

# Neue Forschungen zur physiologischen Optik und zur Psychologie des Sehens.

Von  
Walter Scheidt-Hamburg.

Im folgenden sollen die wichtigsten Ergebnisse theoretischer Untersuchungen dargestellt werden, welche sich aus neurologisch-psychologischen Studien<sup>1</sup> in bezug auf die Sehvorgänge ergeben haben. Da wesentliche Teile der hauptsächlich von *H. v. Helmholtz* geschaffenen Lehre von den Sehfunktionen mit neueren Forschungsergebnissen nicht mehr vereinbar sind, eine durchgreifende Revision der physiologischen Optik aber trotzdem noch nicht vorgenommen wurde; dürften die neuen Gesichtspunkte auch für den praktischen Ophthalmologen von Interesse sein. Die ausführliche Begründung der allgemeinen, für die gesamte Neurophysiologie gültigen Prinzipien findet sich in den angegebenen Werken. Sie lassen sich in der *Synallaxetheorie* zusammenfassen, welche etwa besagt: Das Nervensystem leitet nicht die Veränderung, welche durch eine Umweltwirkung an einem „Reiz“-Aufnahmeorgan gesetzt wird, einfach „weiter“, sondern es verbindet immer und überall mehrere solche Aufnahmeorgane leitend miteinander und dient dem „Ausgleich“ der Zustandsunterschiede zwischen getroffenen und nicht getroffenen Aufnahmeorganen. Die Vorgänge in diesen Aufnahmeorganen sind deshalb nicht als „Reize“, sondern als *Incidenzen* (Lichtincidenz, Schallincidenz usw.) aufzufassen. *Reiz* im Sinne der Synallaxetheorie (Zusammenleitungstheorie) ist vielmehr jener Ausgleichsvorgang (elektrischer Art), welcher stets über eine Ganglienzelle erfolgt. Aus Incidenzunterschieden entstehen also zunächst Reize ersten Grades (erster Zusammenleitungs- oder *Synallaxestufe*), aus der Synallaxe reizhaltiger und reizfreier peripherer Ganglienzellen entstehen (um eine Synallaxestufe weiter zentralwärts) Reize zweiten Grades usw.

Die *Mechanik des synallaktischen Reizaufbaues* wurde im Anschluß an die bedeutsamen Befunde von *Péterfi* aus der (erst funktionellen) Anlage der Neurofibrillen erklärt, für welche die Nerven im makroskopisch-anatomischen Sinn lediglich die Neuroplasmabahnen als morphologisch vorgebildete *Verbindungsmöglichkeiten* bedeuten. Aus den elektro-physiologischen Befunden konnte ein in alle Einzelheiten gehendes Modell der *Schaltungsmechanik für die Neurofibrillenanlage* abgeleitet werden.

<sup>1</sup> *Scheidt, W.*: Biologische Psychologie, Teil I. 1934. — Psychomechanik, H. 1. Hamburg. (Dieses Werk ist aus äußeren Gründen später nicht fortgeführt, sondern durch die beiden folgenden ersetzt worden. Es enthält jedoch eine ausführlichere Schilderung der niederen Sehfunktionen als jene.) — Grundlagen einer neurologischen Psychologie. Jena 1937. — Aufbau einer neurologischen Psychologie. Jena 1938.

### 1. Die Funktion der Retina.

Die wichtigste allgemeine Folgerung aus der Synallaxetheorie ist die *Beseitigung faseranatomischer Vorstellungen*. Wollte man bei der Erklärung der Sehfunktionen an dieser alten absolutistischen (weil auf die Beachtung jeweils nur *eines* Incidenzaufnahmeelementes abgestellten) Vorstellung festhalten, so müßte man die neueren histologischen Befunde durch die Annahme ergänzen, daß trotz der Verbindung jeder bipolaren Ganglienzelle mit *vielen* Stäbchen und Zapfen doch von jedem einzelnen Retinaelement eine und nur eine (morphologisch vorgebildete) Neurofibrille die bipolare Ganglienzelle, ebenso die große Ganglienzelle und eine Ganglienzelle des primären Opticuszentrums durchziehe, um schließlich (nach der Theorie von einer „corticalen Retina“) in einer bestimmten Rindenzelle zu endigen. Diese Vorstellung ist aus vielen (a. a. O. näher erläuterten) Gründen völlig unhaltbar. Sie läßt überdies nicht nur die Funktion der horizontalen und der amakrinen Ganglienzellen der Retina unerklärt, sondern macht (in ihrer Erweiterung auf die suprakaudischen — oberhalb des Hirnstammes liegenden — Teile des nervösen Sehapparates) auch jede Erklärung einer „Bearbeitung“ des „Rindensehbildes“ unmöglich.

Die Synallaxelehre, welche keiner faseranatomischen Hypothesen bedarf, hält sich an die Histologie der Retina. Jedes Paar von Netzhautelementen ist über mehr als eine bipolare Ganglienzelle leitend verbunden. Wird das eine Element durch Belichtung verändert, das andere nicht, so müssen also in zahlreichen bipolaren Ganglienzellen Reize entstehen. Aus der schleifen-, ösen- und knäueiförmigen Anordnung der Neurofibrillen in den Incidenzaufnahmeorganen sowohl wie in den Ganglienzellen ist zu schließen, daß die Stromkreise der Nervenregung im Prinzip von einem Retinaelement A über eine Ganglienzelle  $G_1$  zu einem anderen Retinaelement B und von diesem über eine zweite Ganglienzelle  $G_2$  zurück zum Retinaelement A angelegt sind. Die Stärke der Erregungen, welche man als Stromflüsse ansehen kann, muß von der Größe des Zustandsunterschiedes („Incidenzgefälles“) zwischen A und B abhängig sein. Eine auf sämtliche Sinnesorgane ausgedehnte Untersuchung hat gezeigt, daß es sich höchstwahrscheinlich überall um thermoelektrische Vorgänge handelt. Jedenfalls lassen sich mit diesem Modell die Funktionen *aller* Sinnesorgane einheitlich und widerspruchlos erklären.

Denkt man sich ein einziges Retinaelement belichtet, alle übrigen unbelichtet, so besteht also ein Incidenzgefälle zwischen diesem belichteten und allen übrigen Elementen und es müssen davon Reize in alle diejenigen Ganglienzellen zu liegen kommen, welche mit den belichteten und irgendwelchen von den unbelichteten Elementen leitend verbunden sind. *Die Lage der reizhaltigen bipolaren Ganglienzellen ist jedenfalls eine andere als die Lage des belichteten Netzhautelementes*. Das gilt natürlich auch für den wirklichen Fall einer Belichtung vieler Retinaelemente, wobei diejenigen Paare, welche gleichartig und gleich stark belichtet sind,

kein Incidenzgefälle aufweisen, also auch keinen Reiz verursachen können. Es kann also keine Rede davon sein, daß das Lichtbild auf der Retina in der Ganglienzellschicht der Retina irgendwie abklatschähnlich wiederholt wird. Wohl aber entspricht die örtliche Verteilung der reizhaltigen und der reizfreien Ganglienzellen einem und nur einem ganz bestimmten Lichtbild auf der Retina. Da Reize nicht Incidenzen gleichkommen, sondern in der ersten Synallaxestufe „Incidenzunterschiede“, in der zweiten Synallaxestufe (großen Ganglienzellen) „Differenzen zwischen Incidenzunterschieden“, in der dritten Synallaxestufe „Unterschiede von Differenzen zwischen Incidenzunterschieden“ darstellen usw. geht ein wesentlicher Teil der „Bearbeitung“ des Lichtbildes auf der Retina schon in den nervösen Retinaschichten vor sich. Die horizontalen und die amakrinen Ganglienzellen bewirken dabei eine Abhängigkeit jedes einzelnen Reizes nicht nur von den unmittelbar reizwirksamen Incidenzgefällen, sondern auch vom Zustand der weiteren Umgebung des Elementenpaares, dessen Incidenzgefälle den Reiz hervorbringt.

## 2. Die optische Abbildung in der Retina.

Die geschilderte Funktion der Retina würde es verständlich machen, daß eine nichtpunktuelle Abbildung im Auge keine physiologische Bedeutung zu haben braucht. Eine kritische Nachprüfung der geläufigen dioptrischen Lehren hat aber gezeigt, daß *die sphärische Aberration an der Hornhautvorderfläche eine sphärische Aberration des Lichtes durch das Gesamt der brechenden Medien zu verhindern imstande ist*, weil die Hornhautkrümmung größer ist als die Krümmung der Linsenvorderfläche bei Akkommodationsruhe. Die durch die Hornhautvorderfläche sphärisch aberrierenden Strahlen bilden wahrscheinlich mit ihren Loten auf die Linsenvorderfläche nur sehr kleine Winkel. Rückt das Sehobjekt näher heran, so nimmt dadurch die von der Hornhautvorderfläche verursachte sphärische Aberration, innerhalb des minimalen Fernpunktes aber auch die Linsenkrümmung zu, so daß die sphärische Aberration fortwährend ausgeschaltet werden kann, weil die stärker sphärisch abgelenkten Strahlen immer wieder nahe den Loten auf die Linsenvorderfläche zu liegen kommen.

An und für sich könnte also eine punktuelle Abbildung auf der Retinanoberfläche stattfinden. Nun kann aber von einer flächenhaften Anordnung der sog. Brennpunkte im Sinne der herrschenden dioptrischen Lehren nicht die Rede sein, 1. weil das in einem „Brennpunkt“ liegende Stoffteilchen bewegt zu denken ist und zu dieser Bewegung einen dreidimensionalen Raum<sup>1</sup> benötigt, 2. weil die Retina, deren Stäbchen- und Zapfenschicht eine Tiefenausdehnung von rund 100 Wellenlängen des orangefarbenen Lichtes hat, in dieser für Lichtdimensionen sehr beträchtlichen

<sup>1</sup> Diese „Brennräume“, außerdem die Bewegungsräume aus präfokalen und postfokalen Strahlenschnittpunkten sind a. a. O. (1934) ausführlich geschildert und berechnet. Aus den Berechnungen läßt sich die von einem Strahlenschnittpunkt ausgehende wellenlängenspezifische Energie des Lichtes ableiten.

Tiefe von zahlreichen (präfokalen, fokalen und postfokalen) Strahlenschnittpunkten durchsetzt ist, 3. endlich wegen der chromatischen Aberration des Lichtes, welche nur Brennpunkte eines homogenen Lichtes in eine Ebene fallen ließe. Es war also wichtig, vor allem die *Tiefengliederung der Strahlenschnittpunkte in der Retina* näher aufzuklären. Diese Aufgabe mußte gleichzeitig die gleichfalls wellenlängenspezifische pupillomotorische Wirkung des Lichtes berücksichtigen, weil von der Ablendung der Randstrahlen die Spitzenwinkel der intraokularen Lichtkegel abhängig sind. Im Anschluß an die experimentellen Untersuchungen besonders von *K. v. Hess* und *A. Kohlbrausch* konnte gezeigt werden, daß die Tiefengliederung der beleuchteten Räume (= Bewegungsräume um präfokale, fokale und postfokale Strahlenschnittpunkte) in der Incidenzschicht der Retina in gesetzmäßiger und exakt berechenbarer Weise von der Blendenweite, der Lichtdichte (Beleuchtungsichte) und der Wellenlänge abhängig ist. Dabei können in ein und dasselbe Element (Stäbchen oder Zapfen) unterschiedlich viele beleuchtete Räume fallen. Ein Sagittalschnitt durch die von einem Bilde beleuchtete (richtiger „durch-“leuchtete) Retina zeigt eine Kernbild-, eine Randbild- und eine Bildmantelzone. Die in der Kernbildzone liegenden Retinaelemente erhalten von einer bestimmten Beleuchtungsichte an alle gleichviel beleuchtete Räume, also alle gleich viel Lichtenergie. Zwischen diesen Elementen entsteht also kein Incidenzgefälle. Dahingegen ist ihr Zustandsunterschied gegenüber den Elementen außerhalb der Bildzone maßgebend für die Stärke derjenigen Reize (in den Ganglienzellen), welche für die Helligkeit entscheidend sind. Die Verhältnisse in der Randbildzone geben eine neue und, wie ich glaube, erstmals zulängliche

### 3. Erklärung des Farbensehens.

Denn die in der Randbildzone liegenden Retinaelemente erhalten ein Lichtenergiegefälle, d. h. die weiter innen liegenden Elemente sind von mehr, die außen liegenden von weniger beleuchteten Räumen durchsetzt und dieses Gefälle (der incidierenden Energie) ist wellenlängenspezifisch, aber unabhängig von der Blendenweite. Aus der leitenden Verbindung bildrandständiger Elemente mit kernbildständigen und mit unbelichteten Elementen und aus der leitenden Verbindung von bildrandständigen Elementen untereinander resultieren also Reize einer ganz bestimmten Stärkeabstufung und *diese wellenlängenspezifische Stärkeabstufung der Lichtreize erklärt das Farbensehen*. Dafür sind a. a. O. mehrere Beweise gegeben worden. Die eindringlichsten sind folgende: 1. Die Randbildzone, welche das wellenlängenspezifische Reizstärkegefälle in den Ganglienzellen verursacht, kommt (aus physikalischen Gründen) nicht zustande unterhalb einer bestimmten Lichtdichte (Beleuchtungsichte), also nicht beim Dämmersehen. 2. Die in der Randbildzone liegenden Retinaelemente erhalten nicht abgestufte, sondern gleich

große Lichtenergien, wenn ein Gemenge aus Komplementärlichtern oder wenn weißes Licht ins Auge fällt.

Die *Farbensinnstörungen* erklären sich sehr wahrscheinlich aus Anomalien der Hornhautkrümmung, besonders der relativen Größe der optischen Zone der Hornhaut, haben ihren Ursprung also in dioptrischen Erscheinungen. Experimentelle Untersuchungen darüber sind im Gange. Die herkömmliche Erklärung des Farbensehens mit wellenlängenspezifischen „Empfindlichkeiten“ verschiedener Netzhautelemente sind unhaltbar, abgesehen davon, daß verschiedene Empfindungen ebensowenig durch verschiedene „Empfindungsfähigkeiten“ („Empfindlichkeiten“) „erklärt“ wären, wie die Schmerzen durch die *dolores*.

Im suprakaudikalen (Endhirn-) Sehapparat wird die in der nervösen Retina noch annähernd flächenhafte (aber bilduntreue) Anordnung der Reize verschiedener, wellenlängenspezifisch gestufter Stärke in eine Tiefgliederung der reizhaltigen Ganglienzellen umgesetzt. Von den primären Sehzentren (also wesentlich vom *Corpus genicul. ext.*) aus werden die Empfindungen (= Reize in den suprakaudikalen Stabkranzapparaten) in der gleichen Weise aufgebaut wie die Reize des infrakaudikalen Apparates, d. h. jedes Paar von Hirnstammganglienzellen ist leitend zu vielen Sehrindenzellen verbunden und erregt in diesen „synallaktischen Sektoren“ (aus je einem Paar von Hirnstammganglienzellen und einer Rindenzelle) Stromflüsse, wenn sich die Reize der beiden Hirnstammganglienzellen voneinander unterscheiden. Diese Unterschiede können größer oder kleiner sein, je nach der Stärke der Reize niedrigerer Synallaxestufen, von denen sie stammen. Je größer das kaudikale Reizgefälle, um so stärker ist die Wirkung zum Endhirn, je stärker diese, um so größer ist die Wahrscheinlichkeit, daß die Reize (hier: „Explikate“) in den Sehrindenzellen der tiefsten Schichte wieder Reize (Explikate höherer Ordnung) in einer oder mehreren höheren Ganglienzellschichten der Sehrinde setzen. *Die wellenlängenspezifisch abgestuften Retinareize entfalten sich letztlich also ihrer Stärke gemäß in die verschiedenen cytoarchitektonischen „Etagen“ der Sehrinde, so daß das zahlenmäßige Verhältnis reizhaltiger Rindenzellen in den verschiedenen Sehrindenschichten wellenlängenspezifisch ist.* Lediglich die Explikation von Reizen aus weißem Licht oder aus Komplementärlichtgemengen sowie die Explikation von unterfarbstufigen Lichtreizen belegt alle Sehrindenschichten gleichmäßig.

Diese Erklärung wird bestätigt durch hirnpathologische Befunde (von *Kleist, Goldstein* u. a.), welche in irreführender Weise auch als „Farbenblindheiten“ bezeichnet worden sind, mit den Trichromasiestörungen aber nichts zu tun haben. Denn die Symptome bestehen in (meist homonymen hemianopischen) Gesichtsfeldausfällen für Perimeterprüflichter bestimmter Wellenlänge. Dabei hat sich gezeigt, daß bei leichteren, weniger tiefgehenden Sehrindenläsionen zuerst und unter Umständen nur langwellige Lichter empfindungsunwirksam bleiben. Da

aus den verletzten Stellen Reize resultieren, welche den vom Hirnstamm her kommenden Sehreizen begegnen und diese dadurch auslöschen können, war nach der Synallaxelehre zu erwarten, daß wellenlängenspezifische Anopsien nach Maßgabe der Tiefe und Ausdehnung der Sehrindenläsion vorkommen. Die in den genannten hirnpathologischen Arbeiten versuchte Deutung ist eine ganz andere. Sie hat meines Erachtens die herkömmliche „Empfindlichkeitslehre“ noch vollends ad absurdum geführt, weil nach dieser Deutung die protanopische Dichromasie z. B. darin bestehen müßte, daß rote oder grüne Lichter empfindungsunwirksam sind. Nach dieser Konfusion ist auch der Ausdruck „Farbenblindheit“ nicht mehr brauchbar. Es dürfte zweckmäßiger sein, in Zukunft diejenigen Farbensinnstörungen, welche darin bestehen, daß Lichter bestimmter Wellenlängen zwar empfindungswirksame, aber keine oder doch abnorme farbenempfindungswirksame Reize setzen, als *Achromasien* von denjenigen Störungen zu unterscheiden, solche Lichter bestimmter Wellenlänge überhaupt empfindungsunwirksam machen und deshalb am besten als *Chromanopsien* bezeichnet werden. Dann ergibt sich folgende Einteilung der gesamten Farbensinnstörungen (und Farbensehstörungen):

### I. *Achromasie.*

A. *Incidentielle* (= auf Besonderheiten der Lichtincidenz zurückzuführende). a) *Physiologische*, im Dämmersehen, d. h. zwischen derjenigen Beleuchtungsdichte, welche die (unspezifische) Schwelle der Empfindungswirksamkeit darstellt, und derjenigen Beleuchtungsdichte, welche die (spezifische) Schwelle der Farbenempfindungswirksamkeit ausmacht; Ursache der physiologischen incidentiellen Achromasie ist also die (geringe) Beleuchtungsdichte.

b) *Abnorme*.  $\alpha$ ) *Hemeralopische*, beim Fehlen des Tagsehens. Ursache also wie A, a;  $\beta$ ) *a-trichromatische*, weil hier die normale Trichromasie gestört ist, und zwar  $\beta_1$ ) *dichromatische*, nämlich *protanopische* und *deutanopische*,  $\beta_2$ ) *monochromatische* = sog. totale Farbenblindheit, symptomatisch = b  $\alpha$ , jedoch der Ursache nach verschieden; denn die Ursache Trichromasiestörungen ist abnorme Energieverteilung in der Retina, wahrscheinlich durch Abnormitäten in der Beschaffenheit der optischen Hornhautzone.

B. *Explicative* (= auf Besonderheiten in der Explikation der Lichtreize in der Sehstrahlung zurückzuführen, also suprakaudikal); da explicative Achromasien noch nicht nachgewiesen, sondern nur theoretisch zu erwarten sind, ist eine Einteilung vorerst nicht nötig; der Nachweis ließe sich durch Eichung des Spektrums bei Hinterhauptshirnverletzten führen.

### II. *Chromanopsie.*

A. *Incidentielle*: Als solche läßt sich die Begrenzung des sichtbaren Spektrums beschreiben und auffassen; infrarote und ultraviolette Strahlen sind aus Gründen der Incidenzmechanik unsichtbar.

B. *Explikative* = Gesichtsfeldgebundene „Farbenblindheit“ im Sinne der Hirnpathologen. Ursache: Explikatverhinderung durch Reizbegegnung mit Herdläsionsströmen.

#### 4. Die Fusionsbewegung und die erste Raumdimension.

Die neurologisch-physiologische Optik hat vor allem zu erklären, wie es zu einer räumlichen Ordnung der (Seh-) Erlebnisse kommen kann. Auf Grund der alten Vorstellung, daß die Netzhauptelemente jeder Retinahälfte zur homonymen Hirnhälfte abgeleitet seien, ist diese Erklärung nicht möglich. Denn da die bildgetreue räumliche Anordnung der Reize im Hirnstamm und in der Sehrinde unmöglich festgehalten werden kann, würden Bilder, welche ganz auf die rechte oder ganz auf die linke Retinaseite fallen, nur den Charakter „rechts“ bzw. „links“ haben können, aber es wäre unmöglich, daß von mehreren solchen Bildern oder Bildteilen etwas *weiter* rechts oder links geortet würde als anderes. Aber auch die Annahme einer „corticalen Retina“ mit abklatschartiger Anordnung der Sehreize würde die Unterscheidbarkeit von Rechts und Links in keiner Weise erklären können. Das ist der schwerste Mangel der herrschenden Lehren.

Die kritische Verwertung der histologischen Befunde lehrt, daß zwar die großen Ganglienzellen jeder Retinahälfte homonym abgeleitet werden. Durch die Zusammenfassung vieler Stäbchen und Zapfen zu je einer bipolaren Ganglienzelle und durch die Zusammenleitung vieler bipolarer Ganglienzellen zu je einer großen Ganglienzelle, insbesondere aber durch die Querverbindungen, welche außerdem von den horizontalen und den amakrinen Ganglienzellen mit ihren Neuriten hergestellt werden, ist jedoch *jede Stelle der Stäbchen- und Zapfenschicht zu beiden Hirnhälften abgeleitet*. Auch längs der (dem genauen Verlauf nach unbekannt) „Ableitungsgrenze“ greifen die Ableitungen *der Incidenzaufnahmeorgane* übereinander. Diese Grenze ist also nur so zu definieren, daß man sich ein Retinabild von gewisser Querausdehnung senkrecht zu dieser Querausdehnung verschoben denkt; diese Verschiebung (auf- und abwärts) könnte (theoretisch) so ausprobiert werden, daß das Bild dabei stets ebenso viele Reize in die rechte wie in die linke Hirnhälfte legt; dann ist die Bildmitte längs jener „Ableitungsgrenze“ verschoben worden. Praktisch suchen (und finden) wir diese Bildlage so, daß wir (monokular oder binokular) die Bildmitte (eines Gegenstandes von Querausdehnung) zu fixieren suchen.

Den Beweis für die Richtigkeit dieser Deutung erbringt eine a. a. O. näher beschriebene Modifikation des *Scheinerschen* Versuches mit dem Nachweis, daß es *möglich ist, Doppelbilder festzuhalten und nacheinander scharf zu sehen*. Dieses wechselweise Scharfsehen ohne Blickfusion beruht auf eine *Blickeinstellung, welche eine symmetrische sphärische Aberration an der Hornhautvorderfläche herbeiführt*. Da bisher der akkommodative Ausgleich der sphärischen Aberration an der Hornhautvorderfläche nicht

bekannt war, sind auch die Berechnungen über die Lage der Sehachse und der „Blicklinie“ (v. Helmholtz) zur optischen Achse hinfällig. Es läßt sich zeigen, daß das Bild beim Scharfsehen keineswegs immer in die Fovea fallen kann. Die in Abschnitt I erklärte synallaktische Funktion der Retina erklärt auch, warum dies gar nicht nötig ist. Da es auf Incidenzspannungen zwischen belichteten und unbelichteten Retinaelementen ankommt, kann die Anzahl und Mannigfaltigkeit solcher Spannungen und der daraus resultierenden Reize sogar größer sein, wenn das Bild nicht auf die Stelle des dichtesten Zapfenstandes zu liegen kommt.

Doppelbilder entstehen dadurch, daß das Bild eines und desselben Gegenstandes von dem einen Auge aus mehr oder weniger linkshirnige (entsprechend weniger oder mehr rechtshirnige) Reize setzt als von dem anderen Auge aus. Dies bedeutet eine Überbelastung des suprakaudikalen Apparates. Nach einem die ganzen Endhirnfunktionen beherrschenden (a. a. O. mit vielen Beispielen belegten) Prinzip wirken die Energien aus einer solchen Überbelastung auf den Hirnstamm zurück und führen, solange nicht besondere „Ableitungswege“ dafür „gebahnt“ sind, zu „Probierbewegungen“. Sobald diese Probierbewegungen (zufällig) die „Überbelastung“ beseitigt haben, fällt ihr Antrieb fort und dieser Zustand wird also festgehalten. Im Sehapparat fließen die kinetisch wirksamen Energien aus Sehreizen, deren Mannigfaltigkeit verkleinert werden kann (also aus der „Überbelastung“ des optischen Empfindungsapparates im thalamo-occipitalen Verbindungssystem, dem suprakaudikalen Entfaltungs- [„Explikations“-] Apparat der Sehreize), den Hirnstammkernen der Augenmuskeln zu. Mit den „Probierbewegungen“ der gesamten (glatten und quergestreiften) Augenmuskulatur wird die Fusion der Blickeinstellung, die zugehörige Akkommodation und die zur Beleuchtungsdichte passende Pupilleneinstellung gesucht und gefunden, durch „Einschleifung“ der Ableitungsbahnen im Laufe der Zeit erlernt. Die Sehachsen (durch Foveamitte und Linsenknötchenpunkt) oder andere anatomisch und physikalisch definierbare Achsen des Bulbus treffen dabei sicher nicht den fixierten Gegenstandspunkt, sondern schneiden sich je nach der Beschaffenheit der Retina (besonders der Ableitungsverhältnisse) individuell verschieden in Punkten vor oder hinter und auch seitlich vom Blickpunkt. Denn nur so ist es möglich, daß beide für das binokulare Scharfsehen (*Scharf- und Einfachsehen!*) erforderlichen Bedingungen: *Symmetrie der sphärischen Hornhautaberration und Kongruenz des Mengenverhältnisses linkshirniger und rechtshirniger Reize bei beiden Augenbildern im binokularen Sehen erfüllt werden.* Eine dritte Bedingung, wie z. B. die streng foveakonzentrische Bildlage würde eine so völlig exakte Symmetrie des Baues beider Augen verlangen, wie sie undenkbar (und übrigens sichtlich schon im größtmöglichen nicht gegeben) ist.

Die Asymmetrie des Körper ist überdies die einzige tragfähige Erklärung dafür, daß linkshirnige und rechtshirnige Sehreize erlebnismäßig

unterscheidbar sind. *Denn die von den Sehreizen im Hirnstamm angelegten Stromflüsse im optisch-explikatorischen System legen, ebenso wie alle anderen Sinnesreize Verbindung einer besonderen Art: „Koordinate“ zu anderen Sinnesreizen, und zwar zunächst zu solchen aus der kontralateralen Körperhälfte an. Da diese körpereigenen Reize vermöge der starken morphologischen und noch stärkeren funktionellen Asymmetrie des Körpers verschieden sind, geben sie die „Merkzeichen“ für die Unterscheidbarkeit rechts- und linkshirinig abgeleiteter Sehreize ab.* (Bezüglich der angeblichen Doppelableitung nur der Macula vgl. a. a. O.) Die erste Raumdimension, die Unterscheidung Rechts-Links ist also eine Asymmetriedimension. Sie ist aus diesem Grunde nur durch den Bezug auf den Körper des Wahrnehmenden definierbar.

Die wichtigste Funktion der lateral und medial zunehmend asymmetrischen Doppelableitung der Retina ist deshalb die *Teilungsfunktion*, d. h. die Möglichkeit, ein Auge oder beide Augen so zu einem Sehding einzustellen, daß das Bild des Sehdinges genau gleich viele rechtshirnige und linkshirnige Reize setzt. Da die Reize aus jedem auch dem kleinsten Netzhautbild in der Ganglienzellschicht der Retina und in den primären Opticuskernen verhältnismäßig weit verstreut liegen (jedenfalls stets viel weiter, als der Ausdehnung des Netzhautbildes entspricht), hat der Organismus die Fähigkeit visuellen Teilens bei allen, selbst den allerkleinsten Sehdingen. Er verfügt mit dieser Reizstreuung sozusagen über ein „Vergrößerungsglas von unerschöpflichem Auflösungsvermögen“. *Was sichtbar ist, das ist auch (visuell) teilbar.* Diese neurologisch-physiologische Tatsache hat eine schwerwiegende erkenntnistheoretische Bedeutung; denn sie gibt die *naturkundliche Begründung des Teilungs- und Teilbegriffes*. Die visuelle Teilung ist natürlich ein Denkvorgang, da sie auf Koordination verschiedenartiger Sinnesreize beruht, Koordination im Sinne der Synallaxetheorie aber der Grundmechanismus aller Denkvorgänge ist.

##### 5. Die statische Funktion des Auges und die zweite Raumdimension.

Auch die Ordnung der Seherlebnisse in einem Übereinander kann nur auf der Koordination der aus unteren bzw. oberen Retinaabschnitten stammenden Sehreize zu verschiedenen und unterscheidbaren anderen Reizen beruhen. Da die hirnpathologischen Erfahrungen ergeben haben, daß die Empfindungen aus Reizen aus der oberen Netzhauthälfte vorwiegend in vorderen, die aus Reizen aus der unteren Netzhauthälfte vorwiegend in hinteren Abschnitten der Sehrinde lokalisiert sind, wird diese Zuordnung damit zusammenhängen. Die herrschende Lehre hat aber keine Erklärung dafür, *warum* jene Verteilung der herkunftsverschiedenen Empfindungen im Cortex stattfindet, da die faseranatomischen Abklatschtheorien natürlich auch hier unmöglich sind. Außerdem ist die Frage, *welche* anderen Empfindungen zu den Sehreizen aus oberer bzw. unterer Netzhauthälfte auf diese Weise zugeordnet werden.

Die neurologisch-psychologischen Untersuchungen ergaben folgende (a. a. O. 1938 mit Einzelheiten belegte) Erklärung: *Das Auge wirkt auch als statisches Organ.* Selbst wenn die Netzhaut keinerlei Belichtung erfährt, müssen von den unteren Teilen desselben Reize ausgehen, welche auf den Druck des Bulbusgewichtes zurückzuführen und genau so beschaffen sind wie die labyrinthären Statolithenreize (näher beschrieben a. a. O. 1937). Die Annahme solcher Reize erklärt auch die sonst kaum erklärliche Außenlage der Stäbchen- und Zapfenschicht der Retina. Möglicherweise wirkt auch die Kompression der Gefäße in der Chorioidea bei der Entstehung dieser Reize mit. Die Empfindungen (Stromflüsse im optischen Explikationsapparat) aus diesen *statischen Retinareizen* (bulbo-statischen Reizen) müssen ebenso in die thalamo-occipitalen Verbindungen fallen wie die Lichtreize, d. h. Lichtreize, welche von der unteren Retinahälfte ausgehen, müssen in den Bahnen der ebendaher kommenden statischen Retinareize verlaufen, können also gewissermaßen nur Modifikationen der bulbo-statischen Reize darstellen. Da nun die bulbo-statischen Reize auch bei Belichtungsmangel (also z. B. bei jedem Lidschlag!) vorhanden sind, bestimmen sie in erster Linie die suprakaudikalen Bahnen, in denen die Lichtreize aus der unteren Retinahälfte expliziert (empfindungswirksam) werden. Wie alle Sinnesreize, so legen auch die Empfindungen aus bulbo-statischen Reizen Koordinate an, und zwar (gleichfalls einem allgemein gültigen Gesetz folgend) vornehmlich und zuerst zu denjenigen anderen Empfindungen, mit denen sie zeitlich koinzidieren. Das aber sind genauestens die statischen Labyrinthreize, deren Empfindungen wahrscheinlich zum Scheitelhirn entfaltet werden. Die fraglichen Koordinate (Stromflüsse zwischen verschiedenen Rindengebieten), welche die „Merkzeichen“ für Sehempfindungen aus der unteren Retinahälfte abgeben, müssen also in (transcorticalen) Leitungen zwischen Scheitelhirn und Occipitalhirn (Sehrinde) liegen. Sind sie aber dort, so können eben dorthin nicht auch Koordinate zwischen Empfindungen aus der oberen Retinahälfte und labyrinthären Empfindungen fallen, d. h. *es können nur die Empfindungen aus unteren Retinalichtreizen jene Koordinate haben.* Die hirnpathologischen Befunde besagen demnach nichts anderes, als daß Reize aus den primären Opticuszentren zunächst und zuerst in die hintere Hälfte der Sehrinde entfaltet werden. Erst in dem Maße, wie diese Verbindungen „belegt“ sind, werden auch die vorderen Sehrindenteile beansprucht. Die Koordination zu labyrinthären Empfindungen haben aber die (immer „zuerst“ vorhandenen) Reize aus den unteren Retinahälften schon für sich in Anspruch genommen. Hätten sie es nicht, so würde ihnen jeder Lidschlag dieses „Koordinationsvorrrecht“ wieder verschaffen.

Bei „visuellem Kopfstand“ werden natürlich die Empfindungen aus den oberen Retinahälften den labyrinthären Empfindungen zugeordnet. Da diese Statolithenreize aber dann andere (von genau entgegengesetztem

Charakter) sind, unterscheidet sich erlebnismäßig das Verkehrtsehen bei visuellem Kopfstand vom Verkehrtsehen bei Kopfstand des Sehdinges. Ohne den geschilderten Mechanismus wäre die Unterscheidung unmöglich, d. h. wir „wüßten“ dann nie, ob wir selbst oder ob das Sehding „auf dem Kopf“ stehe.

Die zweite Raumdimension ist also eine „*Gravitationsdimension*“. So erklärt sich, daß auch diese Dimension nur durch Bezug auf den eigenen Körper definiert werden kann. Eindeutig ist nicht „verkehrt stehen“, sondern nur „auf dem Kopf stehen“.

#### 6. *Formensehen, Minimum visibile und Minimum separabile.*

Der dritten Raumdimension liegen keine besonderen neurophysiologischen Mechanismen zugrunde. Sie wird nicht unmittelbar erlebt, sondern beurteilt. Die Koordinationen, welche dieses Urteil möglich machen, sind sehr mannigfaltig, aber von derselben Art wie alle anderen gnostischen Funktionen. Dabei spielt die Orientierung des eigenen Körpers zur sichtbaren und tastbaren Umwelt die wichtigste Rolle. Auch der Richtungsbegriff gehört deshalb in den Bereich des Urteils über die sog. dritte Dimension. Am sog. Formensehen aber ist noch eine besondere, rein optische Qualität der Sehempfindungen beteiligt: die neben Helligkeit und Farbe dritte *Qualität der Bildgeschlossenheit*. Denn die Anzahl der Sehreize, welche von einem Retinabild gesetzt werden, ist von der Anzahl der Elementpaare abhängig, welche durch die Belichtung Incidenzspannungen erhalten. Diese Anzahl von incidenzverschiedenen Stäbchen- bzw. Zapfenpaaren wird bei Bildern gleicher Umrißform und gleicher Lage in der Retina durch die Beleuchtungsdichte, bei Bildern gleicher Beleuchtungsdichte und gleicher Lage in der Retina aber durch die *Umrißform* bestimmt. Denkt man sich z. B. zwei foveakonzentrisch fallende Bilder gleicher Beleuchtungsdichte (Helligkeit) und gleicher Flächengröße, deren eines kreisrunde Scheibenform, deren anderes aber quadratische Form hat, so ist die Anzahl derjenigen Paare von Stäbchen bzw. Zapfen, deren eines in das Bild, deren anderes in die Bildumgebung fällt, umso größer, je größer der Bildumfang (bei gleicher Bildfläche) ist. Deshalb erscheint trotz gleicher Beleuchtungsdichte und Flächengröße das kreisrunde Bild anders, und zwar *geschlossener* als das quadratische, dieses geschlossener als ein langgezogenes rechteckiges oder spiralig-bandförmiges usw. Man kann diese Qualität der Geschlossenheit auch so umschreiben, daß man sagt, es habe bei dem im Verhältnis zur Fläche umfangkleineren Bild eine größere Anzahl (beleuchteter) Bildpunkte „Halt“ an einem und demselben unbeleuchteten Umgebungspunkt, weil um so mehr beleuchtete Bildpunkte mit ein und demselben unbeleuchteten Umgebungspunkt leitend verbunden sind, je dichter die beleuchteten Bildpunkte beieinander liegen.

Diese Qualität der Geschlossenheit ist für das Sehen und für die Unterscheidung von besonderer Bedeutung. Nach den Ausführungen im ersten

Abchnitt über die synallaktische Funktion der Retina kann die Eigenschaft des Minimum visibile nicht mehr im Verhältnis der Größe des Bildes zur Größe der Stäbchen oder Zapfen gesucht werden. Auch dann, wenn das Bild viel kleiner wäre als ein Stäbchen- oder Zapfenquerschnitt, würde es bei genügender Lichtenergie Reize in mehr als nur einer Ganglienzelle setzen müssen. Die Unterscheidbarkeit sehr kleiner Bilder, also das Minimum separabile hängt aber in erster Linie von Unterschieden der Geschlossenheit ab. Denn eine mit Hilfe der Augenbewegungen kontrollierende Beurteilung der Form in allen Einzelheiten kommt dafür — zumal bei flüchtigem Sehen, wie z. B. beim Lesen kleiner Schrift — keinesfalls in Betracht. Der Eindruck maximaler Geschlossenheit führt bei sehr kleinen Sehdingen immer zum Urteil eines „punktförmigen“, d. h. kreisrundscheibenförmigen Sehdinges, auch dann, wenn die genaue Betrachtung oder gar die physikalische Vergrößerung des Objektes ovalen oder eckigen oder ganz unregelmäßigen Umfang aufdeckt. Der nächste (geringere) Geschlossenheitsgrad führt zum Urteil des kommaförmigen oder strichförmigen, irgendwie „länglichen“ Sehdinges, wobei aber die Richtung der Längsausdehnung noch nicht erkannt wird, das Sehen in erster Dimension also noch nicht beteiligt ist. Aber auch die flüchtige Unterscheidung sehr kleiner Konglomerate von irgendwie länglichen Sehdingen, welche bei achtsamer Betrachtung bereits in die Einzelheiten der Form aufgegliedert werden könnten, erfolgt zweifellos noch auf Grund des Geschlossenheitskriteriums dieser komplexeren Bilder. Sonst wäre das Tempo des Lesens nicht erklärlich und wir müßten das Lesen jeder neu auftauchenden Type erst wieder so erlernen, wie wir das Schreiben derselben — auch bei vorzüglicher „allgemeiner“ Schreibübung — tatsächlich Zug für Zug erlernen müssen. Der Vorsprung des Lesens vor dem Schreiben beruht also nicht nur auf den Schwierigkeiten, die Handfertigkeit zu erwerben, sondern auch auf rein optischen Unterschieden zwischen dem Sehen, das nur die sichere Unterscheidung mehr oder minder geschlossener Formen verlangt, und dem Sehen, das — zum Zweck des Nachbildens — Einzel- und Feinbeurteilung der Form (im engeren Sinn dieses Wortes) erfordert.

Prüfungen der sog. *Sehschärfe*, welche die Verwendung von Prüfzeichen phasisch-graphischen Charakters ohnedies ausschließen müssen, sollten deshalb nicht nur, überhaupt nicht vorwiegend so angestellt werden, daß (nach Art der *Landoltschen* Ringe und ähnlicher Prüfzeichen) Dimensionsurteile und Feinformurteile verlangt werden, sondern es sollten geschlossenheitsgleiche und geschlossenheitsverschiedene Konglomerate „sinnloser“ kleiner Sehdinge in tachoskopischen Abstufungen zum Urteil auf Gleichheit bzw. Ähnlichkeit geboten werden. Nur solche Prüfungen — welche überdies simulationssicherer wären — könnten die Ermittlung eines Minimum separabile von derjenigen eines Minimum cognoscibile trennen.

---