

Dr. Helmut Goersch,
Berlin

Die Grundlagen des normalen Binokularsehens

1. Vorwort

Das menschliche Sehorgan hat hauptsächlich zwei Aufgaben zu bewältigen, die visuelle Erkennung und die visuelle Raumwahrnehmung.

Bei der visuellen Erkennung handelt es sich um die Erkennung von Objekten und Objekteinheiten. Die visuelle Raumwahrnehmung besteht aus Richtungswahrnehmung und Tiefensehen, die zusammen die Erkennung der gegenseitigen Lage von Objekten im Raum liefern.

Alle diese Aufgaben sind im allgemeinen binokular besser und sicherer zu lösen als monokular (Abb. 1).

2. Normales Binokularsehen

Die im Oktober 1986 erschienene Norm DIN 5340 „Begriffe der physiologischen Optik“ [2] gibt darüber Auskunft, was unter **normalem Binokularsehen** zu verstehen ist. Dort heißt es*:

Binokularsehen ist das Sehen bei beidäugiger Wahrnehmung.

Man unterscheidet:

- a) Beidäugiges Simultansehen ohne Fusion.
 - b) Beidäugiges Simultansehen mit Fusion (binokulares Einfachsehen).
 - c) Beidäugiges Simultansehen mit Stereopsis.
- Normales Binokularsehen liegt vor, wenn bei normaler Korrespondenz Stereopsis besteht und ständig in allen Blickrichtungen für Ferne und Nähe fusioniert wird.

Binokularsehen ist also beidäugiges Simultansehen, das heißt gleichzeitiges Sehen mit beiden Augen. Bei der Unterteilung des Binokularsehens werden drei Qualitätsstufen unterschieden. Für die höchste Qualitätsstufe des Binokularsehens muß Stereopsis (Stereosehen) vorhanden sein.

Als Grundlage des normalen Binokularsehens sollen nun die im oben zitierten Normtext verwendeten Begriffe **Fusion**, **Korrespondenz** und **Stereopsis** sowie zusätzlich der besonders wichtige Begriff **Fixationsdisparation** erörtert werden.

3. Fusion und Korrespondenz

Zum Begriff **Fusion** heißt es in DIN 5340:

Fusion ist der Vorgang, der zur Verschmelzung der Bildeindrücke beider Augen führt.

Man unterscheidet folgende Komponenten:

- a) Motorische Fusion:
Durch einen Fusionsreiz ausgelöste Vergenz.
- b) Sensorische Fusion:
Sensorischer Vorgang, welcher ohne Vergenz zu binokularem Einfachsehen führt, und zwar auch bei Disparation.

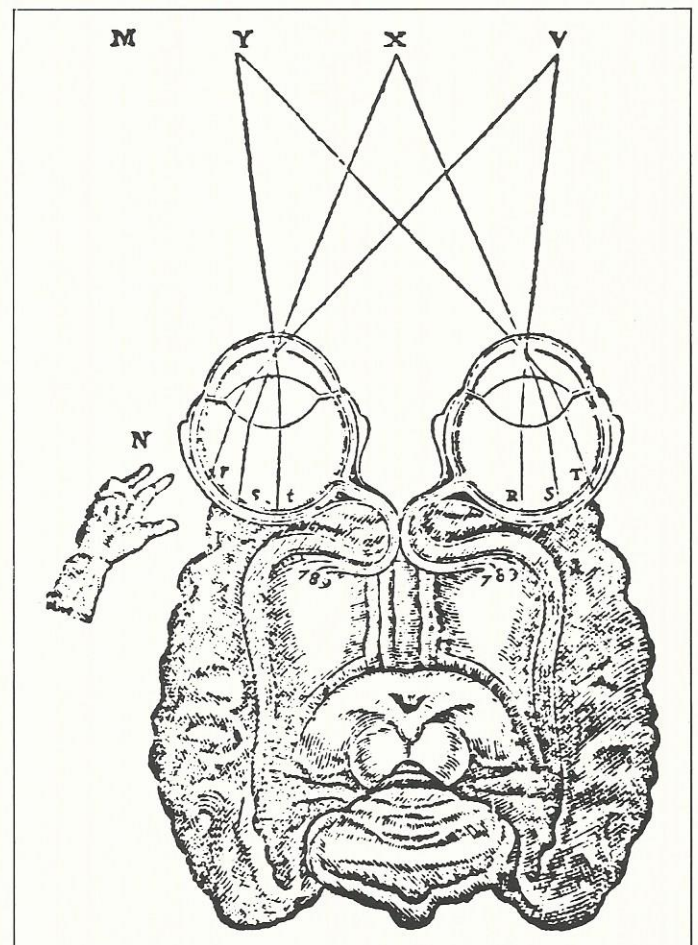


Abb. 1 Darstellung korrespondierender Netzhautstellen nach Descartes (1637), aus [1]

*Auch alle anderen halbfett gedruckten Begriffe sind in [2] erklärt

Beim beidäugigen Simultansehen liefert jedes der beiden Augen eines Augenpaares einen Bildeindruck. Diese Bildeindrücke müssen fusioniert, das heißt verschmolzen werden. Dafür ist in der Regel zuerst eine motorische Fusion nötig, das ist eine **Vergenz**, die durch einen **Fusionsreiz** ausgelöst wird. Eine Vergenz ist eine gegensinnige Bewegung beider Augen. So wird **Konvergenz** zum Sehen in die Nähe benötigt und **Divergenz** zum Betrachten eines fernen Objektes, wenn zuvor die Augen auf die Nähe ausgerichtet waren.

Ein Fusionsreiz [3] ist ein Anreiz für das Sehzentrum, die Augen zu einer Vergenz zu veranlassen. Wie kommt ein Fusionsreiz zustande, und was soll die dadurch ausgelöste Augenbewegung bewirken?

Damit die beiden durch die Einzelaugen vermittelten Bildeindrücke einen Reiz zur Fusion ausüben können, müssen sie hinreichend gleich sein, das heißt, sie müssen in Form, Struktur, Größe und Helligkeit so weitgehend übereinstimmen, daß vom Gehirn die beiden Bildeindrücke als zu ein und demselben Objekt gehörig erkannt werden. Diese Bedingung wird auch als „objektive Fusionsbedingung“ bezeichnet [4]. Sind solche fusionierbaren Bilder vorhanden, dann kommt motorische Fusion durch die Augenbewegungsmuskeln zustande, bis die Bilder auf beiden Netzhäuten im Idealfall in den Mitten der Netzhautgruben liegen.

Von jeder Netzhautstelle wird in den Außenraum eine ganz bestimmte Richtungsempfindung projiziert, das ist der **Richtungswert** dieser Netzhautstelle. Alle Richtungswerte beziehen sich auf den Richtungswert „Geradeaus“, den beim Monokularsehen im Normalfall die Mitte der Netzhautgrube besitzt. Ein vom Einzelauge in der Mitte seiner Netzhautgrube abgebildetes Objekt wird als „Geradeaus vor dem Auge“ befindlich erkannt.

Bei der gemeinsamen Tätigkeit beider Augen führt die Betrachtung der Richtungswerte auf den Begriff **Korrespondenz**. Dazu sagt die Norm:

Korrespondenz ist die sensorische Beziehung der Netzhäute beider Augen bezüglich der Richtungswerte (Sehrichtungsgemeinschaft).

Man unterscheidet:

a) Normale Korrespondenz:

Die Foveolae beider Augen haben gleiche Richtungswerte.

b) Anomale Korrespondenz (nur als Folge einer Heterotropie):

Die Foveolae beider Augen haben ungleiche Richtungswerte.

Beide Augen bilden eine Sehrichtungsgemeinschaft. Im Idealfall korrespondieren die Mitten der Netzhautgruben miteinander und haben jeweils den Richtungswert „Geradeaus“, und im Binokularsehen geht die Richtungsempfindung von der Mitte zwischen beiden Augen aus, vom sogenannten Zyklopaugenauge.

Eine sehr eindrucksvolle Veranschaulichung dieser Sehrichtungsgemeinschaft ist der in Abb. 2 dargestellte Fensterversuch. Auf einer Fensterscheibe befindet sich ein Fixationspunkt, der vom Augenpaar bizentral abgebildet wird. Rechts im Außenraum in Richtung der Fixierlinie des linken Auges ist ein Baum, der für das rechte Auge nicht sichtbar ist, links in

Richtung der Fixierlinie des rechten Auges ein Haus, das für das linke Auge nicht sichtbar ist. In beiden Richtungen signalisieren die Einzelaugen „Geradeaus“, und durch die Sehrichtungsgemeinschaft beider Augen wird (vom Zyklopaugenauge) der binokulare Seheindruck „Baum und Haus in gleicher Richtung“ vermittelt.

Damit wird ein wesentlicher Sachverhalt besonders deutlich, nämlich die Tatsache, daß die Richtungswerte der einzelnen Netzhautstellen beider Augen völlig unabhängig davon sind, ob auf ihnen fusionierbare oder nicht fusionierbare Bilder liegen. Richtungswerte und Korrespondenz sind also von dem Vorhandensein irgendwelcher Netzhautbilder unabhängige Eigenschaften der Augen.

Dabei heißen Netzhautstellen beider Augen mit gleichem Richtungswert **korrespondierende Netzhautstellen**, Stellen mit in beiden Augen ungleichem Richtungswert heißen **disparate Netzhautstellen**.

Um diese Begriffe genauer verstehen zu können, muß die Fusion noch weiter erläutert werden. Ein Augenpaar will irgendein Objekt betrachten, das sogenannte „Objekt des Interesses“. Es entwirft davon zwei fusionierbare Netzhautbilder, die eine motorische Fusion auslösen. Als Ergebnis der motorischen Fusion (Vergenz) liegen dann die Bilder dieses Objektes „bizentral“, das heißt gleichzeitig in den Mitten der Netzhautgruben beider Augen.

Der „Bi-Fixationsreflex“ hat die Augen also in die richtige Lage gebracht, in die sogenannte **Orthostellung**. Das Objekt liegt jetzt auf der Blicklinie des Zyklopaugenauges und wird sozusagen automatisch sensorisch fusioniert, da die Bildorte auf den beiden Netzhäuten gleiche Richtungswerte besitzen.

Außer dem Fixationsobjekt können noch weitere der im Objektraum befindlichen Objekte auf korrespondierenden Netzhautstellen abgebildet sein. Alle gleichzeitig korrespondierend abgebildeten Objekte liegen auf dem sogenannten **Horopter**. Alle anderen Objekte aber, die vor oder hinter dem Horopter liegen, werden auf Netzhautstellen mit ungleichem Richtungswert abgebildet, auf disparaten Netzhautstellen. Aufgrund der unterschiedlichen Richtungswerte der beiden Netzhautbildorte müßte ein nicht auf dem Horopter befindliches Objekt eigentlich doppelt gesehen werden. Aber **Diplopie** (Doppeltsehen) ist so ziemlich das Schlimmste, was einem Augenpaar widerfahren kann. Das Doppeltsehen wird in diesem Fall dadurch verhindert, daß eine sensorische Fusion auch dann stattfinden kann, wenn eine disparate Abbildung mit nicht zu großer **Disparation** vorliegt (das heißt, wenn der Unterschied der Richtungswerte beider Bildorte nicht zu groß ist). Trotz unterschiedlicher Richtungswerte einigen sich die Netzhautstellen beider Augen auf eine gemeinsame Richtungsempfindung, sofern und solange sich auf ihnen fusionierbare Bilder befinden. Das ist das sogenannte „Panumse-

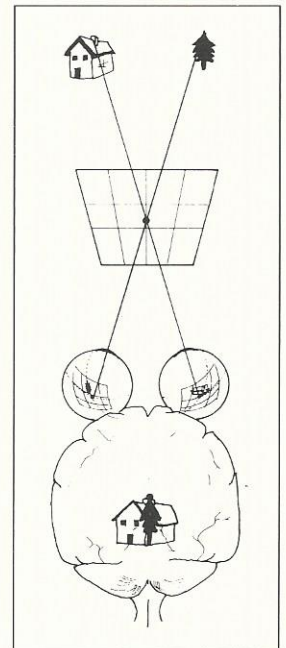


Abb. 2 Der Fensterversuch nach Hering, aus [1]

hen“, und die Bereiche auf den Netzhäuten, in denen diese sensorische Fusion disparater Netzhautbilder funktioniert, heißen **Panumbereiche**. Die Objekte, deren Netzhautbilder innerhalb von Panumbereichen zu liegen kommen, bilden beiderseits des Horopters den **Panumraum** (region of binocular single vision in Abb. 3).

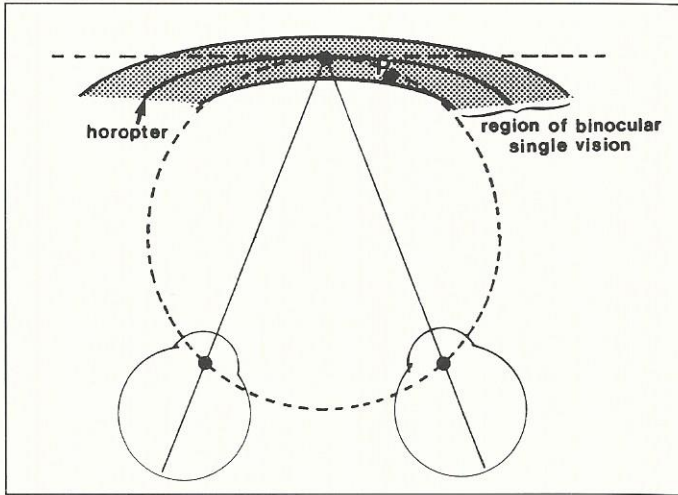


Abb. 3 Horopter und Panumraum, aus [1]

Durch diesen Sachverhalt wird es verständlich, daß eine Aussage über die Korrespondenz nur gemacht werden kann, wenn zur Prüfung der Korrespondenz in beiden Augen nicht fusionierbare Bilder vorhanden sind. Denn bei fusionierbaren Bildern läßt sich nicht feststellen, ob das binokulare Einfachsehen dadurch zustande kommt, daß die Bildorte auf beiden Netzhäuten gleiche Richtungswerte besitzen oder dadurch, daß trotz ungleicher Richtungswerte sensorisch fusioniert wird. Darauf nimmt die exakte Erklärung in der Norm Rücksicht, in der es heißt:

Korrespondierende Netzhautstellen sind Netzhautstellen in beiden Augen, die im Binokularesehen auch für nicht fusionierbare Bilder gleiche Richtungswerte haben.

Und entsprechend:

Disparate Netzhautstellen sind Netzhautstellen in beiden Augen, die im Binokularesehen für nicht fusionierbare Bilder ungleiche Richtungswerte haben.

Damit sind nun die beiden wichtigsten Grundlagen des Binokularesehens erörtert worden. Das ist einerseits die Fusion, deren motorischer Anteil durch die Richtungswerte derjenigen Netzhautorte gesteuert wird, auf denen das Objekt des Interesses abgebildet ist und deren sensorischer Anteil auf eine hinreichende Gleichheit der beiden Netzhautbilder angewiesen ist, und andererseits die Korrespondenz, die auf der Zusammenarbeit von Netzhautstellen beider Augen mit gleichem Richtungswert basiert.

Die bisherigen Erörterungen zeigen übrigens auch, daß Sensorik und Motorik des menschlichen Sehorgans schon durch die für die Fusion nötige senso-motorische Steuerung der Augenbewegungen untrennbar miteinander verbunden sind.

4. Stereopsis

Der dritte grundlegende Begriff ist die **Stereopsis**. Dazu sagt die Norm:

Stereosehen (Stereopsis) ist gleichbedeutend mit querdisparatem Tiefensehen.

Tiefensehen (räumliches Sehen) ist die Wahrnehmung, daß Objektpunkte verschieden weit vom Beobachter entfernt liegen.

Querdisparates Tiefensehen ist eine Tiefenwahrnehmung, die nur durch unterschiedlich querdisparate Abbildung von Objektpunkten auf der Netzhaut verursacht wird und daher nur binokular möglich ist.

Voraussetzung für jegliches Stereosehen ist das beidäugige Simultansehen mit Fusion. Zuvor wurde klargestellt, daß alle auf dem Horopter befindlichen Objekte auf korrespondierenden Netzhautstellen abgebildet und dadurch sozusagen automatisch fusioniert werden. Aber für die auf disparaten Netzhautstellen liegenden Bilder von Objekten außerhalb des Horopters findet ebenfalls sensorische Fusion statt, wenn die Disparation der Abbildung nicht zu groß ist, da diese Bilder im natürlichen Sehen hinreichend gleich sind.

Eingangs wurde bereits erwähnt, daß sich die Raumwahrnehmung aus der Richtungswahrnehmung und dem Tiefensehen zusammensetzt. Bei der sensorischen Fusion von disparat liegenden Bildern haben sich die entsprechenden Netzhautstellen beider Augen auf eine gemeinsame binokulare Richtungswahrnehmung geeinigt. Gleichwohl besitzen diese Netzhautstellen nach wie vor ihre unterschiedlichen Richtungswerte; und der Unterschied dieser Richtungswerte wird nun so ausgewertet, daß die Entfernung des „Stereo-Objektes“ vom Fixationsobjekt binokular richtig erkannt wird.

Je weiter nämlich ein Objekt vom Horopter entfernt ist, um so größer ist der Unterschied in den Richtungswerten der Bildorte auf beiden Netzhäuten, die sogenannte **Querdisparation**. „Quer“ deshalb, weil die Augen nebeneinander liegen und daher der Unterschied in seitlicher Richtung – eben „quer“ – vorhanden ist.

Das wichtigste Wort in dem Satz, mit dem die Norm das querdisparate Tiefensehen erklärt, ist also das Wort unterschiedlich: „Stereopsis ist eine Tiefenwahrnehmung, die nur

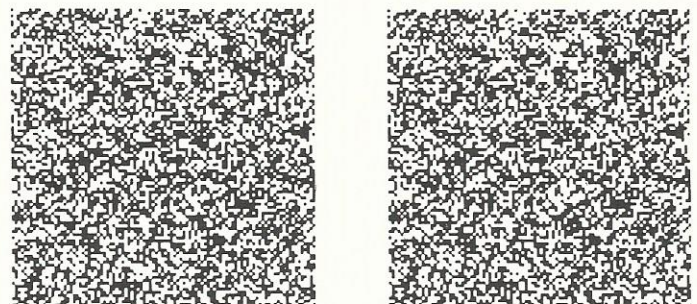


Abb. 4 Random-Dot-Stereobildpaar, aus [1]. (Wird das Bildpaar aus etwa 40 cm Entfernung so betrachtet, daß sich die Fixierlinien beider Augen etwa 20 cm davor schneiden und damit – ähnlich wie beim Fensterversuch nach Hering – das linke Auge den rechten Teil des Bildpaares, das rechte Auge den linken Teil betrachtet, so erscheint räumlich nach hinten ein großes T)

durch **unterschiedlich** querdisparate Abbildung von Objektpunkten auf der Netzhaut verursacht wird.“

Die Unterschiede in den Querdisparationen liefern die Wahrnehmung der verschiedenen Tiefen. Das Stereosehen ist damit ein relatives Tiefensehen.

Da auch viele monokulare Faktoren zum Tiefensehen beitragen, müssen übrigens zur Prüfung der reinen Stereopsis stereoskopische Bildvorlagen benutzt werden, bei denen die querdisparaten Netzhautbilder keinerlei Hinweise auf das Aussehen des Stereo-Objektes liefern. Das wird in der sogenannten Random-Dot **Stereoskopie** [5] realisiert (Abb. 4).

5. Fixationsdisparation

Wenn die auf den beschriebenen drei Grundlagen Fusion, Korrespondenz und Stereopsis beruhenden Funktionen ständig in allen Blickrichtungen für Ferne und Nähe funktionieren, dann liegt normales Binokularsehen vor.

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde aber stillschweigend angenommen, daß die Augen immer ruhig in der jeweiligen Orthostellung stehen könnten. Doch das ist nicht der Fall, denn schon im Monokularsehen verschiebt sich das Netzhautbild eines fixierten Objektpunktes ständig aufgrund von immer vorhandenen winzigen unregelmäßigen Bewegungen des Auges, die vollkommen normal sind (physiologischer Mikro-Nystagmus). Abb. 5 zeigt ein Beispiel für die Änderungen des Netzhautbildortes beim Fixieren eines Objektpunktes;

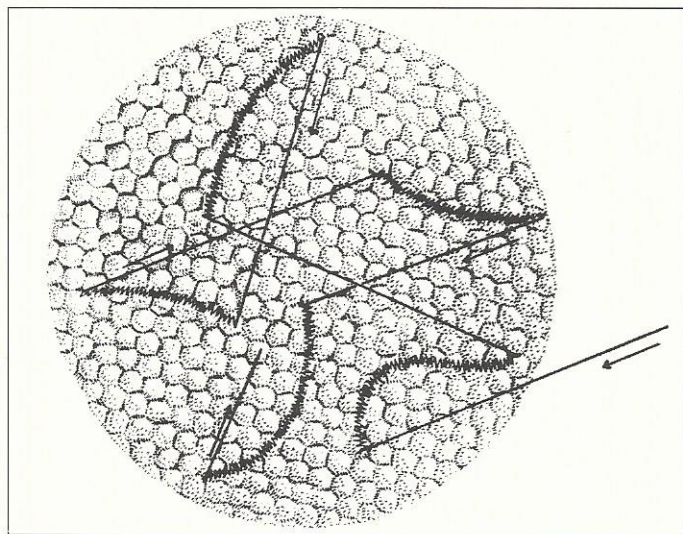


Abb. 5 Schwankungen des Netzhautbildortes bei Fixation eines Objektpunktes, aus [1]

die **Fixation** wird in einem Netzhautbereich von etwa 0,05 mm Durchmesser gehalten, was einem **Sehwinkel** von ungefähr zehn Minuten entspricht. In diesem Bereich sind die drei verschiedenen Typen von Augenbewegungen gut zu erkennen, die bei konstanter Fixation eines Objektpunktes auftreten: schnelle kleine Sakkaden, die immer wieder zum Zentrum zurückführen (gerade Linien mit Pfeil, Länge bis zu 20 Winkelminuten, Dauer etwa 25 ms), und langsamere Gleitbewegungen, die vom Zentrum wegführen (gebogene Linien, Länge etwa fünf Winkelminuten, Dauer etwa 0,2 s), wobei die Gleitbewegungen von Zitterbewegungen überlagert sind (Länge etwa 15 Winkelsekunden, Frequenz 50 Hz und mehr).



ARK 2000 S

Das Auto-Profilophthalmometer und Autorefraktometer in einem Gerät.

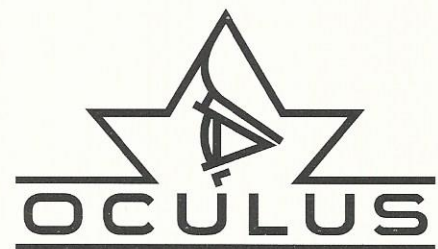
Durch den wachsenden Einsatz asphärischer Flächen in der Kontaktoptik gewinnt die exakte Messung des Hornhautprofils zunehmend an Bedeutung. Mit dem ARK 2000 S von NIDEK erfassen Sie schnell und präzise die notwendigen Hornhautparameter:

- zentrale Hornhautradien
- periphere Hornhautradien
- Hornhautexzentrizität

und ...

... gar nicht so nebenbei ist das ARK 2000 S auch ein hervorragendes Autorefraktometer.

Interessiert? Rufen Sie uns an!



ENTWICKLUNG · BERATUNG · VERTRIEB

OCULUS Optikgeräte GmbH

Münchholzhäuser Straße 29, D-6330 Wetzlar 17
Telefon: 06 41/20050, Telex: 4821 700 ocul d, Telefax: 06 41/200555

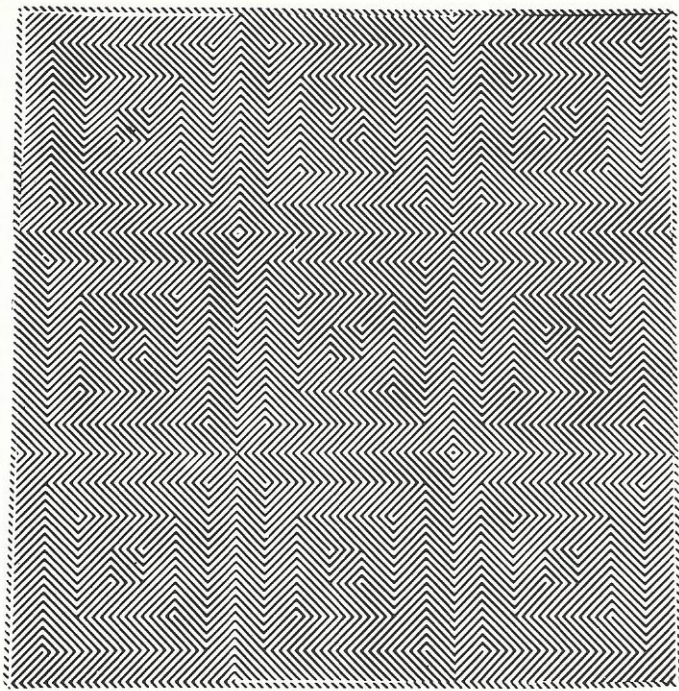


Abb.6 Reginald Neale, Square of Three, 1964, aus [1]

Diese Unruhe in der Augenstellung kann durch Abb. 6 gut demonstriert werden. Wird eine Stelle inmitten des Bildes fixiert, so täuschen die Fixationsschwankungen eine Unruhe im Bild vor.

Diese Fixationsunruhe geht nun in beiden Augen zum guten Teil unkoordiniert vor sich, so daß ein Fixationsobjekt nicht ständig exakt korrespondierend abgebildet werden kann. Statt dessen findet eine disparate Abbildung statt, die sich laufend nach Betrag und Richtung ändert. Der Vorgang des Panumsehens sorgt dann mit sensorischer Fusion für das binokulare Einfachsehen auch des Fixationspunktes. Die ständig wechselnde Abbildung des Fixationspunktes aufgrund des Mikro-Nystagmus der Augen wird in [6] als „dynamische“ Fixationsdisparation bezeichnet.

Allgemein sagt die Norm zur **Fixationsdisparation**:

Fixationsdisparation ist ein Zustand des normalen binokularen Einfachsehens, bei dem der Fixationspunkt mit einer Disparation innerhalb des zugehörigen Panumbereiches abgebildet wird.

Neben der dynamischen Fixationsdisparation ist nun bei den meisten Augenpaaren noch eine nach Richtung (und meist auch nach Betrag) gleichbleibende Fixationsdisparation vorhanden, die zur Unterscheidung als „statische“ Fixationsdisparation bezeichnet wird [6]. Ursache für diese Art der Fixationsdisparation ist die phorische Belastung bei der motorischen Kompensation einer **Heterophorie**. Zur Einsparung von Energie im Vergenzsystem (Verringerung der ständigen motorischen Fusionsanstrengung) weichen die Augen von der Orthostellung in Richtung auf die Ruhestellung des heterophorischen Augenpaares ab. Die statische Fixationsdisparation stellt die sensorische Anpassung an diese Abweichung dar, und sie ist größer als die dynamische. Abb. 7 zeigt das Beispiel einer Exo-Fixationsdisparation.

Da die Mehrzahl aller Augenpaare heterophorisch ist und

die prismatische Vollkorrektur sich noch nicht allgemein durchgesetzt hat, ist diese Art des Sehens, nämlich das Sehen mit statischer Fixationsdisparation, die häufigste Art des normalen Binokularsehens. Anzustreben ist jedoch das anstrengungsfreie ideale Binokularsehen, das heißt das Sehen mit bizentraler Fixation bei binokularer Vollkorrektur.

Laut Norm ist die Korrespondenz normal, wenn die Foveolae beider Augen gleiche Richtungswerte haben. Gemeint ist damit, daß dann normale Korrespondenz vorliegt, wenn diejenigen Netzhautstellen beider Augen, die im Binokularsehen den Richtungswert „Geradeaus“ besitzen, in den Mitten der Netzhautgruben (also „bizentral“) liegen. Wie bereits in 3. dargestellt, ist diese Art der normalen Korrespondenz der Idealfall (bizentrale Korrespondenz). Aber auch bei einer reversiblen Verschiebung der Korrespondenz (Fixationsdisparation zweiter Art oder disparate Korrespondenz [6]) aufgrund einer nicht oder nicht voll korrigierten Heterophorie ist normale – wenn auch nicht mehr ideale – Korrespondenz vorhanden. Im übrigen heißt es in der Norm, daß anomale Korrespondenz nur als Folge einer **Heterotropie** (also nur beim manifesten Schielen) auftreten kann.

Diese kurze Darlegung der Grundlagen des normalen Binokularsehens sollte den Anstoß dafür liefern, sich noch näher mit den vier Säulen

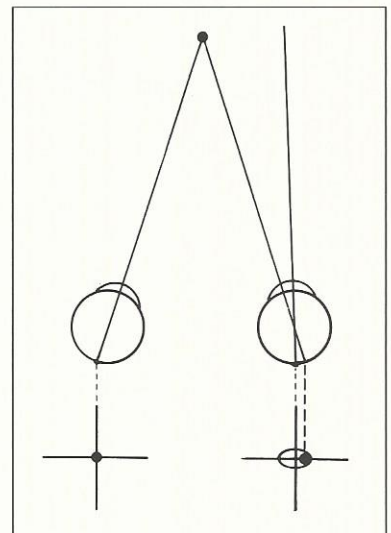


Abb. 7 Exo-Fixationsdisparation, aus [6]

Fusion, Korrespondenz, Stereopsis und Fixationsdisparation

zu beschäftigen, von denen das normale Binokularsehen getragen wird.

Literaturhinweise

- [1] Howard Solomons: „Binocular Vision“, William Heinemann Medical Books Ltd., London 1978
- [2] DIN 5340: „Begriffe der physiologischen Optik“, Beuth Verlag Berlin, Oktober 1986
- [3] Helmut Goersch: „Einführung in das Binokularsehen, Teil VIII“, der Augenoptiker 43(1):17–22, 1988
- [4] Helmut Goersch: „Einführung in das Binokularsehen, Teil III“, der Augenoptiker 36(4):26–29, 1981
- [5] Heinz-Wilhelm Paysan/Hermann Schürle: „Random-Dot-Teste für das Polatest-Sehprüfgerät“, der Augenoptiker 40(5):20–21, 1985
- [6] Helmut Goersch: „Fixationsdisparation erster und zweiter Art“, Neues Optikerjournal 29(11):45–51, 1987

Anschrift des Autors:

Dr. Helmut Goersch, Staatliche Fachschule für Optik und Fototechnik Berlin, Einsteinufer 43 – 53, 1000 Berlin 10