

DISCUSSION

GEDANKEN EINES NICHT-STRABOLOGEN ZUR
PATHOPHYSIOLOGIE DES OPTISCHEN RAUMSINNES

VON

H. GOLDMANN

Der hier beschriebene theoretische Rahmen hat es mir ermöglicht, durch das den Laien überwältigende Labyrinth der Strabologie einen Weg zu finden und hat mir vor allem einen Maßstab für die Beurteilung methodischer Prozeduren an die Hand gegeben.

Im ersten Teil wird synthetisch stufenweise und vereinfacht das sensomotorische System des Sehorgans angenähert. Dadurch kommt man zu klaren Begriffen der Fixation (monocular), der Sehrichtungsgemeinschaft (bi-monocular) und des stereoskopischen Sehens (binocular).

Im 2. Teil wird in sehr fragmentarischer Weise das Schielen behandelt, als Reductionssystem eines auf binoculares (stereoskopisches) Sehen angelegten sensomotorischen Apparates.

1) Um mir klar zu machen, was die Begriffe des visuellen Raumsinnes bedeuten, die im Zusammenhang mit dem Schielproblem gebraucht werden und wichtig sind, möchte ich folgende Überlegungen vorlegen.

Nehmen wir meinen Arm als Sinnesorgan des Tastsinns, den Zeigefinger als seine Hauptrichtung, dann geben die anderen Finger relativ zum Zeigefinger 'relative Lokalisationen' an; Beweglichkeit der Finger ändert daran nichts (man könnte sie sich auch steif denken). Wird der Arm intentionell auf einen *gehörten* Gegenstand rechts vom Zeigefinger hingewendet, so bleibt der absolute Tastraum (die 'egozentrische Lokalisation') unverändert. Gegenüber der relativen ist aber eine Lageänderung erfolgt. Die Raumwertsveränderung wird auf zweierlei Weise zustande gebracht, einer zentralen, die zugleich mit der Intention erfolgt (aber höchstens an 'Phantomarmen' Amputierter bewußt wird (Mechanismus I) (v. Holsts 'Efferenzkopie') und einem peripheren Rückmeldungs- und Rückkoppelungsmechanismus des Muskelsinns, das uns orientiert, ob die Stellung des Armes mit dem Intentionenbild übereinstimmt (Mechanismus II) (eine 'Reafferenz'). Der genaueste Rückmeldungs- (Feedback-) Mechanismus geht aber von einem höheren Sinnesorgan selbst aus. Um im Gebiet desselben Sinnesorgans zu bleiben: im Dunklen berühre der kleine Finger meiner rechten ausgestreckten gespreizten Hand eine Spitze. Um sie genauer betasten zu können, will ich sie in die Hauptrichtung (Zeigefinger) bringen. Ich bringe,

ohne sukzessive Berührung durch die nächsten Finger, den Zeigefinger in die richtige Richtung und korrigiere fein durch Einstellung der Fingerkuppe, also durch Rückmeldung nach (Mechanismus III). Das hier Geschilderte ist genau dasselbe, was am Auge beim Fixieren eines im peripheren Gesichtsfeld liegenden Objektes geschieht, dem ich meine Aufmerksamkeit zuwende. Nur sind die Akzente der Feedbackmechanismen verschoben: die mit der Intention direkt verknüpfte Korrektur zur Konstanthaltung der egozentrischen Lokalisation (Mechanismus I) ist hier überwältigend, das Feedbacksystem des Muskelsinns (Mechanismus II) nur wenig hervortretend, hingegen die direkte letzte Korrektur der Bewegung durch den Sinneseindruck selbst (Mechanismus III) klar: der Bewegungsimpuls hört erst auf, wenn das Objektbild in den Fixierpunkt gelangt. Das ist die Definition von 'Fixation': bei Einstellung des Bildes auf den fixierenden Ort der Retina ('Hauptsehrichtung') hört jeder Impuls III zur Änderung der Augenstellung auf. Man beachte, daß in dieser Definition „Sehschärfe“ nicht vorkommt. Hier wird nur der stabilisierte Zustand beschrieben, nicht der Entstehungsprozeß, der die Auswahl der Stelle der Retina determiniert, an der der Mechanismus III zur Ruhe kommt, also der Fixationsort. Man sei sich auch darüber im Klaren, daß jeder Feedbackmechanismus einen Einstellungsfehler hat, sodaß der Bewegungsimpuls niemals an einem geometrischen Punkt aufhört, sondern in einem kleineren oder größeren Areal. Ist das Areal groß, so streut die Einstellung eben erheblich ('excentric viewing' = 'exzentrische Einstellung' enthält noch den motorischen Impuls, 'excentric fixation' = 'exzentrische Fixation' hingegen nicht mehr). Wird in meinem Beispiel von der Hand statt des Zeigefingers der Mittelfinger zum 'Haupttastfinger' gewählt, so ändert sich weder die relative Beziehung der Objekte im Raum zueinander, noch zu meiner Person, nur der Nullpunkt des Koordinatensystems der relativen Lokalisation.

Bevor wir zu paarigen Sinnesorganen übergehen, müssen wir uns über einen Punkt klar sein. Zwei Sinnesorgane – auch solche ganz verschiedener Sinnesqualitäten – mit Empfindungen, die Raumwerte haben, also z.B. Tastorgane und Auge, müssen Richtungsgemeinsamkeit haben, wenn sie normal funktionieren. Wird von einem Paar gleichartiger Sinnesorgane jeder Partner unabhängig vom andern bewegt, so bedarf es für jeden von beiden eines Korrekturmechanismus der 1. Art (Efferenzkopie) zur Aufrechterhaltung der egozentrischen Lokalisation. Sind die Bewegungen beider Sinnesorgane gekoppelt, so ist das nicht mehr notwendig. Auf die Augen übergehend, heißt das: unabhängig von der gegenseitigen Stellung der Augen wird die absolute Loka-

lisation eines solchen 'bimonokularen' Systems funktionieren. Es besteht Richtungsgemeinschaft. Die Stellung der Augen zueinander wird sich kaum ändern. Wenn die Sehschärfeverteilung in jedem Auge inhomogen ist, wird notwendigerweise jeweils ein Auge führen (Fixation siehe oben) und da Differenz in relativer Lokalisation gleich Sehschärfe ist, wird die Stellung des 2. Auges nicht die hohe Genauigkeit der Einstellung des 'führenden' Auges verlangen. Gekoppelte Bewegung beider Augen führt aber zu vermehrter Information, die ausgenutzt werden kann und die nicht gekoppelten Sinnesorganen fehlt: es kommt zum binokularen, stereoskopischen Sehen, das höchste Ausnützung der Information beidäugigen Sehens bedeutet. Das setzt aber eine weitere Verknüpfung beider Sehorgane voraus, nicht nur motorisch, nicht nur im Sinne der gemeinsamen Vorgabe des Raumwertwandels des Mechanismus I, von dem wir schon sprachen, sondern im Sinne einer Integration der beidäugigen Signale zu einer Einheit höherer Ordnung. Es ist dann ökonomisch, daß cerebral die einander entsprechenden Bezirke beider Augen ganz nahe beieinanderliegen und wenn Stellen gleicher Sehrichtung [und gleicher Sehschärfe (also auch der besten)] einander anatomisch zugeordnet werden. Die Zuordnung muß genügende Starre anstreben, um feinste Bilddifferenzen zu integrieren. Ein neuer Feedbackmechanismus muß für die gegenseitige motorische Einstellung sorgen: Fusionsmechanismus mit Fusionsbewegung (Mechanismus IV). Echtes Binokularsehen ist also stereoskopisches Sehen mit Fusionsbewegungen. Eine solche höchste Ausnützung der Information setzt ein praestabilisiertes System voraus mit sensorischer wechselweiser Zuordnung ('Korrespondenz', ein Ausdruck, der erst hier einen Sinn bekommt, will man ihn nicht für jede Richtungsgemeinschaft beliebiger Sinnesorgane gebrauchen) und motorischem 'Feedback': Fusionsbewegung.

Wir haben bisher das mono- und binokulare Sehen als Feedbacksystem betrachtet. Wie ein Großteil solcher Systeme, dienen sie der Information. Betrachten wir das binokulare, also stereoskopische Sehen als Informationssystem. Nach der Informationstheorie ist jedes Informationssystem ein Wahrscheinlichkeitssystem, wobei der Informationsgehalt nie absolut (= unendlich) sein kann. Selbst bei Fixation bestehen unkoordinierte Augenbewegungen, die im Winkelmaß die Feinheit des stereoskopischen Sehens überschreiten. Zeitlich überstreicht also das Bild eines gesehenen Objektes geometrisch (ich sage geometrisch) nicht korrespondierende Punkte. Dementsprechend kann auch keine Punkt-für-Punktkorrespondenz beider Sehorgane bestehen, sondern nur eine statistische. Je geringer die Sehschärfe, je größer die Bewegungen im

Zustand der Fixation, umso größer das 'Rauschen' des Systems. Durch Bestimmung des Rauschpegels gewinnt man einen charakteristischen Parameter des Systems: also z.B. durch Feststellung, wie groß der mittlere Fehler der Horoptereinstellung bei verschiedener Bildschärfe ist.

Hier eine Bemerkung über das 'Panum'sche Areal': es besteht aus 2 Teilen: 1.) die binokulare Distinktionsschwelle, d.h. die Grenze des nicht analysierbaren Parallaxenunterschiedes, also des parallaktischen Rauschens und 2.) des Bereiches, der zum Tiefensehen *ohne* Doppeltsehen integriert wird. Nur wenn *beide* Bereiche existieren, darf ohne Mißverständnis sinnvoll von einem Panum-Areal gesprochen werden. Nur bei Bestehen eines solchen Panum-Areals (verknüpft mit Fusionsbewegungen) darf von Binokularsehen gesprochen werden.

Hier ist eine Bemerkung einzuschalten, die wichtig erscheint. Theoretisch wäre als Ideal völlig stetige Fixation zu betrachten. Sie sollte das Höchstmaß von Information liefern. Stabilisiert man aber ein Bild auf die Netzhaut, so verschwindet es durch Lokaladaptation. Es ist also ein Optimum zu erstreben zwischen möglicher Stabilisierung des Bildes und möglicher Verhinderung der Lokaladaptation, eine 'Optimierung', bei der eben noch ein Minimum von Bewegungen notwendig ist. Wahrscheinlich sind alle stationären Zustände des sensomotorischen und binokularen Apparates solche Optimumzustände und das Erstrebenswerte, die Versuchsanordnungen zu finden, welche diese Zustände zu charakterisieren gestatten. Aus dem bisher Gesagten folgt als Wichtigstes: es gibt Richtungsgemeinschaft ohne Korrespondenz, aber keine echte Korrespondenz ohne Richtungsgemeinschaft.

2) *Abbau der Funktion*

Geht die binokulare Information im 'Rauschen' des Systems unter, so geht das System in ein 'bimonokulares' über, das gegenüber einem binokularen an Informationskapazität verloren hat, gegenüber einem monokularen das Informationsmehr sich räumlich oder zeitlich nicht überschneidender Raumanteile liefert [also binokular: $aR + bL + M.R.L$; bimonokular: $a'R + b'R$; monokular R oder L. Voraussetzung ist, daß jede monokulare Blickbewegung die egozentrische Lokalisation nicht ändert (Lähmungsschielen!).]

Ein solches Reduktionssystem wird – wenn es wirklich ein Reduktionssystem ist, also nicht für das Informationsniveau angelegt ist, auf das es herabsinkt, sondern für ein höheres – noch Reste des Vollsystems enthalten (die sich aus dem Bau des Systems ableiten); sie werden dann zutage treten, wenn das

System verzerrte Informationen empfängt: wird es also unter Bedingungen untersucht, die nicht normale Informationen liefern, so werden paradoxe, nicht zusammenpassende Erscheinungen resultieren (dissoziierende Teste): dysharmonische anomale Korrespondenz, bzw. scheinbar normale Korrespondenz nur bei Verwendung von Bedingungen, die dem natürlichen Sehen fernstehen (*Worth* → Synoptophor → Heringsches Nachbild im Dunkeln).

Es ist aus methodischen Gründen gerade hier wichtig, noch einen Begriff der Informationstheorie zu erörtern und auf unsere Probleme anzuwenden, den Begriff der Redundanz. Man versteht darunter kurz gesagt 'Weitschweifigkeit' oder 'Überdetermination': wenn also mehr als unbedingt notwendige Information geliefert wird. Redundanz macht ein Informationssystem unempfindlicher gegen Verzerrung der Information, entweder indem es einfach anzeigt, daß etwas nicht in Ordnung ist, oder indem es trotz fehlerhafter Kommunikation schließlich doch zur richtigen Information führt: z.B. wird der Satz 'Die erste Linse ist konvex, die 2. ko . . .' trotz Unvollständigkeit verstanden; niemand wird 'konkret' lesen. Aber irgendwann wird eine verzerrte Information unverständlich, besonders rasch bei geringer Redundanz: So werden z.B. Namen schon bei geringster Verzerrung nicht mehr verstanden, wenn sie allein auftreten (fremdsprachige Sätze werden schlechter verstanden als solche der Muttersprache). Unser normales Binokularsehen hat eine große Redundanz, die sich aus der Integration *aller* natürlichen momentanen und vorhergehenden Umstände ableitet. Je abnormer wir aber die Verhältnisse machen, umso kleiner wird die Redundanz. Wird schließlich jedem Auge ein differentes, physiologischerweise nicht vorkommendes Bild ohne detaillierte Umgebung dargeboten, dann hört die eindeutige Information auf; es werden stochastisch abwechselnd die zur Information passenden *möglichen* Informationen geboten! 'Wettstreit'. Es genügt aber eine zusätzliche, irgendwie geartete Information, z.B. daß zeitlich *erst* das eine Signal und dann das andere erfolgte, um die stochastische Angabe von Antworten irgendwie geordnet werden zu lassen. Aber – und das ist wichtig – diese Antworten, ob stochastisch oder geordnet, sagen über das normale Funktionieren des Informationsapparates nichts aus, wenn sie auch über den Apparat selbst etwas aussagen. Um das Ende des letzten Satzes klarer zu machen: das Wort 'Wettstreit', wie ich es hier gebrauche, bedeutet einfach Wechsel der Antworten entsprechend der mehrdeutigen Information; wie dieser Wettstreit aussieht, hängt vom System ab; oder wenn ein 'Löschphänomen' oder ein Metakontrast infolge zeitlicher Asymmetrie auftritt, so ist es Eigenschaft des Systems, *welcher* Reiz gelöscht wird. Daher glaube ich, daß

die von H. HAMBURGER und Frau AULHORN beschriebenen außerordentlich interessanten Phänomene zur Deutung von Vorgängen beim physiologischen Binokularsehen nur mit Vorsicht herangezogen werden dürfen; vor allem würde mich interessieren, wie sich in den Versuchen von Frau AULHORN 2 stereoskopische Einzelbilder (nicht 2 total verschiedene) verhalten, wenn sie in verschiedener zeitlicher Folge dargeboten werden. Wird dann auch das eine unterdrückt, oder sieht man räumlich (Integration)? Sieht man überhaupt in der Anordnung von Frau AULHORN stereoskopisch? Die Phänomene des Wettstreits und des Löschphänomens deuten aber auf Mechanismen, die gerade beim bimonokularen Sehen von grundlegender Bedeutung zu sein scheinen: wenn ein Auge führt, bewirken solche Phänomene eindeutige Information.

Die Frage nach der Ursache des konkomitierenden Schielens ist hier ganz ausgeklammert worden. Es ist leicht, darüber zu spekulieren, ob nicht zumindest *eine* Gruppe von konkomitierendem Schielen durch Fehler im Mechanismus IV, also des Mechanismus für echtes Binokularsehen, bedingt ist. In diesem Fall müßte es eine Gruppe ganz früh Schielergebener geben, die trotz sehr angenäherter Parallelstellung der Augen kein binokulares stereoskopisches Sehen in irgendeinem Ausmaß gewinnen. Bei denen hingegen, die es wiedergewinnen, muß man annehmen, daß irgendeine Ursache die Stellung beider Augen zueinander aus dem 'Gravitationsfeld' des Systems IV herausgeführt hat und Zurückbringen in dieses Feld es wieder einspielt. Unter 'Gravitationsfeld' des Systems IV verstehe ich jene quantitative Gesetzmäßigkeit, nach der der 'Fusionszwang' in Abhängigkeit vom Abstand der Retinabilder von der Korrespondenzlage (= Null-Lage des Fusionsmechanismus) verläuft. Trotz unserer rudimentären Kenntnisse darüber können wir eines aussagen: dieses Gravitationsfeld hat eine andere Gesetzmäßigkeit ('Struktur') als der Fixationsmechanismus, das System III. Damit stellt sich sofort ein weiteres Problem: sind notwendigerweise immer bei stereoskopischem Sehen die beiden Foveae miteinander verknüpft? Besteht ein gesetzmäßiger Zusammenhang zwischen System III, dem monokularen Fixationsmechanismus und System IV, dem binokularen Fusionsmechanismus? Wir wissen darüber zu wenig. Wenn aber beide, wie das informationstheoretisch zu erwarten ist, statistischen Gesetzmäßigkeiten gehorchen und wenn diese voneinander unabhängig sind, dann folgt etwas sehr Merkwürdiges, jedoch Prüfbares daraus: es muß eine Statistik stereoskopisch sehender Doppelaugen geben, die vom Fehlen jeder Einstellbewegung beim Covertest bis zu kleinen, deutlichen Einstellbewegungen reicht, verknüpft mit verschiedenen gutem stereoskopischem Sehen; und dies müßte primär

existieren, also nicht nach Operationen oder als Restzustand nach einem Schielen, das sich sonst irgendwie zurückgebildet hat. (Dr. LANG scheint solche Fälle in größerer Zahl beobachtet zu haben).

Ist Schielen (*ein* bimonokularer Zustand) etabliert, so ist die Sehfunktion des nicht führenden Auges in einem Gleichgewichtszustand, analog einem thermodynamischen, charakterisiert durch funktionelle Skotome. Wandelt man den bimonokularen Zustand in einen monokularen um (durch Verdecken eines Auges), so strebt die Sehfunktion des früher schielenden Auges einem neuen Gleichgewicht zu (bei anatomisch normalen Augen wohl meist der 'monokularen Sehfunktion' mit fovealer Fixation). Es wird bei alternierendem Schielen sofort, bei monolateralem Schielen erst nach längerer Zeit, beschleunigt durch medizinische Maßnahmen (Pleoptik), erreicht. Der alte Gleichgewichtszustand mit Skotomen tritt aber wieder ein, wenn der Zustand bimonokularen Sehens nicht beseitigt wird und beide Augen zum Sehen benützt werden.

Schließlich sei noch darauf hingewiesen, daß alle 4 beschriebenen Mechanismen objektiven Untersuchungsmethoden zugänglich sind, ohne daß auf das subjektive Korrelat abgestellt werden müßte (gerade bei Kindern sehr wichtig). Mechanismus I kann bei sonst normalen Menschen mit dem Zeigeversuch (Übereinstimmung von opt. und hapt. egocentr. Lok.) geprüft werden, Mechanismus II ist nur, wie mir scheint, mit elektro-physikalischen Methoden zu prüfen, spielt aber eine relativ geringe Rolle. Mechanismus III ist okulographisch oder nystagmographisch zu prüfen. Mechanismus IV daran, ob Fusionsbewegungen für Ferne und Nähe existieren, eventuell bei Änderung der Akkommodation der Konvergenzwinkel gehalten wird.

Ganz allgemein sei noch darauf hingewiesen, daß bei Symptomen, bei denen die Methode der Untersuchung das System selbst grundlegend verändern kann, nur Methoden brauchbar sind, die unter physiologischen Bedingungen mit physiologischen Reizen arbeiten, alle anderen weisen nur auf Anpassungsmöglichkeiten des Systems hin und darauf, was man ihm mit 'Hebeln und mit Schrauben' abringen kann.

B. BAGOLINI:

I would like to ask Dr. BOEDER if the 'response shift' is, let us say, a geometrical interpretation of what happens subjectively in anomalous retinal correspondence or if it implies a cortical interpretation of the subjective findings. In this last case what is the cortical interpretation?

P. BOEDER TO B. BAGOLINI

The 'response shift' is a phenomenon which occurs in 'past pointing', and whenever reflex innervations to the extra-ocular muscles are frustrated. According to it, the incoming visual impulses do not give rise to the usual visual direction, but are 'shifted' in the visual cortex, to visual directions which differ from the normally elicited ones by an angle equal to the frustrated ocular rotation.

My hypothesis is that 'anomalous retinal correspondence' does not exist; but that a 'response shift' enables the squinter to attain single binocular vision. Since the 'substitute' visual directions elicited in the response shift are directions which are normally associated with different retinal units, these are in (normal) correspondence with their partners in the other eye; thus, retinal correspondence is not at all affected in strabismus; it remains inviolate. All characteristic deviations of the squinter's single binocular vision from the normal can be shown to be consequences of the response shift; as, incidentally, can also your recent findings in regard to the squinter's horopter.