

Stereopsis – Grundlagen und Prüfverfahren

Nachfolgend werden grundlegende Zusammenhänge zur Sensorik des Binokularsehens und zur Stereopsis erklärt. Dabei handelt es sich um einen für die »Optometrie« modifizierten Auszug aus dem Grundlagenteil der Masterarbeit des Verfassers [1]. Das zugrunde liegende Studium an der Hochschule Aalen wurde in enger Kooperation mit US-amerikanischen Hochschulen konzipiert; es vermittelt moderne Optometrie auf hohem Niveau und fördert gleichzeitig den fachlichen Transfer zwischen Optometristen verschiedener Länder. Daher sind in dieser Arbeit – im Sinne einer besseren länderübergreifenden Verständigung – die verwendeten Fachbegriffe auch mit ihrer englischen Benennung angegeben.

1 Einleitung

Die visuellen Anforderungen sind in unserer modernen Welt enorm gestiegen: Der Einzug des Computers in nahezu sämtliche Lebensbereiche, kleine Displays von beispielsweise Mobiltelefonen oder Digitalkameras belasten die Augen ebenso wie die vielfältigen Reize, die beim Straßenverkehr mit zum Teil extrem hoher Geschwindigkeit verarbeitet werden müssen.

Aus diesen Gründen machen sich selbst kleine Ametropien (Hyperopien, Myopien, Astigmatismen) störend bemerkbar, wenn sie nicht optimal korrigiert sind, insbesondere beim gleichzeitigen Vorliegen von Anisometropie. Äußerst kritisch wirken sich zudem Abweichungen von der idealen Zusammenarbeit der beiden Einzelaugen aus. Daher kommt den latenten und manifesten Ruhestellungsfehlern (Heterophorien und Heterotropien) eine besondere Bedeutung in der modernen Optometrie zu.

Die höchstentwickelte Stufe des beid-
 äugigen Sehens ist die Stereopsis. Insbesondere Störungen im Bereich der Sensorik führen häufig zu Beeinträchtigungen des räumlichen Sehvermögens und damit zu einer oftmals deutlichen Herabsetzung der visuellen Leistungsfähigkeit, die sich auf viele Lebensbereiche auswirken kann. Dessen ungeachtet

produziert die moderne Technik immer neue und höhere Beanspruchungen des visuellen Systems. Ein aktuelles Beispiel ist die Einführung des 3D-Fernsehens, welches ein gut funktionierendes Stereosehen voraussetzt.

Im internationalen Vergleich ist die Augenoptik/Optometrie bezüglich des Umgangs mit nicht idealem Binokularsehen von sehr unterschiedlichen Herangehensweisen geprägt. So hat zum Beispiel in den deutschsprachigen Ländern die binokulare Augenglasbestimmung bei symptomatischen Heterophorien einen hohen Stellenwert – meistens mit dem Ziel, neben der exakten Korrektur monokularer Fehlsichtigkeiten auch binokulare Abweichungen optisch auszugleichen. Mit der prismatischen Korrektur wird angestrebt, das Augenpaar motorisch und/oder sensorisch zu entlasten. Dadurch soll die bestmögliche Ausgangssituation für das Binokularsehen geschaffen werden, vergleichbar dem Zustand bei Orthophorie. Diesem Zweck dient auch die Feinbestimmung

der prismatischen Korrektur an Stereopsistesten.

In den angelsächsischen Ländern hingegen sind prismatische Korrekturen eher die Ausnahme. Stattdessen ist es weit verbreitet, optometrische Sehübungen durchzuführen, mit dem Ziel, das visuelle System so weit zu stärken, dass das Augenpaar in der Lage ist, seinen Ruhestellungsfehler im natürlichen Sehen ohne subjektive Beschwerden selbst zu kompensieren. Zwar wird bei der Ermittlung des binokularen Status auch hier die Qualität der Stereopsis überprüft, der festgestellte Wert wird jedoch nicht für Korrektionszwecke herangezogen.

Ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal der MKH (Mess- und Korrektionsmethodik nach H.-J. Haase) gegenüber anderen Binokularverfahren ist, dass Stereopsis als Optimierungskriterium für prismatische Korrekturen dient und dazu systematisch verschiedene Teste verwendet werden. Natürlich ist es wichtig, mit geeigneten Testen zunächst auf das Vorhandensein von Stereopsis zu prüfen, die jahrzehntelangen Erfahrungen mit der MKH zeigen jedoch, dass sich die Befunde zu weit mehr als allgemeinen Qualitätshinweisen eignen.

Ein weiteres Anwendungsgebiet ist das gezielte Training von Stereopsis im



Georg Stollenwerk, M.Sc.,
 1987–1989 Studium zum staatl. gepr.
 Augenoptiker u. Augenoptikermeister,
 1989–2008 Fachschuldozent,
 2002–2008 Schuldirektor,
 2009–2011: Studium zum Master
 of Science in Vision Science and
 Business (Optometry).
 Seit 2000 Präsident der IVBV.
 Kontakt über www.optometrie24.de.

Rahmen sportoptometrischer Sehubungen. So lässt sich mit geeigneten Tests und Maßnahmen auch bei Augenpaaren, die keine binokularen Defizite aufweisen, die Qualität der Stereopsis steigern. Speziell für Leistungssportler mit hohem Anspruch an das schnelle Erfassen räumlicher Situationen sind entsprechende Trainingsprogramme interessant.

Die neuen Arbeits- und Qualitätsrichtlinien für Augenoptik und Optometrie sehen für die Bestimmung der binokularen Fern- und Nahkorrektur eine Prüfung und Dokumentation der Stereopsis vor (Zitat): »... z. B. mit differenzierten Stereotesten zur Bestimmung des kleinsten Stereowinkels« [2].

2 Grundlagen der Sensorik des Binokularsehens

2.1 Fusion

Beim beidäugigen Simultansehen liefert jedes der beiden Augen eines Augenpaares einen Bildeindruck. Das Zusammenspiel der beiden Augen beginnt damit, dass diese beiden Bildeindrücke *fusioniert*, das heißt verschmolzen werden müssen (Def. 1).

Zu unterscheiden sind die beiden Komponenten *motorische Fusion* und *sensorische Fusion* (Def. 2 u. 3).

Im Regelfall ist zunächst eine motorische Fusion notwendig, also eine Vergenz, die durch einen *Fusionsreiz* ausgelöst wird. Bei Vergenz handelt es sich um eine gegensinnige Bewegung beider Augen. So wird zum Sehen in die Nähe Konvergenz benötigt und zum Sehen in die Ferne – wenn die Augen zuvor auf die Nähe ausgerichtet waren – Divergenz. Ein Fusionsreiz bildet einen Anreiz für das Sehzentrum, die Augen zu einer Vergenz zu veranlassen (Def. 4).

Für das Auftreten von Fusionsreizen muss die *objektive Fusionsbedingung* erfüllt sein. Das heißt, die beiden durch die Einzelaugen vermittelten Bildeindrücke müssen so weitgehend übereinstimmen, dass sie vom Sehzentrum als zu ein und demselben Objekt gehörig erkannt werden (Def. 5).

Sind entsprechend fusionierbare Bilder vorhanden, dann kommt motori-

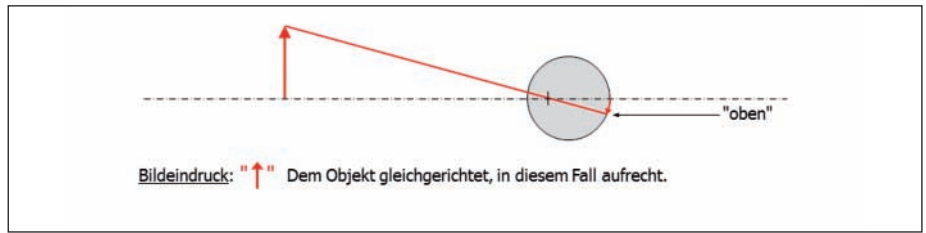


Abb. 1: Objekt, Netzhautbild und Bildeindruck (Erläuterungen im Text).

sche Fusion durch die Augenbewegungsmuskeln zustande, bis die Bilder im Idealfall auf den Netzhautgrubenmitten beider Augen liegen. Für das Wirksamwerden des erforderlichen Fusionszwanges muss die *subjektive Fusionsbedingung* erfüllt sein (Def. 6). Unter Fusionszwang (*en: compulsion for fusion*) versteht man den sensomotorischen Regelvorgang zur Vermeidung von binokularen Doppelbildern [3, Nr. 184].

2.2 Richtungswerte

Die von einem jeden rezeptiven Feld vermittelte Richtungsempfindung für einen Objektpunkt im Außenraum relativ zur Bezugsblickrichtung als Nullrichtung wird als *Richtungswert* bezeichnet [4, S. 242]. Dabei versteht man unter der Nullrichtung (*en: zero direction*) die Richtung, auf welche die Angabe anderer Richtungen bezogen wird [4, S. 204]. Die Bezugsblickrichtung (*en: visual reference direction*) beschreibt »die momentane Richtung der Fixierlinie des Auges im Raum beim Monokularsehen bzw. der Fixierlinie des Zyklopedes beim Binokularsehen« [3, Nr. 48].

Richtungswerte beziehen sich also stets auf diejenige Netzhautstelle mit der Empfindung Geradeaus, welche im Monokularsehen normalerweise die Foveola vermittelt (Def. 7).

Die Netzhautstelle mit dem »Richtungswert Geradeaus« (*en: oculocentric direction straight on*) ist der Kreuzungspunkt von horizontalem und vertikalem Netzhautmeridian. Je weiter ein rezeptives Feld von demjenigen mit dem Richtungswert Geradeaus entfernt ist, desto größer ist der Winkel, den die damit empfundene Richtung mit der Bezugsblickrichtung bildet [4, S. 242].

Jedes rezeptive Feld, durch das keiner der beiden Netzhautmeridiane geht, besitzt sowohl einen horizontalen als auch

einen vertikalen Richtungswert. Dabei bedeutet horizontaler Richtungswert »links oder rechts bezüglich der Nullrichtung« und vertikaler Richtungswert »oben oder unten bezüglich der Nullrichtung« [4, S. 242].

Während ein vom Einzelaugen in der Foveamitte abgebildeter Objektpunkt als »Geradeaus vor dem Auge« befindlich erkannt wird, wird im Auge unten Abgebildetes als »oberhalb der Mitte« lo-

Def. 1: **Fusion** (*en: fusion*)

Gesamtheit aller motorischen und sensorischen Vorgänge, die zur Verschmelzung der Bildeindrücke beider Augen führen und sie aufrechterhalten. [3, Nr. 174]

Def. 2: **Motorische Fusion** (*en: motor fusion*)

Durch einen Fusionsreiz ausgelöste Vergenz. [3, Nr. 175]

Def. 3: **Sensorische Fusion** (*en: sensory fusion*)

Verschmelzung der Bildeindrücke beider Augen ohne Vergenz, und zwar auch bei Abbildung auf disparaten Netzhautstellen. [3, Nr. 176]

Def. 4: **Fusionsreiz** (*en: fusional stimulus*)

Von beidäugig wahrgenommenen Konturen ausgehender Reiz, der aufgrund hinreichend gleicher Bildeindrücke die Fusion anregt. [3, Nr. 182]

Def. 5: **Objektive Fusionsbedingung**

(*en: objective requirement for fusion*)
Bedingung der hinreichenden Gleichheit der Bildeindrücke in beiden Augen, insbesondere bezüglich Größe, Form, Struktur, Helligkeit, Kontrast, Schärfe und Farbe. [4, S. 105]

Def. 6: **Subjektive Fusionsbedingung**

(*en: subjective requirement for fusion*)
Bedingung, dass die Augen bei Anwesenheit von Fusionsreizen durch die Tätigkeit der Augenbewegungsmuskeln in eine Arbeitsstellung gelangen können. [4, S. 105]

Def. 7: **Richtungswert**

(*en: oculocentric direction*)
In den Außenraum projizierte Richtungsempfindung einer Netzhautstelle, bezogen auf die Netzhautstelle mit dem Richtungswert Geradeaus. [3, Nr. 346]

kalisiert, da rezeptive Felder, die unterhalb vom vertikalen Netzhautmeridian liegen, Richtungswerte »oben« haben (Abb. 1).

Zu unterscheiden sind *monokulare* und *binokulare Richtungswerte* (Def. 8 u. 9).

Dabei ist die Hauptsehrichtung (*en: principal visual direction*) »die vom Fixationsort vermittelte Sehrichtung« [3, Nr. 198]. Im Binokularsehen bezieht sich die Richtungsempfindung auf ein hypothetisches Mittelaug, das sich mittig zwischen beiden Augen befindet – auf das sogenannte Zyklopenauge (*en: cyclopean eye*) (s. Abb. 12).

Ein Objekt wird demnach im beidäugigen Sehen als Geradeaus lokalisiert, wenn es sich in der Medianebene des Augenpaares (*en: median plane*) befindet. Darunter versteht man eine Ebene, die senkrecht auf der Mitte der Verbindungsstrecke zwischen den optischen Augendrehpunkten beider Augen steht [4, S. 180].

2.3 Korrespondenz

Retinale *Korrespondenz* beschreibt die Verknüpfung der monokularen Richtungswerte der beiden Einzelaugen im Binokularsehen, also das sensorische Zusammenwirken von Netzhautstellen beider Augen (Def. 10).

Die im Binokularsehen vorhandene Eigenschaft der gemeinsamen Auswertung der monokularen Richtungswerte wird auch als »Sehrichtungsgemeinschaft« bezeichnet [4, S. 259], ein Begriff, für den eine englischsprachige Entsprechung fehlt. Diejenigen Netzhautstellen beider Augen, die im Binokularsehen gleichzeitig den Richtungswert Geradeaus besitzen, heißen *Korrespondenzzentren* (Def. 11).

Die retinale Korrespondenz ist im Grunde eine kortikale Korrespondenz, also eine sensorische Leistung, die nicht auf der Netzhaut, sondern erst im Cortex stattfindet [4, S. 158]. Bei ständig gleichen monokularen Richtungswerten der Foveolae und näherungsweise aller Netzhautstellen mit gleicher Lage relativ zur Foveolamitte besteht normale Korrespondenz (*en: normal retinal correspondence*), Abweichungen davon werden als

anormale Korrespondenz (*en: anomalous retinal correspondence*) bezeichnet [3, Nr. 252]. Normale Korrespondenz ist somit der Oberbegriff für bizen-trale und dispa-rate Korrespondenz [4, S. 159]. Bei bizen-traler Korrespondenz (*en: bicentral correspondence*) liegen die Korrespondenzzentren beider Augen in den Foveamitten (ideale Korrespondenz) [4, S. 159].

Die Gleichheit von Richtungswerten von Netzhautstellen beider Augen im Binokularsehen ist unabhängig vom Vorhandensein und von der Art irgendwelcher Netzhautbilder [4, S. 200] (Def. 12).

Während also mit den Begriffen *Richtungswert* und *Korrespondenz* Eigenschaften der Augen beschrieben werden – unabhängig davon, ob irgendwelche (fusionierbaren oder nicht fusionierbaren) Netzhautbilder vorhanden sind, beziehen sich *abbildungsgleiche Netzhautstellen* nur auf die Abbildung desselben Objektes in beiden Augen, haben also mit Richtungswert und Korrespondenz nichts zu tun (Def. 13).

Die Zusammenhänge der Korrespondenz zwischen beiden Augen sind schon lange bekannt, Abbildung 2 zeigt eine Darstellung aus dem Jahr 1637.

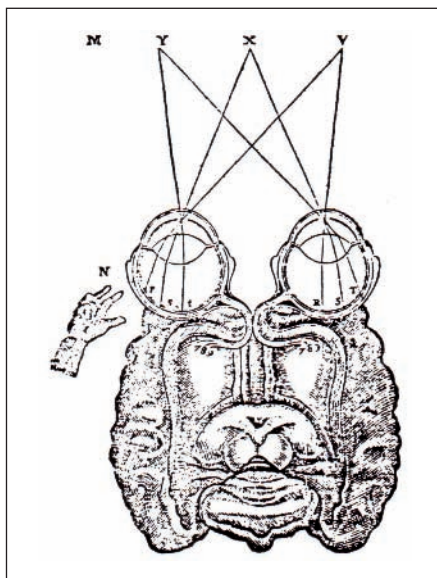


Abb. 2: Darstellung korrespondierender Netzhautstellen nach Descartes (aus [5]).

3 Grundlagen der Stereopsis

3.1 Normales Binokularsehen

Simultansehen (*en: simultaneous vision*) stellt die niedrigste Stufe des Binokular-

sehens dar und bedeutet »Sehen bei gleichzeitiger beidäugiger Wahrnehmung« [3, Nr. 382]. Da dieser Wahrnehmung die räumliche Tiefe (noch) fehlt, wird sie im Englischen als »flat fusion« bezeichnet [6, S. 119]. Ist mit Stereopsis die höchste Stufe des Binokularsehens erreicht, besteht in der Regel *normales Binokularsehen* (Def. 14).

Bei einem visuellen Screening wird in der Regel auch die Sehfunktion Stereopsis überprüft. Die hierfür verwendeten Stereopsisteste erlauben jedoch meist nur eine grobe Prüfung, ob Stereopsis vorhanden ist. Das Screening-Ergebnis wird mit festgelegten Regelwerten verglichen, das heißt, es wird in eine der beiden biostatistischen Rubriken »nega-

Def. 8: Monokularer Richtungswert

(*en: monocular oculocentric direction*)

Auf die Hauptsehrichtung bezogene Sehrichtung. [3, Nr. 348]

Def. 9: Binokularer Richtungswert

(*en: binocular oculocentric direction*)

Auf die Richtung der Fixierlinie des Zyklo-pen-auges bezogene Richtungsempfindung für einen Objektpunkt im Binokularsehen. [3, Nr. 347]

Def. 10: Korrespondenz (*en: correspondence*)

Synonym: Netzhautkorrespondenz

Sensorische Beziehung der Netzhäute beider Augen bezüglich ihrer monokularen Richtungswerte. [3, Nr. 251]

Def. 11: Korrespondenzzentren

(*en: centres of correspondence*)

Die beiden korrespondierenden Netzhautstellen mit dem »Richtungswert Geradeaus«. [4, S. 159]

Def. 12: Korrespondierende Netzhautstellen

(*en: corresponding retinal points*)

Netzhautstellen in beiden Augen, die im Binokularsehen sowohl für fusionierbare als auch für nicht fusionierbare Bilder gleiche monokulare Richtungswerte haben. [3, Nr. 297]

Def. 13: Abbildungsgleiche Netzhautstellen

(*en: identical-image retinal points*)

Synonym: Bildpunktgleiche Netzhautstellen
Netzhautstellen in beiden Augen, auf die derselbe Objektpunkt gleichzeitig abgebildet wird. [3, Nr. 295]

Def. 14: Normales Binokularsehen

(*en: normal binocular vision*)

Binokularsehen bei normaler Korrespondenz und Fusion mit Stereopsis für alle Blickrichtungen in Ferne und Nähe. [4, S. 43]

tiver Messwert« oder »positiver Messwert« eingeordnet.

Darüber, wie gut die Stereopsis funktioniert und wie gleichmäßig beide Augen am Zustandekommen der räumlichen Wahrnehmung beteiligt sind, können erst während der Augenglasbestimmung verwendete verfeinerte Messungen Aufschluss geben. Berke bezeichnet Stereopsis als »*Barometer des Binokularsehens*«, weshalb ihre Prüfung auch Aussagen über die Qualität des Binokularsehens gestattet [6, S. 119]. Als Qualitätskriterien dienen das relative Tiefensehen, die Stereo-Tiefensehschärfe und das Stereo-Sehgleichgewicht. Im folgenden Abschnitt wird die Terminologie zum Thema Stereopsis näher erläutert.

3.2 Raumsehen und Stereopsis

Die offizielle Definition stellt klar, dass *Stereopsis* nur durch die sensorische Auswertung von Querdisparationen zustande kommt (Def. 15).

Die weit verbreitete Bezeichnung *räumliches Sehen* ist also differenziert zu betrachten, weil damit sowohl das Monokularsehen als auch das Binokularsehen gemeint sein kann (Def. 16).

Die beiden Komponenten *Richtungssehen* und *Tiefensehen* sind einerseits wichtig für das Verständnis der Theorie, andererseits kann mit geeigneten Stereopsistesten separat auf beide Funktionen geprüft werden (Def. 17 u. 18).

Räumliches Sehen wird häufig fälschlicherweise nur mit Tiefensehen assoziiert, obwohl die gegenseitige Lage wahrgenommener Objekte im dreidimensionalen Raum nur dann vollständig beschrieben werden kann, wenn auch deren Richtung angegeben wird. Richtungssehen und Tiefensehen werden synonym auch als »Richtungswahrnehmung« respektive »Tiefenwahrnehmung« bezeichnet [4, S. 242, 288]. Die Norm unterscheidet zwischen *absolutem* und *relativem Tiefensehen*, wobei absolutes Tiefensehen auch als »Entfernungssehen« bezeichnet wird [4, S. 288] (Def. 19 u. 20).

Bedeutsam für eine sachgerechte Unterscheidung ist, dass der Begriff Stereopsis ein Synonym für »querdisparates Raumsehen« ist. Das heißt, es ist

deutlich abzugrenzen, ob räumliches Sehen monokular oder binokular zustande kommt (Def. 21).

Ergänzend zu dieser Definition führt die Norm folgende Beispiele für monokular wahrnehmbare Phänomene an, die von Berke als sekundäre Faktoren bezeichnet werden [6, S. 121]:

- Geometrische Perspektive,
- Bewegungsparallaxe,
- Objektüberdeckungen (Überdeckungsperspektive),
- Konturenschärfe,
- Atmosphärische Einflüsse,
- Verteilung von Licht und Schatten,
- Beziehung zwischen Netzhautbildgröße und Größenvorstellung,
- durch die akkommodative Einstellung bewirkte Empfindung.

Entsprechend sind *nicht querdisparates Tiefensehen* und *querdisparates Tiefensehen* gegeneinander abzugrenzen, denn Letzteres ist nur binokular möglich (Def. 22 u. 23).

Eine ausführliche Gegenüberstellung von querdisparatem und nicht querdisparatem Tiefensehen findet sich in [7].

Die Bezeichnung »querdisparates Tiefensehen« ist also kein Synonym für Stereopsis, da zu Stereopsis außer Tiefensehen stets auch Richtungssehen gehört. Dennoch findet diese fehlerhafte Gleichsetzung immer noch statt, selbst in aktueller Literatur, zum Beispiel in [8, S. 77]. Analog ist die Bezeichnung »nicht querdisparates Tiefensehen« kein Synonym für »nicht querdisparates Raumsehen«, da nicht querdisparates Raumsehen ebenfalls aus den Komponenten Tiefensehen und Richtungssehen besteht. In der MKH werden die beiden Komponenten der Stereopsis separat überprüft, am Stereo-Dreieckstest das (querdisparate) Tiefensehen, am Valenztest das (querdisparate) Richtungssehen.

Schließlich darf Stereopsis nicht mit *Stereoskopie* verwechselt werden, die bei Binokulartests zur Anwendung kommt (Def. 24).

3.3 Disparation

Um verständlich zu machen, wie Stereopsis zustande kommt, bedarf es der

Erläuterung, welche Rolle Disparationen dabei spielen, denn diese kleinen Unterschiede der Netzhautbildlagen in

Def. 15: Stereopsis (*en: stereopsis*)

Synonyme: Stereosehen, querdisparates Raumsehen

Räumliches Sehen ausschließlich aufgrund unterschiedlich querdisparater Abbildung von Objektpunkten. [3, Nr. 394]

Def. 16: Räumliches Sehen

(*en: spatial perception*)

Synonyme: Raumsehen, Raumwahrnehmung

Visuelle Wahrnehmung der Anordnung von Objekten im dreidimensionalen Raum. Das räumliche Sehen gründet sich auf das Richtungssehen und auf das Tiefensehen. [4, S. 256]

Def. 17: Richtungssehen (*en: directional vision*)

Visuelle Wahrnehmung der Richtung, in der sich Objektpunkte relativ zur Bezugsblickrichtung des Beobachters befinden. [3, Nr. 345]

Def. 18: Tiefensehen (*en: depth perception*)

Visuelle Wahrnehmung der Entfernung, in der sich Objektpunkte vom Beobachter befinden. [3, Nr. 415]

Def. 19: Absolutes Tiefensehen

(*en: absolute depth perception*)

Visuelle Wahrnehmung der Entfernung eines Objektpunktes vom Beobachter. [3, Nr. 416]

Def. 20: Relatives Tiefensehen

(*en: relative depth perception*)

Visuelle Wahrnehmung des Unterschiedes der Entfernungen zweier Objektpunkte vom Beobachter (Tiefenunterscheidung). [3, Nr. 417]

Def. 21: Nicht querdisparates Raumsehen

(*en: non-laterally disparate space perception*)

Räumliches Sehen aufgrund verschiedener monokular wahrnehmbarer Phänomene sowie aufgrund der durch die momentane Vergegenständlichung bewirkten Empfindung. [3, Nr. 329]

Def. 22: Nicht querdisparates Tiefensehen

(*en: depth perception without retinal disparity*)

Tiefensehen ausschließlich aufgrund von nicht querdisparatem Raumsehen. [4, S. 288]

Def. 23: Querdisparates Tiefensehen

(*en: laterally disparate depth perception*)

Tiefensehen ausschließlich aufgrund von Stereopsis. [4, S. 288]

Def. 24: Stereoskopie (*en: stereoscopy*)

Haploskopische Erzeugung unterschiedlich querdisparater Netzhautabbildungen. [3, Nr. 396]

beiden Augen sind für das Zustandekommen von Stereopsis zwingend erforderlich.

Disparation liegt immer dann vor, wenn ein Objektpunkt nicht auf korrespondierenden Netzhautstellen abgebildet wird, die beiden abbildungsgleichen Netzhautstellen also unterschiedliche Richtungswerte besitzen. Bei der Abbildung auf eine disparate Netzhautstelle hängt die sensorische Weiterverarbeitung entscheidend davon ab, wie stark sich die Richtungswerte der abbildungsgleichen Netzhautstellen unterscheiden. Als Maß dient die Entfernung von derjenigen Netzhautstelle, bei der Korrespondenz vorläge, zum tatsächlichen Bildpunkt auf der disparaten Netzhautstelle. Diese Strecke heißt Disparation (disparat = verschieden, unvereinbar) (Def. 25).

Zu unterscheiden sind drei Komponenten: Querdisparation, Vertikaldisparation und Zyklodisparation, wobei nur die Disparation in Richtung des horizontalen Netzhautmeridians, die Querdisparation, von praktischer Bedeutung ist (Def. 26).

Während Vertikaldisparation und Zyklodisparation (Verrollungskomponente der Disparation) nicht zur Stereopsis beitragen, ist *Querdisparation* für das Zustandekommen von Stereopsis unabdingbar: Erst die sensorische »Verrechnung« von querdisparat abgebildeten Objekten führt zur binokular-räumlichen Wahrnehmung. Stereopsis setzt also sensorische Fusion voraus, besitzt aber keine motorische Komponente [6, S. 122]. Läge nach Abschluss fusionaler Vergenz keine Disparation mehr vor, hätte die motorische Fusion ihre Aufgabe zwar ideal erfüllt, es wäre aber keine Stereopsis mehr möglich. Daher bedarf es für Stereopsis zusätzlich zum Fixationspunkt mindestens eines weiteren Objektes, das querdisparat in beiden Augen abgebildet wird.

Querdisparation wird auch als »horizontale Disparation« bezeichnet; sie liegt parallel zum horizontalen Netzhautmeridian und ist gekennzeichnet durch Querdisparationsstrecke und Querdisparationsrichtung [4, S. 233]. Darüber hinaus ist zu unterscheiden

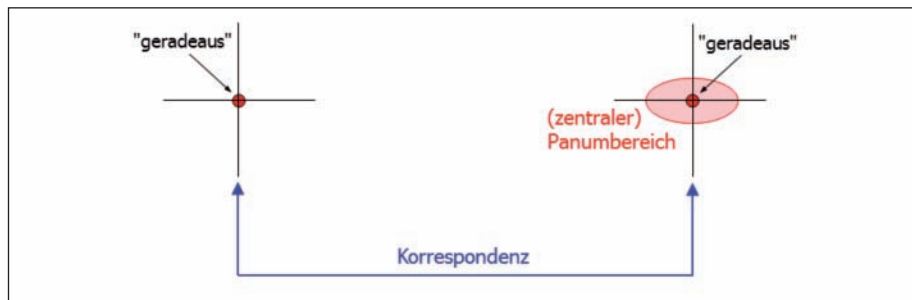


Abb. 3: Beispiel für den zentralen Panumbereich, dargestellt für bizentrale Korrespondenz (Netzhautbetrachtung von hinten). Im linken Auge, das im Beispiel als stellungsmäßiges Führungsaugen angenommen wird, wird der Fixationspunkt zentral abgebildet. Das rechte Auge sei das – im Binokularsehen – gelegentlich abweichende Auge. Für die dargestellte Situation wird der Fixationspunkt momentan auch im rechten Auge zentral abgebildet, so dass sich das Augenpaar in der Orthostellung befindet. Die Grenzen für eine nicht zentrale Abbildung im rechten Auge sind durch den zentralen Panumbereich gekennzeichnet. Er stellt das Ausmaß der Toleranz für disparate Bildlagen dar, die vom Augenpaar noch fusionierbar sind.

zwischen *nasaler* und *temporaler Querdisparation* (Def. 27 u. 28).

Ergänzend zu den Begriffen zur Disparation existieren auch entsprechende Festlegungen, die sich auf die Netzhautstellen beziehen. Dabei unterscheidet die Norm zwischen querdisparaten Netzhautstellen (*en: laterally disparate retinal points*) und vertikaldisparaten Netzhautstellen (*en: vertically disparate retinal points*) (Def. 29).

Von *disparaten Netzhautstellen* spricht man somit nur, wenn bei nicht fusionierbaren Bildern ungleiche Richtungswerte vermittelt werden. Diese nicht korrespondierenden Netzhautstellen können für fusionierbare Bilder unter bestimmten Bedingungen vorübergehend gleiche Richtungswerte annehmen. Daraus resultiert das Panumsehen. Eine Überprüfung der Richtungswerte muss daher immer mit für beide Augen unterschiedlichen (nicht fusionierbaren) Objekten durchgeführt werden.

3.4 Panumsehen

Die Bezeichnung *Panumsehen* geht zurück auf den dänischen Physiologen Prof. Dr. Peter Ludvig Panum (1820–1885) (Def. 30).

Panumsehen ermöglicht binokulares Einfachsehen trotz Disparation. Das heißt, innerhalb gewisser Grenzen findet bei disparater Abbildung sensorische Fusion (von fusionierbaren Objekten) statt. Hierbei »einigen« sich die Augen auf eine gemeinsame Richtungsempfindung. Panumsehen kann also als

fakultativ-temporäre Zusammenarbeit von disparaten Netzhautstellen aufgefasst werden.

Zu jeder Netzhautstelle eines Auges gibt es im anderen Auge eine korrespondierende Netzhautstelle, die von einem Toleranzbereich umgeben ist, der als *Panumbereich* bezeichnet wird

Def. 25: **Disparation** (*en: [retinal] disparity*)
Abstand des Bildpunktes in einem Auge von derjenigen Netzhautstelle dieses Auges, die zur abbildungsgleichen Netzhautstelle im anderen Auge korrespondierend liegt. [3, Nr. 82]

Def. 26: **Querdisparation**
(*en: lateral [retinal] disparity*)
Horizontalkomponente der Disparation bei aufrechter Kopfhaltung. [3, Nr. 328]

Def. 27: **Nasale Querdisparation**
(*en: uncrossed [retinal] disparity*)
Querdisparation bei der Abbildung eines hinter dem Horopter liegenden Objektpunktes. [4, S. 233]

Def. 28: **Temporale Querdisparation**
(*en: crossed [retinal] disparity*)
Querdisparation bei der Abbildung eines vor dem Horopter liegenden Objektpunktes. [4, S. 233]

Def. 29: **Disparate Netzhautstellen**
(*en: disparate retinal points*)
Netzhautstellen in beiden Augen, die im Binokularsehen für nicht fusionierbare Bilder ungleiche monokulare Richtungswerte haben (nicht korrespondierende Netzhautstellen). [3, Nr. 296]

Def. 30: **Panumsehen** (*en: Panum vision*)
Binokulares Einfachsehen durch sensorische Fusion disparat liegender Netzhautbilder. [4, S. 214]

(Abb. 3) (Def. 31). Modellhaft handelt es sich bei diesen Fusionsarealen um liegende Ellipsen, deren Größe unter anderem von der Sehschärfe abhängt. Daher sind die Areale peripher größer als im Netzhautzentrum (s. Abb. 5).

Die deutschsprachige Nomenklatur hat sich auf den Begriff »Panumbereich« als Vorzugsbenennung festgelegt. Vielfach wird aber auch die Bezeichnung »Panum-Areal« verwendet, die an die englischsprachige Benennung anlehnt und daher von der DIN 5340 als synonyme Benennung aufgeführt wird. In älterer Literatur findet sich auch die Bezeichnung »Panumgebiet«, zum Beispiel in [9]. Keinesfalls darf der Panumbereich mit dem *Panumraum* verwechselt werden (Def. 34).

Lange Zeit umstritten war insbesondere die Größe des zentralen Panumbereichs (Abb. 4) (Def. 32). Goersch weist darauf hin, dass die Literaturangaben für den (horizontalen) Durchmesser des zentralen Panumbereiches in Abhängigkeit von den Messbedingungen zwischen 5 Winkelminuten und 4 Winkelgrad schwanken und folgert: »*Ein realistischer Wert für die üblichen Sehaufgaben im natürlichen Sehen dürfte bei 1° liegen.*« [4, S. 213].

Bezüglich der Größe von Panumbereichen existieren also kontroverse Standpunkte. Indem inzwischen mehrere Autoren darauf hinweisen, dass bestimmte äußere Gegebenheiten Einfluss nehmen können, erklärt sich die

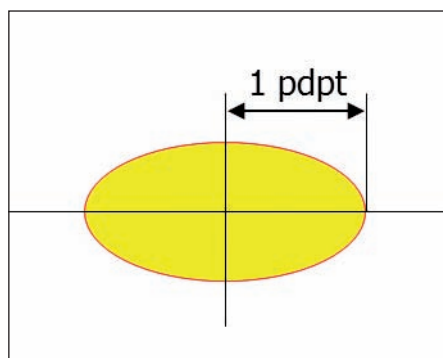


Abb. 4: Schematische Darstellung des zentralen Panumbereichs. Für etwaige Korrektionszwecke (von horizontaler Fixationsdisparation) ist je nach beanspruchter Richtung entweder der nasale oder der temporale Anteil relevant. Daher ist der horizontale Radius eingezeichnet. Dieser ist hier beispielhaft mit 0,5° angenommen, was als Korrektionswert ausgedrückt knapp 1 pdpt entspricht.

mitunter extreme Diskrepanz der Größenangaben. So finden sich Hinweise auf Einflussfaktoren wie »äußere Umstände«, »innere Stimmung« und »Versuchsanordnung« [10]. Außerdem beeinflussen »Eigenschaften des Objektes« die Größe der Panumbereiche [6, S. 121].

Im Einzelnen werden in der Literatur folgende Einflussfaktoren beschrieben:

- Größe und Typ der Objekte [11; 12; 13],
- Netzhautbildlage [14; 15; 16; 17; 18; 19],
- Beschaffenheit der Objekte [13; 14; 17; 20; 21],
- Konturen der Objekte [12; 22],
- reale oder simulierte Objekte [23],
- Darbietungszeit [17; 19; 24; 25; 26],
- dynamische oder statische Darbietung [18; 22; 24],
- Geschwindigkeit der Erhöhung der Disparation [22],
- Messung vom oder zum Doppelbild [12; 22],
- Messung mit oder ohne Konvergenzkontrolle [22].

Es ist folglich fachlich nicht mehr haltbar, ohne Berücksichtigung der Messbedingungen konstante Größen für Panumbereiche an bestimmten Netzhautorten anzugeben. Eine ausführliche Zusammenstellung der kontroversen Ansichten sowie eine kritische Analyse finden sich in [27].

Außerdem zeigt sich die Notwendigkeit zur Einführung eines genormten Tests zur Bestimmung der Stereo-Tiefensehschärfe, für den möglichst alle relevanten Messbedingungen präzise definiert sind. Praktische Beobachtungen an bestimmten Stereopsistesten zeigen, dass die physiologische Fähigkeit zur sensorischen Fusion disparat liegender Netzhautbilder individuell unterschiedlich sein kann. So kann eine bestimmte Testkonfiguration, die bei den meisten Klienten Stereopsis auslöst, bei einigen Klienten zu Diplopie führen, selbst dann, wenn ein ansonsten ungestörtes Binokularesehen vorliegt. Als Ursache hierfür wird angenommen, dass diese Personen eingeschränkte Panumbereiche besitzen (Def. 33). Für diese Fälle stehen in der MKH Stereopsisteste mit reduzierter stereoskopischer Parallaxe zur Verfügung.

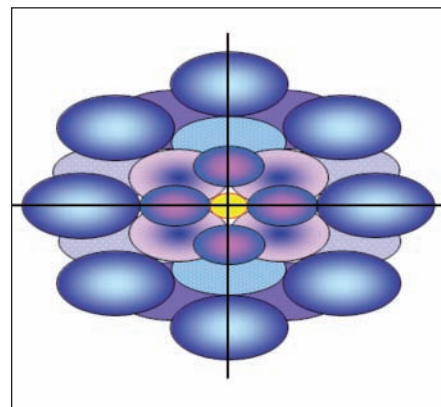


Abb. 5: Schematische Darstellung der Panumbereiche. Die Größe ist im Netzhautzentrum sehr klein und nimmt zur Peripherie stetig zu (aus [30]).

Weitergehende Ursachen für das Auftreten von Diplopie an Stereopsistesten sind in [28] beschrieben.

Einigkeit besteht darüber, dass der zentrale Panumbereich stets am kleinsten ist, das heißt, je weiter Panumbereiche vom Netzhautzentrum entfernt liegen, umso größer sind diese [6, S. 121; 10; 29, S. 335]. Dabei nimmt die Toleranz für sensorische Fusion zur Peripherie etwa in dem Maße zu, wie die Sehschärfe abnimmt (Abb. 6 u. 7). Die Größe der Panumbereiche ist demnach näherungsweise umgekehrt proportional zur relativen Sehschärfe am jeweiligen Netzhautort.

Bei Fixationsdisparation erfolgt die Abbildung des Fixationspunktes in mindestens einem Auge außerhalb der Foveamitte. Da der disparate Netzhautort eine geringere monokulare Sehschärfe als die Foveola vermittelt, kann die binokulare Sehschärfe dadurch reduziert

Def. 31: Panumbereich

(en: Panum's [fusional] area)

Synonym: Panum-Areal

Die unmittelbare Umgebung jeder korrespondierenden Netzhautstelle in einem Auge, in der trotz disparater Abbildung sensorische Fusion möglich ist. [3, Nr. 311]

Def. 32: Zentraler Panumbereich

(en: central Panum's area)

Der zur Foveamitte gehörige Panumbereich. [4, S. 213]

Def. 33: Eingeschränkter Panumbereich

(en: reduced Panum's area)

Panumbereich mit geringerer als der normalen Größe. [4, S. 213]

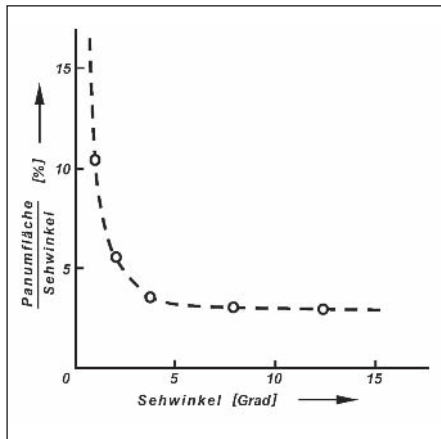


Abb. 6: Größe der Panumbereiche in Abhängigkeit vom Sehwinkel (nach F. P. Fischer, 1924, aus [29, S. 335]).

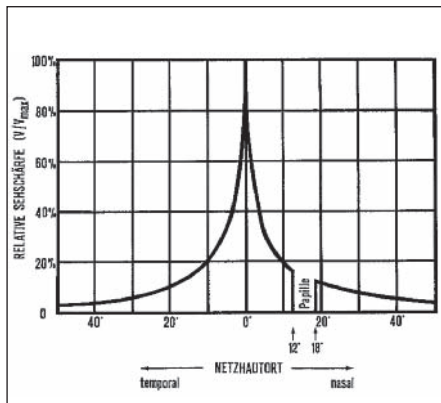


Abb. 7: Relative Sehschärfe in Abhängigkeit vom horizontalen Netzhautort (nach T. Wertheim, 1894, aus [29, S. 263]).

sein. Bereits zwei Grad außerhalb der Foveola beträgt die relative Sehschärfe nur die Hälfte ihres Maximalwertes (Abb. 7).

Die sensorische Fusion von in Panumbereichen unterschiedlich querdisparat abgebildeten Objekten ist Voraussetzung für binokular räumliche Wahrnehmung (Stereopsis). Disparationen außerhalb des Panumbereiches führen zu physiologischer Diplopie. Objektpunkte, die – auf der Netzhaut – im Panumbereich abgebildet werden, befinden sich – außen – im zugehörigen Panumraum (Def. 34).

Der Panumraum ist somit die Entsprechung der Panumbereiche im Außenraum. Dieser beiderseits des Horopters liegende Teil des Objektraumes bildet die »Region des binokularen Einfachsehens«. Da Objektpunkte im Panumraum zudem – aufgrund der sen-

sorischen Auswertung der Querdisparation – binokular räumlich gesehen werden, wird der Panumraum auch als »stereoskopischer Raum« bezeichnet.

3.5 Horopter

Unter dem *Horopter* versteht man eine gedachte räumliche Fläche durch den fixierten Objektpunkt, auf der alle weiteren im Objektraum befindlichen Objekte liegen, die gleichzeitig korrespondierend abgebildet werden (Def. 35).

Bei Orthostellung wird das Fixationsobjekt automatisch sensorisch fusioniert, weil die Bildorte auf beiden Netzhäuten den gleichen Richtungswert besitzen. Außer dem Fixationsobjekt können aber noch weitere der im Objektraum befindlichen Objekte auf korrespondierenden Netzhautstellen, das heißt ohne Disparation, abgebildet werden. Die Gesamtheit dieser Objektpunkte bildet den Horopter. Alle anderen Objekte aber, die vor oder hinter dem Horopter liegen, werden disparat abgebildet, was jedoch nicht zwangsläufig zu Diplopie führt. Solange es sich um Objekte handelt, die sich noch innerhalb des Panumraums befinden, erfolgt die Abbildung (auf der Netzhaut) im Panumbereich, so dass die sensorische Fusion wirksam werden kann. Dieser Mechanismus verhindert Doppelsehen (*en: double vision*). Ist die Disparation indes zu groß, die Lage der Objekte folglich außerhalb des Panumraums, entstehen Doppelbilder. Beim normalen Sehvorgang wird aber meistens eines der beiden Bilder unterdrückt, so dass diese (physiologische) Diplopie nicht auffällt und nur durch bewusste Aufmerksamkeit wahrnehmbar ist.

Für einfache Darstellungen gibt es den *geometrischen Horopter* (Def. 36). Dieser wird aufgrund vereinfachender Annahmen über den Bau des Auges geometrisch-optisch nach dem Modell der Deckpunkte konstruiert und heißt daher auch »theoretischer Horopter« oder »Deckpunkt-Horopter«. *Deckpunkte* sind rein geometrisch definiert und haben keine funktionelle Bedeutung (Def. 37).

Davon zu unterscheiden ist der *empirische Horopter*, der synonym auch als

»wahrer Horopter« bezeichnet wird [4, S. 134] (Def. 38). Seine Form ergibt sich aus experimentellen Messungen und kann individuell sehr unterschiedlich sein. Sie ist aber stets flacher als die des geometrischen Horopters und bildet einen Torus (Abb. 8).

Der Unterschied zwischen wahren (empirischem) und geometrischem Horopter wird »Hering-Hillebrand-Abweichung« genannt. Crelier gibt Kriterien an, die bei der Bestimmung des empirischen Horopters zu beachten sind und erläutert verschiedene Methoden [28].

Analog zur variablen Größe von Panumbereichen lässt sich auch für den Horopter keine feste Form und Größe angeben. Bei aufrechter Kopfhaltung nimmt vor allem die Lage des Fixationspunktes im Raum Einfluss auf die Form des Horopters [27].

Ein Horizontalschnitt durch einen geometrischen Horopter ergibt den *Vieth-Müller-Kreis* (Abb. 9) (Def. 39).

Def. 34: Panumraum (*en: Panum's space*)
Gesamtheit aller Punkte vor und hinter dem Horopter, die trotz disparater Abbildung binokular einfach gesehen werden. [3, Nr. 312]

Def. 35: Horopter (*en: horopter*)
Geometrischer Ort für alle Objektpunkte, die in beiden Augen jeweils gleiche Richtungsempfindungen auslösen. [4, S. 134]

Def. 36: Deckpunkte (*en: coincident points*)
Punkte gleicher Koordinatenwerte in zwei gleichen Koordinatensystemen, deren Ursprung sich in den Foveolamitten beider Augen befindet. [3, Nr. 74]

Def. 37: Geometrischer Horopter (*en: geometrical horopter*)
Aufgrund vereinfachender Annahmen über den Bau des Auges geometrisch-optisch konstruierter Horopter. [3, Nr. 219]

Def. 38: Empirischer Horopter (*en: empirical horopter, general horopter, space horopter*)
Gesamtheit aller Objektpunkte im Außenraum, die bei binokularer Fixation eines gegebenen Objektpunktes auf korrespondierenden Netzhautstellen abgebildet werden. [3, Nr. 218]

Def. 39: Vieth-Müller-Kreis (*en: Vieth-Mueller circle*)
Kreis durch den Konvergenzpunkt und die Mitten der Eintrittspupillen beider Augen. [3, Nr. 459]

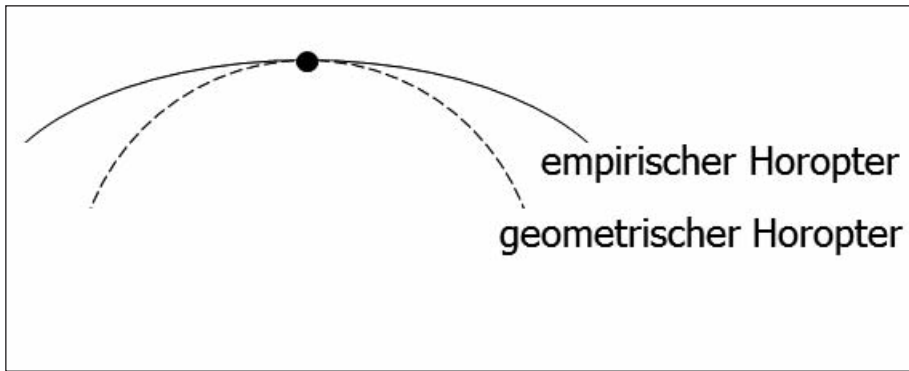


Abb. 8: Schematischer Vergleich der Formen von empirischem Horopter und geometrischem Horopter.

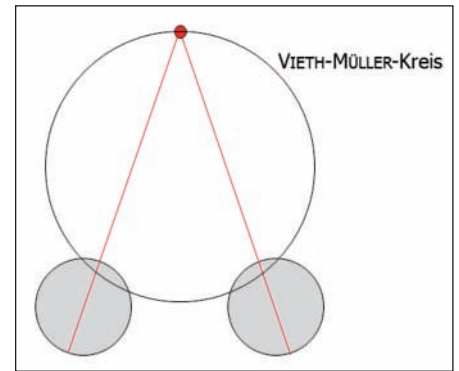


Abb. 9: Grafische Darstellung des Vieth-Müller-Kreises.

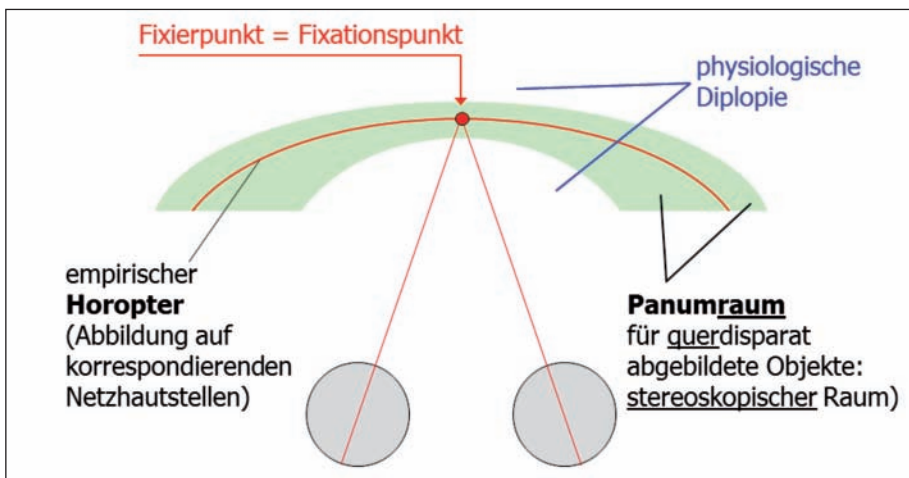


Abb. 10: Schematische Darstellung von empirischem Horopter, Panumraum und Objektlagen mit physiologischer Diplopie.

4 Funktionsprinzip von Stereopsistesten

Die Konstruktion von Stereopsistesten beruht auf den vorab beschriebenen Zusammenhängen, die dem Zustandekommen von Stereopsis zugrunde liegen. Demnach muss in beiden Augen eine derart querdisparate Abbildung erzeugt werden, dass über das Panumsehen ein räumlicher Seheindruck erreichbar ist (vgl. Def. 30). Dazu ist ein spezieller Testaufbau notwendig. Die Stereo-Figuren müssen jedem Auge getrennt dargeboten werden und dabei eine gleichzeitige visuelle Wahrnehmung ermöglichen (Def. 40).

Davon zu unterscheiden ist ein »Stereo-Objekt« (en: *stereopsis object*): »Jedes nicht angeblickte Objekt im Panumraum«, wobei diese Bezeichnung auch im Sinne von Stereo-Figur verwendet wird [4, S. 272].

Der Abstand zwischen den beiden Testbildanteilen in einer Stereo-Figur wird als *stereoskopische Parallaxe* be-

zeichnet (Abb. 11). Diese verursacht Abbildungen auf querdisparaten Netzhautstellen (Def. 41).

Über die stereoskopische Parallaxe, die synonym auch als »binokulare Parallaxe« (en: *binocular parallax*) oder kurz als »Stereo-Parallaxe« bezeichnet wird [4, S. 214], definiert sich der *Stereowinkel* (Abb. 12) (Def. 42).

Erfolgt die Abbildung einer Stereo-Figur in beiden Augen temporal querdisparat, wird das Stereo-Objekt vor der Prüfebene wahrgenommen (Abb. 13), bei nasal querdisparater Abbildung dahinter.

Eine wahrgenommene räumliche Tiefe wird als »Sehtiefe« bezeichnet [4, S. 261], die stereoskopische Wahrnehmung von Sehtiefe heißt *Stereotiefe*. Für die Angabe des Abstandes zwischen Stereo-Objekten und Prüfebene werden beide Benennungen verwendet (Def. 43).

Geometrisch betrachtet ist die Stereotiefe Δa bei gleicher stereoskopischer

Parallaxe y_p für hinter der Prüfebene wahrgenommene Stereo-Objekte größer als für solche, die vor der Prüfebene gesehen werden (Abb. 12). Die an einem Stereopsistest ermittelte Stereotiefe basiert auf der Fähigkeit zum relativen Tiefensehen (vgl. Def. 20). Darauf bezieht sich auch die *Tiefenunterscheidungsstrecke* (Def. 44).

Ergänzend zu Def. 44 lautet eine Anmerkung in der Norm: »Ohne erläuternde Zusätze beziehen sich Angaben zur Tiefenunterscheidungsstrecke auf die Stereo-Tiefenunterscheidungsstrecke.« Die

Def. 40: Stereo-Figur (en: *stereopsis test shape*)
Figur oder Optotype in einem Binokulartest mit einer bestimmten stereoskopischen Parallaxe, die zu einer von der Testentfernung abhängigen querdisparaten Abbildung führt. [4, S. 272]

Def. 41: Stereoskopische Parallaxe
(en: *stereoscopic parallax*)
Formelzeichen: y_p
Abstand zwischen den auf einen Objektpunkt gerichteten Knotenpunktstrahlen beider Augen, gemessen in einer frontparallelen Ebene mit anderer Entfernung. [3, Nr. 313]

Def. 42: Stereowinkel (en: *angle of stereopsis*)
Synonym: Stereoskopischer Winkel
Formelzeichen: ϑ
Schwinkel, unter dem die stereoskopische Parallaxe von einem hypothetischen Mittelauge aus erscheint. [3, Nr. 400]

Def. 43: Stereotiefe (en: *stereoscopic depth*)
Aufgrund von Stereopsis wahrgenommene Sehtiefe. [4, S. 272]

Def. 44: Tiefenunterscheidungsstrecke
(en: *depth discrimination distance*)
Kleinst wahrnehmbarer Entfernungunterschied zwischen zwei Objektpunkten im relativen Tiefensehen. [3, Nr. 419]

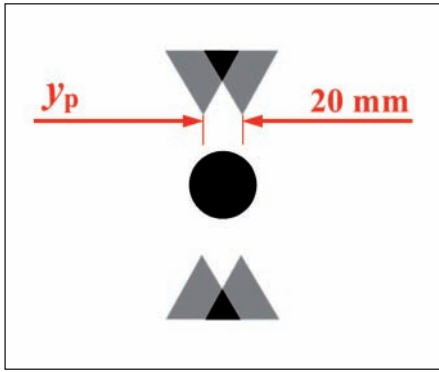


Abb. 11: Stereoskopische Parallaxe am Beispiel der oberen Stereo-Figur im Stereo-Dreieckstest.

Tiefenunterscheidbarkeit aufgrund von Querdisparation wird also über die Stereo-Tiefenunterscheidungsstrecke beschrieben:

Def. 45: **Stereo-Tiefenunterscheidungsstrecke** (en: *stereoscopic depth discrimination distance*) Tiefenunterscheidungsstrecke ausschließlich aufgrund der Stereopsis. [3, Nr. 399]

Das Wörterbuch der Optometrie führt ergänzend dazu aus [4, S. 273]: »Die Stereo-Tiefenunterscheidungsstrecke nimmt stark mit der Fixationsentfernung des näheren der beiden Objektpunkte zu. Sie liegt im Greifbereich in der Größenordnung 10^{-4} m (Zehntel Millimeter) und beträgt bereits 1 m bei einer Fixationsentfernung von ungefähr 35 m. Bei Fixationsentfernungen von einigen hundert Metern ist eine Tiefenunterscheidung ausschließlich mit Hilfe der Stereopsis kaum noch möglich.«

5 Mathematische Zusammenhänge

Für temporale Querdisparation (Wahrnehmung »nach vorne«) errechnet sich die theoretische Stereotiefe wie folgt:

$$\Delta a_v = \frac{a \cdot y_p}{p + y_p}$$

Formel 1: Stereotiefe bei temporaler Querdisparation (proximale Stereotiefe).

Während für temporale Querdisparation im Nenner ein Pluszeichen steht, ist bei nasaler Querdisparation ein Minuszeichen einzusetzen. Demnach lautet

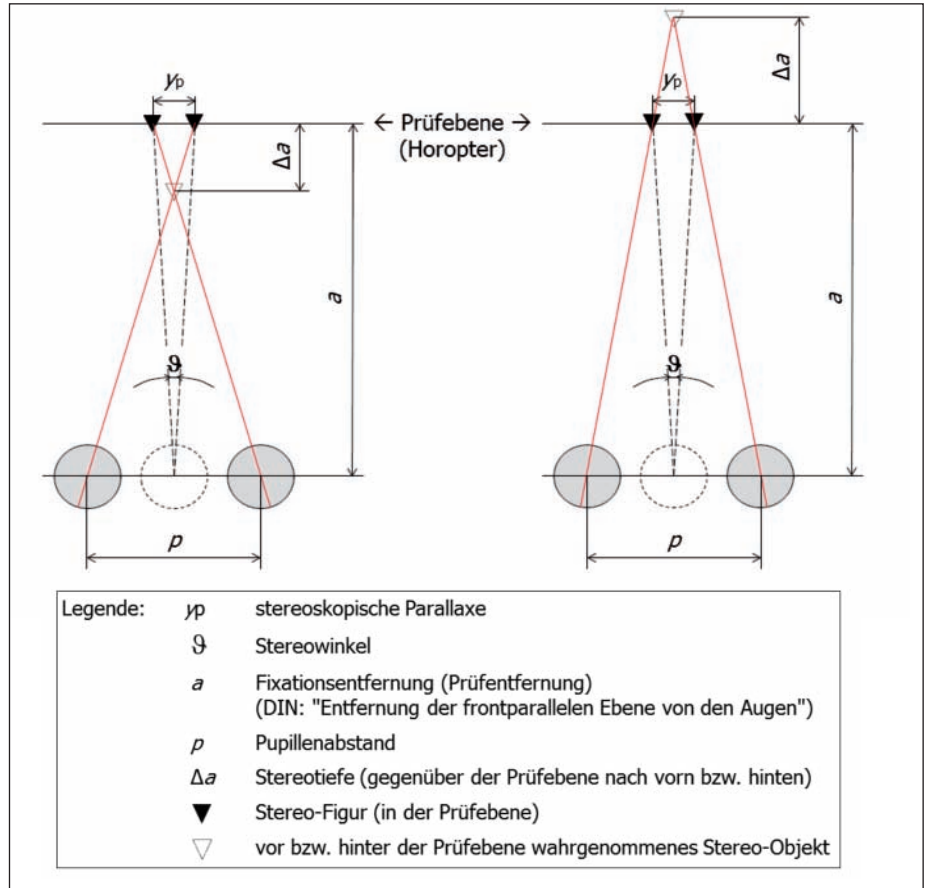


Abb. 12: Zusammenhang zwischen stereoskopischer Parallaxe, Stereowinkel und Fixationsentfernung. Dem auf die Prüfebene eingestellten Augenpaar wird – getrennt für jedes Auge – eine Stereo-Figur dargeboten, die sich ebenfalls in der Prüfebene befindet. Je nach Zuordnung der beiden Testbildanteile der Stereo-Figur zu den Einzelaugen, nimmt das Augenpaar ein Stereo-Objekt vor bzw. hinter der Prüfebene wahr. Jeweils gestrichelt dargestellt zwischen beiden Augen ist das Zyklopenauge.

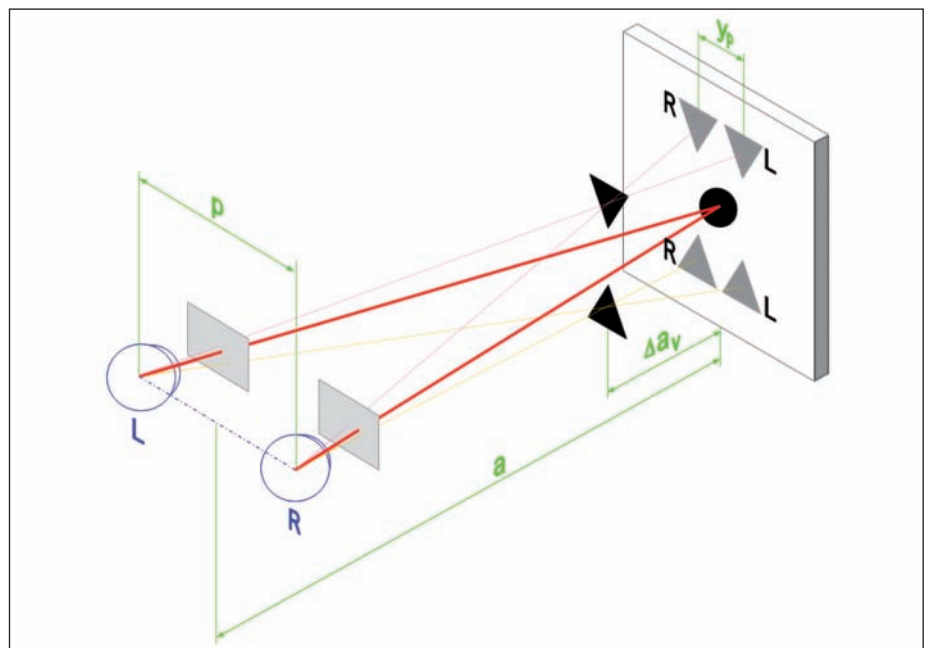


Abb. 13: Funktionsprinzip des Stereo-Dreieckstests in Normaldarbietung. Zusätzlich zum binokular sichtbaren zentralen Fixierpunkt werden dem rechten Auge mittels Polarisierungstrennung die beiden linken Dreiecke dargeboten, dem linken Auge die beiden rechten Dreiecke. Dadurch werden die Stereo-Figuren (Dreiecke) in beiden Augen mit temporaler Querdisparation abgebildet. Im Idealfall nimmt das Augenpaar oberhalb und unterhalb des Punktes jeweils ein Dreieck wahr, wobei beide Dreiecke um die Stereotiefe Δa_v vor der Prüfebene zu schweben scheinen.

die Formel für nasale Querdissparation (Wahrnehmung »nach hinten«):

$$\Delta a_h = \frac{a \cdot \gamma_p}{p - \gamma_p}$$

Formel 2: Stereotiefe bei nasaler Querdissparation (distale Stereotiefe).

Somit gelten folgende Zusammenhänge:

- Je kleiner der Pupillenabstand, umso größer die Stereotiefe.
- Je kleiner die Prüferentfernung, umso kleiner die Stereotiefe.
- Je kleiner die Stereoparallaxe, umso kleiner die Stereotiefe.

Abb. 12 u. 13 zeigen, dass neben Prüferentfernung und stereoskopischer Parallaxe auch der Pupillenabstand Einfluss auf die Stereotiefe nimmt. Auf den Stereowinkel eines Stereopsistests hingegen nimmt der Pupillenabstand keinen Einfluss; unter Testbedingungen hängt der Stereowinkel lediglich von der stereoskopischen Parallaxe der Stereo-Figur im dargebotenen Stereopsistest und von der Fixationsentfernung (Prüferentfernung) ab. Für die Darbietung eines Stereopsistests in der Fixationsentfernung a gilt somit:

$$\vartheta = \frac{\gamma_p}{a}$$

Formel 3: Stereowinkel am Trennertest (unabhängig vom Pupillenabstand; Stereoparallaxe konstant).

Bei Betrachtung eines Stereopsistests mit fester stereoskopischer Parallaxe aus zunehmender Entfernung ergibt sich gemäß Formel 3 ein kleiner werdender Stereowinkel, aber gemäß Formeln 1 und 2 entsteht dabei eine wachsende Stereotiefe. Die stereoskopische Parallaxe der jeweiligen Stereo-Figur – das heißt, die jeweilige Strecke unter dem Stereowinkel – ist bei Trennersituation konstant und der Stereowinkel folglich unabhängig vom Pupillenabstand. Anders im natürlichen Sehen: Hierbei ist die Anordnung der realen Objekte konstant, womit unter anderem

auch die Stereotiefe einen festen Wert besitzt. Aus diesem Grund hängt der Stereowinkel im natürlichen Sehen auch vom Pupillenabstand ab, wohingegen die stereoskopische Parallaxe keinen Einfluss nimmt:

$$\vartheta = p \cdot \frac{\Delta a_v}{a \cdot (a - \Delta a_v)}$$

Formel 4: Stereowinkel im natürlichen Sehen (abhängig vom Pupillenabstand; Stereotiefe konstant).

Für kleine Abstände von der Bezugsebene ($\Delta a \ll a$) gilt folgende Näherungsformel:

$$\vartheta = \frac{p \cdot \Delta a}{a^2}$$

Formel 5: Stereowinkel bei vereinfachenden Annahmen (gemäß [3, Nr. 400]).

Der Stereowinkel in den Formeln 3, 4 und 5 ist in der SI-Einheit Radiant einzusetzen, also im Bogenmaß (Internationales Einheitensystem SI = Systéme International d'Unités).

6 Methoden zur Prüfung der Stereopsis

Binokularteste erfordern ein Verfahren, mit dem jedem Auge die monokularen Testbildanteile (simultan oder sukzessiv) getrennt dargeboten werden, diese dabei aber visuell gleichzeitig wahrnehmbar sind. Derartige Verfahren werden als *Haploskopie* bezeichnet (Def. 46).

Zur Prüfung auf Stereopsis bedarf es *Stereoskopie*, also der haploskopischen Erzeugung unterschiedlich querdisparater Netzhautbilder (vgl. Def. 24). Dabei sind die verwendeten Teilbilder eines *Stereobildpaars* in der Regel nebeneinander angeordnet (Def. 47).

Die haploskopische Darbietung eines Stereobildpaars liefert eine den natürlichen Verhältnissen entsprechende querdisparate Abbildung und ermöglicht dadurch eine stereoskopische Wahrnehmung. Für Binokularteste wird Haploskopie häufig über ein Trenner-Verfahren realisiert (Def. 48).

Bei *Trenner-Verfahren* zur Binokularprüfung werden beiden Augen die zugehörigen Teilbilder bezüglich Farbe, Größe, Helligkeit, Kontrast und Struktur gleichwertig dargeboten. Ungleichwertige Bildeindrücke für beide Augen werden hingegen durch *Anaglyphen-Verfahren* erzeugt (Def. 49).

Beispiele für Stereopsisteste in Anaglyphen-Trennung: TNO-Test (Fa. Laméris, Utrecht), Stereo-Dreiecktest (in erster Ausführung des Sehprüfgeräts »Optotyp« der Firma OPA, Abb. 14).

Bei Anaglyphen-Verfahren zur Binokularprüfung kann sowohl eine akkommodativ bedingte Unruhe der Verengstellung eintreten als auch eine Dunkel-Ruhestellung aufgrund ungleicher Helligkeit für beide Augen [4, S. 15]. Auf die Fehlerquellen und Unzulänglichkeiten von Binokulartests, für deren Anwendung vor einem Auge beispielsweise ein Rotfilter und vor dem anderen Auge ein Grünfilter angeordnet wird, finden sich vielfältige Hinweise in der Literatur [zum Beispiel in 8, S. 333; 31; 32, S. 185; 33, S. 80; 34, S. 11; 35, S. 474].

Weit verbreitet sind Binokularteste, bei denen die Bildtrennung über Polarisierung realisiert wird (Def. 50).

Def. 46: **Haploskopie** (en: *haploscopia*)

Verfahren der für jedes Auge getrennten Objektdarbietung. [3, Nr. 197]

Def. 47: **Stereobildpaar** (en: *stereogram*)

Zwei entsprechend dem durchschnittlichen Pupillenabstand fotografierte oder gezeichnete Bilder desselben räumlich ausgedehnten Objektes. [nach 4, S. 271]

Def. 48: **Trenner-Verfahren**

(en: *separation method*)

Verfahren der Haploskopie, bei dem die Zuordnung der Teilbilder zum jeweiligen Auge geometrisch erfolgen kann (zum Beispiel durch eine Blende) oder physikalisch durch Polarisierungstrennung. [4, S. 292]

Def. 49: **Anaglyphen-Verfahren**

(en: *anaglyphic method*)

Verfahren der Haploskopie, bei dem die jedem Auge zugeordneten Testteile innerhalb der Gesamtfigur zweifarbig (meist Rot/Grün) differenziert sind und durch entsprechende Farbfilter betrachtet werden, wodurch eine Trennung der Testteile für rechtes und linkes Auge bewirkt wird (Anaglyphen-Trennung). [nach 4, S. 15]

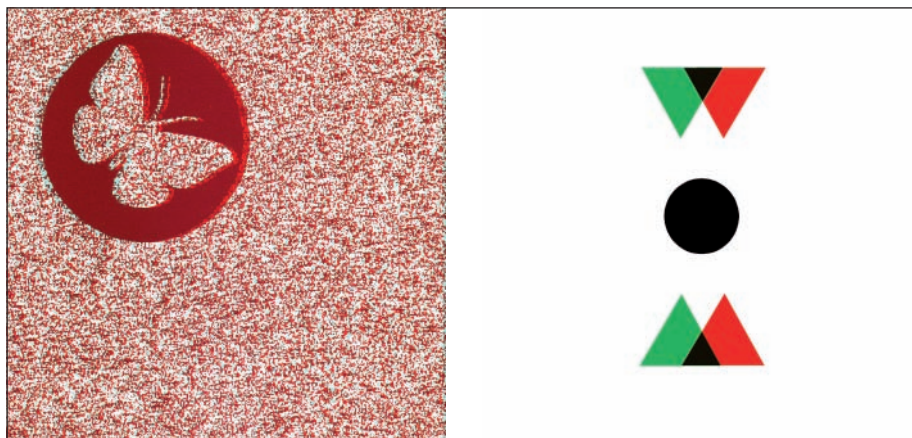


Abb. 14: Stereopsisteste in Anaglyphen-Trennung. Links: TNO-Test (Tafel 1), rechts: Stereo-Dreiecktest.

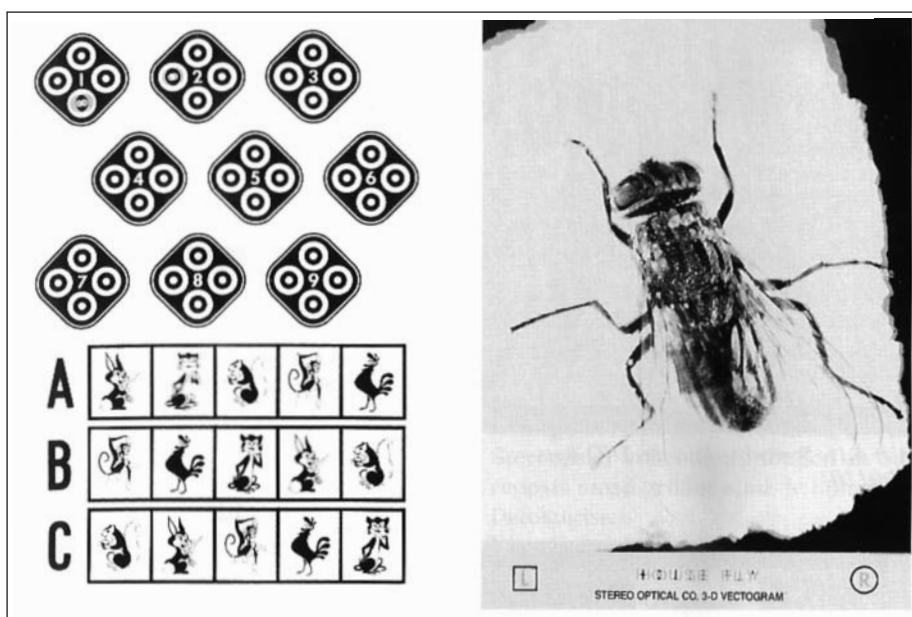


Abb. 15: Titmus-Stereotest. Wirt-Ringe, Tiere und Hausfliege (aus [6, S. 133]).

Polarisationstrennung kommt zum Beispiel in einem Vektogramm (en: *vectogram*) zur Anwendung. Dabei handelt es sich um einen Stereopsistest für die Nähe, in dem die ineinander liegenden Halbbilder in senkrecht zueinander polarisiertem Licht erscheinen, sodass die Polarisationstrennung bei Betrachtung durch entsprechende Analysatorfilter erfolgt [4, S. 298]. Die Vektogramm-Technik wird unter anderem in den bekannten Stereopsistesten von Titmus Optical Company verwendet (Beispiel: Titmus-Fliege, Abb. 15).

Nach Art der Auslöschung ist zu unterscheiden zwischen positiver und negativer Polarisationstrennung. Außerdem wird nach den Polarisationsrichtungen zwischen »L-Polarisationstrennung« und »V-Polarisationstrennung«

unterschieden, was für die nachfolgenden Betrachtungen jedoch von untergeordneter Bedeutung ist.

Mit positiver Polarisationstrennung lassen sich schwarze Testbildanteile in hellem Umfeld in einem gemeinsamen Sehfeld für beide Augen darstellen (Abb. 16) (Def. 51). Sie wird synonym auch als »positive Trennung« oder kurz als »positive Polarisation« bezeichnet [4, S. 222]. Das technische Prinzip der positiven Polarisationstrennung kommt beim Polatest-Sehprüfgerät der Firma Carl Zeiss (»Polatest Classic«) und vergleichbaren mechanischen Gerätschaften sowie bei neueren elektronischen Sehprüfgeräten zur Anwendung.

In den meisten Sehzeichenprojekten hingegen wird negative Polarisationstrennung verwendet (Def. 52). Damit las-

sen sich schwarze Testbildanteile in hellem Umfeld nur in für beide Augen getrennten Sehfeldern darstellen (Abb. 17). Sie wird synonym auch als »negative Trennung« oder kurz als »negative Polarisation« bezeichnet [4, S. 222].

Als nachteilig wird bei negativer Polarisationstrennung angesehen, dass die beiden monokular dargebotenen hellen Testbildanteile gegenseitig von dunklen Testbildanteilen überlagert werden, die aus den monokularen Einzelbildern für das jeweils andere Auge herrühren (Abb. 18). Da dies nicht natürlichen Sehbedingungen entspricht, können unruhige Bildwahrnehmung und instabiler Kontrast aufgrund von Wettstreit zwischen den beiden monokularen Bildeindrücken auftreten.

Ein weiterer Nachteil der negativen Polarisation besteht darin, dass bei hellen Zeichen (in dunklem Umfeld) keine Prüfung auf binokulare Schwärzungsgleichheit (en: *binocular contrast equality*) vorgenommen werden kann. Mit positiver Polarisationstrennung hingegen lassen sich bei Binokulartests weitgehend natürliche Sehbedingungen herstellen, was insbesondere für die Prüfung der Stereopsis von Bedeutung ist.

Außerdem gewährleisten dunkle Testzeichen (in hellem Umfeld) eine unwillkürliche Kontrolle der Akkomoda-

Def. 50: Polarisationstrennung

(en: *separation by polarization*)

Methode der haploskopischen Objektdarbietung mit Hilfe von polarisiertem Licht: Durch Polarisationsfilter als Polarisator werden die den einzelnen Augen zugeordneten Testbildanteile mit senkrecht zueinander stehender Polarisationsrichtung erzeugt. Durch entsprechend ausgerichtete Polarisationsfilter als Analysator werden die simultan getrennten Testbildanteile betrachtet. [4, S. 222]

Def. 51: Positive Polarisationstrennung

(en: *separation by positive polarization*)

Polarisationstrennung, bei der die Testbildanteile, die für ein Auge unsichtbar werden sollen, hell in hellem Umfeld verschwinden. [4, S. 222]

Def. 52: Negative Polarisationstrennung

(en: *separation by negative polarization*)

Polarisationstrennung, bei der die Testbildanteile, die für ein Auge unsichtbar werden sollen, schwarz in schwarzem Umfeld verschwinden. [4, S. 222]

tion, da hierbei jede akkommodative Veränderung den Kontrast mindern und zu grau wahrgenommenen Testfiguren führen würde. Idealerweise werden

den somit gleichzeitig Verfälschungen durch akkommodative Vergenz vermieden.

Dass allein querdisperate Netzhautbilder für Stereopsis verantwortlich sind, belegt die *Random-Dot-Stereopsis*:

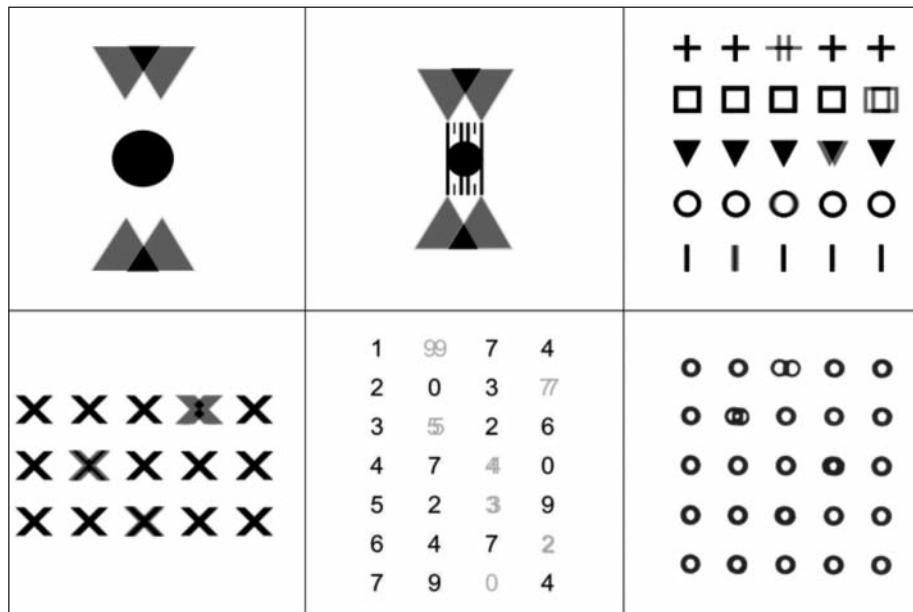


Abb. 16: Beispiele für Stereopsisteste in positiver Polarisationsstreuung. V.l.n.r.: Stereo-Dreiecktest, Valenztest, fünfzehiger differenzierter Stereotest, differenzierter Stereotest nach Osterberg, »Stereo-Test« nach Reiner (aus [36]), »AOC-Ringtest« nach Grolmann (aus [9]).

Def. 53: Random-Dot-Stereopsis
(en: random dot stereopsis)
Stereosehen ausschließlich aufgrund unterschiedlich querdisperser Netzhautbilder ohne monokulare Erkennbarkeit der Stereo-Figuren. [4, S. 235]

Def. 54: Random-Dot-Test
(en: random dot test, random dot stereogram)
Synonym: Random-Dot-Stereogramm
Stereopsistest mit Random-Dots, in denen Stereo-Figuren verborgen sind, ohne monokular erkennbare Konturen zu liefern. Er dient zur Überprüfung der Random-Dot-Stereopsis. [nach 4, S. 235]

Random-Dot-Teste bestehen aus einer Fläche mit zufällig verteilten Punkten, in die Elemente mit stereoskopischer Parallaxe, sogenannte Random-Dots, eingefügt sind. Sie werden in der Regel per Computer erzeugt, der zufallsgeneriert ein Muster aus statistisch gleich verteilten, im Einzelnen aber zufällig (en: randomly) angeordneten Punkten (en: dots) berechnet. Erst wenn gleichzeitig jedes Einzelauge die ihm zugeordnete Objektvorlage sieht, erscheint aufgrund winziger Unterschiede und der dadurch verursachten Querdispersion eine räumliche Figur in dem Zufallspunktemuster [37] (Abb. 19). Computergenerierte Random-Dot-Teste zur Darstellung am Bildschirm wurden noch vor Markteinführung der ersten elektronischen Sehprüfgeräte vorgestellt [39].

Random-Dot-Stereoskopie, also die Erzeugung eines räumlichen Seindrucks durch Random-Dots, wird häufig mit Polarisationsstreuung kombiniert. Beispiele: Random-Dot Handtest (en: random dot hand test), Random-Dot Stufenfentest (en: random dot step test) [38] (Abb. 20). Der TNO-Test hingegen ist ein Random-Dot-Test für Anaglyphen-Trennung (vgl. Abb. 14).

Random-Dot-Stereopsis stellt einen Sonderfall der Stereopsis dar und wird

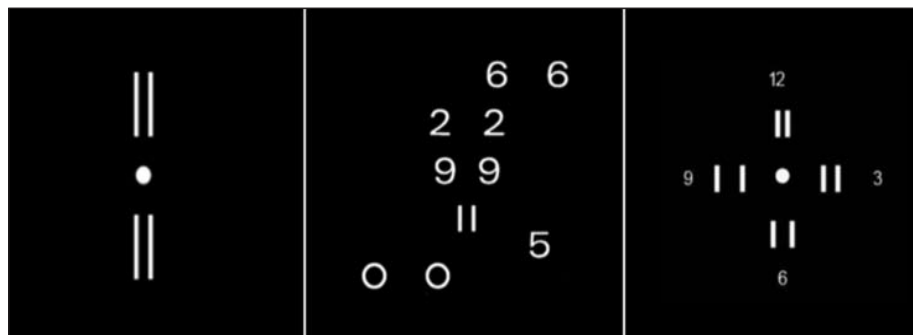


Abb. 17: Beispiele für Stereopsisteste in negativer Polarisationsstreuung. V.l.n.r.: Doppel-Stereotest nach Osterberg, »Stereo-Zifferntest« nach Osterberg (aus [36]), »Detail-Stereotest« (Firma Nidek) (aus [36]).

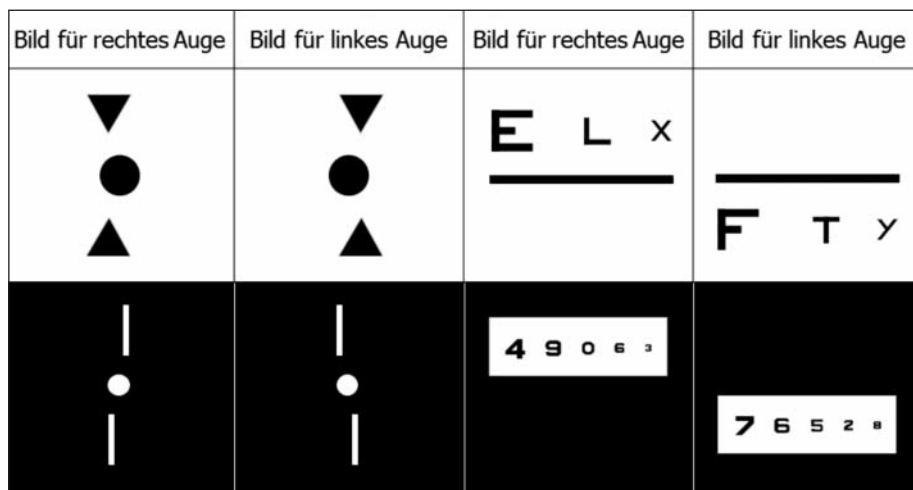


Abb. 18: Monokulare Testbildanteile bei positiver und bei negativer Polarisationsstreuung im Vergleich. Links: Stereopsisteste (oben: Stereo-Dreiecktest nach Haase, unten: Doppel-Stereotest nach Osterberg), rechts: Refraktionsgleichgewichtsteste (oben: Polatest-Sehprüfgerät, unten: Scheinprojektor).

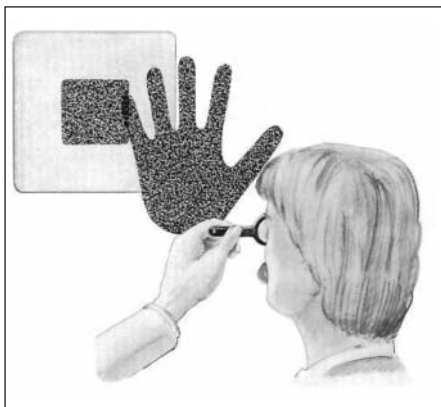


Abb. 19: Random-Dot Handtest für das Polatest Sehprüfgerät. Der Test stellt eine Kombination aus positiver Polarisationstrennung und Random-Dot-Stereoskopie dar (aus [38]).

auch als »globale Stereopsis« (en: *global stereopsis*) bezeichnet [8, S. 357; 6, S. 125–126; 40, S. 17]. Damit wird die Fähigkeit des Augenpaares beschrieben, allein aufgrund unterschiedlich querdisparater Netzhautbilder eine räumliche Struktur zu erkennen, obwohl die Testfigur für die beiden Einzelaugen nicht erkennbar ist.

Das Gegenstück zur Bezeichnung globale Stereopsis ist die »lokale Stereopsis« (en: *local stereopsis*), bei der Querdisparationen von definierten Konturen erzeugt werden [6, S. 125–126]. Entsprechend findet sich im Englischen dafür auch die Benennung »contour stereopsis« [40, S. 17]. Gewöhnliche Stereopsisteste wie zum Beispiel der Stereo-Dreieckstest oder differenzierte Stereoteste prüfen daher die lokale Stereopsis. Lokale Stereopsis ist aufgrund der praktischen Bedeutung bei der Binokularprüfung die Stereopsis im engeren Sinne. Sofern es nicht globale Stereopsis (Random-Dot-Stereopsis) betrifft, wird daher im Folgenden der Begriff Stereopsis im Sinne von »lokale Stereopsis« verwendet.

Mit dem Zylinderraster-Verfahren hergestellte Stereopsisteste können ohne weitere Hilfsmittel zur Bildtrennung betrachtet werden (Abb. 21). Das Verfahren ließ sich der Züricher Augenarzt und Physiologe Hess im Jahr 1912 patentieren (Def. 55).

Das Wörterbuch der Optometrie bezeichnet das Zylinderraster-Verfahren als »Linsentrastertrenner«. Diese Be-



Abb. 20: Random-Dot-Teste für die MKH. V.l.n.r.: Bildeindruck ohne Analysatoren bzw. monokular mit Analysatoren, Random-Dot Handtest (binokular mit Analysatoren), Random-Dot Stufentest (binokular mit Analysatoren).

nennung wird hier nicht verwendet, um Verwechslung mit dem einstigen »Linsentrasterverfahren« nach Siemens-Berthon zu vermeiden, einem additiven Verfahren der Farbenfotografie [41, S. 250]. Ein Beispiel für das Zylinderraster-Verfahren in Kombination mit Random-Dot-Stereoskopie ist der Lang-Stereotest [42] (Abb. 22).

Sehprüfgeräte unterscheiden sich auch darin, ob die monokularen Test-

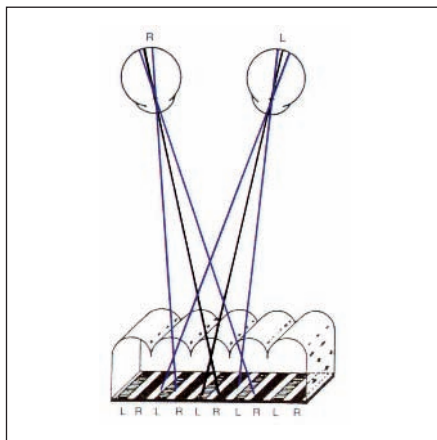


Abb. 21: Prinzip des Zylinderraster-Verfahrens nach W. R. Hess. Unter jedem Halbzyylinder befinden sich zwei Bildstreifen, von denen einer nur vom rechten Auge und der andere nur vom linken Auge gesehen werden kann. Die Zylinder wirken wie Trennerstreifen, die jedem Auge nur den Blick auf die ihm zugeordneten Bildstreifen ermöglichen (aus [6, S. 131]).

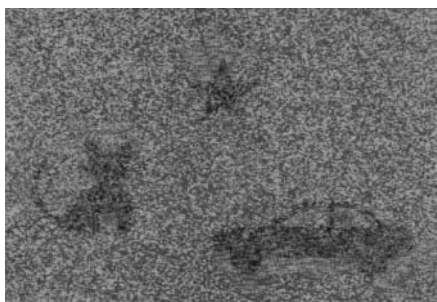


Abb. 22: Lang-Stereotest.

bildanteile von Binokulartests gleichzeitig (*simultan*) oder alternierend (*sukzessiv*) dargeboten werden (Def. 56 u. 57).

Sukzessive Darbietung erfolgte beispielsweise über einen synchronisierten LCD-Vorsatz (Shutter) bei elektronischen Sehprüfgeräten mit phasendifferenzhaplooskopischer Bildtrennung; Beispiel: Sehprüfgerät »CompuVist« (Firma Rodenstock). Das erste computergestützte Sehprüfgerät nach diesem Prinzip wurde in den Jahren 1988 bis 1990 unter dem Namen »Visucat« an der Fachhochschule Aalen entwickelt [31; 43]. Bei den Geräten der ersten Generation war noch keine flimmerfreie Darbietung möglich. Erst höhere Bildwiederholfrequenzen moderner Displays

Def. 55: Zylinderraster-Verfahren
(en: *cylinder raster method*)

Parallele Anordnung schmaler Halbzyylinder mit vertikaler Achse. Werden die Halbbilder eines Stereobildpaares entsprechend der Breite der Halbzyylinder des Zylinderraster-trenners in Streifen aufgeteilt und die zueinander gehörigen Streifen des linken und rechten Halbbilds jeweils nebeneinander angeordnet, so ermöglicht der darübergelegte Zylinderrastertrenner eine simultane haplooskopische Objektdarbietung.
[nach 4, S. 173–174]

Def. 56: Simultan-Verfahren
(en: *simultaneous method*)

Verfahren zur gleichzeitigen Darbietung von monokular oder binokular zu vergleichenden Sehzeichen oder Testbildanteilen.
[4, S. 264]

Def. 57: Sukzessiv-Verfahren
(en: *successive method*)

Verfahren zur alternierenden Darbietung von monokular oder binokular zu vergleichenden Sehzeichen oder Testbildanteilen.
[4, S. 281]

sorgen dafür, dass zumindest bewusst kein Flimmern mehr wahrnehmbar ist. Es wurde darüber diskutiert, ob durch die sukzessive Darbietung Einflüsse auf die Sensorik des Binokularsehens auftreten können, insbesondere bei alter Fixationsdisparation mit ausgeprägten visuellen Hemmungen. Fraglich war dabei auch, ob es ausreicht, wenn das menschliche Auge kein Flimmern mehr wahrnimmt, das heißt, ob diese Qualität der sukzessiven Darbietung der simultanen Darbietung physiologisch gleichwertig ist. Geklärt wurden diese Fragen nie, und zwischenzeitlich hat sich die Technik der meisten elektronischen Sehprüfgeräte derart verändert, dass die sukzessive Bildtrennung kaum noch verwendet wird.

Schließlich besteht die Möglichkeit, Stereopsis mit direkten Messverfahren zu bestimmen. Dazu werden reale Objekte in unterschiedlicher Distanz zueinander angeordnet (Beispiele: Dreistabchengerät nach Helmholtz, Stereoidometer nach Monjé, Howard-Dolman-Apparat).

Stereoskopie kommt auch für andere Zwecke zur Anwendung, zum Beispiel bei optometrischen Sehübungen (*en: visual therapy*). Dafür werden beispielsweise variable Vektogramme verwendet, in denen die Halbbilder gegeneinander verschiebbar sind. Dadurch können Stereoparallaxe und Querdisparation schrittweise verändert werden. Für Trainingszwecke existiert darüber hinaus eine Vielzahl an Geräten respektive optischen Vorrichtungen zur Betrachtung von Stereobildpaaren. Ein solches Stereoskop (*en: stereoscope*) ist zum Beispiel das Bernell-O-Scope [40, S. 197–198]. Im Rahmen von Sehübungen zielen Stereopsisteste mehr auf die Verbesserung von Sehfunktionen ab als auf Messung der Stereopsis und deren Verwendung als Korrektionskriterium. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in [40]. ■

Ein weiterer Auszug aus der Masterarbeit wird sich mit dem Stereogrenzwinkel und zugehörigen Testmöglichkeiten befassen.

Literaturhinweise

1. STOLLENWERK, G.: Stereopsis – Überprüfung, Bewertung und optometrische Bedeutung. Masterarbeit. Hochschule Aalen. 2011.
2. Zentralverband der Augenoptiker: Arbeits- und Qualitätsrichtlinien für Augenoptik und Optometrie. Vorschlag zur Änderung zum Teil Optometrische Prüf- und Messverfahren. Schriftenreihe zur Augenoptik. Band 12. 5. Auflage, 2010.
3. DIN 5340. Begriffe der physiologischen Optik. Beuth Verlag, Berlin, 1998.
4. GOERSCH, H.: Wörterbuch der Optometrie. 3. Auflage. DOZ-Verlag Optische Fachveröffentlichung. Heidelberg, 2004.
5. GOERSCH, H.: Die Grundlagen des normalen Binokularsehens. Deutsche Optikerzeitung. 1990;10:22-28.
6. BERKE, A.: Optometrisches Screening. DOZ-Verlag Optische Fachveröffentlichung. Heidelberg, 2009.
7. DIEPES, H.: Das nicht-querdisparate Tiefensehen und seine Bedeutung für die Raumwahrnehmung. Sonderdruck der WVAO. 1979;30:73-93.
8. DIEPES, H.: Refraktionsbestimmung. 3. Auflage. DOZ-Verlag Optische Fachveröffentlichung. Heidelberg, 2004.
9. GOERSCH, H.: Stereopsis unter phorischer Belastung. Deutsche Optikerzeitung. 1982;9:8-18.
10. BRÜCKNER, R.: Die Korrektur von Heterophorien mit Fixationsdisparation. Optometrie. 1989; 1:3-18.
11. WOO G. C., READING R. W.: Panum's area explained in terms of known acuity mechanism. Br J Physiol Opt. 1978; 32:30-37.
12. BOMAN, D. K., KERTESZ, A. E.: Effect of stimulus parameters on fusional and stereoscopic performance. Am. J Optom Physiol Opt. 1985; 62:222-227.
13. HECKMANN, T., SCHOR, C. M.: Panum's fusional area estimated with a criterion-free technique. Percept Psychophys. 1989; 45:297-306.
14. KERTESZ, A. E.: Disparity detection within Panum's fusional areas. Vision Res. 1973; 13:1537-1543.
15. FRIEDBURG, D.: Decreasing local stereopsis with increasing horizontal disparity, indicating decreasing density of binocular cortical projection towards the limits of Panum's area. Albrecht v Graefes Arch Klin Exp Ophthalmol. 1980; 213:109-114.
16. HAMPTON, D. R., KERTESZ, A. E.: The extent of Panum's area and the human cortical magnification factor. Perception. 1983; 12:161-165.
17. SCHOR, C., WESSON, M., ROBERTSON, K. M.: Combined effects of spatial frequency and retinal eccentricity upon fixation disparity. Am J Optom Physiol Opt. 1986;63:619-626.
18. DINER, D. B., FENDER, D. H.: Hysteresis in human binocular fusion: temporalward and nasalward ranges. J Opt Soc Am A. 1987; 4:1814-1819.
19. DINER, D. B., FENDER, D. H.: Dependence of Panum's fusional area on local retinal stimulation. J Opt Soc Am A. 1988;5:1163-1169.
20. SCHOR, C., WOOD, I., OGAWA, J.: Binocular sensory fusion is limited by spatial resolution. Vision Res. 1984; 24:619-626.
21. RICHARDS, W.: Chromatic constraints upon Panum's limits. Am J Optom Arch Am Acad Optom. 1971; 48:306-311.
22. FENDER, D., JULESZ, B.: Extension of Panum's fusional area in binocularly stabilized vision. J Opt Soc Am. 1967; 57:819-830.
23. RICHARDS, W.: Independence of Panum's near and far limits. Am J Optom Arch Am Acad Optom. 1971; 48:103-109.
24. SCHOR, C. M., TYLER, C. W.: Spatio-temporal properties of Panum's fusional area. Vision Res. 1981; 21:683-692.
25. WOO, G. C.: The effect of exposure time on the foveal size of Panum's area. Vision Res. 1974; 14:473-480.
26. WOO, G. C.: Temporal tolerance of the foveal size of Panum's area. Vision Res. 1974; 14:633-635.
27. WESEMANN, W.: Beiträge zur Physiologie des Stereosehens, zur Form des Horopters und zur Größe des Panumbereichs. Deutsche Optikerzeitung. 2000; 4:22-31/5:38-45.
28. CRELIER, R.: Warum am Valenztest auch ohne Winkelfehlsichtigkeit Doppelbilder auftreten können. Deutsche Optikerzeitung. 2004; 1:44-49/2:26-31.
29. SCHOBER, H.: Das Sehen. Bd II. 2. Auflage. Fachbuchverlag. Leipzig, 1958.
30. STOLLENWERK, G.: Untersuchungen an einem Zeigertest mit zentraler Stereo-Figur. Deutsche Optikerzeitung. 1998; 9:28-35.
31. DIEPES, H.: Erzeugung von Sehproben mit dem Computerbildschirm – Möglichkeiten und Grenzen. Optometrie. 1990; 1:3-11.
32. GLASER, T.: Die Phorien – Ihre Prüfung und Korrektur. VEB Verlag Technik. Berlin, 1970.
33. METHLING, D.: Bestimmen von Sehhilfen. 2. Auflage. Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart, 1996.
34. HAASE, H. J.: Zur Fixationsdisparation. Verlag Optische Fachveröffentlichung. Heidelberg, 1995.
35. RÜSSMANN, W.: Untersuchung des Binokularsehens. In: KAUFMANN, H. (Hrsg): Strabismus. 2. Auflage. Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart, 1995.
36. STOLLENWERK, G.: D6 – ein neuer differenzierter Stereotest. Neues Optikerjournal. 1998; 4:42-48/5:10-16/6:14-19/7:8-24-28.
37. GOERSCH, H.: Die Grundlagen der Stereopsis. Neues Optikerjournal. 1980; 11:17-23.
38. PAYSAN, H. W., SCHÜRLE, H.: Random-Dot-Teste für das Polatest-Sehprüfgerät. Der Augenoptiker. 1985; 5:20-21.
39. RINGLEB, P.: Ergänzung der Binokularprüfung durch computergestützte Darbietung von Random-Dot-Tests. Sonderdruck der WVAO. 1985; 37:84-89.
40. SCHEIMAN, M., WICK, B.: Clinical management of binocular vision: Heterophoric, accommodative, and eye movement disorders. 3rd Ed. Lippincott Williams & Wilkins. Philadelphia, 2008.
41. MÜTZE, K.: et al. ABC der Optik. Verlag Werner Dausien. Hanau/Main, 1961.
42. MAIDOWSKY, W.: Der Lang-Stereotest. Neues Optikerjournal. 1984; 12:36-37.
43. DIEPES, H.: Beidäugiges Sehen – Zusammenhänge zwischen Physik und Physiologie. Der Augenoptiker. 1991;2:52-54.