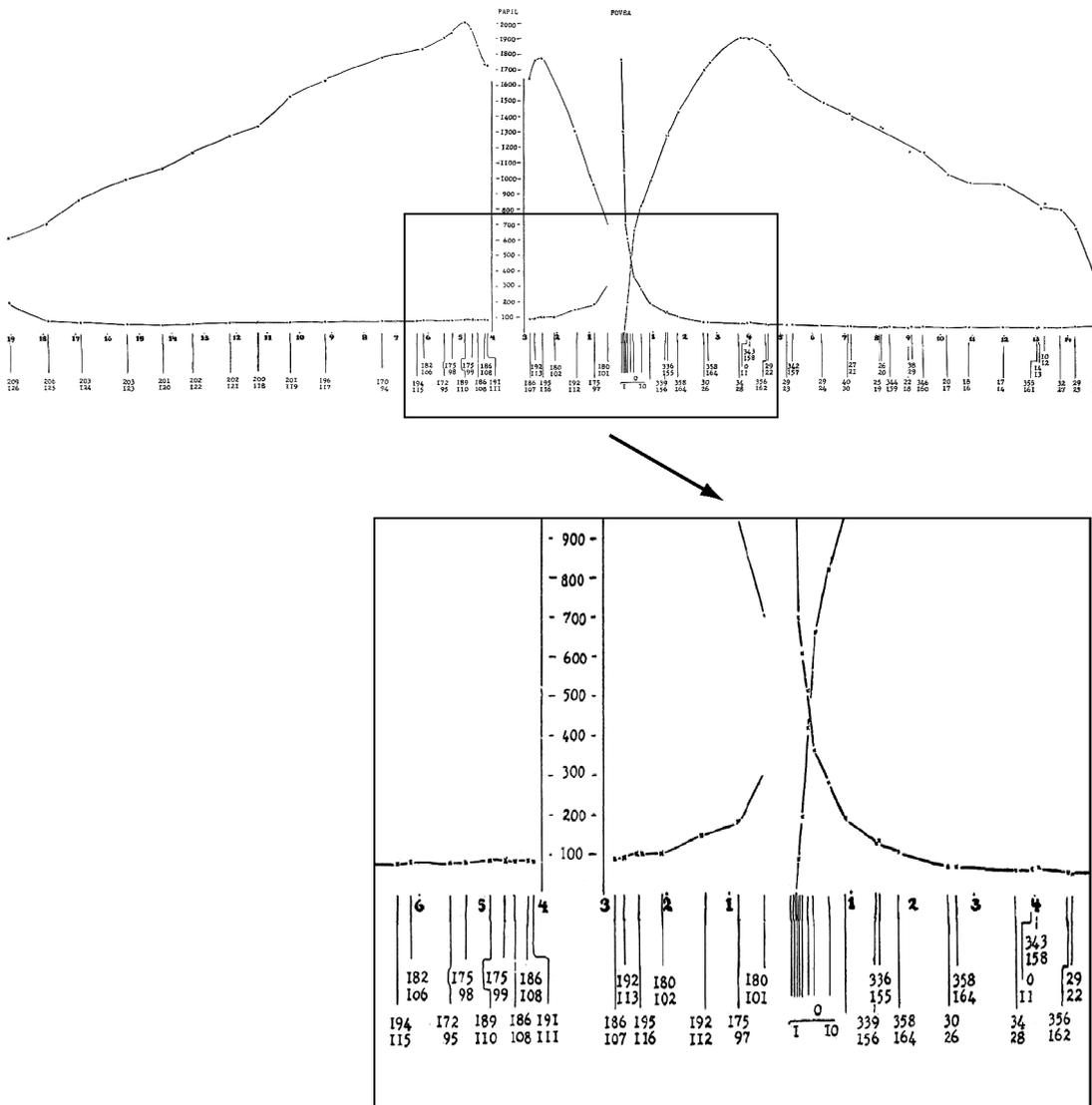


Abb. 1.1-4: Rezeptordichte nach Østerberg (1935) (verkleinerte Originalabbildung).

Indexes ein. Der  $M$ -Faktor gibt den Durchmesser desjenigen kortikalen Areal an, auf das ein Gesichtsfeldareal von  $1^\circ$  Durchmesser projiziert. Anders ausgedrückt ist  $M$  der Abstand auf der Kortexoberfläche (in mm) von zwei Zellen, deren receptive Felder einen Mittelpunktsabstand von  $1^\circ$  Sehwinkel haben. Für die menschliche Fovea beträgt  $M$  etwa  $8 \text{ mm}/^\circ$ . Das Wort „Vergrößerung“ bezieht sich dabei auf die Tatsache, daß die Zellabstände auf dem Kortex wesentlich größer als die entsprechenden auf der Retina sind (bezieht sich also nicht, wie manchmal mißverstanden, auf die Tatsache, daß die der Fovea zugeordnete kortikale Fläche größer als die der Peripherie zugeordnete ist).  $1^\circ$  Sehwinkel entspricht auf der Retina einem Rezeptorabstand von  $0,32 \text{ mm}$  (Pirenne, 1962), der kortikale Abstand beträgt also etwa das 25-fache. Foveale Reize werden kortikal sozusagen durch eine „neuronal Lupe“ betrachtet.

Daniel und Whitteridge können beim Affen die Projektionseigenschaften neurophysiologisch bestimmen, doch liegen ihnen keine entsprechenden Verhaltensmaße vor. Sie vergleichen ihre physiologischen Daten daher mit Verhaltensdaten vom Menschen. Cowey und Rolls (1974) stellen dann erstmals beim Menschen einen quantitativen Zusammenhang zwischen der Sehschärfe und den Eigenschaften der Projektion her; sie beziehen sich dabei auf die von Brindley und Lewin (1968) beschriebene Gesichtsfeldverteilung von Phosphenen, die durch elektrische Stimulation der Hirnrinde mit implantierten Elektroden hervorgerufen worden sind. Die Verhaltensdaten entstammen der klassischen Arbeit von Wertheim (1894) und betreffen die Gittersehschärfe.

### Der Weg zur Systemtheorie

Es erscheint oft selbstverständlich, daß die Erkennbarkeit von Mustern durch die Sehschärfe, d.h. die Auflösung feiner Strukturen bei hohem Kontrast, gegeben ist. Da die Abhängigkeit der Sehschärfe vom Gesichtsfeldort gut bekannt ist, scheint daher alles Wissenswerte zur peripheren Mustererkennbarkeit bekannt. Tatsächlich ist die Identifizierbarkeit einzeln dargebotener, hochkontrastiger Buchstaben zur Peripherie hin in ähnlicher Weise verringert, wie es verschiedene Sehschärfen sind, die Unterschiede zwischen diesen erst einmal beiseite gelassen (s. Kap. 4.1). Abb. 1.1-5 zeigt ein Schaubild, das Anstis (1974) zur Veranschaulichung der Gesichtsfeldortsabhängigkeit erstellt hat.

Die Gleichsetzung von Sehschärfe und Mustererkennbarkeit widerspricht nun aber der Erfahrung jeden Augenarztes, der weiß, daß Mustererkennung und Sehschärfe, etwa in der Amblyopie, unabhängig voneinander gestört sein können (Rentschler et al., 1982). Schon Ehlers (1953) etwa schreibt:

„Form vision is a complex sense, composed, as it is, of a number of visual functions“ (S. 433) ... „It is generally assumed, but it is not quite true, that the visual acuity test is an examination of the sense of form.“ (ebd.) ... „I have tried to emphasize that the visual acuity of an amblyopic eye does not indicate the same degree of disability as the same visual acuity found in an eye with organic disease. The two conditions cannot be compared. The treatment for amblyopia seems less glorious when this is appreciated.“ (S. 434).

Eine formale Erklärung dafür kann die systemtheoretische, kybernetische Beschreibung visueller Wahrnehmung bieten, die von Heinz von Foerster in den 50er Jahren begründet wurde (von Foerster, 1981; zur Einführung siehe etwa Röhler, 1967; Rentschler & Schober, 1978; Levine, 1985; Marko, 1986; Wahl, 1989; Shapley et al., 1990; Wechsler, 1990). Mit systemtheoretischen Methoden lassen sich die Übertragungseigenschaften eines linearen, ortsinvarianten Systems vollständig durch die Angabe der Übertragungsfunktion beschreiben. Diese ist aber durch die Übertragung feiner Details (hoher Ortsfrequenzen), die die Sehschärfe bestimmen, nur zu einem kleinen Teil festgelegt; demzufolge können die Übertragungseigenschaften bei gegebener Sehschärfe auf vielerlei Weise verändert sein.

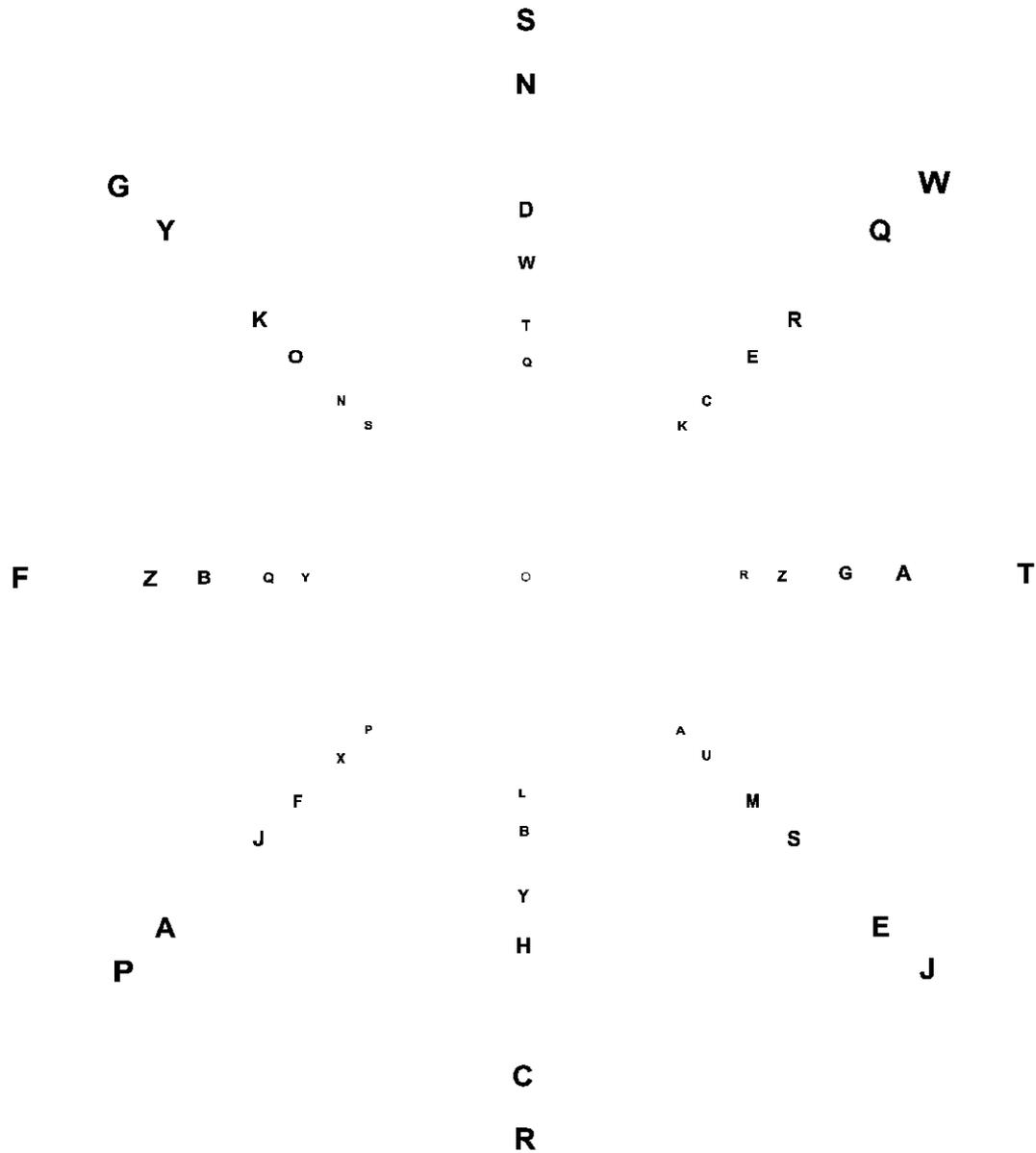


Abb. 1.1-5: Demonstration der Gesichtsfeldabhängigkeit der Größenschwelle von Anstis (1974) (Ausschnitt).

Wenn man in der Mitte fixiert, liegen alle Zeichen – für Anstis' Versuchspersonen – an der Größenschwelle ( $2 \text{ Vpn}$ ,  $1,8 \log \text{ ft-L} = 216 \text{ cd/m}^2$ ). Die Tafel hat die überraschende Eigenschaft, daß dies innerhalb gewisser Grenzen unabhängig vom Abstand gilt, da der Exzentrizitätswinkel und der Reizgrößenwinkel sich gleichsinnig mit dem Betrachtungsabstand ändern. (Die Tafel kann hier nicht in Originalgröße reproduziert werden; zur Kontrolle: Der Mittelpunkt des unteren „R“ sollte 66 mm vom Mittelpunkt entfernt liegen.)

Der optische Apparat des Auges läßt sich recht gut als lineares, ortsinvariantes System beschreiben, d.h. die Systemeigenschaften lassen sich auf einfache Weise an Hand der Übertragungseigenschaften für periodische Reize mit sinusförmiger Modu-

lation, den Sinusgittern, bestimmen. Da die Übertragungseigenschaften des dem optischen nachfolgenden neuronalen Systems nicht direkt der Beobachtung zugänglich sind, hat man versucht, sie indirekt über Schwellenmessungen zu erfassen. Man hoffte dabei, über die Bestimmung der *Gittererkennbarkeit* zu einer allgemeinen Beschreibung visueller Leistungen zu gelangen (s. etwa Braddick et al. 1978, Olzak & Thomas, 1986). In diesem Rahmen gewinnt die Untersuchung, in welcher Weise die Gittererkennbarkeit bei niedrigem Kontrast vom Gesichtsfeldort abhängt, zentrale Bedeutung. Dabei interessiert nun nicht nur die *Gittersehschärfe*, die ja bereits von Wertheim (1894) gut untersucht war, sondern die Kontrastempfindlichkeitsfunktion (contrast sensitivity function, CSF), also das Inverse der Kontrastschwelle als Funktion der Gitterortsfrequenz. Hilz und Cavonius (1974) beschreiben erstmals die Gitterkontrastempfindlichkeit in der Peripherie.

### **Psychophysik und kortikale Vergrößerung**

Auf Grund der allgemeinen Bedeutung, die der Kontrastempfindlichkeitsfunktion in den 70er Jahren zugesprochen wurde, lag es nahe, auch die Gitterkontrastempfindlichkeit mit den inzwischen gut untersuchten Eigenschaften der primären kortikalen Projektion in Bezug zu setzen. Koenderink et al. (1978) und Rovamo und Virsu (1979) haben dies getan und finden, daß die Abnahme der Kontrastempfindlichkeit zur Peripherie hin sich nahezu vollständig aus den retinokortikalen Projektionseigenschaften herleiten läßt. Da im Fall der Kontrastempfindlichkeit das Kriterium nicht, wie im Fall der Sehschärfen, ein ortsbezogenes ist, kann man die Schwelle oder deren Inverses nicht direkt mit dem Vergrößerungsfaktor  $M$  in Bezug setzen. Man geht indirekt vor, indem man peripher größere Reize verwendet und dadurch die Kontrastempfindlichkeit auf gleiches Niveau bringt. Dabei werden die Reize nach Maßgabe des  $M$ -Faktors in der Weise größenskaliert, daß sie, unabhängig vom Gesichtsfeldort, auf gleich große kortikale Flächen abgebildet werden.

Rovamo und Virsu (1979) verwenden kreisförmige Ausschnitte aus Sinusgittern; Vergrößern der Reize bedeutet also sowohl Verringern der Ortsfrequenz als auch Vergrößern der Apertur. In der Tat erhalten sie das Resultat, daß durch  $M$ -Skalierung das periphere Kontrastempfindlichkeitsdefizit bis auf etwa den Faktor 2 reduziert werden kann; auf die verbleibende Diskrepanz gehen sie nicht näher ein. In neuerer Zeit haben Bijl et al. (1992) die These von der  $M$ -Skalierbarkeit der Gitterkontrastempfindlichkeit geprüft und erhielten etwas größere Abweichungen, etwa um den Faktor 3. Sie können auf der Grundlage der bekannten Eigenschaften der retinokortikalen Projektion ein Modell angeben, das diese Abweichungen erklärt.

Die Ortsabhängigkeit der Entdeckungsleistungen an Sinusgittern läßt sich also im vollen Umfang durch die Eigenschaften der retinokortikalen Projektion erklären. Nachdem ein lineares System vollständig durch die Übertragung von Sinusgittern charakterisiert ist, könnte man vermuten, daß auch die Ortsabhängigkeit von *Erkennensleistungen* bei komplexeren Reizen durch diese Projektionseigenschaften gegeben ist. So schreiben Rovamo et al. (1978, S. 56):

The result suggests that ... a picture can be made equally visible at any eccentricity by scaling its size by the magnification factor, because the contrast sensitivity function represents the spatial modulation transfer function of the visual system for near-threshold contrasts.

Es ist irritierend, wie die Autoren angesichts der reichlich vorhandenen Evidenz für das Gegenteil ohne weitere Begründung diese weitreichende Verallgemeinerung in den Raum stellen. Man fragt sich, ob die grobe Vereinfachung gar der Grund ist, warum diese Arbeit sehr bekannt wurde, während die gleichzeitig erschienene, wesentlich umfangreichere Studie von Koenderink et al. (1978) – die zum gleichen Ergebnis kommt – wenig Beachtung findet.

Virsu et al. (1987) formulieren die These erneut, pointiert, als Theorie der kortikalen Vergrößerung:

This has led to the emergence of what could be called the cortical magnification theory of peripheral vision. In a generalized form, the theory claims that the visibility of any stimulus is similar across the whole visual field if the cortical representations of the stimulus calculated by means of the striate-cortical magnification factor are similar.“  
(S. 1568)

„The basic idea behind the cortical magnification theory is that identical striate-cortical stimulus representations produce identical thresholds ...“ (ebd.)

Die Autoren testen die Vorhersagen der Theorie an Hand von sieben räumlichen Schwellenaufgaben, darunter zwei Noniusseherschärfenaufgaben, und finden, daß zwischen 85% und 97% der Varianz aufklärbar sind. Sie weisen darauf hin, daß die auch von ihnen im Fall der 2-Punkt-Auflösung gefundene nach Skalierung verbleibende Schwellenerhöhung um den Faktor 2,3 (von 0 bis 20 Grad Exzentrizität) recht gering sei, denn im Verhältnis zu der Erhöhung um den Faktor 18, den man ohne Skalierung erhält, blieben nur 7,7% der Gesamtvarianz unaufgeklärt.

Westheimer (1982) polemisiert gegen die vereinfachende Sicht, insbesondere der finnischen Arbeitsgruppe:

„There is a rather insistent opinion abroad that spatial visual processing has identical properties right across the visual field save for a multiplicative factor which is a function of eccentricity. Evidence is sought in the concordance of values of minimum angle of resolution and the reciprocal of the magnification factor in various eccentricities. The modulation sensitivity function has also been included under this rubric.“  
(S. 161).

In der Ablehnung der Theorie der kortikalen Vergrößerung stützt Westheimer sich hauptsächlich auf seine ausführlichen Untersuchungen zur Noniusseherschärfe (hyperacuity); er kommt zu dem Schluß, daß Noniusseherschärfemaße wesentlich stärker zur Peripherie hin ansteigen als Seherschärfemaße. Levi et al. (1985, 1987) und Virsu et al. (1987) kommen allerdings zu dem Schluß, daß die Hyperseherschärfen ihrerseits keine homogene Gruppe bilden und unter ihnen solche sind, die sich in das Konzept der kortikalen Vergrößerung einfügen, und andere, für die das nicht gilt. Ein von Wilson (1991) vorgestelltes Modell des peripheren Sehens, in dem zusätzliche Eigenschaften der retinokortikalen Projektion berücksichtigt werden, ist ein Versuch, dieses stärkere Ansteigen der Noniusseherschärfen zu erklären.

Doch wird durch das Einführen zusätzlicher Variablen, auch wenn sie physiologisch gut begründet sind, das skalare kortikale Vergrößerungskonzept gesprengt und unversehens zu einem mehrdimensionalen, vektoriellen Ansatz, in welchem die kortikale Vergrößerung nur *ein* Aspekt unter anderen ist. Irreführend ist, wenn dies unter der Hand geschieht. So wird in Rovamo und Raninens (1984) „F-scaling“ zusätzlich die retinale Beleuchtungsstärke skaliert. Wenn dann gesagt wird, „this paper extends *M*-scaling to luminance“ – gerade so, als ob es möglich wäre, eine nicht-ortsbezogene Größe mit einem ortsbezogenen Faktor zu skalieren –, wird dem Leser, wie man im Englischen sagt, „die Wolle über die Augen gezogen“ (er wird getäuscht). Darüber hinaus stört bei allen Erweiterungsversuchen des Vergrößerungskonzepts zum gegenwärtigen Zeitpunkt der ad-hoc Charakter der Entscheidung darüber, welche Eigenschaften des retinokortikalen Pfades denn nun berücksichtigt werden und welche nicht. Sobald nämlich das scholastische Verdikt, allein der örtliche Maßstab sei entscheidend, fällt, ist die Zahl der Anwarter, die berücksichtigt werden sollten, lang. Zu nennen sind der Grad der rezeptiven Feldüberlappung (overlap factor), die Größe der rezeptiven Felder, das Unter- oder Überschreiten der örtlichen Nyquist-Frequenz durch die Feldzentrendichte („undersampling“), die relative Dichteverteilung von *P*- und *M*-Zellen, die unterschiedliche Kontrastempfindlichkeit der beiden Systeme (noch ganz abgesehen von ihren zeitlichen Eigenschaften) und die oft über den Mittelwertsunterschieden liegende Varianz aller dieser Größen.

Der entscheidende Trugschluß der Theorie der kortikalen Vergrößerung liegt darin, daß zu weitreichende Folgerungen aus den Schwellenexperimenten gezogen werden. Wenn Rovamo und Virsu und Andere von „visibility“ sprechen, dann wird – beabsichtigt oder nicht – suggeriert, daß *Mustererkennung* mitgemeint ist. Die vorhandene Evidenz beruht aber vorwiegend auf Detektionsaufgaben<sup>3</sup> oder sehr einfachen visuellen Leistungen. Auch das oben angeführte – scheinbar systemtheoretische – Argument bezüglich der Rolle der Gitterkontrastempfindlichkeit trifft nicht; in ihm sind fünf entscheidende Fehler enthalten:

a) Das neuronale visuelle System ist hochgradig nichtlinear. Komplexe Leistungen sind deshalb nicht einfach aus elementaren vorhersagbar.

b) Schwellen sind ein nichtlineares Konzept. In einem linearen System *existieren sie nicht*; insbesondere wird bei Schwellenexperimenten das System gezielt in dem Bereich betrieben, der laut Ansatz nichtlinear ist. Gleiches gilt für Aufgaben bei hohem Kontrast, bei denen anzunehmen ist, daß das System in der Sättigung betrieben wird.

c) Die Kontrastempfindlichkeitsfunktion (contrast sensitivity function, CSF) wird oft leichtfertig als Modulationsübertragungsfunktion (MÜF, modulation transfer function, MTF) gedeutet (etwa im oben angegebenen Zitat aus Rovamo et al. 1978), obgleich die CSF sich auf den *niedrigsten* sichtbaren Kontrast bezieht und als ein nichtlineares Konzept aufgefaßt werden kann, wogegen der Übertragungsfaktor der MÜF sich auf den *ganzen* Kontrastbereich bezieht und ein lineares Konzept darstellt.

3. Dem englischen Begriffspaar „detection/recognition“ entspricht das deutsche Paar „Entdeckung/Erkennung“ nur ungenügend. Mit „Erkennung“ meint man gelegentlich auch das, was man im Englischen mit „detection“ bezeichnet, und das Wort „Entdeckung“ hat die Konnotation eines plötzlichen Auftretens eines Ereignisses, die in unserem Zusammenhang der Erkennung statischer Muster irreführt.

d) Ohne die Angabe der Phasenübertragung ist auch ein lineares System unzureichend gekennzeichnet; dabei ist im Fall der Bildverarbeitung die Angabe der Phasenfunktion sogar weit wichtiger als die der Amplitudenfunktion (Oppenheim & Lim, 1981).

e) Elementare Fragen, wie z.B. die in sich hoch nichtlineare Wandlung von Leuchtdichte-Information in Kontrastinformation zu modellieren ist, bleiben unbeantwortet.

### **Welche visuellen Teilfunktionen skalieren mit dem kortikalen Vergrößerungsfaktor?**

Offensichtlich sind gewisse visuelle Teilleistungen nur insofern im indirekten Sehen herabgesetzt, als für gleiche Leistung größere Reize notwendig sind, und andere sind in jedem Fall herabgesetzt. Teilleistungen, deren periphere Verschlechterung durch Reizvergrößerung nach Maßgabe des kortikalen Vergrößerungsfaktors  $M$  kompensierbar sind, kann man als  $M$ -skalierbar bezeichnen; sie sind mit der „Theorie der kortikalen Vergrößerung“ (Virsu et al., 1987) verträglich. Strasburger und Rentschler (1996) und Strasburger (2001) geben eine Kurzübersicht, welche Leistungen dies nach Literaturberichten sind. Dies sind:

#### **a) $M$ -skalierbare Leistungen:**

Eine Reihe von Sehschärfeaufgaben wie Zwei-Punkt-Auflösung in der nahen Peripherie (Aubert & Foerster, 1857), Gittersehschärfe (Wertheim, 1894; Weymouth, 1958; Daniel & Whitteridge, 1961; Cowey & Rolls, 1974; Drasdo, 1977; Rovamo & Virsu, 1979; Virsu et al., 1987) und Snellen-Sehschärfe (Ludvig, 1941; Virsu et al., 1987), Ortsfrequenz- und Orientierungsdiskrimination (Thomas, 1987; Levi et al., 1999), weiterhin der Durchmesser des Panum-Areals (Fusionsbereich des Stereosehens; Ogle, 1950), Größe von Migräne-Skotomen (Drasdo, 1977), und Gitter-Kontrastempfindlichkeit sowohl als Funktion der Ortsfrequenz (Hilz & Cavonius, 1974; Koenderink et al., 1978a; Rovamo et al., 1978; Virsu & Rovamo, 1979; Rovamo & Virsu, 1979) wie der Zeitfrequenz (Virsu et al., 1982; Kelly, 1984a).

#### **b) Kontroverse Befunde:**

Zur Gitterkontrastempfindlichkeit (Gabormuster-Detektion) kommen allerdings García-Pérez und Sierra-Vásquez (1996) in ihrem extensiven Vergleich von empirischen Daten zu einem drastisch schlechteren Ergebnis was die Skalierbarkeit betrifft. Sie werten alle oben dazu genannten Arbeiten (außer Kelly, 1984a) und noch 46 (sechsvierzig!!) weitere Arbeiten zur Gitterkontrastempfindlichkeit als mit dem Skalierbarkeitskonzept unvereinbar. In allen Fällen nimmt die Leistung zur Peripherie hin ab, wenn auch nur in mäßigem Ausmaß.

Es gibt weiterhin widersprechende Berichte zu Hypersehschärfeaufgaben (hyperacuity): Pro Skalierbarkeit: Levi et al. (1985), einschließlich einer Crowding-Sehschärfeaufgabe; Virsu et al., 1987; contra: Hering, 1899; Bourdon, 1902; Weymouth, 1958; Westheimer, 1982; Virsu et al., 1987 zur Linienteilungs- (bisection) Hypersehschärfe; siehe Beard et al., 1997, zu einem nicht-skalaren Modell) und der Konsens scheint zu sein, daß diese Aufgaben (wie Sehschärfen) keine homogene Gruppe bilden. Weiterhin gibt es widersprechende Ergebnisse zur Orientierungsempfindlichkeit (pro Skalierbarkeit: Virsu et al., 1987; contra: Spinelli et al., 1984). Auch zur zwei-Punkt-Auflösung in der nahen Peripherie berichten Foster et al. (1989) ein Versagen des Skalierungskonzepts, im Unterschied zu dem was man aus Aubert und Foersterns klassischen Ergebnissen folgert.

### c) Nicht *M*-skalierbare Leistungen:

Schließlich gibt es die unbestritten nicht *M*-skalierbaren Leistungen: Zwei-Punkt-Auflösung in der ferneren Peripherie (Aubert & Foerster, 1857), Stereosehschärfe (Fendick & Westheimer, 1983), skotopische Kontrastempfindlichkeit (Koenderink et al., 1978b), Gitterscheinbewegung (Hilz et al., 1981), unreferenzierte Gitterbewegung (Levi et al., 1984), Auflösung feinkörniger Bewegung (fine-grain motion, Foster et al., 1989), Bewegung erster und zweiter Ordnung (Bewegung zweiter Ordnung bezieht sich auf Zufallspunktmuster, die von einem bewegten Sinusgitter moduliert sind; Solomon & Sperling, 1995), Detektion von Unschärfe (blur detection) in farbigen Grenzlinien (Blatherwick & Hallett, 1989), Linienteilungs-Hypersehschärfe (Levi & Klein, 1986; Virsu et al., 1987), Schätzung einer Anzahl (numerosity judgement, Parth & Rentschler, 1984), Ortsbeziehungen zwischen Bildkomponenten (Verarbeitung örtlicher Phasenbeziehungen) (Rentschler & Treutwein, 1985; Bennett & Banks, 1987; Saarinen, 1987), Symmetrie-Detektion (Tyler, 1999; Tyler berichtet sogar gegenläufige Exzentrizitätsabhängigkeit), örtliche Phasenauflösung (Harvey et al., 1985), Maskierung durch ortskorrelierte Muster (Hübner et al., 1985), und – das Thema dieses Buches – Ziffern/Buchstabenerkennung bei niedrigem Kontrast (Strasburger et al., 1991; Strasburger et al., 1994; Strasburger & Rentschler, 1996).

### Zur Neurophysiologie

Gerade in der jüngsten Zeit ist im Bereich der visuellen Psychophysik die Funktion des peripheren Sehens vorwiegend unter dem Aspekt der kortikalen Vergrößerung untersucht worden (s. z.B. Pointer, 1986, Drasdo, 1991, Virsu et al., 1987, Toet & Levi, 1992, Bijl et al., 1992, Wilson, 1991). Ein Grund dafür sind sicher die beeindruckenden Fortschritte in der anatomischen und neurophysiologischen Untersuchung des retinokortikalen Übertragungskanal und die Aktualität der daraus entstandenen Fragen. Dazu gehört die Klassifikation und Bestimmung der Eigenschaften der an

diesem Pfad beim Primaten und Menschen beteiligten Zelltypen. Während noch vor 10 Jahren das visuelle System der Katze, und damit die Klassifikation und Beschreibung von *X*- und *Y*-Zellen als für den Menschen paradigmatisch herangezogen wurde, hat sich durch die neuen Kenntnisse zum visuellen System der Primaten eine für das menschliche Gehirn passendere Systematik herausgebildet. Die beiden wichtigen Subsysteme sind dabei nach den beteiligten Schichten des Genikulatum laterale (LGN, seitlicher Kniehöcker) als magnozelluläres und parvozelluläres benannt, bzw. kurz *M*- und *P*-System. Die dem zugrundeliegende Klassifikation retinaler Ganglienzellen stammt von de Monasterio und Gouras (1975), die 25 funktionelle Zelltypen beschreiben und diese in drei Klassen einteilen: Breitbandzellen, farbopponente Zellen und nicht-konzentrische Zellen. Nur die ersten beiden Typen projizieren auf das Genikulatum. Breitbandzellen (die Bandbreite bezieht sich auf die Lichtwellenlänge) zeigen transientes Antwortverhalten und projizieren vor allem auf die magnozelluläre Schicht, farb-opponente Zellen zeigen tonisches Antwortverhalten und projizieren stärker auf parvozelluläre Schichten. In der Peripherie stellen Breitbandzellen den häufigsten Zelltyp dar; farbopponente Zellen sind der häufigste Typ in der Foveola. Es gibt keine direkte Entsprechung zur *X/Y*-Klassifizierung bei der Katze, aber in gewisser Hinsicht entsprechen sich *M* und *Y*, sowie *P* und *X*. Einen guten Überblick bieten Kaplan et al. (1990); eine weitergehende Darstellung bringt Kap. 5.3.

Die funktionelle Unterteilung des Zellantwortverhaltens in ein transientes und ein tonisches („sustained“) hat dabei aber keineswegs an Aktualität verloren. Diese Antwortcharakteristiken waren bereits im System der Katze unterschieden worden (Enroth-Cugell & Robson, 1966), und in der visuellen Psychophysik der letzten zwanzig Jahre hatte es intensive Bemühungen gegeben, diese Charakteristiken in Zusammenhang mit vergleichbaren Verhaltenseigenschaften des Gesamtlebewesens zu bringen (Kulikowski & Tolhurst, 1973; Breitmeyer & Ganz, 1976; Breitmeyer, 1984; einen entsprechenden Versuch mit Hilfe des evozierten Potentials unternahmen Strasburger, Murray & Rentschler, 1993). Die in einem solchen Ansatz grundsätzlich enthaltenen Schwierigkeiten haben vielfach Unbehagen ausgelöst und der Unterteilung von transienten und tonischen Kanälen Kritik eingetragen. Doch bleibt Psychophysik ohne Bezug zur Neurophysiologie in der Gefahr spekulativer Theoriebildung, und die Funde der Neurophysiologie beleben den Versuch der Zuordnung (Kulikowski et al., 1989).

Im Mittelpunkt der gegenwärtigen neurophysiologischen Forschung zur retinokortikalen Übertragungstrecke stehen zwei Kontroversen. Die eine betrifft die Frage, ob die Konvergenz und Divergenz der Verschaltung allein in der Netzhaut (bei der Projektion von Rezeptorzellen auf Ganglienzellen) geschieht, oder ob es in der Projektion speziell der Fovea weitere Divergenz in der nachfolgenden Übertragungstrecke zum Kortex gibt. Man spricht im letzteren Fall von selektiver Überrepräsentation der Fovea. Die Projektionseigenschaften der Gesamtstrecke sind nun recht genau bekannt (van Essen et al., 1984). Die Schwierigkeit besteht in der funktionellen Zuordnung zwischen Rezeptor- und Ganglienzellen. Zwar läßt sich die Dichte beider Zelltypen im Präparat gut in Abhängigkeit vom anatomischen Gesichtsfeldort bestimmen – schon Østerberg (1935) hat dies ja für die Rezeptorzellen geleistet –,

doch sind diejenigen Ganglienzellen, die die Signale der Fovea verarbeiten, gegenüber den auf sie projizierenden Rezeptorzellen aus Platzgründen lateral verschoben, so daß die Zuordnung der Zellen zum Gesichtsfeldort im zentralen Sehen unsicher ist. Obgleich in der Abschätzung des Ausmaßes dieser Verschiebung in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt worden sind, ist die Frage noch kontrovers (Perry & Cowey, 1988; Wässle et al. 1989, 1990; Curcio & Allen (1990); Azzopardi & Cowey, 1993, 1996a, 1996b; Azzopardi et al. 1999).

Eine weitere Kontroverse betrifft die Frage, wie sich die Dichte von *P*- und *M*-Zellen zur Peripherie hin verändert. Während Perry und Silveira (1988) und Livingstone und Hubel (1988) die Ansicht vertreten, daß beide Typen ähnlich zur Peripherie hin verteilt sind, vertreten Schein und de Monasterio (1987) die These, daß im *M*-System anders als im *P*-System in der Projektion vom Genikulatum zum Kortex peripher starke Konvergenz auftritt. Im Einklang damit finden mehrere Autoren eine Abnahme des *P/M*-Zahlenverhältnisses zur Peripherie hin; Malpeli et al. (1996) berichten um einen Faktor von 14 insgesamt, Azzopardi et al. (1999) um den Faktor 5 im zentralen Bereich (von foveal 35:1 auf 5:1 bei 15°). Für eine ältere aber umfassende Übersicht siehe Drasdo (Drasdo, 1991, sowie die Veranschaulichung in Drasdo, 1989, Fig. 2), und die Modellierung in Azzopardi & Cowey (1996a).

## Gestaltpsychologie

Die hohe Aufmerksamkeit, die dem Konzept der kortikalen Vergrößerung in der visuellen Psychophysik geschenkt wird, scheint mir der Entwicklung einer allgemeingültigeren Theorie des peripheren Sehens eher abträglich, denn die Vielfalt der Phänomene des peripheren Sehens gerät dadurch in den Hintergrund. In den minutiösen phänomenologischen und gestaltpsychologischen Beschreibungen des Wahrnehmungsprozesses Anfang unseres Jahrhunderts (Kirschmann, 1908; Wagner, 1918; Korte, 1923; Zigler, 1930; Butzmann, 1940) sind die vielfältigen Aspekte zu einem Gesamtbild zusammengetragen, einem Bild, das bis heute nur lückenhaft ausgefüllt erscheint. Denn die gestaltpsychologische These, daß das Ganze mehr als die Summe der Teile ist, gilt auch in der Forschung. So hat schon Wagner (1918, S. 70) experimentell die Existenz dessen nachgewiesen, was man heute als Bahnung zwischen verschiedenen Gesichtsfeldorten bezeichnen würde, daß nämlich foveal lokalisiertes Schriftmaterial besser lesbar ist, wenn es zuvor peripher dargeboten wurde. Das peripher Dargebotene muß dabei nicht erkannt worden sein, und es bedarf auch keiner Zuwendung der Aufmerksamkeit. Wagners interessanter Befund wurde bis heute weder bestätigt noch widerlegt. Den komplementären Bahnungseffekt beschreiben in neuerer Zeit Geiger und Lettvin (1986). Nach ihnen wird die Erkennung peripher dargebotener Muster durch gleichzeitige foveale Präsentation der gleichen Muster erleichtert, ohne daß die fovealen Muster selbst erkannt werden. Bahnung wird gegenwärtig unter dem Stichwort „Priming“ in der Kognitionspsychologie untersucht (z.B. Posner & Snyder, 1975; Humphreys & Quinlan, 1988). Die Muster werden allerdings beim Priming gegenwärtig nur am gleichen Gesichtsfeldort dargeboten. Mo-

dellierungen auf der Basis konnektionistischer Ansätze werden mit Hilfe des „spreading-activation“-Konzepts versucht (McClelland & Rumelhart, 1981). Leider arbeiten in diesem Bereich kognitive Psychologie und visuelle Psychophysik weitgehend getrennt von einander.

Ein weiteres Beispiel ist Kortes (1923) detaillierte gestaltpsychologische Beschreibung des Prozesses, der zur Erkennung von Buchstaben und Worten führt. Dieser Gestaltauffassungsprozeß läßt nach Korte zwei unterscheidbare Stufen erkennen. In der ersten wird auf passive Weise ein Gesamteindruck gebildet. Die danach einsetzende zweite Phase ist ein aktiver Prozeß der Auswahl von Einzelheiten und der Konkurrenz zwischen alternativen Perzepten. Spätere Zwei-Stufen-Theorien, etwa die von Broadbent (1958), in der als erste Stufe Parallelverarbeitung mit einer folgenden zweiten Stufe von begrenzter Kapazität angenommen wird, oder die aktuellen Unterteilungen in parallele Vor- und serielle Weiterverarbeitung durch Treisman (1980) sowie in „preattentive/attentive“ (Julesz) finden also hier Vorgänger, die wenig zur Kenntnis genommen werden. Kortes Auffassung, daß in einer zweiten Phase das in der ersten aufgenommene Material miteinander in Konkurrenz tritt, wird nach jüngeren Untersuchungen gestützt, nach denen unterschiedliche Aspekte der wahrzunehmenden Muster unabhängig voneinander aufgefaßt werden können. So bleibt der subjektive Eindruck scharfer Konturen in der Peripherie erhalten (Bouma, 1971; Lettvin, 1976), obgleich die Sehschärfe herabgesetzt ist. Lettvin (1976) beschreibt eine Reihe merkwürdiger Ergänzungseffekte, bei denen Mustersigenschaften perzeptuell in den Bereich des blinden Flecks extrapoliert werden, d. h. dort wahrgenommen werden, ohne daß ein entsprechender physikalischer Reiz vorliegt. So wird eine unterbrochene, gerade Linie, bei der die Unterbrechung im blinden Fleck liegt, als durchgehend gesehen, während eine in gleicher Weise unterbrochene aber gezackte Linie als unterbrochen gesehen wird.

Die gestaltpsychologische Beschreibung des Formwahrnehmungsprozesses findet in den Studien zur Aktualgenese einen Höhe- aber auch einen Endpunkt. Eine beispielhafte Arbeit dieser Epoche zur peripheren Wahrnehmung ist die von Butzmann (1940). In der Beschreibung des „Gestaltwerdens“ sollen gleich mehrere aufeinanderfolgende Phasen unterschieden werden können. Da formalisierte Methoden zur Beschreibung prozeßhafter Vorgänge, wie sie heute die Systemtheorie bietet, damals nicht zur Verfügung standen, geschehen solche Bemühungen in Abgrenzung von „rein quantitativen“ Aussagen. So schreibt Butzmann (1940, S. 140):

„Die Zahl der Arbeiten, die sich mit dem allgemeinen Charakter der Wahrnehmung im indirekten Sehen beschäftigen, ist klein. Noch weniger umfangreich an Zahl sind die Untersuchungen, die sich speziell mit der Auffassung extrafoveal abgebildeter Gestalten befassen. Die meisten davon haben quantitative Feststellungen zum Gegenstand, d. h. sie beschränken sich in vielen Fällen auf Aussagen darüber, in welchem Abstand vom Fixationspunkt die wahre Form der Reizkonstellationen in den verschiedenen Netzhautmeridianen erkannt wird. Natürlich werden in diesen Darstellungen auch qualitative Faktoren häufig mit erwähnt, aber diese liegen doch mehr oder weniger abseits vom eigentlichen Ziel der Untersuchungen.“

Die Gesichtsfeldperipherie dient Butzmann dabei als Mittel zum Zweck: Auf Grund der peripher herabgesetzten Wahrnehmungsleistung faßt er die Verarbeitung an verschiedenen Gesichtsfeldorten als prototypisch für Vorstufen der Gestaltauffassung auf. Durch fortlaufend von peripher zu zentraler erfolgende Reizdarbietung will er daher sozusagen Momentaufnahmen der einzelnen Verarbeitungsphasen erstellen. Er unterscheidet folgende vier Phasen: „1) Von der gefühlsartigen Vorform bis zum 'Urnebel'“; 2) die erste Gestaltung; 3) die Entfaltung; 4) die Verfestigung und endgültige Wiedergabe., Man lasse sich nicht durch die altertümlich anmutenden Begriffe ablenken: Die Beschreibungen sind auch heute erhellend.

In neuerer Zeit gibt es – getragen von den heute aktuellen Fragestellungen zur Verarbeitung komplexerer visueller Information in den kognitiven Wissenschaften – eine deutliche Wiederbelebung gestalttheoretischen Denkens (Spillmann & Ehrenstein, 1996; Spillmann, 1999a, 1999b, 2001). Durch verbesserte Möglichkeiten der computergestützten Modellierung und Einsichten in neurobiologische Zusammenhänge kann sich heute gestaltpsychologisches Denken mit quantitativen Ansätzen verbinden.

### **Visuelle Funktionsdiagnostik: Sehschärfe und Perimetrie**

Das, was in der Gestaltpsychologie als bloß quantitativ beiseite gelassen wurde, ist im Bereich der visuellen Funktionsdiagnostik von besonderem Interesse: Die Quantifizierbarkeit der visuellen Leistung zum Zweck von praktischen Entscheidungen, sei es für ein Heilverfahren, eine Sehhilfe, zur Gestaltung von Sichtgeräten oder in der Personenauswahl. Bis heute ist dort das grundlegende Maß die Sehschärfe. Daß man genauer von Sehschärfen sprechen muß, sollte aus dem Vorangehenden klar geworden sein. Hier seien zusammenfassend die wichtigen Arbeiten dazu in historischer Reihenfolge genannt: Hück (1840), Aubert & Foerster (1857), Snellen (1862), Snellen & Landolt (1874), Wertheim (1894), Köllner (1925), Low (1951), Weymouth (1958) (s. S. 110), Pirenne (1962) (s. S. 181), Randall et al. (1966) (enthält auch Standardabweichungen zur Landolt-Sehschärfe), Sloan (1968) (Fig. 8 zeigt Sehschärfe vs. Exzentrizität für eine Reihe von Leuchtdichten), Aulhorn (1960) (s. dort Abb. 1), Genter et al. (1981), Levi et al. (1985). – Die Arbeit von Genter et al. (1981) ist der vollständigste Überblick aus neuerer Zeit.

Das zweite grundlegende Diagnostikum ist die Perimetrie. Während die Sehschärfe in der Regel herangezogen wird, um das foveale Sehen zu beurteilen, ist die Perimetrie das erste Mittel der Wahl zur Untersuchung der Peripherie. Die grundsätzliche Intaktheit des Gesichtsfeldes läßt sich örtlich präzise durch Darbieten heller Lichtpunkte prüfen; dies bezeichnet man heute als qualitative Perimetrie (s. z.B. Kasten, Strasburger & Sabel, 1997). In den 70er Jahren wurde diese um die – technisch aufwendigere – Vermessung der Leuchtdichteinkrementschwelle (Kontrastschwelle) für kleine Kreisscheiben auf homogen leuchtendem Hintergrund ergänzt, die sogenannte statische Perimetrie. Ihre Entwicklung ist eng mit dem Namen der Tübinger Ophthalmologin Elfriede Aulhorn verknüpft (Aulhorn, 1960; Aulhorn & Harms, 1972); das Tübinger (Hand-) Perimeter ist neben dem Goldmannschen auch heute noch ein be-

sonders geschätztes Gerät. Mit einem solchen fanden z.B. Harvey und Pöppel (1972) ein Plateau in der Leuchtdichteinkrementschwelle jenseits der Exzentrizität des blinden Flecks, das im Zusammenhang mit den hier berichteten Ergebnissen von besonderem Interesse ist. Abb. 1.1-6 zeigt eine aus diesen Ergebnissen abgeleitete schematische Darstellung des Gesichtsfeldes.

Eine hinsichtlich des Untersuchungsaufwands am Patienten zeitökonomische Alternative zur statischen ist die kinetische Perimetrie. Es wird ebenfalls bei niedrigem Kontrast, aber an nur wenigen Gesichtsfeldorten gemessen. Dabei wird der Testreiz langsam von außen nach innen über das Gesichtsfeld geführt, bis er sichtbar ist. Langsam!: Es wird nicht – wie der Name nahelegen scheint – die periphere Bewegungsempfindlichkeit oder Zeitauflösung gemessen (s.u.). Mit der Verbreitung der computergesteuerten statischen Automatikerimeter (auf denen keine kinetische Perimetrie implementiert ist) ist die kinetische Perimetrie in den letzten Jahren in den Hintergrund getreten. In neuerer Zeit gibt es Bemühungen, auch die kinetische Perimetrie zu automatisieren (s. Schiefer, Strasburger, Becker et al., 2001) und im neuen Octopus-Perimeter (Baujahr 2001) ist z.B. eine halbautomatische kinetische Perimetrie enthalten.

Die Untersuchung dynamischer Eigenschaften des Gesichtsfeldes – Bewegungsempfindlichkeit und Zeitauflösung – erfordert eigene Verfahren. Eine Möglichkeit ist die Vermessung der Reaktionszeit (s.u.), eine weitere die (ortsabhängige) Bestimmung der Flimmerverschmelzungsfrequenz. Hier sei auf die von Treutwein entwickelte Doppelpulsperimetrie hingewiesen (Treutwein & Rentschler, 1992), bei der in einem verschachtelt adaptiven Verfahren gleichzeitig an acht Gesichtsfeldpositionen die gerade wahrnehmbare Unterbrechung (zeitliche Lücke) der Darbietung eines Lichtpunktes gemessen wird (zu adaptiven Verfahren siehe Treutwein, 1995).

Ein interessantes Verfahren zur Untersuchung des Gesichtsfeldes ist die von Aulhorn eingeführte Rauschfeldkimpimetrie (Aulhorn & Köst 1989; Schiefer, Köst & Aulhorn 1990; Schiefer, Pfau, Selbmann, Wilhelm & Zrenner, 1995; Kolb, Petersen, Schiefer et al. 1995, Bachmann & Fahle, 2000; Spang et al., 2001; Review in Safran & Landis 1996). Durch Betrachten eines Rauschfeldes (es sieht aus, wie ein Fernsehbild nach Sendeschluß) können viele – aber nicht alle – Patienten mit cerebralen Gesichtsfeld-Schädigungen ihren eigenen, ihnen ansonsten nicht wahrnehmbaren Gesichtsfeldverlust subjektiv wahrnehmen (s. Abschnitt auf S. 35).

Die Beurteilung der peripheren Sehfunktion in der Perimetrie ist aus (neuro-) ophthalmologischer und neurologischer Sicht in der Regel nicht selbst der diagnostische Endzweck. Zum Beispiel lassen sich bei Schädigungen des Gesichtsfeldes recht genaue Schlüsse auf den anatomischen Ort einer Schädigung ziehen, da die neuronale Projektion des Gesichtsfeldes zum Kortex anatomisch höchst regelhaft erfolgt. Vor dem Siegeszug der modernen bildgebenden Verfahren war die Perimetrie daher ein entscheidendes Diagnosemittel zur Lokalisierung, etwa im Zusammenhang mit operativen Eingriffen. Die Geräteentwicklung ging mit dieser Zweckbestimmung parallel, so daß moderne Automatikerimeter zur Untersuchung der hier behandelten, eher grundlegenden Fragen, wenig geeignet sind. Zum heutigen Stand der Perimetrie siehe Lachenmayr (1988), Lachenmayr und Vivell (1992), Kölmel (1988), Gloor (1993) und die Zeitschrift *Perimetry Update*.

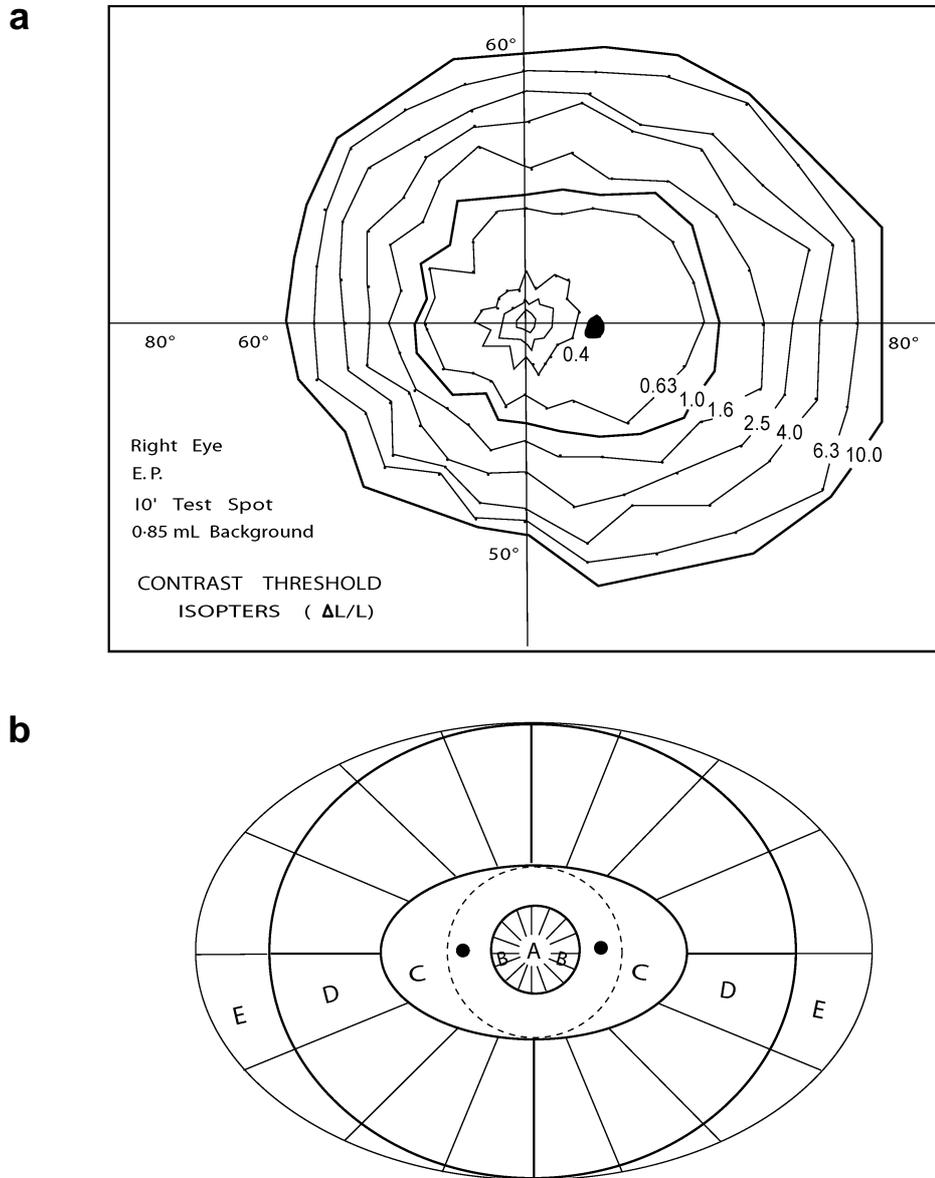


Abb. 1.1-6: Ein Leistungsplateau im menschlichen Gesichtsfeld, nach Pöppel und Harvey (1973) und Harvey und Pöppel (1972).

(a) Zugrundeliegende perimetrische Daten (aus Harvey & Pöppel, 1972).

(b) Schematische Darstellung des Gesichtsfeldes nach Pöppel und Harvey (1973), die sie aus ihren Messungen der Leuchtdichteinkrementschwelle ableiten. Es werden fünf Bereiche unterschieden: A: Fovea; höchste Empfindlichkeit unter photopischen Bedingungen. B: Perifovealer Bereich; Radius etwa  $10^\circ$ ; Schwelle nimmt unter photopischen Bedingungen mit der Exzentrizität zu. C: Plateau; konstante Schwelle bis etwa  $20^\circ$  vertikal und  $35^\circ$  horizontal; gestrichelter Kreis: nasale Grenze; schwarzer Punkt: Blinder Fleck. D: Peripherer Bereich mit ansteigender Schwelle bis zur Grenze des binokularen Bereichs. E: Monokularer temporaler Randbereich.

Als Gesichtsfeld (visual field) bezeichnet man den Gesamtbereich des Außenraums, in welchem, ohne Augenbewegungen, best-sichtbare Reize detektiert werden können; es wird mittels Perimetrie gemessen. Daneben existieren aber eine Reihe weiterer Gesichtsfeldbegriffe, die ich hier nenne, um sie vom üblichen Begriff zu unterscheiden. Als Formerkennungsgesichtsfeld bezeichne ich denjenige Teil des Gesichtsfeldes, innerhalb dessen einfache Formen wie Ziffern oder Buchstaben bei festgelegtem Musterkontrast erkannt werden können. Ein verwandter Begriff ist das von G. Geiger eingeführte "form-resolving field". Als Blickfeld bezeichnet man den Gesamtbereich des Außenraums, der unter Einschluß von Blickzuwendungen, aber ohne Kopfbewegung, gesehen werden kann. Dieses Blickfeld ist naturgemäß wesentlich größer als das Gesichtsfeld, da es letzteres umfaßt; im Normalfall ist es durch die Lider und Nase begrenzt. Von Interesse wird dieses Feld insbesondere, wenn Blickbewegungen gestört sind, oder – wie im Fall des Neglekts – Blickbewegungen in bestimmte Richtungen nicht ausgeführt werden. Das von Karlene Ball eingeführte "useful field of view" (UFOV®) scheint auf den ersten Blick ebenfalls ein spezialisierter Gesichtsfeldbegriff zu sein. Der zugehörige Test eignet sich zur Beurteilung der Fahrsicherheit von Autofahrern; dabei wird eine sensorische Leistung bei räumlich geteilter Aufmerksamkeit untersucht. Der Bezug zum Gesichtsfeld ist aber nur lose, denn es geht nicht um die topographischen Eigenschaften oder Gesichtsfeldgrenzen der gemessenen Leistungen.

### Reaktionszeit und Gesichtsfeld

Ein einfaches Maß zur Beurteilung zeitlicher sensorischer Eigenschaften stellen Reaktionszeiten dar. Schnellstmögliche Reaktionen auf das Erscheinen eines Reizes, ohne Notwendigkeit sich zwischen Alternativen zu entscheiden, bezeichnet man als Einfachreaktionszeiten (simple reaction times, SRT) – man kann sie als additiv aus einer sensorischen und einer motorischen Komponente zusammengesetzt beschreiben (Teichner & Krebs, 1972), und ihre Variation bei gleichbleibender motorischer Bedingung kann demnach als sensorisch bedingt angesehen werden. Unter optimalen Bedingungen betragen Einfachreaktionszeiten um die 180 ms, mit nur geringer Altersabhängigkeit zwischen 15 und 60 Jahren (60-jährige sind schneller als 10-jährige!). Der Oberarm ist um etwa 15 ms langsamer als der Mittelfinger (Reviews: Teichner, 1954; Teichner & Krebs, 1972; Keele, 1986; Luce, 1986; Schiefer, Strasburger et al., 2001).

Bereits Poffenberger (1912) beschrieb eine Zunahme der Reaktionszeit mit zunehmender Gesichtsfeldexzentrizität; insgesamt sind aber verlässliche Untersuchungen zur Abhängigkeit der Reaktionszeit vom Gesichtsfeldort rar (die moderne Experimentalpsychologie hat sich von diesem Thema weitgehend abgewendet). Poffenberger (1912) fand eine Zunahme um 24 ms bei 45° temporal and 15 ms nasal; das entspricht temporal einer Zunahme von 0.53 ms/° und nasal 0.33 ms/°. Rains (1963) berichtet eine Zunahme von 20 ms bei 5° Exzentrizität nasal aber nicht temporal, also um 5 ms/° in der nasalen Perifovea, und einen weiteren flachen Anstieg

von 0.4 ms/° bis 30° Exzentrizität nasal. Im Mittel betrug der nasale Anstieg also etwa 1 ms/°.

In einer kürzlich durchgeführten Studie fanden wir ebenfalls einen leichten (aber hoch zuverlässigen) Anstieg von Reaktionszeiten mit zunehmender Exzentrizität (Schiefer, Strasburger et al., 2001). Er betrug im Mittel 1.8 ms/° bis 30° Exzentrizität, mit schwächerer Zunahme unter und stärkerer über 15°.

Eine mögliche Erklärung für die peripher erhöhte sensorische Verarbeitungszeit ist die, daß bei gleichbleibender Reizgröße ein jeweils relativ geringerer Anteil eines rezeptiven Feldes gereizt wird (bei 30° etwa um den Faktor 13), so daß die (anzunehmende) beschleunigende Wirkung von Reizsummation weniger zum Tragen kommt. Zum Beleg der These fehlen allerdings Kenntnisse über den Einfluß der Reizgröße auf die Reaktionszeit. Gesichert ist bisher nur die leicht beschleunigende Wirkung höherer Leuchtdichten.

Interessant ist, daß peripher nicht nur Reaktionen leicht verzögert sind, sondern daß auch ein sich bewegender Reizes als langsamer wahrgenommen wird (Tynan & Sekuler, 1982). Eine Erklärung für das Phänomen gibt es bisher nicht.

### **Cerebrale Gesichtsfeldschäden und deren Restitution**

Indirektes Sehen setzt die Intaktheit des Gesichtsfeldes voraus und mit dem Thema des indirekten Sehens ist daher untrennbar das der neuronalen Schädigungen des Gesichtsfeldes und dessen möglicher funktioneller Restitution verbunden. Nach dem anatomischen Läsionsort unterscheidet man retinale (in der Ophthalmologie behandelte) von cerebralen (in der Neurologie/Neuropsychologie behandelte) Schäden und teilt letztere z.B. in prä- und postchiasmatische, prä- und postgenikuläre oder kortikale und subkortikale. Nach dem funktionellen (Gesichtsfeld-) Ort teilt man cerebrale Gesichtsfeldschäden in homonyme und heteronyme Hemianopsien, Quadrantenanopsien und Skotome.

Lange Zeit galten cerebrale Gesichtsfeldschäden als unheilbar. Inzwischen gibt es jedoch ernst zu nehmende Hinweise, daß durch extensives Sehtraining eine zumindest teilweise Wiederherstellung der Sehfunktion möglich ist. Seit den Pionierarbeiten von Zihl, von Cramon und Pöppel (Zihl, von Cramon & Pöppel, 1978; Pöppel, Brinkmann, von Cramon & Singer, 1978; Zihl, 1980; Zihl, 1981; Zihl & von Cramon, 1985) zum restitutiven Ansatz gab es einander widersprechende Berichte über Wirksamkeit und Nutzen eines Sehtrainings (Pommerenke & Markowitsch, 1989; Zihl & von Cramon, 1985; Balliet, Blood & Bach-y-Rita, 1985; Schmielau, 1989, und unveröffentlichte Einzelfallstudien; Kasten et al., 1994). Berichten über eindrucksvolle Gesichtsfeldvergrößerungen bezüglich Hell/Dunkelwahrnehmung, begleitet von einer Generalisierung des Therapieerfolgs auf (nicht-trainierte) Erkennensleistungen, stehen ausgesprochen kritische Berichte über weniger ausgeprägte oder gar ausbleibende Gesichtsfeldvergrößerungen (Balliet et al., 1985) oder andere Belege für feste anatomische Verschaltung der Gesichtsfeldrepräsentation (Pöppel et al. 1987) gegenüber. Insbesondere fehlten lange Zeit randomisierte Doppelblindstudien an einem Patientenkollektiv, um der naheliegenden Frage nachzuge-

hen, ob das Sehtraining – wie nahegelegt – ursächlich für die Wahrnehmungsverbesserung ist. Kasten und Sabel führten eine solche Studie durch (Kasten, Wüst, Behrens-Baumann & Sabel, 1998; Kasten, Wüst & Sabel, 1998a, 1998b); die Ergebnisse belegen einen kausalen Zusammenhang zwischen Training und visueller Funktionsverbesserung. Leider gibt es auch in dieser umfangreichen Studie methodische Schwächen (Kommerell, Lieb & Münßinger, 1999), die insbesondere die eingesetzten diagnostischen Verfahren zur Vermessung und Beurteilung der Sehfunktion betreffen.

Die bisher erreichten Gewinne an nutzbarer Gesichtsfeldfläche sind oft klein (wobei wenige Grad zentral eine hohe Bedeutung besitzen) und bisher schwer prognostizierbar. Desweiteren fehlen systematische Studien zur Generalisierung auf nicht-trainierte Sehleistungen. Kompensatorische Therapieansätze (z. B. Zihl & von Cramon, 1985; Kerkhoff et al., 1992, s.a. Trauzettel-Klosinski, 1997), bei denen etwa durch Augenbewegungstraining das Blickfeld vergrößert wird, sind deshalb in jedem Fall von besonderer praktischer Bedeutung.

### **Unbewußtes Sehen, Blindsight und Filling-in**

Sehen ist nicht immer bewußtes Sehen, und dies gilt offenbar insbesondere außerhalb des Gesichtsfeldzentrums. Zwei Forschungsrichtungen haben in jüngerer Zeit besondere Aufmerksamkeit auf sich gezogen, nämlich zu den Phänomenen Blindsight/visuelle Restfunktionen und dem sogenannten Filling-in. In beiden Fällen geht es um die Beziehung zwischen bewußtem und unbewußtem Sehen, im Fall des Blindsight (Blindsehen) um unbewußtes aber korrektes Wahrnehmen und im Fall des Filling-in um das vermeintliche Wahrnehmen nicht vorhandener Information sowie der bewußten Wahrnehmen der partiellen Blindheit (Skotomwahrnehmung).

Das Phänomen des Blindsehens ist implizit bereits in Riddochs klassischem Bericht enthalten (Riddoch, 1917) und wurde in jüngerer Zeit vor allem von Pöppel und kurz darauf Weiskrantz beschrieben (Pöppel, Held & Frost, 1973; Weiskrantz, Warrington, Sanders & Marshall, 1974). Es bezeichnet die Fähigkeit zur korrekten Wahrnehmung von Reizen, die innerhalb des perimetrisch als blind ausgewiesenen Gesichtsfeldes dargeboten werden (Riddoch, 1917; Bender & Krieger, 1951; Pöppel et al., 1973; Weiskrantz et al., 1974; Perenin & Jeannerod, 1978; Zihl, 1980; Stoerig & Pöppel, 1986; Stoerig & Cowey, 1989, 1992; Fendrich, Wessinger & Gazzaniga, 1992, 1993; Wessinger et al., 1997). Da die Perimetrie den Gesichtsfeldbereich der bewußten Detektion bestimmt, handelt es sich – per Definition – um unbewußte Wahrnehmung. Die Tatsache der Wahrnehmung kann über ein geeignetes Verhaltensmaß, etwa Augenbewegungen, objektiviert werden. Stoerig und Pöppel (1986) haben mit Hilfe der Signalentdeckungstheorie einen zweifelsfreien Beleg der tatsächlichen Reizdetektion geliefert. Ein aktueller Diskussionspunkt ist die Frage, ob die gefundenen visuellen Leistungen durch Restfunktionen des primären visuellen Pfades (Genikulatum → V1/striärer Kortex) vermittelt werden, wie dies Fendrich und Wessinger annehmen (Fendrich et al., 1992; Fendrich et al., 1993; Wessinger et al., 1997), oder über alternative, subkortikale Wege (Pulvinar, Colliculus superior

etc.) oder geniculo-extrastriäre Projektionen – also unter Umgehung von V1 – wie von Stoerig favorisiert (Stoerig & Pöppel, 1986; Stoerig & Cowey, 1992). Stoerig und Cowey führen als zentralen Beleg ihrer Auffassung das Überleben farbsensitiver retinaler p-beta-Ganglienzellen nach Läsionen des striären Kortex an (Cowey, Stoerig & Perry, 1989). Fendrich et al.'s zentraler Beleg für die Beteiligung von V1 ist die Existenz der von ihnen beschriebenen Micro-Inseln verbleibender Funktion im blinden Gesichtsfeld, unter Hinweis auf die nur für V1 anzunehmende topografischen Spezifität der visuellen Funktion.

Patienten mit Gesichtsfelddefekten nehmen diese in der Regel nicht unmittelbar als solche wahr (etwa als graue Flecken) und Patienten sind oft überrascht, wenn ihnen ihr "objektives" perimetrisches Gesichtsfeld zur Kenntnis gebracht wird. (Dieses Nichterleben ist z.B. der entscheidende Grund für die oft verhängnisvolle Spätentdeckung eines Glaukoms, das, nicht mehr therapierbar, zur Blindheit führt). Das bekannte Phänomen wird von Safran und Landis mit dem Begriff des Filling-in in Zusammenhang gestellt (Safran & Landis, 1996). Als Filling-in bezeichnet man die Tatsache, daß in einem blinden Bereich, wie z.B. dem blinden Fleck, umgebende Reizstrukturen (etwa eine Linie) als im blinden Bereich fortgesetzt wahrgenommen werden, auch wenn sie dort physikalisch nicht vorhanden sind. Das Nicht-Wahrnehmen eines Skotoms kann man daher als Konsequenz von Filling-in auffassen. Lettvin (1976) beschreibt in einem lebhaften Bericht viele Filling-in-Phänomene im blinden Fleck, und auch das Ausbleiben der Ergänzung.

Mittels Rauschfeld-Kampimetrie (s. S. 30). können Gesichtsfelddefekte – und auch der blinde Fleck des normalen Sehens – einem Teil der Betroffenen sichtbar gemacht werden. Aufgrund welcher biologischer Mechanismen dies geschieht, ist nicht bekannt. Kolb et al. (1995) vermuten auf Grund des Vergleichs konventioneller und Rauschfeld-Kampimetrie und unterschiedlicher Schädigungsorte, daß für die Skotom-Wahrnehmbarkeit eine Funktionstüchtigkeit des primären visuellen Kortex (V1) gegeben sein muß. Auch von anderen Autoren wird V1 eine besondere Rolle bei der Bewußtheit zugeschrieben. Fahle zeigt dagegen, daß die große Mehrzahl der Patienten mit infarktbedingten Gesichtsfeldausfällen ihren Defekt wahrnehmen können, vorausgesetzt das Rauschfeld ist ausreichend groß (horizontal mindestens  $\pm 40^\circ$ ) (Bachmann & Fahle, 2000; Spang et al., 2001). Die Frage, welche Strukturen das bewußte visuelle Wahrnehmen vermitteln, ist Gegenstand angeregter gegenwärtiger Debatten.

### **Die Rolle niedrigen Reizkontrasts**

Während in der systemtheoretischen Tradition der Sehforschung – für die Wahrnehmbarkeit von Sinusgittern (d.h. Vermessen der Kontrastempfindlichkeitsfunktion) aber auch für die Wahrnehmung komplexer, an Bildverarbeitungssystemen bereitgestellter Muster (s. Caelli, 1986, zu einem Überblick) – der Gesamtbereich möglichen Reizkontrasts selbstverständlicher Bestandteil von Theorie und Experiment ist, wird bei der Erforschung von Muster- und Formwahrnehmung in weiten Teilen der kognitionspsychologischen (Boff, Kaufman & Thomas, 1986, Vol. II),

neurowissenschaftlichen (Farah, 2000) und klinischen (ophthalmologischen, neurologischen, neuropsychologischen) Forschung ebenso selbstverständlich maximaler Kontrast vorausgesetzt. Im klinischen Bereich gehörte die Aulhornsche Perimetrie zu den ganz wenigen Beispielen, in denen eine Erkennensleistung bei niedrigem Kontrast, für Optotypen-ähnliche Muster, vermessen wurde. Die von Aulhorn (1960) eingeführte Aufgabe besteht in der Unterscheidung eines Kreises von einer Raute (Aulhorn, 1960, 1964; Aulhorn & Harms, 1972; Johnson et al., 1978; Lie, 1980); sie ist im (nicht mehr gebauten) Tübinger Handperimeter enthalten; neuere Perimeter enthalten nichts Vergleichbares. Aulhorn wies zu recht darauf hin, daß die Angabe einer Leuchtdichteinkrementschwelle  $DL$  nur bei Kenntnis der Adaptationsleuchtdichte  $L$  Sinn macht, und daß der Weberbruch  $DL/L$  eine gewisse Unabhängigkeit von der Adaptationsleuchtdichte erbringen sollte. Gerade da dies so selbstverständlich erscheint, ist bemerkenswert, daß es in der nunmehr über 200-jährigen Geschichte der quantitativen Sehforschung so wenige Untersuchungen zur Erkennenskontrastschwelle bei einfachen Mustern gibt (Berry, 1889; G. Young 1918). Vielleicht ist es der simple technische Grund, daß Muster von definiertem, niedrigem Kontrast schwer herstellbar erscheinen (sie sind es nicht).

In neuerer Zeit belebt sich das Interesse an Buchstabenerkennensleistungen bei niedrigem Kontrast. Aus der Grundlagenforschung zu nennen sind die Arbeiten von Legge (1983, 1987), Flecks (1987) ausführliche Untersuchung, in der die Kontrastschwelle zur Erkennung von auf Standard-Computerterminals dargebotenen Buchstaben vermessen wird, sowie die Arbeiten von Alexander et al. (1993, 1994, 1997), Higgins et al. (1996), Solomon und Pelli (1994), Strasburger et al. (1991, 1994) und Strasburger und Rentschler (1996). Für die klinische Sehfunktionsprüfung sind seit einigen Jahren Niedrigkontrast-Testtafeln entwickelt worden, von Regan, von Pelli und Robson, und von Rabin (Regan & Neima, 1983a, 1983b; Regan, 1988a, 1988b; Pelli, Robson & Wilkins, 1988; Rabin, 1995; Rabin & Wicks, 1996). Über klinische Erprobungen dieser Tafeln berichten weiter Beck et al. (1993), Blommaert und Timmers (1987), Brown et al. (1987), und France und France (1988). Tests zur Buchstabenerkennung bei niedrigem Kontrast fanden damit Einsatz bei den Krankheitsbildern der Dyslexie, Amblyopie, Glaukom und erhöhtem Augeninnendruck, diabetischen und anderen Retinopathien, Katarakt, multipler Sklerose, Parkinson, und in der pädiatrischen Ophthalmologie (siehe Regan, 1988a, zu einem teilweisen Überblick zur klinischen Relevanz) sowie schließlich zum exzeptionellem Sehen (Rabin 1995).

### **Sensorische Aufmerksamkeit**

Bei peripherer Mustererkennung kann das Zentrum der Aufmerksamkeit ein anderes als das der Fixation sein. Bei der in dieser Arbeit verwendeten Versuchsanordnung ist dies wahrscheinlich der Fall, da die zu erkennenden Zeichen für eine Serie von Darbietungen an festem Gesichtsfeldort auftreten. Dieser Versuchsaspekt wird in den Experimenten zur Erkennbarkeit einzelner Zeichen nicht variiert, und da Auf-

merksamkeit nicht experimentell erfaßt wird, ist die Frage, was Aufmerksamkeit ist, ohne Belang: Es ist zunächst ein umgangssprachlicher Begriff, der mit der Instruktion an die Versuchsperson verknüpft ist. Im ersten Teil dieser Arbeit (Kap. 1 – 5) wird daher von Aufmerksamkeit nicht gesprochen. Wenn aber neben dem Zielzeichen andere Konturen vorhanden sind, zeigt sich, daß ohne ein wohldefiniertes Konstrukt der visuellen Aufmerksamkeit (visual attention) die Ergebnisse nicht verständlich sind. Es scheint sogar so, als ob diesem Konstrukt dabei die Hauptrolle zufällt. Zur Forschungsgeschichte des peripheren Sehens gehört demnach untrennbar die Forschungsgeschichte der visuellen Aufmerksamkeit.

Der Begriff der visuellen Aufmerksamkeit ist wohl so alt wie die Psychologie selbst. Johannes Müller (1825) führt aus, daß Augenbewegungen und Aufmerksamkeit von einander entkoppelt sein können (diesen Hinweis verdanke ich Erich Weichselgartner). Im Jahr 1866 finden wir bereits die heute aktuelle Vorstellung, daß die visuelle Aufmerksamkeit sich wie ein Scheinwerfer mit variablem Zentrum und Kegeldurchmesser verhalte. Von Helmholtz (1871) zeigt experimentell, daß Aufmerksamkeitsfokussierung und Fixation von einander unabhängig sind und erstere für die Erkennensleistung wichtiger ist. William James (1890), der die junge Wissenschaft der Psychologie maßgebend geprägt hat, kennt diese Ergebnisse, schenkt ihnen aber nicht recht Glauben und legt größeren Wert auf – wie wir heute wohl sagen würden – höhere Funktionen der Aufmerksamkeit. Es ist deshalb nützlich, von einem allgemeinen Begriff der Aufmerksamkeit (dessen Gegenteil Unaufmerksamkeit sein könnte) einen spezielleren Begriff der sensorischen und insbesondere der visuellen Aufmerksamkeit abzugrenzen. Den Psychologen Anfang des Jahrhunderts war die Rolle der visuellen Aufmerksamkeit wohl bewußt, und so schreibt z.B. Wagner (1918, S. 67):

„Auch beim gewöhnlichen Sehen ist das Gesichtsfeld beständig von einer Menge von Gegenständen angefüllt, die sich peripher auf der Netzhaut abbilden, die aber im Hintergrund des Bewußtseins bleiben, da sie nicht alle gleichzeitig von der Aufmerksamkeit erfaßt werden können. Wendet sich ihnen bei starrer Fixation des Auges die Aufmerksamkeit zu, so können sie in den Blickpunkt des Bewußtseins treten. Dasselbe ist auch bei Wörtern der Fall. Bei Fixation der Mitte einer Buchseite kann ein größerer Bezirk des Gesichtsfeldes zur Auffassung gelangen, wenn sich die Aufmerksamkeit den peripheren Gebieten zuwendet.“

Doch obgleich die entscheidenden Gedanken bereits von von Helmholtz klar formuliert worden sind, versuchte man nicht, oder vielleicht gelang es auch nicht, die Rolle der Aufmerksamkeit quantitativ zu sichern. So geriet das Konzept der Aufmerksamkeit während der folgenden behaviouristischen Ära, in der mentalistisch anmutende Konzepte verpönt waren und der Wert des Konstruktbegriffs noch nicht klar war, in Vergessenheit.

Dies ändert sich erst in neuerer Zeit mit den Arbeiten von Averbach und Coriell (1961) und Eriksen und Mitarbeitern (Eriksen & Collins, 1969; Eriksen & Rohrbaugh, 1970; Eriksen & Eriksen, 1974; Eriksen & Hoffmann, 1974). Averbach und Coriell verwenden zur Aufmerksamkeitssteuerung in einer Buchstabenkette einen

Kreis um den Zielbuchstaben und zeigen, daß sich damit dessen Wahrnehmbarkeit verbessern läßt. Da, wie Averbach und Coriell finden, dieser Kreis auch Konturinteraktion zur Folge hat, verwendet in der Folge Eriksen einen Hinweisreiz, der wie ein Zeiger auf den Zielreiz weist und damit von ihm örtlich getrennt ist. Eriksen und Collins (1979) zeigen eine Verbesserung der Wahrnehmungsleistung durch diesen Hinweisreiz (der, wie sie zeigen, die beste aufmerksamkeitssteuernde Wirkung bei etwa 150 ms Vorlaufzeit besetzt). Sie können damit erstmals den Einfluß der Aufmerksamkeit – dieses so flüchtig scheinenden Begriffs – zweifelsfrei experimentell belegen. Eriksen und Rohrbaugh (1970) wenden dabei erstmals ihr Interesse nicht nur auf die richtigen Beobachterantworten sondern auch auf die falschen und zeigen, daß durch eine Analyse dieser Antwortfehler der Einfluß der örtlichen Aufmerksamkeitsfokussierung auch quantitativ gesichert werden kann. (Solche Fehleranalysen werden von Townsend (1973) und Mewhort und Campbell (1978) weitergeführt.)

Posner und Mitarbeiter (Posner, Walker, Friedrich & Rafal 1984, 1987) haben ein ähnliches Paradigma mit Hinweisreiz bei hirngeschädigten Patienten (mit Parietallappenläsionen) eingesetzt, um die neuronale Basis der Aufmerksamkeitssteuerungsprozesse zu untersuchen. Posner unterscheidet dabei, zunächst hypothetisch, drei Teilprozesse: Einen Prozeß der Abkopplung oder Lösung der Aufmerksamkeit („disengagement“), einen der Aufmerksamkeitsverschiebung („shift“), und einen des Wiedereinkuppelns und Haltens („re-engagement“). Er nimmt dabei an, daß diesen unterscheidbaren Prozessen unterschiedliche Hirnregionen zugrunde liegen, der Loslösungsprozeß nämlich parietal (also kortikal) vermittelt sei, die Verschiebung durch den Culliculus superior vermittelt (Mittelhirn), und die Einkopplung durch das laterale Pulvinar des Thalamus (Zwischenhirn). Posner setzt damit experimentalpsychologische Methoden in den Neurowissenschaften ein und Posners Arbeiten können als zentrale Beiträge zur Begründung der modernen neurowissenschaftlichen Aufmerksamkeitsforschung gelten.

Mit Eriksens und Posners Arbeiten lebt also die alte Vorstellung wieder auf, daß visuelle Aufmerksamkeit, unabhängig von der Fixation, wie ein größenverstellbarer und schwenkbarer Scheinwerfer oder Lichtkegel über das Gesichtsfeld bewegt werden kann. Im Englischen spricht man vom attentional spotlight, und diese Metapher erfreut sich ausgesprochener Beliebtheit, auf Grund ihrer Anschaulichkeit und weil sich viele eindrucksvolle Belege ihrer Nützlichkeit finden. Jonides (1981) zeigt, daß der Lichtkegel von einem Reiz automatisch angezogen werden kann. Tsal (1983) nennt eine Bewegungsgeschwindigkeit des Kegels von  $1/8$  Schwinkelgrad/ms. LaBerge (1983) findet einen Durchmesser des zentralen Lichtkegels von  $0,3^\circ - 2^\circ$ . Eriksen und Yeh (1985) entwerfen ein „zoom lens model“ und belegen die Nichtteilbarkeit des Lichtkegels. Tsal und Lavie (1988) zeigen die Existenz eines Aufmerksamkeitskegels mit einer alternativen Technik zu Eriksens Fehleranalyse (die sie kritisieren). Stoffer (1988) untersucht die Lichtkegel-Metapher eingehend (Lichtkegel mit Gummilinde bzw. Zoom) – und kommt zu dem Schluß, daß die Vorstellung einer kontinuierlichen, und damit entfernungsabhängigen, Bewegungsprozesses (wie etwa bei Tsal, 1983) auf Schwierigkeiten stößt; er schlägt daher eine Modifikation vor, die den kontinuierlichen Schwenk (shift-Prozeß) eines einzelnen Scheinwerfers durch ein Überblenden mehrerer ersetzt. Man stelle sich also Scheinwerferlichtkegel

vor, die eine Halbkugel von innen beleuchten – ähnlich wie in einem Planetarium oder dem Perimeter –, mit kleineren Kegeldurchmessern im Zentrum als in der Peripherie, wobei die Scheinwerfer gruppenweise ein- und ausgeschaltet werden können.

Nakayama und Mackeben untersuchen die zeitlichen Eigenschaften der Aufmerksamkeitsprozesse näher. Nakayama und Mackeben (1989) zeigen, daß ein kurzzeitig dargebotener Hinweisreiz (transient cue) eine höhere Wirksamkeit als ein länger dauernder (sustained cue) besitzt, und daß der höchste Effekt des transienten Hinweisreizes bei einer Vorlaufzeit von 70–150 ms erzielt wird. Auch Eriksen und Collins (1969) hatten beste aufmerksamkeitssteuernde Wirkung bei ca. 150 ms nachgewiesen. Mackeben und Nakayama (1993) zeigen weiter, daß das Verschwinden des Fixationsmarkers den Aufmerksamkeitsloslösungsprozeß (disengagement) fördert und eine ungewöhnlich schnelle Verschiebung der Aufmerksamkeit erlaubt, die sie als „express shift“ bezeichnen. Das Gesichtsfeld zeigt dabei ausgeprägte Inhomogenitäten in der Fähigkeit zur Aufmerksamkeitszuwendung und diese Inhomogenitäten sind interindividuell sehr verschieden. Ursächlich für diese Inhomogenitäten ist dabei der Zuwendungsprozeß (deployment; Lösung plus Verschiebung), nicht der Halteprozeß (Mackeben, 1999).

Trotz der direkten Bezüge laufen Forschungen in der experimentellen Psychologie und „vision community“ über Jahre und Jahrzehnte merkwürdig unverbunden nebeneinander her. Aufmerksamkeit wird als höheren Prozessen (ist gleich „Psychologie“) zugehörig betrachtet, während laterale Interaktion oder Crowding als Folge elementarer Prozesse („Sehen“) gedeutet wird, auch wenn schon Flom et al. (1963) den kortikalen Ursprung des von ihnen beschriebenen lateralen Maskierungsphänomens nachgewiesen haben. Einen (daher lange Zeit isoliert dastehenden) Versuch der Zusammenführung der Traditionen unternahmen Wolford und Chambers (1983), die die Einflüsse von Aufmerksamkeit und „feature interaction“ quantitativ von einander trennen können. Strasburger et al. (1991) zeigen mit Hilfe des neuentwickelten Paradigmas der Erkennenskontrastschwelle, daß der Crowding-Effekt zu einem Teil durch ungenügende Ausmerksamkeitsfokussierung verursacht ist. He, Cavanagh und Intrilligator (1996) kommen zu dem gleichen Schluß und schreiben „we believe that this crowding effect reflects the limited resolution of the spatial attention mechanism.“ Van der Heijden (1992) gibt erstmals im Rahmen der experimentalpsychologischen Aufmerksamkeitsforschung (also außerhalb der „vision community“) einen Überblick über wesentliche Teile der Literatur zur lateralen Maskierung.

Moderne Theorien der visuellen Aufmerksamkeit nehmen zunehmend neurowissenschaftliche Konzepte und Ergebnisse auf und werden von ihnen untrennbar. Ohlshausen et al. (1992) etwa stellen ein neurobiologisch begründetes computationales Modell des Zusammenspiels von Mustererkennung und Aufmerksamkeit vor. LaBerge und Brown (1989) und LaBerge (1995, insbesondere Fig. 41.2 und 41.5) bieten ein besonders interessantes neuroanatomisch fundiertes Aufmerksamkeitsmodell. Eine zentrale Rolle spielt dabei das Pulvinar. Dabei wird Bezug genommen auf die inzwischen gängige neuroanatomische Unterscheidung eines ventralen und dorsalen Pfades der kortikalen visuellen Informationsverarbeitung (*ventral*: V1, V2, V3, V4, Inferotemporkortex IT, ventrolateraler Präfrontalkortex VLPFC; *dorsal*: V1, posteriorer Parietalkortex PPC, dorsolateraler Präfrontalkortex DLPFC), denen man,

Ungerleider und Mishkin (1982) folgend, eine Aufgabenteilung in eine Verarbeitung des Ortes („Wo?“) und der Form („Was?“) zuschreibt (Ungerleider & Mishkin, 1982; Mishkin, Ungerleider & Macko, 1983). Im Parietallappen gilt dabei ein Teilbereich namens LIP als wahrscheinlicher Ort der Ortskodierung; dort wird möglicherweise auch akustische Ortsinformation verarbeitet. Diese kortikalen Areale kommunizieren mit subkortikalen Strukturen und in diesem Zusammenhang insbesondere mit dem lateralen Pulvinar, einer dorsal im Thalamus gelegenen relativ großen Teilstruktur desselben. (Der anatomische Atlas von Nieuwenhuis und van Huijzen, 1988, in elektronischer Version das Programm interBRAIN von M. Hirsch, ist besonders schön und übersichtlich; dort sind die Strukturen gut auffindbar.) Das laterale und inferiore Pulvinar (PL, PI) ist retinotop organisiert, mit rezeptiven Feldern deren Größe mit zunehmender Exzentrizität zunimmt, und gilt deshalb als wahrscheinlicher Ort für eine ortskodierte Landkarte („map“). Auf dem Weg zwischen Parietallappen und Pulvinar passiert die neuronale Information den Nucleus reticularis, eine Struktur, die wie ein muschelförmiger Schild den dorsalen Thalamus medial umschließt. Dies ist ein möglicher Ort, in dem, ortsselektiv, Erregung gehemmt werden kann und damit ein lateral inhibierender Filtermechanismus repräsentiert sein könnte (Skinner & Yingling, 1977). Crick (1984) vermutet daher, der Nucleus reticularis könne der Implementierung des Aufmerksamkeitsscheinwerfers dienen. Das laterale Pulvinar, in Wechselwirkung mit dem Parietallappen, könnte demgegenüber den neuronalen Ort darstellen, an dem ortsspezifische *erregende* Effekte im Zentrum des Aufmerksamkeitsscheinwerfers realisiert sind. Selektion kann dabei, einer Einteilung von LaBerge folgend, durch selektive Leistungsverbesserung arbeiten oder durch Hemmung ablenkender Information. Die Rolle des Pulvinars könnte aber auch darin liegen, die ortsbezogene Vermittlung zwischen Wahrnehmung und (z.B. motorischer) Handlung bereitzustellen (Ward, persönliche Mitteilung). Dies würde zu einem neueren Konzept passen, in der die Rollenverteilung des ventralen versus dorsalen Pfades nicht in einer „Was?/Wo?“- sondern in einer „Was?/Wie?“-Dichotomie gesehen wird („where?/how?“, Goodale & Milner, 1992; Milner & Goodale, 1996; zur Kritik s. Ungerleider & Haxby, 1994). Dem dorsalen Pfad kommt in dieser Sicht weniger die (recht spezifische) Aufgabe der Ortskodierung sondern die der Vermittlung von Wahrnehmung zur Handlung zu.

Im Rahmen der sich machtvoll entwickelnden Kognitionswissenschaft kommt dem Phänomen der Aufmerksamkeit heute eine zentrale Rolle zu (Posner & Marin, 1985; Desimone & Duncan 1995; Arbib, 1995; Anderson, 1996; Haberlandt, 1997; Gazzaniga, 1995, 1999). Eine MedLine-Recherche zum Stichwort „visual attention“ erbringt für ein einziges Jahr (1999) über hundert Treffer. Die Trennung zwischen experimenteller Psychologie, den Neurowissenschaften und den modellierenden Disziplinen (computational sciences, Biokybernetik) verwischt sich dabei in vieler Hinsicht. In ihrem Rahmen wird es gelingen, die Trennung zwischen einer „kognitiven“ Aufmerksamkeit und sensorischen Prozessen aufzuheben, wie es dem Begriff der sensorischen Aufmerksamkeit angemessen ist.

## Laterale Maskierung, Crowding, Amblyopie, Lesen

Einen historischen Rückblick über die Bereiche „laterale Maskierung oder Crowding“ bietet Kapitel 6.1. Dort findet sich auch ein kurzer Rückblick zu den Themen Amblyopie, Legasthenie sowie Lesen.

## Moderne Psychophysik

Die moderne visuelle Psychophysik ist von dem Bestreben gekennzeichnet, psychologisch und physiologisch begründete rechnergestützte (sogenannte „computational“) Modelle des Sehens zu erstellen und steht damit in der Tradition der Systemtheorie und Kybernetik (s. Shapley et al., 1990). Sie nähert sich damit wieder Fechners ursprünglichem Ziel, quantifizierbare Entsprechungen zwischen physikalischer Umwelt und psychischem Erleben zu finden, und sie löst sich von der Methode, zu diesem Zweck vorwiegend oder ausschließlich Skalen zu entwickeln; Letzteres hat sich in der Psychometrie zu einem eigenständigen Bereich entwickelt. Vorausschickend sei gesagt, daß es Modelle der Formerkennung, die beide genannten Bedingungen – physiologische und psychologische Begründung – im strengen Sinne erfüllen, nicht gibt. Da zudem außerhalb der Psychophysik zunehmend der Eindruck entsteht, daß ein Fundament, etwa durch Betrachtung von „Ortsfrequenzen“, geschaffen sei, besteht ein wichtiger Teil des Fortschritts darin, die grundlegenden Schwierigkeiten aufzuzeigen. Die Kritik richtet sich gegenwärtig auf die sogenannten „Ortsfrequenz“- oder „Kanal“-Modelle (s. Braddick et al., 1978; Olzak & Thomas, 1986); die Schwierigkeit liegt darin, daß mit solchen Modellen der Eindruck erweckt wird, der essentielle Bestandteil sei die Fourieranalyse oder Gabor-Filterung. Das Mißverhältnis kommt dadurch zustande, daß in solchen Modellen, wie etwa dem bekannten Modell von Wilson und Bergen (1979), gar nicht Formerkennensleistungen modelliert werden, sondern nur, meist einfache, Entdeckungsleistungen. Bei Entdeckungsleistungen spielt aber die gerade bei der Formerkennung wesentliche Frage, welche Nichtlinearitäten *nach* der Vorverarbeitungsstufe im Modell vorgesehen sind, eine untergeordnete Rolle (Zetzsche & Barth, 1990). Michael Morgan bezeichnet solche Modelle, in denen die nach der Vorverarbeitung folgende Entscheidungsstufe im wesentlichen aus einem nichtlinearen Summierer plus nachfolgendem Schwellenglied besteht, als „primal soup models“. Eine weitere Einschränkung betrifft die Tatsache, daß die Modelle häufig im Ortsraum nur eindimensional spezifiziert sind, bei der Formerkennung aber gerade zweidimensionale Charakteristika, wie Kantenkrümmung, wichtig sind (Zetzsche et al., 1993). Dieser Punkt betrifft etwa das Mirage-Modell von Watt und Morgan (1985), das sich von anderen durch die ausdrückliche Einführung von Nichtlinearitäten abhebt. Porat und Zeevi (1988) präzisieren den Aspekt der Vorverarbeitung durch Gabor-Filterung, doch betrifft auch dies zunächst nur die interne Repräsentation, d.h. es werden keine Verhaltensleistungen modelliert. Schließlich lassen die Nachweise der Adaptivität in der Filterung (Caelli et al., 1987;

Rentschler et al., 1990) die Annahme fixer Filterparameter und damit den Sinn einer allgemeingültigen quantitativen Bestimmung derselben überhaupt fragwürdig erscheinen (s. auch Hauske et al., 1976).

Im Bereich der Texturwahrnehmung werden die für Erkennensleistungen spezifischeren Fragen – Bildsegmentierung, Klassifikation – stärker verfolgt (Caelli et al., 1978; Caelli, 1985; Malik & Perona, 1990). Caelli (1985) und Malik und Perona (1990) stellen vollständige Modelle zur Texturunterscheidung vor; darauf soll hier aber nicht näher eingegangen werden.

Der Bereich des Konnektionismus präsentiert sich mit einer immensen Fülle von Modellen, die auf den ersten Blick vorgeben, neuronale Netze zur Hervorbringung spezifisch menschlicher – also psychologischer – Leistungen zu modellieren. Doch ist dies natürlich so ernst nicht gemeint, denn das Ziel ist in der Regel ein anderes, nämlich die technische *Realisation* von Leistungen, d.h. es wird weder eine neurophysiologische noch eine psychologische Fundierung bezweckt. Die physiologische Seite betrifft praktisch immer Einzelzellniveau, mit dem für reale Zellen oft untypischen gewichtet-linearen Summieren, oft dazu noch mit binärem (statt z.B. frequenzanalogem) Antwortverhalten. Physiologische Struktureigenschaften (etwa Parvo- vs. Magnosystemeigenschaften) werden nicht berücksichtigt. Das Lernverhalten wird in der Regel aus eher praktischen Gründen mit „back propagation“ modelliert, obgleich die dabei essentielle Modellbedingung, daß Rückprojektionen nicht nur für Gruppen von Vorwärtsprojektionen sondern für jede einzelne Vorwärtsprojektion existieren, keinerlei physiologische Entsprechung findet (vgl. auch Mumford, 1991). Besser sieht es auf der Seite der psychologischen Anbindung aus, nicht zuletzt, da ein entscheidender Impuls zur Entwicklung konnektionistischer Netze von kognitionspsychologischer Seite ausging (Rumelhart & McClelland, 1986). Doch stehen hier oft höhere kognitive Leistungen im Vordergrund des Interesses. In dem bekannten Modell von McClelland und Rumelhart (1981) wird recht selbstverständlich (vielleicht auf Grund der Anschaulichkeit) vorausgesetzt, daß die zur Buchstabenerkennung notwendigen „features“ im wesentlichen die Kantenstrecken, d.h. spezielle standardisierte Bildsegmente, sind. Eine Bildsegmentierung – genau im richtigen Maßstab – und die anschließende Klassifikation der Bildsegmente haben implizit also schon stattgefunden. Ob die „features“ aber auf einer solchen rein ortsbezogenen Ebene gebildet werden, ist durchaus fragwürdig. Oder es werden allgemein formulierte, nicht quantifizierte Konzepte, wie Rotationsinvarianz oder Fehlertoleranz, nachgebildet, ohne daß geprüft wird, ob diese Leistungen tatsächlich in der behaupteten Form existieren. Die experimentalpsychologische Anbindung geschieht also nur scheinbar. Dazwischen gibt es aber auch Arbeiten, in denen nicht die Realisation sondern die Nachbildung das Ziel ist. Zur Frage der Formerkennung sind die Arbeiten von Grossberg und Mitarbeitern zu nennen (eine Übersicht bieten Grossberg und Todorovic, 1988). In diesen Modellen werden z.B. Webers Gesetz, Orientierungfilter-Vorverarbeitung, Konturerkennung, Bildsegmentierung und „feature“-Ergänzung berücksichtigt.

Nachdem in allen Bereichen der Modellbildung elementare Fragen zum fovealen Sehen offen sind, verwundert es nicht, daß der Modellierung des peripheren Sehens selbst wenig Aufmerksamkeit geschenkt wird. Sie beschränkt sich zumeist auf den

Aspekt des Abbildungsmaßstabs (King-Smith, 1978; Wilson & Bergen, 1979; Watson, 1983; Watt & Morgan, 1985; Porat & Zeevi 1988), was leider auch für das elegant formalisierte Modell von Mallot (1990) gilt.

Die Arbeitsgruppe um Rentschler hat in den vergangenen Jahren an einer Reihe von Beispielen die Besonderheiten des peripheren Sehens aufgezeigt (Hilz et al., 1981; Parth & Rentschler, 1984; Rentschler & Treutwein, 1985; Hübner et al., 1985; Harvey et al. 1985; Jüttner, 1996). Rentschler und Treutwein (1985) zeigen, daß dabei die Wahrnehmung örtlicher Relationen beeinträchtigt ist. Sie verwenden Testreize, die aus einem Sinusgitter plus dritter Harmonischer bestehen, wobei bei einem zu unterscheidenden Paar die örtliche Phasenlage der dritten Harmonischen von einem Mittelwert nach rechts und links verschoben sind. Es ergab sich, daß zwei zueinander spiegelbildliche Gitter peripher ununterscheidbar sind, während aus den gleichen Komponenten konstruierte Gitter, die nicht zueinander spiegelbildlich sind, unterscheidbar sind. Einen weiteren Nachweis peripher herabgesetzter Wahrnehmung örtlicher Relationen bietet Saarinen (1987); er verwendet als Reize Muster, die in unterschiedlicher Weise aus fünf Linienabschnitten zusammengesetzt sind. Hübner et al. (1985) zeigen, daß, trotz geeigneter Vergrößerung peripher dargebotene Bilder menschlicher Gesichter besonders dann schlechter erkannt werden, wenn die unterlegten Störreize (Rauschen) *örtliche Bezüge* zur Bildinformation besaßen. Auch dieser Befund läßt sich, wie die davor genannten, dahingehend interpretieren, daß das periphere Sehen insbesondere in der Verarbeitung örtlicher Relationen unterlegen ist.