Dr. Helmut Goersch
Stellvertr. Direktor der Staatl. Fachschule
für Optik und Fototechnik Berlin

Einführung in das Binokularsehen

(HANS-JOACHIM HAASE zur Vollendung seines 65. Lebensjahres gewidmet.)

Teil I

Vorwort

Jedes Fachgebiet besitzt seine eigene Sprache, mit deren Hilfe sich die Fachleute untereinander verständigen. Ein Lernender muß sich daher zuerst mit den Begriffen des Fachgebietes vertraut machen: Er muß „Vokabeln lernen". Diese Aufgabe wird ihm dann besonders erschwert, wenn verschiedene Fachleute desselben Gebietes unterschiedliche Auffassungen von der Bedeutung gewisser Fachvokabeln besitzen, wenn also die Bedeutung der Fachbegriffe nicht verbindlich festgelegt ist. Hier haben das Deutsche Institut für Normung (DIN) auf nationaler Ebene und die Internationale Organisation für Normung (ISO) auf internationaler Ebene eine besonders wichtige Aufgabe, welche zur Erstellung von sogenannten „Begriffsnormen" führt. Bei dieser Normung von Fachbegriffen geht es in erster Linie um eine *zweckmäßige* Festlegung der Bedeutung aller wichtigen Vokabeln. Die Frage nach einem „richtig oder falsch" einer Definition ist in der Regel unangebracht. Erst wenn eine klare und sinnvolle Definition eines Fachbegriffes in einer Norm festgelegt wurde, ist die Verwendung dieses Begriffes nur noch in dem dort erklärten Sinne *richtig*. So entsteht auf dem Weg der Normung eine geschlossene, in sich widerspruchsfreie Terminologie eines Fachgebietes.

Für das Gebiet der physiologischen Optik liegt noch keine abgeschlossene Norm vor, was schon bei der Vermittlung der Grundlagen dieses Fachgebietes zu gewissen Schwierigkeiten führt. Lediglich eine Reihe von Begriffen aus dem Monokularsehen ist bereits seit April 1972 genormt [1]. Über die Festlegung von Begriffen des Binokularsehens wird schon seit über zehn Jahren diskutiert, was zu einem Normentwurf vom August 1978 geführt hat [2]. Dabei handelt es sich um einen Auszug aus einem Normentwurf zu Begriffen der physiologischen Optik [3]. Bis dieser jedoch (mit eventuellen Änderungen) zur endgültigen Norm verabschiedet wird, werden sicher noch Jahre vergehen.

Aus der Notwendigkeit heraus, einen begrifflich klaren Unterricht über die Grundlagen des Binokularsehens zu gestalten, wird an der Staatlichen Fachschule für Optik und Fototechnik Berlin im Fach „Physiologische Optik" eine Terminologie verwendet, welche hier dargestellt und zur Beschreibung des Binokularsehens benutzt werden soll. Da für das Verständnis der Zusammenhänge im beidäugigen Sehen die Kenntnis einiger Grundlagen aus dem Monokularsehen unerläßlich ist, wird eine Darstellung wesentlicher monokularer Begriffe und Sachverhalte dem eigentlichen Thema vorangestellt.

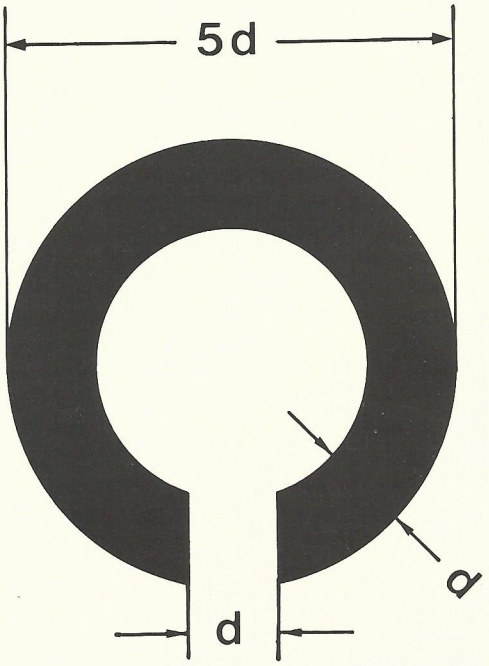


Abb. 1: Der Landoltring als Normzeichen Fmseh

1. Begriffe aus dem Monokularsehen

1.1 Visus

Da das Auflösungsvermögen eines Auges von der Art der zu erkennenden Objekteinzelheiten und von einer Reihe weiterer Umstände abhängt [4], ist zu seiner definierten Messung eine besondere Norm geschaffen worden. Darin wird als *Normsehzeichen* der „Landoltring" festgelegt [5]. Dieses in Abb. 1 dargestellte Normsehzeichen ist ein Kreisring mit einer Aussparung von der Größe der Strichbreite. Der Innendurchmesser des Landoltringes beträgt das Dreifache der Strichbreite, der Außendurchmesser also das Fünffache. Das mit diesem Normsehzeichen unter den in der Norm genau festgelegten Bedingungen [6] gemessene Auflösungsvermögen eines Auges wird als „Sehschärfe" oder „Visus" bezeichnet. Das geprüfte Auge muß die jeweilige Lage der Öffnung des Ringes erkennen. Die *Maßeinheit* für die Sehschärfe

heißt „Visus 1,0“ und ist durch einen Landoltring festgelegt, dessen Öffnung unter einem Gesichtswinkel von 1 Winkelminute erscheint, wobei senkrecht auf die Ebene der Ringfläche geblickt werden muß. Gesichtswinkel sind Knotenpunktwinkel [7], da nur diese objektseitig und bildseitig gleich sind. Als Winkelmaß ist die Einheit für die Sehschärfe entfernungsunabhängig. Der Zusammenhang zwischen der Winkelgröße und dem Durchmesser von Landoltringen in Abhängigkeit von der Betrachtungsentfernung ist jedem einschlägigen Lehrbuch zu entnehmen [8]. In Tab. 1 sind die in der Norm festgelegten Visusstufen wiedergegeben. Dabei handelt es sich um eine logarithmische Abstufung, so daß der Quotient der Größe eines Sehzeichens und der des nächst kleineren $\sqrt[10]{10}$ beträgt. Damit ergibt sich eine von Stufe zu Stufe gleichwertige Steigerung der Sehleistung in der Erkennung von Landoltringöffnungen.

Im folgenden soll auf einen häufig anzutreffenden Fehler aufmerksam gemacht werden. Die höchste Sehschärfe V_{max} eines Auges ist für dieses Auge die Sehschärfe 100 % und kann irgendeine der Visusstufen gemäß Tab. 1 sein. Der Visus 100 % stellt nicht in jedem Fall die Visusstufe 1,0 dar, sondern nur dann, wenn $V_{max} = 1{,}0$ ist. Der Höchstvisus V_{max} ist meistens größer als 1,0. Als Meßwert ergibt sich stets eine Visusstufe nach Norm und keine Prozentzahl. Wenn es zum Beispiel heißt, mit refraktiver Vollkorrektion sei bei einem Auge ein Visus von 125 % erreicht worden, dann ist diese Ausdrucksweie falsch. Gemeint ist, daß hier eine Sehschärfe von $V_{max} = 1{,}25$ erreicht wurde. Dieser Wert stellt für das betreffende Auge den Visus 100 % dar. Es gibt keine höhere Sehschärfe als 100 %! Anders ausgedrückt: V = 100 % ist gleichbedeutend mit V_{max}. Prozentangaben für den Visus sind stets auf den individuellen Wert V_{max} bezogen und werden nur als Angaben für relative Sehschärfen gebraucht. Also noch einmal richtig: Es wurde ein Visus von z. B. 0,8 erreicht (und nicht 80 %).

Bei subjektiven Refraktionsbestimmungen werden nun meistens Buchstaben und Zahlen als Sehzeichen verwendet, die bei gleicher Größe und Strichstärke und unter sonst gleichen Bedingungen in der Regel leichter zu erkennen sind als die Lage der Öffnung von Landoltringen. Schon untereinander bieten ja Buchstaben und Zahlen unterschiedliche Erkennungsschwierigkeiten, wie jeder Refraktionist weiß. Anhand solcher Sehproben gemachte Aussagen über den Visus eines Auges sind also nicht ganz normgerecht. Für die Praxis der Augenglasbestimmung spielt das jedoch keine Rolle, da hierbei die durch Meßgläser hervorgerufenen Visusänderungen nur zur Ermittlung der optimalen refraktiven Korrektion dienen. Lediglich bei (klinischen) Sehschärfeprüfungen für Gutachterzwecke sind Landoltringe als Sehzeichen in der vorgeschriebenen Weise zu benutzen, um normgerechte Visuswerte zu erhalten.

Bezeichnung der Visusstufen nach DIN 58 220	Winkel für Aussparung und Strichbreite des Landoltringes	alte Visusbezeichnung bei Prüfentfernung			Sehvermögen
		5 m	6 m	20 feet	
0,1	10′	5/50	6/60	20/200	schwachsichtig (amblyop)
0,125	8′	5/40	6/50	20/160	
0,16	6′18″	5/30	6/40	20/125	
0,2	5′	5/25	6/30	20/100	
0,25	4′	5/20	6/25	20/80	
0,3	3′12″	5/15	6/20	20/60	
0,4	2′30″	5/12,5	6/15	20/50	herabgesetzt
0,5	2′	5/10	6/12	20/40	
0,6	1′36″	5/8	6/10	20/30	
0,8	1′15″	5/6	6/7,5	20/25	ausreichend bis sehr gut
1,0	1′	5/5	6/6	20/20	
1,25	48″	5/4	6/5	20/16	
1,6	38″	5/3	6/4	20/12,5	
2,0	30″	5/2,5	6/3	20/10	überdurchschnittl.

Tabelle 1: Sehschärfe

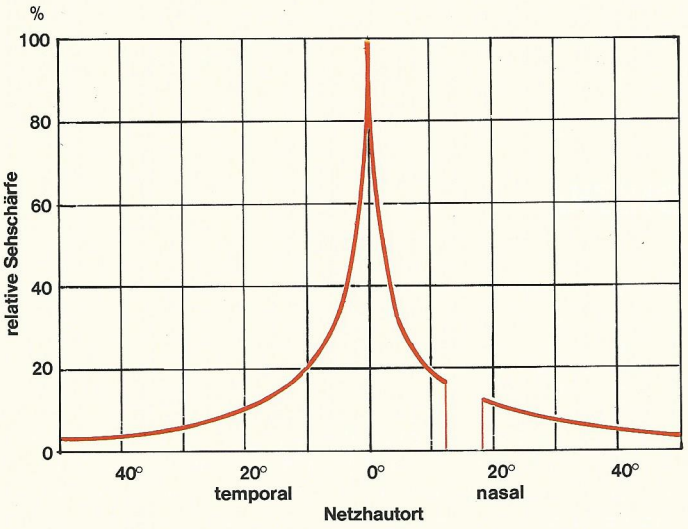


Abb. 2: Relative Sehschärfe in Abhängigkeit vom horizontalen Netzhautort

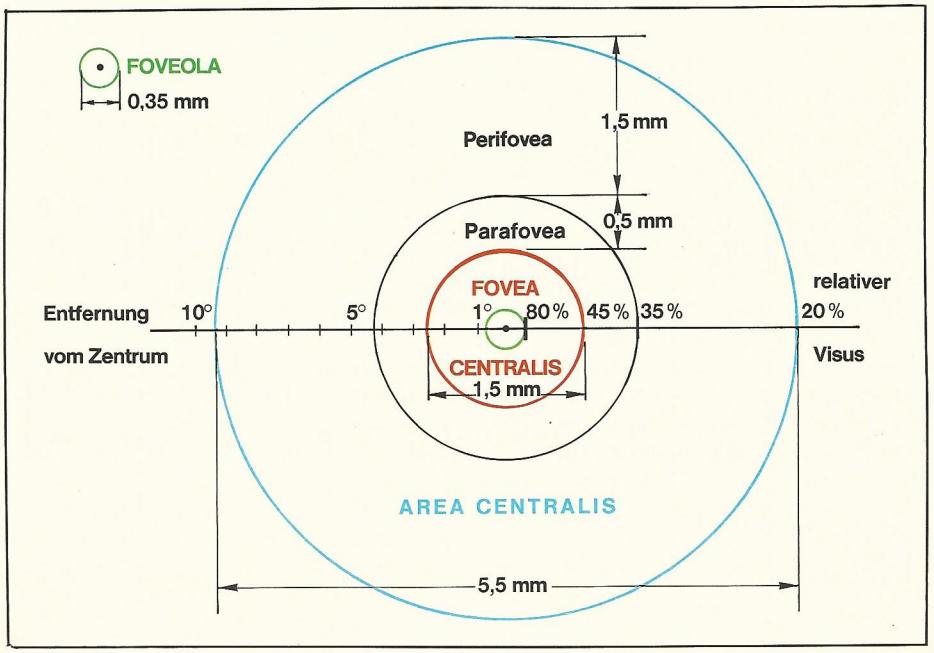


Abb. 3: Ungefähre Zahlenangaben für den zentralen Netzhautbereich

Bei einer Sehschärfebestimmung wird der Visus am Fixationsort auf der Netzhaut ermittelt. Das ist im Normalfall die Netzhautgrubenmitte, die von Natur aus das höchste Auflösungsvermögen besitzt. Von großer Bedeutung ist nun die relative Sehschärfe in Abhängigkeit vom Netzhautort. Abb. 2 ist eine der üblichen Darstellungen für diesen Zusammenhang, wobei die Lage des blinden Flecks zu erkennen ist. Dieser besitzt eine Ausdehnung von etwa 7° und liegt mit seinem Zentrum etwa 15° nasal von der Netzhautgrubenmitte [9]. Bei den Gradangaben handelt es sich auch hier um Knotenpunktwinkel. Der Bereich um die Netzhautgrubenmitte mit der höchsten Sehschärfe (V = 100 %) hat einen Durchmesser von ungefähr 20 Winkelminuten [10]. Nach außen hin fällt der Visus ziemlich schnell ab. Interessant ist nun die Zuordnung zu den anatomisch definierten Bereichen der Netzhaut. Diese werden meist im Streckenmaß angegeben [11]. In Abb. 3 sind die Bezeichnungen und die Maße der Netzhautbereiche eingetragen. Wird für die Strecke zwischen dem bildseitigen Knotenpunkt des Auges und der Netzhaut ein Wert von 16,74 mm nach dem vereinfachten schematischen Gullstrand-Auge zugrunde gelegt [12], dann ergeben sich die auf der linken Skala in Abb. 3 eingetragenen Gradangaben. Die zugehörigen relativen Visuswerte folgen aus Abb. 2 und sind auf der rechten Skala in Abb. 3 aufgetragen. In der Praxis können die groben Anhaltswerte der Tab. 2 benutzt werden.

Relative Sehschärfe	Entfernung von der Netzhautgrubenmitte
100 %	bis 10′
50 %	2°
33 %	5°
20 %	10°
10 %	20°

Tabelle 2: Anhaltswerte für die Sehschärfenverteilung

1.2 Akkommodation

Ziel einer jeden Refraktionsbestimmung ist die Ermittlung derjenigen Korrektion, mit deren Hilfe ferne Objekte ohne akkommodative Anstrengung scharf auf der Netzhaut abgebildet werden. Dieser Zustand der Akkommodation „ohne Anstrengung" (oder besser „mit geringster Anstrengung") wird als „Ruhelage der Akkommodation" bezeichnet. Bei der normalen Refraktionsbestimmung ist die Akkommodations-Ruhelage für das photopische Sehen (Tagessehen) bei höchster Anforderung an die Sehschärfe maßgebend. Eine etwaige sogenannte „Nachtmyopie" und eine „Raummyopie" brauchen in diesem Zusammenhang nicht diskutiert zu werden. Die hier zu erörternde Ruhelageneinstellung des Akkommodationssystems hängt bekanntlich sowohl von mechanischen Faktoren (Elastizität der Augenlinse, etc.) als auch von den auf die glatte Akkommodationsmuskulatur antagonistisch (entgegengesetzt) einwirkenden Innervationen durch den Parasympathicus und durch den Sympathicus ab [13]. Bei jedem Akkommodationszustand liegt ein bestimmtes Verhältnis von parasympathischer und sympathischer Innervation vor. Obwohl die parasympathische Innervation für die Akkommodationsvorgänge eine größere Bedeutung besitzt als die sympathische, ist keine der beiden Innervationen unter physiologischen Bedingungen gleich Null. Bei der Ruheeinstellung des Akkommodationssystems als einer Art Gleichgewichtseinstellung ist offenbar die für den vorgegebenen Zweck (Erkennung kleinster Einzelheiten ferner Objekte) geringstmögliche Energie erforderlich, es handelt sich also um ein Sehen mit geringster Anstrengung. Um diesen physiologischen Zustand herbeizuführen, dürfen die Innervationen durch die parasympathischen und die sympathischen Nervenfasern nicht einseitig gestört werden. Deshalb kann sich bei einer Refraktionsbestimmung unter Zykloplegie (Akkommodationslähmung) eine im natürlichen Sehen nicht verträgliche Korrektion ergeben. Hierbei kann sich nämlich kaum eine physiologiche Akkommodations-Ruhelage einstellen, da die Wirkung der parasympathischen Innervation der Akkommodationsmuskulatur ausgeschaltet wird, ohne die Wirkung der sympathischen Innervation wesentlich zu stören. Die vorstehenden Erörterungen beziehen sich wohlgemerkt auf die Ermittlung der zum betreffenden Zeitpunkt optimalen und verträglichen refraktiven Korrektion. Eine aus medizinischen Gründen angezeigte Verwendung von Zykloplegica bleibt davon selbstverständlich unberührt.

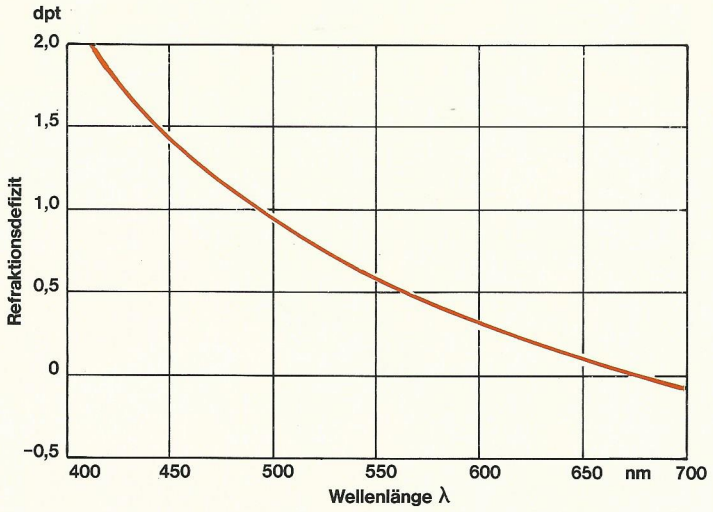


Abb. 4: Die chromatische Aberration des menschlichen Auges

Jedes Auge besitzt Dispersion, was zu unterschiedlichen Refraktionen für verschiedene Lichtwellenlängen führt. In Abb. 4 ist ein für die (in Luft gemessene) Wellenlänge λ = 680 nm rechtsichtiges Auge angenommen, und die Refraktionsdefizite [14] auf Grund der Dispersion sind in Abhängigkeit von der Wellenlänge aufgetragen [15]. Zwischen den Grenzen für das sichtbare Spektrum ergibt sich also eine Refraktionsdifferenz von ungefähr 2 dpt. Refraktionsbestimmungen erfolgen nun in der Regel im polychromatischen (weißen) Licht. Das führt zu vielen im Auge hintereinander liegenden einfarbigen Bildern eines schwarz-weißen Objektes in der jeweiligen Farbe (Wellenlänge). Deshalb erhebt sich die Frage nach der sogenannten „Einstellwellenlänge" des Auges, das ist diejenige Wellenlänge, deren zugehöriges Bild in der Akkommodations-Ruhelage auf der Netzhaut liegt. Zur Messung der individuellen Einstellwellenlänge eines Auges müßte das Ergebnis einer in weißem Licht durchgeführten Refraktionsbestimmung mit Refraktionsergebnissen in jeweils unterschiedlichem monochromatischen Licht verglichen werden. Dasjenige monochromatische Ergebnis, welches gleich dem polychromatischen Ergebnis ist, liefert die Einstellwellenlänge des Auges. MÜTZE zitiert dazu IVANOFF, der an einigen Versuchspersonen diese Einstellwellenlänge gemessen hat [16]. Die dabei gefundenen Mittelwerte sind in Abb. 5 dargestellt [15]. Für die akkommodationslose Einstellung auf ferne Objekte ergibt sich danach eine im Roten liegende Einstellwellenlänge von etwa 685 nm. Daraus darf nun aber (wegen der geringen Anzahl der Versuchspersonen) nicht gefolgert werden, daß die Einstellwellenlänge eines jeden akkommodationslosen Auges im Roten liegt, sondern lediglich, daß dies häufig der Fall sein dürfte.

Bei der Betrachtung näherer Objekte verschiebt sich die Einstellwellenlänge zu kürzeren Wellenlängen hin (Abb. 5). Auf diesem Wege nutzt das Auge seine Dispersion aus, um Akkommodation im Sinne einer tatsächlichen Brechwerterhöhung einzusparen. Dadurch erklärt sich wahrscheinlich auch ein Teil der bei alten Augen mit verhärteter Augenlinse noch gemessenen Akkommodationsbreite. Ohne auf die unterschiedlichen Begriffe Akkommodationsaufwand und Akkommodationserfolg näher einzugehen [1], soll darauf hingewiesen werden, daß für den normgemäßen Begriff *maximaler Akkommodationsaufwand* häufig auch die Bezeichnung „Akkommodationsvermögen" verwendet wird und für den normgemäßen

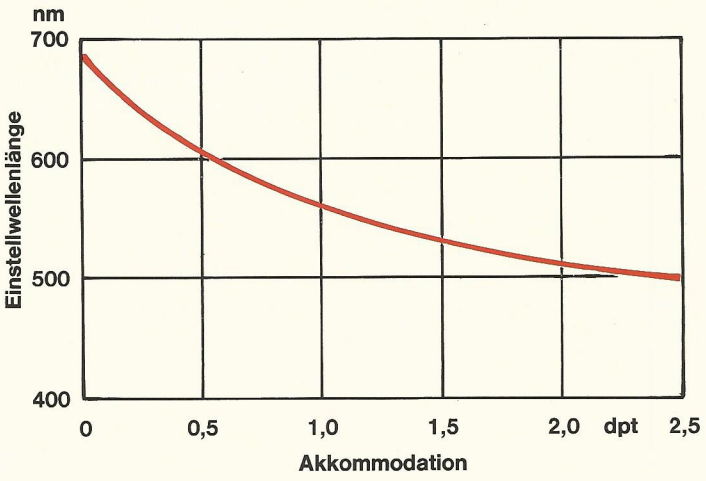


Abb. 5: Die Einstellwellenlänge des menschlichen Auges in weißem Licht (Nach IVANOFF)

Begriff *maximaler Akkommodationserfolg* auch die Bezeichnung „Akkommodationsbreite" [17]. Die meßtechnisch zugängliche Größe ist die Akkommodationsbreite als Differenz zwischen der Fernpunktrefrakion und der Nahpunktrefraktion. Das Akkommodationsvermögen kann aus der gemessenen Akkommodationsbreite nur unter Zuhilfenahme weiterer Daten berechnet (aber nicht gemessen) werden [18]. Übrigens ist auch eine (anstrengende) „negative Akkommodation" über die Akkommodations-Ruhelage hinaus möglich [19].

Einige weitere Begriffe zur Akkommodation sind in Tab. 3 zusammengestellt. Dazu soll noch angemerkt werden, daß die in der zur Zeit gültigen Ausgabe der Norm gegebene Definition für das „Akkommodationsgebiet" (nämlich: Differenz zwischen dem in Metern gemessenen Fernpunktabstand und dem Nahpunktabstand) nicht sinnvoll ist. Der Normenausschuß hat jedoch bereits beschlossen, die zuvor gültige sinnvolle Definition (nämlich: Gesamtheit aller Einstellpunkte) bei der nächsten Auflage dieses Normblattes wieder einzuführen.

Begriff	Zeichen	Einheit	Erklärung	Anmerkung
Fernpunkt (punctum remotum)	R	–	Bei entspannter Akkommodation scharf auf der Netzhaut abgebildeter Objektpunkt	Bei Rechtsichtigkeit liegt R im Unendlichen, bei Kurzsichtigkeit reell im Endlichen (vor dem Auge), bei Übersichtigkeit virtuell im Endlichen (hinter dem Auge)
Fernpunktabstand	a_R	m	Abstand des Punktes R vom vorderen Augenhauptpunkt H	Bei Rechtsichtigkeit ist $a_R = -\infty$, bei Kurzsichtigkeit ist $a_R < 0$, bei Übersichtigkeit ist $a_R > 0$
Fernpunktrefraktion	A_R	dpt	$A_R = \frac{1}{a_R}$	Bei Rechtsichtigkeit ist $A_R = 0$, bei Kurzsichtigkeit ist $A_R < 0$, bei Übersichtigkeit ist $A_R > 0$
Einstellpunkt	E	–	Bei beliebigem Akkommodationszustand scharf auf der Netzhaut abgebildeter Objektpunkt	Bei zunehmender Akkommodation wandert E in Lichtrichtung
Akkommodationsentfernung	a_E	m	Abstand des Punktes E vom vorderen Augenhauptpunkt H	
Einstellrefraktion	A_E	dpt	$A_E = \frac{1}{a_E}$	
Nahpunkt (punctum proximum)	P	–	Bei stärkster Akkommodation scharf auf der Netzhaut abgebildeter Objektpunkt	
Nahpunktabstand	a_P	m	Abstand des Punktes P vom vorderen Augenhauptpunkt H	
Nahpunktrefraktion	A_P	dpt	$A_P = \frac{1}{a_P}$	
Akkommodationsgebiet	–	–	Gesamtheit aller Einstellpunkte eines Auges	Das Akkommodationsgebiet wird durch die Lage seiner Grenzen R und P gekennzeichnet
Maximaler Akkommodationserfolg (Akkommodationsbreite)	ΔA_{max}	dpt	$\Delta A_{max} = A_R - A_P$	

Tabelle 3: Einige Begriffe nach DIN 58208 Teil 3

1.3 Richtungswerte

Optimale refraktive Korrektion und (bei näheren Objekten) richtiger Akkommodationszustand sorgen durch ein scharfes Netzhautbild für die volle Ausnutzung der physiologisch gegebenen Sehschärfe eines Auges. Neben der dadurch möglichen Erkennung von Objekteinzelheiten ist die korrekte Richtungswahrnehmung verschiedener Objekte im Gesichtsfeld von wesentlicher Bedeutung.

Bei der Abbildung eines Objektpunktes auf einer beliebigen Netzhautstelle wird eine dieser Netzhautstelle zugeordnete (erlernte) Richtungsempfindung für diesen Objektpunkt ausgelöst. Jeder Netzhautstelle ist also ein „Richtungswert" zugeordnet [20], der früher auch als Lokalzeichen oder Raumwert bezeichnet wurde [21]. Im Idealfall (und nur dieser soll hier behandelt werden) besitzt die Netzhautgrubenmitte den Richtungswert „Geradeaus". Ein auf ihr abgebildeter Objektpunkt wird als geradeaus vor dem Auge liegend empfunden. Zusätzlich dazu werden natürlich noch die aus den entsprechenden Muskelgefühlen heraus beurteilten Lagen des Auges relativ zum Kopf, des Kopfes relativ zum Rumpf und des Rumpfes relativ zum übrigen Körper ausgewertet, um die genaue Lage des foveolär abgebildeten Objektpunktes relativ zur eigenen Person zu erfassen.

Die Richtungswerte aller übrigen Netzhautstellen beziehen sich auf den Richtungswert Geradeaus der Netzhautgrubenmitte, was in Abb. 6 schematisch dargestellt ist. Das Koordinatenkreuz im unteren Teil der Darstellung symbolisiert die Netzhaut; diese wird dabei von hinten betrachtet (also nicht mit dem Taboschema verwechseln). Der Nullpunkt des Koordinatenkreuzes stellt die Netzhautgrubenmitte mit ihrem Richtungswert „Geradeaus" dar. An dieser Stelle wird im gewählten Beipiel ein Punkt abgebildet. Alle diejenigen Netzhautstellen, welche die Richtungsempfindung „rechts oder links und gleich hoch wie der Punkt" vermitteln, bilden den „horizontalen Netzhautmeridian" (h. M. in Abb. 6). Alle Netzhautstellen, welche die Richtungsempfindung „direkt unterhalb oder oberhalb vom Punkt" vermitteln, bilden den „vertikalen Netzhautmeridian" (v. M. in Abb. 6). Alle Netzhautstellen links vom vertikalen Netzhautmeridian besitzen die Richtungswerte „Rechts" und umgekehrt, alle Netzhautstellen oberhalb des horizontalen Netzhautmeridians besitzen die Richtungswerte „Unten" und umgekehrt. Je weiter eine Netzhautstelle vom vertikalen bzw. horizontalen Netzhautmeridian entfernt ist, um so weiter Rechts, Links, Unten oder Oben ist ihr zugehöriger Richtungswert. Das in Abb. 6 links oben auf der Netzhaut abgebildete Quadrat liegt also im Außenraum rechts unter dem Punkt, und das rechts unten auf der Netzhaut abgebildete Dreieck liegt im Außenraum links über dem Punkt. Über die Entfernung eines Objektes gibt die Lage des zugehörigen Netzhautbildes im Einzelauge keinerlei Auskunft.

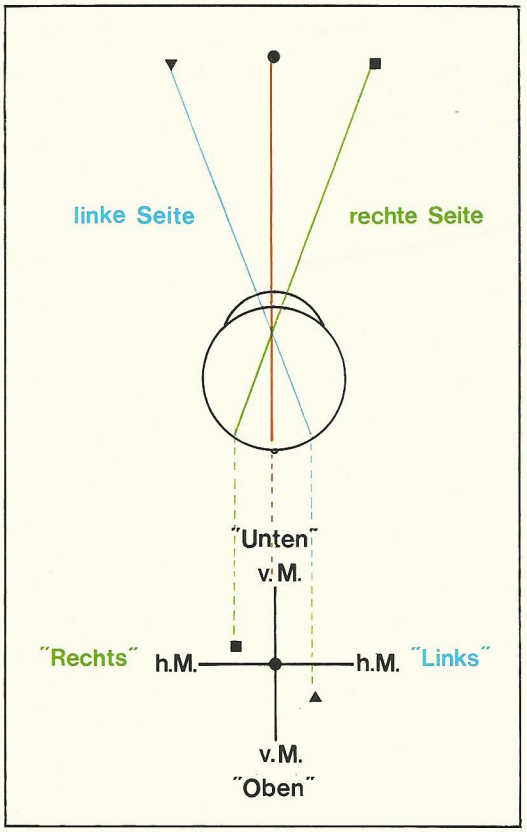


Abb. 6: Richtungswerte im Monokularsehen
h.M. = horizontaler Netzhautmeridian
v.M. = vertikaler Netzhautmeridian

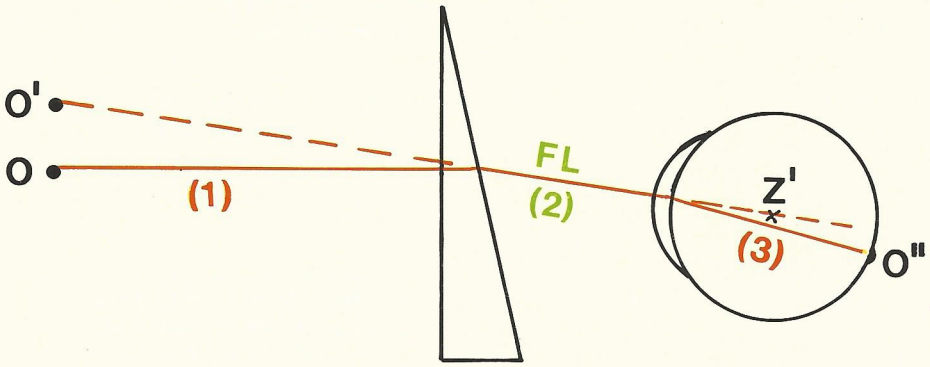


Abb. 7: Zur Definition der Fixierlinie
(1) Objektseitiger Hauptstrahl bezüglich des Brillenglases
(2) Bildseitiger Hauptstrahl bezüglich des Brillenglases und objektseitiger Hauptstrahl bezüglich des Auges
(3) Bildseitiger Hauptstrahl bezüglich des Auges
Z' Optischer Augendrehpunkt

1.4 Fixation

Der Begriff „Fixation" kennzeichnet die Ausrichtung eines Auges auf einen im Gesichtsfeld interessierenden Objektpunkt [22]. Das Anblicken eines solchen bestimmten Punktes wird als „Fixieren" bezeichnet. Im Idealfall (und das ist hier gleichzeitig der Normalfall) wird der Fixationspunkt in der Netzhautgrubenmitte abgebildet, denn dort besitzt das Auge von Natur aus die höchste Sehschärfe und den Richtungswert „Geradeaus". Jeder kann sich sehr genau bewußt machen, welchen Punkt im Gesichtsfeld er in jedem Moment anblickt („fixiert"). Für ein freies Auge ist dazu die „Fixierlinie" (oder „Visierlinie") definiert [23]: Das ist die Verbindungsgerade zwischen dem fixierten Objektpunkt und der Mitte der Eintrittspupille des Auges. Damit ist die Fixierlinie geometrisch-optisch betrachtet der objektseitige Hauptstrahl desjenigen Strahlenbündels, welches den fixierten Objektpunkt in die Mitte der Foveola abbildet.

Befindet sich aber ein Brillenglas vor dem Auge und herrscht in dem benutzten Durchblickpunkt eine prismatische Wirkung, dann wird dieser Hauptstrahl dort gebrochen. Seine Richtung vor dem Brillenglas stimmt nun nicht mehr mit der Richtung der Fixierlinie überein. Dieser Sachverhalt ist in Abb. 7 veranschaulicht, und die normmäßige Definition der Fixierlinie soll für diesen Fall folgendermaßen ergänzt werden:

> *„Befindet sich ein Brillenglas vor dem Auge, so übernimmt das von diesem Glas entworfene Bild des fixierten Objektpunktes für das Auge die Rolle des Fixationspunktes. Die Fixierlinie ist dann die Verbindungsgerade zwischen diesem Bildpunkt und der Mitte der Eintrittspupille des Auges".*

Abb. 7 zeigt deutlich, daß nur derjenige Teil des Hauptstrahles (2) mit der Fixierlinie identisch ist, der zwischen dem Brillenglas und dem Auge liegt. Auf der in das Augeninnere verlängerten Fixierlinie liegt der optische Augendrehpunkt Z', der nährungsweise den Schnittpunkt der Fixierlinien(richtungen) bei Blickbewegungen darstellt [24].

In dem anomalen Zustand einer „exzentrischen Fixation" wird (im Monokularsehen!) eine außerhalb des Bereiches des schärfsten Sehens gelegene Netzhautstelle zum Fixieren benutzt [25]. Dieser exzentrische Fixationsort auf der Netzhaut wird gelegentlich auch als „Pseudofovea" bezeichnet, er besitzt für dieses Auge den Richtungswert Geradeaus im Monokularsehen.

Benennung	Art der Bewegung
Adduktion	Einwärtswendung
Abduktion	Auswärtswendung
Supraduktion	Hebung
Infraduktion	Senkung
Intorsion (Inzykloduktion)	Einwärtsrollung (90° – Richtung nach nasal)
Extorsion (Exzykloduktion)	Auswärtsrollung (90° – Richtung nach temporal)

Tabelle 4: Bewegungen eines Auges

1.5 Duktionen und Torsionen

Blickt ein Auge waagerecht geradeaus („Nullblickrichtung"), dann steht es in „Primärstellung". Von dieser Stellung aus führen Bewegungen nach rechts oder links sowie Bewegungen nach oben oder unten zu den „Sekundärstellungen" des Auges. Alle übrigen Augenstellungen sind „Tertiärstellungen". Bewegungen eines Auges zwischen den vorgenannten Stellungen werden als „Duktionen" bezeichnet, Rollbewegungen um die Fixierlinie als „Torsionen" [26]. Bei Duktionen ändert sich also die Richtung der Fixierlinie im Raum, während diese bei Torsionen unverändert bleibt. Tab. 4 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Duktionen und Torsionen. Manche Autoren bezeichnen allerdings eine Torsion als „Zykloduktion" [27].

(wird fortgesetzt)

Anschrift des Verfassers
Dr. Helmut Goersch
Westhofener Weg 30
1000 Berlin 38

Literaturhinweise

[1] DIN 58208
„Begriffe und Zeichen bei Brillengläsern in Verbindung mit dem menschlichen Auge" Teil 3 „Auge" (September 1978) (Erste Ausgabe April 1972)

[2] DIN 58208
„Begriffe und Zeichen bei Brillengläsern in Verbindung mit dem menschlichen Auge" Teil 5 „Binokulares System Auge – Brille" (Entwurf August 1978)

[3] DIN 5340
„Begriffe der physiologischen Optik" (Entwurf Februar 1979)

[4] a) „Handbuch für Augenoptik"
Herausgeb. Carl Zeiss, Oberkochen (1977) S. 61
b) siehe [3] Lfd. Nr. 278

[5] DIN 58220
„Sehschärfebestimmung" Blatt 1 „Sehzeichen und Darbietungsbedingungen" (März 1974)

[6] DIN 58220
„Sehschärfebestimmung" Blatt 3 „Fernvisusbestimmung" (März 1974)

[7] siehe [1] Lfd. Nr. 8

[8] HEINZ DIEPES
„Refraktionsbestimmung" Verlag Heinz Postenrieder, Pforzheim (2. Auflage 1975) S. 61

[9] WILHELM TRENDELENBURG
„Der Gesichtssinn" Springer-Verlag, Berlin (2. Auflage 1961) S. 64

[10] HERBERT SCHOBER
„Das Sehen" Band I, VEB Fachbuchverlag Leipzig (4. Auflage, 1970) S. 31

[11] MICHAEL J. HOGAN et al.
„Histology of the Human Eye" W. B. Saunders Company, Philadelphia (1971) S. 492

[12] ROBERT SIEBECK
„Optik des menschlichen Auges" Springer-Verlag, Berlin (1960) S. 139

[13] a) RUDOLF SACHSENWEGER
„Pathologie und Klinik der Refraktionsanomalien" in Karl Velhagen (Herausgeb.) „Der Augenarzt" Band II VEB Georg Thieme, Leipzig (1972) S. 981
b) RUDOLF SACHSENWEGER
(Herausgeb.) „Neuroophthalmologie" Georg Thieme Verlag, Stuttgart (1975) S. 309

[14] siehe [7] S. 56

[15] siehe [4a] S. 72

[16] KARL MÜTZE
„Die Akkommodation des menschlichen Auges" Akademie-Verlag, Berlin (1956) S. 78

[17] siehe [3] Lfd. Nr. 12

[18] TH. GRAFF
„Messungen augen- und brillenoptischer Größen" Verlag G. Braun, Karlsruhe (1960) S. 84

[19] a) HERBERT SCHOBER
„Das Sehen" Band II VEB Fachbuchverlag Leipzig (3. Auflage 1964) S. 10
b) siehe [13a] S. 989

[20] siehe [3] Lfd. Nr. 253

[21] siehe [8] S. 249

[22] siehe [3] Lfd. Nr. 115

[23] bis [25]
siehe [1] Lfd. Nr. 5 bis 7

[26] G. MACKENSEN
„Untersuchung der Motilität und der Binokularfunktion" in Wolfgang Straub (Herausgeb.) „Die ophthalmologischen Untersuchungsmethoden" Band II Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart (1976) S. 8

[27] GUNTER K. VON NOORDEN und
A. EDWARD MAUMENEE
„Atlas der Schieldiagnostik" F. K. Schattauer Verlag, Stuttgart – New York (1971) S. 9

1,— DM nur

pro Ausgabe kostet „der Augenoptiker", wenn Sie Auszubildender sind oder an einer der Fachschulen studieren.

- Das Angebot gilt bis zum Ende Ihrer Ausbildung.
- Wann dürfen wir Sie in den Leserkreis dieser großen deutschen Fachzeitschrift aufnehmen?
- Füllen Sie einfach die beiliegende Bestellkarte aus oder schreiben Sie direkt an uns.
- Nennen Sie uns aber auch Ihren Ausbildungsbetrieb oder die Schule, an der Sie studieren.

Verlag Willy Schrickel · „der Augenoptiker" · Klever Straße 33 · 4000 Düsseldorf 30 · Telefon (02 11) 48 85 21

Dr. HELMUT GOERSCH, Berlin
Stellv. Direktor der SFOF Berlin

Einführung in das Binokularsehen

Teil II

(Fortsetzung aus Heft 7/1980)

Vorbemerkung

Für alle folgenden Erörterungen zum Binokularsehen sollen Fälle von exzentrischer Fixation (im Monokularsehen!) ausgeschlossen werden. Bei monokularer Fixation eines dargebotenen Objektes wird dieses also in der Netzhautgrubenmitte des betreffenden Auges abgebildet (Richtungswert „Geradeaus").

Ferner soll zur Vereinfachung der zeichnerischen Darstellung von Augenpaaren angenommen werden, daß für jedes Auge der Winkel zwischen seiner optischen Achse [1, Lfd. Nr. 2] und der Gesichtslinie [1, Lfd. Nr. 4], der sogenannte γ-Winkel [10, S. 114] gleich Null ist. Dann fallen optische Achse, Gesichtslinie und Fixierlinie zusammen, und die Netzhautgrubenmitte deckt sich mit dem hinteren Augenpol [4, S. 51]. In Darstellungen von Augenpaaren können dann die Fixierlinien beider Augen bis zu den Netzhautgrubenmitten durchgezeichnet werden. Für Augen mit von Null verschiedenem γ-Winkel ändert sich nichts an den nachstehenden Erläuterungen zum Binokularsehen, nur die zeichnerische Darstellung wäre aufwendiger.

2. Motorik des Binokularsehens

2.1 Versionen und Vergenzen

Bekanntlich werden Bewegungen eines Auges durch die Tätigkeit der sechs tangential am Augapfel angreifenden äußeren Augenmuskeln hervorgerufen. Die Benennungen und Wirkungen dieser quergestreiften Muskeln sind in der Literatur vielfältig dargestellt, z. B. [9, S. 270—274; 27, S. 1—13; 28, S. 245—263]. Bei binokular koordinierten Augenbewegungen erhalten die sich im rechten und linken Auge entsprechenden synergistisch wirkenden Muskeln gleiche Impulse (HERING'sches Gesetz der seitengleichen Innervation) [9, S. 283; 27, S. 20]. Dabei werden *gleichsinnige* („konjugierte") und *gegensinnige* („disjugierte") Augenbewegungen durch

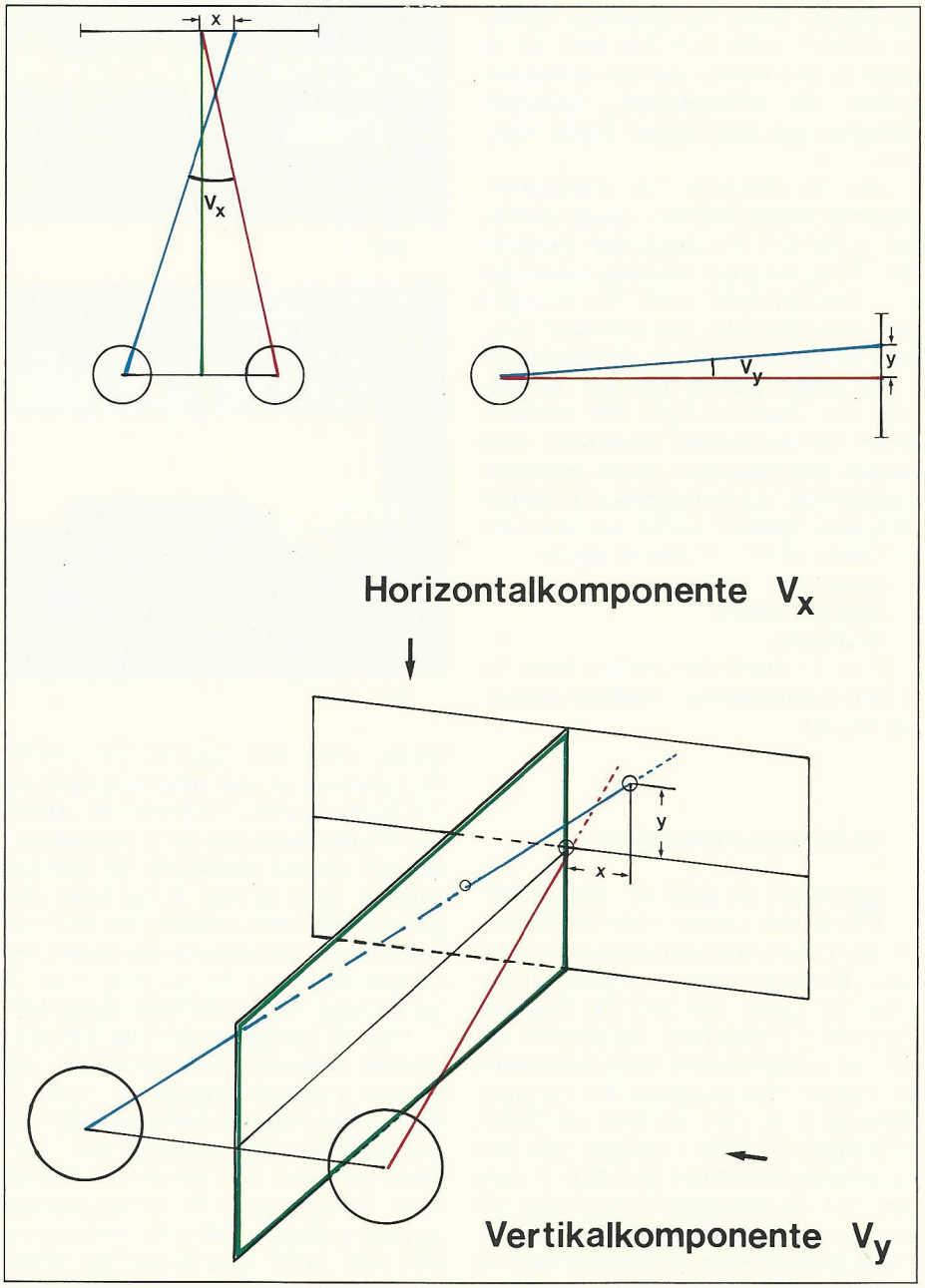


Abb. 8: Komponenten einer Vergenzstellung mit windschiefen Fixierlinien (grün: Medianebene)

die Begriffe „Version“ und „Vergenz“ unterschieden [2, Lfd. Nr. 39 und 34].

Definition 1 **Version**

Gleichgroße gleichsinnige Bewegung beider Augen

Definition 2 **Vergenz**

Gleichgroße gegensinnige Bewegung beider Augen

Normale Versionen und Vergenzen sind Bewegungen beider Augen um ihre Vertikal- und/oder Transversalachsen [27, S. 13] und verändern damit die Richtungen der Fixierlinien. Rollbewegungen beider Augen um ihre Sagittalachsen sind praktisch Rollungen um die Fixierlinien, lassen also deren Richtungen relativ zum Kopf unverändert und werden als *Zyklo*versionen und -vergenzen bezeichnet. Die weitere Unterteilung der Versionen und Vergenzen [26, S. 9; 27, S. 16] sind in den *Tabellen 5 und 6* zusammengestellt. In einer Anmerkung zu [2, Lfd. Nr. 34] wird darauf hingewiesen, daß der früher (für eine Vertikalvergenz) verwendete Ausdruck *Vertikaldivergenz* („VD“) nicht mehr benutzt werden sollte, da der Begriff Divergenz eine Horizontal-Vergenz kennzeichnet.

Versionen und Vergenzen sind genau wie Duktionen (vgl. Abschnitt 1.5) Augenbewegungen relativ zum Kopf. Änderungen der Augenstellung im Raum, die bei relativ zum Kopf ruhig gehaltenen Augen lediglich durch Kopf- oder Körperbewegungen zustande kommen, brauchen deshalb hier nicht erörtert zu werden. Wichtig ist jedoch die sogenannte „kompensatorische Rollung“ der Augen, die dafür sorgt, daß bei mäßigen seitlichen Kopfneigungen (bis etwa 10°) die Lage der Augenmeridiane (vgl. Abschnitt 1.3 und Abb. 6) im Raum erhalten bleibt [19, S. 401]. Die kompensatorische Rollung ist demnach eine der Kopfneigung entgegengesetzte Zykloversion, bei Kopfneigung nach links also eine gleichgroße Dextrozykloversion und umgekehrt. Sie wird über das Gleichgewichtsorgan durch die Schwerkraft gesteuert und muß sowohl bei der Augenglasbestimmung als auch bei der Brillenanfertigung berücksichtigt werden, um korrekte Werte für die Achslage von Zylindern und für die Basislage von Prismen zu erhalten. Eine ausführliche Erörterung dieses Problems findet sich in [29].

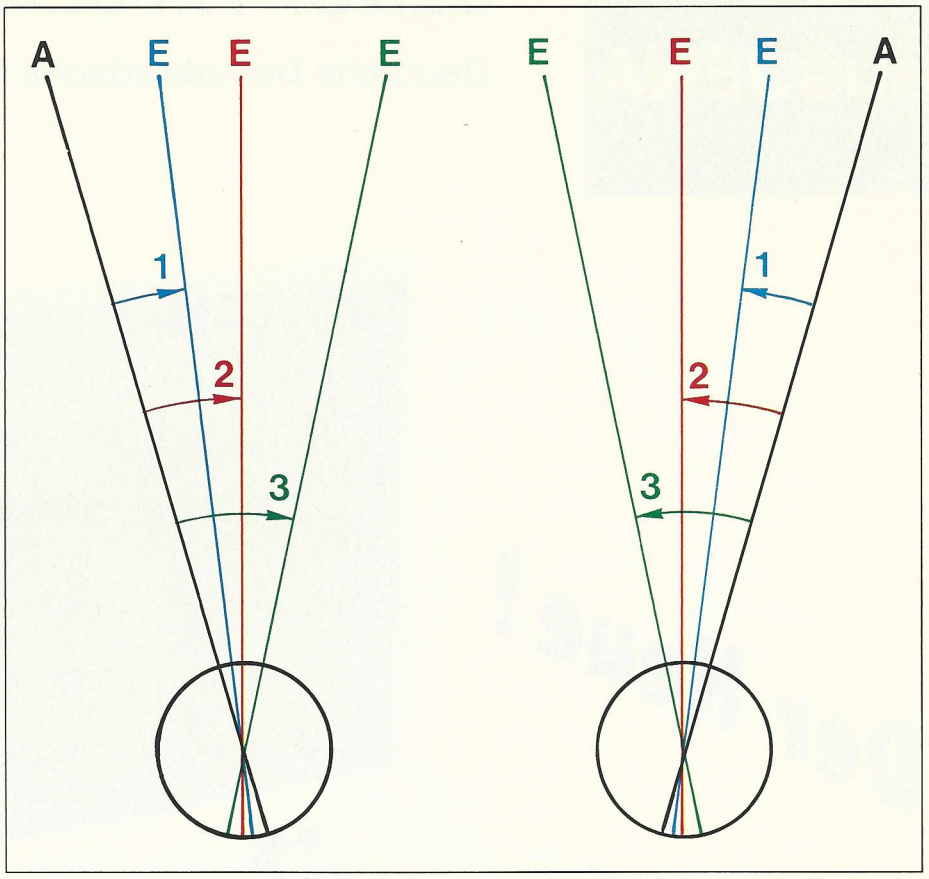


Abb. 9: Unterschiedliche Konvergenzen von der Divergenzstellung A aus (E: Endstellungen)

2.2 Vergenzstellungen

Die Stellung der Augen eines Augenpaares wird unabhängig von der Größe des jeweiligen γ-Winkels durch die Richtung der beiden Fixierlinien gekennzeichnet, da in der Regel nur diese als Hauptstrahlen der foveolär abbildenden Bündel von wesentlicher optometrischer Bedeutung sind (vgl. Abschnitt 1.4 und Abb. 7). Schneiden sich die Fixierlinien, dann liegen beide in einer Ebene, die ihren Schnittpunkt und die beiden optischen Augendrehpunkte [1, Lfd. Nr. 7] enthält. Der von beiden Fixierlinien gebildete Winkel heißt „Vergenzstellung“ [2, Lfd. Nr. 38].

Tabelle 5: Versionen

Benennung	Bewegung beider Augen
Dextroversion	nach rechts (Abduktion des rechten Auges und Adduktion des linken Auges)
Laevoversion	nach links (Adduktion des rechten Auges und Abduktion des linken Auges)
Supraversion	nach oben (Supraduktion)
Infraversion	nach unten (Infraduktion)
Dextrozykloversion	Rollung nach rechts (Extorsion des rechten Auges und Intorsion des linken Auges)
Laevozykloversion	Rollung nach links (Intorsion des rechten Auges und Extorsion des linken Auges)

Tabelle 6: Vergenzen

Benennung	Bewegung der Augen
Konvergenz	Adduktion beider Augen
Divergenz	Abduktion beider Augen
positive Vertikalvergenz	Supraduktion des rechten Auges und Infraduktion des linken Auges
negative Vertikalvergenz	Infraduktion des rechten Auges und Supraduktion des linken Auges
Inzyklovergenz	Intorsion beider Augen
Exzyklovergenz	Extorsion beider Augen

Definition 3 **Vergenzstellung**

Winkel zwischen den Fixierlinien beider Augen

Die Lage der Ebene, in welcher die Fixierlinien als Schenkel des Winkels „Vergenzstellung" liegen, wird mit Hilfe eines Koordinatensystems gekennzeichnet. Bei normaler lotrechter Kopf- und Körperhaltung fallen kopffestes und raumfestes Koordinatensystem zusammen. Die weiteren Erörterungen beziehen sich auf ein kopffestes Koordinatensystem mit einer „horizontalen" und einer „vertikalen" Ebene.

An dieser Stelle scheint eine Anmerkung zur Benutzung der Wörter *horizontal, vertikal, waagerecht, lotrecht und senkrecht* angebracht, da auch Standardwerke der deutschen Sprache nicht immer hinreichende Auskunft geben. So wird zum Beispiel *waagerecht* erklärt als „horizontal, rechtwinklig zur Senkrechten" [30, S. 759], oder *vertikal* als „senkrecht, lotrecht" [31, S. 683]. In der Umgangssprache werden also sowohl die Wörter waagerecht und horizontal gleichbedeutend benutzt als auch die Wörter lotrecht, vertikal und senkrecht. Fachsprachlich müssen jedoch die Bedeutungen dieser Wörter unterschieden werden:

Lotrecht ist die mit Hilfe eines Senklotes objektiv zu ermittelnde Richtung der Schwerkraft.

Waagerecht ist eine mit Hilfe einer Wasserwaage objektiv zu ermittelnde Richtung, die rechtwinklig zur Lotrechten liegt.

Vertikal und horizontal sind die entsprechenden subjektiven Empfindungen, und diese stimmen nicht genau mit den objektiven Gegebenheiten (lotrecht und waagerecht) überein [9, S. 344; 19, S. 402].

Senkrecht bedeutet (in der Geometrie) lediglich, daß die betrachtete Richtung rechtwinklig zu einer anderen ist. Ursprünglich heißt jedoch die in Richtung des Senklotes verlaufende Linie „senkrecht" [32, S. 310], so daß gegen eine Verwendung in diesem Sinne nichts einzuwenden sein dürfte.

Die horizontale und die vertikale Ebene des benutzten Koordinatensystems sind bei normaler Kopf- und Körperhaltung durch die natürliche Lage der horizontalen und vertikalen Netzhautmeridiane (vgl. Abb. 6) gegeben. Bei schräger Lage des Winkels zwischen den Fixierlinien beider Augen (etwa bei in normaler Kopfhaltung ungleich hoch liegenden Augen) wird die Vergenzstellung durch Projektionen auf die dementsprechende Ebene in eine „Horizontalkomponente" und eine „Vertikalkomponente" zerlegt. Nur diese Komponenten sind von optometrischer Bedeutung.

Falls die Fixierlinien beider Augen *windschief* zueinander verlaufen, sich also nicht schneiden, dann liegen sie nicht in einer Ebene und bilden keinen direkten Winkel miteinander.

Projektionen der Fixierlinien auf die entsprechende Ebene liefern jedoch auch in diesem Fall eine Horizontalkomponente und eine Vertikalkomponente, was ebenfalls in Abb. 8 veranschaulicht ist. In diesem Sinne ist die Definition 3 also auch für windschiefe Fixierlinien anwendbar.

Von der Vergenzstellung als Winkel zwischen beiden Fixierlinien ist die *Zyklovergenzstellung* zu unterscheiden, mit der die Richtung der beiden vertikalen Augenmeridiane relativ zueinander beurteilt wird.

Definition 4 **Zyklovergenzstellung**

Winkel zwischen den vertikalen Meridianen beider Augen

Im einzelnen werden bei den Komponenten von Vergenzstellungen und bei Zyklovergenzstellungen die in *Tabelle 7* zusammengestellten Begriffe benutzt. Abweichend von der Maßeinheit cm/m für die optometrisch wichtigeren Vergenzstellungen sind Zyklovergenzstellungen in Winkelgrad zu messen.

Benennung	Einheit	Erklärung
Parallelstellung (Parallel-Vergenzstellung, Vergenzstellung Null)	—	Die Fixierlinien beider Augen sind einander parallel
Konvergenzstellung (positive Horizontal-Vergenzstellung)	$\frac{cm}{m}$	Horizontalkomponente einer Vergenzstellung mit einwärts weisenden Fixierlinien
Divergenzstellung (negative Horizontal-Vergenzstellung)	$\frac{cm}{m}$	Horizontalkomponente einer Vergenzstellung mit auswärts weisenden Fixierlinien
positive Vertikal-Vergenzstellung $\left(\frac{R}{L}, + VV\right)$	$\frac{cm}{m}$	Vertikalkomponente einer Vergenzstellung, bei der die Fixierlinie des rechten Auges höher steht als die des linken Auges
negative Vertikal-Vergenzstellung $\left(\frac{L}{R}, - VV\right)$	$\frac{cm}{m}$	Vertikalkomponente einer Vergenzstellung, bei der die Fixierlinie des rechten Auges tiefer steht als die des linken Auges
Inzyklovergenzstellung	Grad	Zyklovergenzstellung, bei der die vertikalen Meridiane beider Augen eine A-Stellung einnehmen
Exzyklovergenzstellung	Grad	Zyklovergenzstellung, bei der die vertikalen Meridiane beider Augen eine V-Stellung einnehmen

Tabelle 7: Vergenzstellungen

2.3 Zusammenhänge zwischen Versionen, Vergenzen und Vergenzstellungen

Die als Versionen und Vergenzen bezeichneten Augen*bewegungen* sind binokulare *Vorgänge* und dürfen nicht mit den als Vergenz*stellungen* bezeichneten *Zuständen* verwechselt werden (vergleichbar mit Akkommodation: *Vorgang*, und Akkommodationseinstellung: *Zustand).* Der Unterschied zwischen diesen Begriffen soll anhand einiger Beispiele deutlich gemacht werden.

Die Aussage „ein Augenpaar macht eine Konvergenz" (oder: *die Augen konvergieren)* enthält keinerlei Information über die Vergenzstellung vor und nach erfolgter Konvergenz. In den *Abb. 9 und 10* sind alle Möglichkeiten für die Vergenzstellungen vor und nach einer Konvergenz dargestellt. Befindet sich ein Augenpaar in einer Divergenzstellung, so kann eine Konvergenz zu einer geringeren Divergenzstellung, zur Parallelstellung oder zu einer Konvergenzstellung führen (Abb. 9), je nachdem welchen Betrag die Ausgangsstellung hatte und wie stark die Konvergenz ist. Von der Parallelstellung aus führt eine Konvergenz immer zu einer Konvergenzstellung und von einer Konvergenzstellung aus immer zu einer stärkeren Konvergenzstellung (Abb. 10).

Für die Auswirkungen einer Divergenz gibt es die entsprechenden Möglichkeiten: von einer Konvergenzstellung aus zu einer kleineren Konvergenzstellung, zur Parallelstellung oder zu einer Divergenzstellung *(Abb. 11);* von der Parallelstellung aus immer zu einer Divergenzstellung, und von einer Divergenzstellung aus immer zu einer größeren Divergenzstellung. Aus der Darstellung aller Horizontal-Vergenzstellungen auf einem Zahlenstrahl in *Abb. 12* ist ersichtlich, daß eine Konvergenz stets eine Vergrößerung und eine Divergenz stets eine Verkleinerung der Vergenzstellung in mathematischem Sinne zur Folge hat. Wichtig ist dabei die Tatsache, daß eine Konvergenz nicht in jedem Falle zu einer Konvergenz*stellung* führt, und daß eine Divergenz nicht in jedem Falle zu einer Divergenz*stellung* führt. Sinngemäß gelten die gleichen Aussagen für die Auswirkungen von Vertikalvergenzen und von Zyklovergenzen. Versionen hingegen ändern nichts an der Vergenzstellung eines Augenpaares, da eine Version als *gleichgroße* gleichsinnige Bewegung beider Augen definiert ist. In entsprechender Weise ist eine Vergenz eine *gleichgroße* gegensinnige Bewegung beider Augen, womit dem HERING'schen Gesetz Rechnung getragen wird. Im natürlichen Sehen laufen die notwendigen Versionen und Vergenzen gleichzeitig ab, um die Ausrichtung der Augen auf interessierende Objekte zu bewirken. Als Beispiel soll der in *Abb. 13* dargestellte Fall dienen, bei dem ein fernes Objekt mit beiden Augen fixiert wurde und auf der Fixierlinie des linken Auges nähergerückt ist. Der hier schematisch dargestellte theoretische Übergang von der beidäugigen Fixation des fernen Objektes zur beidäugigen Fixation des nahen Objektes zeigt, daß entweder zuerst eine Laevoversion erfolgen könnte (um die Fixierlinien der Augen symmetrisch zum nahen Objekt zu stellen) und danach eine Konvergenz zur Ausrichtung beider Fixierlinien auf das Objekt (oberes Bild), oder aber daß zuerst eine Konvergenz auf die neue Fixationsentfernung erfolgen könnte und dann eine Laevoversion (unteres Bild). Die im natürlichen Sehen kombiniert ablaufenden Vorgänge Version und Vergenz führen jedoch tatsächlich dazu, daß das linke Auge in Ruhe bleibt (da sich die Adduktions- und Abduktionsimpulse gegenseitig aufheben), während das rechte Auge die aus beiden Vorgängen summierten Adduktionen machen muß.

Die hier definierte Vergenz wird manchmal als *symmetrische* Vergenz bezeichnet [26, S. 8]. Davon wird dann eine *asymmetrische* Vergenz unterschieden, die jedoch als Kombination von Version und Vergenz aufgefaßt werden muß, wenn die hier gegebenen strengen Definitionen von Version und Vergenz als jeweils *gleichgroße* Bewegungen beider Augen zugrunde gelegt werden. Sonst könnte der im Beispiel der

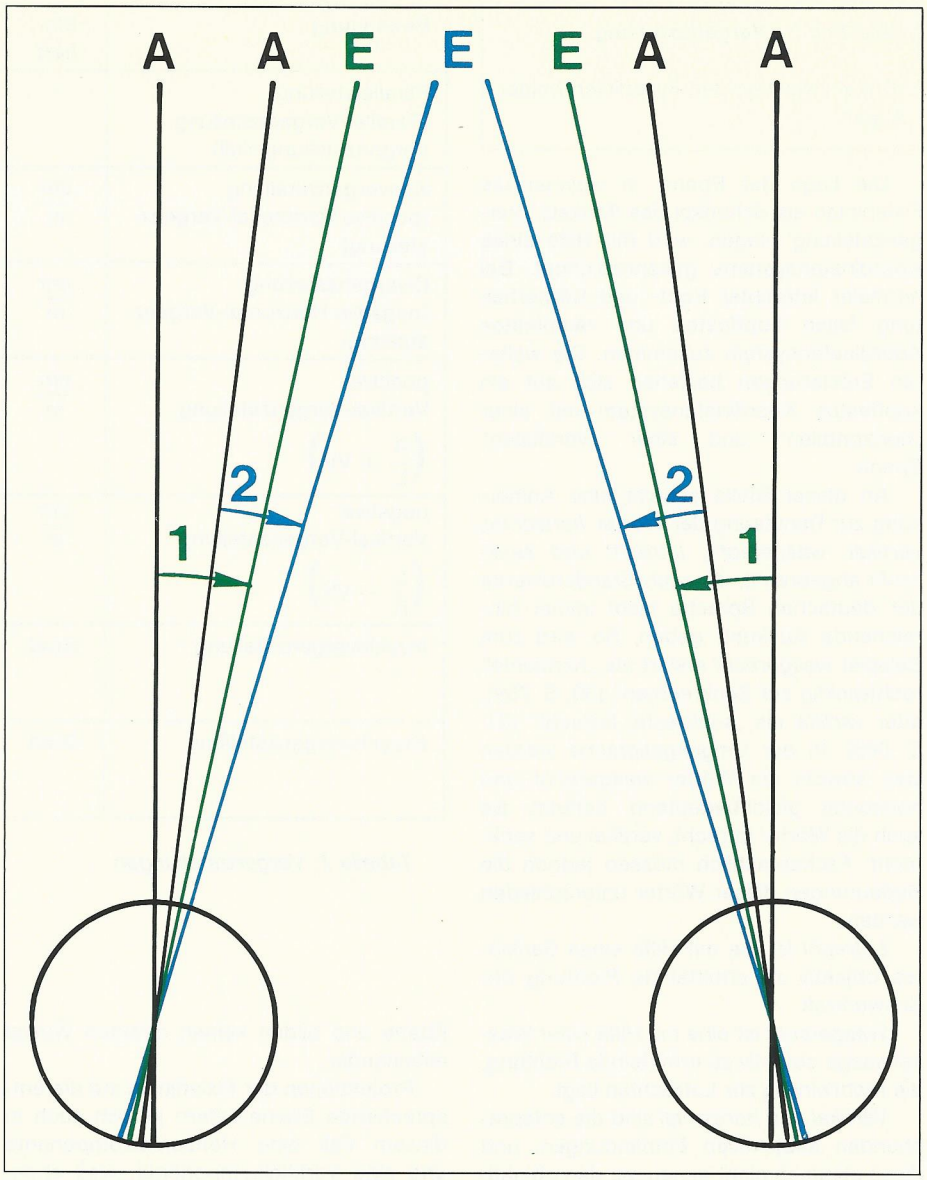


Abb. 10: Konvergenz von der Parallelstellung A 1 aus und von der Konvergenzstellung A 2 aus (E: Endstellungen)

Abb. 13 dargestellte Bewegungsablauf ebensogut als asymmetrische Version wie als asymmetrische Vergenz bezeichnet werden, da nur das rechte Auge eine Bewegung macht. Im natürlichen Sehen würde eventuell zusätzlich eine Kopfwendung nach links und eine gleichzeitige Dextroversion erfolgen, um ein Sehen mit geringstmöglicher Anstrengung zu gewährleisten. Deshalb ist es bei Konvergenz- und Divergenz*stellungen* sinnvoll, zwischen *symmetrischen und asymmetrischen* Stellungen zu unterscheiden, je nachdem ob der Schnittpunkt der Fixierlinien auf der Medianebene des Augenpaares liegt oder nicht. Bei symmetrischer Vergenzstellung ist der halbe Winkel zwischen den Fixierlinien gleich der Abweichung jedes Auges von der Primärstellung.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß Versionen erfolgen, wenn verschiedene Objekte in gleicher Entfernung nacheinander angeblickt werden sollen, Vergenzen hingegen, wenn verschieden weit entfernte Objekte in der Medianebene anzublicken sind. Andernfalls ist stets eine Kombination von Version (zur Richtungseinstellung) und Vergenz (zur Entfernungseinstellung) notwendig. Versionen laufen allgemein schneller ab als Vergenzen [26, S. 20].

2.4 Vergenz-Orthostellung und Vergenzbedarf

Zum binokularen Einfachsehen unter sensorisch *idealen* Bedingungen muß ein binokular dargebotener Fixationspunkt in

Definition 5 **Vergenz-Orthostellung**

Vergenzstellung, bei der ein binokular dargebotener Fixationspunkt gleichzeitig in den Netzhautgrubenmitten beider Augen abgebildet wird *(bifoveoläres Sehen).*

den Netzhautgrubenmitten beider Augen abgebildet werden. Die Fixierlinien beider Augen müssen sich dazu im Fixationspunkt schneiden. Diese *ideale* Vergenzstellung soll als „Orthostellung" bezeichnet werden.

Beim Blick in die Ferne ist die Parallelstellung die Orthostellung für ein Augenpaar ohne Brille, beim Blick in die Nähe ist eine bestimmte Konvergenzstellung die Orthostellung. Diese Orthostellungen für ein Augenpaar ohne Brille sind in *Abb. 14* dargestellt. Durch die unter den Augen gezeichneten Kreuze sollen die horizontalen und vertikalen Netzhautmeridiane (vgl. Abb. 6) gekennzeichnet sein. Bei dem dargestellten bifoveolären Sehen (Orthostellung) wird der Fixationspunkt in beiden Netzhautgrubenmitten abgebildet.

Als „Vergenzbedarf" soll ganz allgemein diejenige Vergenz bezeichnet werden, welche aus irgendeiner bestimmten Vergenzstellung heraus die Augen in die vorgegebene Orthostellung überführt.

Bei der späteren Betrachtung des Begriffes „Heterophorie" wird sich zeigen, daß schon zum Sehen in die Ferne ein Vergenzbedarf vorliegen kann. Der besonders wichtige Vergenzbedarf zur Überführung eines Augenpaares von der Fern-Orthostellung in eine Nah-Orthostellung wird speziell als (freier) „Konvergenzbedarf" bezeichnet. Der gelegentlich anzutreffende Zusatz „freier" Konvergenzbedarf soll darauf hinweisen, daß es sich hierbei um den Konvergenzbedarf eines Augenpaares ohne Brille handelt.

Definition 6 **Vergenzbedarf**

Diejenige Vergenz, die ein Augenpaar von irgendeiner bestimmten Vergenzstellung aus in die vorgegebene Orthostellung überführt.

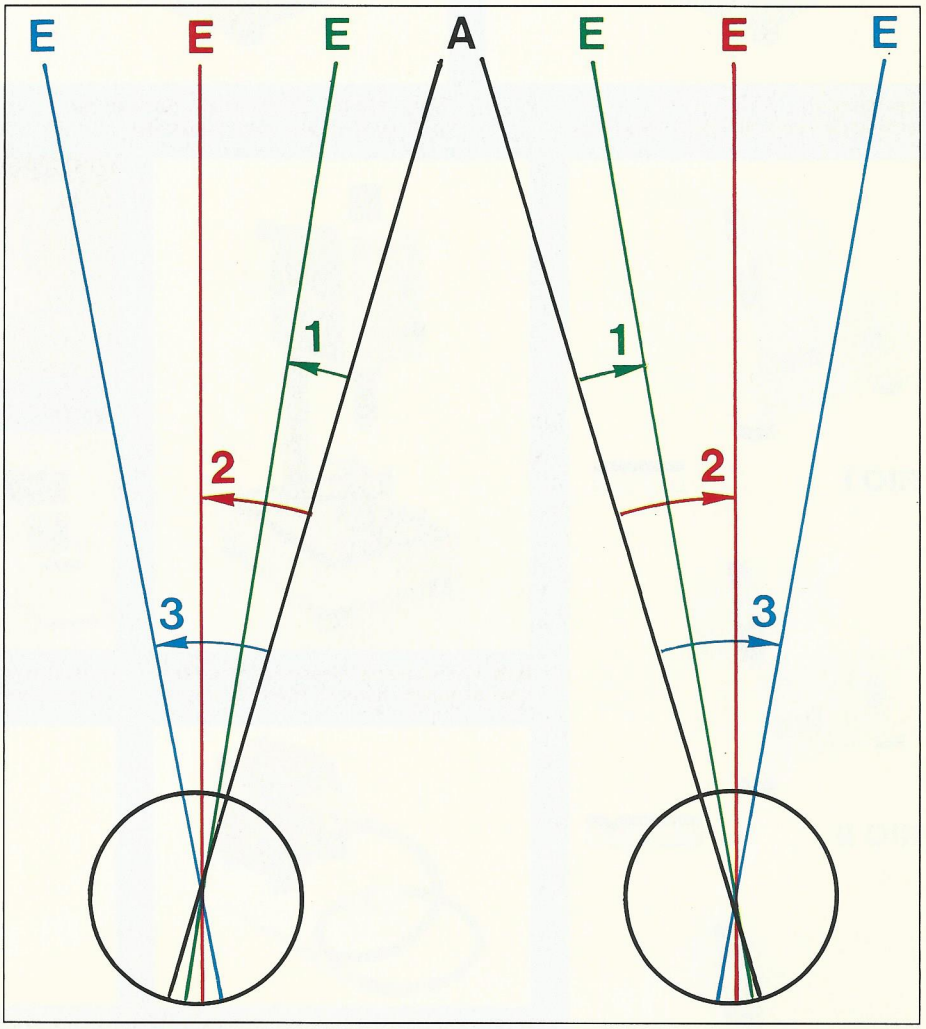
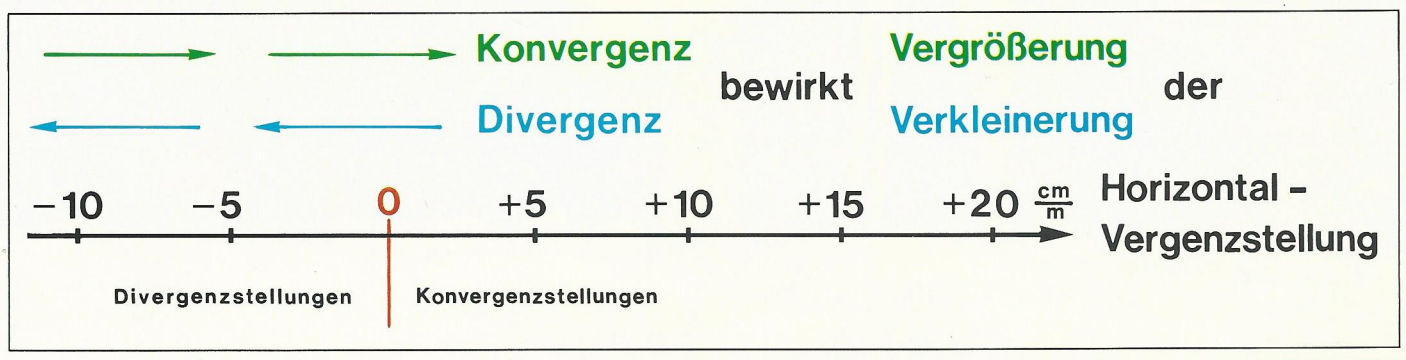


Abb. 11: Unterschiedliche Divergenzen von der Konvergenzstellung A aus (E: Endstellungen)

Abb. 12: Auswirkung von Horizontalvergenzen



Definition 7 **Freier Konvergenzbedarf**

Diejenige Konvergenz, die ein Augenpaar ohne Brille aus der Parallelstellung in eine bestimmte Nah-Orthostellung (Konvergenzstellung) überführt.

Der freie Konvergenzbedarf ist abhängig von der Entfernung des betrachteten Objektes und dem Pupillenabstand der Augen [1, Lfd. Nr. 13]. *Abb. 15* zeigt den Zusammenhang dieser Größen für die Ermittlung des freien Konvergenzbedarfs. Sind p der Pupillenabstand und a die positiv gerechnete Entfernung des binokular dargebotenen Fixationspunktes von der Verbindungsgeraden beider optischen Augendrehpunkte, dann ergibt sich aus dem rechtwinkligen Dreieck in Abb. 15 für den freien Konvergenzbedarf K:

$$\frac{1}{2}\,K\left(\frac{cm}{m}\right) = \frac{\frac{1}{2}\,p\,(cm)}{a\,(m)},$$

oder mit $A = \frac{1}{a}$

Formel 1 **Freier Konvergenzbedarf**

$$K\left(\frac{cm}{m}\right) = p\,(cm) \cdot A\,(dpt)$$

mit p: Pupillenabstand
und A: Kehrwert der Entfernung des Fixationspunktes

Diese Formel für den freien Konvergenzbedarf liefert gleichzeitig die Größe der betreffenden Konvergenzstellung (Nah-Orthostellung), da von der Parallelstellung aus gerechnet wird.

Anmerkung: Auch in [2, Lfd. Nr. 36] findet sich der Begriff „Vergenzbedarf", der dort erklärt wird als „Vergenzstellung, die zum binokularen Einfachsehen erforderlich ist." Da sich dort auch Formel 1 findet, ist damit offenbar der freie Konvergenzbedarf der Definition 7 gemeint, der dem Betrage nach gleich der betreffenden (Nah-)Orthostellung der Definition 5 ist. Trotzdem sollte die notwendige Größe eines Vorganges (Bedarf an *Vergenz)* nicht durch *einen* Zustand (Vergenzstellung) erklärt werden, sondern durch die dementsprechende Zustands*änderung.* Im übrigen wird auf die Vergenzstellung, die binokulares Einfachsehen ermöglicht, später genauer einzugehen sein, wenn das „normale Binokularsehen" erörtert wird.

Für ein Augenpaar mit Brille ist die Fern-Orthostellung nur dann die Parallelstellung, wenn in den Durchblickpunkten der Gläser keine binokular-prismatische Wirkung herrscht. Die mit der Lage der Durchblickpunkte veränderliche binokular-prismatische Nebenwirkung refraktiv korrigierender Brillengläser beeinflußt den Kon-

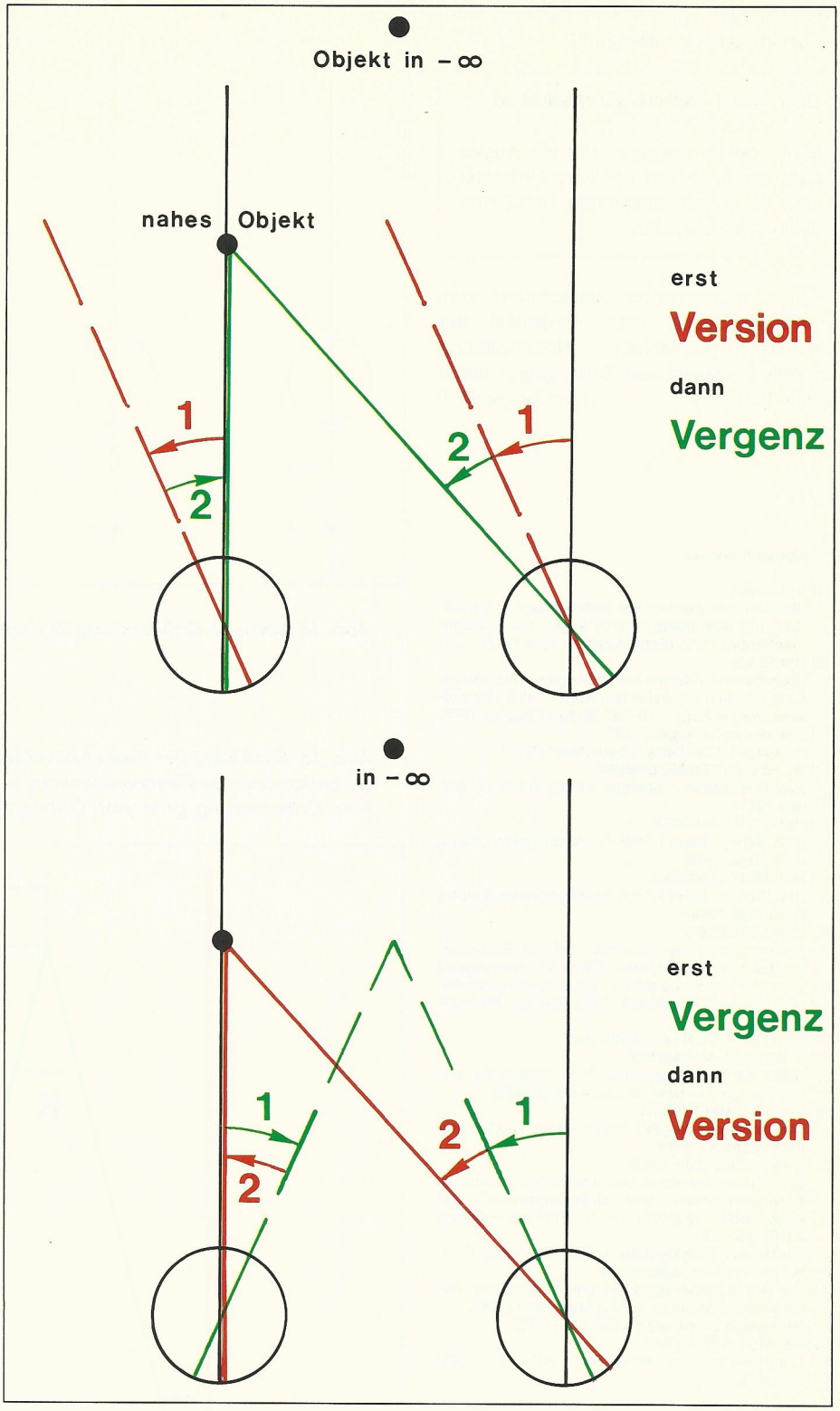


Abb. 13: Theoretisches Zusammenwirken von Version und Vergenz im natürlichen Sehen

vergenzbedarf. Dieser wird dann als Konvergenzbedarf cc bezeichnet.

Definition 8 **Konvergenzbedarf cc**

Diejenige Konvergenz, die ein Augenpaar mit Brille von der Fern-Orthostellung cc in eine bestimmte Nah-Orthostellung cc überführt.

Eine rechnerische Betrachtung zum Konvergenzbedarf unter Einschluß der binokular-prismatischen Nebenwirkung refraktiv korrigierender Brillengläser findet sich in [33]. *(wird fortgesetzt)*

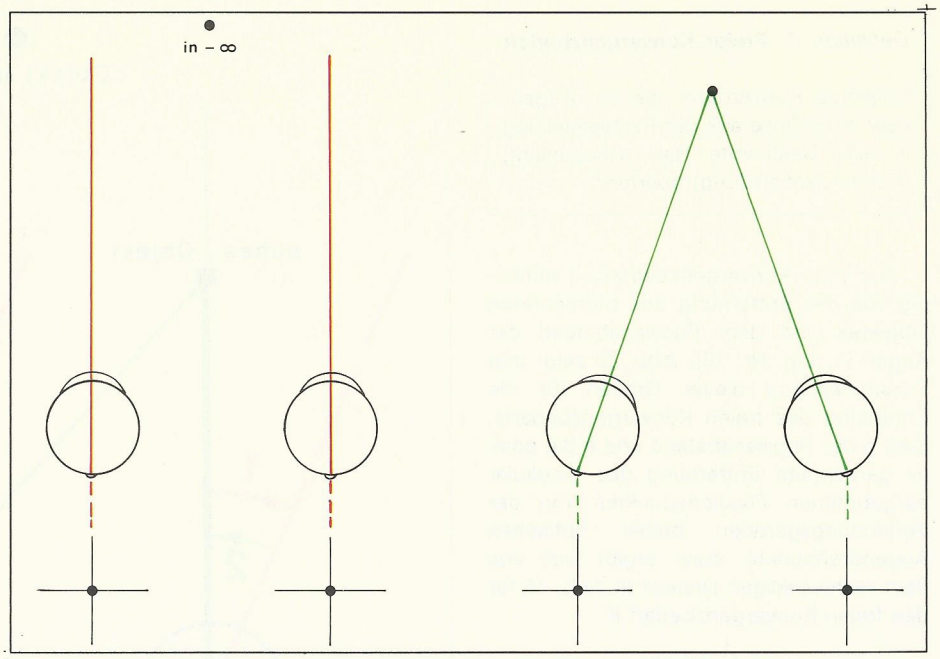
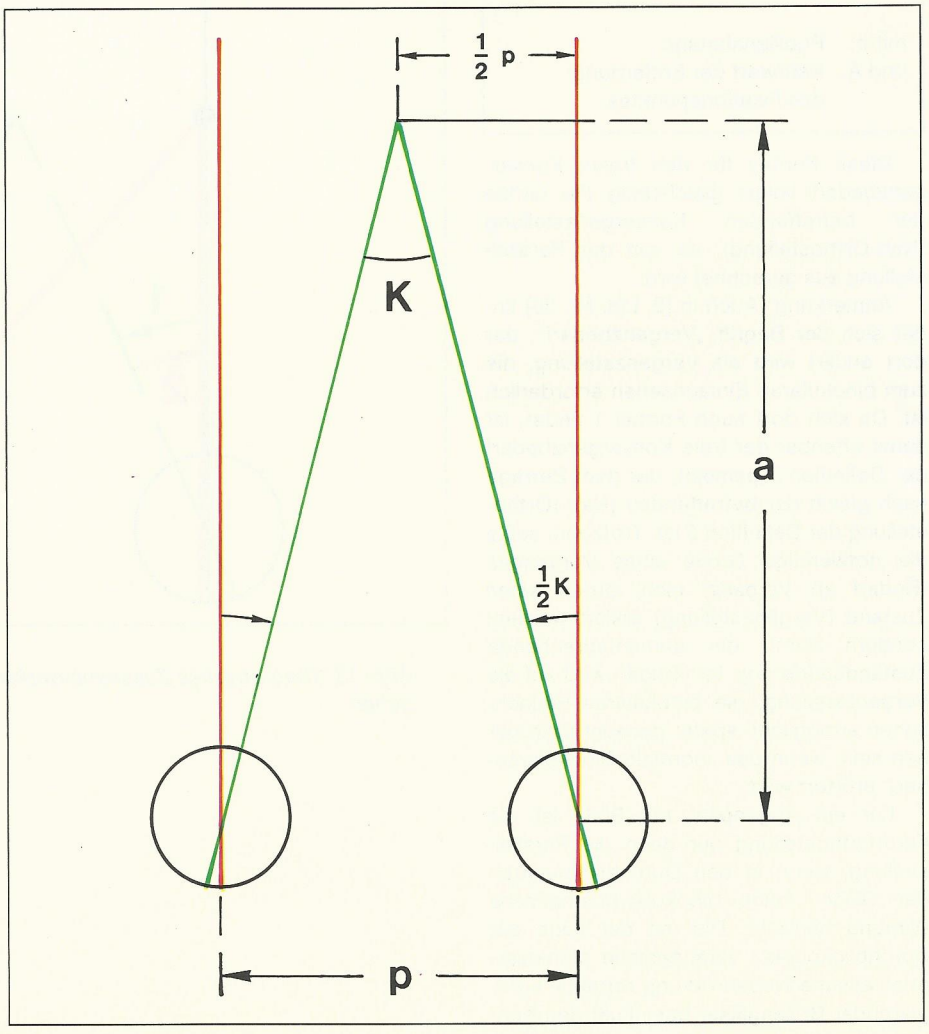


Abb. 14: Vergenz-Orthostellung für Ferne und Nähe

Abb. 15: Ermittlung des freien Konvergenzbedarfs K
(a: Entfernung des Fixationsobjektes, p: Pupillenabstand, rot: parallele Fern-Orthostellung, grün: Nah-Orthostellung)



Literaturhinweise

[1] DIN 58 208
„Begriffe und Zeichen bei Brillengläsern in Verbindung mit dem menschlichen Auge" Teil 3 „Auge" (September 1978) (Erste Ausgabe April 1972)

[2] DIN 58 208
„Begriffe und Zeichen bei Brillengläsern in Verbindung mit dem menschlichen Auge" Teil 5 „Binokulares System Auge — Brille" (Entwurf August 1978)

[4] „Handbuch für Augenoptik"
Herausgeb. Carl Zeiss, Oberkochen (1977)

[9] WILHELM TRENDELENBURG
„Der Gesichtssinn" Springer-Verlag, Berlin (2. Auflage 1961)

[10] HERBERT SCHOBER
„Das Sehen" Band I, VEB Fachbuchverlag Leipzig (4. Auflage, 1970)

[19] HERBERT SCHOBER
„Das Sehen" Band II VEB Fachbuchverlag Leipzig (3. Auflage 1964)

[26] G. MACKENSEN
„Untersuchung der Motilität und der Binokularfunktion" in WOLFGANG STRAUB (Herausgeb.) „Die ophthalmologischen Untersuchungsmethoden" Band II Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart (1976)

[27] GUNTER K. VON NOORDEN und
A. EDWARD MAUMENEE
„Atlas der Schieldiagnostik" F. K. Schattauer Verlag, Stuttgart — New York (2. Auflage 1979)

[28] WERNER MAIDOWSKY
„Anatomie des Auges", Verlag Neues Optikerjournal Pforzheim (1980)

[29] HANS-JOACHIM HAASE
„Zur Zusammenarbeit und Abstimmung zwischen Brillenbestimmern und Brillenanpassern" Der Augenoptiker 12 (1970) 7—17; 1 (1971) 31—35 und 2 (1971) 9—19

[30] Brockhaus Enzyklopädie Band 19, Verlag F. A. Brockhaus Wiesbaden (1974)

[31] Der Große Duden Band 5 (Fremdwörterbuch), Verlag Bibliographisches Institut Mannheim (1960)

[32] Brockhaus Enzyklopädie Band 17 (1973)

[33] HELMUT GOERSCH
„Zentrierung von Nahbrillen" NOJ 7 (1975) 509—516

Dr. Helmut Goersch, Berlin

Einführung in das Binokularsehen

Teil III

(Fortsetzung aus Heft 12/1980)

2.5 Vergenz-Arbeitsstellung und Fusion

Normales binokulares Einfachsehen kann unter Umständen auch dann vorhanden sein, wenn sich die Augen nicht genau in der Orthostellung befinden. Dabei liegt kein bifoveoläres Sehen vor, nur die Fixierlinie *eines* Auges ist auf das Fixationsobjekt gerichtet. In einem späteren Kapitel über die Sensorik des Binokularsehens wird auf diese „Fixationsdisparation" näher eingegangen. Diejenige Vergenzstellung, bei welcher sich im Normalfall binokulares Einfachsehen ergibt, soll als „Arbeitsstellung" bezeichnet werden.

Definition 9 **Vergenz-Arbeitsstellung**

Vergenzstellung eines Augenpaares, bei der normales binokulares Einfachsehen vorliegt.

Die ideale Arbeitsstellung ist selbstverständlich die Orthostellung.

Mit dem Begriff „Fusion" [2, Lfd. Nr. 11] werden alle Vorgänge zusammengefaßt, die zur Verschmelzung der beiden monokularen Seheindrücke eines Augenpaares zu einer beidäugigen Einfachwahrnehmung führen. Als Ergebnis des *Vorganges* „Fusion" entsteht der *Zustand* „binokulares Einfachsehen", der auch als „Simultansehen mit Fusion" bezeichnet wird.

Definition 10 **Fusion**

Gesamtheit der Vorgänge, die eine Verschmelzung der Seheindrücke beider Augen zum binokularen Einfachsehen liefern.

Zur Fusion gehören sowohl motorische als auch sensorische Vorgänge, die stets ineinandergreifen. Weicht die Vergenzstellung eines Augenpaares von der für die binokulare Einfachwahrnehmung eines interessierenden Objektes notwendigen Arbeitsstellung ab, so ergibt sich daraus ein „Fusionsreiz" [2, Lfd. Nr. 13]. Durch diesen Fusionsreiz wird eine Vergenz ausgelöst, bis die Arbeitsstellung (im Idealfall also die Orthostellung) erreicht ist. Die Tatsache, daß der gesamte Vorgang unwillkürlich geschieht, ist als „Fusionszwang" oder „Fusionsreflex" bekannt [34, S. 131].

Die durch den Fusionsreiz ausgelöste Vergenz wird als „motorische" Fusion, manchmal auch als „Fusionsbewegung" bezeichnet [35, S. 43; 36, S. 74].

Definition 11 **Motorische Fusion**

Durch einen Fusionsreiz bewirkte Vergenz, die ein Augenpaar bei vorgegebener Lage eines Fixationspunktes in eine Arbeitsstellung überführt.

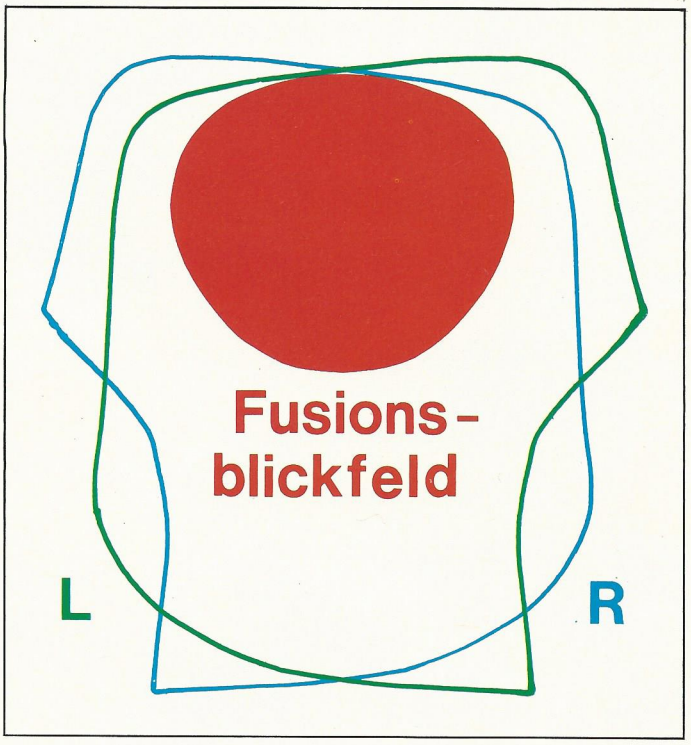


Abb. 16: Das Fusionsblickfeld eines Augenpaares nach Hering (L: Blickfeld des linken Auges, R: Blickfeld des rechten Auges. Aus [9] S. 269)

Befindet sich ein Augenpaar in einer Arbeitsstellung, dann setzt im Normalfall binokulares Einfachsehen durch „sensorische" Fusion ein.

Definition 12 **Sensorische Fusion**

Verschmelzung der Seheindrücke beider Augen zum binokularen Einfachsehen, ohne daß dazu eine Vergenz nötig ist.

Auch auf die sensorische Fusion wird im Kapitel über die Sensorik näher eingegangen.

Damit aus einer von der Arbeitsstellung abweichenden Vergenzstellung heraus Fusion erfolgen kann, müssen stets zwei Voraussetzungen erfüllt sein. Erstens muß ein Fusionsreiz vorhanden sein, und zweitens muß das Augenpaar die Fähigkeit besitzen, diesem Reiz mit entsprechender Vergenz Folge zu leisten. Bedingung für das Auftreten von Fusionsreizen ist *hinreichende* Gleichheit der Netzhautbilder in beiden Augen („objektive" Fusionsbedin-

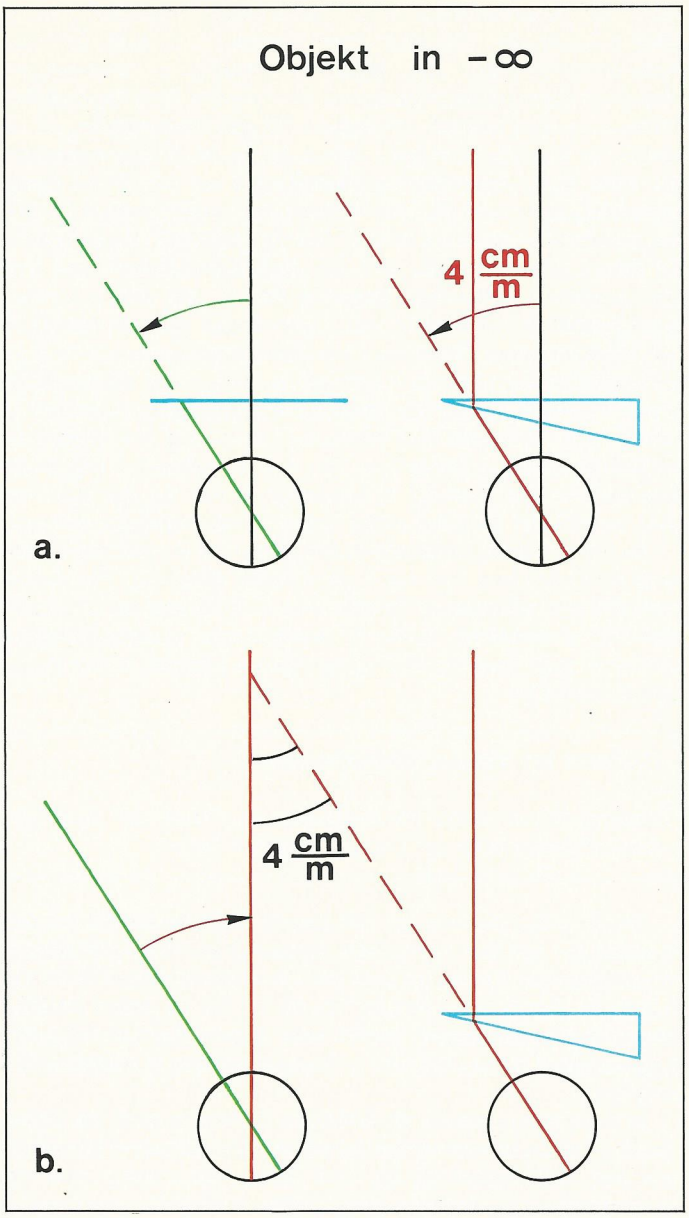


Abb. 17: Fusion bei unsymmetrischer Veränderung der Orthostellung

gung). Diese hinreichende Gleichheit bezieht sich auf Größe, Form, Struktur, Helligkeit, Kontrast, Schärfe und Farbe der Bilder. Ist die objektive Fusionsbedingung erfüllt, und besitzen die beiden monokularen Seheindrücke demzufolge hinreichend gleiche Wahrnehmungsqualität, dann müssen die Augen außerdem noch in der Lage sein, durch die Tätigkeit der Augenbewegungsmuskeln dem Fusionsreiz zu folgen, bis die Arbeitsstellung (im Idealfall die Orthostellung) erreicht ist („subjektive" Fusionsbedingung). Ist die subjektive Fusionsbedingung nicht erfüllt, wie etwa im Dissoziationsverfahren nach v. GRAEFE [8, S. 363; 35, S. 122], so wird doppelt gesehen. Für den äußerst seltenen (pathologischen) Fall, daß trotz erfüllter Fusionsbedingungen keine Fusion erfolgt, sondern Diplopie mit ständig wechselnder Entfernung der beiden monokularen Seheindrücke vorliegt, wird der Ausdruck „Horror fusionis" verwendet [37, S. 34].

Während das monokulare Blickfeld [1, Lfd. Nr. 11] eines jeden Auges alle Objekte umfaßt, die bei ruhig gehaltenem Kopf von diesem Auge zentral fixiert werden können, gibt das „Fusionsblickfeld" [26, S. 16] oder „binokulare Blickfeld" an, welche Objekte im natürlichen Sehen bei ruhendem Kopf fusioniert werden können. Am bekanntesten ist wohl die auf HERING zurückgehende, in Abb. 16 wiedergegebene Darstellung des Fusionsblickfeldes [9, S. 269].

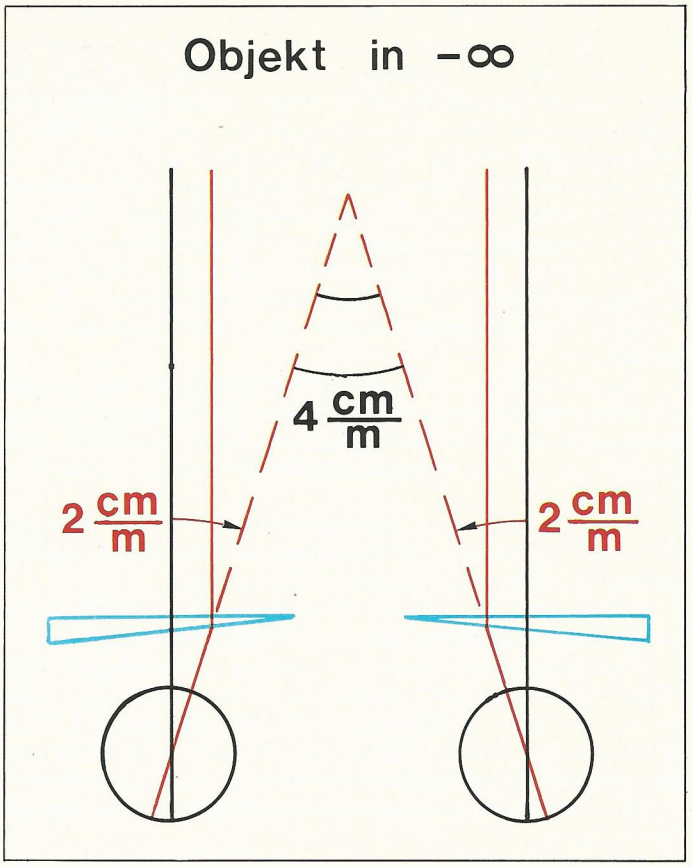


Abb. 18: Fusion bei symmetrischer Veränderung der Orthostellung

Die Fusion sorgt einerseits dafür, daß ein Augenpaar durch Vergenz in die zum binokularen Einfachsehen nötige Arbeitsstellung gelangt, andererseits aber auch dafür, daß eine einmal eingenommene Arbeitsstellung solange beibehalten wird („fusionale Verriegelung"), bis das Objekt des Interesses wechselt. Diese Tatsache der fusionalen Verriegelung einer Arbeitsstellung soll mit folgendem Beispiel illustriert werden, wobei die Orthostellung als Arbeitsstellung angenommen wird. Das Augenpaar der Abb. 17 blickt auf einen fernen Fixationspunkt. Die Orthostellung ist die Parallelstellung, es herrscht bifoveoläres binokulares Einfachsehen. Nun wird das linke Auge abgedeckt, und vor das rechte Auge wird ein Prisma (von z. B. 4 cm/m) mit der Basis außen, das heißt temporal, gehalten. Das Bild des Objektes wird um den entsprechenden Betrag zur temporalen Seite der Netzhaut hin verlagert. Der „Fixationsreflex" [38, S. 849] dient nun dazu, die zentrale Fixation wieder aufzunehmen. Dadurch wird eine Adduktion des rechten Auges ausgelöst. So erklärt sich auch die für Prismen mit Basis außen häufig benutzte Bezeichnung „adduzierende" Prismen (entsprechend heißen Prismen mit Basis innen, das heißt nasal, auch „abduzierende" Prismen). Nach dem HERING'schen Gesetz erfolgt außerdem eine gleichzeitige gleichgroße Abduktion des abgedeckten linken Auges, insgesamt macht das Augenpaar also eine Laevoversion, wodurch die Parallelstellung beibehalten wird (Abb. 17a), sofern dies die entsprechende Dunkelruhestellung des Augenpaares ist (siehe Abschnitt 2.6). Wenn nun die Abdeckung des linken Auges entfernt wird, so erfolgt eine Adduktion dieses Auges, um wieder zentrale Fixation des fernen Objektes aufzunehmen und damit Fusion zu ermöglichen (Abb. 17b). Würde das rechte Auge diese Duktion im Sinne einer Dextroversion mitmachen, dann würde das Fixationsobjekt doppelt gesehen. Das wird jedoch von dem jetzt wieder vorhandenen Simultansehen mit Fusion verhindert, die Vergenzstellung der Augen richtet sich nach der neuen, durch das Prisma veränderten Orthostellung cc. Es handelt sich dabei in diesem Beispiel um eine asymmetrische Konvergenzstellung von 4 cm/m. Wäre das Prisma vor

das rechte Auge gesetzt worden, ohne das linke Auge abzudekken, so hätte sich aufgrund der motorischen Fusion unmittelbar die asymmetrische Konvergenzstellung der Abb. 17b ergeben. Wenn andererseits das Prisma mit Basis außen vor das linke Auge gehalten worden wäre, hätte dieses eine entsprechende Adduktion ausgeführt, um das Augenpaar in die nun zur anderen Seite hin asymmetrische Orthostellung cc zu bringen. Bei symmetrischer Verteilung der binokular-prismatischen Wirkung mit temporaler Basislage auf beide Augen hätte der Fusionsreiz eine Konvergenz zur Folge, durch die das Augenpaar in die symmetrische Konvergenzstellung der Abb. 18 gelangte (Orthostellung cc).

Anhand der erläuterten Beispiele kann zusammenfassend festgestellt werden:

1. Eine binokular-prismatische Wirkung in den Durchblickpunkten einer Brille verändert die durch einen Fixationspunkt in einer bestimmten Arbeitsentfernung gegebene Orthostellung (die nach Formel 1 zu ermitteln ist) um den Betrag dieser prismatischen Wirkung.

2. Bei adduzierender binokular-prismatischer Wirkung ergibt sich eine Vergrößerung, bei abduzierender Wirkung eine Verkleinerung der horizontalen Vergenz-Orthostellung.

3. Eine vertikale binokular-prismatische Wirkung liefert eine entsprechende Vertikalkomponente für die Orthostellung.

4. Ist die binokular-prismatische Wirkung gleichmäßig auf beide Augen verteilt (das heißt: beiderseits gleiche Beträge mit Basis außen, oder Basis innen, oder rechts Basis unten und links Basis oben, oder rechts Basis oben und links Basis unten), dann wird die Orthostellung symmetrisch verändert, anderenfalls unsymmetrisch entsprechend den ungleichen prismatischen Wirkungen vor beiden Augen.

5. Der Fusionszwang sorgt dafür, daß die Augen eine der neuen Orthostellung cc entsprechende Arbeitsstellung einnehmen, sofern objektive und subjektive Fusionsbedingungen erfüllt sind.

6. Die Veränderung der Orthostellung durch eine binokular-prismatische Wirkung in den Durchblickpunkten einer Brille bedeutet eine gleichgroße Veränderung des Vergenzbedarfs (Definition 6). Diese Auswirkung wurde früher auch mit dem Ausdruck „Brillenvergenz" bezeichnet [4, S. 152].

2.6 Vergenz-Ruhestellung und Ruhestellungsfehler

Es besteht wohl Einigkeit darin, mit dem Begriff „Ruhestellung" (oder Ruhelage) den unter den gegebenen Umständen anstrengungsärmsten Zustand eines Vergenzsystems zu bezeichnen. In einer Ruhestellung gelangen die insgesamt schwächsten Innervationsimpulse an die Augenbewegungsmuskeln, wobei die Innervationsverhältnisse von verschiedenen äußeren Umständen abhängig sind. Es handelt sich jeweils um Zustände eines „Muskelgleichgewichtes", da hierbei keine Kraftrichtung überwiegt.

Definition13 **Vergenz-Ruhestellung**

Die unter vorgegebenen äußeren Umständen anstrengungsärmste Vergenzstellung eines Augenpaares (Muskelgleichgewichtsstellung).

Um eine andere als die Vergenz-Ruhestellung einzunehmen, sind stärkere Innervationen der Augenmuskeln notwendig, das Muskelgleichgewicht ist gestört, und der Energiehaushalt des Körpers wird (meist unnötig) belastet.

Zu unterschiedlichen äußeren Umständen gehören verschiedene, teilweise stark voneinander abweichende Ruhestellungen. Die absolute (auch anatomische, mechanische oder statische), das heißt innervationslose Ruhestellung, liegt nur unmittelbar nach dem Tode vor [34, S. 169; 36, S. 144] und ist sowohl für die physiologische Optik als auch für die Optometrie ohne Bedeutung. Aber auch die Schlafruhestellung des BELL'schen Phänomens [9, S. 289] als eine der physiologischen relativen (das heißt von den äußeren Umständen des lebenden Organismus abhängigen) Ruhestellungen ist optometrisch bedeutungslos. Von wesentlicher Bedeutung sind jedoch diejenigen Vergenz-Ruhestellungen, in denen im Wachzustand bei offenen Augen Muskelgleichgewicht herrscht. Einen besonders starken Einfluß auf die Größe dieser Ruhestellungen kann die Leuchtdichte des Gesichtsfeldes [1, Lfd. Nr. 9], insbesondere im zentralen Bereich, besitzen. Diese qualitativ schon lange bekannte und als „Hell-Dunkel-Effekt" des Vergenzsystems bezeichnete Tatsache [39, S. 64] wurde kürzlich auch quantitativ untersucht [40]. Dabei zeigte sich der Hell-Dunkel-Effekt bei zwei Drittel aller Versuchspersonen, beginnend im Übergangsbereich zwischen dem photopischen und dem mesopischen Sehen [4, S. 64], also etwa bei Leuchtdichten zwischen 10 und 1 cd/m^2. Die gute Reproduzierbarkeit der bei den Versuchen erhaltenen Meßergebnisse legt den Schluß nahe, daß die Größe der Vergenz-Ruhestellung in Abhängigkeit von der Leuchtdichte eine individuelle Eigenart eines jeden Vergenzsystems darstellt.

Im Bereich des photopischen Sehens ist die Vergenz-Ruhestellung offenbar nicht von der Leuchtdichte abhängig. Für diesen optometrisch wichtigsten Bereich wird deshalb von *der* „Hellruhestellung" gesprochen, wobei für beide Augen gleiche Helligkeit vorliegen muß, was im natürlichen Sehen ohnehin in der Regel gewährleistet ist.

Definition 14 **Vergenz-Hellruhestellung**

Vergenz-Ruhestellung im photopischen Sehen bei gleicher Beleuchtungsstärke der Netzhäute beider Augen.

Ohne Zusatz bezieht sich der Begriff Hellruhestellung auf den Zustand der auf ihre Fernpunkte eingestellten, das heißt akkommodationslosen Augen, obwohl der Deutlichkeit wegen auch der Ausdruck „Fernhellruhestellung" zu finden ist. Zu jedem *anderen* Akkommodationszustand gehört eine andere Ruhestellung des Augenpaares; diese „Nahruhestellungen" werden in Abschnitt 2.8 erläutert.

In Vergenzsystemen mit Hell-Dunkel-Effekt weicht die Ruhestellung bei Leuchtdichten unterhalb des photopischen Bereiches von der Hellruhestellung ab, und diese Abweichung wird mit abnehmender Leuchtdichte meist größer, aber auch ein wellenförmiger Verlauf wurde beobachtet [40]. Außer der Hellruhestellung kann es also weitere von den entsprechenden Beleuchtungsverhältnissen bestimmte Ruhestellungen geben, die als „Dunkelruhestellungen" bezeichnet werden.

Definition 15 **Vergenz-Dunkelruhestellung**

Eine der Vergenz-Ruhestellungen im mesopischen oder im skotopischen Sehen.

Auch bei ungleichen Helligkeiten für beide Augen (insbesondere also bei manchen binokularen Prüfsituationen) kann sich eine Dunkelruhestellung des Vergenzsystems ergeben.

Beim normalen binokularen Einfachsehen befinden sich die meisten Augenpaare nicht im Zustand des Muskelgleichgewichtes [41, S. 81]. Sie nehmen im natürlichen Sehen aufgrund der Fusionsreize eine Arbeitsstellung ein, und wenn *sensorisch ideales* Binokularsehen vorliegt, dann stehen sie in der Orthostellung. Bei manchen Augenpaaren führen die besonderen Umstände ihres Muskelgleichgewichtes sogar zu einem Schielen. In den vorgenannten Fällen stimmen Ruhestellung und Orthostellung nicht überein, was in der Literatur allgemein als „Stellungsanomalie" bezeichnet wird [38; 41]. Weicht die Vergenz-Ruhestellung eines Augenpaares von der durch den binokularen Fixationspunkt gegebenen Orthostellung ab, so besitzt dieses Augenpaar einen

„Ruhestellungsfehler", der oft auch nur als „Stellungsfehler" bezeichnet wird [8, S. 129; 35, S. 62].

Definition 16 **Ruhestellungsfehler**

Unterschied zwischen der Vergenz-Hellruhestellung eines Augenpaares und der Orthostellung.

Da die Orthostellung rein geometrisch-optisch zu ermitteln ist (für ferne Objekte Parallelstellung, für nahe Objekte Konvergenzstellung nach Formel 1), läuft die meßtechnische Bestimmung eines Ruhestellungsfehlers auf die Messung der Hellruhestellung hinaus. Im Rahmen dieser Einführung in das Binokularsehen geht es jedoch hauptsächlich um die begriffliche Erläuterung der physiologisch-optischen Gegebenheiten, weshalb die Frage einer korrekten Messung der Hellruhestellung hier nicht erörtert zu werden braucht. Die kontroversen Antworten auf diese Frage sind bekannt [38, S. 123]. Hier soll nur darauf hingewiesen werden, daß bisher noch nicht untersucht worden ist, ob im normalen natürlichen Binokularsehen (mit Fusion) genau die gleiche Ruhestellung maßgeblich ist, die sich unter Aufhebung aller Fusionsreize einstellt. Deshalb wurde in der Definition 13 die klassische Formulierung der Ruhestellung als *fusionsfreie* Vergenzstellung [36, S. 144] absichtlich vermieden.

Die Ruhestellungsfehler werden grundsätzlich in zwei verschiedene Arten eingeteilt, je nachdem, ob normales Binokularsehen bei Anwesenheit von Fusionsreizen vorliegt oder nicht. Stellt sich trotz eines Ruhestellungsfehlers normales binokulares Einfachsehen durch Fusion ein, dann handelt es sich um einen *latenten* Stellungsfehler, der als „Heterophorie" [2, Lfd. Nr. 15] bezeichnet wird. Durch das Simultansehen mit Fusion bleibt dieser Ruhestellungsfehler im natürlichen Sehen verborgen (*latent*).

Definition 17 **Heterophorie**

Ruhestellungsfehler, bei dem durch Fusion normales binokulares Einfachsehen zustande kommt (*Latenter* Stellungsfehler).

Verhindert der Ruhestellungsfehler eines Augenpaares das normale binokulare Einfachsehen, dann handelt es sich um einen *manifesten* Stellungsfehler, der als „Strabismus" [2, Lfd. Nr. 31] oder „Heterotropie" [3, Lfd. Nr. 148] bezeichnet wird.

Definition 18 **Heterotropie**

Ruhestellungsfehler, bei dem kein normales binokulares Einfachsehen zustande kommt (*Manifester* Stellungsfehler, *Strabismus, Schielen).*

Die Größe eines Ruhestellungsfehlers ist kein Kriterium dafür, ob es sich um eine Heterophorie oder um einen Strabismus handelt. Es gibt sowohl große Heterophorien als auch kleine Strabismen. Die Art eines Ruhestellungsfehlers kann immer nur anhand der Qualität des Binokularsehens ermittelt werden.

(Wird fortgesetzt)

Literaturhinweise

[1] DIN 58 208
„Begriffe und Zeichen bei Brillengläsern in Verbindung mit dem menschlichen Auge" Teil 3 „Auge" (September 1978) (Erste Ausgabe April 1972)
[2] DIN 58 208
„Begriffe und Zeichen bei Brillengläsern in Verbindung mit dem menschlichen Auge" Teil 5 „Binokulares System Auge — Brille" (Entwurf August 1978)
[3] DIN 5340
„Begriffe der physiologischen Optik" (Entwurf Februar 1979)
[4] „Handbuch für Augenoptik"
Herausgeb. Carl Zeiss, Oberkochen (1977)
[8] HEINZ DIEPES
„Refraktionsbestimmung" Verlag Heinz Postenrieder, Pforzheim (2. Auflage 1975)
[9] WILHELM TRENDELENBURG
„Der Gesichtssinn" Springer-Verlag, Berlin (2. Auflage 1961)
[26] G. MACKENSEN
„Untersuchung der Motilität und der Binokularfunktion" in Wolfgang Straub (Herausgeb.) „Die ophthalmologischen Untersuchungsmethoden" Band II Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart (1976)
[34] HOWARD SOLOMONS
„Binocular Vision" William Heinemann Medical Books Ltd., London (1978)
[35] THEO GLASER
„Die Phorien" VEB Verlag Technik Berlin (1969)
[36] BURIAN — VON NOORDEN'S
„Binocular vision and ocular motility" The C. V. Mosby Company, St. Louis (Second Edition, 1980)
[37] JOACHIM OTTO
„Lehrbuch und Atlas der Orthoptik". Verlag Hans Huber Bern (1975)
[38] FRANZ ANTON HAMBURGER
„Stellungsanomalien" in Karl Velhagen (Herausgeb.) „Der Augenarzt" Band III. VEB Georg Thieme, Leipzig (1960)
[39] H.-J. HAASE/G. FORST/D. PESTALOZZI/H. GOERSCH
„Binokulare Korrektion" (Eine Sammlung von zehn Arbeiten aus den Jahren 1957—1978). Verlag Willy Schrickel, Düsseldorf (1980)
[40] UWE WULFF
„Zusammenhang von Vergenzruhelage und Leuchtdichte zentral dargebotener Testzeichen" Dissertation, Medizinischer Fachbereich der Freien Universität Berlin (1980)
[41] W. DODEN
„Stellungsanomalien und Motilitätsstörungen" in Th. Axenfeld/H. Pau „Lehrbuch und Atlas der Augenheilkunde" Gustav Fischer Verlag, Stuttgart (1980)

Sammelbox

- Alle Berufsinformationen dieser Fachzeitschrift werden zukünftig stets geordnet am gleichen Platz bereit gehalten
- Jede Sammelbox faßt einen kompletten Jahrgang
- Etiketten mit der gewünschen Jahreszahl werden mitgeliefert
- Preis je Sammelbox inc. Porto **12,50 DM** + 13% MwSt.
- Lieferung nur gegen Vorkasse auf die Konten:
  Postscheck-Konto: Köln 92584-500
  Bank: Deutsche Bank Düsseldorf 3942836



Verlag Willy Schrickel, 4000 Düsseldorf 30
Klever Str. 33 · Fernruf: 0211/488521

Dr. Helmut Goersch, Berlin

Einführung in das Binokularsehen

Teil IV

(Fortsetzung aus Heft 4/1981)

Bei einer *Zyklophorie* oder einer *Zyklotropie* [2, Lfd. Nr. 41 und 42] handelt es sich nicht um einen Ruhestellungsfehler im Sinne der Definition 16, sondern um eine Abweichung der anstrengungsärmsten Zyklovergenzstellung (Definition 4) von der parallelen Stellung der vertikalen Augenmeridiane.

Definition 19 **Zykloruhestellungsfehler**

Die vertikalen Meridiane beider Augen bilden in ihrer anstrengungsärmsten Zyklovergenzstellung einen von Null Grad abweichenden Winkel miteinander.

In einem solchen Fall sind die Augen also auch bei korrekter Ausrichtung beider Fixierlinien (Orthostellung) in ihrer „Zyklovergenz-Ruhestellung" gegeneinander verrollt. Ist ein Zykloruhestellungsfehler latent, dann sorgen die im natürlichen Sehen vorhandenen Fusionsreize für Simultansehen mit Fusion, und es liegt eine „Zyklophorie" vor.

Definition 20 **Zyklophorie**

Zykloruhestellungsfehler, bei dem durch Fusion normales binokulares Einfachsehen zustande kommt.

Ist ein Zykloruhestellungsfehler manifest, dann ist eine „Zyklotropie" vorhanden.

Definition 21 **Zyklotropie**

Zykloruhestellungsfehler, bei dem kein normales binokulares Einfachsehen zustande kommt.

2.7 Phorien

Die verschiedenen Arten des im vorigen Abschnitt definierten Ruhestellungsfehlers *Heterophorie* werden zusammen mit dem binokularen Idealfall *Orthophorie* als Phorien bezeichnet [2, Lfd. Nr. 26]. In dem motorischen Idealzustand „Orthophorie" befinden sich die Augen bei bifoveolärer Abbildung des Fixationspunktes (Orthostellung) im Muskelgleichgewicht.

Definition 22 **Orthophorie**

Die Vergenz-Ruhestellung der Augen stimmt mit der vorgegebenen Orthostellung überein *(bifoveoläres Sehen bei Muskelgleichgewicht).*

Die beiden Begriffe *Orthostellung* und *Orthophorie* dürfen in ihrer unterschiedlichen Bedeutung nicht miteinander verwechselt werden. Auf diesen bei Lernenden häufig anzutreffenden Gedankenfehler soll besonders aufmerksam gemacht werden. Befindet sich ein Augenpaar in der Orthostellung (Definition 5), dann ist die für ein *sensorisch ideales* Binokularsehen nötige bifoveoläre Abbildung des Fixationspunktes vorhanden. Damit ist jedoch nicht gesagt, daß gleichzeitig *motorisch ideales* Binokularsehen vorliegt: Orthostellung bedeutet noch nicht Orthophorie! Auch bei jeder voll motorisch kompensierten Heterophorie befinden sich die Augen in der Orthostellung. Erst wenn die Orthostellung zugleich die Ruhestellung des Augenpaares ist, herrscht der Idealzustand Orthophorie.

Um eine andere Verwechslung zu verhindern, soll an dieser Stelle auf den in [2, Lfd. Nr. 22] aufgeführten Begriff *Orthotropie* hingewiesen werden. „Orthotropie" wird dort definiert als „Vergenzstellung, bei der sich die Fixierlinien beider Augen im angeblickten Objektpunkt schneiden". Danach ist der dortige Begriff

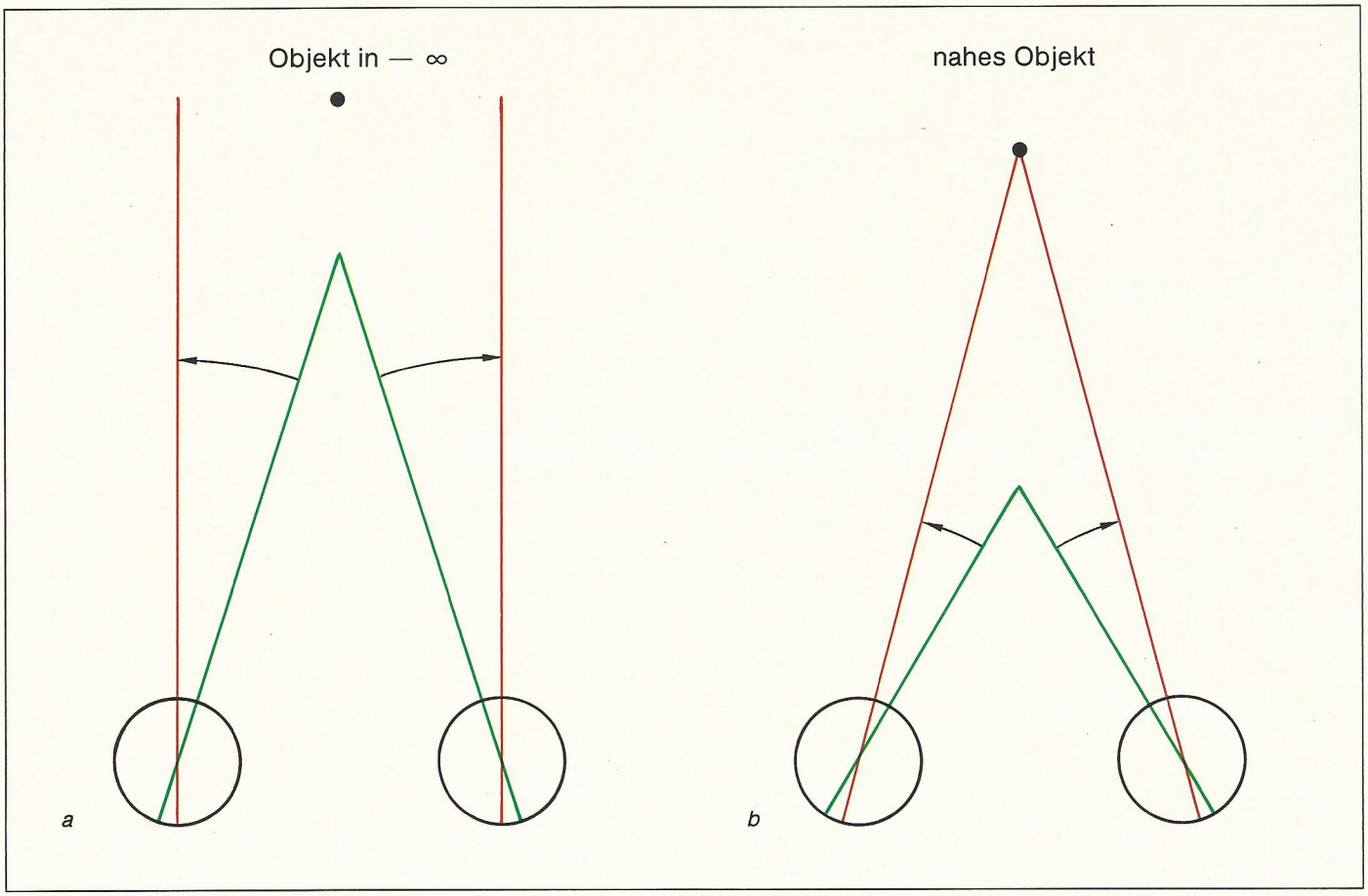


Abb. 19: Fusionaler Divergenzbedarf zur motorischen Kompensation einer
a) Fern-Esophorie } *grün: Vergenz-Ruhestellung*
b) Nah-Esophorie } *rot: Orthostellung*

Orthotropie mit dem hier verwendeten Begriff Orthostellung identisch und darf deshalb ebenfalls nicht mit Orthophorie verwechselt werden. Weiterhin findet sich die Bezeichnung „Orthoposition" zur Kennzeichnung der „idealen Lage der Augen für das binokulare Einfachsehen" [42, S. 109], so daß auch Orthoposition und Orthostellung identische Begriffe sind.

Um aus der Vergenz-Ruhestellung in die Orthostellung zu gelangen, muß ein heterophorisches Augenpaar eine entsprechende Vergenz aufbringen. Gemäß Definition 6 besteht ein *„fusionaler* Vergenzbedarf".

Definition 23 **Fusionaler Vergenzbedarf**

Diejenige Vergenz, die ein (heterophorisches) Augenpaar von seiner Vergenz-Ruhestellung in die vorgegebene Orthostellung überführt.

Der fusionale Vergenzbedarf bei Heterophorie stellt eine zum bifoveolären Sehen notwendige motorische Fusion dar, wobei der Betrag des fusionalen Vergenzbedarfs stets gleich der Größe der Heterophorie ist. Hier liegt also der bereits in Abschnitt 2.4 erwähnte Fall vor, daß selbst beim Sehen in die Ferne ein Vergenzbedarf vorhanden ist.

Die Benennung der einzelnen Arten von Heterophorien gibt an, in welcher Richtung die Vergenz-Ruhestellung des betreffenden Augenpaares von der Orthostellung abweicht, wobei diese Benennungen gleichermaßen für Ferne und Nähe benutzt werden (gegebenenfalls mit dem Zusatz Fern- bzw. Nah-). Besitzen Ruhestellung und Orthostellung unterschiedliche Horizontalkomponenten, so liegt eine „Horizontalphorie" vor. Horizontalphorien werden in *Esophorien* und *Exophorien* eingeteilt. Bei einer „Esophorie" weicht die Ruhestellung der Augen von der Orthostellung nach innen ab.

Definition 24 **Esophorie**

Die Vergenz-Ruhestellung der Augen weicht von der vorgegebenen Orthostellung nach innen ab.

Die Ruhestellung eines esophorischen Augenpaares ist also eine im mathematischen Sinne größere Horizontal-Vergenzstellung als die Orthostellung. Zum Übergang von der Ruhestellung in die Orthostellung besteht daher ein fusionaler *Divergenzbedarf* (siehe Abb. 12). Dieser fusionale Divergenzbedarf zur motorischen Kompensation einer Esophorie wird in Abb. 19 veranschaulicht.

Bei einer „Exophorie" ist die Ruhestellung eine im mathematischen Sinne kleinere Horizontal-Vergenzstellung als die Orthostellung.

Definition 25 **Exophorie**

Die Vergenz-Ruhestellung der Augen weicht von der vorgegebenen Orthostellung nach außen ab.

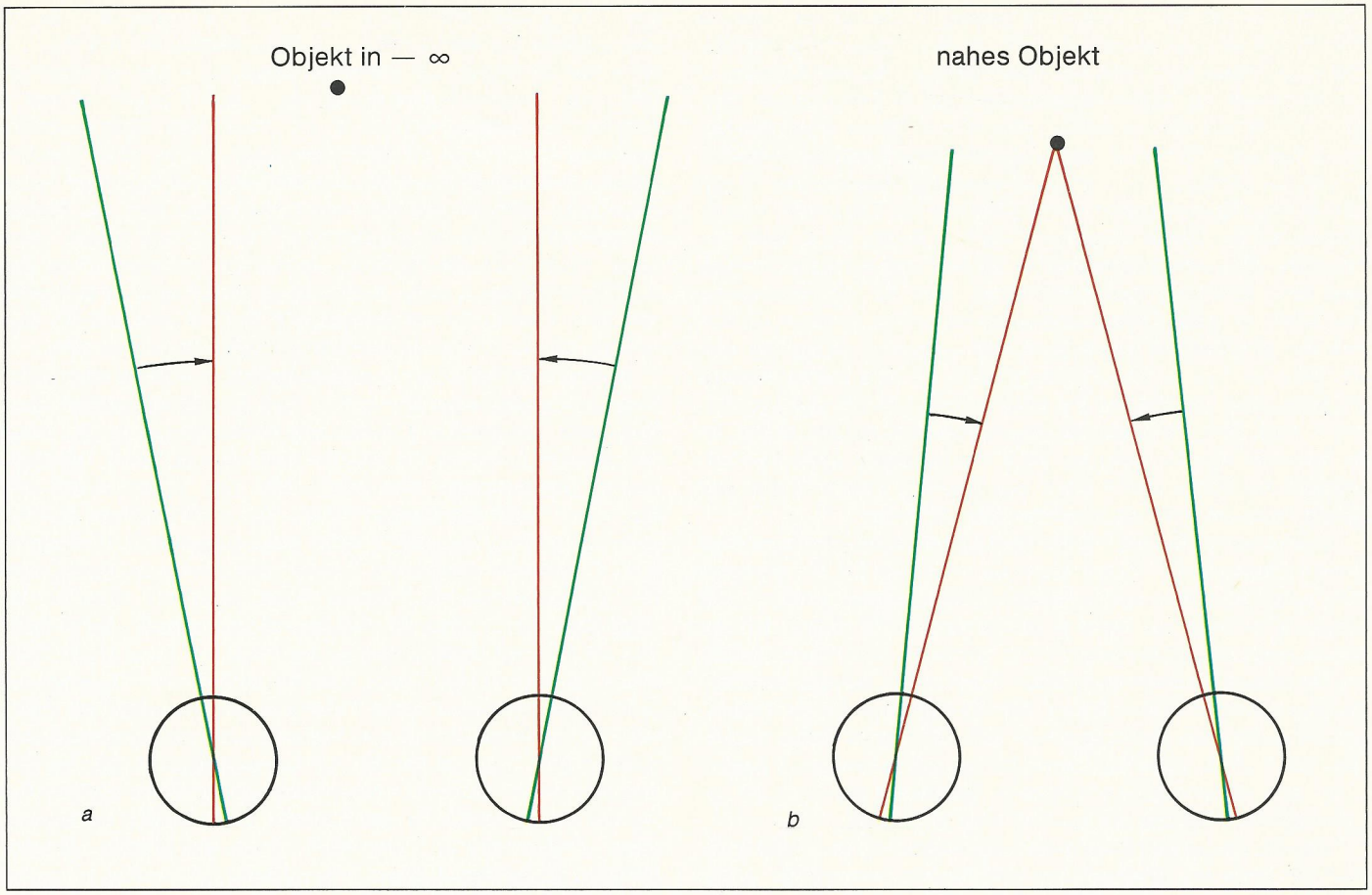


Abb. 20: Fusionaler Konvergenzbedarf zur motorischen Kompensation einer
a) Fern-Exophorie } *grün: Vergenz-Ruhestellung*
b) Nah-Exophorie } *rot: Orthostellung*

Ein exophorisches Augenpaar besitzt demnach einen fusionalen *Konvergenzbedarf* zur motorischen Kompensation seiner Heterophorie, was in Abb. 20 dargestellt ist.

Bei einer „Vertikalphorie" (oder „Höhenphorie") unterscheiden sich Vergenz-Ruhestellung der Augen und Orthostellung in ihrer Vertikalkomponente.

Definition 26 **Vertikalphorie**

Die Vergenz-Ruhestellung der Augen weicht von der vorgegebenen Orthostellung in der Vertikalen ab *(Höhenphorie)*.

Die in Tab. 8 zusammengestellte weitere Unterteilung von Vertikalphorien erfolgt nach der Richtung der Fixierlinien bei Vergenz-Ruhestellung im Vergleich zur Orthostellung. In jedem Fall besteht ein entsprechender fusionaler Vertikalvergenzbedarf, um das Augenpaar in die Orthostellung zu bringen.

Eine Heterophorie, die sich mit der Blickrichtung ändert, wird als „Anisophorie" [43, S. 559] oder als „inkomittierende" Heterophorie [8, S. 145] bezeichnet. Die Größe von Heterophorien wird in der Maßeinheit cm/m angegeben (welche früher auch als Prismendioptrie bezeichnet wurde).

Außer reinen Esophorien, Exophorien und Vertikalphorien gibt es die Kombinationen Esophorie-Vertikalphorie und Exophorie-Vertikalphorie. Die Häufigkeit aller Arten von Heterophorien zusammen liegt bei ungefähr 75% [43, S. 529; 44, S. 33] (ähnlich wie die der Fehlsichtigkeiten [8, S. 65]), wobei die Literaturangaben darüber zum Teil erheblich schwanken. Das ist jedoch nicht anders zu erwarten, denn statistische Aussagen dieser Art hängen sowohl von der jeweils verwendeten Meßmethode ab, als auch von der angenommenen Schwelle zum Idealzustand (in der Regel 0,5

Benennung	Abweichung d. Vergenz-Ruhestellung gegenüber der Orthostellung
positive Vertikalphorie, Hyperphorie R, Hypophorie L	Fixierlinie des rechten Auges nach oben und/oder Fixierlinie des linken Auges nach unten
negative Vertikalphorie, Hyperphorie L, Hypophorie R	Fixierlinie des linken Auges nach oben und/oder Fixierlinie des rechten Auges nach unten

Tab. 8: Vertikalphorien

Art der Heterophorie	nach Bosshard	nach Günthert	Mittelwerte	
Esophorie-Vertikalphorie	29,0%	38,5%	34%	75%
Exophorie-Vertikalphorie	27,5%	16,8%	22%	
Vertikalphorie	16,0%	22,1%	19%	
Esophorie	16,5%	17,5%	17%	25%
Exophorie	11,0%	5,1%	8%	

Tab. 9: Verteilung von Heterophorien (aus [45] und [46])

cm/m binokular und 0,25 dpt monokular). In der älteren Literatur finden sich kaum systematisch gewonnene Angaben über die Häufigkeit der einzelnen Arten von Heterophorien. Neuere Ergebnisse von BOSSHARD an 2000 Heterophorikern [45, S. 249] und von GÜNTHERT an 5000 Heterophorikern [46] sind in Tab. 9 zusammengestellt. Daraus geht hervor, daß die Kombination Esophorie-Vertikalphorie am häufigsten auftritt; etwa jede dritte Heterophorie ist von dieser Art. Den geringsten Anteil stellt hier die Exophorie, was im Gegensatz zu älteren Angaben steht [44, S. 39; 45, S. 248]. Bei ungefähr 75% aller Heterophorien ist eine Höhenphorie beteiligt, und 25% sind reine Horizontalphorien. Wird für alle Augenpaare ein Anteil von 25% *Orthophorie* zugrunde gelegt, dann ergibt sich mit den Mittelwerten aus Tab. 9 eine ungefähre Verteilung aller Phorien, wie sie in Abb. 21 dargestellt ist. Die ausführlichsten Angaben über die Größen von Heterophorien finden sich bei GÜNTHERT [46]. Etwa 78% aller Heterophorien sind danach *kleine* Heterophorien mit Beträgen bis zu 4 cm/m, knapp 20% besitzen *mittlere* Werte von über 4 cm/m bis 12 cm/m, und nur 2,4% sind *große* Heterophorien mit Beträgen über 12 cm/m.

Zur korrekten Ermittlung der Größe einer Heterophorie müssen zwei meßtechnische Voraussetzungen erfüllt werden. Erstens muß für beide Augen eine exakte Refraktionsbestimmung erfolgen, und zweitens müssen die refraktiv vollkorrigierenden Gläser bei der binokularen Augenglasbestimmung genau zu den Pupillenmitten beider Augen zentriert sein, damit keine binokular-prismatischen Nebenwirkungen dieser Gläser das Meßergebnis für die Heterophorie verfälschen (siehe Abschnitt 2.5). Sind diese Voraussetzungen nicht erfüllt, dann kann auch für ein orthophorisches Augenpaar eine scheinbare Heterophorie gemessen werden, die als „Pseudo-Heterophorie" bezeichnet wird [8, S. 146].

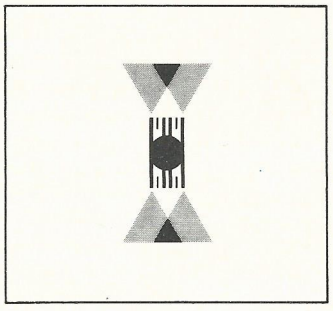
Bei der Erörterung prismatischer Korrektionen von Heterophorien ist zwischen *Meßmethode* und *Korrektionsregel* zu unterscheiden. Während die Meßmethode die Art einer Heterophorie und ihre Größe liefert, leitet die Korrektionsregel aus diesem Meßergebnis die Stärke des Korrektionsprismas ab. Auf die kontroversen Ansichten zur korrekten Messung einer Heterophorie (also der Vergenz-Ruhestellung der Augen) wurde schon in Abschnitt 2.6 hingewiesen [35, S. 118; 39, S. 123]. Ebenso kontrovers sind noch immer die Meinungen über die Korrektionsbedürftigkeit von Heterophorien. Nur ihre Korrektionsfähigkeit wird wohl inzwischen mehrheitlich nicht mehr bestritten. Wird die Korrektionsbedürftigkeit einer bestimmten Heterophorie bejaht, dann bleibt immer noch der Streit um die richtige Korrektionsregel [35, S. 225], wobei es in erster Linie um die Frage einer Unterkorrektion oder einer Vollkorrektion geht [39, S. 213]. Hier soll die Auswirkung von Korrektionsprismen begrifflich erläutert werden.

In Abschnitt 2.5 wurde bereits dargelegt, in welcher Weise jede binokular-prismatische Wirkung in den Durchblickpunkten einer Brille eine entsprechend veränderte Orthostellung cc zur Folge hat. Danach erfordern Esophorien Korrektionsprismen mit Basis außen. Der fusionale Divergenzbedarf des Esophorikers wird durch den Konvergenzbedarf infolge der adduzierenden Prismen vermindert (Unterkorrektion) oder ganz aufgehoben (Vollkorrektion). Exophorien werden mit Prismen Basis innen korrigiert, positive Vertikalphorien mit Prismen Basis unten vor dem rechten Auge (bzw. Basis oben vor dem linken) und negative Vertikalphorien mit Prismen Basis oben vor dem rechten Auge (bzw. Basis unten vor dem linken). Jede *Unterkorrektion* einer Heterophorie beläßt dem Augenpaar einen fusionalen Vergenzbedarf cc, genau wie eine refraktive Unterkorrektion einen Akkommodationsbedarf cc übrig läßt. Dagegen besteht die Auswirkung prismatischer Brillengläser zur *Vollkorrektion* einer Heterophorie in der *völligen Aufhebung* des fusionalen Vergenzbedarfs. Dadurch wird der Idealzustand *„Orthophorie cc"* hergestellt, genau wie refraktiv vollkorrigierende Gläser den Zustand „Emmetropie cc" herstellen. An der Heterophorie selbst wird durch eine prismatische Korrektion

Das Fachbuch vom Fachmann

Binokulare Korrektion

Die Methodik und Theorie von H.-J. HAASE



Eine Sammlung von 10 Arbeiten aus den Jahren 1957-1978 folgender Autoren:

H.-J. HAASE
Oberstudienrat a.D. an der SFOF Berlin

Prof. Dr. G. FORST
Direktor der SFOF Berlin

Dr. med. D. PESTALOZZI
Augenarzt, Olten/Schweiz

Dr. H. GOERSCH
stellv. Direktor der SFOF Berlin

291 Seiten, über 100 Abbildungen, broschiert, Preis 53,– DM

VERLAG DÜSSELDORF WILLY SCHRICKEL

Klever Str. 33
4000 Düsseldorf 30
Fernruf 0211 / 48 85 21

Postscheck-Konto-Köln
925 84-500 (BLZ 370 100 50)
Deutsche Bank Düsseldorf
3 942 836 (BLZ 300 700 10)

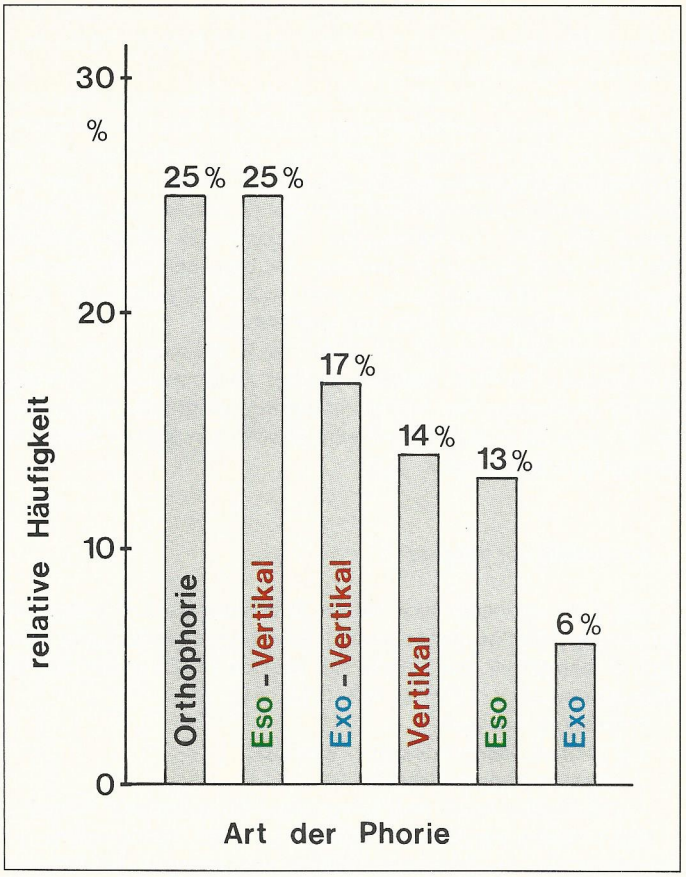


Abb. 21: Ungefähre Verteilung von Phorien

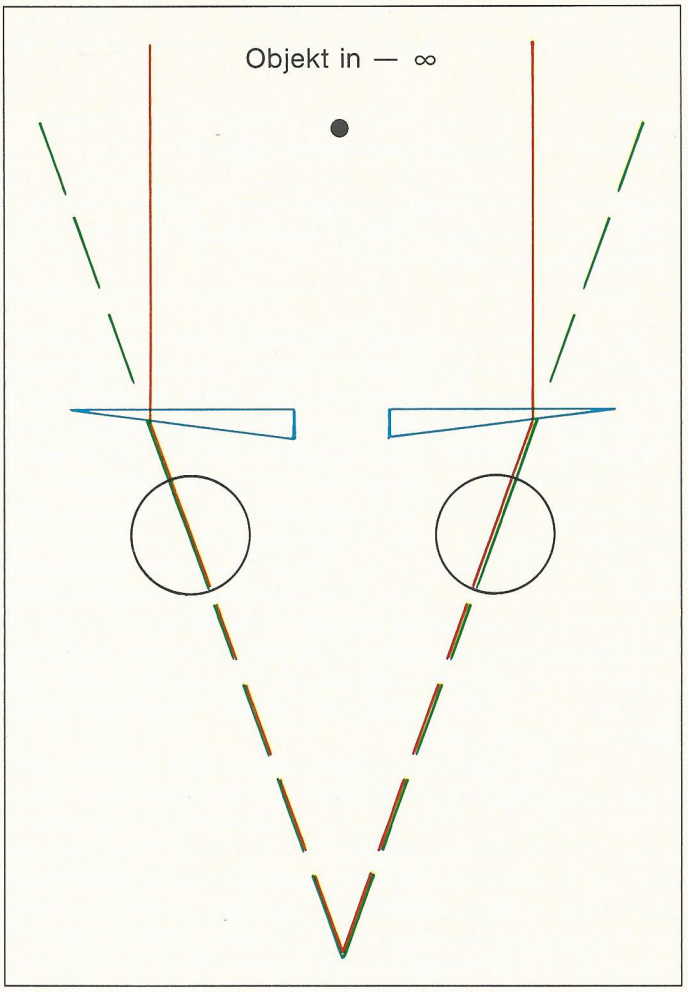


Abb. 22: Prismatische Vollkorrektion einer Exophorie (grün: Vergenz-Ruhestellung; rot: foveolär abbildende Hauptstrahlen, hinter den Prismen Orthostellung cc)

nichts geändert; die Vergenz-Ruhestellung der Augen wird dadurch ebensowenig beeinflußt wie die Fehlsichtigkeit eines Auges durch refraktive Korrektionsgläser. Prismatische Brillengläser zur binokularen Vollkorrektion bieten den Augen lediglich diejenige Orthostellung cc, die ihrer Ruhestellung entspricht. Damit wird bifoveoläres Sehen bei Muskelgleichgewicht erreicht, was am Beispiel einer Exophorie in Abb. 22 dargestellt ist.

Von denjenigen, die eine Korrektion kleiner Heterophorien *„ohne Beschwerden"* ablehnen, wird für diese Heterophorien gerne der Ausdruck *Normophorie* verwendet [41, S. 81], was nach GLASER auf einen Vorschlag von SACHSENWEGER zurückgeht [35, S. 66]. Der Begriff „Normophorie" wurde von JONKERS et al. jedoch als Kennzeichnung dafür geprägt, „daß der normale fusionsfreie Stand für die Fernsicht eine Streuung mit der Spitze nach der esophoren Seite und für die Nahsicht eine Streuung mit der Spitze nach der exophoren Seite aufweist" [47]. Damit sollte also offenbar klargestellt werden, daß Heterophorie der bei den meisten Augen anzutreffende Normalzustand ist. Deshalb sollte der Ausdruck Normophorie auch nur in diesem Sinne verwendet werden. Aus der Verteilung der Refraktionszustände akkommodationsloser Augen [48, S. 141] geht gleichermaßen hervor, daß Fehlsichtigkeit der Normalzustand ist, ohne daß heutzutage die Korrektion geringer Fehlsichtigkeiten *„ohne Beschwerden"* (als *Normo-Ametropien)* abgelehnt würde. Vor über hundert Jahren wurde jedoch vielfach noch die Korrektion jeglicher Übersichtigkeiten abgelehnt [49, S. 239]. Analog zur refraktiven Vollkorrektion fordert H.-J. HAASE eine konsequente Vollkorrektion aller Heterophorien anhand der mit seiner Methodik ermittelten Meßwerte [39; 50], wohingegen neben anderen SACHSENWEGER ein solches Vorgehen ablehnt [51].

Als Gegensatz zur Normophorie (im Sinne einer *nicht* korrektionsbedürftigen Heterophorie) findet sich gelegentlich der Ausdruck „Pathophorie" zur Kennzeichnung einer wegen entsprechender Beschwerden korrektionsbedürftigen Heterophorie [52]. Auch der Begriff Pathophorie sollte jedoch nur (wie es seinem wörtlichen Sinn entspricht) für tatsächlich pathologisch bedingte Heterophorien benutzt werden. Diese echten Pathophorien sind sicherlich ähnlich selten wie Fehlsichtigkeiten krankhafter Genese *(Patho-Ametropien).* Die Ursache einer normalen Heterophorie kann sowohl anatomischer als auch innervatorischer Natur sein. Für die Belange der Optometrie ist die Ursache einer nicht krankhaften Heterophorie ebenso gleichgültig wie die Ursache einer normalen Fehlsichtigkeit (Längen- oder Brechwertametropie). „Es bleibt dem einzelnen überlassen, ob er den anatomischen oder den nervösen Faktoren größere Bedeutung zuerkennen will" [44, S. 35].

Für eine Beschwerden (engl.: symptoms) verursachende Heterophorie findet sich der Ausdruck *dekompensierte* Heterophorie [8, S. 136; 47; 53, S. 180] vielfach ohne Rücksicht darauf, ob der fusionale Vergenzbedarf dabei vollständig motorisch gedeckt wird oder nicht. Dementsprechend betont SACHSENWEGER, daß „Dekompensation ein klinischer und kein physikalisch-optischer Begriff" sei [54, S. 169]. Bei dieser Festlegung wäre jedoch nicht meßtechnisch feststellbar, ob eine Heterophorie dekompensiert ist oder nicht. Außerdem hält WIESER „die Bezeichnung *Kompensation* oder *Dekompensation* anhand der Abwesenheit oder des Vorliegens von subjektiven Symptomen, wie Kopfschmerz, Asthenopie etc. für unklar und verwirrend". Und er spricht „von einer kompensierten Heterophorie dann, wenn es dem Patienten gelingt, bifoveoläre Fixation aufrechtzuerhalten" [55]. Deshalb soll hier der Begriff Dekompensation grundsätzlich physikalisch-optisch aufgefaßt und nur im Sinne einer „motorisch dekompensierten Heterophorie"

benutzt werden. Der nicht mehr motorisch kompensierte Anteil wird auf sensorischem Wege (mit Fixationsdisparation) ausgeglichen.

Definition 27 **Dekompensierte Heterophorie**

Nicht mehr voll motorisch kompensierter Stellungsfehler, bei dem normales binokulares Einfachsehen durch Fixationsdisparation aufrechterhalten wird.

Bei einer dekompensierten Heterophorie weicht die Arbeitsstellung von der Orthostellung in Richtung auf die Ruhestellung hin ab, und eine solche Abweichung kann meßtechnisch überprüft werden. Damit ist für jede Heterophorie die Frage nach einer eventuellen Dekompensation im Sinne der Definition 27 mit einer geeigneten Meßmethodik zu beantworten [39]. Unabhängig davon, ob Beschwerden vorhanden sind oder nicht, wird bei einer dekompensierten Heterophorie der Unterschied zwischen Arbeits- und Orthostellung auf sensorischem Wege (durch Fixationsdisparation) überbrückt bzw. „kompensiert". Beim binokularen Einfachsehen mit Fixationsdisparation liegt zwar *normales,* aber kein sensorisch *ideales* Binokularsehen vor. Die damit verbundenen Sehstörungen sind in [56] zusammengestellt. Hier wird im Kapitel über die Sensorik des Binokularsehens auf die Fixationsdisparation näher eingegangen werden.

In Abschnitt 2.6 wurde die Heterophorie als *latenter* Ruhestellungsfehler erklärt, weil die Existenz des Stellungsfehlers (wegen des vorhandenen normalen binokularen Einfachsehens) erst durch geeignete Meßverfahren festgestellt werden kann. Daher mag der auch von Sachsenweger benutzte Ausdruck *latente Heterophorie* [51, S. 649] im ersten Moment als Tautologie erscheinen. Dieser Begriff ist jedoch sinnvoll, und es ist zwischen *motorisch* und *sensorisch* latenten Heterophorien zu unterscheiden. Durch andauernde motorische Kompensation einer Heterophorie kann es (genau wie bei unkorrigierter Fehlsichtigkeit) zu einem Tonus kommen, durch dessen Wirkung die bei einer Binokularprüfung erwünschte völlige Entspannung der Augen bis zu ihrer physiologischen Ruhestellung verhindert wird [39, S. 149; 55]. Der Heterophoriemeßwert ist dann kleiner als die Heterophorie, da der Tonus einen Teil der Heterophorie *motorisch* latent hält.

Definition 28 **Motorisch latente Heterophorie**

Von einem Fusionstonus latent gehaltener Anteil einer Heterophorie, durch den der Heterophoriemeßwert kleiner ausfällt als der wahre Betrag der Heterophorie.

Vergleichbare Fälle sind jedem Refraktionisten von der Erstkorrektion einer Fehlsichtigkeit (insbesondere Übersichtigkeit) her vertraut. Motorisch latente Heterophorien finden sich hauptsächlich unter den Esophorien [46; 55].

Bei einer *sensorisch* latenten Heterophorie handelt es sich um eine Abweichung der Augen von der Orthostellung, die jedoch durch konventionelle (d. h. zentral dissoziierende) Meßverfahren nicht festgestellt werden kann [39, S. 183]. Hierbei liegt eine besondere Art von Fixationsdisparation (mit Korrespondenzverschiebung) vor, auf die ebenfalls im Kapitel über die Sensorik eingegangen wird.

Definition 29 **Sensorisch latente Heterophorie**

Durch Fixationsdisparation zweiter Art sensorisch kompensierter Anteil einer Heterophorie, der nur mit geeigneter Meßmethodik zu erfassen ist.

Sensorisch latente Heterophorien kommen bei allen Arten von Heterophorie häufig vor und müssen zur bifoveolären Vollkorrektion stets miterfaßt werden [39].

Bei *Zyklophorie* (Definition 20) besteht ein fusionaler Zyklovergenzbedarf, um die vertikalen Augenmeridiane einander parallel zu stellen. Da sich die Augen auch ohne fusionale Zyklovergenz in der Orthostellung (Definition 5) befinden, ist es nicht ganz korrekt, die Zyklophorie unter dem Begriff Phorie [2, Lfd. Nr. 26] mit aufzuführen [57]. Eine Unterteilung der Zyklophorien erfolgt entsprechend der anstrengungsärmsten Zyklovergenzstellung in „Inzyklophorien" und „Exzyklophorien" (siehe Tab. 7). Zyklophorien können durch Brillengläser nicht korrigiert werden.

„Pseudo-Zyklophorien" [35, S. 87; 44, S. 43] sind keine echten Zyklophorien, sondern beruhen auf der astigmatischen Wirkung korrekt bestimmter und richtig zentrierter zylindrischer Brillengläser. Sie sind durch geeignete Meßmethoden von echten Zyklophorien gut zu unterscheiden [50].

2.8 Anteile der Vergenz

Die zum normalen binokularen Einfachsehen (bei beliebiger Entfernung des Fixationspunktes) aufzubringende Vergenz wird nach Burian [36, S. 90] bereits seit Maddox (1893) in vier Anteile aufgegliedert [4, S. 81; 8, S. 153; 35, S. 51]:

1. Tonische Vergenz,
2. Fusionale (auch fusionelle) Vergenz,
3. Akkommodative Vergenz,
4. Psychische (auch psychologische oder proximale) Vergenz.

Die tonische Vergenz ist diejenige Vergenz, durch welche ein Augenpaar von der Bell'schen Schlafruhestellung in die Vergenz-Fernhellruhestellung (Definition 14) überführt wird. Da nur die Fernhellruhestellung der Augen interessiert, ist die tonische Vergenz selbst optometrisch bedeutungslos. Eine motorisch latente Heterophorie sollte keinesfalls als Veränderung der tonischen Vergenz aufgefaßt werden, da dies dem Vorhandensein *einer* individuellen Fernhellruhestellung widerspräche. Durch einen Fusionstonus wird die physiologische Ruhestellung lediglich verborgen gehalten.

Stimmt die Ruhestellung nicht mit der beim normalen binokularen Einfachsehen eingenommenen Arbeitsstellung der Augen überein, so erfolgte der Übergang zwischen beiden Vergenzstellungen durch „fusionale Vergenz".

Definition 30 **Fusionale Vergenz**

Diejenige Vergenz, die ein (heterophorisches) Augenpaar von seiner Hellruhestellung in eine Arbeitsstellung überführt.

Hier soll wieder auf einen bei Lernenden häufig anzutreffenden Gedankenfehler aufmerksam gemacht werden: fusionaler Vergenzbedarf (Definition 23) und fusionale Vergenz (Definition 30) sind zwei unterschiedliche Begriffe! Nur bei voller motorischer Kompensation einer Heterophorie ist die fusionale Vergenz gleich dem fusionalen Vergenzbedarf und bringt die Augen bis in die Orthostellung. Bei dekompensierter Heterophorie (Definition 27) ist die fusionale Vergenz kleiner als der fusionale Vergenzbedarf, und die Differenz wird sensorisch (mit Fixationsdisparation) „kompensiert". Die Arbeitsstellung ist also nur dann gleich der Orthostellung, wenn entweder gar kein fusionaler Vergenzbedarf vorliegt (Orthophorie), oder eine Heterophorie durch fusionale Vergenz vollständig motorisch kompensiert wird (bifoveoläres Sehen).

Akkommodation und Vergenz eines Augenpaares sind individuell mehr oder weniger stark miteinander gekoppelt. Diese Koppelung wird im Kapitel 3 näher betrachtet werden. Die mit einer bestimmten Akkommodation verknüpfte Vergenz wird als „akkommodative Vergenz" bezeichnet.

Definition 31 **Akkommodative Vergenz**

Diejenige Vergenz, die mit einem Akkommodationsaufwand der Augen gekoppelt ist.

Da es sich bei der akkommodativen Vergenz um eine Konvergenz handelt, wird dadurch die horizontale Vergenzstellung (in mathematischem Sinne) vergrößert (siehe Abb. 12). Eine negative Akkommodation zieht keine Divergenz nach sich.

Betrachtet ein Augenpaar ein reales nahes Objekt, dann wird durch das sogenannte „Bewußtsein der Nähe" [36, S. 100] eine Konvergenz bewirkt, die als „psychische Vergenz" ebenso wie als psychologische oder auch proximale Vergenz bezeichnet wird.

Definition 32 **Psychische Vergenz**

Diejenige Konvergenz, die vom Bewußtsein der Nähe ausgelöst wird *(proximale* Vergenz).

Diese psychische Vergenz ist auch als Apparatekonvergenz bekannt und kann bei bestimmten binokularen Meßeinrichtungen das gesuchte Ergebnis in Richtung größerer Horizontal-Vergenzstellungen verfälschen.

Bei der Betrachtung eines nahen Objektes führen akkommodative und psychische Vergenz ein Augenpaar aus seiner Fernruhestellung in die zugehörige Nahruhestellung. Aufgrund der unterschiedlichen Entfernungen naher Objekte gibt es neben *der* Fernruhestellung beliebig viele Nahruhestellungen. Zu jeder Objektentfernung (bzw. zu jedem Akkommodationszustand [3, Lfd. Nr. 19]) gehört eine „Nahruhestellung".

Definition 33 **Nahruhestellung**

Eine der Vergenz-Ruhestellungen, die sich aufgrund der gemeinsamen Wirkungen von akkommodativer und psychischer Vergenz ergeben.

Fällt die erreichte Nahruhestellung nicht mit der durch die Objektlage bestimmten Nah-Orthostellung zusammen, dann sind akkommodative und psychische Vergenz zusammen kleiner oder größer als der Konvergenzbedarf (Definition 7 und Formel 1). In diesem Fall besteht eine Nahheterophorie, und es ist ein entsprechender fusionaler Vergenzbedarf vorhanden. Sämtliche Phoriebegriffe gelten also gleichermaßen für das Sehen in die Nähe.

Der Einfluß von Prismen auf die Orthostellung und damit auf den fusionalen Vergenzbedarf wurde in den Abschnitten 2.5 und 2.7 erläutert. Auf dem Wege über den fusionalen Vergenzbedarf ergeben sich in der Regel auch Auswirkungen auf die fusionale Vergenz. Um diesen Einfluß binokular-prismatischer Wirkungen in den Durchblickpunkten einer Brille (oder anderer optischer Systeme) auf die Vergenzstellung eines Augenpaares zu beschreiben, findet sich in [2, Lfd. Nr. 37] der Ausdruck „Vergenzerfolg", der dort definiert wird als „scheinbare Vergenzstellung bei Verwendung optischer Hilfsmittel". Da der Begriff Vergenzstellung zur Kennzeichnung der gegenseitigen Lage der Augen anhand der Richtungen der Fixierlinien festgelegt ist (Definition 3), und da die Fixierlinien gleich den zwischen Brille und Augen verlaufenden Hauptstrahlen der beiden foveolär abbildenden Bündel sind (siehe Abschnitt 1.4), handelt es sich bei dieser „scheinbaren" Vergenzstellung um den Winkel zwischen den objektseitigen Hauptstrahlen der für beide Augen foveolär abbildenden Strahlenbündel. Im Beispiel der Abb. 22 ist das der parallele Teil der rot gezeichneten Strahlen. Hier wird der Ausdruck Vergenzerfolg jedoch nicht benutzt, da bei prismatischer Vollkorrektion gar keine fusionale Vergenz aufgewendet wird.

Weiterhin wird gelegentlich der Ausdruck „Vergenzaufwand" im Sinne der von den Augen eingenommenen „wahren" Vergenzstellung benutzt. In diesem Sinne ist er jedoch überflüssig. Außerdem müßte er korrekt (analog zum Begriff Akkommodationsaufwand [1, Lfd. Nr. 29]) als von der Ruhestellung aus gerechnete Vergenz betrachtet werden und wäre damit nichts anderes als die Summe von akkommodativer, psychischer und fusionaler Vergenz. Auch der Ausdruck Vergenzaufwand wird hier nicht benutzt.

(Wird fortgesetzt)

Literaturhinweise

[1] DIN 58 208
„Begriffe und Zeichen bei Brillengläsern in Verbindung mit dem menschlichen Auge" Teil 3 „Auge" (September 1978) (Erste Ausgabe April 1972)

[2] DIN 58 208
„Begriffe und Zeichen bei Brillengläsern in Verbindung mit dem menschlichen Auge" Teil 5 „Binokulares System Auge — Brille" (Entwurf August 1978)

[3] DIN 5340
„Begriffe der physiologischen Optik" (Entwurf Februar 1979)

[4] „Handbuch für Augenoptik"
Herausgeb. Carl Zeiss, Oberkochen (1977)

[8] HEINZ DIEPES
„Refraktionsbestimmung" Verlag Heinz Postenrieder, Pforzheim (2. Auflage 1975)

[35] THEO GLASER
„Die Phorien" VEB Verlag Technik Berlin (1969)

[36] BURIAN — VON NOORDEN'S
„Binocular vision and ocular motility" The C. V. Mosby Company. St. Louis (Second Edition, 1980)

[39] H.-J. HAASE/G. FORST/D. PESTALOZZI/H. GOERSCH
„Binokulare Korrektion" (Eine Sammlung von zehn Arbeiten aus den Jahren 1957—1978). Verlag Willy Schrickel, Düsseldorf (1980)

[41] W. DODEN
„Stellungsanomalien und Motilitätsstörungen" in Th. Axenfeld/H. Pau „Lehrbuch und Atlas der Augenheilkunde" Gustav Fischer Verlag, Stuttgart (1980)

[42] HANS BREDEMEYER/KATHLEEN BULLOCK
„Orthoptik" Walter de Gruyter, Berlin — New York (1978)

[43] STEWART DUKE-ELDER (Herausgeb.)
„System of Ophthalmology" Vol VI „Ocular Motility and Strabismus" Henry Kimpton, London (1973)

[44] PAUL A. JAENSCH
„Diagnose und Therapie des Schielens" Bücherei des Augenarztes 24. Heft, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart (1956)

[45] JÖRG TROTTER
„Das Auge" Optik — Verlag Solothurn (2. Auflage, 1967)

[46] KURT GÜNTHERT
„Heterophorien im Spiegel der Statistik" der Augenoptiker 12 (1980) 8—15

[47] G. H. JONKERS, J. VADER und H. J. WELL
„Ergebnisse der orthoptischen Behandlung von dekompensierten Phorien" Klin.Mbl.Augenheilk. 136 (1960) 449—459

[48] KARL MÜTZE/B. NEHRLING/J. REUTTER
„Brillenglasbestimmung" Verlag für Augenheilkunde und Optik, Zürich (2. Auflage, 1970)

[49] F. C. DONDERS
„Die Anomalien der Refraction und Accommodation des Auges" Wilhelm Braumüller, Wien (1866)

[50] HELMUT GOERSCH
„Die Entwicklung der binokularen Meß- und Korrektionsmethodik von H.-J. HAASE"
der Augenoptiker 10 (1980) 6—13

[51] R. SACHSENWEGER
„Das Binokularsehen bei der Brillenbestimmung" in HANS SAUTTER (Herausgeb.) „Entwicklung und Fortschritte in der Augenheilkunde" Ferdinand Enke Verlag (1963) S. 643—660

[52] MAX EISFELD und FRIEDRICH MEHLHOSE
„Der Wandel in der Brillenversorgung" (III)
Der Augenarzt 6 (1975) 339—344

[53] T. K. LYLE und S. JACKSON
„Praktische Orthoptik in der Behandlung des Schielens" Verlag Urban & Schwarzenberg, München — Berlin — Wien (1957)

[54] RUDOLF SACHSENWEGER
„Das Sehgleichgewicht und der binokulare Abgleich" (Teil II und III) in Augenärztliche Fortbildung Band 2 Teil 2, Verlag Urban & Schwarzenberg, Berlin — München — Wien (1974) S. 169—208

[55] D. WIESER
„Versuch einer Synopsis der Binokularstörungen bei intermittierenden Schielformen und großwinkligen Heterophorien" Arbeitskreis Schielbehandlung im Berufsverband der Augenärzte Deutschlands e. V. Band 11 (1979) 47—67

[56] HELMUT GOERSCH
„Dekompensierte Heterophorien und ihre Auswirkungen auf das Sehen"
der Augenoptiker 5 (1978) 13—23

[57] HEINZ DIEPES
„Binokulare Begiffe in der Normung" DOZ 8 (1980) 11—17

Dr. Helmut Goersch, Berlin

Einführung in das Binokularsehen

Teil V (Fortsetzung aus Heft 6/1981)

3. Zusammenhänge zwischen Akkommodation und Vergenz

3.1 ACA-Verhältnisse

Akkommodation und Vergenz sind zwei Partner, die in gemeinsamer Tätigkeit die beiden visuellen Grundanforderungen des scharfen Sehens und des einfachen Sehens erfüllen. Dabei sorgt das Akkommodationssystem durch den richtigen Akkommodationszustand für optimale Schärfe der Netzhautbilder in beiden Augen, während das Vergenzsystem für eine zum normalen binokularen Einfachsehen führende Vergenzstellung verantwortlich ist. Im natürlichen Sehen unterstützen sich beide Systeme wechselseitig; ihre Tätigkeit ist in physiologischer Weise miteinander verknüpft.

Bei der Erörterung dieser physiologischen Kopplung zwischen Akkommodation und Vergenz wird oft darüber gestritten, ob einer der beiden Partner eine führende Rolle spielt und den anderen „mitzieht", und welcher der führende Partner ist. Diese Frage ist zwar für die Grundlagenforschung interessant, aber für ein sowohl monokular (d. h. refraktiv) als auch binokular (d. h. prismatisch) vollkorrigiertes Augenpaar besitzt sie im natürlichen Sehen nur geringe Bedeutung. Denn erst mit Hilfe einer gezielten Abweichung vom natürlichen Sehen durch Aufhebung der Fusion oder durch Abweichung von der Vollkorrektion (oder durch beides) kann die Kopplung zwischen Akkommodation und Vergenz meßtechnisch untersucht werden. Dabei wird unter anderem ein sogenanntes ACA-Verhältnis (engl.: ratio) ermittelt. Die Abkürzung ACA entstand aus dem englischen AC (für *accommodative convergence*) geteilt durch A (für *accommodation*). Es gibt verschiedenartige Meßmethoden [58, S. 237], die zu unterschiedlichen ACA-Verhältnissen führen. Hauptsächlich werden zwei Methoden angewendet, die mit Ausschaltung der Fusion arbeiten. Das ist einerseits die „Gradientenmethode", bei der nur die akkommodative Vergenz (Definition 31) berücksichtigt wird, und andererseits die „Quotientenmethode", bei der zur akkommodativen Vergenz noch die psychische Vergenz (Definition 32) hinzukommt.

Die Gradientenmethode

Durch Abweichung von der refraktiven Vollkorrektion wird der Akkommodationszustand der Augen um einen bekannten Betrag verändert und die dadurch ausgelöste akkommodative Vergenz meßtechnisch bestimmt. Um Einflüsse der psychischen Vergenz auszuschließen, muß die Entfernung der zur Aufhebung der Fusion und zur Phoriemessung dienenden binokularen Prüfeinrichtung konstant gehalten werden, während der Akkommodationsreiz (und damit der Akkommodationszustand) durch sphärische Gläser verändert wird. Gemessen werden die zu verschiedenen Akkommodationszuständen gehörigen Vergenzruhestellungen, deren Unterschied durch akkommodative Vergenz bedingt ist. Das Ergebnis dieser Meßmethode (*gradient test* [34, S. 257] oder *gradient method* [36, S. 92; 43, S. 203; 59; 60]) ist der „ACA-Gradient" [4, S. 81; 61].

Definition 34 **ACA-Gradient**
Diejenige akkommodative Vergenz, die mit einer Änderung des Akkommodationszustandes um eine Dioptrie gekoppelt ist.

Formel 2

$$\text{ACA-Gradient (cm)} = \frac{\text{akkomm. Vergenz (cm/m)}}{\text{Akkomm. (dpt)}}$$

Der ACA-Gradient besitzt die Einheit cm (akkommodative Vergenz in cm/m geteilt durch Akkommodation in dpt ergibt die Einheit $\frac{\text{cm/m}}{1/\text{m}} = \text{cm}$).

Mit positiver Akkommodation ist eine akkommodative Konvergenz gekoppelt, jedoch keine Divergenz mit negativer Akkommodation (nicht zu verwechseln mit einer Verringerung von positiver Akkommodation!). Deshalb ergibt sich bei ferner Prüfeinrichtung nur eine Möglichkeit der Bestimmung des ACA-Gradienten, während eine nahe Prüfeinrichtung zwei Möglichkeiten bietet. Bei ferner Prüfeinrichtung führen zusätzlich zu den refraktiven Vollkorrektionsgläsern vorzusetzende sphärische Minusgläser zu einem Akkommodationsaufwand und damit zur akkommodativen Konvergenz.

Beispiel: Vergenzruhestellung bei refraktiver Vollkorrektion sei −3 cm/m (also eine Exophorie von 3 cm/m). Zusatz von z. B. −2 dpt beiderseits möge eine Ruhestellung von 5 cm/m liefern. Also zog eine (positive) Akkommodation von 2 dpt eine akkommodative Vergenz von 5 cm/m — (−3 cm/m) = 8 cm/m nach sich. Damit ergibt sich nach Formel 2 der

$$\text{ACA-Gradient} = \frac{8\ \text{cm/m}}{2\ \text{dpt}} = 4\ \text{cm}.$$

Bei naher Prüfeinrichtung kann entweder der Akkommodationsaufwand durch sphärische Minusgläser erhöht werden (gleiche Möglichkeit wie bei ferner Prüfeinrichtung) oder aber durch Zusatz von sphärischen Plusgläsern der durch die Nähe der Prüf-

einrichtung vorgegebene Akkommodationsbedarf verringert werden. Bei der ersten Möglichkeit ist die Grenze des Minuszusatzes durch das altersbedingte Akkommodationsvermögen der Augen gegeben, bei der zweiten Möglichkeit ist die Grenze des Pluszusatzes durch den „akkommodationslosen" Zustand gegeben, also durch die in dpt gemessene Entfernung der nahen Prüfeinrichtung.

Beispiel: Nahe Prüfeinrichtung in einer Entfernung von 40 cm (2,5 dpt). Vergenzruhestellung (ohne Zusatz zur refraktiven Fern-Vollkorrektion) sei 14 cm/m (das wäre bei einem Pupillenabstand von 68 mm eine Nahexophorie von 3 cm/m). Erste Möglichkeit: Zusatz von beiderseits z. B. −1,5 dpt liefert eine Änderung des Akkommodationszustandes von 1,5 dpt und möge eine Ruhestellung von 20 cm/m zur Folge haben. Akkommodative Vergenz = 20 cm/m −14 cm/m = 6 cm/m. Damit ist nach Formel 2 der

$$\text{ACA-Gradient} = \frac{6\ \text{cm/m}}{1{,}5\ \text{dpt}} = 4\ \text{cm}.$$

Zweite Möglichkeit: Zusatz von beiderseits z. B. 2 dpt liefert eine Änderung des Akkommodationszustandes um −2 dpt und möge zu einer Ruhestellung von 6 cm/m führen. Akkommodative Vergenz = 6 cm/m −14 cm/m = −8 cm/m. Und nach Formel 2 ist der

$$\text{ACA-Gradient} = \frac{-8\ \text{cm/m}}{-2\ \text{dpt}} = 4\ \text{cm}.$$

Bei dem hier geschilderten Vorgehen zur Bestimmung des ACA-Gradienten wird in den Nenner der Formel 2 die Abweichung von der refraktiven Vollkorrektion eingesetzt. Diese Größe ist die Änderung des Akkommodationsbedarfes [1, Lfd. Nr. 28], bzw. des Akkommodationsreizes [1, Lfd. Nr. 27], wodurch sich ein sogenannter „Reiz-ACA-Gradient" ergibt (*stimulus ACA ratio* [36, S. 96]). In der Definition 34 ist jedoch die Änderung des Akkommodationszustandes enthalten, woraus ein sogenannter „Reaktions-ACA-Gradient" folgt (*response ACA ratio* [36, S. 96]). Dieser ist schwierig zu ermitteln, nach ALPERN et al. [62] aber nur etwa 8% größer als der Reiz-ACA-Gradient. Bei einer Gradientenmessung (wie übrigens bei jeder Bestimmung einer Nahphorie [63]) sollte daher eine hohe Anforderung an die Sehschärfe durch die binokulare Prüfeinrichtung dafür sorgen, daß der Akkommodationszustand möglichst genau dem Akkommodationsbedarf entspricht.

In der Regel wird also der „Reiz-ACA-Gradient" gemessen, und gerade dieser ist es, der praktische optometrische Bedeutung bei Abweichungen von der refraktiven Vollkorrektion besitzt. Diese Tatsache soll anhand einiger einfacher Fälle erklärt werden.

Fall 1a: Abweichung von der refraktiven Vollkorrektion in Richtung Minus (bei Übersichtigkeit also eine Unterkorrektion und bei Kurzsichtigkeit eine Überkorrektion) um z. B. 0,5 dpt und bei Vollkorrektion Orthophorie im ganzen Akkommodationsgebiet (bei refraktiver Vollkorrektion ist also die Parallelstellung die Fern-Ruhestellung der Augen und die Nah-Ruhestellungen stimmen mit den jeweiligen Nah-Orthostellungen überein). ACA-Gradient = 4 cm. Bei höchster Anforderung an die Sehschärfe müssen die Augen zum Sehen in die Ferne einen Akkommodationsaufwand von 0,5 dpt aufbringen, mit dem eine akkommodative Konvergenz von 2 cm/m verbunden ist (Umstellung der Formel 2 liefert: akkommodative Vergenz = ACA-Gradient · Akkommodation). Dadurch ergibt sich als neue akkommodativ bedingte Ruhestellung eine Vergenzstellung von 2 cm/m, während die Fern-Orthostellung unverändert bleibt. Um die Parallelstellung zu erreichen, ist nun eine fusionale Divergenz von 2 cm/m nötig. Zu der akkommodativen Belastung der Augen durch die Abweichung von der refraktiven Vollkorrektion kommt also noch eine binokulare Belastung wie bei einer Esophorie. Diese esophorische Belastung hängt nach Formel 2 sowohl von der Größe der refraktiven Fehlkorrektion als auch von dem Betrag des (Reiz-)ACA-Gradienten ab. Die gleiche Belastung ergibt sich bei der Betrachtung naher Objekte, da nur ein um die Fehlkorrektion (hier 0,5 dpt) höherer Akkommodationsaufwand, als der in dpt gemessenen Objektentfernung entspricht, zu einer korrekten akkommodativen Einstellung der Augen führt.

Fall 1b: Abweichung von der refraktiven Vollkorrektion in Richtung Minus und bei refraktiver Vollkorrektion Esophorie. Durch den entsprechend 1a erhöhten fusionalen Divergenzbedarf ergibt sich eine Vergrößerung der esophorischen Belastung des Augenpaares bei allen Objektentfernungen.

Fall 1c: Abweichung von der refraktiven Vollkorrektion in Richtung Minus und bei refraktiver Vollkorrektion Exophorie. Der entsprechend 1a entstehende fusionale Divergenzbedarf kann den durch die Exophorie vorhandenen fusionalen Konvergenzbedarf teilweise oder ganz ausgleichen oder auch größer sein als dieser, je nach den einzelnen Beträgen. So kann sich entweder eine Verringerung oder Aufhebung der exophorischen Belastung ergeben oder auch ein Umschlag in eine esophorische Belastung. Das erste wird gelegentlich zur Vermeidung einer prismatischen Basis-innen-Korrektion verwendet [58, S. 901], was jedoch fragwürdig sein dürfte, da hierbei lediglich eine binokulare durch eine akkommodative Dauerbelastung ersetzt wird. Außerdem ist dieses Vorgehen bei Presbyopen selbstverständlich kaum möglich.

Fall 2a: Abweichung von der refraktiven Vollkorrektion in Richtung Plus (bei Übersichtigkeit also eine Überkorrektion und bei Kurzsichtigkeit eine Unterkorrektion) um z. B. 0,5 dpt und bei refraktiver Vollkorrektion Orthophorie im gesamten Akkommodationsgebiet. ACA-Gradient = 4 cm. Für ferne Objekte ergibt sich die höchste Sehschärfe bei einer negativen Akkommodation von 0,5 dpt, was jedoch keine binokulare Belastung nach sich zieht, weil damit keine akkommodative Divergenz verbunden ist. Nahe Objekte werden scharf gesehen mit einem um 0,5 dpt geringeren Akkommodationsaufwand als der in dpt gemessenen Objektentfernung entspricht. Dadurch verringert sich die akkommodative Konvergenz nach Formel 2 um 2 cm/m, so daß hierbei eine binokulare Belastung wie bei einer Nahexophorie dieser Größe entsteht.

Fall 2b: Abweichung von der refraktiven Vollkorrektion in Richtung Plus und bei refraktiver Vollkorrektion Esophorie. Für die Ferne ergibt sich wie in 2a keine binokulare Veränderung. Für die Nähe kommt entsprechend 2a eine exophorische Belastung hinzu, so daß sich je nach den einzelnen Beträgen eine Verringerung oder Aufhebung der esophorischen Belastung ergeben kann oder auch ein Umschlag in eine exophorische Belastung.

Fall 2c: Abweichung von der refraktiven Vollkorrektion in Richtung Plus und bei refraktiver Vollkorrektion Exophorie. Für die Ferne keine binokulare Änderung. Für die Nähe wird die schon vorhandene exophorische Belastung entsprechend 2a vergrößert.

Der ACA-Gradient nach Definition 34 wird in der Literatur nicht einheitlich bezeichnet. Es finden sich dafür auch die Ausdrücke ACA-Verhältnis [42], ACA-Koeffizient [64] und häufig ACA-Quotient [8; 35; 42; 65] (nicht zu verwechseln mit dem gleichnamigen Begriff der Definition 35). Die in der Literatur angegebenen Werte reichen bis zu 10 cm, die Mittelwerte liegen zwischen 2 cm und 5 cm. Ausführliche meßtechnische Betrachtungen zu allen Problemen der Beziehung zwischen Akkommodation und Vergenz finden sich in [66].

Die Quotientenmethode

Gemessen werden die Vergenzruhestellungen für Ferne und Nähe bei refraktiver Fern-Vollkorrektion. Der Unterschied beider Ruhestellungen liefert die durch die Betrachtung der nahen Prüfeinrichtung ausgelöste akkommodative und psychische Vergenz (siehe Definition 33). Das Ergebnis dieser Meßmethode (*phoria method* [36, S. 91; 43, S. 201; 59] oder *calculated method* [60]) ist der „ACA-Quotient" [4, S. 81; 61].

Definition 35 **ACA-Quotient**
Diejenige Summe aus akkommodativer und psychischer Vergenz, die mit einer Änderung der Objektentfernung um eine Dioptrie gekoppelt ist.

Formel 3

ACA-Quotient (cm)

$$= \frac{\text{akkomm. + psych. Vergenz (cm/m)}}{\text{Objektentf. (dpt)}}$$

Wie der ACA-Gradient hat auch der ACA-Quotient die Einheit cm.

Beispiel: Refraktive Vollkorrektion. Vergenzruhestellung für die Ferne −3 cm/m und für eine Entfernung von 40 cm (2,5 dpt) 14 cm/m. Daraus ergibt sich nach Formel 3 der ACA-Quotient $= \frac{14\text{ cm/m} - (-3\text{ cm/m})}{2{,}5\text{ dpt}} = \frac{17\text{ cm/m}}{2{,}5\text{ dpt}} = 6{,}8\text{ cm}$.

Der so gemessene ACA-Quotient wird in der Literatur auch bezeichnet als ACA+ [65; 66] oder ACA-Gradient [19, S. 28; 67] (nicht zu verwechseln mit dem gleichnamigen Begriff der Definition 34).

Während der ACA-Gradient die Grundlage für Berechnungen der binokularen Auswirkung refraktiver Fehlkorrektionen liefert, verknüpft der ACA-Quotient die Phorien eines Augenpaares für verschiedene Objektentfernungen bei refraktiver Fern-Vollkorrektion. Dieser Sachverhalt wird im Abschnitt 3.3 näher erläutert.

Bei einer weiteren Meßmethode wird ein ACA-Verhältnis ohne Aufhebung der Fusion durch gezielte Abweichungen von der monokularen und binokularen Vollkorrektion bestimmt. Bei dieser „Fixationsdisparationsmethode" [36, S. 93] werden Fixationsdisparationen sowohl bei unterschiedlichen phorischen Belastungen (durch prismatische Gläser veränderte Orthostellung) als auch bei unterschiedlichen akkommodativen Belastungen (durch sphärische Gläser veränderter Akkommodationsbedarf) gemessen. Das ACA-Verhältnis ergibt sich dann aus denjenigen Wertepaaren von Vergenzbedarf und Akkommodationsbedarf, die zur gleichen Fixationsdisparation geführt haben. Nach OGLE et al. ist das so bestimmte ACA-Verhältnis in der Regel gleich dem (Reiz-)ACA-Gradienten [68, S. 145].

Der Unterschied zwischen dem ACA-Quotienten und dem ACA-Gradienten ergibt die psychische Vergenz pro Dioptrie Objektentfernung. Dieses „PCD-Verhältnis" (*proximal convergence / distance ratio* [68, S. 131]) stellt die alleinige Auswirkung des „Bewußtseins der Nähe" dar.

Definition 36 **PCD-Verhältnis**

Diejenige psychische Vergenz, die mit einer Änderung der Objektentfernung um eine Dioptrie gekoppelt ist.

Formel 4

PCD-Verhältnis = ACA-Quotient — ACA-Gradient

Auch das PCD-Verhältnis besitzt die Einheit cm.

Beispiel: ACA-Quotient = 6,8 cm. ACA-Gradient = 4 cm. Nach Formel 4 folgt daraus das PCD-Verhältnis = 6,8 cm −4 cm = 2,8 cm.

Das PCD-Verhältnis kann auch für sich allein meßtechnisch bestimmt werden, indem sowohl für die Ferne als auch für die Nähe die Vergenzruhestellung bei „akkommodationslosen" Augen gemessen wird. Mit einer fernen Prüfeinrichtung wird also bei refraktiver Vollkorrektion gemessen, mit einer nahen Prüfeinrichtung bei einem sphärischen Pluszusatz entsprechend der Entfernung dieser Prüfeinrichtung. Die Differenz beider Ruhestellungen ist dann durch die in dpt gemessene Entfernung der nahen Prüfeinrichtung zu teilen.

Beispiel: Fernruhestellung = −3 cm/m. Mit einer nahen Prüfeinrichtung in 40 cm (2,5 dpt) und einem beidseitigen Pluszusatz von 2,5 dpt möge eine Ruhestellung von 4 cm/m gemessen werden. Die Differenz der Ruhestellungen ist dann 4 cm/m — (−3 cm/m) = 7 cm/m und das PCD-Verhältnis $= \frac{7\text{ cm/m}}{2{,}5\text{ dpt}} = 2{,}8\text{ cm}$.

In der Regel ist der ACA-Quotient größer als der ACA-Gradient und damit das PCD-Verhältnis positiv. OGLE fand jedoch für 16% seiner 256 Prüfpersonen negative Werte für das PCD-Verhältnis [68, S. 159]. Die Werte erstreckten sich insgesamt von −3 cm bis +6 cm mit einem Mittelwert von 1,8 cm (Fixationsdisparationsmethode). Auch FICK [66] gibt für 4% seiner 244 Prüfpersonen negative Werte an; insgesamt reichen die dortigen Werte von −3 cm bis +7 cm mit einem Mittelwert von 2,6 cm (Gradienten- und Quotientenmethode). Ein negatives PCD-Verhältnis bedeutet eine durch das „Bewußtsein der Nähe" (oder in diesem Fall nach OGLE ein „psychisches Bewußtsein der Ferne" [68, S. 158]) ausgelöste psychische *Divergenz*. „Es ist schwierig, die Bedeutung negativer Werte zu interpretieren" [36, S. 100]. Damit stellt sich die Frage nach dem eigentlichen Sinn derartiger Messungen anhand von Abweichungen vom natürlichen Sehen. OGLE erinnert in diesem Zusammenhang daran, daß der Begriff der psychischen Vergenz eingeführt wurde, um die unterschiedlichen Meßwerte für die hier als ACA-Gradient und ACA-Quotient definierten ACA-Verhältnisse zu erklären.

Viele Autoren haben sich damit beschäftigt, die Abhängigkeit der ACA-Werte von den verschiedensten äußeren Umständen zu untersuchen. Danach scheint der ACA-Gradient im wesentlichen zeitlich konstant zu sein [68, S. 175], obwohl auch eine geringe Abnahme des Mittelwertes mit zunehmendem Lebensalter der Prüfpersonen gefunden wurde [69]. Eng verknüpft mit einer zeitlichen Konstanz der ACA-Werte ist sicher die Frage, ob die Kopplung zwischen Akkommodation und Vergenz angeboren oder erlernt ist. Für beide Möglichkeiten gibt es eine Reihe von Argumenten [36, S. 95; 58, S. 230; 68, S. 180]. Der ACA-Gradient ist ferner im wesentlichen linear, das heißt unabhängig sowohl von der Höhe des Akkommodationsaufwandes (Messungen bei verschiedenen Prüfentfernungen [70]) als auch von der Größe der Änderung des Akkommodationsbedarfes [68, S. 184]. Vielfach untersucht wurde der teilweise beträchtliche Einfluß von Drogen auf die ACA-Werte [36, S. 97; 58, S. 236; 68, S. 195]. Hingegen kann der individuelle ACA-Wert durch orthoptische Übungen offenbar nicht dauerhaft verändert werden [36, S. 98]. „Die Tatsache, daß die Phorien wenig geändert werden, ist einer der begrenzenden Faktoren bei orthoptischen Verfahren" [68, S. 220]. Eine zusammenfassende Betrachtung der verschiedensten Untersuchungen findet sich in [71].

In den bisherigen Erörterungen ging es um den Einfluß der Akkommodation auf die Vergenz. In umgekehrter Weise kann auch eine Änderung der Vergenzstellung eine Änderung des Akkommodationszustandes nach sich ziehen. Die durch eine Konvergenz ausgelöste Akkommodation wird als „Vergenzakkommodation" bezeichnet [1, Fußnote 9b; 4, S. 57], oder auch als Konvergenzakkommodation [8, S. 154; 19, S. 29; 67].

Definition 37 **Vergenzakkommodation**

Diejenige Akkommodation, die durch eine Änderung der Vergenzstellung bewirkt wird.

Eine Messung der Vergenzakkommodation an Prüfpersonen unterschiedlichen Alters zeigte einen deutlich abnehmenden Wert mit zunehmendem Lebensalter, offenbar bedingt durch das geringer werdende Akkommodationsvermögen [72, S. 315]. Auf die Vergenzakkommodation wird auch die Tatsache zurückgeführt, daß das Akkommodationsvermögen in der Regel binokular etwas größer ist als monokular [34, S. 233; 58, S. 174].

3.2 Vergenzbreiten und Vergenzreserven

Während im Abschnitt 3.1 die akkommodative und die psychische Vergenz im Vordergrund standen, geht es hier um Begriffe zur *fusionalen* Vergenz beim Blick in Ferne und Nähe. Grundlage der sogenannten „graphisch-analytischen Gläserbestimmung" ist die Prüfung der Fähigkeit eines Augenpaares, das binokulare Einfachsehen (also die Fusion) aufrechtzuerhalten, wenn bei konstanter Objektentfernung die Orthostellung durch optische Mittel (z. B.

Prismen) verändert wird. Die wichtigste bei dieser Prüfung bestimmte Größe ist die maximale *relative* Vergenz. Bei einer „relativen Vergenz" [2, Lfd. Nr. 35] handelt es sich um eine Änderung der Vergenzstellung bei unverändertem Akkommodationserfolg [1, Lfd. Nr. 31], also bei gleichbleibend scharfen Netzhautbildern.

Definition 38 **Relative Vergenz**
Durch optische Mittel erzwungene Änderung der Vergenzstellung bei konstantem Akkommodationsbedarf und unverändert *scharfem* binokularen Einfachsehen.

Die Einheit der relativen Vergenz ist cm/m. Zur Bestimmung der *maximalen* relativen Vergenz wird die Orthostellung bei refraktiver Vollkorrektion und hoher Anforderung an die Sehschärfe soweit verändert, bis das betrachtete Objekt entweder durch einsetzende Vergenzakkommodation unscharf wird oder Diplopie auftritt [8, S. 451; 36, S. 203; 58, S. 827]. Es wird also diejenige maximale binokulare Belastung ermittelt, welche zumindest kurzzeitig unter Anstrengung tragbar ist. In der Regel wird dabei angenommen, daß der künstlich erzeugte fusionale Vergenzbedarf (Definition 23) vollständig durch fusionale Vergenz (Definition 30) gedeckt wird, das heißt, daß sich die Augen beim binokularen Einfachsehen in der jeweiligen Orthostellung befinden (*ideale Arbeitsstellung*). Die Verfälschung der Meßergebnisse durch die in den meisten Fällen sicherlich vorhandene Fixationsdisparation wird im allgemeinen nicht beachtet, wohl in der Annahme ihrer Geringfügigkeit im Vergleich zur Größe des Meßwertes.

Wird nun bei derartigen Messungen der fusionale Vergenzbedarf laufend erhöht, dann kann das Augenpaar in eine Vergenzstellung gelangen, bei welcher durch Vergenzakkommodation gerade unscharfes Sehen einsetzt. Damit wäre der „Nebelpunkt" [2, Lfd. Nr. 38] erreicht.

Definition 39 **Nebelpunkt**
Diejenige Vergenzstellung, bei welcher unter wachsendem fusionalen Vergenzbedarf und konstantem Akkommodationsbedarf gerade kein *scharfes* binokulares Einfachsehen mehr aufrechterhalten werden kann (*Unschärfepunkt, blur point*).

Wird der fusionale Vergenzbedarf über den Nebelpunkt hinaus weiter gesteigert, dann kann er schließlich nicht mehr gedeckt werden, es ist kein binokulares Einfachsehen mehr möglich, und der „Abreißpunkt" [2, Lfd. Nr. 38] ist erreicht.

Definition 40 **Abreißpunkt**
Diejenige Vergenzstellung, bei welcher unter wachsendem fusionalen Vergenzbedarf und konstantem Akkommodationsbedarf Diplopie einsetzt (*Diplopiepunkt, break point*).

Wenn keine Vergenzakkommodation auftritt, dann gelangen die Augen bei steigendem fusionalen Vergenzbedarf direkt zum Abreißpunkt, der in solchem Fall für graphisch-analytische Zwecke dem Nebelpunkt gleichgesetzt wird. Wenn nach dem Erreichen des Abreißpunktes der fusionale Vergenzbedarf wieder verringert wird, dann stellt sich beim „Wiedervereinigungspunkt" [2, Lfd. Nr. 38] erneut binokulares Einfachsehen ein.

Definition 41 **Wiedervereinigungspunkt**
Diejenige Vergenzstellung, bei welcher unter geringer werdendem fusionalen Vergenzbedarf und konstantem Akkommodationsbedarf gerade wieder binokulares Einfachsehen einsetzt (*Fusionspunkt, Verschmelzungspunkt, recovery point*).

Die Lage des Wiedervereinigungspunktes im Vergleich zum Abreißpunkt läßt die „Fusionsbereitschaft" eines Augenpaares beurteilen (*readiness to fuse* [36, S. 204]).

Soll mit derartigen Messungen die fusionale Belastungsfähigkeit eines Augenpaares ermittelt werden, dann ist als Ausgangspunkt sinnvollerweise die Vergenzstellung *ohne* fusionale Belastung (*Vergenzruhestellung*) zu wählen [36, S. 206; 43, S. 179]. Auch die akkommodative Belastungsfähigkeit wird bekanntlich als Akkommodationsbreite (maximaler Akkommodationserfolg, siehe Tabelle 3) von der Akkommodationsruhelage (Einstellung des Auges auf seinen Fernpunkt) aus gemessen. (Die Einstellfähigkeit eines z. B. unkorrigierten übersichtigen Auges auf nahe Objhekte wäre dessen „Akkommodationsreserve".) Entsprechend werden die maximal mögliche fusionale Konvergenz und Divergenz von der Vergenzruhestellung aus als „Konvergenzbreite" und als „Divergenzbreite" gemessen [4, S. 80; 8, S. 452; 39, S. 217].

Definition 42 **Relative Konvergenzbreite**
Differenz zwischen derjenigen Vergenzstellung, in welcher mit fusionaler Konvergenz bei konstantem Akkommodationsbedarf gerade noch *scharfes* binokulares Einfachsehen möglich ist, und der Vergenzruhestellung (*relative positive Vergenzbreite*).

Zur Bestimmung der relativen Konvergenzbreite werden ausgehend von der refraktiven und binokularen Vollkorrektion Basis-außen-Prismen wachsender Stärke vor die Augen gebracht, bis unter dieser exophorischen Belastung der Nebelpunkt (oder bei fehlender Vergenzakkommodation der Abreißpunkt) erreicht ist. Die Differenz zwischen dieser Vergenzstellung und der Ruhestellung wird als relative Konvergenzbreite gerechnet, wobei der kleine Fehler vernachlässigt wird, der dadurch entsteht, daß der Nebelpunkt eine etwas größere Vergenzstellung ist als diejenige, die gerade noch *scharfes* binokulares Einfachsehen zuläßt.

Existiert ein Nebelpunkt, dann wird die Basis-außen-Wirkung der Meßprismen solange weiter verstärkt, bis die maximal mögliche exophorische Belastung erreicht ist (Abreißpunkt).

Definition 43 **Absolute Konvergenzbreite**
Differenz zwischen derjenigen Vergenzstellung, in welcher mit fusionaler Konvergenz bei konstantem Akkommodationsbedarf gerade noch binokulares Einfachsehen möglich ist, und der Vergenzruhestellung (*absolute positive Vergenzbreite*).

In der Praxis wird die absolute Konvergenzbreite als Differenz zwischen Abreißpunkt und Ruhestellung bestimmt [39, S. 218]. Bei fehlendem Nebelpunkt werden absolute und relative Konvergenzbreite gleichgesetzt.

In entsprechender Weise werden Divergenzbreiten gemessen, indem eine esophorische Belastung durch Basis-innen-Prismen erzeugt und ständig gesteigert wird.

Definition 44 **Relative Divergenzbreite**
Differenz zwischen derjenigen Vergenzstellung, in welcher mit fusionaler Divergenz bei konstantem Akkommodationsbedarf gerade noch *scharfes* binokulares Einfachsehen möglich ist, und der Vergenzruhestellung (*relative negative Vergenzbreite*).

Für die Ferne ist die relative Divergenzbreite in der Regel gleich der absoluten (kein Nebelpunkt).

Definition 45 **Absolute Divergenzbreite**
Differenz zwischen derjenigen Vergenzstellung, in welcher mit fusionaler Divergenz bei konstantem Akkommodationsbedarf gerade noch binokulares Einfachsehen möglich ist, und der Vergenzruhestellung (*absolute negative Vergenzbreite*).

Die Konvergenzgrößen sind positiv, die Divergenzgrößen negativ. Die Summe aus den Beträgen von relativer Konvergenzbreite und relativer Divergenzbreite (oder mathematisch: relative Konvergenzbreite minus relative Divergenzbreite) ist die relative Vergenzbreite oder „Fusionsbreite" [2, Lfd. Nr. 12] (*range of fusion* [43, S. 171]).

Definition 46 **Relative Fusionsbreite**
Differenz zwischen denjenigen Vergenzstellungen, in denen mit fusionaler Konvergenz beziehungsweise fusionaler Divergenz bei konstantem Akkommodationsbedarf gerade noch *scharfes* binokulares Einfachsehen möglich ist (*relative Vergenzbreite*).

In gleicher Weise stellt die Summe der absoluten Einzelbreiten die absolute Gesamtbreite dar.

Definition 47 **Absolute Fusionsbreite**
Differenz zwischen denjenigen Vergenzstellungen, in denen mit fusionaler Konvergenz beziehungsweise fusionaler Divergenz bei konstantem Akkommodationsbedarf gerade noch binokulares Einfachsehen möglich ist (*absolute Vergenzbreite*).

In der Praxis werden Messungen zur Fusionsbelastung häufig von der durch die Prüfentfernung gegebenen Orthostellung aus durchgeführt, also nur mit refraktiver Vollkorrektion (und Korrektion einer eventuellen Vertikalphorie [73, S. 26]). Die Prüfentfernung ergibt als Orthostellung für die Ferne die Parallelstellung, im übrigen eine vom Pupillenabstand der Prüfperson abhängige Konvergenzstellung (nach Formel 1 z. B. bei p = 6,0 cm für 6 m Entfernung 1 cm/m und für 40 cm Entfernung 15 cm/m). Bei orthophorischen Augenpaaren ist diese Orthostellung gleich der Ruhestellung, wodurch die Differenz zwischen dem jeweiligen Nebelpunkt (bzw. Abreißpunkt) und dieser Orthostellung die zuvor definierten Breiten liefert. Dagegen brauchen heterophorische Augen bereits fusionale Vergenz, um in die durch die Prüfentfernung gegebene Orthostellung zu gelangen. Bei vorliegender Heterophorie ergibt deshalb die Differenz zwischen Nebelpunkt (bzw. Abreißpunkt) und dieser Orthostellung nicht die Breite, sondern die ohne Berücksichtigung der Heterophorie zur Verfügung stehende „Fusionsreserve" [4, S. 80; 8, S. 452; 34, S. 192; 36, S. 206; 58, S. 878; 74; 75, S. 122].

Definition 48 **Relative Konvergenzreserve**
Differenz zwischen derjenigen Vergenzstellung, in welcher mit fusionaler Konvergenz bei konstantem Akkommodationsbedarf gerade noch *scharfes* binokulares Einfachsehen möglich ist, und der durch die Prüfentfernung gegebenen Orthostellung (*relative positive Vergenzreserve*).

Für die Ferne ist die relative Konvergenzreserve gleich dem in konvergenter Richtung gemessenen Nebelpunkt. Entsprechendes gilt bei den übrigen Reserven für die Ferne.

Definition 49 **Absolute Konvergenzreserve**
Differenz zwischen derjenigen Vergenzstellung, in welcher mit fusionaler Konvergenz bei konstantem Akkommodationsbedarf gerade noch binokulares Einfachsehen möglich ist, und der durch die Prüfentfernung gegebenen Orthostellung (*absolute positive Vergenzreserve*).

Definition 50 **Relative Divergenzreserve**
Differenz zwischen derjenigen Vergenzstellung, in welcher mit fusionaler Divergenz bei konstantem Akkommodationsbedarf gerade noch *scharfes* binokulares Einfachsehen möglich ist, und der durch die Prüfentfernung gegebenen Orthostellung (*relativ negative Vergenzreserve*).

Differenz zwischen und	Ruhestellung	durch die Prüfentfernung gegebene Orthostellung
Nebelpunkt	relative Breite	relative Reserve
Abreißpunkt	absolute Breite	absolute Reserve

Tab. 10: Übersicht über die praktische Messung der einzelnen fusionalen Vergenzbreiten und Vergenzreserven

Definition 51 **Absolute Divergenzreserve**
Differenz zwischen derjenigen Vergenzstellung, in welcher mit fusionaler Divergenz bei konstantem Akkommodationsbedarf gerade noch binokulares Einfachsehen möglich ist, und der durch die Prüfentfernung gegebenen Orthostellung (*absolute negative Vergenzreserve*).

Tabelle 10 gibt eine zusammenfassende Übersicht über die einzelnen Größen. Diejenigen Größen, die von der Ruhestellung aus in Richtung der durch die Prüfentfernung gegebenen Orthostellung liegen (bei Esophorie also die fusionalen Divergenzgrößen, bei Exophorie die Konvergenzgrößen) werden auch als „kompensatorisch" bezeichnet [39, S. 219], z. B. „kompensatorische Fusionsbreite" [76]. Im Englischen wird die relative Konvergenzreserve als *positive relative convergence,* die relative Divergenzreserve als *negative relative convergence* bezeichnet (dementsprechend auch in [8, S. 151; 35, S. 101; 64; 66; 76]), und die absolute Konvergenzreserve als *positive fusional reserve,* die absolute Divergenzreserve als *negative fusional reserve;* die einzelnen Vergenzbreiten heißen *binocular ductions* (*adduction und abduction,* aber auch *advergence und abvergence*) [34, S. 189; 58, S. 227 und S. 824]. Im ophthalmologischen Schrifttum (und leider auch in [2, Lfd. Nr. 12]) werden die hier als Reserven definierten Begriffe häufig als Breiten bezeichnet (z. B. relative Konvergenzbreite [41, S. 77]). Diese Ausdrücke stimmen aber nur bei Orthophorie mit den hier verwendeten gleichnamigen Begriffen überein.

Bei bekannter Heterophorie sind die einzelnen Reserven und Breiten leicht ineinander umzurechnen.

Formel 5 Einzelbreite = Einzelreserve — Heterophorie

Dabei sind Esophorien mit positivem und Exophorien mit negativem Vorzeichen einzusetzen.

Beispiel: Exophorie von 3 cm/m.
Konvergenzreserve = 12 cm/m.
Divergenzreserve = −5 cm/m. Formel 5 liefert die
Konvergenzbreite = 12 cm/m — (−3 cm/m) = 15 cm/m und die
Divergenzbreite = −5 cm/m — (−3 cm/m) = −2 cm/m.

Die Summe der Beträge von Konvergenzreserve und Divergenzreserve ist die gesamte Vergenzreserve oder „Fusionsreserve". Da die Lage der Nebelpunkte (bzw. Abreißpunkte) unabhängig vom Ausgangspunkt ist, ergibt sich die Fusionsreserve genauso aus den einzelnen Breiten.

Formel 6 gesamte (relative bzw. absolute) Fusionsreserve = gesamte (relative bzw. absolute) Fusionsbreite

In Abb. 23 sind die horizontalen Größen symbolisch dargestellt. Auch in der Vertikalen können eine Vergenzreserve und eine Vergenzbreite gemessen werden, und zwar sowohl $\frac{R}{L}$ als auch $\frac{L}{R}$. Bei $\frac{R}{L}$ wird die Orthostellung durch ein Prisma Basis unten rechts (oder Basis oben links) dahingehend verändert, daß das rechte Auge zum bifoveolären Sehen höher stehen muß als das linke, umgekehrt bei $\frac{L}{R}$ (siehe auch Tabelle 7).

Es soll noch einmal betont werden, daß sämtliche Vergenzbreiten und Vergenzreserven die Fähigkeiten eines Augenpaares zur zumindest kurzzeitig unter Anstrengung maximal möglichen *fusionalen Vergenz* charakterisieren. In Tabelle 11 sind einige Durchschnittswerte zusammengestellt, obwohl in der Literatur für alle diese Größen außerordentlich unterschiedliche Zahlenwerte zu finden sind. Das liegt sicher daran, daß neben der individuellen Verschiedenheit dieser Größen die Meßmethode (z. B. Art des optischen Mittels zur Veränderung der Orthostellung, zeitlicher Ablauf dieser Veränderung, Form und Leuchtdichte des Fusionsobjektes) und die Verfassung der Prüfperson (z. B. Art der vorausgegangenen Messungen, Ermüdung, Motivation) sehr einflußreiche Rollen spielen [36, S. 206]. Diese meßtechnischen Probleme sind wohl auch dafür verantwortlich, daß die „analytische Methode" bisher wenig Eingang in die hiesige Praxis der Korrektionsbestimmung

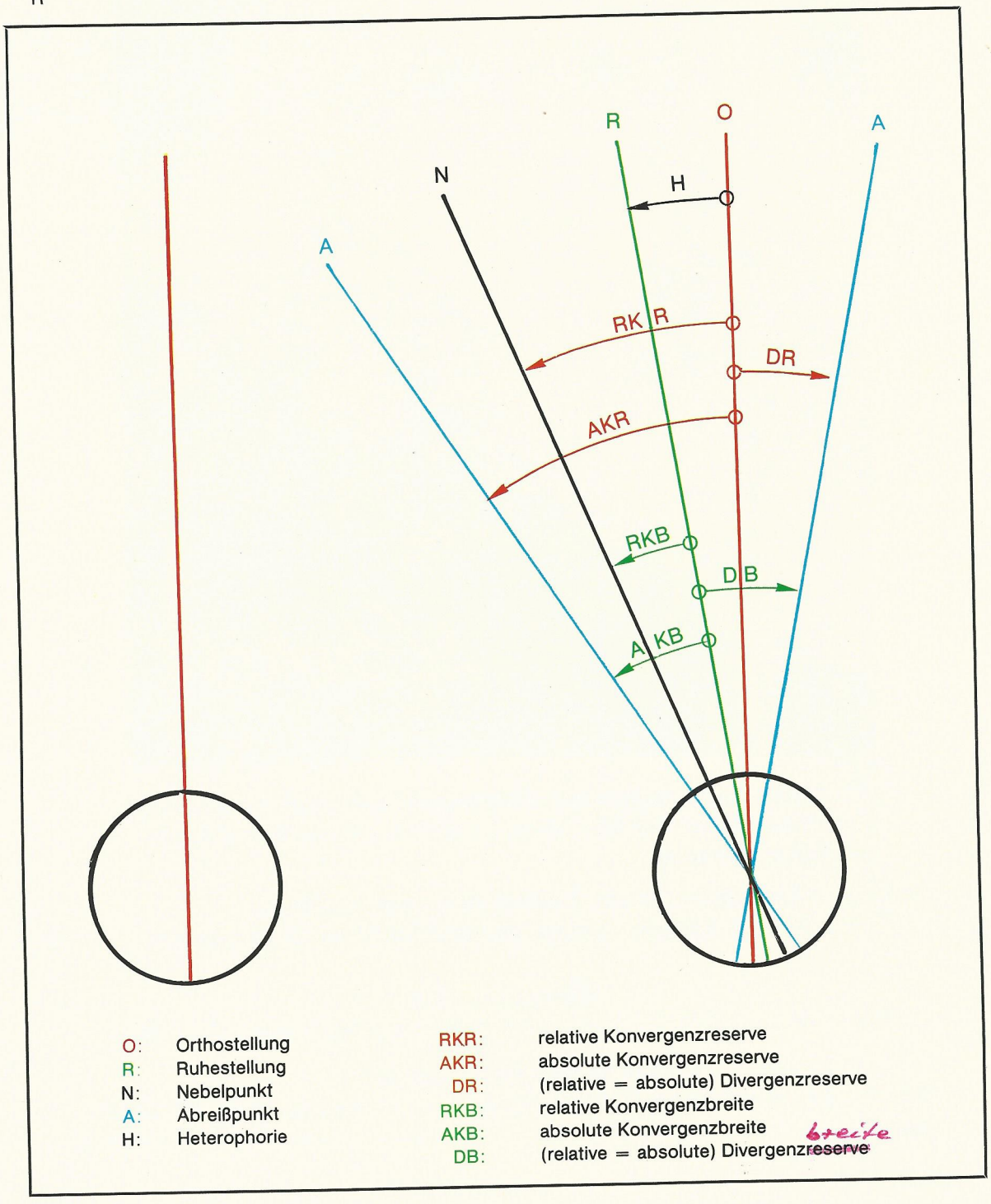


Abb. 23: Symbolische Darstellung der wichtigsten Begriffe zur horizontalen Fusionsbelastung bei fernem Objekt am Beispiel einer Esophorie

Größen in cm/m (gerechnet von der durch die Prüfentfernung gegebenen Orthostellung aus)				
	Nebelpunkt	Abreißpunkt	Wiedervereinigungspunkt	vertikale Vergenzreserve ($\frac{R}{L}$ oder $\frac{L}{R}$)
FERNE	7 bis 11 —	15 bis 23 – 7 bis – 9	8 bis 12 – 3 bis – 5	2 bis 4
NÄHE	14 bis 20 – 11 bis – 15	18 bis 24 – 19 bis – 23	7 bis 15 – 10 bis – 16	

Tab. 11: Durchschnittliche einzelne Fusionsreserven und Wiedervereinigungspunkte nach [35, S. 103 und 36, S. 205]

gefunden hat. Daher finden sich auch hauptsächlich theoretische Betrachtungen darüber, aber kaum Erfahrungsberichte [77].

Alle zuvor erläuterten fusionalen Vergenzbegriffe beziehen sich auf einen konstanten Akkommodationsbedarf, also auf unveränderte Entfernung des Objektes. Wird jedoch die absolute Konvergenzfähigkeit durch Annäherung eines realen Objektes geprüft, dann erreicht ein Augenpaar normalerweise in einer Entfernung von ungefähr 8 bis 10 cm (das entspricht nach Formel 1 je nach Pupillenabstand einer Konvergenzstellung von etwa 60 bis 90 cm/m) seinen „Konvergenznahpunkt" (*near point of convergence* [36, S. 209] oder *absolute Konvergenz* [8, S. 151]).

Definition 52 **Konvergenznahpunkt**
Die kleinste Objektentfernung, in der ein Objektpunkt bei beliebigem Akkommodationszustand gerade noch binokular einfach gesehen werden kann.

Der Konvergenznahpunkt ist im Gegensatz zum Akkommodationsnahpunkt (siehe Tabelle 3) unabhängig vom Lebensalter [35, S. 52].

(wird fortgesetzt)

Literaturhinweise

[1] DIN 58 208
„Begriffe und Zeichen bei Brillengläsern in Verbindung mit dem menschlichen Auge" Teil 3 „Auge" (September 1978) (Erste Ausgabe April 1972)

[2] DIN 58 208
„Begriffe und Zeichen bei Brillengläsern in Verbindung mit dem menschlichen Auge" Teil 5 „Binokulares System Auge — Brille" (Entwurf August 1978)

[4] „Handbuch für Augenoptik"
Herausgeb. Carl Zeiss, Oberkochen (1977)

[8] HEINZ DIEPES
„Refraktionsbestimmung" Verlag Heinz Postenrieder, Pforzheim (2. Auflage 1975)

[19] HERBERT SCHOBER
„Das Sehen" Band II VEB Fachbuchverlag Leipzig
(3. Auflage 1964)

[34] HOWARD SOLOMONS
„Binocular Vision" William Heinemann Medical Books Ltd., London (1978)

[35] THEO GLASER
„Die Phorien" VEB Verlag Technik Berlin (1969)

[36] BURIAN — VON NOORDEN'S
„Binocular vision and ocular motility" The C. V. Mosby Company. St. Louis (Second Edition, 1980)

[39] H.-J. HAASE/G. FORST/D. PESTALOZZI/H. GOERSCH
„Binokulare Korrektion" (Eine Sammlung von zehn Arbeiten aus den Jahren 1957—1978). Verlag Willy Schrickel, Düsseldorf (1980)

[41] W. DODEN
„Stellungsanomalien und Motilitätsstörungen" in Th. Axenfeld/H. Pau „Lehrbuch und Atlas der Augenheilkunde" Gustav Fischer Verlag, Stuttgart (1980)

[42] HANS BREDEMEYER/KATHLEEN BULLOCK
„Orthoptik" Walter de Gruyter, Berlin — New York (1978)

[43] STEWART DUKE-ELDER (Herausgeb.)
„System of Ophthalmology" Vol VI „Ocular Motility and Strabismus" Henry Kimpton, London (1973)

[58] IRVIN M. BORISH
„Clinical Refraction". The Professional Press, Inc., Chicago (Third Edition 1975)

[59] MEREDITH W. MORGAN
„A Comparison of Clinical Methods of Measuring Accommodative — Convergence". Amer. J. Optom. 27, 8 (1950) 385—396; dtsch. Übersetzung in Optometrie 5 (1966)

[60] THEODORE GROSVENOR
„The Use of the AC/A Ratio in Prescribing". Optometric Weekly, August 14 (1975) 16—18

[61] THEO GLASER
„Messungen zur grafischen analytischen Gläserbestimmung". Der Augenoptiker 2 (1969) 17—21

[62] MATHEW ALPERN, WILFRED M. KINCAID and MARVIN J. LUBECK
„Vergence and Accommodation: III. Proposed Definitions of AC/A Ratios". Amer. J. Ophthalm. 48 (1959) 141—148

[63] EDUARD BOSSHARD
„Die sogenannte ‚physiologische' Nah-Exophorie als Meßproblem". SOZ 9 (1971) 636—637

[64] J. REINER
„Bestimmung der Heterophorie nach der graphisch-analytischen Methode". 119. Versammlung des Vereins Rheinisch-Westfälischer Augenärzte, Düsseldorf (April 1969) 31—41

[65] H. H. FICK
„Eine Betrachtung über den ACA-Quotienten". Der Augenoptiker 2 (1972) 19—21

[66] H. H. FICK
„Fusion und Akkommodation". 15 Folgen in NOJ 10 (1974) bis 1 (1976)

[67] WOLFGANG ROOS
„Über den Zusammenhang zwischen Akkommodation und Konvergenz". 4. Sonderdruck der WVA (1955) 28—41

[68] KENNETH N. OGLE, THEODORE G. MARTENS and JOHN A. DYER
„Oculomotor Imbalance in Binocular Vision and Fixation Disparity". Lea & Febiger, Philadelphia (1967)

[69] MATHEW ALPERN and BERTIL F. LARSON
„Vergence and Accommodation. IV. Effect of Luminance Quantity on the AC/A". Amer. J. Ophthalm. 49 (1960) 1140—1149

[70] MATHEW ALPERN
„Testing Distance Effect on Phoria Measurement at Various Accommodative Levels". Arch. Ophthalm. 54 (1955) 906—915

[71] MEREDITH W. MORGAN
„„Accommodation and Vergence"; Amer. J. Optom. 45, 7 (1968) 415—454, dtsch. Übersetzung in Optometrie 2 und 3 (1969)

[72] ROBERT A. MOSES (Herausgeb.)
„ADLER'S Physiology of the eye". The C. V. Mosby Company, Saint Louis (Sixth Edition, 1975)

[73] R. SACHSENWEGER
„Funktionsprüfung und Funktionsstörungen" in Th. Axenfeld/H. Pau „Lehrbuch und Atlas der Augenheilkunde". Gustav Fischer Verlag, Stuttgart (1980)

[74] THEO GLASER
„Analytische Brillengläserbestimmung". Augenoptik 82, 1 (1965) 19—23

[75] K. H. WILMS
„Grundzüge moderner Refraktionstechnik". Verlag Willy Schrickel, Düsseldorf (1977)

[76] J. REINER
„Regeln zur Prismenverordnung". Klin. Mbl. f. Augenheilk. 153 (1968) 715—721

[77] G. FORST
„Vergleich der Ergebnisse von Heterophoriekorrektionen nach verschiedenen Methoden". Der Augenoptiker 9 (1973), nachgedruckt in [39, S. 229—239]

Das Fachbuch vom Fachmann

KARL-HEINZ WILMS
Grundzüge moderner Refraktionstechnik
156 Seiten, 96 Abbildungen, Preis bei Vorauszahlung 44,— DM inkl. Porto u. MwSt.
Aus dem Inhalt:
Gliederung im Bereich der objektiv-statischen Refraktion
Systematik und Einteilung der Skiaskopie-Verfahren
Die Refraktometrie
Das aphakische Auge und seine Länge
Linsen- und Nahastigmatismus
Entwicklung und Nutzung von Refraktionsprogrammen
Prüfung des binokularen Sehens
Das Optometric Extension Programm
Mathematische Betrachtung zur graphischen Analyse

VERLAG DÜSSELDORF WILLY SCHRICKEL

Duisburger Str. 16
4000 Düsseldorf 30
Fernruf:
02 11/49 90 25/26

Postscheck-Konto: Köln
925 84-500 (BLZ 370 100 50)

Deutsche Bank Düsseldorf
3 942 836 (BLZ 300 70010)

DR. HELMUT GOERSCH, Berlin

Einführung in das Binokularsehen

Teil VI (Fortsetzung aus Heft 10/1981)

3.3 Akkommodation-Vergenz-Diagramm

Haben die beiden Partner Akkommodation und Vergenz ihre Aufgaben optimal erfüllt, so wird das binokular angeblickte Objekt scharf und bifoveolär auf den Netzhäuten beider Augen abgebildet. Bei einem rechtsichtigen Augenpaar ist dann der Akkommodationserfolg gleich dem Akkommodationsbedarf (vom vorderen Augenhauptpunkt aus gemessene Objektentfernung in dpt), und die Augen sind in der Orthostellung. Diese ist bei (unendlich) fernem Objekt stets die Parallelstellung, während bei nahen Objekten zu jeder Objektentfernung eine vom Pupillenabstand abhängige Konvergenzstellung gemäß Formel 1 gehört (siehe Abschnitt 2.4). Zusammengehörige Werte von Akkommodationsbedarf und Vergenzbedarf für das freie Sehen bilden einen „Donderspunkt" oder „freien Orthopunkt".

Definition 53 **Donderspunkt**
Wertepaar von Akkommodationsbedarf (bei Emmetropie oder vollkorrigierter Ametropie) und freiem Konvergenzbedarf für scharfes Sehen in einer Orthostellung (*freier Orthopunkt*).

In der Optometrie ist es üblich, Orthopunkte in einem „Akkommodation-Vergenz-Diagramm" graphisch darzustellen. Dazu dient ein rechtwinkliges Koordinatensystem, in welchem der Akkommodationsbedarf die Ordinate und der Vergenzbedarf die Abszisse bilden. Die Verbindung der zu einem bestimmten Pupillenabstand gehörigen freien Orthopunkte liefert die „Donderslinie" [2, Lfd. Nr. 9], auch Reizlinie [78] (*demand line* [79]) oder freie Ortholinie genannt.

Definition 54 **Donderslinie**
Verbindungslinie der für einen vorgegebenen Pupillenabstand berechneten freien Orthopunkte (*freie Ortholinie*).

Die Donderslinie wird dann eine Gerade, wenn die Objektentfernung von den optischen Augendrehpunkten aus gerechnet wird (siehe Abb. 15). Alle Strecken zur Kennzeichnung von akkommodativen Einstellungen eines Auges rechnen aber vom vorderen Augenhauptpunkt aus (siehe Tab. 3). Da es hier hauptsächlich um die Erläuterung von Begriffen geht, soll dieser Unterschied vernachlässigt werden, zumal er ohnehin erst oberhalb von etwa 3 dpt merklich wird. Würde er berücksichtigt, ergäbe sich eine leicht gebogene Ortholinie [8, S. 460].

Das Akkommodation-Vergenz-Diagramm der Abb. 24 zeigt, daß in der gebräuchlichen Darstellungsweise ein kleinerer Pupillenabstand zu einer steileren Donderslinie führt, da die Steigung der Geraden durch den Kehrwert des Pupillenabstandes bestimmt ist ($A = \frac{1}{p} \cdot K$ als Umstellung von Formel 1). Allerdings ist auch die Verwendung vertauschter Koordinaten empfohlen worden [78; 80]. Die Namensgebung weist darauf hin, daß derartige Darstellungen auf DONDERS zurückgehen, und Abb. 25 zeigt ein Original-Diagramm von DONDERS [49, S. 94]. Darin ist kk' die Donderslinie, und im natürlichen Sehen stellen sich die Augen im Idealfall auf einen

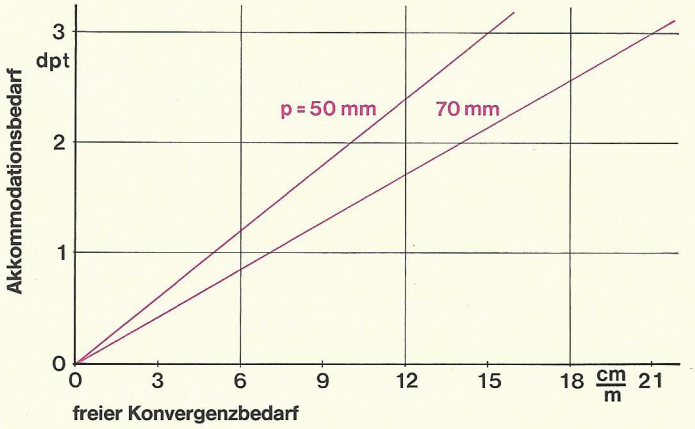


Abb. 24: Darstellung von Donderslinien für zwei Pupillenabstände p im Akkommodation-Vergenz-Diagramm.

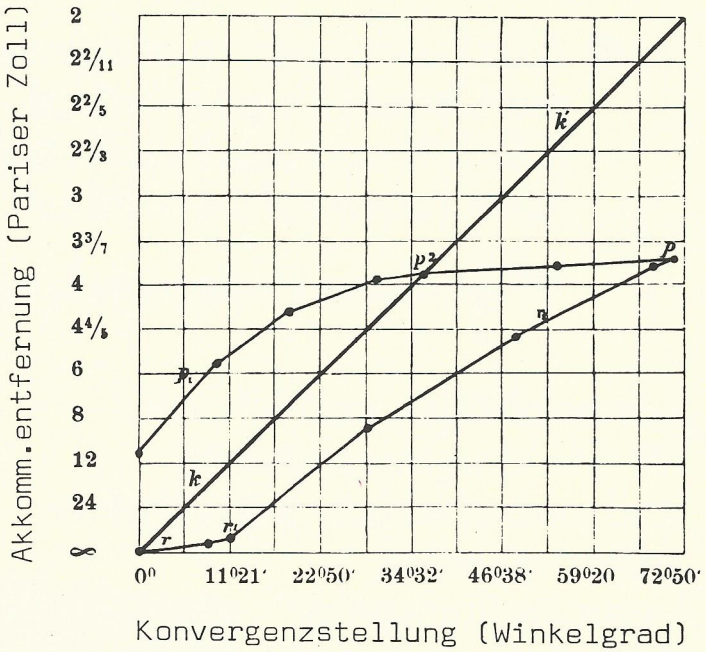


Abb. 25: Original-Diagramm von DONDERS [49, S. 9] für ein rechtsichtiges Augenpaar mit einem Pupillenabstand von 28½''' (= 64,3 mm). 1 Pariser Fuß = 0,325 m. 1 Fuß (') = 12 Zoll ('') = 144 Linien (''') [81, S. 428]. kk': freie Ortholinie; rr₁p: Fernpunktlinie; p₁p₂p: Nahpunktlinie.

Orthopunkt dieser Linie ein. Der Fernpunkt des rechtsichtigen Augenpaares liefert den Ursprung des Koordinatensystems (r in Abb. 25), und derjenige Orthopunkt, der dem im binokularen Sehen ermittelten Nahpunkt entspricht, ist als p_2 eingezeichnet.

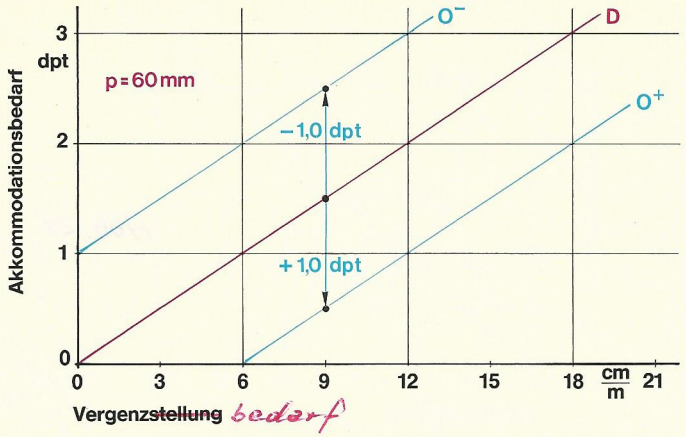


Abb. 26: Verschiebung der Orthopunkte im Akkommodation-Vergenz-Diagramm durch sphärische Gläser. D: Donderslinie für p = 60 mm; 0^-, 0^+: Ortholinien bei Addition von −1,0 dpt bzw. +1,0 dpt.

Die Annäherung eines realen Objektes im Binokularsehen bedeutet ein Durchlaufen der Donderslinie von r bis p_2.

Die Augen können jedoch auch bei unveränderter Objektentfernung einem durch beidseitiges Vorsetzen von gleichen sphärischen Gläsern veränderten Akkommodationsbedarf folgen. Dieser Vorgang heißt „relative Akkommodation" [2, Lfd. Nr. 1].

Definition 55 **Relative Akkommodation**
Durch sphärische Gläser erzwungene Änderung des Akkommodationserfolges bei konstantem Vergenzbedarf und unverändert scharfem binokularen Einfachsehen.

Durch einen Vorsatz von gleichstarken sphärischen Minusgläsern vor beide Augen wird der Orthopunkt vom Donderspunkt aus nach oben verschoben, durch Plusgläser nach unten. Durch Minusgläser wird also der durch einen freien Orthopunkt gekennzeichnete Akkommodationsbedarf vergrößert und durch Plusgläser verringert. Folgt das Augenpaar diesem veränderten Akkommodationsbedarf, so spricht bereits DONDERS von *positiver* und *negativer* relativer Akkommodation [49, S. 96].

Definition 56 **Positive relative Akkommodation**
Durch sphärische Minusgläser erzwungene relative Akkommodation.

Definition 57 **Negative relative Akkommodation**
Durch sphärische Plusgläser erzwungene relative Akkommodation.

Die bei *maximaler* positiver und negativer relativer Akkommodation erreichten Akkommodationsentfernungen sind in Abb. 25 als Linie der relativen (binokularen) Nahpunkte p_1p_2p und als Linie der relativen (binokularen) Fernpunkte rr_1r_1 eingezeichnet. Die vertikalen Strecken zwischen den relativen Nahpunkten und Fernpunkten stellen die jeweilige „relative Akkommodationsbreite" dar [49, S. 96; 82, S. 444]. Wie aus Abb. 25 ersichtlich, ist die relative Akkommodationsbreite von der Vergenzstellung abhängig.

Definition 58 **Relative Akkommodationsbreite**
Summe der Beträge von maximaler positiver und maximaler negativer Akkommodation für eine vorgegebene Vergenzstellung.

Diese (binokulare) relative Akkommodationsbreite ist kleiner als die (absolute) Akkommodationsbreite im Monokularsehen (maximaler Akkommodationserfolg, siehe Tab. 3).

Wie bereits betont, gilt die Donderslinie für refraktive Vollkorrektion (freie Ortholinie). Ist keine refraktive (Fern-)Vollkorrektion gegeben, so weichen die Orthopunkte von der Donderslinie ab, und diese neuen Orthopunkte bilden eine neue Ortholinie. Abb. 26 zeigt zwei Beispiele für die neue Lage der Orthopunkte bei Zusatz sphärischer Gläser zur refraktiven Vollkorrektion. Dabei gilt die obere Ortholinie zum Beispiel für ein übersichtiges Augenpaar bei Unterkorrektion um 1 dpt und die untere Ortholinie für eine Nahbrille mit einem Nahzusatz von 1 dpt.

Genau genommen ist die bisherige Darstellung der Donderslinie als Gerade (auch bei Messung der Objektentfernung von den optischen Augendrehpunkten aus) nur für Augenpaare ohne Brille richtig, denn eine völlig korrekte Darstellung der Ortholinie eines Augenpaares mit Brille muß die binokular-prismatischen Wirkungen in den jeweiligen Durchblickpunkten der Gläser berücksichtigen. Diese Wirkungen sind umso stärker, je größer der Betrag des Brechwertes der sphärischen Gläser ist. Auch bei torischen Gläsern kommt es nur auf die horizontal-prismatische Wirkung an. Da die Zentrierung der Gläser vor den Augen den Vergenzbedarf ebenfalls beeinflußt, soll angenommen werden, daß die Gläser (mit ihren optischen Mitten) auf den Pupillenabstand der Augen zentriert sind. Dann ist beim Blick geradeaus in die Ferne (Parallelstellung) keine binokular-prismatische Wirkung vorhanden, die Ortholinie geht also durch den Nullpunkt des Akkommodation-Vergenz-Diagramms, und beim Blick in die Nähe hängt die jeweilige prismatische Nebenwirkung der Gläser ab von: 1. der Gläserstärke, 2.

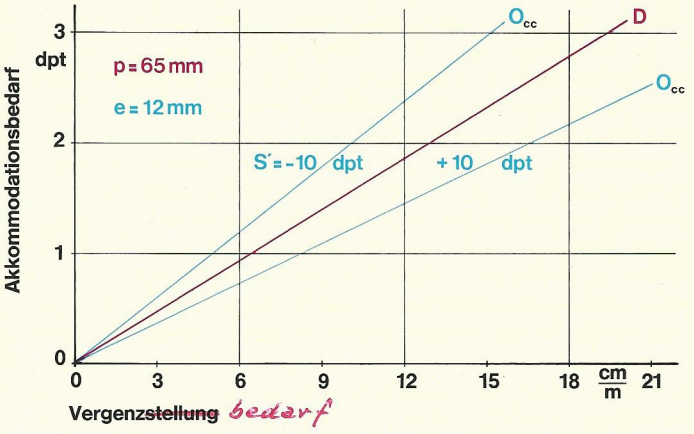


Abb. 27: Donderslinie D und Ortholinien 0_{cc} bei refraktiver Vollkorrektion mit auf den Pupillenabstand p = 65 mm zentrierten Brillengläsern des Scheitelbrechwertes S' = −10 dpt bzw. S' = +10 dpt im Hornhaut-Scheitelabstand e = 12 mm.

dem Pupillenabstand und 3. dem Hornhaut-Scheitelabstand der Gläser [33]. Abb. 27 zeigt, wie für sphärische Plus- und Minusbrillen die Ortholinien cc von der Donderslinie abweichen. Diese brillenglasbedingten Einflüsse auf den Vergenzbedarf sollen bei den weiteren Darstellungen jedoch unberücksichtigt bleiben.

Die bisherigen Erörterungen galten für orthophorische Augen, denn ein heterophorisches Augenpaar kann nur mit fusionaler Vergenz zum Orthopunkt gelangen. Deshalb ist es üblich, die zu jedem Akkommodationszustand gehörige Vergenz-Ruhestellung (also die jeweilige Vergenzstellung ohne fusionale Vergenz) als „Phoriepunkt" in das Diagramm einzutragen.

Definition 59 **Phoriepunkt**
Wertepaar von Akkommodationsbedarf (bei Emmetropie oder vollkorrigierter Ametropie) und Vergenz-Ruhestellung.

Die Gesamtheit aller Phoriepunkte liefert die „Phorielinie" [2, Lfd. Nr. 27].

Definition 60 Phorielinie
Verbindungslinie der für verschiedene Objektentfernungen gemessenen Phoriepunkte.

Diese Phorielinie wird in [19, S. 28] fälschlicherweise als Donders'sche Linie bezeichnet, beide Linien fallen jedoch nur bei Orthophorie zusammen. Abb. 28 zeigt drei Beispiele für gerade Phorielinien im Vergleich mit der zugehörigen Donderslinie. Wenn sich die Phorie bei Verringerung der Objektentfernung ungleichmäßig ändert, ergibt sich eine gebogene Phorielinie. Für jeden Akkommodationsbedarf zeigt der horizontale Pfeil vom Phoriepunkt zum Orthopunkt den fusionalen Vergenzbedarf nach Betrag und Richtung an, nämlich fusionaler Divergenzbedarf bei Esophorie (Pfeil nach links) und fusionaler Konvergenzbedarf bei Exophorie (Pfeil nach rechts). Vertikalphorien können in diesen Diagrammen nicht dargestellt werden. Dadurch ist deren praktische Brauchbarkeit sicherlich eingeschränkt, denn die Mehrzahl aller Heterophorien besitzt eine Höhenkomponente (vgl. Abschnitt 2.7). Trotzdem haben die Diagramme einen hohen didaktischen Wert durch die anschauliche Darstellung der Verknüpfung von Akkommodation und Vergenz.

3.4 Phorielinie und ACA-Quotient

Da die akkommodative und psychische Vergenz zu den Nahruhestellungen eines Augenpaares führen (vgl. Abschnitt 2.8), stehen Phorielinie und ACA-Quotient in unmittelbarem Zusammenhang. Bekanntermaßen werden die Phoriepunkte für Ferne und Nähe bei mehr oder weniger starker Aufhebung der Fusionsreize gemessen. Das sind aber gleichzeitig die Messungen, welche zur Bestimmung des ACA-Quotienten dienen (vgl. Abschnitt 3.1). Daher kann der ACA-Quotient direkt aus der Phorielinie ermittelt werden, was anhand einiger Beispiele gezeigt werden soll.

Beispiel 1: Orthophorie im gesamten Akkommodationsgebiet. In diesem Fall ist die Phorielinie mit der Donderslinie identisch. Bei Annäherung eines realen Objektes wird also die Donderslinie ohne fusionale Vergenz durchlaufen. Ihre Neigung (mathematisch exakt: der Kehrwert ihrer Steigung) ist daher ein Maß für die Summe aus akkommodativer und psychischer Vergenz. Der Pupillenabstand möge p = 60 mm betragen. Bei 3 dpt Objektentfernung ergibt sich nach Abb. 28 die Summe von akkommodativer und psychischer Vergenz zu 18 cm/m, was einen ACA-Quotienten von

$$\frac{18\ \text{cm/m}}{3\ \text{dpt}} = 6\ \text{cm}$$ liefert.

Aus Beispiel 1 ist also ersichtlich:
Bei Orthophorie im gesamten Akkommodationsgebiet ist der ACA-Quotient gleich dem in cm angegebenen Pupillenabstand. (Die Phorielinie ist mit der Donderslinie identisch).

Beispiel 2: Konstante Esophorie im gesamten Akkommodationsgebiet. Hier ist von der Phorielinie auszugehen, da die fusionale Vergenz zur Ermittlung des ACA-Quotienten eliminiert werden muß. Aus P_1 in Abb. 28 ergibt sich: Bei 3 dpt Objektentfernung liegt der Phoriepunkt bei 24 cm/m, für die Ferne bei 6 cm/m. Daraus folgt:

$$\text{ACA-Quotient} = \frac{24\ \text{cm/m} - 6\ \text{cm/m}}{3\ \text{dpt}} = 6\ \text{cm}.$$

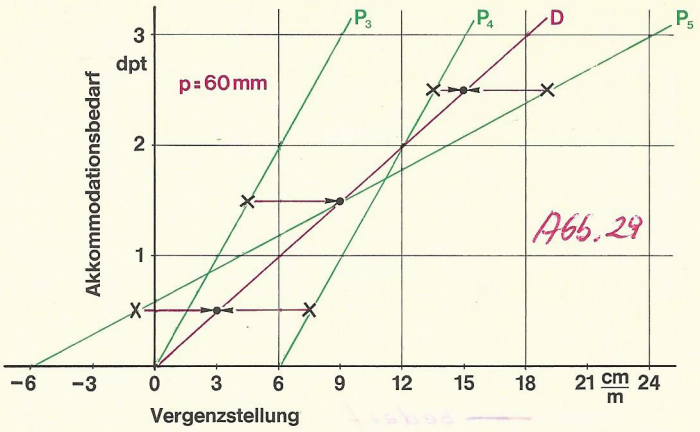


Abb. 28: Donderslinie D und Phorielinien. P_1: Esophorie von 6 cm/m für alle Objektentfernungen; P_2: Exophorie von 6 cm/m für alle Objektentfernungen; P_3: Fern-Orthophorie und mit abnehmender Objektentfernung zunehmende Nah-Exophorie; Pfeile: nach rechts fusionaler Konvergenzbedarf, nach links fusionaler Divergenzbedarf.

Eine im gesamten Akkommodationsgebiet konstante Exophorie liefert das gleiche Ergebnis (P_2 in Abb. 28):

$$\text{ACA-Quotient} = \frac{12\ \text{cm/m} - (-6\ \text{cm/m})}{3\ \text{dpt}} = 6\ \text{cm}.$$

Aus Beispiel 2 ist also ersichtlich:
Bei im gesamten Akkommodationsgebiet konstanter horizontaler Heterophorie ist der ACA-Quotient ebenfalls gleich dem in cm angegebenen Pupillenabstand. (Die Phorielinie verläuft parallel zur Donderslinie).

Beispiel 3: Fern-Orthophorie und Nah-Exophorie, die bei geringer werdender Objektentfernung gleichmäßig ansteigt. Aus P_3 (Abb. 28 oder 29) ergibt sich: Bei 3 dpt Objektentfernung liegt der Phoriepunkt bei 9 cm/m und für die Ferne bei Null, woraus der ACA-Quotient zu $\frac{9\ \text{cm/m}}{3\ \text{dpt}} = 3\ \text{cm}$ folgt.

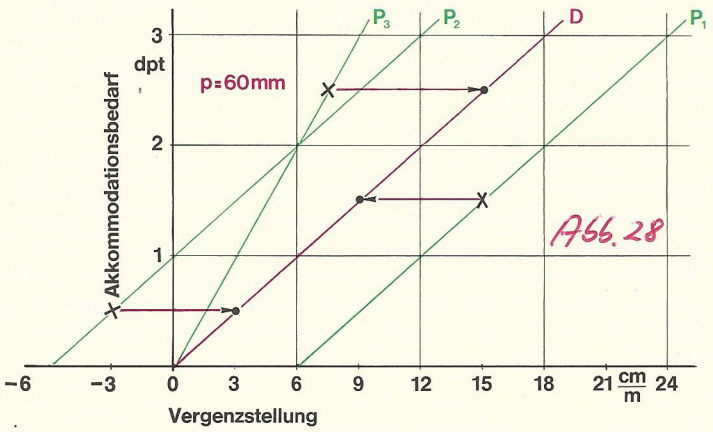


Abb. 29: Phorielinien und ACA-Quotient. D: Donderslinie; Pfeile: nach rechts fusionaler Konvergenzbedarf, nach links fusionaler Divergenzbedarf. (Weitere Erläuterungen im Text).

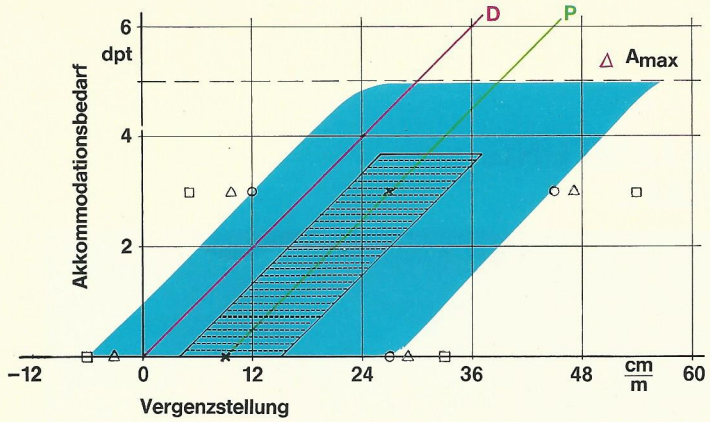


Abb. 30: Zone des deutlichen binokularen Einfachsehens (blau) und Zone des komfortablen Sehens nach SHEARD (schraffiert). D: Donderslinie; P: Phorielinie; ΔA_{max}: maximaler Akkommodationserfolg. (Symbole siehe Tabelle 12).

VERGENZSTELLUNG (bei vorgegebenem Akkommodationsbedarf)	Symbol	Definition
Phoriepunkt (Ruhestellung)	×	59
Nebelpunkt (Unschärfepunkt)	○	39
Abreißpunkt (Diplopiepunkt)	□	40
Wiedervereinigungspunkt (Fusionspunkt)	△	41

Tab. 12. Symbole zur Kennzeichnung bestimmter Vergenzstellungen im Akkommodation-Vergenz-Diagramm

Beispiel 4: Fern-Esophorie, die bei Objektannäherung gleichmäßig abnimmt bis Orthophorie erreicht ist und bei weiterer Objektannäherung in eine ebenso gleichmäßig wachsende Exophorie übergeht. P_4 in Abb. 29 liefert: Bei 3 dpt Objektentfernung liegt der Phoriepunkt bei 15 cm/m (Exophorie von 3 cm/m), für 2 dpt bei 12 cm/m (Orthophorie) und für die Ferne bei 6 cm/m (Esophorie von 6 cm/m). Das liefert einen ACA-Quotienten von

$$\frac{15\ \text{cm/m} - 6\ \text{cm/m}}{3\ \text{dpt}} = 3\ \text{cm}.$$

Aus den Beispielen 3 und 4 ist also ersichtlich:

Bei einer mit geringer werdender Objektentfernung in mathematischem Sinne kleiner werdenden Horizontalphorie (d. h. kleiner werdende Esophorie bzw. wachsende Exophorie) ist der ACA-Quotient kleiner als der in cm angegebene Pupillenabstand. (Die Phorielinie ist steiler als die Donderslinie).

Beispiel 5: Fern-Exophorie, die bei Objektannäherung gleichmäßig abnimmt bis Orthophorie erreicht ist und bei weiterer Objektannäherung in eine ebenso gleichmäßig zunehmende Esophorie übergeht. P_5 in Abb. 29 liefert: Bei 3 dpt Objektentfernung liegt der Phoriepunkt bei 24 cm/m (Esophorie von 6 cm/m), für 1,5 dpt bei 9 cm/m (Orthophorie) und für die Ferne bei −6 cm/m (Exophorie von 6 cm/m). Daraus folgt der

$$\text{ACA-Quotient} = \frac{24\ \text{cm/m} - (-6\ \text{cm/m})}{3\text{dpt}} = 10\ \text{cm}.$$

Aus Beispiel 5 ist also ersichtlich:

Bei einer mit geringer werdender Objektentfernung in mathematischem Sinne größer werdenden Horizontalphorie (d. h. größer werdende Esophorie bzw. kleiner werdende Exophorie) ist der ACA-Quotient größer als der in cm angegebene Pupillenabstand. (Die Phorielinie ist flacher als die Donderslinie).

Diese Beispiele lassen sich beliebig vermehren und ergeben zusammengefaßt die folgenden Merkregeln.

ACA-Regeln

1. Die Größe des ACA-Quotienten ergibt sich aus der Neigung der Phorielinie.
2. Besitzt die Phorielinie dieselbe Neigung wie die Donderslinie, dann ist der ACA-Quotient gleich dem in Zentimeter angegebenen Pupillenabstand.
3. Ist die Phorielinie steiler als die Donderslinie, dann ist der ACA-Quotient kleiner als der in Zentimeter angegebene Pupillenabstand.
4. Ist die Phorielinie flacher als die Donderslinie, dann ist der ACA-Quotient größer als der in Zentimeter angegebene Pupillenabstand.
5. Der ACA-Quotient ist nur dann konstant, wenn die Phorielinie eine Gerade ist.

Der zuvor erläuterte Zusammenhang zwischen dem ACA-Quotienten einerseits und dem Pupillenabstand sowie der Entfernungsabhängigkeit der Horizontalphorie andererseits wird in [36, S. 91] und in [43, S. 202] durch eine Formel dargestellt.

Formel 7 $\text{ACA-Quotient} = p + (P_N - P_F).a_N$

Darin ist p: Pupillenabstand (in cm!)
P_N: Nahphorie (in cm/m)
P_F: Fernphorie (in cm/m)
a_N: Objektentfernung (in m!), in welcher die Nahphorie gemessen wurde.

Esophorien rechnen dabei positiv, Exophorien negativ, und der ACA-Quotient ergibt sich in der Einheit Zentimeter. Da der Pupillenabstand die Steigung der Donderslinie liefert, gehen aus Formel 7 die oben aufgestellten ACA-Regeln ebenfalls hervor. Der Wert ACA-Quotient = p wird in [36, S. 92] als theoretisch ideales Verhältnis bezeichnet.

3.5 Zone des komfortablen Sehens

Von den Anhängern der analytischen Gläserbestimmung [83] werden auch die in Abschnitt 3.2 erläuterten Größen in das Akkommodation-Vergenz-Diagramm eingezeichnet. Für alle einzuzeichnenden Werte sind bestimmte Symbole festgelegt worden [2, Lfd. Nr. 38], die in Tabelle 12 zusammengestellt sind. Abb. 30 zeigt ein Beispiel. Der Bereich zwischen den Nebelpunkten (nach oben begrenzt durch das Akkommodationsvermögen) ist die „Zone des deutlichen binokularen Einfachsehens".

Definition 61 **Zone des deutlichen binokularen Einfachsehens**

Gesamtheit aller Wertepaare im Akkommodation-Vergenz-Diagramm, bei denen (zumindest kurzzeitig) scharfes binokulares Einfachsehen möglich ist.

Die im linken, rechten und oberen Randbereich dieser Zone liegenden Werte stellen Anforderungen an Akkommodation und Vergenz eines Augenpaares, die sicher nicht über längere Zeit beschwerdefrei erfüllt werden können. Derjenige Bereich innerhalb der Zone des deutlichen binokularen Einfachsehens, in dem das scharfe binokulare Einfachsehen auf Dauer beschwerdefrei möglich ist, heißt „Zone des komfortablen Sehens".

Definition 62 **Zone des komfortablen Sehens**
Gesamtheit aller Wertepaare im Akkommodation-Vergenz-Diagramm, bei denen andauerndes scharfes binokulares Einfachsehen beschwerdefrei möglich ist.

Nach oben ist diese Zone des komfortablen Sehens ungefähr durch den 2/3-Wert des Akkommodationsvermögens begrenzt. Über ihre horizontalen Grenzen ist viel spekuliert worden. Nach der Theorie von H.-J. HAASE [39] ist stets binokulare Vollkorrektion angezeigt (Prismen Basis außen verschieben die Orthopunkte nach rechts, Basis innen nach links), und die Zone des komfortablen Sehens hat nur eine minimale horizontale Ausdehnung (etwa 0,5 cm/m beiderseits der Phorielinie). In der analytischen Gläserbestimmung werden dagegen die komfortablen Zonen nach PERCIVAL und SHEARD benutzt [83]. Nach PERCIVAL erstreckt sich die Zone des komfortablen Sehens über das mittlere Drittel zwischen den Nebelpunkten, nach SHEARD wird sie gebildet aus den rechts und links der Phorielinie liegenden ersten Dritteln von relativer Konvergenzbreite und relativer Divergenzbreite (Abb. 30). Die Gesamtbreite der komfortablen Zone nach PERCIVAL und nach SHEARD ist damit gleich, jedoch kann die Lage der einzelnen Grenzen beträchtliche Unterschiede aufweisen.

Eine zusammenfassende Diskussion der Akkommodation-Vergenz-Probleme (einschließlich der Frage, ob die Akkommodation oder die Vergenz die führende Rolle spielt) findet sich in [84], und eine ausführliche Darstellung der historischen Entwicklung in der Erforschung des Zusammenspiels von Akkommodation und Vergenz in [58, S. 875] und in [85]. *(Wird fortgesetzt)*

Literaturhinweise:

[2] DIN 58 208
„Begriffe und Zeichen bei Brillengläsern in Verbindung mit dem menschlichen Auge" Teil 5 „Binokulares System Auge — Brille" (Entwurf August 1978)

[8] HEINZ DIEPES
„Refraktionsbestimmung" Verlag Heinz Postenrieder, Pforzheim (2. Auflage 1975)

[19] HERBERT SCHOBER
„Das Sehen" Band II VEB Fachbuchverlag Leipzig (3. Auflage 1964)

[33] HELMUT GOERSCH
„Zentrierung von Nahbrillen" NOJ 7 (1975) 509—516

[36] BURIAN — VON NOORDEN'S
„Binocular vision and ocular motility" The C. V. Mosby Company. St. Louis (Second Edition, 1980)

[39] H.-J. HAASE/G. FORST/D. PESTALOZZI/H. GOERSCH
„Binokulare Korrektion" (Eine Sammlung von zehn Arbeiten aus den Jahren 1957—1978). Verlag Willy Schrickel, Düsseldorf (1980)

[43] STEWART DUKE-ELDER (Herausgeb.)
„System of Ophthalmology" Vol VI „Ocular Motiliy and Strabismus" Henry Kimpton, London (1973)

[49] F. C. DONDERS
„Die Anomalien der Refraction und Accommodation des Auges" Wilhelm Braumüller, Wien (1966)

[58] IRVIN M. BORISH
„Clinical Refraction"
The Professional Press, Inc., Chicago (Third Edition 1975)

[78] H. W. HOFSTETTER
„Verbessertes Schema für die grafische Analyse des Akkommodations-Konvergenz-Verhältnisses"
Augenoptik 84 (1967) 103—105

[79] DONALD G. PITTS and H. W. HOFSTETTER
„Demand-line graphing of the zone of clear single binocular vision"
J. Amer. Optom. Assoc. 31 (1959) 51—55

[80] H. W. HOFSTETTER
„A Revised Schematic for the Graphic Analysis of the Accommodation-Convergence Relationship"
Canad. J. Optom. 30 (1968) 49—52

[81] Brockhaus' Conversations-Lexikon Siebenter Band, Verlag F. A. Brockhaus Leipzig (1884)

[82] ABC der Optik (Herausgeb. KARL MÜTZE)
VEB F. A. Brockhaus Verlag Leipzig (1961)

[83] J. REINER
„Bestimmung der Heterophorie nach der graphisch-analytischen Methode"
119. Versammlung des Vereins Rheinisch-Westfälischer Augenärzte (Düsseldorf 1969) 31—41

[84] WOLFGANG ROOS
„Über den Zusammenhang zwischen Akkommodation und Konvergenz" (Versuch einer Abgrenzung der Zone des komfortablen Sehens). 4. Sonderdruck der WVA (1955) 28—41

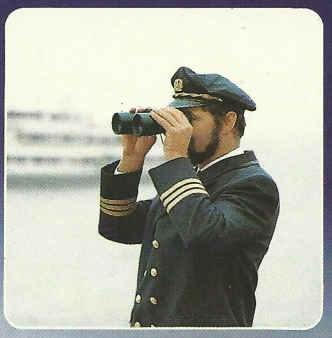
[85] H. W. HOSTETTER
„The Zone of Clear Single Binocular Vision"
Amer. J. Optom. 22 (1945) 301—333 und 361—384

Ihre neuen Zielgruppen: Seefahrer und Segler

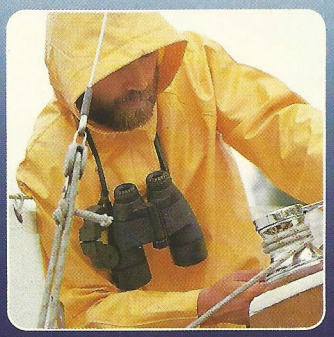
Unser neues Produkt HABICHT SL 7 x 50 für Seefahrer und Segler

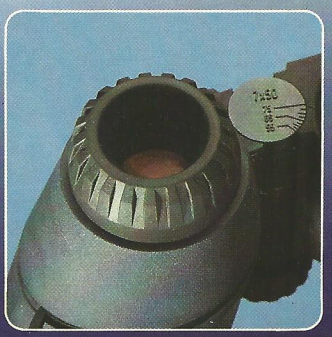
SWAROVSKI OPTIK











Der Habicht SL 7 x 50 hat Eigenschaften, die andere seetaugliche Gläser gerne hätten.

- Stoßdämpfend gelagertes optisches System
- Weicher, schlagschützender geschäumter Mantel
- Wasser- und gasdicht
- Funktionssicher bei Temperaturen von −40° C bis +70° C
- Neuer patentierter Mittelbetrieb mit geschlossener Brücke
- Kompromißlos funktionelles Design für optisches Handling, auch bei Nässe.

Wir inserieren ab Oktober in den wichtigsten Fachzeitschriften.

Besuchen Sie uns auf der deutschen Bootsausstellung 1982 in Hamburg, Stand 3B/3145, Halle 3B.

AUSTRIA

Generalvertretung für Deutschland Manfred Alberts
Bielsteiner Straße 69, D 5276 Wiehl Telefon 0 22 62/42 41

Dr. Helmut Goersch, Berlin

Einführung in das Binokularsehen

Teil VII (Fortsetzung aus Heft 11/1982)

4. Sensorik des Binokularsehens

Unter der Sensorik des Binokularsehens wird bekanntlich der nervliche Anteil des beidäugigen Sehvorganges verstanden. Die Sensorik bewirkt sowohl die Steuerung der Augenbewegungen (Sensomotorik) als auch die visuelle Empfindung, Wahrnehmung und Erkennung. Die hier vorgenommene Aufteilung zwischen der Motorik und der Sensorik des Binokularsehens geschieht aus rein didaktischen Gründen. Im natürlichen Sehen laufen motorische und sensorische Vorgänge ineinander verzahnt ab und sind kaum voneinander zu trennen. Sachsenweger benutzt die Begriffe *Okulomotorik* und *Visusensorik:* „Das okulomotorische und das visusensorische System müssen ... als Einheit betrachtet werden, wobei die Sensorik die Okulomotorik reguliert und kontrolliert" [86].

In diesem Kapitel sollen die wichtigsten Begriffe zur Sensorik des Binokularsehens dargestellt werden.

4.1 Netzhautkorrespondenz

Im Abschnitt 1.3 sind die Richtungsempfindungen erörtert worden, die durch unterschiedliche Netzhautstellen des Einzelauges vermittelt werden. Die relative Lage von Objekten im Gesichtsfeld wird mit Hilfe der den Bildorten auf der Netzhaut zugeordneten Richtungswerte visuell vermittelt. Dabei ist zu beachten, daß diese Richtungswerte eigentlich nicht zu den Netzhautstellen, sondern zu den „Empfängerzellen" im Sehzentrum gehören [36, S. 11]. Die Netzhautelemente sind lediglich die „Senderzellen", deren Impulse zu den jeweils „richtigen" Empfängern geschickt werden. Unter gewissen Umständen kann jede Netzhautstelle „ihren" Richtungswert verändern.

Im Binokularsehen, das heißt also bei der gleichzeitigen Tätigkeit beider Augen, besitzen die einzelnen Stellen der Netzhäute ihre Richtungswerte zunächst weiterhin unabhängig voneinander. Im Sensorium werden dann die Richtungsempfindungen der Einzelaugen gemeinsam verarbeitet. Zwischen den Richtungswerten im Monokularsehen und im Binokularsehen besteht jedoch ein wesentlicher Unterschied, der besonders deutlich von Helmholtz beschrieben wurde [87]. Während sich die Richtungswerte des Monokularsehens auf den Ort des Auges selbst beziehen, entsteht die binokulare Richtungsempfindung von der Mitte zwischen beiden Augen aus: „Man denke sich in der Mitte zwischen beiden Augen ein imaginäres mittleres Cyclopenauge, welches auf den gemeinsamen Fixationspunkt beider Augen gerichtet ist ..." [87, S. 756]. Bei normal entwickeltem Binokularsehen besitzt die Richtungsempfindung dieses „Zyklopenauges" überragende Bedeutung. So orientiert sich zum Beispiel die Bewegung von Körperteilen auch dann noch an der gewohnten binokularen Richtungswahrnehmung, wenn nur monokular gesehen wird. Dazu beschreibt Helmholtz folgenden eindrucksvollen Versuch: „Man blicke mit einem Auge nach einem entfernten Objecte und halte vor den unteren Theil des Gesichtes ein Blatt Papier so, daß man die eigenen Hände und Arme nicht sehen kann. Man schiebe dann den Zeigefinger der rechten Hand unter dem deckenden Schirm so in die Höhe, als wollte man nach dem gesehenen Gegenstand hinzeigen. Der Finger wird hinter dem Papier links vor dem fixierten Gegenstand zum Vorschein kommen, wenn man mit dem rechten Auge hinblickt, rechts, wenn man mit dem linken sieht" [87, S. 757]. Im weiteren ist mit „Richtungswert" die auf das Zyklopenauge bezogene Richtungsempfindung gemeint.

Bei der richtungswertmäßigen Zusammenarbeit beider Augen kommt der jeweils gleichen Richtungsempfindung bestimmter Netzhautstellen des rechten und linken Auges besondere Bedeutung zu. Dabei muß unterschieden werden, ob zwei Netzhautstellen gleiche Richtungswerte nur haben, wenn auf ihnen fusionierbare Bilder liegen, oder auch bei rechts und links völlig verschiedenen Bildern. („Fusionierbare" Bilder sind hinreichend gleiche Bilder: die „objektive" Fusionsbedingung ist erfüllt; siehe Abschnitt 2.5).

Die wohl bekannteste Veranschaulichung gleicher Richtungswerte basiert auf dem Fensterversuch nach Hering [9, S. 20]. Abb. 31 zeigt das Prinzip dieses Versuches. Ein in der Medianebene eines Augenpaares inmitten einer Blendenöffnung befindlicher Fixationspunkt möge beidäugig zentral fixiert werden. Während sich die Augen in dieser Orthostellung befinden, werden die hinter

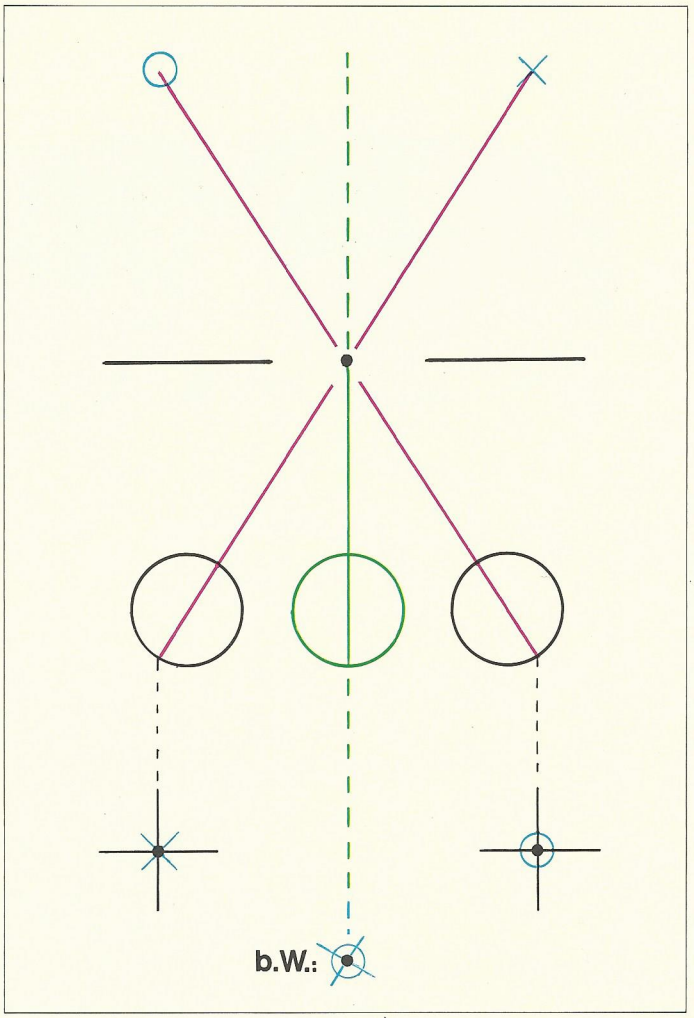


Abb. 31: Veranschaulichung der Sehrichtungsgemeinschaft (grün: Zyklopenauge; b.W.: binokulare Wahrnehmung; Darstellung der Netzhäute siehe Abschnitt 1.3; weitere Erläuterung im Text).

der Blende liegenden und nur jeweils einem Auge sichtbaren Objekte (hier ein Kreis für das rechte Auge und ein Andreaskreuz für das linke Auge) monokular genau in die Richtung der Fixierlinie des betreffenden Auges gebracht, wobei das jeweils andere Auge zugehalten wird. In der binokularen Wahrnehmung erscheinen dann alle drei Objekte in gleicher Richtung geradeaus in der Medianebene (Blickrichtung des Zyklopenauges), denn ihre Bilder liegen auf Netzhautstellen mit gleichem Richtungswert. Diese „Sehrichtungsgemeinschaft" [88, S. 101] zwischen beiden Augen auch für nicht fusionierbare Netzhautbilder wird als „Netzhautkorrespondenz" oder einfach als „Korrespondenz" bezeichnet [2, Lfd. Nr. 18].

Definition 63 Korrespondenz
Unabhängig von der Beschaffenheit der beiden Netzhautbilder vorhandene Gleichheit der Richtungswerte von Netzhautstellen beider Augen im Binokularsehen.

„Diese Korrespondenz ist ein alles überragendes Attribut des Binokularsehens. Sie vereinigt beide Augen zu einem unitarischen visuellen System. Die Identifikation korrespondierender Sehrichtungen miteinander ist angeboren; als solche funktioniert sie vollautomatisch und ununterbrochen, unabhängig von der relativen Stellung des einen Auges zum anderen" [89]. Solche in Korrespondenz stehende Netzhautstellen beider Augen, die also im Binokularsehen für fusionierbare und ebenso für nicht fusionierbare Netzhautbilder gleiche Richtungswerte besitzen, heißen „korrespondierende Netzhautstellen" [2, Lfd. Nr. 21].

Definition 64 Korrespondierende Netzhautstellen
Netzhautstellen in beiden Augen, die sowohl für fusionierbare als auch für nicht fusionierbare Bilder gleiche Richtungswerte besitzen.

Die wichtigsten korrespondierenden Netzhautstellen sind naturgemäß diejenigen, die den Richtungswert Geradeaus besitzen, da alle übrigen Richtungsempfindungen relativ zu dieser Geradeausempfindung entstehen. Diese Netzhautstellen in beiden Augen sind die Nullpunkte oder Zentren für die Richtungsempfindungen und werden dementsprechend „Korrespondenzzentren" genannt.

Definition 65 Korrespondenzzentren
Korrespondierende Netzhautstellen mit dem Richtungswert Geradeaus.

„Die ideale Situation für binokulare Wahrnehmung ist dann gegeben, wenn die Augen „bi-fixieren" . . ." [89]. Im Idealfall stellen also die Mitten der beiden Netzhautgruben die Korrespondenzzentren dar (wie im Beispiel der Abb. 31), es besteht „bizentrale Korrespondenz".

Definition 66 Bizentrale Korrespondenz
Korrespondenz, bei der die Korrespondenzzentren in den Mitten der Netzhautgruben beider Augen liegen.

Oft wird diese bizentrale Korrespondenz auch als bifoveoläre Korrespondenz bezeichnet. Dieser Ausdruck kann aber mißverstanden werden [72, S. 562], denn wörtlich genommen heißt bifoveolär nur innerhalb der beiden Foveolae, was nicht unbedingt in deren Zentren zu sein braucht. Da monokular von „zentraler" Fixation gesprochen wird, sollte es auch binokular korrekt „bizentral" heißen, wenn beide Zentren gemeint sind.

Bei einer Korrespondenzprüfung soll die Lage der Korrespondenzzentren auf den beiden Netzhäuten ermittelt werden. Da das Wesen der Korrespondenz in der unabhängig von der Art der Netzhautbilder vorhandenen Gleichheit der Richtungswerte liegt, kann eine Korrespondenzprüfung nur mit nicht fusionierbaren Bildern in beiden Augen erfolgen. Eine solche Korrespondenzprüfung erfordert eine subjektive und eine objektive Aussage oder Kenntnis. Subjektiv muß feststehen, daß die den beiden Augen unabhängig voneinander dargebotenen (nicht fusionierbaren) Fixationsobjekte angeblickt und damit auf den beiden Netzhautstellen mit dem Richtungswert Geradeaus abgebildet werden. Und objektiv muß bekannt sein, auf welchen Stellen der Netzhäute die zugehörigen Bilder liegen. In Abb. 32 soll als Beispiel einer Möglichkeit zur Korrespondenzprüfung der Nachbildtest nach HERING beschrieben werden [27, S. 96]. Die Austrittsöffnung eines Blitzgerätes ist mit einer zweiteiligen Schlitzblende versehen, in deren Mitte ein Fixationspunkt markiert ist. Bei zugehaltenem rechten Auge des zu prüfenden Augenpaares soll der Fixationspunkt mit dem linken Auge angeblickt werden, wobei die Schlitzblende waagerecht liegt. Dieser waagerechte, in der Mitte unterbrochene Strich wird nun in das linke Auge geblitzt und erzeugt dort ein Nachbild. Dann wird der Blitzvorgang bei zugehaltenem linken Auge wiederholt, während das rechte Auge den Fixationspunkt bei lotrecht stehender Schlitzblende anblickt. Das Nachbild im rechten

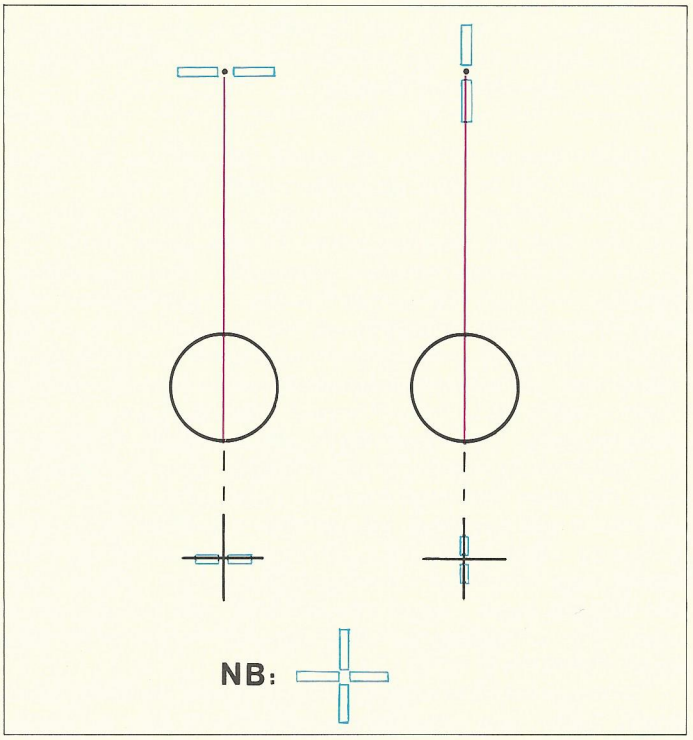


Abb. 32: Nachbildtest nach Hering (NB: binokulare Nachbildwahrnehmung bei bizentraler Korrespondenz; weitere Erläuterung im Text).

Auge vereinigt sich nun mit dem des linken Auges, und die binokulare Wahrnehmung ist (unabhängig von der Blickrichtung!) ein Kreuz, wenn bizentrale Korrespondenz vorliegt und jedes Auge für sich zentral fixiert hatte. Unter der Voraussetzung zentraler Fixation der Einzelaugen zeigt eine Abweichung der Nachbild-Wahrnehmung von einem Kreuz eine Abweichung von der bizentralen Korrespondenz an. Derartige Abweichungen werden später besprochen.

4.2 Horopter

Besitzt ein Augenpaar bizentrale Korrespondenz und befindet es sich in der durch einen binokular dargebotenen Fixationspunkt gegebenen Orthostellung, dann wird dieser Fixationspunkt in den Korrespondenzzentren abgebildet. Außer dem Fixationspunkt werden nun noch andere Objektpunkte auf jeweils korrespondierenden Netzhautstellen abgebildet. Die Gesamtheit aller Objektpunkte, die gleichzeitig auf korrespondierenden Netzhautstellen abgebildet werden können, bildet den sogenannten „Horopter" [2, Lfd. Nr. 16].

Definition 67 Horopter
Geometrischer Ort für alle Objektpunkte, die gleichzeitig auf korrespondierenden Netzhautstellen abgebildet werden können *(Empirischer Horopter)*.

Um deutlich zu machen, daß dieser Horopter nur auf experimentellem Wege ermittelt werden kann, wird er auch als „empirischer" oder „wahrer" Horopter bezeichnet. Seine Form hängt von der Entfernung des Fixationspunktes von den Augen ab.

Da die Augen nebeneinander angeordnet sind, ist der Horizontalschnitt durch den Horopter von besonderer praktischer Bedeutung. Er entsteht als Schnittlinie der Horopterfläche mit derjenigen Ebene, die durch die beiden Fixierlinien (bei Orthostellung) aufgespannt wird. Der Fixationspunkt selbst liegt naturgemäß immer auf dieser Schnittlinie, und die Form der Schnittlinie hängt von der Entfernung des Fixationspunktes von den Augen ab. Nach Davson [90, S. 523] ist die Linie bei einer Entfernung des auf der Medianebene liegenden Fixationspunktes von mehr als 2m konvex (vom Augenpaar aus gesehen), bei geringeren Entfernungen konkav gekrümmt; dazwischen, bei ungefähr 2m Entfernung des Fixationspunktes, handelt es sich um eine frontparallele Gerade. Ähnliche Angaben finden sich bei Schober [19, S. 371]. Eine besonders ausführliche Darstellung von Methoden der Horopterbestimmung findet sich in [91, S. 1574].

Zur möglichst anschaulichen Darstellung der Zusammenarbeit beider Augen sind vereinfachende Annahmen über die Augen gemacht worden. Solche Annahmen führen zu einer geometrisch einfachen Form des Horopters, der deshalb „geometrischer Horopter" genannt wird [2, Lfd. Nr. 16].

Definition 68 Geometrischer Horopter
Durch vereinfachende Annahmen über den Bau der Augen konstruierter Horopter.

Ein häufig verwendetes Funktionsmodell entsteht, wenn die Netzhäute beider Augen so übereinanderliegend gedacht werden, daß sich sowohl die Mitten der Netzhautgruben als auch die vertikalen Netzhautmeridiane decken (dann decken sich auch die horizontalen Netzhautmeridiane; siehe Abschnitt 1.3). Je zwei der dabei übereinanderliegenden Netzhautstellen beider Augen heißen „Deckpunkte" [2, Lfd. Nr. 6].

Definition 69 Deckpunkte
Netzhautstellen gleicher Koordinatenwerte in zwei gleichen Koordinatensystemen, deren Nullpunkte in den Mitten der Netzhautgruben beider Augen liegen.

Von allen Deckpunkten sind nur die Korrespondenzzentren bei bizentraler Korrespondenz exakt korrespondierende Netzhautstellen. Alle übrigen dieser rein geometrisch definierten Deckpunkte besitzen keine funktionelle Bedeutung, können aber trotzdem in erster Näherung als korrespondierende Netzhautstellen betrachtet werden. Dann kann aus dem Modell der Deckpunkte ein geometrischer Horopter konstruiert werden. Der Horizontalschnitt durch diesen geometrischen „Deckpunkt-Horopter" ist bei jeder Entfernung des Fixationspunktes ein Kreis, der als „Vieth-Müllerscher Horopterkreis" bezeichnet wird. Dieser Kreis geht durch den Fixationspunkt und durch die Mitten der Eintrittspupillen beider Augen [19, S. 365]. Häufig findet sich die unzutreffende Aussage, dieser Kreis sei durch die Knotenpunkte beider Augen bestimmt. Der Vieth-Müllersche Horopterkreis ist stärker gekrümmt als der entsprechende Schnitt durch den empirischen Horopter.

4.3 Disparation

Alle Objektpunkte des binokularen Gesichtsfeldes werden gleichzeitig auf den Netzhäuten beider Augen abgebildet, so daß jedem Objektpunkt auf jeder Netzhaut ein Bildpunkt entspricht. Unabhängig von der Lage der Bildpunkte auf den einzelnen Netzhäuten werden diejenigen Stellen beider Netzhäute, auf denen ein und derselbe Objektpunkt abgebildet wird, als „abbildungsgleiche Netzhautstellen" bezeichnet [2, Lfd. Nr. 19].

Definition 70 Abbildungsgleiche Netzhautstellen
Netzhautstellen in beiden Augen, auf denen derselbe Objektpunkt gleichzeitig abgebildet wird.

Alle Objektpunkte auf dem durch einen bizentral abgebildeten Fixationspunkt bestimmten Horopter werden auf korrespondierenden Netzhautstellen abgebildet. Für diese Objektpunkte sind die abbildungsgleichen Netzhautstellen also korrespondierende Netzhautstellen. Alle Objektpunkte aber, die nicht auf dem Horopter liegen, werden auf nicht korrespondierenden Netzhautstellen abgebildet. Grundsätzlich besitzen nicht korrespondierende Netzhautstellen unterschiedliche Richtungswerte, können jedoch unter bestimmten Bedingungen für fusionierbare Bilder vorübergehend gleiche Richtungswerte annehmen. Das daraus resultierende „Panum-Sehen" wird später behandelt. Allgemein werden nicht korrespondierende Netzhautstellen auch „disparate Netzhautstellen" genannt [2, Lfd Nr. 20].

Definition 71 Disparate Netzhautstellen
Netzhautstellen in beiden Augen, die für nicht fusionierbare Bilder unterschiedliche Richtungswerte besitzen.

Abbildungsgleiche Netzhautstellen sind also entweder Stellen mit gleichem Richtungswert (korrespondierende Netzhautstellen; Abbildung von auf dem Horopter liegenden Objektpunkten) oder Stellen mit ungleichem Richtungswert (disparate Netzhautstellen; Abbildung von außerhalb der Horopterfläche befindlichen Objektpunkten). Bei einer Abbildung auf disparaten Netzhautstellen hängt die sensorische Weiterverarbeitung entscheidend davon ab, wie stark sich die Richtungswerte der abbildungsgleichen Netzhautstellen voneinander unterscheiden. Als Maß dafür kann die Entfernung des einen Bildpunktes von derjenigen Stelle dienen, die mit der abbildungsgleichen Netzhautstelle im anderen Auge korrespondiert. Diese Strecke wird als „Disparation" bezeichnet [2, Lfd. Nr 7].

Definition 72 Disparation
Abstand des Bildpunktes in einem Auge von derjenigen Netzhautstelle dieses Auges, die mit der abbildungsgleichen Netzhautstelle im anderen Auge korrespondiert.

Mit Hilfe der Abb. 33 soll die Disparation erläutert werden. In den Korrespondenzzentren 1,1 kreuzen sich der horizontale und der vertikale Netzhautmeridian jedes Auges, und die Andreaskreuze markieren zwei abbildungsgleiche, disparate Netzhautstellen. In Abb. 33a ist nun zum Bildort 2 des linken Auges die im rechten Auge korrespondierende Netzhautstelle 2 eingezeichnet worden. Der Abstand d von dieser Netzhautstelle bis zum Bildort ist die Disparation. In Abb. 33b ist zum Bildort 3 des rechten Auges die im linken Auge korrespondierende Netzhautstelle 3 eingezeichnet, und wieder ist der Abstand d zum Bildort die Disparation. Der Abstand d ist in den Abb. 33a und 33b gleich groß und befindet sich im gleichen Quadranten der Netzhaut des rechten bzw. des linken Auges. Daher ist es gleichgültig, in welchem der beiden Augen die Disparation bestimmt wird.

In Abb. 33 ist absichtlich eine schräg zur Richtung der Netzhautmeridiane liegende Disparation eingezeichnet worden. Wichtig ist die vektorielle Zerlegung einer solchen Disparation in zwei parallel zu den Netzhautmeridianen liegende Komponenten. Abb. 34 zeigt eine derartige Zerlegung. Die beiden Komponenten heißen „Querdisparation" und „Vertikaldisparation" [2, Lfd. Nr. 7].

Definition 73 Querdisparation
Disparation in Richtung des horizontalen Netzhautmeridians.

Definition 74 Vertikaldisparation
Disparation in Richtung des vertikalen Netzhautmeridians.

Jede Disparation ist eine vom korrespondierenden Netzhautort zum betreffenden Bildort hin gerichtete Strecke. Von praktischer Bedeutung ist jedoch nur die Richtung der *Quer*disparation, wobei es aber nicht auf die räumliche Richtung nach rechts oder nach links ankommt, sondern auf die relative Richtung nach nasal oder nach temporal. Nur deshalb ist es tatsächlich gleichgültig, in welchem Auge die Disparation bestimmt wird. Abb. 35 zeigt eine „temporale Querdisparation" (wie sie auch in Abb. 33 enthalten ist), und Abb. 36 zeigt eine „nasale Querdisparation".

Merke: Objekte vor dem Horopter werden temporal querdisparat abgebildet, Objekte hinter dem Horopter nasal querdisparat. Diese Tatsache wird in Abb. 37 dargestellt.

4.4 Diplopie

Unter bestimmten Bedingungen kann ein Objekt gleichzeitig in zwei verschiedenen Richtungen gesehen werden. Diese Wahrnehmung von Doppelbildern wird als „Diplopie" oder auch als „Doppeltsehen" bezeichnet [2, Lfd. Nr. 10].

Definition 75 Diplopie
Doppelte Wahrnehmung eines Sehobjektes *(Doppeltsehen).*

Ein Doppeltsehen kann auf verschiedene Weise zustande kommen, und nach [2, Lfd. Nr. 10] wird zwischen *monokularen* und *binokularen* Doppelbildern unterschieden.

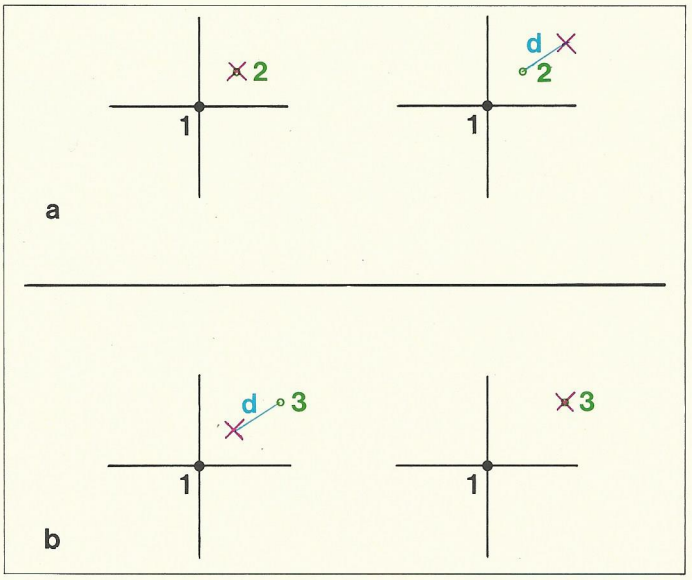


Abb. 33: Zur Erläuterung der Disparation d (1,1: Korrespondenzzentren; 2,2 und 3,3: korrespondierende Netzhautstellen; X,X: abbildungsgleiche, disparate Netzhautstellen).

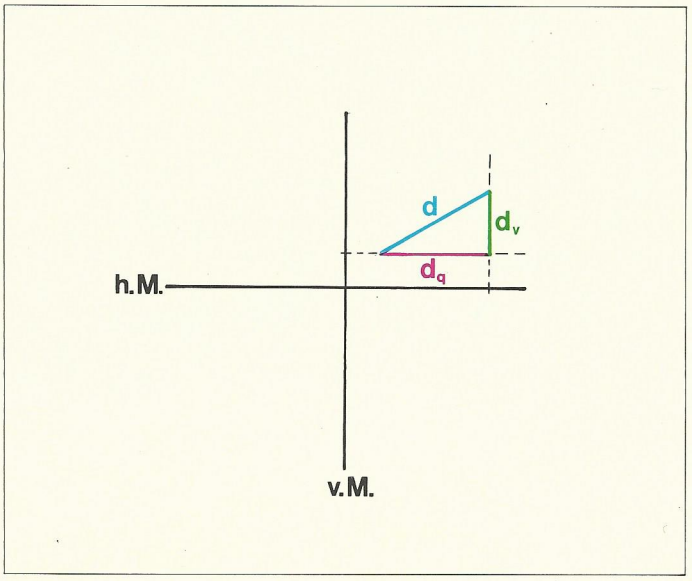


Abb. 34: Die Komponenten einer Disparation d (h. M. und v. M.: horizontaler und vertikaler Netzhautmeridian; d_q: Querdisparation; d_v: Vertikaldisparation).

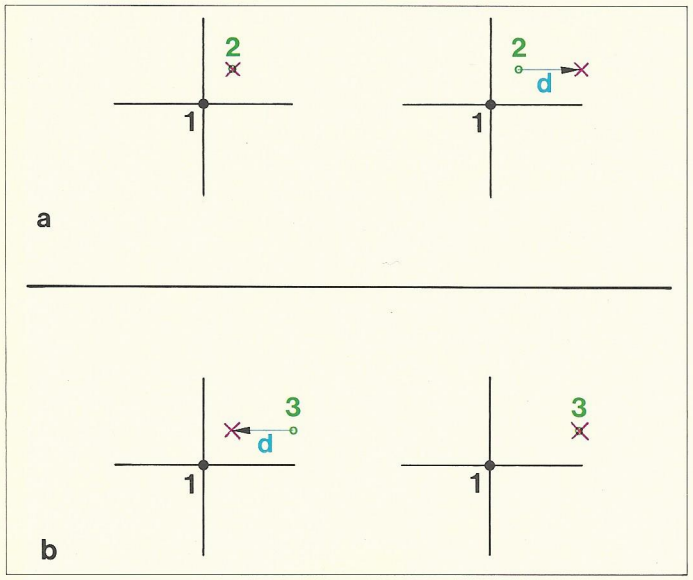


Abb. 35: Temporale Querdisparation d (1,1: Korrespondenzzentren; 2,2 und 3,3: korrespondierende Netzhautstellen; X,X: abbildungsgleiche, disparate Netzhautstellen).

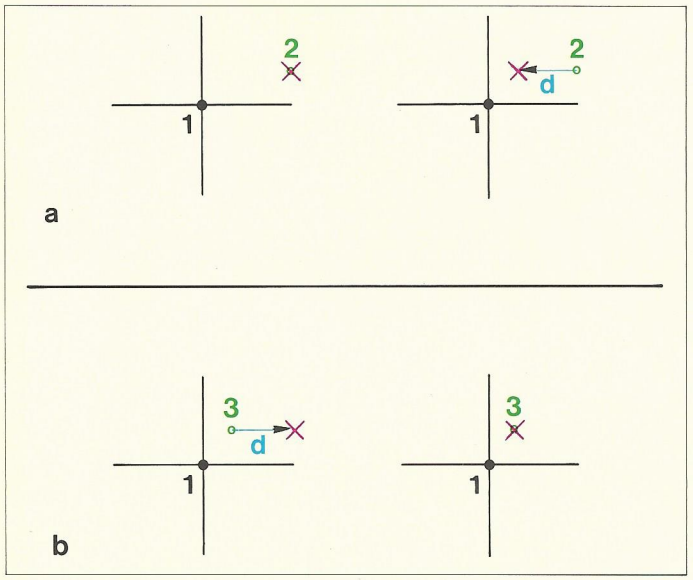


Abb. 36: Nasale Querdisparation d (1,1: Korrespondenzzentren; 2,2 und 3,3: korrespondierende Netzhautstellen; X,X: abbildungsgleiche, disparate Netzhautstellen).

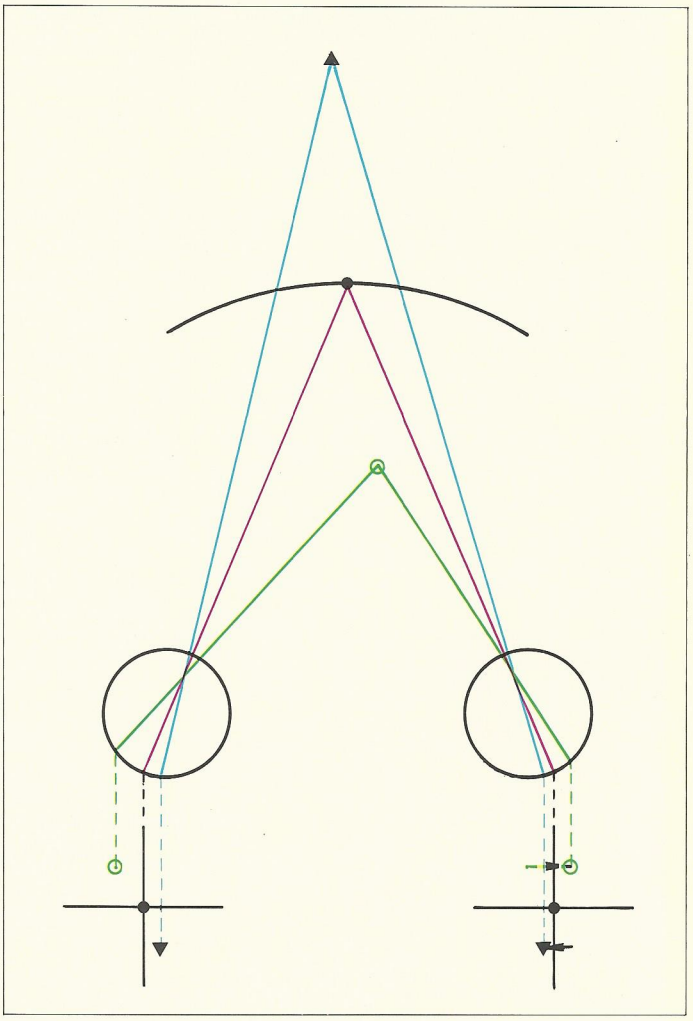


Abb. 37: Temporal querdisparate Abbildung des vor dem Horopter H befindlichen Kreises und nasal querdisparate Abbildung des hinter dem Horopter H befindlichen Dreiecks.

Monokulare Doppelbilder können verursacht sein entweder durch fehlerhafte Abbildung auf der Netzhaut (zum Beispiel wenn während einer Refraktionsbestimmung der Korrektionszylinder noch nicht richtig ermittelt ist oder gelegentlich bei nicht homogenen Medientrübungen) oder durch das gleichzeitige Vorhandensein zweier Richtungswerte für eine Netzhautstelle.

Binokulare Doppelbilder entstehen durch Abbildung eines Objektes auf disparaten Netzhautstellen. Im normalen natürlichen Binokularsehen werden binokulare Doppelbilder durch sensorische Vorgänge verhindert, die im nächsten Abschnitt beschrieben werden. In einer Versuchssituation kann jedoch durch bewußte Aufmerksamkeit ein Doppeltsehen zustande kommen: „Physiologische Diplopie" [26, S. 86]. Der bekannteste Versuch dazu ist wohl der sogenannte Bleistiftversuch, der in den Abb. 38 und 39 schematisch dargestellt ist. Zwei Bleistifte befinden sich in ausreichender Entfernung voneinander in der Medianebene eines Augenpaares. Wird der hintere Bleistift angeblickt, so legt er bei bizentraler Fixation den Horopter fest, und der vordere Stift wird mit temporaler Querdisparation abgebildet (Abb. 38). Ist der Abstand zwischen den Stiften groß genug, so wird der temporal querdisparat abgebildete vordere Stift in physiologischer Diplopie wahrgenommen. Dabei liefert das rechte Auge das linke der entstandenen Doppelbilder und umgekehrt, was als „heteronyme Diplopie" bezeichnet wird [26, S. 86].

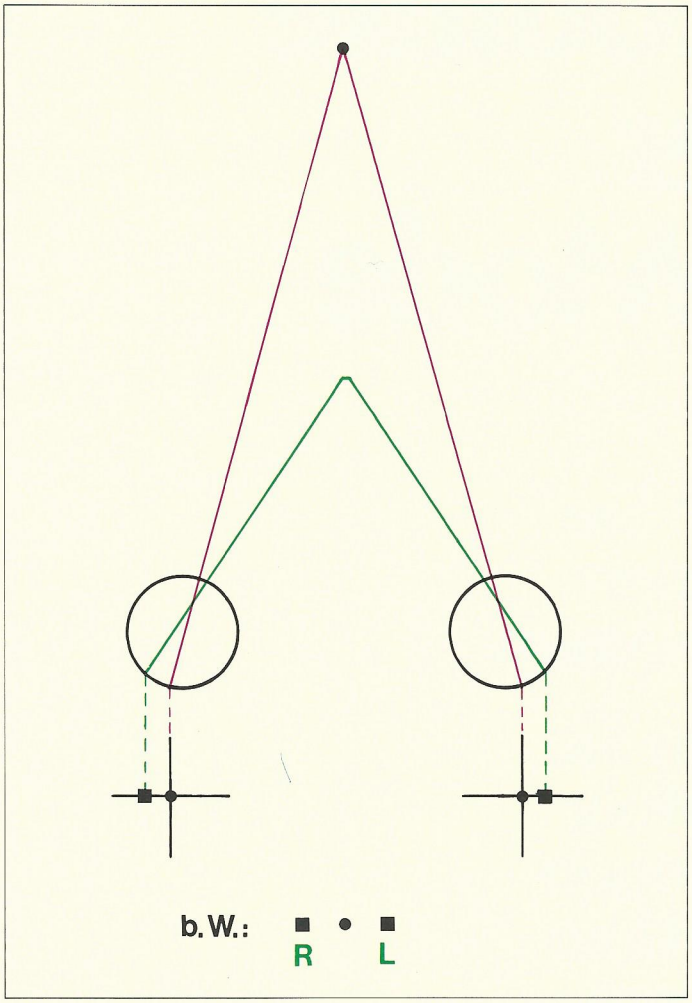


Abb. 38: Heteronyme Diplopie (b.W.: binokulare Wahrnehmung).

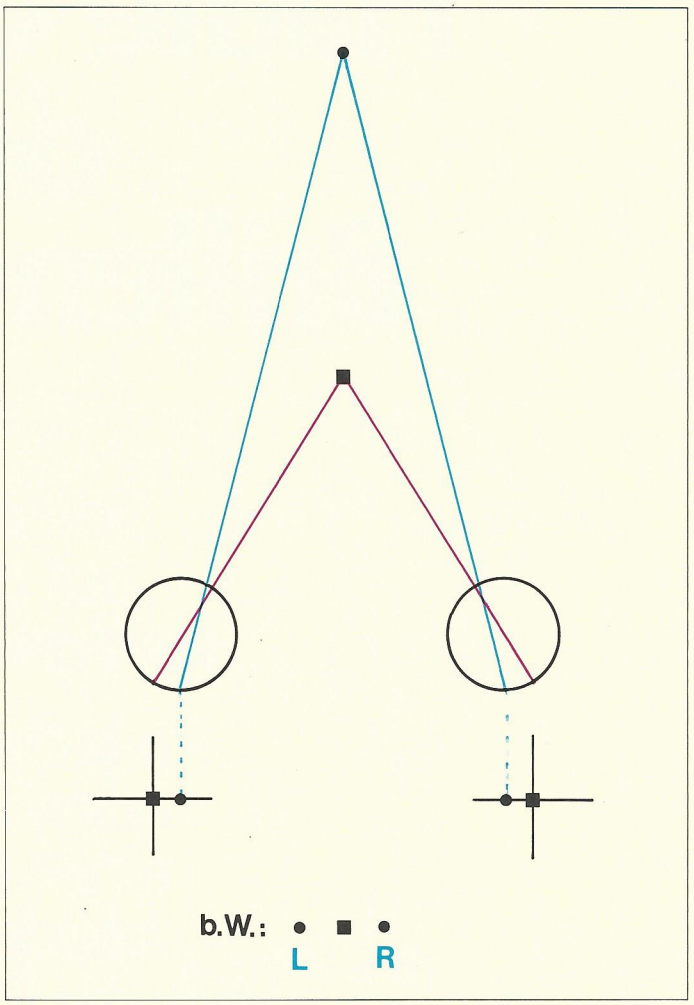


Abb. 39: Homonyme Diplopie (b.W.: binokulare Wahrnehmung).

Definition 76 Heteronyme Diplopie
Wahrnehmung von gekreuzten Doppelbildern: Aufgrund temporaler Querdisparation wird der links liegende Seheindruck vom rechten Auge vermittelt, der rechts liegende vom linken.

Wird dagegen der vordere Stift angeblickt (Abb. 39), so liefert die nasale Querdisparation für die Abbildung des hinteren Stiftes eine physiologische Wahrnehmung von Doppelbildern, von denen das linke zum linken Auge gehört und umgekehrt. Ein solches Doppeltsehen heißt „homonyme Diplopie" [26, S. 86].

Definition 77 Homonyme Diplopie
Wahrnehmung von ungekreuzten Doppelbildern: Aufgrund nasaler Querdisparation wird der links liegende Seheindruck vom linken Auge vermittelt, der rechts liegende vom rechten.

Literaturhinweise:

[2] DIN 58 208: „Begriffe und Zeichen bei Brillengläsern in Verbindung mit dem menschlichen Auge" Teil 5 „Binokulares System Auge — Brille" (Entwurf August 1978).
[9] Wilhelm TRENDELENBURG: „Der Gesichtssinn" Springer-Verlag, Berlin (2. Auflage 1961).
[19] HERBERT SCHOBER: „Das Sehen" Band II VEB Fachbuchverlag Leipzig (3. Auflage 1964).
[26] G. MACKENSEN: „Untersuchung der Motilität und der Binokularfunktion" in Wolfgang Straub (Herausgeb.) „Die ophthalmologischen Untersuchungsmethoden" Band II Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart (1976).
[27] GUNTER K. VON NOORDEN und A. EDWARD MAUMENEE: „Atlas der Schieldiagnostik" F.K. Schattauer Verlag, Stuttgart — New York (2. Auflage 1979).
[36] BURIAN — VON NOORDEN'S: Binocular vision and ocular motility" The C.V. Mosby Company St. Louis (Second Edition, 1980).
[72] ROBERT A. MOSES (Herausgeb.): „ADLER'S Physiology of the eye". The C.V. Mosby Company Saint Louis (Sixth Edition, 1975).
[86] R. SACHSENWEGER: „Klinische und pathologische Aspekte des menschlichen Augenbewegungssystems" in Hans Drischel und Wolfgang Kirmse (Herausgeb.) „Das okulomotorische System, physiologische und klinische Aspekte" VEB Georg Thieme Leipzig (1979) 44—60.
[87] H. VON HELMHOLTZ: „Handbuch der Physiologischen Optik", Verlag von Leopold Voss, Hamburg und Leipzig, 2. Auflage (1896).
[88] ARMIN VON TSCHERMAK — SEYSENEGG: „Einführung in die physiologische Optik", Springer-Verlag Wien, 2. Auflage (1947).
[89] PAUL BOEDER und RONALD M. BURDE: „Die Verschiebung der Sehrichtungsantwort", Augenärztliche Fortbildung, Band 6, Teil 1 (1980) 37—58.
[90] HUGH DAVSON: „Physiology of the Eye", Verlag Churchill Livingstone, Edinburgh, London and New York, Fourth Edition (1980).
[91] ARMIN TSCHERMAK — SEYSENEGG: „Methodik des optischen Raumsinnes und der Augenbewegungen" in Emil Abderhalden (Herausgeb.). „Handbuch der biologischen Arbeitsmethoden" Abt. V, Teil 6, Verlag Urban & Schwarzenberg, Berlin, Wien (1937) 1427—1782.

SERIE

Dr. Helmut Goersch, Berlin

Einführung in das Binokularsehen

Teil VIII (Fortsetzung aus Heft 5/1984)

Die Serie „Einführung in das Binokularsehen" wurde nach dem Teil VII unterbrochen, um die Festlegung einiger Begriffe zur Sensorik des Binokularsehens (insbesondere zur Stereopsis und Fixationsdisparation) durch den DIN-Arbeitsausschuß „Begriffe der physiologischen Optik" (Leitung: Frau Prof.E.Aulhorn, Tübingen) abzuwarten. Diese Festlegungen sind inzwischen erfolgt, die DIN 5340 *„Begriffe der physiologischen Optik"* ‹3› ist im Oktober 1986 erschienen, und die Serie soll nun mit drei weiteren Teilen zu Ende geführt werden.

4.5 Fusionsreize

Im Abschnitt 2.5 finden sich bereits die Erklärungen für die Begriffe *Fusion* (Definition 10), *motorische Fusion* (Definition 11) und *sensorische Fusion* (Definition 12). Hier soll nun auf weitere Begriffe zur Fusion und ihre Bedeutung für das sensomotorische Zusammenspiel der Augen eingegangen werden. Da bei dieser Erörterung die häufig mit den Begriffen Konvergenzstellung und Divergenzstellung verwechselten Begriffe *Esostellung* und *Exostellung* verwendet werden, sollen diese Begriffe zuerst beschrieben und mit den Begriffen Konvergenzstellung, Divergenzstellung und Parallelstellung für alle vorkommenden Fälle verglichen werden.

Die in Tabelle 7 (Abschnitt 2.2) erklärten Begriffe Konvergenzstellung und Divergenzstellung haben die Parallelstellung der Fixierlinien als Bezugsgröße, sie geben also eine absolute Horizontal-Vergenzstellung an (das heißt nach innen oder außen gerichtete Fixierlinien). Davon begrifflich zu unterscheiden sind die horizontalen Vergenzstellungen *Esostellung* und *Exostellung*, die sich als relative Horizontal-Vergenzstellungen auf die jeweilige Orthostellung (Definition 5) beziehen. Weichen die Augen von der Orthostellung nach innen ab, so nehmen sie eine „Esostellung" ein.

Definition 78 **Esostellung**
Vergenzstellung, bei der sich die Fixierlinien beider Augen vor dem dargebotenen Fixationspunkt schneiden.

Bei einer Esostellung liegt der Bildort des Fixationspunktes im abweichenden Auge immer nasal vom vertikalen Netzhautmeridian. Im freien Sehen ist eine Esostellung bei jeder Entfernung des Fixationspunktes eine Konvergenzstellung (Abb. 40). Auch wenn in den Durchblickpunkten einer Brille eine binokular-prismatische Wirkung mit Basis außen herrscht (was für jede Entfernung des Fixationspunktes zu einer konvergenten Orthostellung cc führt), ist eine Esostellung der Augen immer eine Konvergenzstellung. Wenn aber in den Durchblickpunkten einer Brille eine binokular-prismatische Wirkung mit Basis innen herrscht, gibt es mehrere Möglichkeiten:

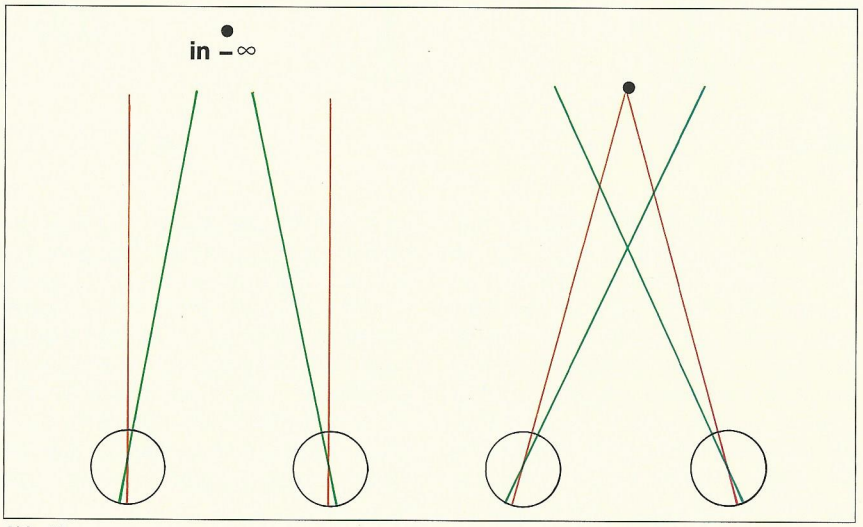


Abb. 40

Für einen (unendlich) fernen Fixationspunkt ergibt sich eine divergente Orthostellung cc, und dann kann eine Esostellung außer einer Konvergenzstellung auch eine (im Vergleich zur Orthostellung geringere) Divergenzstellung oder die Parallelstellung sein (Abb. 41). Für einen nahen Fixationspunkt kommt es darauf an, wie groß der nach Formel 1 (Abschnitt 2.4) zu bestimmende freie Konvergenzbedarf im Vergleich zum Betrag der binokular-prismatischen Wirkung ist. Wenn der freie Konvergenzbedarf kleiner ist als der Betrag der Basis-innen-Wirkung, dann ergibt sich eine divergente Orthostellung cc mit den oben aufgeführten Möglichkeiten für eine Esostellung. Ist jedoch der freie Konvergenzbedarf entweder gleich der Prismenwirkung (Orthostellung cc ist dabei die Parallelstellung), oder größer als der Betrag der Basis-innen-Wirkung (Orthostellung cc ist dabei eine Konvergenzstellung), dann ist eine Esostellung der Augen immer eine Konvergenzstellung.
Weichen die Augen von der Orthostellung nach außen ab, so nehmen sie eine „Exostellung" ein.

Definition 79 **Exostellung**
Vergenzstellung, bei der sich die Fixierlinien beider Augen hinter dem dargebotenen Fixationspunkt schneiden.

Bei der Exostellung liegt der Bildort des Fixationspunktes im abweichenden Auge immer temporal vom vertikalen Netzhautmeridian. Im freien Sehen ist eine Exostellung nur bei (unendlich) fernem Fixationspunkt immer eine Divergenzstellung, bei nahem Fixationspunkt kann eine Exostellung außer einer Divergenzstellung auch eine (im Vergleich zur Orthostellung

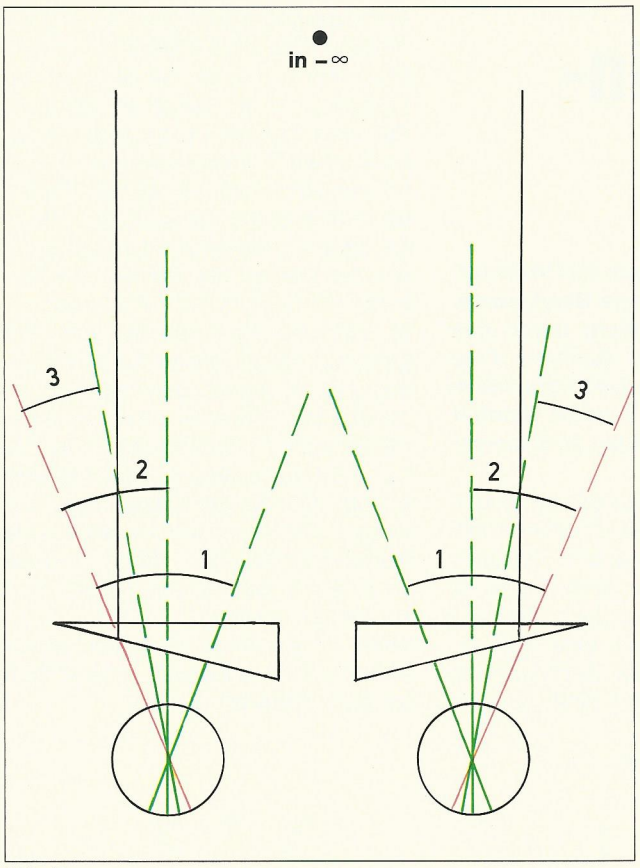


Abb. 41

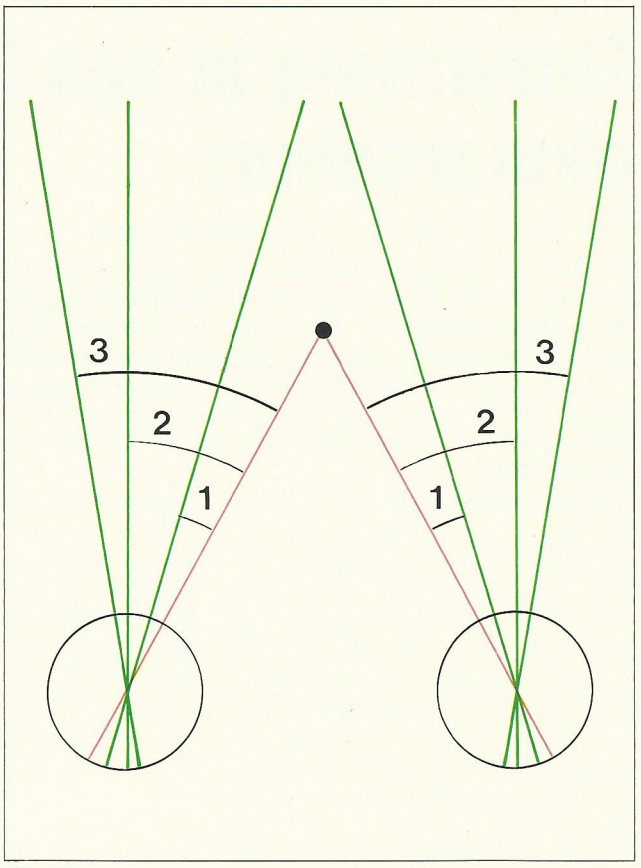


Abb. 42

geringere) Konvergenzstellung oder die Parallelstellung sein (Abb. 42). Eine in den Durchblickpunkten einer Brille vorhandene binokular-prismatische Wirkung mit Basis außen führt bei jeder Entfernung des Fixationspunktes zu einer konvergenten Orthostellung cc und damit zu den gleichen Möglichkeiten für eine Exostellung der Augen wie bei nahem Fixationspunkt im freien Sehen. Wenn aber in den Durchblickpunkten einer Brille eine binokular-prismatische Wirkung mit Basis innen herrscht, gibt es wieder mehrere Möglichkeiten:
Führt die Basis-innen-Wirkung entweder zu einer divergenten Orthostellung cc (was bei fernem Fixationspunkt immer zutrifft, aber bei nahem Fixationspunkt nur dann, wenn die binokular-prismatische Basis-innen-Wirkung dem Betrag nach größer ist als der freie Konvergenzbedarf) oder zur parallelen Orthostellung cc (was nur bei nahem Fixationspunkt möglich ist, wenn nämlich der Betrag der Basis-innen-Wirkung gleich dem freien Konvergenzbedarf ist), dann ist eine Exostellung der Augen immer eine Divergenzstellung. Ergibt bei nahem Fixationspunkt die Basis-innen-Wirkung dagegen eine konvergente Orthostellung cc (was zutrifft, wenn die Basis-innen-Wirkung dem Betrag nach kleiner ist als der freie Konvergenzbedarf), dann sind wieder die gleichen Möglichkeiten für eine Exostellung der Augen vorhanden wie bei nahem Fixationspunkt im freien Sehen.

Die einzelnen Möglichkeiten für Eso- und Exostellungen hängen also immer davon ab, ob die Orthostellung eine Konvergenzstellung, eine Divergenzstellung oder die Parallelstellung ist; in Tabelle 13 sind alle Möglichkeiten noch einmal zusammengefaßt.
Den beiden Augen eines Augenpaares möge nun ein binokular sichtbarer Fixationspunkt dargeboten werden. Dieses „Objekt des Interesses"

Möglichkeiten für die Art der Orthostellung	Esostellung	Exostellung
Konvergenzstellung	Konvergenzstellung	Konvergenzstellung Parallelstellung Divergenzstellung
Parallelstellung	Konvergenzstellung	Divergenzstellung
Divergenzstellung	Konvergenzstellung Parallelstellung Divergenzstellung	Divergenzstellung

Tabelle 13: Übersicht über die möglichen Eso- und Exostellungen in Abhängigkeit von der Art der Orthostellung

(engl.: object of regard, ‹36, S.4›) übt einen starken Fusionsreiz aus, der die Augen im Idealfall durch motorische Fusion in die Orthostellung bringt. Der Fixationspunkt wird dadurch in den Zentren der beiden Foveolae abgebildet. Bei diesem „Sehen mit bizentraler Fixation" ist der Horopter (Definition 67) durch den Fixationspunkt bestimmt. Alle Objektpunkte auf dem Horopter werden gleichzeitig mit dem Fixationspunkt auf jeweils korrespondierende Netzhautstellen beider Augen abgebildet und liefern einen gleichgearteten Fusionsreiz. Ein solcher Fusionsreiz, der die Augen in die Orthostellung zu ziehen versucht (und sie im Idealfall in der Orthostellung festhält), wird als „orthopetaler" Fusionsreiz bezeichnet ‹92›.

Definition 80 **Orthopetaler Fusionsreiz**
Vom Objekt des Interesses und allen anderen auf dem durch dieses Objekt bestimmten Horopter ausgehender Fusionsreiz zur Einnahme und Aufrechterhaltung der Orthostellung.

Genau genommen geht von Bildern auf korrespondierenden Netzhautstellen gar kein Fusionsreiz im Sinne eines Anreizes zu einer Vergenz (motorische Fusion, Definition 11) aus, denn ein solcher Fusionsreiz kommt immer dadurch zustande, daß sich die Richtungswerte der abbildungsgleichen Netzhautstellen (Definition 70) voneinander unterscheiden. Ziel eines jeden Fusionsreizes (im Sinne einer motorischen Fusion) ist es nämlich, die Disparation der Netzhautbilder des Objektes, welche diesen Fusionsreiz auslösen, zu beseitigen. Jeder Anreiz zur motorischen Fusion hört deshalb in demjenigen Moment auf, in dem die auslösenden Netzhautbilder auf korrespondierenden Netzhautstellen angelangt sind. Orthopetale Fusionsreize zur Aufrechterhaltung einer einmal erreichten Orthostellung sind also im Grunde bedingt durch die kleinen unregelmäßigen (das heißt in Richtung und Größe wechselnden) Disparationen, mit denen der Fixationspunkt und die anderen auf dem Horopter befindlichen Objektpunkte infolge des physiologischen Mikro-Nystagmus abgebildet werden.
Befindet sich ein Augenpaar in der Orthostellung, so liefern Objekte vor und hinter dem Horopter disparate Netzhautbilder (siehe Abb. 37). Da disparate fusionierbare Netzhautbilder immer auch einen motorischen Fusionsreiz ausüben, gehen von allen nicht auf dem Horopter liegenden Objektpunkten Fusionsreize aus, welche die Augen aus der Orthostellung wegzuziehen versuchen. Solche Fusionsreize werden deshalb „orthofugale" Fusionsreize genannt.

Definition 81 **Orthofugaler Fusionsreiz**
Fusionsreiz, der das Augenpaar aus der Orthostellung wegzuziehen versucht.

Orthofugale Fusionsreize wirken unterschiedlich, je nachdem ob sie von Objekten vor oder hinter dem Horopter ausgehen. Da Objekte vor dem Horopter temporal querdisparate Netzhautbilder liefern, versucht der dadurch bedingte Fusionsreiz das Augenpaar in eine Esostellung (Definiton 78) zu bringen. Diese Art eines orthofugalen Fusionsreizes heißt deshalb „esopetaler" Fusionsreiz.

Definition 82 **Esopetaler Fusionsreiz**
Orthofugaler Fusionsreiz, der die Augen in eine Esostellung zu ziehen versucht.

Objekte hinter dem Horopter liefern dagegen durch ihre nasal querdisparaten Netzhautbilder orthofugale Fusionsreize, die das Augenpaar in eine Exostellung (Definition 79) zu bringen suchen. Ein solcher Fusionsreiz wird daher „exopetal" genannt ‹92›.

Definition 83 **Exopetaler Fusionsreiz**
Orthofugaler Fusionsreiz, der die Augen in eine Exostellung zu ziehen versucht.

Im natürlichen Sehen ergeben sich durch die ständig vorhandenen esopetalen und exopetalen Fusionsreize aber (zumindest für orthophorische Augen) keinerlei Probleme, denn die Aufmerksamkeit gilt dem „Objekt des Interesses", und die Wirksamkeit der orthopetalen Fusionsreize überwiegt. Sind dagegen in einer Binokular-Prüfeinrichtung orthofugale Fusionsreize vorhanden, so muß durch diese (ungewollten) Fusionsreize mit falschen Meßergebnissen gerechnet werden ‹39, S.27›. Solche Verfälschungen sind insbesondere dann zu befürchten, wenn orthofugale Fusionsreize in vertikaler Richtung wirken (wie das zum Beispiel beim Gleichgewichtsverfahren nach v. Graefe der Fall ist).
Abweichungen von der Orthostellung in vertikaler Richtung sollen in „Hyperstellung" und „Hypostellung" unterschieden werden, wobei sich diese Benennungen auf das rechte Auge beziehen.

Definition 84 **Hyperstellung**
Vergenzstellung, bei der die Fixierlinie des rechten Auges nach oben bzw. diejenige des linken nach unten von der Orthostellung abweicht.

Definition 85 **Hypostellung**
Vergenzstellung, bei der die Fixierlinie des rechten Auges nach unten bzw. diejenige des linken nach oben von der Orthostellung abweicht.

Dementsprechend sind vertikal wirkende orthofugale Fusionsreize in „hyperpetal" und „hypopetal" zu unterteilen.

Definition 86 **Hyperpetaler Fusionsreiz**
Orthofugaler Fusionsreiz, der die Augen in eine Hyperstellung zu ziehen versucht.

Definition 87 **Hypopetaler Fusionsreiz**
Orthofugaler Fusionsreiz, der die Augen in eine Hypostellung zu ziehen versucht.

Die orthopetalen und orthofugalen Fusionsreize sind in Abb. 43 noch einmal zusammengestellt.
Da sich alle diesbezüglichen Erörterungen auf ein kopffestes Koordinatensystem beziehen (siehe Abschnitt 2.2), kann es im natürlichen Sehen nur für in normaler Kopfhaltung ungleich hoch liegende Augen vertikal wirkende Fusionsreize geben. Die Orthostellung selbst enthält in diesem Fall für nahe Objekte eine vertikale Komponente, und zwar eine positive Vertikalvergenzstellung (siehe Tabelle 7), wenn das rechte Auge tiefer liegt als das linke, und eine negative Verti-

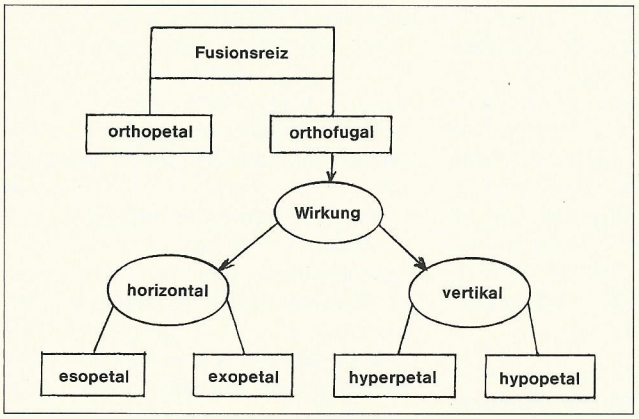


Abb. 43

kalvergenzstellung, wenn das rechte Auge höher liegt. (Dabei müßte sinnvollerweise in Tabelle 7 bei der Erklärung für die Vertikalvergenzstellungen das Wort „steht" durch die Wörter „gerichtet ist" ersetzt werden.) Liegt das rechte Auge höher als das linke, dann üben Objekte hinter dem Horopter hyperpetale Fusionsreize aus und Objekte vor dem Horopter hypopetale. Wenn das rechte Auge tiefer liegt als das linke, ist es umgekehrt. Für die Relation zwischen Hyperstellung und Hypostellung einerseits sowie positiver und negativer Vertikalvergenzstellung andererseits gilt das für die Möglichkeiten der Eso- und Exostellung dargestellte in entsprechender Weise, was in Tabelle 14 zusammengestellt ist.

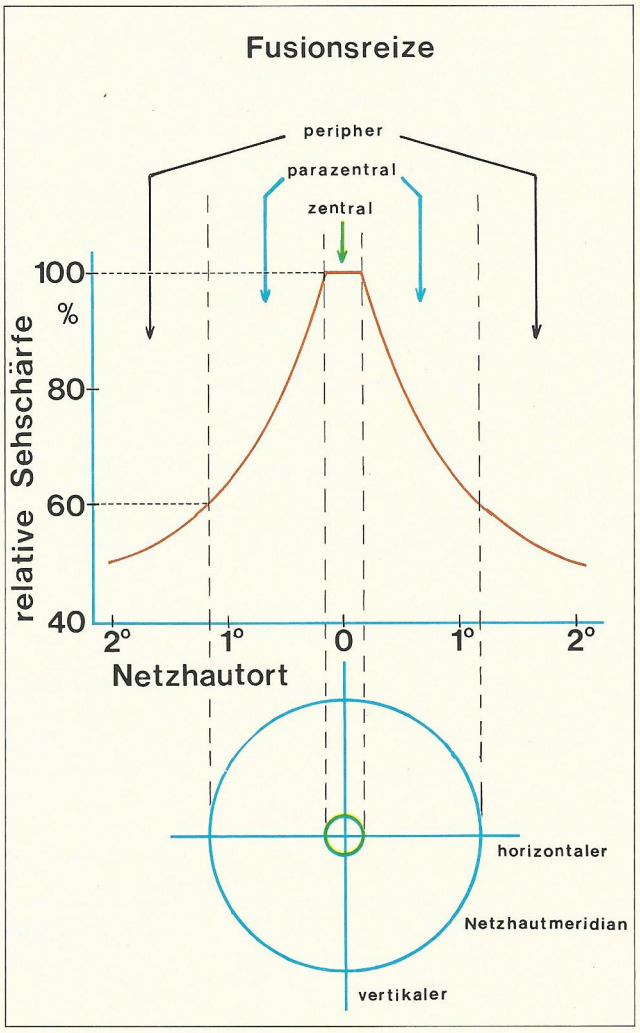


Abb. 44

Möglichkeiten für die Art der Orthostellung	Hyperstellung	Hypostellung
Positive Vertikalvergenzstellung	**Positive Vertikalvergenzstellung**	**Positive Vertikalvergenzstellung Parallelstellung Negative Vertikalvergenzstellung**
Parallelstellung	**Positive Vertikalvergenzstellung**	**Negative Vertikalvergenzstellung**
Negative Vertikalvergenzstellung	**Positive Vertikalvergenzstellung Parallelstellung Negative Vertikalvergenzstellung**	**Negative Vertikalvergenzstellung**

Tabelle 14: Übersicht über die möglichen Hyper- und Hypostellungen in Abhängigkeit von der Art der Orthostellung

Befinden sich die Augen (genau genommen die optischen Augendrehpunkte beider Augen) bei normaler Kopfhaltung in gleicher Höhe, dann gibt es im natürlichen Sehen keine vertikal wirkenden Fusionsreize. Folgen gleich hoch liegende Augen einem in einem binokularen Trenner-Verfahren vorhandenen hyperpetalen Fusionsreiz, so ergibt sich eine positive Vertikalvergenzstellung, bei hypopetalem Fusionsreiz eine negative Vertikalvergenzstellung.

Weiterhin ist es zweckmäßig, eine Einteilung der Fusionsreize bezüglich des Netzhautortes für die auslösenden Netzhautbilder zu treffen. Hierzu wird zwischen zentralen, parazentralen und peripheren Fusionsreizen unterschieden. „Zentrale" Fusionsreize ergeben sich durch Netzhautbilder in dem kleinen Gebiet des schärfsten Sehens, also in einem Bereich um die

Netzhautgrubenmitte herum mit einem Durchmesser von ungefähr 20 Winkelminuten (Knotenpunktwinkel).

Definition 88 **Zentraler Fusionsreiz**
Fusionsreiz, der durch Netzhautbilder im Gebiet des schärfsten Sehens verursacht wird.

„Parazentrale" Fusionsreize werden durch Netzhautbilder geliefert, die außerhalb des Gebietes des schärfsten Sehens, aber noch innerhalb des von Stäbchen freien Netzhautbereiches liegen. Das ist ein kreisringförmiger Bereich mit einem Winkeldurchmesser zwischen etwa 20 Minuten und 2 Grad ‹90, S.176›.

Definition 89 **Parazentraler Fusionsreiz**
Fusionsreiz, der durch Netzhautbilder verursacht wird, die zwischen dem Gebiet des schärfsten Sehens und dem Stäbchen enthaltenden äußeren Netzhautbereich liegen.

„Periphere" Fusionsreize kommen durch Netzhautbilder zustande, die in dem Stäbchen enthaltendem Gebiet liegen.

Definition 90 **Peripherer Fusionsreiz**
Fusionsreiz, der durch Netzhautbilder außerhalb des von Stäbchen freien Netzhautbereiches verursacht wird.

Abb. 44 zeigt die ungefähre Lage der einzelnen Fusionsreizbereiche. Während zentrale Fusionsreize von Netzhautbildern im Gebiet des schärfsten Sehens (V_{max}) ausgehen, reicht der zu parazentralen Fusionsreizen gehörige Bereich bis zu einer relativen Sehschärfe von ungefähr 60% (von V_{max}), woran sich das Gebiet für periphere Fusionsreize anschließt. Ein Vergleich mit den anatomisch definierten Netzhautbereichen (siehe Abb. 3) zeigt, daß die zu peripheren Fusionsreizen führenden Netzhautbilder durchaus noch innerhalb der Fovea centralis liegen können.

4.6 Panumsehen

Da die auf dem *Horopter* (Definition 67) liegenden Objektpunkte beim Sehen mit bizentraler Fixation auf *korrespondierenden Netzhautstellen* (Definition 64) abgebildet werden, können die jeweiligen beiden Bilder normalerweise sozusagen automatisch sensorisch fusioniert werden. Alle nicht auf dem Horopter befindlichen Objektpunkte werden jedoch auf *disparaten Netzhautstellen* (Definition 71) abgebildet und müßten wegen der unterschiedlichen Richtungswerte dieser Netzhautstellen eigentlich doppelt gesehen werden. Im normalen Binokularsehen tritt eine *Diplopie* (Definition 75) dieser Objekte aber nicht auf, da zwei verschiedene sensorische Mechanismen für binokulares Einfachsehen sorgen. Je nach der Größe der vorhandenen *Disparation* (Definition 72) tritt entweder der Mechanismus „Panumsehen" oder derjenige der „Bahnung und Hemmung" in Tätigkeit.

Ist die Disparation nicht zu groß, so einigen sich die jeweils abbildungsgleichen (aber disparaten) Netzhautstellen auf eine gemeinsame Richtungsempfindung, wenn und solange sich auf ihnen fusionierbare (das heißt hinreichend gleiche) Bilder befinden.

Dieser Mechanismus der sensorischen Fusion disparater Netzhautbilder („das fakultativ-temporäre Zusammenarbeiten von disparaten Netzhautstellen") wird als „Panumsehen" bezeichnet ‹88, S.103›, da dieses Verhalten der Augen erstmals von dem dänischen Physiologen Peter Ludvig Panum erkannt und beschrieben wurde ‹93›.

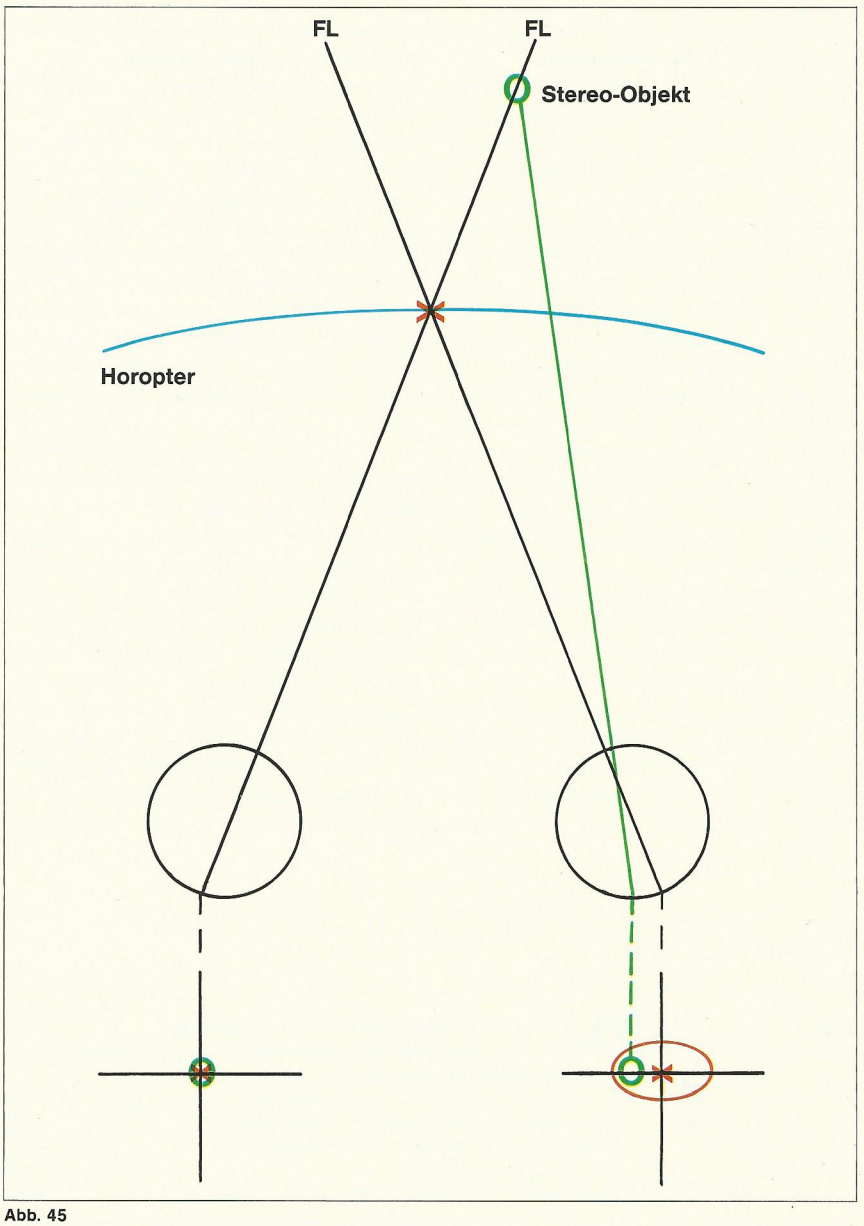


Abb. 45

Definition 91 **Panumsehen**
Binokulares Einfachsehen durch sensorische Fusion disparat liegender Netzhautbilder.

„Das Panumsehen beruht also nicht auf einem gewissen Schwanken der Korrespondenz selbst, sondern auf einer gewissen Flexibilität des Zusammenwirkens, einer fakultativen Sehrichtungsgemeinschaft zwischen der einen Stelle hüben und einer innerhalb gewisser Grenzen wechselnden Stelle drüben ..." ‹88, S.104›. Durch die maximale Disparation, bis zu der das Panumsehen funktioniert, ist die Grenze für den jeweiligen sogenannten *Panumbereich* ‹3, Ltd. Nr. 281› bestimmt.

Definition 92 **Panumbereich**
Umgebung der zum Bildort im anderen Auge korrespondierenden Netzhautstelle, in welcher es trotz disparater Bildlage zu sensorischer Fusion kommt.

Jede Netzhautstelle ist von einem solchen Panumbereich umgeben, dessen Form einer liegenden Ellipse ähnelt, bei welcher der horizontale Durchmesser etwa doppelt so groß ist wie der vertikale ‹90, S.528›. Früher wurden die Panumbereiche als kreisförmig angesehen ‹88; 93›. Der zur Netzhautgrubenmitte eines Auges gehörige Panumbereich heißt zentraler Panumbereich und tritt für alle Objektpunkte in Funktion, die vor oder hinter dem Horopter auf der Fixierlinie des anderen Auges liegen und durch Panumsehen einfach erscheinen. Das ist in Abb. 45 veranschaulicht.
Die Größe der Panumbereiche wächst vom Zentrum zur Netzhautperipherie hin etwa in dem Maße, in dem die Fläche der einzelnen Sehelemente zunimmt ‹36, S.26›. Der horizontale Durchmesser des zentralen Panumbereiches ist oft gemessen worden, wobei die Meßergebnisse stark von der Versuchsanordnung abhingen. So gibt es Literaturwerte zwischen wenigen Winkelminuten ‹9, S.301› und etwa zwei Winkelgrad ‹94›. Aus praktischen Erfahrungen bei der Korrektion von Heterophorien mit Fixationsdisparation heraus kann mit einem für durchschnittliche Sehaufgaben des täglichen Lebens gültigen Wert von ungefähr einem Winkelgrad gerechnet werden.
Dasjenige Gebiet vor und hinter dem Horopter, welchem durch Panumsehen Einfachwahrnehmung möglich ist, wird als „Panumraum" bezeichnet ‹3, Lfd. Nr.282›.

Definition 93 **Panumraum**
Das den Panumbereichen entsprechende Gebiet im Außenraum.

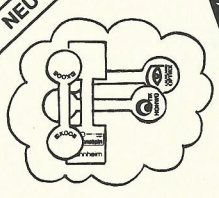
An dieser Stelle soll nachdrücklich darauf hingewiesen werden, daß es auf der Netzhaut selbst weder Richtungswerte noch Panumbereiche gibt; diese Modellvorstellung überträgt lediglich die Verhältnisse bei der Reizverarbeitung in der Sehrinde durch eine Art Projektion auf die entsprechenden reizaufnehmenden Netzhautstellen.
Für alle Objektpunkte, die außerhalb des Panumraumes liegen, dient der Mechanismus „Bahnung und Hemmung" ‹26› zur Vermeidung von Diplopie. Hierbei bahnt sich der Seheindruck des einen Auges seinen Weg in die Wahrnehmung, während derjenige des anderen Auges unterdrückt wird. Die gleiche physiologische Fähigkeit zur Hemmung des einen Seheindruckes liegt dem Phänomen des binokularen Wettstreites zugrunde, der immer dann zu beobachten ist, wenn (mit Hilfe eines binokularen Trenner-Verfahrens) nicht fusionierbare Bilder auf korrespondierende Netzhautstellen fallen. Bei diesem Wettstreit gewinnen die Seheindrücke der beiden Einzelaugen abwechselnd die Oberhand.
„Der Wettstreit der Sehfelder macht deutlich, daß Bahnung und Hemmung als physiologische Grundfunktionen aller nervalen Strukturen auch im Sehorgan ständig zusammenwirken. Für ein störungsfreies beidäugiges Sehen ist die vom binokularen Seheindruck gesteuerte Hemmung (binokulare „Wechselhemmung") unumgänglich, denn sie eliminiert im binokularen Sehfeld die Seheindrücke der mit erheblicher Querdisparation abgebildeten Objekte." ‹26, S.92›.

Literaturhinweise

‹3› DIN 5340: „Begriffe der physiologischen Optik" (Oktober 1986), Beuth Verlag, Berlin
‹9› WILHELM TRENDELENBURG: „Der Gesichtssinn", Springer-Verlag, Berlin (2.Auflage 1961)
‹26› G.MACKENSEN: „Untersuchung der Motilität und der Binokularfunktion" in Wolfgang Straub (Herausgeber) „Die ophthalmologischen Untersuchungsmethoden" Band II, Ferdinand Enke, Verlag, Stuttgart (1976)
‹36› BURIAN - VON NOORDEN'S: „Binocular vision and ocular motility", The C.V.Mosby Company, St.Louis (Second Edition, 1980)
‹39› H.-J.HAASE / G.FORST / D.PESTALOZZI / H.GOERSCH: „Binokulare Korrektion" (Eine Sammlung von zehn Arbeiten aus den Jahren 1957-1978), Verlag Willy Schrickel, Düsseldorf (1980)
‹88› ARMIN VON TSCHERMAK - SEYSENEGG: „Einführung in die physiologische Optik", Springer-Verlag Wien (2.Auflage, 1947)
‹90› HUGH DAVSON: „Physiology of the Eye", Verlag Churchill Livingstone, Edinburgh, London and New York (Fourth Edition, 1980)
‹92› WERNER THIELE: „Neuentwicklungen auf dem Gebiet der binokularen Prüfverfahren", Optometrie 5 (1956) 136-145
‹93› P.L.PANUM: „Physiologische Untersuchungen über das Sehen mit zwei Augen", Schwerssche Buchhandlung, Kiel(1858)
‹94› DEREK FENDER and BELA JULESZ: „Extension of Panum's Fusional Area in Binocularly Stabilized Vision", J.Opt.Soc.Amer. 57,6 (1967) 819-830

Die bisherigen 7 Folgen dieser Serie: „Einführung in das Binokularsehen":
Teil I ... der Augenoptiker 7 (1980) 8-15
Teil II .. der Augenoptiker 12 (1980) 20-28
Teil III . der Augenoptiker 4 (1981) 26-29
Teil IV .. der Augenoptiker 6 (1981) 17-23
Teil V ... der Augenoptiker 10 (1981) 5-17
Teil VI .. der Augenoptiker 11 (1982) 5-11
Teil VII . der Augenoptiker 5 (1984) 8-15

NEU



Kophan's **Brillenetiketten für Ihr Image**
Der große Erfolg in Skandinavien - jetzt auch in Deutschland...

Endlich die richtige Etikettenlösung für Ihre Brillen
Kunststoffetikett (Vinyl), keine Leimrückstände auf den Bügeln
schwer reißbar, kein Einschrumpfen, vertragen Spiritus, Benzin und Sulfo, ultraschallfest und UV-beständig.

Werbe- und Schmucketiketten,
Preisauszeichner und Etiketten u.v.m.



M-Werbeständer patentiert durch Magnetsystem absolut wetterfest, äußerst werbewirksam für Aktionen, Werbefotos u.m.

Fordern Sie bitte unverbindlich Preise und Muster an:

Verkaufsbüro Nord
Reimar Bade
Preisauszeichnungen
Schönböckener Str. 78a
2400 Lübeck 1
Tel. 04 51-47 50 59

Verkaufsbüro Süd
Hans-Jürgen Ranft
Preisauszeichnungen
Lilienstr. 2
6805 Heddesheim
Tel. 0 62 03-4 34 20