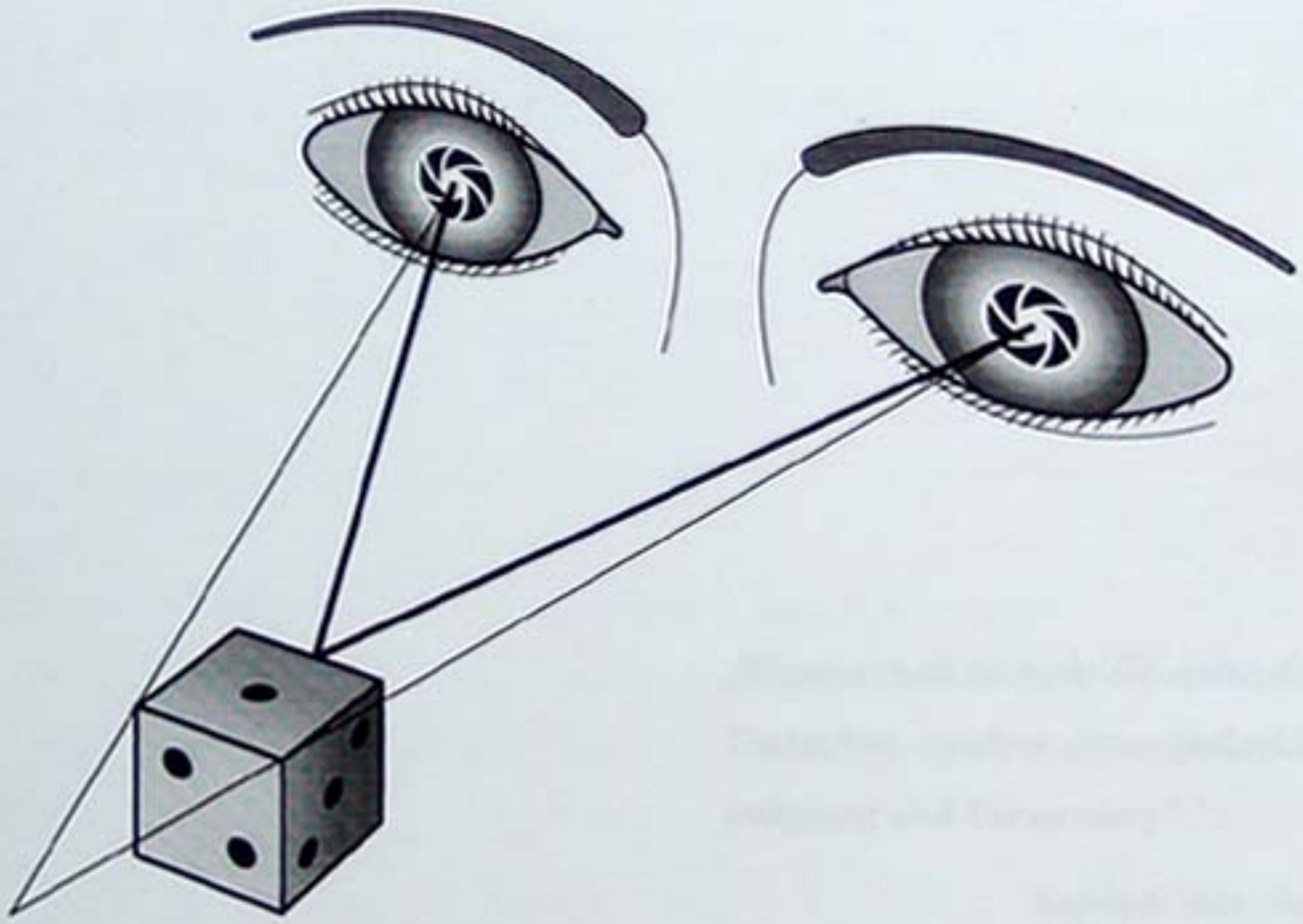
Wettbewerbsbeitrag

Roland Seibt

1996 0292 B 1/1

Roland Seibt

Überlegungen zum beidäugigen Sehen und zur Verarbeitung von Sehreizen im Gehirn



Halle (Saale)
1997

„Wissenschaft ist nicht die Anhäufung von Tatsachen, sondern deren gedankliche Verknüpfung und Verwertung“ [1]

Ludwig R. Bach (1865 - 1912)
Augenarzt in Marburg

[1] HAUGWITZ, T.: Die Augenheilkunde im 20. Jahrhundert, 1991, S. 26

Vorwort:

Mit der visuellen Wahrnehmung des Raumes haben sich Menschen aller Zeiten auseinandergesetzt. Der Astronom JOHANNES KEPLER (1571 - 1630) vermutete, daß das durch die beidäugige Sehweise zustandekommende Stereosehen darauf beruht, daß ein Sehobjekt mit unterschiedlichen Disparitäten in beiden Augen bzw. auf beiden Netzhäuten abgebildet wird.[2] Der englische Physiker CHARLES WHEATSTONE (1802 - 1875) konnte 1838 der Royal Society Experimente mit einem von ihm konstruierten Stereoskop demonstrieren, die diese Vermutung erhärteten.

Seitdem gilt die Theorie der Querdisparation als bewiesen. Was man bei der Theorie der Querdisparation jedoch nicht finden kann, sind Aussagen über unscharfe Bildprojektionen. Beruft man sich auf die Theorie der Querdisparation, dann werden im Auge bzw. auf der Netzhaut angeblich *alle* Bilder scharf abgebildet. Diesbezüglich lassen sich KAMKE und WALCHER mit folgenden Worten zitieren: Es „ ... werden dem Auge ebenso wie der fotografischen Kamera aber in der Regel Aufgaben gestellt, die sie grundsätzlich nicht erfüllen können: es soll nämlich der Objekt*raum* in einer *Ebene* (Netzhaut, Photoplatte) scharf abgebildet werden. Das ist nach den Abbildungsgleichungen ... nicht möglich, denn zu einer bestimmten Bildebene gehört genau eine Objektebene."[3] Damit ist ein Schwachpunkt der Theorie der Querdisparation aufgezeigt.

Neu ist die Überlegung, daß Unschärfe eine Bedeutung für die binokularen Sehfunktionen besitzt. So werden in der vorliegenden Arbeit Modellvorstellungen zum beidäugigen Sehen erörtert, die anerkennen, daß von Sehobjekten auch *unscharfe* Bilder auf die Netzhaut projiziert werden können.

Das Schwergewicht wurde in dieser Ausarbeitung auf die *grafische Darstellung* der beidäugigen Sehfunktionen gelegt. Wesentliche Zusammenhänge des binokularen Sehens können deshalb mit Hilfe der Grafiken von Bild 1 bis zu Bild 14.2. (Seite 18 bis 33) schnell und einfach erfaßt werden.

Halle, im April 1997

Roland Seibt

---

[2] siehe: HOFFMANN, K.-P., C. WEHRHAHN: Zentrale Sehsysteme. In: DUDEL, J., R. MENZEL, R. F. SCHMIDT: Neurowissenschaft. Vom Molekül zur Kognition, 1996, S. 417

[3] KAMKE, D., W. WALCHER: Physik für Mediziner, 2. Aufl., 1994, S. 480

- Inhaltsverzeichnis -

Seite

Einleitung zu Schwerpunktthemen 1

1. Kann sich ein Einäugiger, der z.B. seit Geburt an einäugig ist, ein beidäugig bzw. stereoskopisch wahrnehmbares Bild vorstellen? 3

1.1. Was sieht man mit normaler beidäugiger Sehweise mehr als mit einäugiger Wahrnehmung? 3

1.2. Warum kann man mit normaler beidäugiger Sehweise Entfernungen besser einschätzen als mit einäugiger Wahrnehmung? 3

1.3. Ergebnis 4

1.4. Wie wird im allgemeinen das räumliche Vorstellungsvermögen von stereoskopisch erfahrungslosen Menschen eingeschätzt? 4

2. Warum werden die rezeptiven Felder der Retina zur Peripherie der Netzhaut hin immer größer? 6

2.1. Die Fusion bzw. Verschmelzung der monokularen Seheindrücke 6

2.2. Die Fokussierung bzw. die Akkommodation 6

2.3. Die Konvergenz der Objektebenen bzw. der fokussierten Gegenstandsflächen 8

2.4. Das Kriterium für ein maximales Binokularsignal 9

2.5. Die Unschärfe auf der Bildfläche 9

2.6. Ergebnis 11

2.7. Weiterführende Schlußfolgerungen aus der vorangegangenen Diskussion 11

2.7.1. Der Horopter und der Panum-Raum 11

2.7.2. Der Antagonismus zwischen ipsi- und kontralateraler Netzhaut 13

2.7.3. Ergebnis 13

3. Womit könnte der 6-schichtige Aufbau des CGLs und die Tatsache, daß sich die alternierende Augenzugehörigkeit dieser Schichten von der zweiten zur dritten Schicht umkehrt, zu tun haben? 14

3.1. Die Dispersion des Lichtes 14

3.1.1. Das Gesetz der scharfen Abbildung 14

3.1.2. Die Dispersion des Lichtes im Auge 14

3.2. Der Antagonismus des Farbspektrums 15

3.3. Die fiktive Bildschale der scharfen Abbildung 15
3.4. Ergebnis 17

Grafische Darstellungen 18

Kurzer historischer Überblick 34

Literaturverzeichnis 36

Abbildungsverzeichnis 38

Einleitung zu den Schwerpunktthemen

Beweis:

Kann sich ein Einäugiger, der z.B. seit Geburt an einäugig ist, im Geist ein beidäugig bzw. stereoskopisch sichtbares Bild vorstellen? Aus dem Kriterium der zulässigen Einäugigkeit[4], das hinsichtlich der visuellen Tauglichkeitsanforderungen für Kraftfahrer verwendet wird, geht hervor, daß diese Frage nach allgemeiner Überzeugung anscheinend verneint wird. Warum sich diese Frage aber unbestreitbar mit ja beantworten läßt, wird in der vorliegenden Diskussion gezeigt.

Die Frage besitzt für stereoblinde bzw. stereoskopisch stark beeinträchtigte (d.h. mit einem Schielfehler konfrontierte) Mitbürger hinsichtlich der Tauglichkeit für viele technische Berufe primäre Bedeutung. Etwa 5% der Bevölkerung besitzen kein hinreichend normales Stereosehen.

Beweis:

Die Filmebene der Fotokamera läßt sich beim Auge mit der Netzhaut vergleichen. In der Netzhautperipherie besitzt der Mensch ein nicht so hohes visuelles Auflösungsvermögen wie im Netzhautzentrum. Dies liegt in der Tatsache begründet, daß zur Netzhautperipherie hin immer mehr Photorezeptoren (Stäbchen und Zapfen) zu einer kreisförmigen Bild-empfangseinheit - einem rezeptiven Feld - zusammengeschaltet sind. Der Durchmesser eines solchen rezeptiven Feldes wird dabei zur Netzhautperipherie hin immer größer.

Die Frage, warum dieses Größerwerden notwendig und logisch ist, kann von der einschlägigen Fachliteratur offenbar nicht beantwortet werden. Dagegen liefert die vorliegende Diskussion diesbezüglich eine schlüssige Erklärung.

Hypothese:

Nachdem die Sehreize durch die Netzhaut aufgenommen worden sind, werden sie an die nachfolgende Verarbeitungsstufe im Gehirn - den seitlichen Kniehöcker bzw. lateinisch: das Corpus geniculatun laterale (CGL) - weitergeleitet. Dieser Gehirnteil läßt sich durch einen 6-schichtigen Aufbau charakterisieren. Schicht 1, 4 und 6 sind mit dem einen Auge verbunden, Schicht 2, 3 und 5 mit dem anderen. HUBEL schreibt dazu: „Warum sich die Reihenfolge von der vierten zur fünften Schicht umkehrt, ist völlig unklar - vielleicht soll man es sich, so denke ich manchmal, nur nicht so gut merken. Eigentlich haben wir auch keine plausible Erklärung

---

[4] siehe: GREHN, F., W. LEYDHECKER: Augenheilkunde, 26. Aufl., 1995, S. 395, 396

dafür, warum es übergaupt eine Reihenfolge gibt."[5] (Anmerkung: Nach WILFRID EDWARD LE GROS CLARK (1895 - 1971) - auf diesen geht die Bezifferung der 6 Schichten des CGLs zurück - meint Hubel hier natürlich nicht die vierte und fünfte Schicht, sondern die zweite und dritte.)

In der vorliegenden Diskussion werden plausible Zusammenhänge aufgezeigt, womit dieser 6-schichtige Aufbau und die erwähnte Umkehrung von der zweiten zur dritten Schicht möglicherweise zu tun haben könnten.

[5] HUBEL, D. H.: Auge und Gehirn. Neurobiologie des Sehens, 2. Aufl., 1990, S. 76

1. Kann sich ein Einäugiger, der z.B. seit Geburt an einäugig ist, ein beidäugig bzw. stereoskopisch wahrnehmbares Bild vorstellen ?

1.1. Was sieht man mit normaler beidäugiger Sehweise mehr als mit einäugiger Wahrnehmung ?

(verwendete Grafiken: **Bild 2 ; 3**)

Bei normaler beidäugiger Sehweise kann es möglich sein, einen Würfel zugleich von vier Seiten zu sehen, wenn dessen Kantenlänge kleiner als der Augenabstand ist.[6] (siehe: Bild 3) Als Normalsichtiger kann man also - wie schon 1852 der Erfinder der zweiäugigen Stereokamera DAVID BREWSTER (1781 - 1868) vermerkte[7] - um das Sehobjekt herumsehen, wobei dies jedoch *nicht* bedeutet, um einen Körper vollständig herumsehen bzw. drumherumsehen zu können. Der Einäugige ist zum Herumsehen nicht fähig. Anders ausgedrückt kann man das Herumsehen auch noch folgendermaßen beschreiben: Der Sehraum, für den dem einen Auge aufgrund eines undurchsichtigen Sehobjektes die Sicht *verdeckt* bleibt, verkleinert sich bei Zuhilfenahme des zweiten Auges. (siehe: Bild 2)

1.2. Warum kann man mit normaler beidäugiger Sehweise Entfernungen besser einschätzen als mit einäugiger Wahrnehmung ?

(verwendete Grafiken: **Bild 1**)

Der für das eine Auge einsehbare Sehraum, für den dem anderen Auge die Sicht verdeckt bleibt, verkleinert sich mit zunehmendem Betrachtungsabstand bzw. mit zunehmendem Abstand zum anvisierten Sehobjekt. Bild 1 zeigt dazu ein anschauliches Beispiel: Der Normalsichtige kann von der zylinderförmigen Scheibe, wenn er sie aus der Nähe anblickt, einen größeren Anteil ihrer Mantelfläche sehen, als wenn er sie aus einer viel größeren Entfernung betrachtet. Dem Einäugigen ist die Wahrnehmung dieses visuellen Unterschiedes nicht möglich. Damit ist für jedermann verständlich beschrieben, worauf der wesentliche Vorteil der beidäugigen Entfernungswahrnehmung von Sehobjekten gegenüber der einäugigen Sehweise zurückzuführen ist.

[6] siehe: SUMPF, K.: Grundriß der Physik, 1905, S. 205
[7] BAIER, W.: Quellendarstellungen zur Geschichte der Fotografie, 3. Aufl., 1977, S. 168

Bild-Nr.

1
2
3
4
5.1.
5.2.
6
7
8
9
10
11
12
13
14.1.
14.2.

1.3. Ergebnis

Ein Farbenblinder, der z.B. Zeit seines Lebens rotblind war, wird unbestritten die Farbe rot mit Assoziationen wie Feuerwehr, Liebe usw. verbinden können. Die Tatsache, daß er weiß, wie die Farbe rot wirklich aussieht, scheint aber nicht gegeben zu sein.
Anders ist dies bei stereoskopisch erfahrungslosen Menschen. Die vorangegangene Diskussion, insbesondere aber die Bilder 1, 2 und 3 zeigen in einleuchtender Weise, daß sich seit eh und je Einäugige bzw. auch Mitbürger, deren räumliches Sehvermögen durch ein seit der frühen Kindheit bestehenden Schielfehler stark beeinträchtig ist, sich dennoch ein stereoskopisches bzw. räumliches Bild geistig vorstellen können. Damit ist zugleich auch klar, daß man trotz stereoskopischer Erfahrungslosigkeit gutes räumliches Vorstellungsvermögen besitzen kann.

1.4. Wie wird im allgemeinen das räumliche Vorstellungsvermögen von stereoskopisch erfahrungslosen Menschen eingeschätzt ?

Diese Frage kann anhand eines Beispieles beantwortet werden. Die visuellen Tauglichkeitsanforderungen für Kraftfahrer enthalten unter anderem folgende Regelung[8]: Ein normalsichtiger Inhaber der Fahrerlaubnis für die Fahrzeugklasse 2 ist, auch wenn er ein Auge verliert, entsprechend dem Kriterium der zulässigen Einäugigkeit noch fähig, (nach Ablauf einer vierteljährlichen Gewöhnungszeit an die Einäugigkeit) z.B. einen LKW sicher durch den Verkehr zu führen. Einem Bewerber für die Fahrerlaubnis der Klasse 2, der jeweils zwei voll funktionsfähige Augen besitzt, bei dem jedoch aufgrund eines Schielfehlers (im Sinne einer Heterotropie) lediglich das beidäugige Zusammensehen bzw. die stereoskopische Wahrnehmung nicht hinreichend normal ausgeprägt ist, wird dagegen die Fahrerlaubnis der Klasse 2 nicht erteilt, da in diesem Fall weder die Bedingung des normalen Stereosehens noch das Kriterium der zulässigen Einäugigkeit erfüllt ist.
Etwa 5% [9] der Bevölkerung schielen im Sinne einer Heterotropie bzw. im Sinne des Begleitschielens. Diese Sehstörung tritt meistens in der frühen Kindheit auf. Das in diesem Alter noch nicht ausgereifte Sehsystem paßt sich dem Sehfehler an. Die Regelmechanismen des visuellen Systems werden in diesem Fall so ausgeprägt, daß störende Doppelbilder dauerhaft unterdrückt werden. Anders als es Laien oftmals assozieren, kann in diesem Zusammenhang das Schielen deshalb *nicht* mit der Tatsache verbunden werden,

[8] Collins, J. F., A. J. Augustin (Hrsg.): Augenheilkunde, Springer, Berlin-Heidelberg, 1996, S. 956, 957
[9] De Decker, W.: Heterotropie (manifester Strabismus). In : H. Kaufmann : Strabismus , 2 . Aufl. , 1995 , S. 209

Bild-Nr.
1
2
3
4
5.1.
5.2.
6
7
8
9
10
11
12
13
14.1.
14.2.

daß störende Doppelbilder gesehen werden. Wer also im Sinne einer Heterotropie schielt, ansonsten aber über zwei intakte Augen verfügt, der dürfte in der Regel ein besseres Sehvermögen besitzen als ein Einäugiger. Schließlich versteht es sich von selbst, daß man mit zwei funktionsfähigen Augen mehr sieht bzw. ein größeres Gesichtsfeld wahrnehmen kann als ein Einäugiger.

Welches konkrete Kriterium kann deshalb dafür ausschlaggebend sein, daß der oben erwähnte Bewerber, der ohne Doppelbildsehen schielt, für die Fahrerlaubnis der Fahrzeugklasse 2 nicht tauglich ist, obwohl er ein besseres Sehvermögen besitzt als der besagte Einäugige, der Inhaber des Führerscheins der Klasse 2 ist. Oder anders gefragt: Was ist es, was der einäugige Inhaber in visueller Hinsicht kann, wozu der normal sehende jedoch lediglich stereoskopisch beeinträchtigte Bewerber aber grundsätzlich nicht fähig sein soll?

Die - so scheint es zumindest - einzige Erklärung, die sich diesbezüglich finden läßt, ist folgende: Der Inhaber des Führerscheins der Fahrzeugklasse 2 war beim Erhalt seiner Fahrerlaubnis normalsichtig. Er muß somit als Erwachsener räumliches Sehvermögen besessen haben und weiß deshalb, wie ein räumliches Bild aussieht. Auch nach dem Verlust eines Auges ist ihm deshalb stereoskopisches Vorstellungsvermögen zuzutrauen.

Der normal sehende Bewerber für die Führerscheinklasse 2, der jedoch seit seiner frühen Kindheit mit einem Schielfehler im Sinne einer Heterotropie konfrontiert ist, hat in seinem Leben keine normalen stereoskopischen Bilder sehen können, womit ihm entsprechende Erfahrungswerte fehlen. Ihm ist demnach auch kein stereoskopisches Vorstellungsvermögen zuzutrauen.

Anders als durch diese Darstellung läßt es sich vermutlich kaum rechtfertigen, daß Bewerbern für eine Fahrerlaubnis, die lediglich keine normalen stereoskopischen Erfahrungen besitzen, ansonsten aber normal sehen können, der Führerschein der Fahrzeugklasse 2 verwehrt wird.

Das Beispiel zeigt, daß man stereoskopisch erfahrungslosen Menschen offenkundig kein normales räumliches Vorstellungsvermögen zutraut. Diesbezüglich wird neben weiteren Kriterien somit ein wesentlicher Grund dafür erkennbar, warum man diese Menschen (deren Anteil an der Gesamtbevölkerung, wie gesagt, in etwa 5% beträgt) im Hinblick auf viele technische Berufe - bei denen räumliches Vorstellungsvermögen benötigt wird - für untauglich hält und ihnen zahlreiche, für diese Berufe notwendige Tätigkeiten verbietet.

Mit den Bildern 1, 2 und 3 in der vorliegenden Diskussion wird diese Auffasung jedoch eindeutig widerlegt. (Es ist klar, daß diese Thematik soziale Bedeutung besitzt.)

Bild-Nr.

1

2

3

4

5.1.

5.2.

6

7

8

9

10

11

12

13

14.1.

14.2.

2. Warum werden die rezeptiven Felder der Retina zur Peripherie der Netzhaut hin immer größer ? (siehe hierzu: **Bild 10**)

Aus folgenden Gedanken läßt sich zu dieser Frage eine Antwort herleiten:

2.1. Die Fusion bzw. die Verschmelzung der monokularen Scheindrücke

(verwendete Grafiken: **Bild 4**)

Aus Bild 4 geht hervor, was man sich in etwa unter der Verschmelzung der beiden monokular unterschiedlichen Scheindrücke zu einem binokularen Bild vorstellen kann: Ohne neuronale Bildverschmelzung müßte man immer ein Doppelbild sehen. Glücklicherweise sehen aber die meisten Menschen trotz gleichzeitiger Wahrnehmung von zwei unterschiedlichen Scheindrücken keine konfusmachenden Doppelbilder. Es stellt sich somit die Frage, welche Mechanismen es sein können, durch die das Gehirn die beiden monokularen Scheindrücke so zusammendreht (linksäugiges Bild in Uhrzeigerrichtung, rechtsäugiges entgegengesetzt der Uhrzeigerrichtung), daß ein binokulares Einzelbild entsteht, wobei man sich den Fixierpunkt jeweils als eine senkrecht zu denkende Drehachse vorstellen kann. Diese Drehachse entspricht zugleich dem Prévostschen Lot[10].

2.2. Die Fokussierung bzw. die Akkommodation

(verwendete Grafiken: **Bild 6 ; 11**)

Eine einäugige Spiegelreflexkamera kann mit Hilfe eines Autofokussystems - dieses besitzt allerdings auch bei sehr guter Technik keinen 100%-igen Wirkungsgrad - unterscheiden, ob sich ein zu fotografierender Gegenstand vor oder hinter der Fixationsebene befindet. Es stellt sich deshalb die Frage, wie der Autofokus bzw. die Akkommodation des einzelnen Auges funktioniert. Bekanntlich kann auch noch das visuelle System des Einäugigen zielgenau fokussieren. „Der adäquate Reiz zur Änderung der Akkommodation ist eine unscharfe Abbildung auf der Netzhaut.“[11] Das visuelle System bewertet also den Unschärfekreis, der von dem noch nicht fixierten Gegenstandspunkt als Bild auf die Retina

[10] siehe: Herzau, V.: Sensorik des Binokularsehens. In.: H. Kaufmann: Strabismus, 2. Aufl., 1995, S. 123, 124

[11] Grüsser, O.-J., U. Grüsser-Cornehls: Gesichtssinn und Okulomotorik. In: Schmidt, R. F., G. Thews: Physiologie des Menschen, 26. Aufl., 1995, S. 285

Bild-Nr.

1
2
3
4
5.1.
5.2.
6
7
8
9
10
11
12
13
14.1.
14.2.

projiziert wird. Je weiter der Gegenstandspunkt von der Fixationsebene entfernt ist, desto größer ist dieser Unschärfekreis. Es stellt sich dabei allerdings die Frage, wie der Sehapparat des Einäugigen unterscheiden kann, ob der Unschärfekreis von einem proximal (bzw. vor) zur Fixationsebene gelegenem Gegenstandspunkt oder von einem distal (bzw. hinter) zur Fixationsebene gelegenem Gegenstandspunkt hervorgerufen wird (siehe: Bild 6), damit die Akkommodation „weiß", ob sie sich auf eine kleinere oder aber auf eine größere Gegenstandsentfernung einstellen muß. Da nun, wie bereits erwähnt, die Akkommodation beim Einäugigen tadellos funktioniert, muß es also zweifellos so sein, daß das visuelle System diese beiden Möglichkeiten von Streukreisprojektionen - die sich als zueinander antagonistisch betrachten lassen - irgendwie unterscheiden kann.

Vielfach wird nun angenommen, daß die Akkommodation eines einzelnen Auges die Fixierpunktentfernung durch Probieren ermittelt. Dieser weitverbreitete Glaube scheint ungerechtfertigt zu sein, denn im weiteren Verlauf der Diskussion wird sich zeigen, daß die Netzhaut unumstritten so aufgebaut sein muß, daß sie zwischen zwei antagonistischen Streukreisprojektionen - also den proximalen und den distalen Streukreisen - unterscheiden kann. Dazu ist noch zu erklären, was als ein proximaler und was als ein distaler Streukreis bezeichnet werden soll (siehe: Bild 6): Liegt ein Gegenstandspunkt proximal (bzw. vor) zur Fixationsebene, so liegt sein scharfer Bildpunkt erst hinter der Netzhaut. Die in diesem Fall zur Netzhaut hin **konvergierenden** Lichtstrahlen erzeugen auf der Retina eine Unschärfeprojektion, die als *proximaler Streukreis* bezeichnet wird. Analog läßt sich ein distaler Streukreis beschreiben. Liegt ein Gegenstandspunkt distal (bzw. hinter) zur Fixationsebene, so liegt sein scharfer Bildpunkt schon vor der Netzhaut. Die in diesem Fall zur Netzhaut hin **divergierenden** Lichtstrahlen erzeugen auf der Retina eine Unschärfeprojektion, die als *distaler Streukreis* bezeichnet wird. An dieser Stelle ist es günstig, durch die Betrachtung von Bild 11 der Diskussion vorauszugreifen. Hier wird der Streukreisantagonismus beim beidäugigen Sehen sehr gut erkennbar. Der beschriebene Gedanke, daß das visuelle System des Menschen zwischen antagonistischen Streukreisprojektionen unterscheiden kann, bildet im folgenden das Fundament, um wichtige Zusammenhänge hinsichtlich der beidäugigen Sehfunktionen zu erklären.

Bild-Nr.
1
2
3
4
5.1.
5.2.
6
7
8
9
10
11
12
13
14.1.
14.2.

2.3. Die Konvergenz der Objektebenen bzw. der fokussierten Gegenstandsflächen

(verwendete Grafiken: **Bild 4 ; 5.1. ; 7 ; 8 ; 9 ; 11**)

In einem optischen System kann strenggenommen ein völlig scharfes Bild auf der Bildebene **nur von einer einzigen Gegenstandsebene erzielt werden.**[12] (Hervorhebung durch den Autor R. S.) Zur Bildebene bzw. zur Bildschale der Netzhaut muß es demnach eine bestimmte Gegenstandsebene geben, auf die das Auge in einem bestimmten Moment gerade akkommodiert bzw. fokussiert ist. Oder um es anders auszudrücken: Es kann nur eine Gegenstandsebene geben, auf die das einzelne Auge scharfstellt.

Um dabei die Frage zu umgehen, ob die der Netzhaut zuzuordnende Gegenstandsebene tatsächlich als plane bzw. ebene Fläche betrachtet werden kann oder ob diese nicht auch schalenförmig sein könnte, soll nur noch von einer Gegenstands*fläche* die Rede sein. Schließlich kann eine Fläche einerseits eine Ebene darstellen, andererseits aber auch schalenförmig sein. Da weiterhin mit dieser erwähnten Gegenstandsfläche jeweils genau die Fläche gemeint sein soll, auf die das einzelne Auge fokussiert ist, wird diese Fläche im folgenden als fokussierte Gegenstandsfläche bezeichnet.

Nimmt die fokussierte bzw. fixierte Gegenstandsfläche eines Auges eine senkrechte Position zur Gesichtslinie desselben Auges ein, so müssen bei symmetrischer Konvergenz und identischen Brechkraftverhältnissen beider Augen die fokussierten Gegenstandsflächen des rechten und des linken Auges im gleichen Winkel zum Fixierpunkt hin konvergieren wie die Gesichtslinien. (siehe: Bild 7)

Zuvor ist aber aus Bild 5.1. noch folgendes zu erkennen: Das didaktische Mittelauge muß sich zum Fixierpunkt genauso weit entfernt befinden wie das rechte und das linke Auge.

Zurück zu Bild 7: Folglich schneiden sich die fokussierten Gegenstandsflächen des rechten und des linken Auges mit der des didaktischen Mittelauges im Fixierpunkt. Die fokussierte Gegenstandsfläche des didaktischen Mittelauges teilt dabei den Raum zwischen den fokussierten Gegenstandsflächen des rechten und des linken Auges genau in zwei symmetrische Hälften. Diese beiden Hälften bilden also ein Verhältnis von 1:1. Ein Gedanke, auf den an nachfolgender Stelle noch einmal zurückgekommen werden wird.

Aus Bild 8, 9 und 11 ist zu erkennen, daß die fokussierten Gegenstandsflächen des rechten und des linken Auges, die zum Fixierpunkt hin konvergieren, einen Gegenstandsraum einschließen, in dem ein Gegenstandspunkt so positioniert sein kann, daß er sich distal (bzw. hinter) zur fokussierten Gegenstandsfläche des ipsilateralen Auges befindet, aber zugleich proximal (bzw. vor) zur fokussierten Gegenstandsfläche des kontralateralen Auges.

---

[12] siehe: MARCHESI, J. J.: Handbuch der Fotografie. Band 1, 1993, S. 169

Bild-Nr.

1
2
3
4
5.1.
5.2.
6
7
8
9
10
11
12
13
14.1.
14.2.

Wenn nun - wie vorausgesetzt wurde - das visuelle System zwischen distalen und proximalen Streukreisen unterscheiden kann, dann muß die Erklärung, woher das Gehirn überhaupt die antagonistischen Informationen erhalten kann, bei der Verschmelzung der beiden monokular unterschiedlichen Seheindrücke das Bild des linken Auges in Uhrzeigerrichtung, aber das Bild des rechten Auges genau entgegen der Uhrzeigerrichtung zu drehen (siehe: Bild 4), offenkundig in folgender Tatsache begründet liegen: Von einem Gegenstandspunkt, der sich im erwähnten Raum zwischen den fokussierten und dabei zum Fixierpunkt hin konvergierenden Gegenstandsflächen des rechten und linken Auges befindet, projiziert auf die rechtsäugige Netzhaut ein Streukreisbild, das sich zu dem der linksäugigen Netzhaut antagonistisch verhält.

2.4. Das Kriterium für ein maximales Binokularsignal

Sind nun diese antagonistischen Streukreise gleich groß, sind ihre Durchmesser also kongruent, so kann das nur bedeuten, daß bei symmetrischer Konvergenz und identischen Brechkräften beider Augen das rechtsäugige Bild des betreffenden Gegenstandspunktes gegenüber seinem linksäugigen Bild in entgegengesetzte Richtung gedreht wird, aber jeweils um den Betrag des gleichen Winkels. Bei symmetrischer Konvergenz und identischen Brechkraftverhältnissen beider Augen entsteht dabei als binokulare Projektion das Bild des didaktischen Mittelauges. Die linksäugige Drehinformation und die entgegengesetzte rechtsäugige Drehinformation, die vom jeweiligen Auge an das Gehirn gesendet werden, um das binokulare Bild entstehen zu lassen, sind also gleich groß. Beide monokulare Informationseingänge werden also bei der neuronalen Bildverarbeitung gleichwertig berücksichtigt. Man kann daher davon ausgehen, daß ein Gegenstandspunkt, der in Form von gleich großen und zugleich antagonistischen Streukreisen auf beide Netzhäute projiziert wird, im Gehirn ein maximales Binokularsignal auslöst.

2.5. Die Unschärfe auf der Bildfläche

(verwendete Grafiken: **Bild 5.2. ; 8 ; 9 ; 11**)

Die Größe eines Streukreises hängt (neben weiteren zur vereinfachten Erklärung hier vernachlässigten Faktoren, die bei der Projektion eines scharfen bzw. unscharfen Bildes in einem optischen System eine Rolle spielen) von der Entfernung eines Gegenstandspunktes zur Fixationsebene bzw. zur fokussierten Gegenstandsfläche des (monokularen) optischen

Bild-Nr.

1

2

3

4

5.1.

5.2.

6

7

8

9

10

11

12

13

14.1.

14.2.

Systems ab. Soll nun das Streukreisbild eines Gegenstandspunktes auf der ipsilateralen Netzhaut antagonistisch und zugleich genauso groß zu dem auf der kontralateralen Netzhaut sein, dann muß die proximale Entfernung dieses Gegenstandspunktes zur fokussierten Gegenstandsfläche des kontralateralen Auges verglichen mit seiner distalen Entfernung zur fokussierten Gegenstandsfläche des ipsilateralen Auges ungefähr das Verhältnis 1:1 bilden. (siehe: Bild 8, 9 und 11)

Gegenstandspunkte, für die dieses Verhältnis zutrifft, befinden sich auf der fokussierten Gegenstandsfläche des didaktischen Mittelauges. Denn, wie bereits unter Punkt 2.3. erwähnt, befindet sich bei symmetrischer Konvergenz und identischen Brechkräften beider Augen die fokussierte Gegenstandsfläche des didaktischen Mittelauges zu der des ipsilateralen Auges immer genauso weit entfernt wie zu der des kontralateralen Auges. Somit bildet die fokussierte Gegenstandsfläche des didaktischen Mittelauges genau die Menge von Gegenstandspunkten, welche bei der Bildprojektion auf die Netzhaut im Gehirn jeweils ein maximales Binokularsignal auslösen. Bekanntermaßen bildet nun auch der (empirische) Horopter (siehe: Bild 5.2.) die Menge von Gegenstandspunkten, die bei der Bildprojektion jeweils ein maximales Binokularsignal auslösen, da in diesem Fall im Gehirn ein Maximum von Binokularneuronen aktiviert wird.[13] Daraus folgt, daß rein formal die fokussierte Gegenstandsfläche des didaktischen Mittelauges das Korrelat des empirischen Horopters bildet.

Die fokussierten Gegenstandsflächen des rechten, des linken und des Mittelauges divergieren zur Peripherie des Gesichtsfeldes hin. (Nachfolgend wird für die Bezeichnung des Gesichtsfeldes nur noch der korrektere Begriff des Gesichtsraumes[14] verwendet.) Somit steigt bei symmetrischer Konvergenz beider Augen zur Peripherie des Gesichtsraumes hin der Abstand von der fokussierten Gegenstandsfläche des didaktischen Mittelauges zu der des ipsilateralen Auges und zu der des kontralateralen Auges in gleicher Weise an. Der Abstand eines Gegenstandspunktes auf der fokussierten Gegenstandsfläche des didaktischen Mittelauges zu der des linken Auges bzw. zu der des rechten Auges wird also in der Peripherie des Gesichtsraumes immer größer. Oder anders ausgedrückt: Ein Gegenstandspunkt auf der fokussierten Gegenstandsfläche des didaktischen Mittelauges, der sich zugleich in der Peripherie des Gesichtsraumes befindet, besitzt zu den Fixationsebenen bzw. den fokussierten Gegenstandsflächen des linken und des rechten Auges einen größeren Abstand, als wenn er im Zentrum des Gesichtsraumes (in der Nähe des Fixierpunktes) positioniert ist.

Bild-Nr.
1
2
3
4
5.1.
5.2.
6
7
8
9
10
11
12
13
14.1.
14.2.

[13] siehe: FRIEDBURG, D.: Pathologisches Binokularsehen. In: H. KAUFMANN: Strabismus, 2. Aufl., 1995, S. 405
[14] siehe: HERZAU, V.: Sensorik des Binokularsehens. In: H. KAUFMANN: Strabismus, 2. Aufl., 1995, S. 121

Somit müssen die gleich großen und zugleich antagonistischen Streukreisbilder, die von diesem Gegenstandspunkt auf die ipsi- und auf die kontralaterale Retina projiziert werden und die jeweils miteinander korrespondieren, mit zunehmender Netzhautperipherie auch immer größer werden.

Demnach korreliert das mit zunehmender Netzhautperipherie unvermeidliche Größerwerden der korrespondierenden Streukreisbilder auf der Retina mit dem mit zunehmender Netzhautperipherie charakteristischen Größerwerden der rezeptiven Felder der Retina. (siehe: Bild 10 und 11) Daraus folgt, daß die rezeptiven Felder der Retina offensichtlich an die Auswertung von Unschärfeprojektionen auf der Netzhaut angepaßt sind.

2.6. Ergebnis

Das mit zunehmender Netzhautperipherie unvermeidliche Größerwerden der korrespondierenden Streukreisbilder auf der Retina korreliert mit dem mit zunehmender Netzhautperipherie charakteristischen Größerwerden der rezeptiven Felder der Retina. Somit ist gezeigt, warum die kreisförmig organisierten rezeptiven Felder in der Netzhautperipherie immer größer werden, wobei das visuelle Auflösungsvermögen bzw. die Fähigkeit, kleine Schrift lesen zu können, immer mehr abnimmt.

Ohne das mit zunehmender Netzhautperipherie charakteristische Größerwerden der rezeptiven Felder würde die Verschmelzung bzw. die Fusion zweier perspektivisch unterschiedlicher monokularer Seheindrücke zu einem einzeln gesehenen binokularen Bild höchstwahrscheinlich überhaupt nicht funktionieren.

2.7. Weiterführende Schlußfolgerungen aus der vorangegangenen Diskussion

2.7.1. Der Horopter und der Panum-Raum

(verwendete Grafiken: **Bild 5.2.**)

Obwohl der Mensch einen Gegenstandspunkt mit beiden Augen zugleich wahrnehmen kann, sieht er diesen normalerweise nicht als ein konfusmachendes Doppelbild. Dies ist jedoch keineswegs selbstverständlich, denn das eine Auge kann besagten Gegenstandspunkt nicht zugleich aus demselben perspektivischen Blickwinkel wahrnehmen wie das andere Auge. Schon um 150 n. Chr. haben deshalb der Astronom und Mathematiker CLAUDIUS PTOLEMÄUS (um 85 - 160 n. Chr.) sowie gegen 1613 der Jesuitenpater FRANCISCUS AGUILONIUS (1566 o. 1567 - 1617) versucht, folgende Frage zu beant-

Bild-Nr.
1
2
3
4
5.1.
5.2.
6
7
8
9
10
11
12
13
14.1.
14.2.

worten: Wo muß sich ein beidäugig wahrgenommenes Sehobjekt im Gegenstandsraum befinden, damit es bei Konvergenzstellung der Hauptsehachsen bzw. der Gesichtslinien nicht als Doppel-, sondern nur als ein einzeln gesehenes Bild wahrgenommen werden kann?[15] Diese Frage wurde schließlich 1818 von dem Mathematiker, Pädagogen und Sportler GERHARD ULRICH ANTON VIETH (1763 - 1836) und 1828 von dem Physiologen JOHANNES PETER MÜLLER (1801 - 1858) durch das Modell des nach ihnen benannten VIETH-MÜLLERschen Horopters beantwortet. Unter dem Horopter kann man sich folgendes vorstellen: Die beiden Netzhäute bilden jeweils ein Koordinatensystem, wobei das Netzhautzentrum der 0-Punkt sein soll. Gegenstandspunkte, deren links- und rechtsäugige Bildprojektion jeweils die gleichen Netzhautkoordinaten besitzen, werden von beiden Augen mit denselben Richtungswerten wahrgenommen. Die Netzhautstellen mit den gleichen Richtungswerten werden korrespondierende Netzhautstellen genannt. Die Menge dieser beidäugig gesehenen Gegenstandspunkte, die jeweils auf der einen Netzhaut mit den gleichen Koordinaten abgebildet werden, wie auf der anderen Netzhaut, bilden im Raum der sichtbaren Außenwelt bzw. im Gegenstandsraum die Figur des Horopters. (siehe: Bild 5.2.) Der von VIETH und MÜLLER entwickelte Horopter basiert in erster Linie auf geometrisch-mathematischen Vorstellungen, die aber nicht ganz mit den wahren Gegebenheiten im Auge übereinstimmen. Der wahre Horopter jedoch, kann auf geometrischem Wege nicht ermittelt werden.[16] Man nennt ihn deshalb auch den empirischen Horopter. „Seine Form ändert sich mit dem Betrachtungsabstand. In zwei Meter Abstand bildet er eine frontoparallele ebene Fläche, in einer größeren Entfernung als zwei Meter ist seine Form konvex, näher als zwei Meter konkav."[17] Hinweis: Es konnte bereits festgestellt werden, daß der empirische Horopter das Korrelat der fokussierten Gegenstandsfläche des didaktischen Mittelauges ist. Es ist demnach nicht falsch, wenn in den verwendeten Grafiken der vorliegenden Diskussion für die Darstellung der fokussierten Gegenstandsfläche des didaktischen Mittelauges eine frontoparallele ebene Fläche gewählt wurde, da der empirische Horopter diese Form ebenfalls besitzen kann.

Der dänische Physiologe PETER LUDVIG PANUM (1820 - 1885) konnte 1858 nun jedoch zeigen, daß beidäugig wahrgenommene Gegenstandspunkte, die sich in einem „kritischen Raum" vor oder hinter dem Horopter befinden, auch noch einzeln und nicht als Doppelbild wahrgenommen werden. Für diesen „kritischen Raum" hat sich im allgemeinen die Bezeichnung des Panum-Raumes eingebürgert. Beidäugig gesehene Gegenstandspunkte

[15] HERZAU, V.: Sensorik des Binokularsehens. In: H. KAUFMANN: Strabismus, 2. Aufl., 1995, S. 123
[16] TROTTER, J.: Das Auge. Ein Handbuch für Augenoptiker, 9. Aufl., 1994, S. 168
[17] LANG, J.: Stellungsanomalien und Motilitätsstörungen. In: H. PAU (Hrsg.), T. AXENFELD (Begr.): Lehrbuch der Augenheilkunde, 13. Aufl., 1992, S. 77

Bild-Nr.
1
2
3
4
5.1.
5.2.
6
7
8
9
10
11
12
13
14.1.
14.2.

außerhalb des Panum-Raumes werden dagegen doppelt gesehen. In diesem Fall spricht man von physiologischer Diplopie. Die Frage ist nun, durch welche optischen Gesetzmäßigkeiten bzw. durch welche Zusammenhänge die Existenz des Panum-Raumes schlüssig zustandekommt.

2.7.2. Der Antagonismus zwischen ipsi- und kontralateraler Netzhaut

(verwendete Grafiken: **Bild 4 ; 8 ; 9 ; 11**)

Wie aus Bild 4 zu erkennen ist, kann man ein zugleich mit zwei Augen betrachtetes Sehobjekt nur dann als binokulares Einzelbild wahrnehmen, wenn die rechts- und linksäugige Perspektive vom Gehirn zu einem binokularen Gesamtbild zusammengedreht wird, wobei die Drehung der rechtsäugigen Perspektive entgegengesetzt zu der der linksäugigen Perspektive erfolgt. Daraus läßt sich folgendes ableiten: Das Bild von einem Sehobjekt bzw. von einem Gegenstandspunkt muß der rechtsäugigen Netzhaut eine Information liefern, die sich zu der Information der linksäugigen Netzhaut irgendwie entgegengesetzt bzw. antagonistisch verhält. Ist dies nicht gegeben, können die rechts- und linksäugige Perspektive dieses Gegenstandspunktes nicht normal zusammengedreht werden, und es muß in einem solchen Fall ein Doppelbild entstehen. Wie aber kann der Antagonismus zwischen links- und rechtsäugiger Netzhaut zustandekommen? Nun, ein Gegenstandspunkt kann so positioniert sein, daß er sich proximal (vor) zur fokussierten Gegenstandsfläche des kontralateralen Auges befindet, aber zugleich distal (hinter) zur fokussierten Gegenstandsfläche des ipsilateralen Auges. Entsprechend wird auf die kontralaterale Netzhaut ein *proximaler Streukreis* projiziert, aber auf die ipsilaterale Netzhaut ein *distaler Streukreis*. Somit läßt sich unübersehbar ein Antagonismus erkennen, durch den die Bedingung für das Entstehen eines binokularen Einzelbildes erfüllt ist. (siehe: Bild 8, 9 und 11)

2.7.3. Ergebnis

Damit ist gezeigt, daß der von PANUM entdeckte Raum genau der Raum sein muß, den die fokussierten Gegenstandsflächen des ipsi- und des kontralateralen Auge eingrenzen und der von der fokussierten Gegenstandsfläche des didaktischen Mittelauges genau geteilt wird.

Bild-Nr.

1
2
3
4
5.1.
5.2.
6
7
8
9
10
11
12
13
14.1.
14.2.

3. Womit könnte der 6-schichtige Aufbau des Corpus geniculatum laterale (CGL) und die Tatsache, daß sich die alternierende Augenzugehörigkeit dieser Schichten von der zweiten zur dritten Schicht umkehrt, zu tun haben ?

Aus folgenden Gedanken läßt sich zu dieser Frage eine hypothesenhafte Anwort herleiten:

3.1. Die Dispersion des Lichtes

(verwendete Grafiken: **Bild 12**)

Der Brennpunkt für das stärker gebrochene blaue Licht liegt näher an der Linse als der für das schwächer gebrochene rote Licht. „Eine einfache Linse kann daher von einem weißen Gegenstand höchstens für eine der darin enthaltenene Farben ein scharfes Bild herstellen, das mit andersfarbigen Rändern umgeben ist.“[18] (siehe: Bild 12)

3.1.1. Das Gesetz der scharfen Abbildung

In einem optischen System kann strenggenommen ein völlig scharfes Bild auf der Bildebene nur von einer einzigen Gegenstandsebene erzielt werden.[19] Darauf wurde schon bei Punkt 2.3. hingewiesen. Zusätzlich ist nun auch noch folgendes zu berücksichtigen: Eine einfache Linse kann einen Gegenstandspunkt, der sich auf der fokussierten Gegenstandsebene befindet, nur mit dem Licht *einer einzigen* Wellenlänge (monochromatisches Licht) auf der Bildebene scharf abbilden.

3.1.2. Die Dispersion des Lichtes im Auge

(verwendete Grafiken: **Bild 12**)

Das menschliche Auge ist für kurzwelliges blaues Licht kurzsichtig, für langwelliges rotes Licht weit- bzw. übersichtig. Dagegen wird grünes Licht bzw. Licht mittlerer Wellenlängen im Netzhautzentrum scharf abgebildet. (siehe: Bild 12)

Den fokussierten Gegenstandsflächen des linken und rechten Auges sowie der des didakti-

[18] Vogel, H. (Hrsg.), C. Gerthsen (Begr.): Physik, 18. Aufl., 1995, S. 493
[19] siehe: Fichtner, P.: Grundlagen der Bilderzeugung. In: G. Teicher (Hrsg.): Handbuch der Fototechnik, 9. Aufl., 1986, S. 61

Bild-Nr.

1
2
3
4
5.1.
5.2.
6
7
8
9
10
11
12
13
14.1.
14.2.

schen Mittelauges muß somit im Sinne einer scharfen Abbildung spektraler Lichtstrahlen auf der Bildfläche das Licht mittlerer Wellenlängen bzw. grünes Licht zugeordnet werden.

3.2. Der Antagonismus des Farbspektrums

Der scharfe Bildpunkt von kurzwelligen blauen Lichtstrahlen liegt vor dem Netzhautzentrum. Die blauen bzw. kurzwelligen Lichtstrahlen werden also vor dem Netzhautzentrum zum scharfen Bildpunkt geschnitten und kreuzen sich entsprechend, um dann zur Netzhaut hin **divergierend** auf die Retina aufzutreffen. Kurzwellige blaue Lichtstrahlen sollen deshalb als *gekreuzte Lichtstrahlen* betrachtet werden.

Anders ist dies bei den grünen (mittelwelligen) und den roten (langwelligen) Lichtstrahlen. Ihr scharfer Bildpunkt liegt auf bzw. hinter dem Netzhautzentrum. Die roten und grünen Lichtstrahlen werden also *nicht* vor dem Netzhautzentrum zum scharfen Bildpunkt geschnitten und bleiben somit ungekreuzt, da sie zur Netzhaut hin **konvergierend** auf die Retina auftreffen. Grüne und rote Lichtstrahlen sollen deshalb als *ungekreuzte Lichtstrahlen* betrachtet werden.

In dem vom menschlichen visuellen System wahrnehmbaren Farb- bzw. Lichtwellenspektrum (etwa 400nm - 700nm) ist also ein Antagonismus zwischen gekreuzten und ungekreuzten Lichtstrahlen enthalten. Demnach müssen z.B. die Reaktionen des Auges bzw. der Netzhaut auf kurzwellige blaue Lichtstrahlen in irgendeiner Weise antagonistisch zu denen der langwelligen roten Lichtstrahlen sein. Es stellt sich somit folgende Frage: Wodurch zeigt sich dieser im Farbspektrum enthaltene Antagonismus, wenn ein einzelner Gegenstandspunkt, der sich z.B. in der Peripherie der fokussierten Gegenstandsfläche des didaktischen Mittelauges bzw. in der Peripherie des empirischen Horopters befindet, sowohl auf die ipsi- als auch auf die kontralaterale Netzhaut abgebildet wird?

3.3. Die fiktive Bildschale der scharfen Abbildung

(verwendete Grafiken: **Bild 11**)

Die fiktive Bildschale der scharfen Abbildung ist eine gedachte Fläche, auf die jene Gegenstandspunkte jeweils als ein scharfer Bildpunkt abgebildet werden, die sich auf der fokussierten Gegenstandsfläche des didaktischen Mittelauges befinden. (siehe: Bild 11) Ein Gegenstandspunkt, der auf der fokussierten Gegenstandsfläche des didaktischen Mittelauges positioniert ist, kann demnach also nur auf der fiktiven Bildschale der scharfen Abbildung als scharfer Bildpunkt abgebildet werden.

Bild-Nr.

1
2
3
4
5.1.
5.2.
6
7
8
9
10
11
12
13
14.1.
14.2.

Weiterhin können in diesem Zusammenhang von dem besagten Gegenstandspunkt nur die Lichtstrahlen mittlerer Wellenlängen bzw. die grünen Lichtstrahlen scharf abgebildet werden, da bereits bei Punkt 3.1.1. festgestellt wurde, daß der fokussierten Gegenstandsfläche des didaktischen Mittelauges das Licht mittlerer Wellenlängen bzw. grünes Licht zugeordnet werden muß. Damit läßt sich aus den Bildern 13, 14.1. und 14.2. folgendes erkennen:

- Von einem Gegenstandspunkt, der sich in der Peripherie der fokussierten Gegenstandsfläche des didaktischen Mittelauges (bzw. in der Peripherie des empirischen Horopters) befindet, wird unabhängig von der Wellenlänge des wahrnehmbaren Lichtspektrums ein *proximaler Streukreis* als Bild auf die kontralaterale Netzhaut, aber ein *distaler Streukreis* als Bild auf die ipsilaterale Netzhaut projiziert. Folglich rufen die Lichtstrahlen des gesamten wahrnehmbaren Farbspektrums - also die roten, grünen und blauen Lichtstrahlen - in der ipsilateralen Netzhaut eine Reaktion hervor, die zu der in der kontralateralen Netzhaut antagonistisch ist. (siehe Tabelle: Bild 14.1.)

- Diesbezüglich ist jedoch auch noch ein Antagonismus zwischen den gekreuzten und ungekreuzten spektralen Lichtstrahlen zu berücksichtigen, der sich mit Hilfe der fiktiven Bildschale der scharfen Abbildung erkennen läßt. Demnach muß im kontralateralen Auge der proximale Streukreis der blauen Lichtstrahlen eine Reaktion in der Netzhaut hervorrufen, die sich antagonistisch zu jenen Reaktionen verhält, die durch die proximalen Streukreise der grünen und roten Lichtstrahlen in derselben Netzhaut hervorgerufen werden. Gleiches gilt dann auch für das ipsilaterale Auge. In diesem erzeugt der distale Streukreis der blauen Lichtstrahlen in der Netzhaut eine Reaktion, die sich zu jenen Reaktionen antagonistisch verhält, die durch die distalen Streukreise der grünen und roten Lichtstrahlen in derselben Netzhaut hervorgerufen werden.

Somit läßt die Abbildung der spektralen Lichtstrahlen *eines einzelnen* Gegenstandspunktes auf der peripheren Netzhaut des rechten und des linken Auges jeweils ein kreis- bzw. ellipsenförmiges Unschärfensystem erkennen, das sich durch einen **Zentrum-Umfeld-Antagonismus** charakterisieren läßt. (siehe hierzu: Bild 13 und 14.1.) Ein solcher Zentrum-Umfeld-Antagonismus existiert in den rezeptiven Feldern der Netzhaut (siehe: Bild 10) und wurde um 1950[20] erstmals durch STEPHEN WILLIAM KUFFLER (1913 - 1980) entdeckt. Der Antagonismus des Farbspektrums bzw. zwischen den gekreuzten und ungekreuzten spektralen Lichtstrahlen spiegelt sich demzufolge in dem Zentrum-Umfeld-Antagonismus der rezeptiven Felder wider. Der Antagonismus zwischen

[20] HUBEL, D. H.: Auge und Gehirn. Neurobiologie des Sehens, 2. Aufl., 1990, S. 48

Bild-Nr.
1
2
3
4
5.1.
5.2.
6
7
8
9
10
11
12
13
14.1.
14.2.

der Reaktion der Netzhaut auf blaues Licht und der Reaktion derselben Netzhaut auf grünes und rotes Licht scheint also demnach wahren Gegebenheiten zu entsprechen.
Die Lichtinformationen der ipsi- und kontralateralen Retina werden schließlich im Corpus geniculatum laterale (CGL) zusammengeführt. Diesbezüglich lassen sich zwei wesentliche Feststellungen treffen:

- Ein Gegenstandspunkt soll sich in der Peripherie der fokussierten Gegenstandsfläche des didaktischen Mittelauges bzw. in der Peripherie des empirischen Horopters befinden. Lichtstrahlen *einer einzigen* Wellenlänge des wahrnehmbaren Farbspektrums, die von diesem Gegenstandspunkt als Bild auf die Retina projiziert werden, rufen auf der ipsilateralen Netzhaut eine Reaktion hervor, die sich zu der auf der kontralateralen Netzhaut antagonistisch verhält.

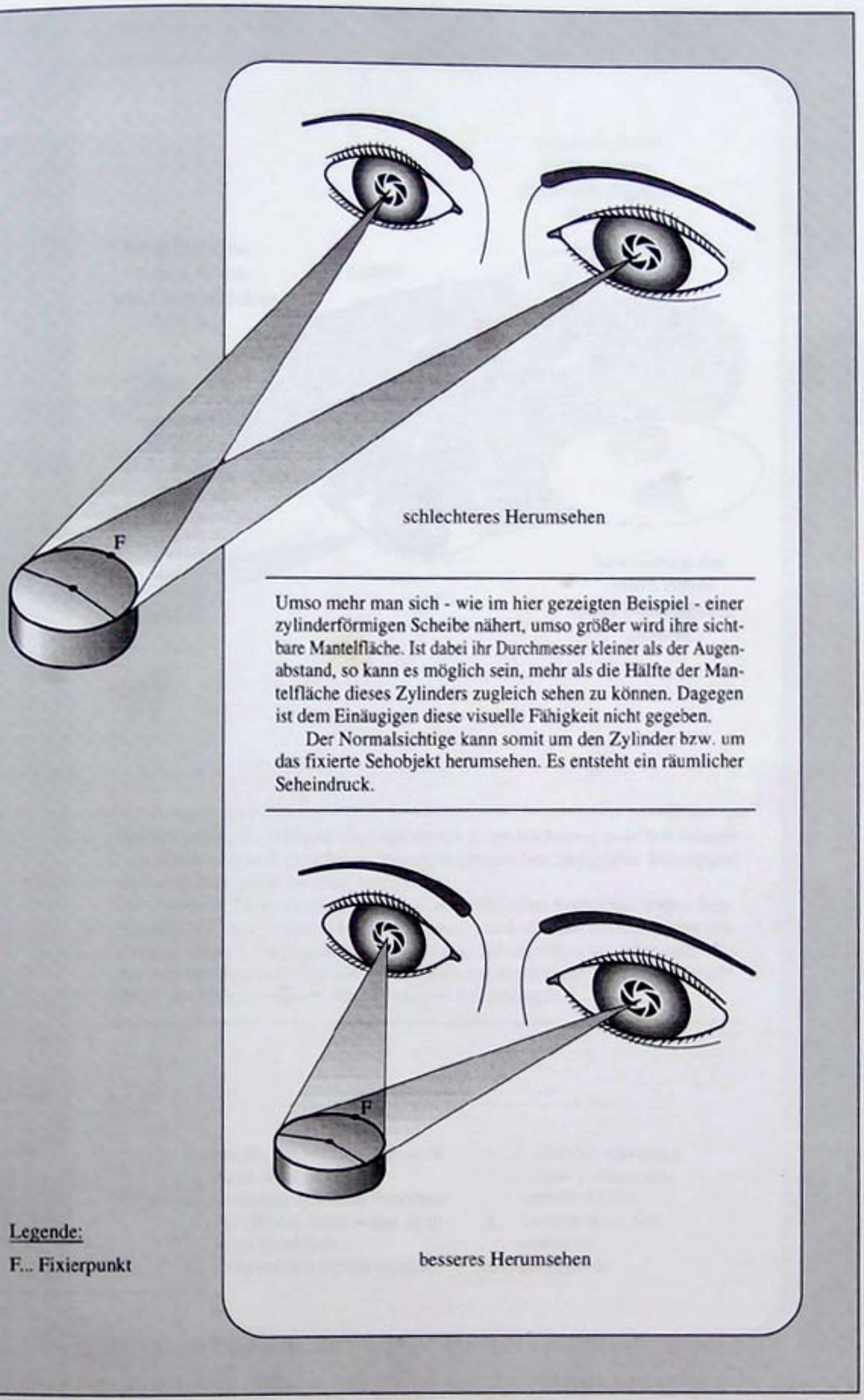
- Die blauen Lichtstrahlen, die von diesem Gegenstandspunkt als Bild auf eine *einzelne* Netzhaut projiziert werden, rufen in dieser Netzhaut eine Reaktion hervor, die sich zu den Reaktionen derselben Netzhaut auf grüne und rote Lichtstrahlen antagonistisch verhält.

Im Bild 14.2. ist die Verknüpfung der beiden letztgenannten Feststellungen dargestellt. Als Ergebnis läßt sich das gleiche alternierende Prinzip erkennen, das auch für die alternierende Augenzugehörigkeit der 6 Schichten des CGLs zutrifft.

3.4. Ergebnis

Beim Menschen läßt sich aus dem Streukreisverhalten des wahrnehmbaren Farbspektrums auf der ipsi- und auf der kontralateralen Netzhaut das gleiche alternierende Prinzip erkennen, das auch für die alternierende Augenzugehörigkeit der 6 Schichten des CGLs zutrifft.
Als Hypothese läßt sich deshalb vermuten, daß der 6-schichtige Aufbau des menschlichen CGLs bzw. des seitlichen Kniehöckers und die Umkehrung der alternierenden Augenzugehörigkeit der Schichten dieses Gehirnteils von der zweiten zur dritten Schicht möglicherweise irgend etwas mit der Dispersion des Lichtes zu tun haben könnten.
Das dazu aufgezeigte Gedankenmodell, das auf einem Antagonismus zwischen konvergierenden und divergierenden Lichtstrahlen aufgebaut ist, läßt zwar Fragen offen, dafür macht es jedoch den Sinn bzw. das Vorhandensein des typischen Zentrum-Umfeld-Antagonismus' der rezeptiven Felder der Netzhaut plausibel, der erstmals von KUFFLER vor fast einem halben Jahrhundert entdeckt wurde.

Bild-Nr.
1
2
3
4
5.1.
5.2.
6
7
8
9
10
11
12
13
14.1.
14.2.



Umso mehr man sich - wie im hier gezeigten Beispiel - einer zylinderförmigen Scheibe nähert, umso größer wird ihre sichtbare Mantelfläche. Ist dabei ihr Durchmesser kleiner als der Augenabstand, so kann es möglich sein, mehr als die Hälfte der Mantelfläche dieses Zylinders zugleich sehen zu können. Dagegen ist dem Einäugigen diese visuelle Fähigkeit nicht gegeben.

Der Normalsichtige kann somit um den Zylinder bzw. um das fixierte Sehobjekt herumsehen. Es entsteht ein räumlicher Seheindruck.

Legende:

F... Fixierpunkt

Bild 1: Der Vorteil des (normalen) beidäugigen Sehens für die Entfernungseinschätzung von Sehobjekten

Bild-Nr.

1

2

3

4

5.1.

5.2.

6

7

8

9

10

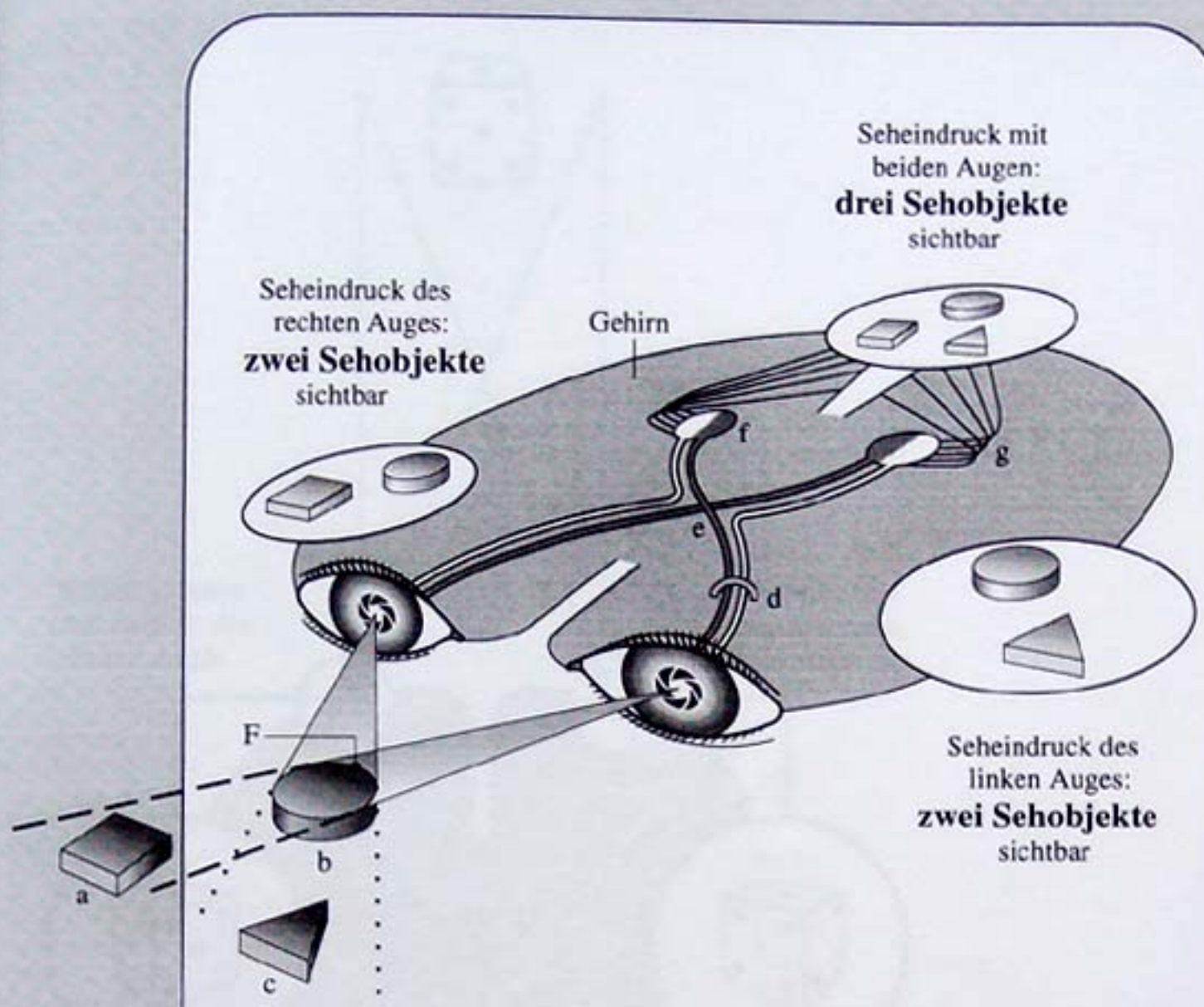
11

12

13

14.1.

14.2.



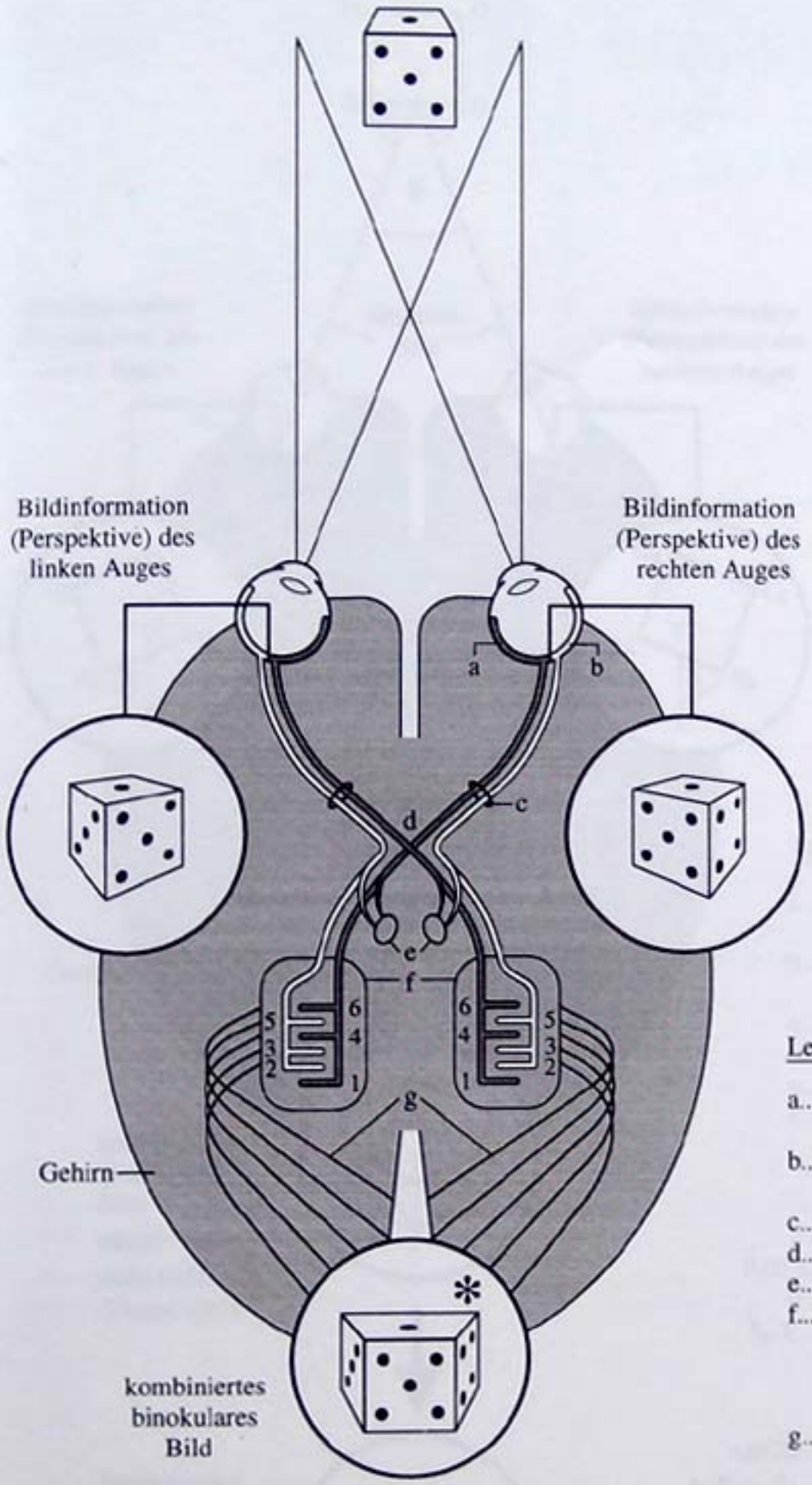
Im hier gezeigten Beispiel sind mit einem Auge höchstens *zwei* Sehobjekte (a und b oder b und c) sichtbar. Dagegen können beidäugig *drei* Sehobjekte (a, b und c) zugleich gesehen werden.
Der Sehraum, für den dem einen Auge aufgrund eines undurchsichtigen Sehobjektes die Sicht verdeckt bleibt, verkleinert sich also bei Zuhilfenahme des zweiten Auges. Dadurch kann man - normales Sehvermögen vorausgesetzt - um den scheibenförmigen Zylinder und somit um das fixierte Sehobjekt herumsehen. Im Gehirn entsteht ein räumlicher Seheindruck.

Legende:

a... nur für das rechte Auge sichtbares Sehobjekt
b... beidäugig sichtbares Sehobjekt
c... nur für das linke Auge sichtbares Sehobjekt
d... Sehnerv (des linken Auges)
e... Sehnervkreuzung
f... Corpus geniculatum laterale (CGL)
g... Gratioletsche Sehstrahlung
F... Fixierpunkt

Bild 2: Räumliches Sehen / Das für das eine Auge sichtbare Sehobjekt, für das dem anderen Auge die Sicht verdeckt bleibt

Bild-Nr.
2
3
4
5.1.
5.2.
6
7
8
9
10
11
12
13
14.1.
14.2.



Legende:

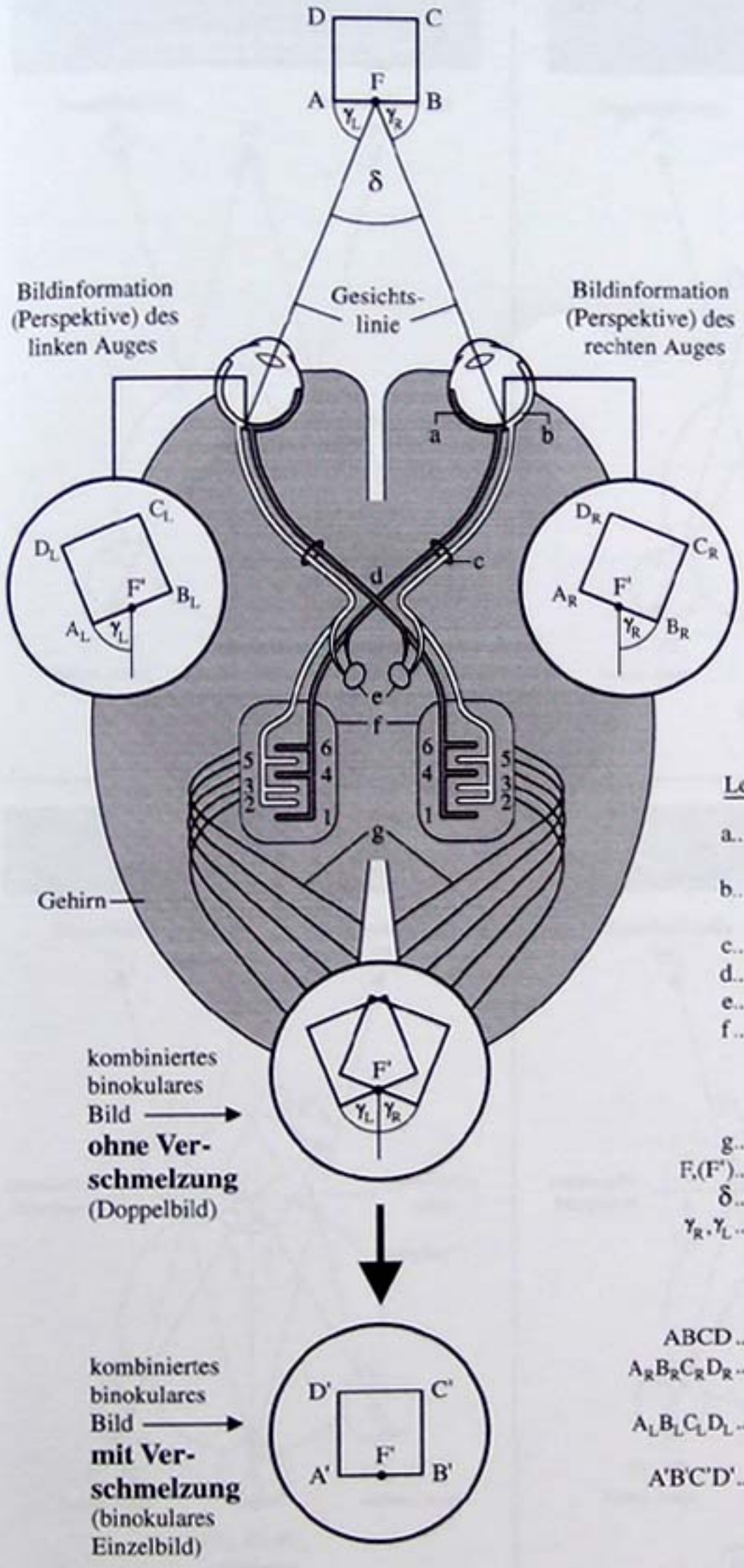
- a... nasale bzw. kontralaterale } Retina
- b... temporale bzw. ipsilaterale } Retina
- c... Sehnerv
- d... Sehnervkreuzung
- e... Colliculi superiores
- f... Corpus geniculatum laterale (CGL) (6-schichtiger Aufbau / schematisiert)
- g... Gratioletsche Sehstrahlung

* Wesentlich ist der Gedanke, einen Würfel (Kantenlänge < Augenabstand) von vier Seiten (also um diesen herum-) sehen zu können. Der Widerspruch, daß man zwangsläufig gegen Grundgesetze der monokularen Perspektive verstoßen muß, wenn man mehr als die Hälfte der Oberfläche eines Würfels in der Schräg- bzw. Kavalliersperspektive darstellen will, soll dagegen vernachlässigt werden.

Bild 3: Räumliches Sehen / Darstellung mit Hilfe eines Würfels in der Schrägperspektive

Bild-Nr.

3
4
5.1.
5.2.
6
7
8
9
10
11
12
13
14.1.
14.2.



Legende:

- a... nasale bzw. kontralaterale } Retina
- b... temporale bzw. ipsilaterale } Retina
- c... Sehnerv
- d... Sehnervkreuzung
- e... Colliculi superiores
- f... Corpus geniculatum laterale (CGL) (6-schichtiger Aufbau / schematisiert)
- g... Gratioletsche Sehstrahlung
- F,(F')... Fixierpunkt (sein Bildpunkt)
- δ... Konvergenzwinkel
- γ_R, γ_L... von der rechts- bzw. linksäugigen Gesichtslinie eingeschlossener Winkel mit der Frontseite des Würfels
- ABCD... Deckfläche des Würfels
- $A_RB_RC_RD_R$... rechtsäugiges Bild der Deckfläche
- $A_LB_LC_LD_L$... linksäugiges Bild der Deckfläche
- A'B'C'D'... vom Gehirn verschmolzenes Bild der Deckfläche

Bild 4: Räumliches Sehen / Darstellung mit Hilfe der Deckfläche eines Würfels aus der Ansicht von oben bzw. aus der Draufsicht

Bild-Nr.

4
5.1.
5.2.
6
7
8
9
10
11
12
13
14.1.
14.2.

Bild 5.1.a: Das didaktische Mittelauge im Modell des VIETH-MÜLLERschen Horopters
Das herrschende Gedankenmodell

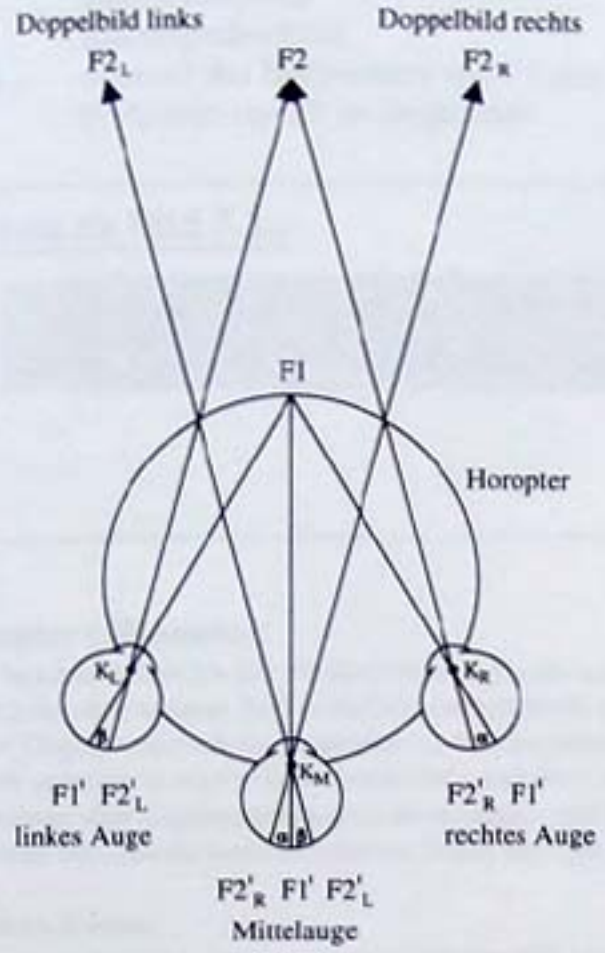


Bild 5.1.b: Projektion der Deckfläche eines Würfels (Ansicht von oben) in das VIETH-MÜLLERsche Horoptermodell

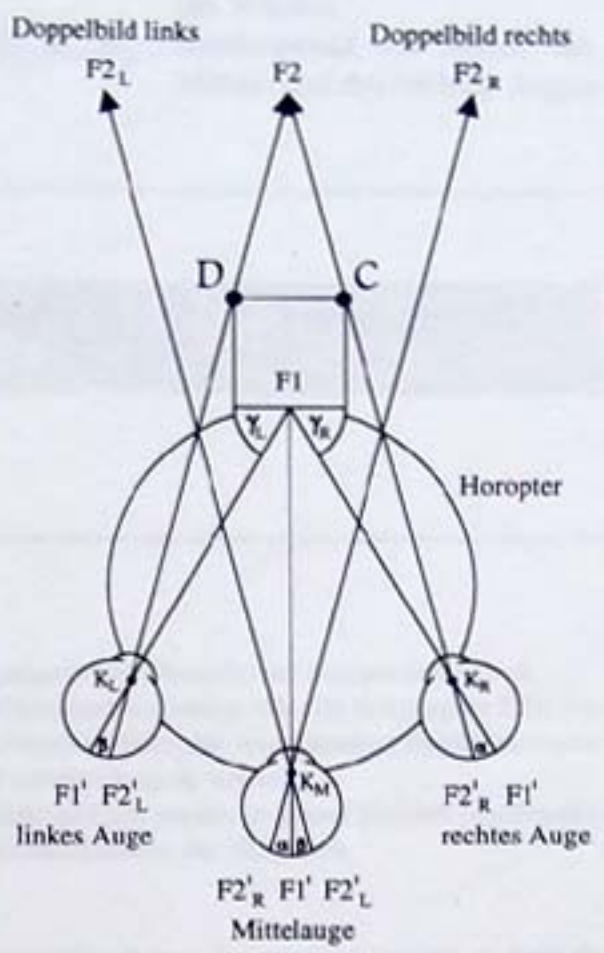


Bild 5.1.c: Projektion der links- bzw. rechtsäugigen Perspektive der Deckfläche eines Würfels in das didaktische Mittelauge

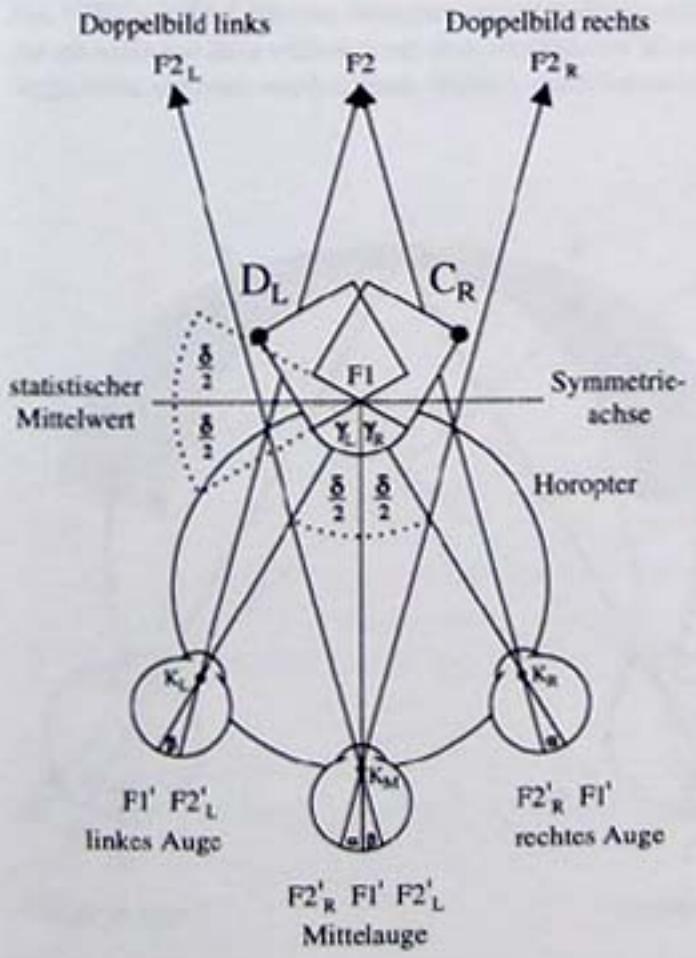


Bild 5.1.d: wie Bild 5.1.c, aber Fixierpunktentfernung des didaktischen Mittelauges genauso groß wie die des linken bzw. rechten Auges

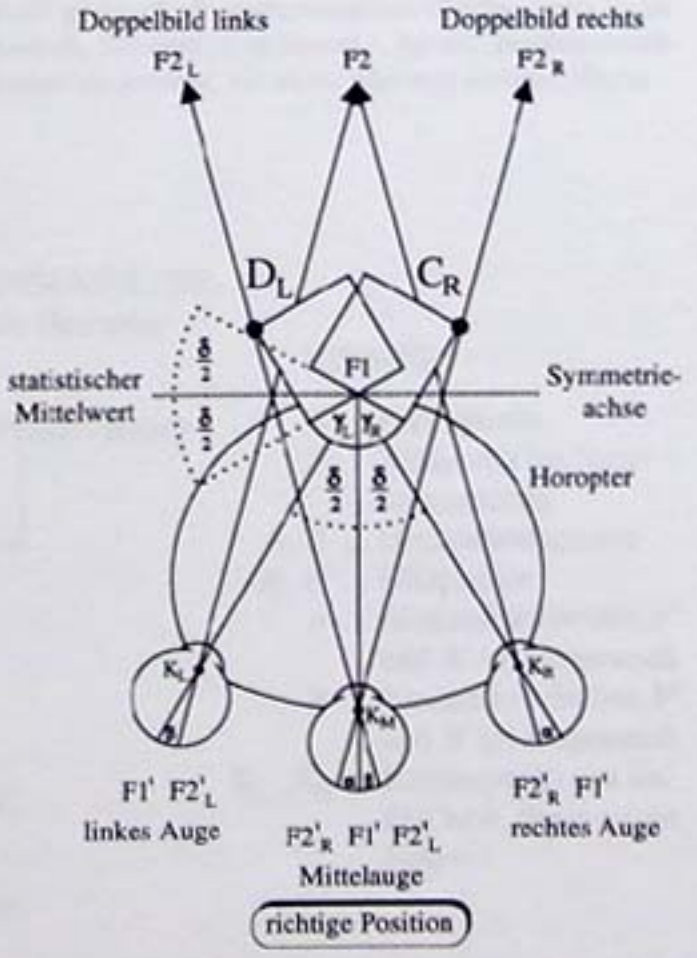


Bild 5.1.: Die richtige Position des didaktischen Mittelauges im VIETH-MÜLLERschen Horoptermodell (Erläuterung und Legende nachfolgende Seite)

Bild-Nr.

5.1.
5.2.
6
7
8
9
10
11
12
13
14.1.
14.2.

Legende zu Bild 5.1.:

C (C_R)... Eckpunkt der Deckfläche des Würfels
D (D_L)... Eckpunkt der Deckfläche des Würfels
F1... Fixierpunkt
F2... distaler Bildpunkt
δ... Konvergenzwinkel
$\alpha=\beta$... Abstand des Bildpunktes von F1 zum Bildpunkt von F2 im Bogenmaß
γ_R, γ_L... von der rechts- bzw. linksäugigen Gesichtslinie eingeschlossener Winkel mit der Frontseite des Würfels
K_L, K_M, K_R... Knotenpunkt des linken, des Mittel- und des rechten Auges

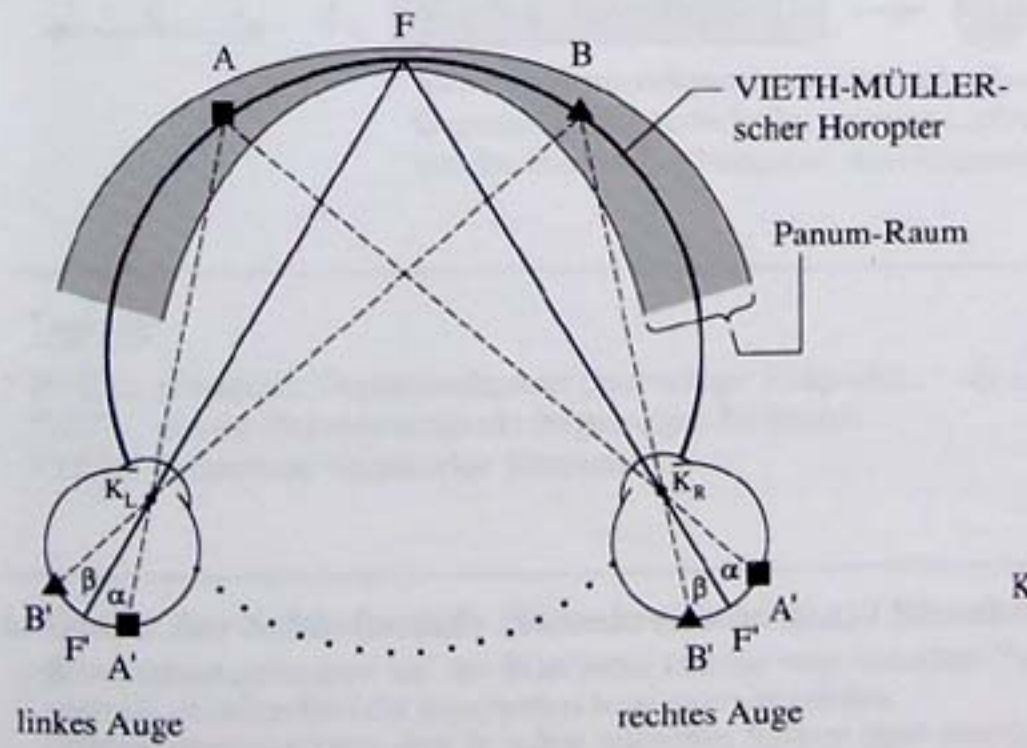
Erläuterung zu Bild 5.1.:

Wenn C auf $\overline{K_R F2}$ liegt (Bild 5.1.b), dann muß C_R auf $\overline{K_R F2}$ liegen. Dies ist nur der Fall, wenn $\overline{K_R F1} = \overline{K_M F1} = \overline{K_L F1}$ (Bild 5.1.d).

Horopter (allgemein):
Jede Netzhaut bildet jeweils ein Koordinatensystem, wobei das Netzhautzentrum (Foveola) der Nullpunkt sein soll. Besitzt das rechtsäugige Bild eines Gegenstandspunktes die gleichen Netzhautkoordinaten wie das linksäugige Bild desselben Gegenstandspunktes, so handelt es sich um korrespondierende Netzhautbilder, die vom visuellen System zu einem einzeln gesehenem Bild verschmolzen und somit nicht als Doppelbild wahrgenommen werden.
Die Menge aller Gegenstandspunkte, deren rechts- und linksäugige Bildprojektion jeweils aufgrund gleicher Netzhautkoordinaten miteinander korrespondieren, bilden die Figur bzw. die Gegenstandsfläche des Horopters.

Panum-Raum:
Ist ein Gegenstandspunkt nur etwas vor (proximal) oder nur etwas hinter (distal) dem Horopter positioniert, so befindet er sich immer noch im Panum-Raum (siehe Skizze). Ein solcher Gegenstandspunkt besitzt die Eigenschaft, daß zwischen seiner rechts- und linksäugigen Bildprojektion auch noch eine Korrespondenz besteht. Ein Gegenstandspunkt, der zwar nicht mehr auf dem Horopter aber noch im Panum-Raum gelegen ist, wird somit noch nicht als Doppelbild gesehen.

VIETH-MÜLLERscher Horopter und empirischer Horopter:
Der VIETH-MÜLLERsche Horopter ist kreisförmig und basiert auf geometrisch-mathematischen Überlegungen. Er ist jedoch nicht mit dem wahren bzw. dem empirischen Horopter identisch. Der emprische Horopter, der auf geometrischem Wege nicht ermittelt werden kann, bildet je nach Betrachtungsabstand ein *konvexe*, ein *ebene* oder eine *konkave* Fläche.

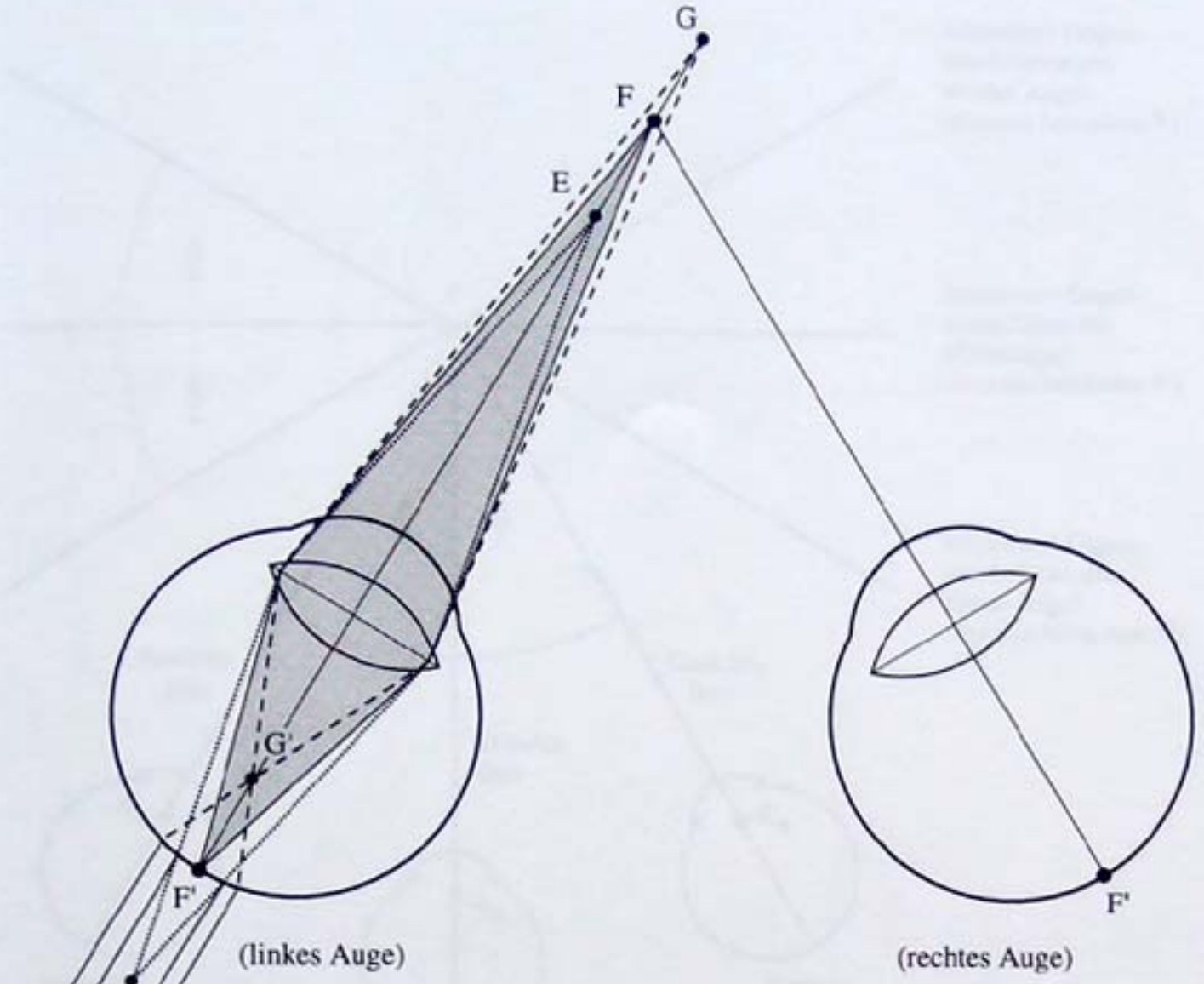


Legende:

F ... Fixierpunkt
F' ... Bildpunkt im Netzhautzentrum
A, B ... Gegenstandspunkte
A', B' ... Bildpunkte
α ... Abstand zwischen F' und A' im Bogenmaß
β ... Abstand zwischen F' und B' im Bogenmaß
K_L, K_R ... Knotenpunkt des linken bzw. des rechten Auges

Bild 5.2.: Erklärung des VIETH-MÜLLERschen Horoptermodells, verbunden mit der (schematisierten) Darstellung des Panum-Raumes

Bild-Nr.
5.2.
6
7
8
9
10
11
12
13
14.1.
14.2.



(linkes Auge) (rechtes Auge)

p... **proximaler Streukreis** → ⊖

Von Gegenstandspunkten, die sich *proximal* (davor) zur fokussierten Gegenstandsfläche befinden, werden Lichtstrahlen ausgesandt, die erst hinter der Bildfläche (Netzhaut) zum Bildpunkt geschnitten werden.

d... **distaler Streukreis** → ⊕

Von Gegenstandspunkten, die sich *distal* (hinter) zur fokussierten Gegenstandsfläche befinden, werden Lichtstrahlen ausgesandt, die schon vor der Bildfläche (Netzhaut) zum Bildpunkt geschnitten werden.

Legende:

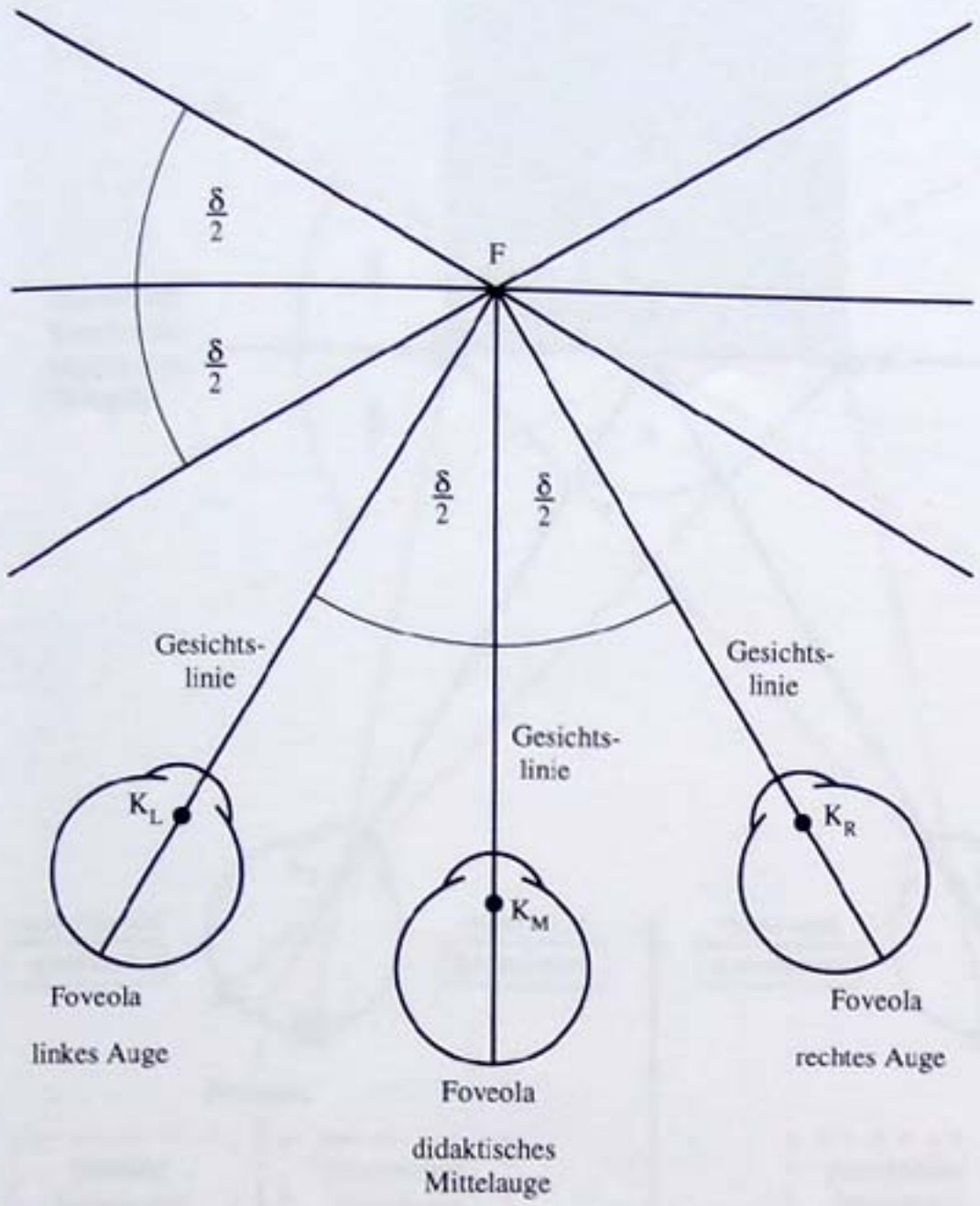
E (E')... proximaler Gegenstandspunkt (zugehöriger Bildpunkt)
G (G')... distaler Gegenstandspunkt (zugehöriger Bildpunkt)
F (F')... Fixierpunkt (zugehörige Bildpunkte)

⊕,⊖ ... Assoziation für den Antagonismus zwischen den Streukreisprojektionen

Bild 6: Gesetz der Schärfentiefe (Streukreistoleranz) / Streukreisantagonismus

Streukreisprojektionen auf der Bildfläche können vom visuellen System bis zu einer bestimmten Größe noch als ein scharfes Bild interpretiert bzw. toleriert werden.
Strenggenommen kann aber in jedem optischen System einer einzigen Bildfläche (z.B. Netzhaut) immer nur eine fokussierte Gegenstandsfläche zugeordnet werden. Auf einer Netzhautstelle gehört also zu einem scharf abgebildeten Bildpunkt auch nur ein einziger Gegenstandspunkt einer bestimmten Gegenstandsentfernung. Alle anderen Gegenstandspunkte werden dagegen auf diese Netzhautstelle jeweils als ein Streukreis projiziert.

Bild-Nr.
6
7
8
9
10
11
12
13
14.1.
14.2.



Vorausgesetzt sei folgendes:

- In einem optischen System gehört zu jeder Bildfläche (z.B. Netzhaut) genau eine fokussierte Gegenstandsfläche (optisches Gesetz; siehe Bild 6)
- Die Fokussierentfernung des didaktischen Mittelauges ist genauso groß wie des rechten bzw. linken Auges: $\overline{K_M F} = \overline{K_L F} = \overline{K_R F}$ (siehe Bild 5.1.d)
- zwischen dem linken und dem rechten Auge besteht symmetrische Konvergenz / beide Augen (und somit auch das didaktische Mittelauge) besitzen identische Brechkraftverhältnisse
- Die Gegenstandsfläche eines Auges soll sich senkrecht zur Gesichtslinie desselben Auges befinden.

Aus den genannten Voraussetzungen folgt, daß sich die Gegenstandsflächen der Augen im Fixierpunkt schneiden. Die Gegenstandsfläche des linken Auges ist dabei um die Hälfte des Konvergenzwinkels in Uhrzeigerrichtung, die Gegenstandsfläche des rechten Auges um die Hälfte des Konvergenzwinkels entgegen der Uhrzeigerrichtung gegen die Gegenstandsfläche des Mittelauges verdreht. Der dabei entstehende Gegenstandsraum wird durch die Gegenstandsfläche des Mittelauges genau geteilt.
Die Gegenstandsfläche des Mittelauges bildet also einen statistischen Mittelwert.

Legende:

K_L, K_M, K_R ... Knotenpunkt des linken, des Mittel- und des rechten Auges
F ... Fixierpunkt
δ ... Konvergenzwinkel

* Die Frage, ob die fokussierte Gegenstandsfläche eines Auges als frontoparallele ebene Fläche oder aber als Schale (also als konvex- oder konkavförmige Fläche) betrachtet werden muß, kann hier vernachlässigt werden.

Bild 7: Die fokussierte Gegenstandsfläche des didaktischen Mittelauges als statistischer Mittelwert

Bild-Nr.

7
8
9
10
11
12
13
14.1.
14.2.

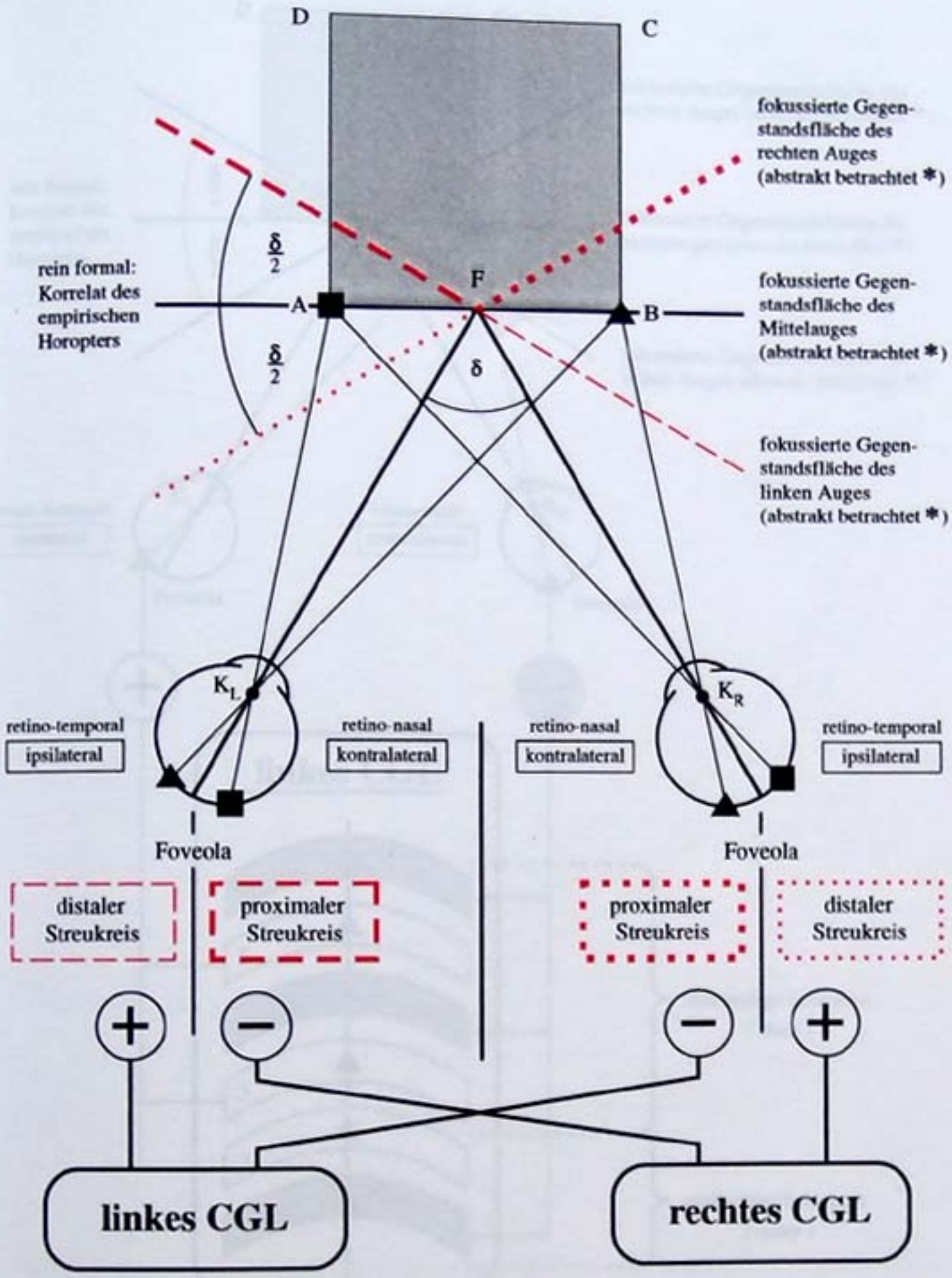


Bild 8: Der Antagonismus zwischen ipsi- und kontralateraler Netzhaut

Befindet sich ein Gegenstandspunkt hinter (distal) der fokussierten Gegenstandsfläche des ipsilateralen Auges und zugleich vor (proximal) der fokussierten Gegenstandsfläche des kontralateralen Auges, so wird zwischen den Streukreisbildern, die von diesem Gegenstandspunkt auf beide Netzhäute projiziert werden, ein Antagonismus erzeugt.

Bild-Nr.

8

9

10

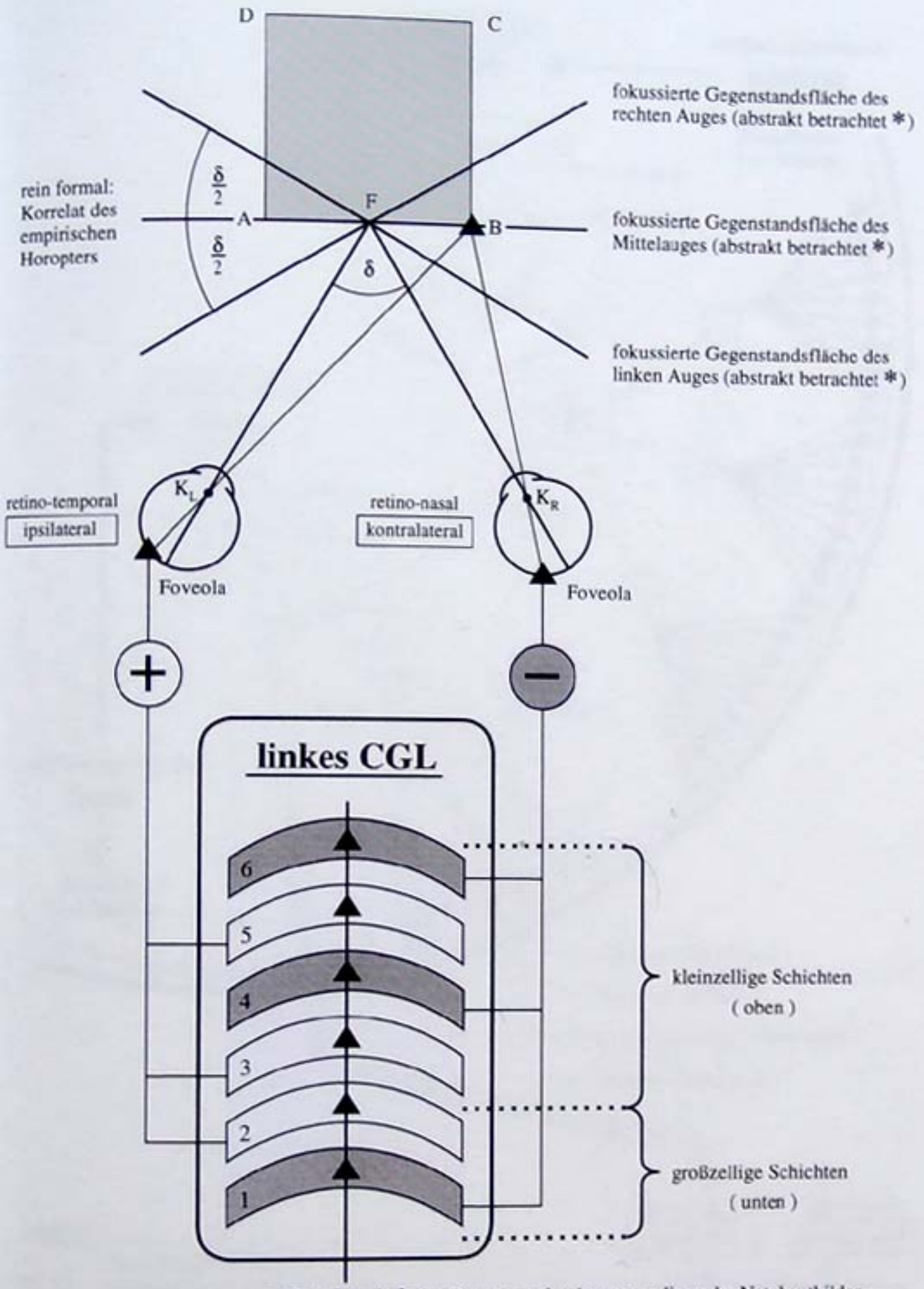
11

12

13

14.1.

14.2.



Legende:

ABCD ... Deckfläche eines Würfels
K_L, K_R ... Knotenpunkt des linken und des rechten Auges
F ... Fixierpunkt
⊖ ... Assoziation für Bildprojektion als proximaler Streukreis
⊕ ... Assoziation für Bildprojektion als distaler Streukreis
δ ... Konvergenzwinkel
* ... siehe Bild 7

Bild 9: Topographisches Prinzip korrespondierender Netzhautorte im CGL

Bild-Nr.

9

10

11

12

13

14.1.

14.2.

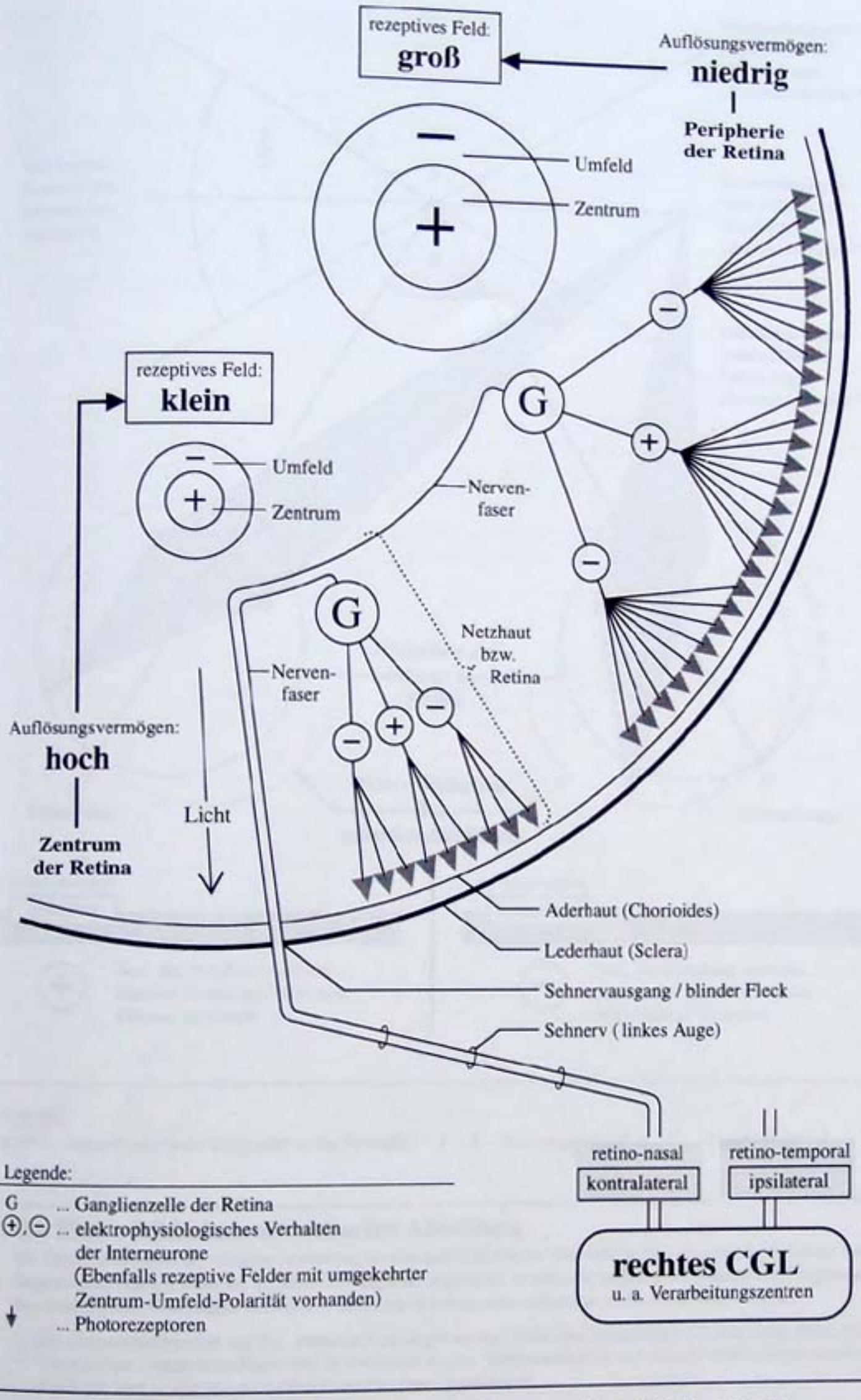
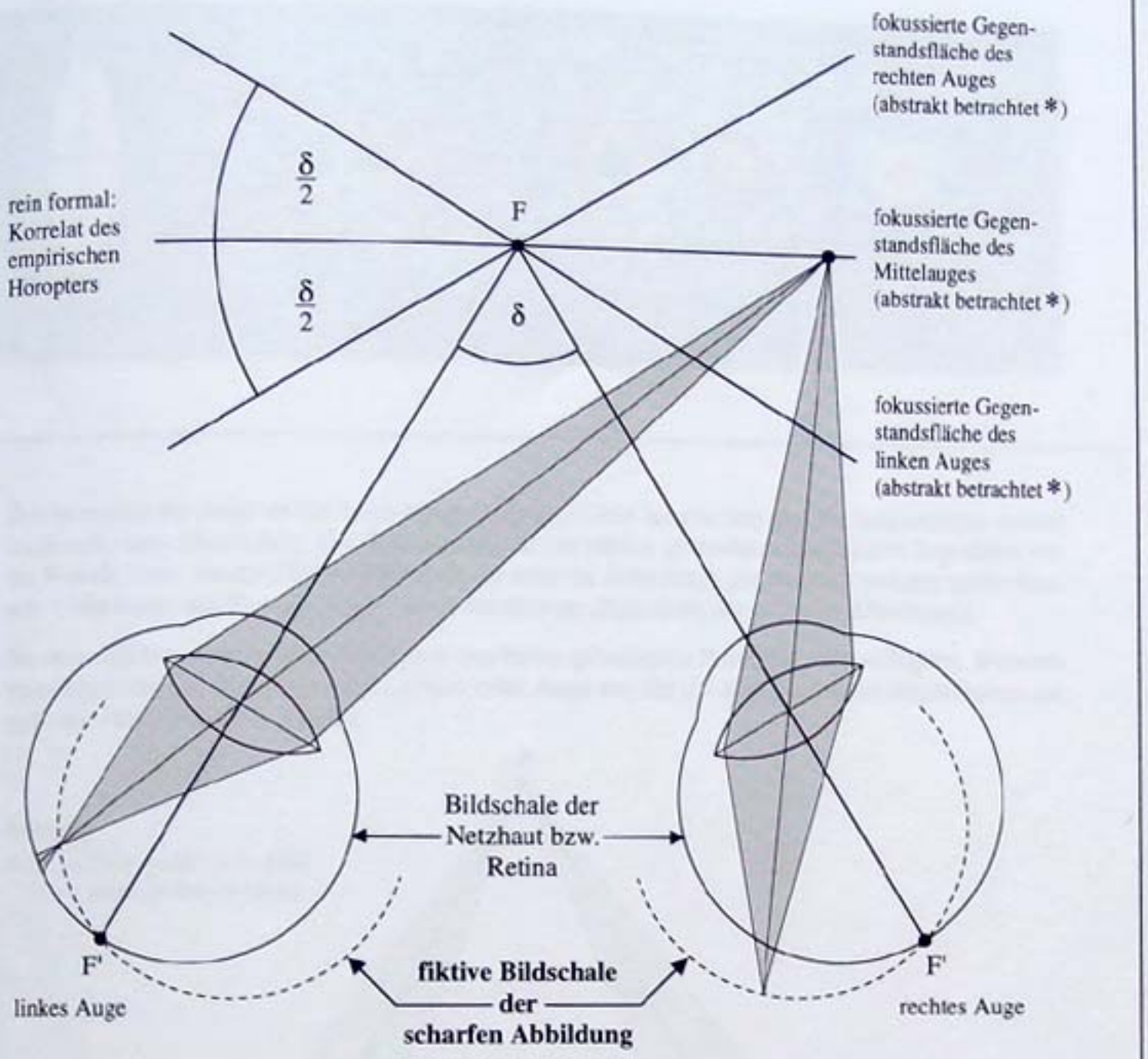


Bild 10 a): Das Größerwerden des Durchmessers der rezeptiven Felder mit zunehmender Netzhautperipherie (schematisiert)
b): Die Abnahme des visuellen Auflösungsvermögens mit zunehmender Netzhautperipherie
c): Der Antagonismus der kreisförmig organisierten rezeptiven Felder

Bild-Nr.
10
11
12
13
14.1.
14.2.



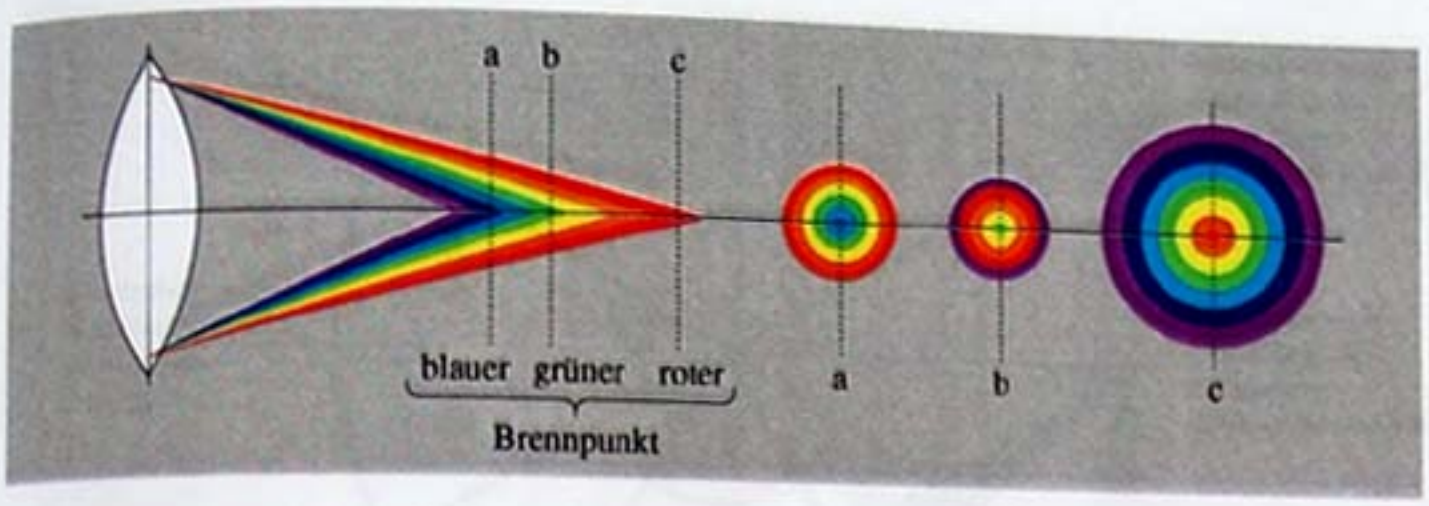
Legende:
F, (F')... Fixierpunkt (sein Bildpunkt in der Foveola) / δ... Konvergenzwinkel / * ... siehe Bild 7

Bild 11: Die fiktive Bildschale der scharfen Abbildung

Die fiktive Bildschale der scharfen Abbildung ist eine gedachte Fläche (Darstellung hier als gekrümmte Linie), auf die jene Gegenstandspunkte jeweils als ein scharfer Bildpunkt abgebildet werden, die sich auf der fokussierten Gegenstandsfläche des didaktischen Mittelauges befinden. Dabei läßt sich folgendes erkennen (siehe auch Bild 6 und 8):

1. Ein Gegenstandspunkt auf der fokussierten Gegenstandsfläche des Mittelauges befindet sich distal (hinter) zur fokussierten Gegenstandsfläche des ipsilateralen Auges. Entsprechend ist das scharfe Abbild eines solchen Gegenstandspunktes schon *vor* der ipsilateralen Netzhaut positioniert.
2. Dagegen befindet sich derselbe Gegenstandspunkt proximal (davor) zur fokussierten Gegenstandsfläche des kontralateralen Auges. Somit ist das scharfe Abbild des erwähnten Gegenstandspunktes erst *hinter* der kontralateralen Netzhaut positioniert.
3. Der Fixierpunkt befindet sich nicht nur auf der fokussierten Gegenstandsfläche des didaktischen Mittelauges, sondern auch auf der des rechten und des linken Auges. Er ist somit der einzige Gegenstandspunkt, der sowohl auf der linksäugigen als auch auf der rechtsäugigen Netzhaut zugleich scharf abgebildet werden kann.

Bild-Nr.
11
12
13
14.1.
14.2.



- Das menschliche Auge ist für kurzwelliges (blaues) Licht kurzsichtig und für langwelliges (rotes) Licht weit- bzw. übersichtig. Der Schnittpunkt für das stärker gebrochene blaue Licht liegt dabei vor der Foveola (bzw. vor der fiktiven Bildschale der scharfen Abbildung), der für das schwächer gebrochene rote Licht hinter der Foveola (bzw. hinter der fiktiven Bildschale der scharfen Abbildung).
- Im menschlichen Auge gibt es *drei* Typen von farbempfindlichen Photorezeptoren (Zapfen). Dementsprechend soll die Dispersion des Lichtes beim Auge nur für die *drei* spektralen Grundfarben rot, grün und blau betrachtet werden.

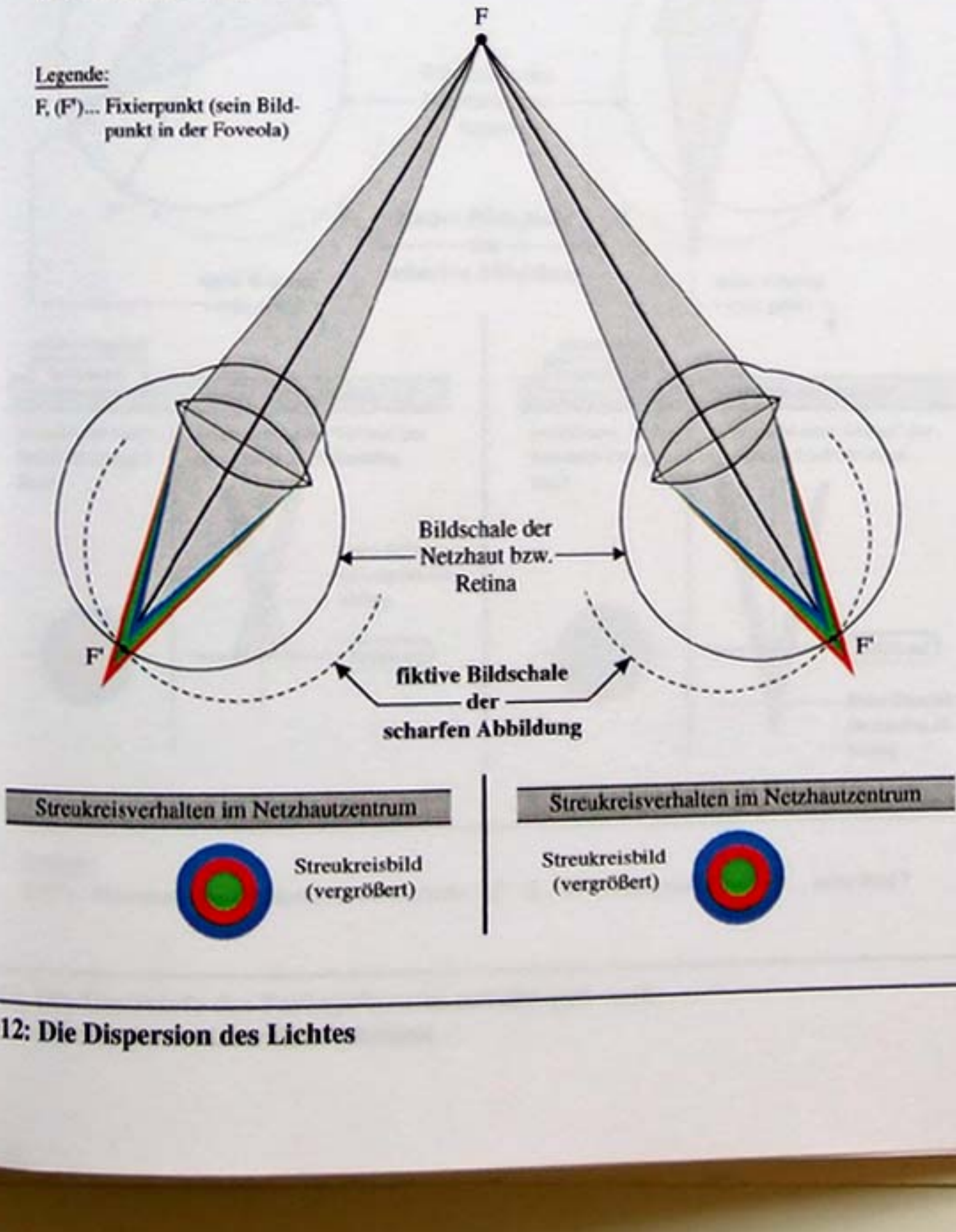


Bild-Nr.

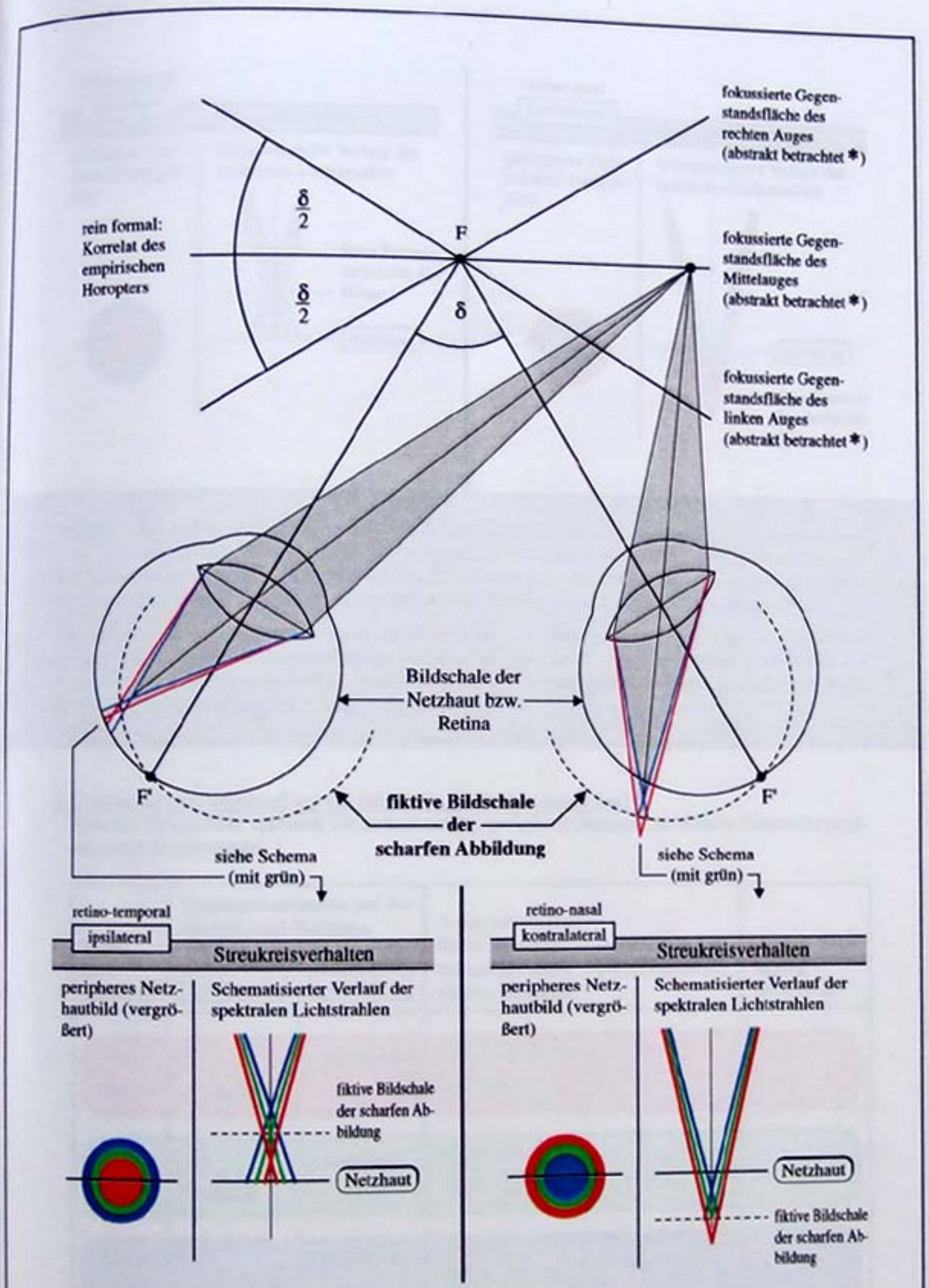
12

13

14.1.

14.2.

Bild 12: Die Dispersion des Lichtes



Legende:
F, (F')... Fixierpunkt (sein Bildpunkt in der Foveola) / δ... Konvergenzwinkel / * ... siehe Bild 7

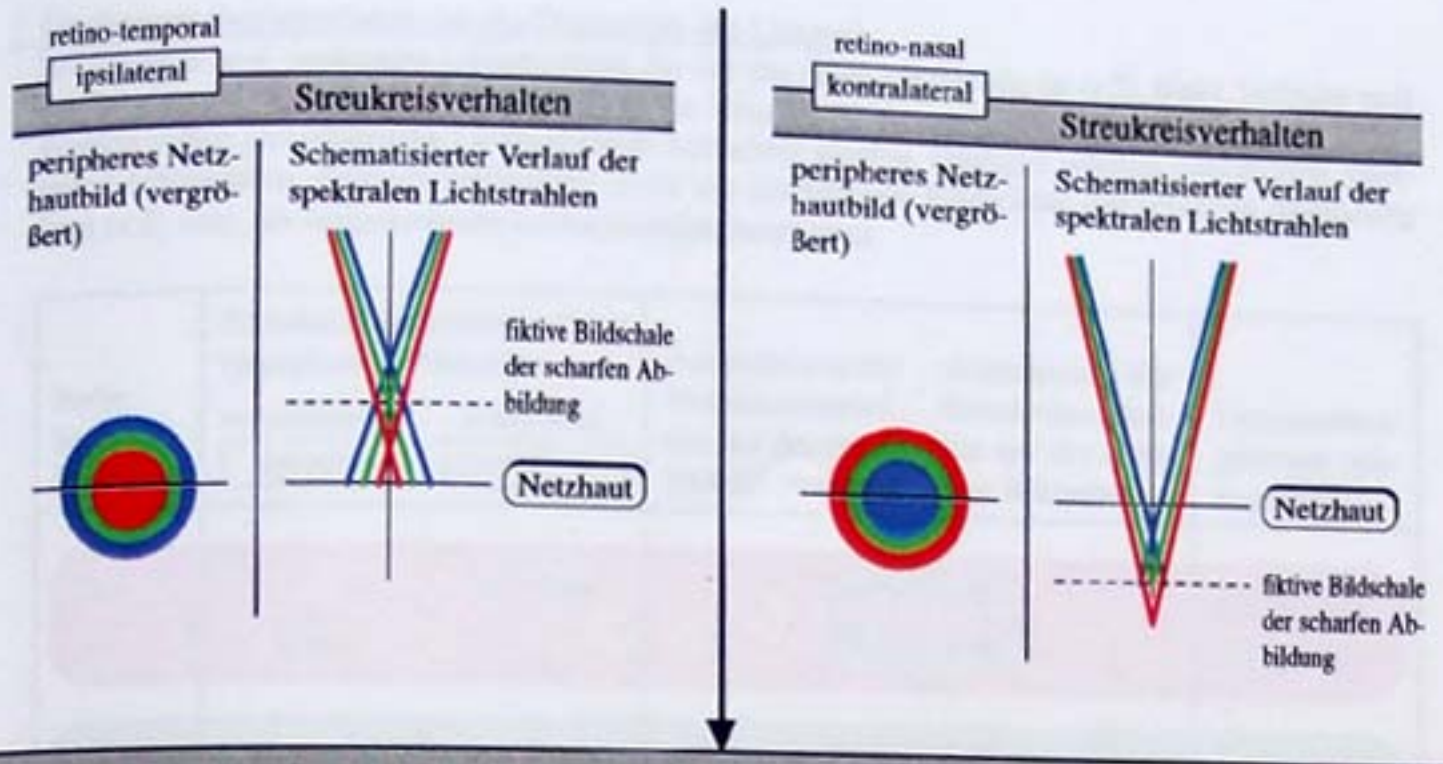
Bild-Nr.

13

14.1.

14.2.

Bild 13: Die Unschärfe des Farbspektrums auf der ipsi- und auf der kontralateralen Netzhaut



Es ist auffällig, daß nicht nur die Anzahl der verschiedenen Typen farbempfindlicher Photorezeptoren (Zapfen) im menschlichen Auge mit *drei* angegeben werden kann, sondern daß auch die Anzahl der Schichten, mit deren Hilfe das Netzhautbild eines einzelnen Auges im Corpus geniculatum laterale (CGL) repräsentiert wird, ausgerechnet *drei* beträgt (siehe Bild 3, 4, 8 und 14.2.).

Verfolgt man diesen Gedanken weiter, so läßt sich aus dem Streukreisverhalten des Farbspektrums auf der ipsi- und auf der kontralateralen Netzhaut das gleiche alternierende Prinzip erkennen, das auch für die Anordnung der sechs Schichten im Corpus geniculatum laterale (CGL) zutreffend ist. Folgender Gedankengang wird dazu aufgezeigt:

1. Überlegung (hervorgehend aus der Schärfentiefe [Streukreistoleranz]):
Wird der farbige bzw. spektrale Lichtstrahl auf die (periphere) Netzhaut als distaler Streukreis projiziert oder als proximaler ?

Farbe bzw. Spektrum	Streukreisverhalten auf der (peripheren) Netzhaut: retino-temporal / ipsilateral	Streukreisverhalten auf der (peripheren) Netzhaut: retino-nasal / kontralateral	Assoziation für Streukreisverhalten auf der (peripheren) Netzhaut	siehe 2. Überlegung (Bild 14.2.)	siehe 2. Überlegung (Bild 14.2.)
rot	distal	proximal	−		
rot			+		
grün	distal	proximal	−		
grün			+		
blau	distal	proximal	−		
blau			+		

weiter: siehe Bild 14.2.

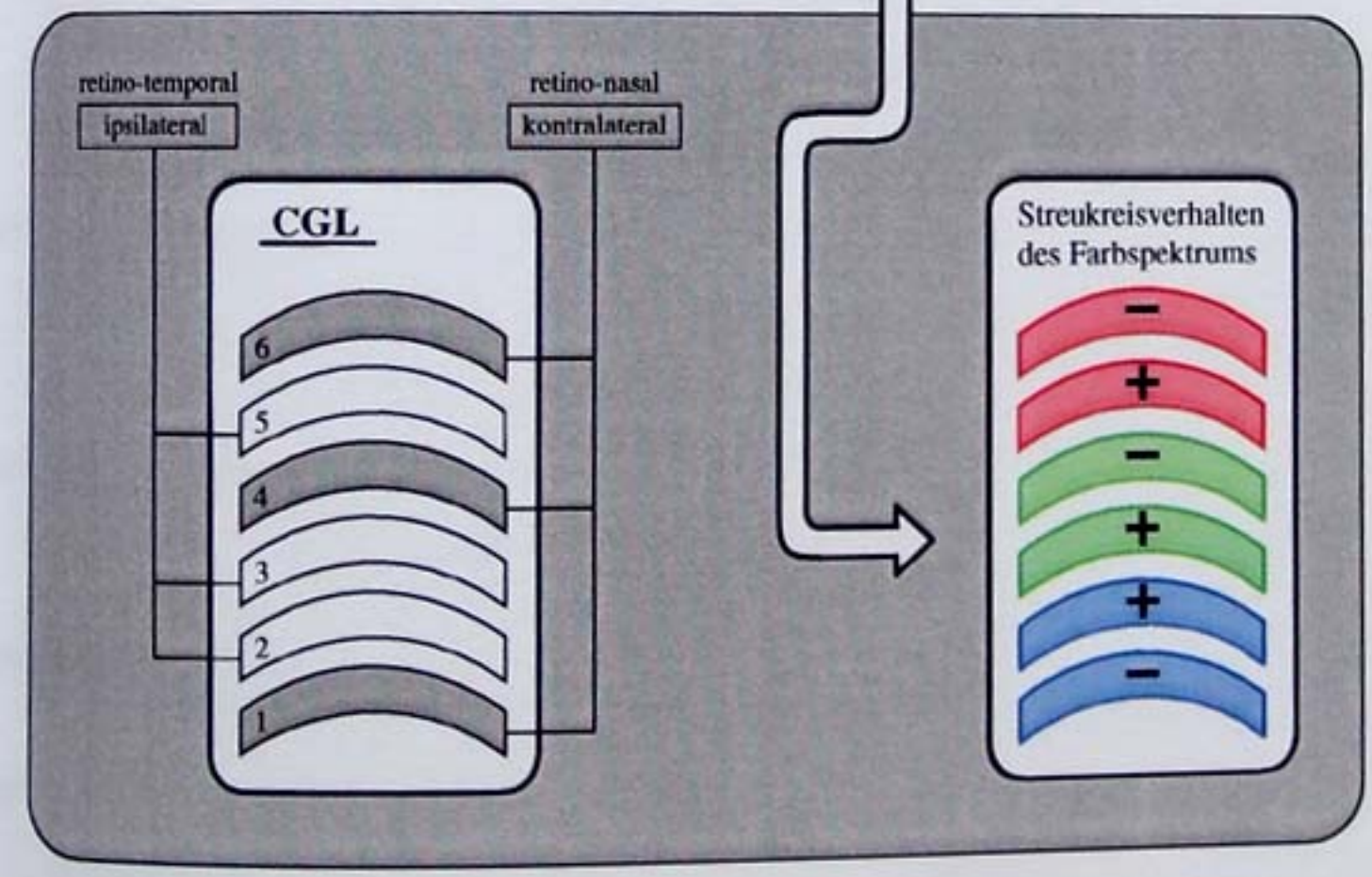
Bild-Nr.
14.1.
14.2.

Bild 14.1.: Das alternierende Prinzip des Farbspektrums zwischen dem ipsi- und dem kontralateralen Auge

2. Überlegung (hervorgehend aus der Dispersion des Lichtes):
Bei farbigen bzw. spektralen Lichtstrahlen, für die das Auge kurzsichtig ist (z.B. blau), befindet sich der Schnittpunkt vor der fiktiven Bildschale der scharfen Abbildung (siehe Bild 14.1.). Solche Lichtstrahlen sollen als **gekreuzte Lichtstrahlen** betrachtet werden. Dagegen werden farbige bzw. spektrale Lichtstrahlen, deren Schnittpunkt *nicht* vor der fiktiven Bildschale der scharfen Abbildung liegt (z.B. rot), als **ungekreuzte Lichtstrahlen** betrachtet.

Farbe bzw. Spektrum	Streukreisverhalten auf der (peripheren) Netzhaut: retino-temporal / ipsilateral	retino-nasal / kontralateral	Assoziation für Streukreisverhalten auf der (peripheren) Netzhaut	Assoziation für Streukreisverhalten auf der fiktiven Bildschale	Lichtstrahlen: gekreuzt oder ungekreuzt
rot	distal	proximal	(−)	+	ungekreuzt
rot			(+)	+	ungekreuzt
grün	distal	proximal	(−)	+	ungekreuzt
grün			(+)	+	ungekreuzt
blau	distal	proximal	(−)	−	gekreuzt
blau			(+)	−	gekreuzt

Vorzeichenaddition



Aus dem Streukreisverhalten des Farbspektrums auf der ipsi- und auf der kontralateralen Netzhaut läßt sich das gleiche alternierende Prinzip erkennen, das ebenfalls charakteristisch für die Anordnung der sechs Schichten im Corpus geniculatum laterale (CGL) ist.

Bild-Nr.

14.2.

Bild 14.2.: (Fortsetzung von Bild 14.1.) Das alternierende Prinzip des Farbspektrums zwischen dem ipsi- und dem kontralateralen Auge

Kurzer historischer Überblick

Wenige historisch wichtige und interessante Daten zur Geschichte der Sehtheorie bzw. zur Geschichte der allgemeinen Optik sollen hier aufgeführt werden:

Altertum	• Reflexionsgesetz bereits bei den Ägyptern bekannt[21] • Vorherrschen der Theorie des Sehstrahls ; Aussage der Theorie des Sehstrahls: Das Auge sendet Sehstrahlen aus, durch welche die Sehobjekte abgetastet werden.[22]
365 - 300 v.Chr.	Euklid von Alexandria • Bis zum 17. Jahrhundert Verwendung seines Werk „Katoptrik" über die geometrische Optik[23]
85 - 160	Claudius Ptolemäus • Erkenntnisse über die Gesetze der Lichtbrechung[21]
965 - 1038	Alhazen (vollständiger Name: Abu Ali al-Hasan Ibn al Hasan Ibn al-Haytham[24]) • Widerlegung der Theorie des Sehstrahls[24] • Verbesserung der Empfangstheorie (Das Auge sendet keine Lichtstrahlen aus, sondern kann diese nur empfangen.) ; Empfangstheorie beginnt sich als neue Sehtheorie durchzusetzen.[24] • Hinweis auf Möglichkeit, mit Hilfe eines gläsernen Kugelsegmentes einen Gegenstand vergrößert erscheinen zu lassen[25] • Erwähnung der Camera obscura[26]
1267	Roger Bacon (1220 - 1292) • Nützlichkeit einer Linse zur Verbesserung der Sehschärfe beim Lesen erkannt ; Entdeckung des Lesesteins und des Vergrößerungsglases ist somit B. zuzuschreiben.[25]
1280 - 1290	Herstellung der ersten Brillen in Norditalien • (Ungeklärtheit, auf welche Persönlichkeit die Erfindung der Brille zurückgeht[25])
Renaissance	Filippo Brunelleschi (1376 - 1446) • Entdeckung der geometrischen Prinzipien der Linearperspektive[27]
1515	Leonardo da Vinci (1452 - 1519) • Ausführliche Beschreibung der Camera obscura[26]

---

[21] siehe: Optisches Museum der Carl-Zeiss-Stiftung Jena (Hrsg.), F. Rossi (Text): Brillen , S. 1, (Im Opt. Museum Jena erhältliche Broschüre zur Geschichte der Brille)
[22] siehe: Vogel, H. (Hrsg.), C. Gerthsen (Begr.): Physik, 18. Aufl., 1995, S. 481
[23] siehe: Collatz, K.-G. u. a. Autoren: Lexikon der Naturwissenschaftler, 1996
[24] siehe: Lindberg, D. C.: Auge und Licht im Mittelalter, 1. Aufl., 1987, zu Alhazen: S. 158-160, 543 ; zu Kepler: S. 349
[25] siehe: Pasco, M.: Die erste Brille. In: Kohlhammer, K. (Hrsg.): Der Augenoptiker, Ausgabe 7 / 1996, S. 12-15
[26] siehe: Marchesi, J. J.: Handbuch der Fotografie. Band 1, 1993, S. 264 - 269
[27] siehe: Parramón, J. M.: Richtig Zeichnen und Malen in der Perspektive, 2. Aufl., 1995, S. 16-19

1583	Georg Bartisch (1535 - 1606) • Erstes (deutschsprachiges) Lehrbuch der Augenheilkunde: „Ophthalmoduleia - das ist Augendienst“[28]
etwa 1610	Johannes Kepler (1571 - 1630) • Theorie des Netzhautbildes entwickelt[24] • Erste exakte Darstellung der Funktionsweise des menschlichen Auges[29] • Begründer der geometrischen Optik[23]
um 1670	Isaac Newton (1643 - 1727) • Entdeckung der Dispersion, der Zerlegung des weißen Sonnenlichtes durch ein lichtbrechendes Prisma in die Spektralfarben[23]
1826	Joseph Nicéphore Niépce (1765 - 1833) • Erste bekannte Fotografie[29]
1838	Charles Wheatstone (1802 - 1875) • Erfindung des Stereoskops ; Theorie der Querdisparation setzt sich durch[30]
1838 / 1839	Georg Friedrich Louis Stromeyer (1804 - 1876) Johann Friedrich Dieffenbach (1792 - 1847) • Ausführung der ersten Schieloperationen ; Heilerziehung beim Schielen bis zu diesem Zeitpunkt auf das Tragen einer (Leder-) Maske beschränkt[31]
19. Aug. 1839	Louis Jacques Mandé Daguerre (1787 - 1851) • Erste praktikable Form der Fotografie[29] • Veröffentlichung der Erfindung der Fotografie - offizielle Geburtsstunde der Fotografie[32]
1858	Hermann von Helmholtz (1821 - 1894) • Erfindung des Augenspiegels ; Erster Mensch, der lebende menschliche Netzhaut sah[33]
1948	Dennis Gabor (1900 - 1979) • Entwicklung der Holographie[23]
um 1950	Stephen William Kuffler (1913 - 1980) • Entdeckung des Zentrum-Umfeld-Antagonismus', der den rezeptiven Feldern der Netzhaut typischerweise zu eigen ist[34]

---

[28] siehe: Tost, M.: Vom Augendienst zur modernen Ophthalmologie. In: Der Rektor der Univ. Halle-Wittenbg. (Hrsg.): scientia halensis. Das Wissenschaftsjournal der Univ. Halle, Ausgabe 1 / 1995, S. 23

[29] siehe: Feldman, A., P. Ford: Erfinder und Wissenschaftler, 1980

[30] siehe: Regan, D., K. Beverly, M. Cynader: Die Wahrnehmung von Bewegung im Raum. In: Wahrnehmung und visuelles System, 1986, S. 98, 99

[31] siehe: Münchow, W.: Geschichte der Augenheilkunde. In: K. Velhagen: Der Augenarzt. Band IX., 2. Aufl., 1983, S. 556-566

[32] siehe: Geiss, I.: Chronik des 19. Jahrhunderts, 1993, S. 310, 311

[33] siehe: Grosse Männer der Weltgeschichte, 1987, S. 198

[34] siehe: Hubel, D. H.: Auge und Gehirn. Neurobiologie des Sehens, 2. Aufl., 1990, S. 48

Literaturverzeichnis

BAIER, W.: Quellendarstellungen zur Geschichte der Fotografie, 3. Aufl., Fotokina, Leipzig 1977

COLLINS, J. F., A. J. AUGUSTIN (Hrsg.): Augenheilkunde, Springer, Berlin-Heidelberg 1996

DE DECKER, W.: Heterotropie (manifester Strabismus). In: H. KAUFMANN: Strabismus, 2. Aufl., Enke, Stuttgart (1995) 209

FICHTNER, P.: Grundlagen der Bilderzeugung. In: G. TEICHER (Hrsg.): Handbuch der Fototechnik, 9., verb. Aufl., Fotokina, Leipzig (1986) 26

FRIEDBURG, D.: Pathologisches Binokularsehen. In: H. KAUFMANN: Strabismus, 2. Aufl., Enke, Stuttgart (1995) 398

GREHN, F., W. LEYDHECKER: Augenheilkunde, 26. überarb. u. aktualisierte Aufl., Springer, Berlin-Heidelberg 1995

GRÜSSER, O.-J., U. GRÜSSER-CORNEHLS: Gesichtssinn und Okulomotorik. In: R. F. SCHMIDT, G. THEWS (Hrsg.): Physiologie des Menschen, 26. Aufl., Springer, Berlin-Heidelberg (1995) 278

HAUGWITZ, T. v.: Augenheilkunde im 20. Jahrhundert. Ergebnisse und Ereignisse im deutschsprachigen Raum, Bücherei des Augenarztes Band 127, Enke, Stuttgart 1991

HERZAU, V.: Sensorik des Binokularsehens. In: H. KAUFMANN: Strabismus, 2. Aufl., Enke, Stuttgart (1995) 118

HOFFMANN, K.-P., C. WEHRHAHN: Zentrale Sehsysteme. In: DUDEL, J., R. MENZEL, R. F. SCHMIDT: Neurowissenschaft. Vom Molekül zur Kognition, Springer, Berlin-Heidelberg (1996) 405

HUBEL, D. H.: Auge und Gehirn. Neurobiologie des Sehens, 2. Aufl., Spektrum der Wiss. Verlagsges., Heidelberg 1990

KAMKE, W., W. WALCHER: Physik für Mediziner, 2., überarb. Aufl., Teubner, Stuttgart 1994

LANG, J.: Stellungsanomalien und Motilitätsstörungen. In: H. Pau (Hrsg.), T. Axenfeld (Begr.): Lehrbuch der Augenheilkunde, 13., völlig neu bearb. Aufl., Fischer, Stuttgart-New York (1992) 77

MARCHESI. J. J.: Handbuch der Fotografie. Band 1 Geschichte; chemische und optische Grundlagen, Photographie, Schaffhausen 1993

SUMPF, K.: Grundriß der Physik, Lax, Hildesheim 1905

TROTTER, J.: Das Auge. Ein Handbuch für Augenoptiker, 9. Aufl., Optik, Trimbach 1994

VOGEL, H. (Hrsg.), C. GERTHSEN (Begr.): Physik, 18., völlig neu bearb. Aufl., Springer, Berlin-New York 1995

Literatur zum kurzen historischen Überblick:

COLLATZ, K.-G. u. a. Autoren: Lexikon der Naturwissenschaftler. Astronomen, Biologen, Chemiker, Geologen, Mediziner, Physiker, Spektrum Akad. Verl., Heidelberg-Berlin 1996

FELDMAN, A., P. FORD : Erfinder und Wissenschaftler. Die Entstehung unserer Zivilisation - von den Anfängen bis heute, Kaiser, Klagenfurt 1980

Grosse Männer der Weltgeschichte. Tausend Biographien in Wort und Bild, Kaiser, Klagenfurt 1987

HUBEL, D. H.: Auge und Gehirn. Neurobiologie des Sehens, am angegebenen Ort

LINDBERG, D. C.: Auge und Licht im Mittelalter. Die Entwicklung der Optik von Alkindi bis Kepler, 1.Aufl., Suhrkamp, Frankfurt a. M. 1987

MARCHESI, J. J.: Handbuch der Fotografie, am angebenen Ort

MÜNCHOW, W.: Geschichte der Augenheilkunde. In: K. VELHAGEN: Der Augenarzt. Band IX, 2., erg. u. überarb. Aufl., Thieme, Leipzig 1983

OPTISCHES MUSEUM DER CARL-ZEISS-STIFTUNG JENA (Hrsg.), F. Rossi (Text): Brillen, (im Opt. Museum J. erhältliche Broschüre zur Geschichte der Brille)

PARRAMÓN, J. M.: Richtig Zeichnen und Malen in der Perspektive, 2., vollst. überarb. Aufl., Fischer, München 1995

PASCO, M.: Die erste Brille. In: K. KOHLHAMMER (Hrsg.): Der Augenoptiker. Monatsmagazin für Augenoptik und Brillenmode, Konradin, Leinfelden-Echterdingen, Ausgabe 7 / 1996

REGAN, D., K. BEVERLY, M. CYNADER: Die Wahrnehmung von Bewegung im Raum. In: Wahrnehmung und visuelles System, Verständliche Forschung, 2. Aufl., Spektrum der Wiss., Heidelberg 1987

TOST, M.: Vom Augendienst zur modernen Ophthalmologie. In: DER REKTOR DER UNIV. HALLE-WITTENBG. (Hrsg.): scentia halensis. Das Wissenschaftsjournal der Martin-Luther-Univ. Halle-Wittenbg., CCA, Halle, Ausgabe 1 / 1995

VOGEL, H. (Hrsg.), C. GERTHSEN (Begr.): Physik, am angegebenen Ort

HETZEL

Art. 18 7002
PP-folienkaschiert

4 013702 005569