3. Wahrnehmung als Konstruktion

3.1 . Instrumentelle Funktion der Wahrnehmung

3.2. Konstruktion

3.3. Extraretinale Information: Propriozeption und Motorische Kommandos

3.4. Blickbewegung

- **3.4.1. Passive Augenbewegungen**
- **3.4.2. Blockade der aktiven Augenbewegung**
- **3.4.3. Minor Motor Anomalies (MMA) (Kleine Bewegungsabweichungen)**

3.5. Das Reafferenzprinzip (Reafferenz, Exafferenz, Efferenzkopie)

- **3.5.1. Reafferenz und Exafferenz**
- **3.5.2. Efferenzkopie**
- **3.5.3. Erklärung von Bewegungswahrnehmung durch das Reafferenzprinzip**
- **3.5.4. Revision des Reafferenzprinzips: Evaluation statt Elimination**

3.6. Zwei Bewegungssysteme: STIER- und SCHAU-System

- **3.6.1. STIER-System (OKN-System u. VOR-System)**
- **3.6.2. SCHAU-System (PURSUIT-System)**
- **3.6.3. Induzierte Bewegung**

3.7. Dissoziation zwischen bewusster Wahrnehmung und Handlungssteuerung

- **3.7.1. Räumliche Dissoziation**
  - 3.7.1.1. Zeigen bei induzierter Bewegung
  - 3.7.1.2. Blindsight
  - 3.7.1.3. Wo-System, Was-System bzw. dorsaler und ventraler Strang
- **3.7.2. Zeitliche Dissoziation**

3.8. Wahrnehmungslernen

- **3.8.1. Reafferenzmodell und Katzenversuche von Hein & Held**
- **3.8.2. Humanversuche zum Wahrnehmungslernen**
  - 3.8.2.1. Typen optischer Transformationen
  - 3.8.2.2. Prismenparadigma
  - 3.8.2.3. Wie misst man Adaptation?
  - 3.8.2.4. Aktive vs. passive Bewegung
  - 3.8.2.5. Mechanismen der Adaptation
  - 3.8.2.7. Spezifische visumotorische Adaptation
  - 3.8.2.8. Wahrnehmungslernen durch Blickbewegung

3.9 Raumwahrnehmung

- **3.9.1. Einige monokulare Tiefencues**
- **3.9.2. Binokulare Tiefencues**
  - 3.9.2.1. Konvergenzwinkel
  - 3.9.2.2. Querdisparation
- **3.9.3. Korrespondierende Netzhautstellen, Horopter, Panum'scher Bereich**
- **9.9.4. Das Zuordnungsproblem**

3. Wahrnehmung als Konstruktion

3.1 . Instrumentelle Funktion der Wahrnehmung

Die beiden bisher besprochenen Ansätze fragen, wie die Umgebung in der Wahrnehmungswelt **abgebildet** wird. In der klassischen Psychophysik handelt es sich um eine **dimensionale**, in der Gestaltpsychologie um eine **strukturelle** Abbildung. In keinem der beiden Ansätze kommt die **Tätigkeit** des Beobachters vor. Schon seit den Anfängen der Experimentalpsychologie hat es aber eine andere Psychophysik gegeben, die stärker die **instrumentelle Bedeutung der Wahrnehmung** für das Verhalten betont hat. Prominentester Vertreter: **Hermann v. Helmholtz**.

Wahrnehmung steht im Dienste der Handlung:

- Wir müssen bei der **Fortbewegung** Hindernissen ausweichen und die Richtung kontrollieren, damit wir da ankommen, wo wir hinwollen
- Wir müssen beim **Greifen** Lage und Größe des Objektes berücksichtigen
- etc. ...

Voraussetzung für die instrumentelle Funktion der Wahrnehmung ist, dass die Information über die Umwelt in einer Weise zugänglich wird, dass sie zur Verhaltens- und Handlungssteuerung **auch benutzt** werden kann. Dazu ist es notwendig, dass die Wahrnehmung über die momentane Beziehung der Umwelt zu den Handlungs- und Bewegungsmöglichkeiten des Wahrnehmenden informiert.
Und in der Tat: Die Beziehung des Wahrnehmenden zur Umgebung ist bereits im proximalen Reiz enthalten, denn die retinale Abbildung der Umwelt ist stets das **Interaktionsprodukt** von Umwelt und Beobachter. **Eigenbewegungen** (Blickbewegungen, Kopfbewegungen, Lokomotion.) **verändern laufend die Reizinformation**, d.h. die Abbildung der Umwelt auf der Retina. Die retinale Abbildung der Umwelt ist also nicht nur von Eigenschaften der Umwelt abhängig, sondern auch von Lage und Bewegung des Wahrnehmenden in dieser Umwelt. Zur Handlungssteuerung kann diese Reizinformation aber nur dann dienen, wenn der Einfluss von Lage und Bewegungen des Wahrnehmenden vom Einfluss der Außenwelt unterschieden werden kann.

Ein Beispiel aus der Arbeit „Das Reafferenzprinzip - Apologie und Kritik." (MITTELSTAEDT, 1971):

> Der Sherif will den Bösewicht erschießen. Der Bösewicht hüpft hin und her. Mit jeder Bewegung des Bösewichts verlagert sich dessen retinales Abbild im Auge des Sherifs. Der Sherif folgt dem Bösewicht mit den Blicken. Mit jeder Blickbewegung verlagert sich ebenfalls das Retinabild des Bösewichts im Auge des Sherifs ständig. Der Sherif muss aber die Pistole nach der **wahren** Position des Bösewichtes richten. D.h.: Der Sherif muss unterscheiden können, ob die Verlagerungen des Retinabildes des Bösewichtes, auf Bewegungen des Bösewichtes, oder auf seine eigenen Blickbewegungen zurückgehen.

Wie werden die durch Eigenbewegungen erzeugten Reizänderungen von den durch Umweltänderungen erzeugten unterschieden?

3.2. Konstruktion

Es ist schon in der Antike (GRÜSSER, 1986) vermutet worden, dass in die Wahrnehmung nicht nur Information von der Sinnesoberfläche einfließt, sondern dass auch Information über die Bewegungen des Beobachters selbst mitberücksichtigt werden. Demzufolge leistet die Wahrnehmung keine Abbildung der Umwelt; vielmehr ist sie ein **Konstruktionsprozess**, der Informationen aus verschiedenen Quellen mitverrechnet.

3.3. Extraretinale Information: Propriozeption und motorische Kommandos

Im Falle der visuellen Wahrnehmung, heißt die Information, die zu der Information aus der Retina hinzutritt:

EXTRARETINAL

Die visuelle Wahrnehmungswelt ist demnach eine **Konstruktion auf der Grundlage retinaler und extraretinaler Information**. Welcher Art könnte die extraretinale Information sein, die über die Eigenbewegungen des Beobachters informiert? Hier gibt es zwei Kandidaten: die **propriozeptive Information,** die von den **Druck-** und **Dehnungsrezeptoren** in Muskeln und Gewebe zum ZNS fließt sowie die **motorischen Kommandos,** die vom ZNS an die Effektoren (Bewegungsorgane) fließen**:**

Sinnesorgane, die **Glied- und Körperbewegungen melden** hat Sherrington (1906) als **Propriozeptoren** bezeichnet, im Unterschied zu den **Exterozeptoren** (Rezeptoren in Auge, Ohr, Nase, Mund, Haut), die Reize aus der Außenwelt aufnehmen.

Der Vollständigkeit halber hier noch Sherringtons dritter Begriff: **Enterozeptoren** informieren über mechanische und chemische Ereignisse aus den Eingeweiden, (z.B. Barorezeptoren und Chemorezeptoren aus dem CarotisSinus, die den Blutdruck, bzw. die Kohlensäure- und Sauerstoffkonzentration registrieren und an der Regelung von Kreislauf und Atmung teilnehmen).

Propriozeptiv ist einmal die

- Information von **Druck- + Dehnungsrezeptoren** in Muskeln und Gewebe (Muskelspindeln und Sehnenorgane), die über die Bewegung und Lage der Gliedmaßen informieren . Man nennt sie **kinästhetisch**. Propriozeptiv ist ferner die
- Information von den Rezeptoren des **Gleichgewichtsorganes (Vestibularorgan**, s. Abb. 105), die über Bewegung und Lage des Körpers informieren (**Körperlagesinn**).

Die Propriozeptoren informieren über die **tatsächlichen** Körperbewegungen. Im Gegensatz dazu informieren die motorischen Kommandos über die **beabsichtigten (intendierten)** Bewegungen**.**

Unterschied zwischen diesen beiden Kandidaten extra - retinaler Information:

- **Propriozeptive Information** ist (wie auch die retinale Information) **Sinnesinformation**, die von der Peripherie (dem Sinnesorgan) zum ZNS, also

zentripetal, d.h. **nach INNEN** fließt. Sie ist extraretinale **AFFERENZ**, die die **tatsächliche** Bewegung spezifiziert.

- **Motorische Kommandos** fließt vom ZNS zur Peripherie (dem Effektor = Bewegungsorgan), also **zentrifugal**, **nach AUSSEN**. Sie ist **EFFERENZ**, die die **beabsichtigte (intendierte)** Bewegung spezifiziert. Wenn im folgenden von Efferenzen die Rede ist, ist stets Kommandoinformation über intendierte Bewegungen gemeint.

3.4. Blickbewegung

Während bei komplexen Eigenbewegungen (Lokomotion, Kopfbewegungen, Bewegung der Gliedmaßen, etc.) sowohl Afferenzen als auch Efferenzen die wahrgenommene Lage der Dinge beeinflussen, scheinen bei der **Blickbewegung** nur die **Efferenzen** entscheidend zu sein. Dies lässt sich zeigen, wenn man die **tatsächliche Blickbewegung** von der **beabsichtigten Blickbewegung trennt,** wenn man also dafür sorgt, dass die Augen sich anders verhalten, als vom Beobachter beabsichtigt. Dies gelingt mit folgenden Methoden:

3.4.1. Passive Augenbewegungen

Mit Hilfe eines Stiftes, der mit einem Saugnapf am Augapfel befestigt wird, kann das Auge vom Experimentator unabhängig von den Blickwechselintentionen der Versuchsperson bewegt werden. Eine solche Bewegung heißt **passiv,** da sie nicht vom Wahrnehmenden selbst initiiert ist. Wird das Auge **passiv** in eine Richtung bewegt, während der Proband die Fixationsstellung beizubehalten versucht (SKAVENSKI, HADDAD & STEINMAN, 1972); so nimmt man eine scheinbare **Umweltbewegung in Gegenrichtung** wahr (s. Abb. 105). Das ist auch dann der Fall, wenn die passive Bewegung so gestaltet ist, dass sie in ihrer Geschwindigkeit und Amplitude einer Willkür - Sakkade ähnlich ist. Als Sakkade bezeichnet man die **ruckartigen** Blickbewegungen, mit denen man vom einen Fixationsobjekt zum nächsten wechselt. Ihre Dauer schwankt, je nach Amplitude, zwischen 10 ms und 80 ms.

Offenbar wird die **passive** Augenbewegung bei der Konstruktion der bewussten Wahrnehmungswelt nicht in Rechnung gestellt. Die Wahrnehmung ist so, als wenn das Auge sich nicht bewegt hätte. Information über die passive Augenbewegung scheint der bewussten Wahrnehmung nicht zugänglich zu sein. Tatsächlich können Vpn, deren Auge bei absoluter Dunkelheit passiv bewegt wird, über die Richtung der Bewegung nur ganz vage Aussagen machen (BRINDLEY & MERTON, 1960).

Der Scheinbewegung bei passiven Augenbewegungen bedeutet aber keineswegs, dass für die Bewegungswahrnehmung eine „retinale Bewegung“ notwendig ist. Dies wird deutlich, wenn man das Auge an der beabsichtigten Bewegung hindert:

3.4.2. Blockade der aktiven Augenbewegung

Es gibt verschiedene Methoden, die intendierte Bewegung des Auges zu verhindern: z.B. Festhalten des Auges mit Hilfe eines Stiftes, s.o., Lähmung, etc. Die Befundlage ist in allen Fällen dieselbe: Wird das Auge an der intendierten Bewegung gehindert, so nimmt der Proband eine **Umweltbewegung in Richtung der intendierten Bewegung** wahr, obwohl die retinale Reizung unverändert bleibt. Man muss sich das so vorstellen, dass das wahrgenommene Objekt mit jeder Blickwechselintention mitspringt, so wie ein negatives

Nachbild (s.u.) mit jedem Blickwechsel mitspringt. Die Wahrnehmung ist so, als hätte sich die Umwelt mit der intendierten Augenbewegung mitbewegt. Offenbar werden die Reizverhältnisse so interpretiert, als wenn das Auge die intendierte Bewegung ausgeführt hätte. Wieder scheint das tatsächliche Augenverhalten bei der Konstruktion der bewussten Wahrnehmungswelt nicht berücksichtigt zu werden.

Entsprechend ist auch die Bewegungswahrnehmung bei passiver Augenbewegung (s.o.) zu deuten: Die Reizänderung wird so interpretiert, **als wenn sich das Auge intentionsgemäß verhalten, sich also nicht bewegt hätte.** Die retinale Änderung wird folglich auf die Außenwelt attribuiert. Da tatsächliche Augenverhalten scheint nicht berücksichtigt zu werden, sondern nur das **beabsichtigte** (**intendierte**) Augenverhalten, in diesem Fall das **konstante Fixieren**.

3.4.3. Minor Motor Anomalies (MMA) (Kleine Bewegungsabweichungen)

Die praktikabelste Methode zur Trennung von intendierter und tatsächlicher Augenbewegung sind die Minor Motor Anomalies (MMA). Wenn man eine Zeit lang die Muskeln anspannt, dann kommt es zu einer **post – tetanischen Potenzierung**: Die Kontraktion der Muskeln wird nachfolgend für eine kurze Zeit erleichtert. (Ein beliebtes Kinderspiel nutzt diesen Sachverhalt aus: Wenn man einige Minuten lang den Arm gegen eine Wand presst, scheint er sich in Ruhestellung wie von selbst anzuheben). Einen analogen Effekt kann man auch bei den äußeren Augenmuskeln erzeugen:

Nimmt man einige Minuten lang eine exzentrische Blickposition (z.B. nach links) ein, dann verändert sich vorübergehend die Beziehung der Efferenzen zu den durch sie initiierten Blickbewegungen. Es kommt für eine gewisse Zeit zu einem Nacheffekt mit der Wirkung, dass Blickbewegungen **in Richtung der exzentrischen Blickposition erleichtert** und solche **in Gegenrichtung erschwert** werden. Die Blickbewegungsamplituden in Richtung der exzentrischen Blickposition sind nun weiter, diejenigen in Gegenrichtung hingegen kürzer als es den efferenten Impulsen normalerweise entspricht (z.B. SHEBILSKE, 1986, s.u.). Jetzt stimmen also tatsächliche und intendierte Blickbewegung nicht überein. Auch diese Methode führt zum selben Ergebnis: Es kommt je nach Blickrichtung zu Richtungstäuschungen, die sich nur damit erklären lassen, dass **nur die intendierte, nicht aber die tatsächliche Blickbewegung** in Rechnung gestellt wird: Hat man einige Zeit lang ein Objekt im linken (rechten) Gesichtsfeld fixiert, so fallen Blickbewegungen nach links (rechts) weiter aus als gewohnt, mit dem Ergebnis, dass sich das Zielobjekt nach rechts (links) zu verlagern scheint. Hingegen fallen Blickbewegungen nach rechts (links) kürzer aus als gewohnt, mit dem Ergebnis, dass sich das Zielobjekt ebenfalls nach rechts (links) zu verlagern scheint (s. Abb. 103). Diese Scheinverlagerungen kommen dadurch zustande, dass nur die beabsichtigte, nicht aber die tatsächliche (zu kurze oder zu weite) Blickbewegung in die Konstruktion der Wahrnehmungswelt einfließt. Die Wahrnehmung ist stets so, als wenn das Auge sich intentionsgemäß (nicht zu weit oder zu kurz) bewegt hätte.

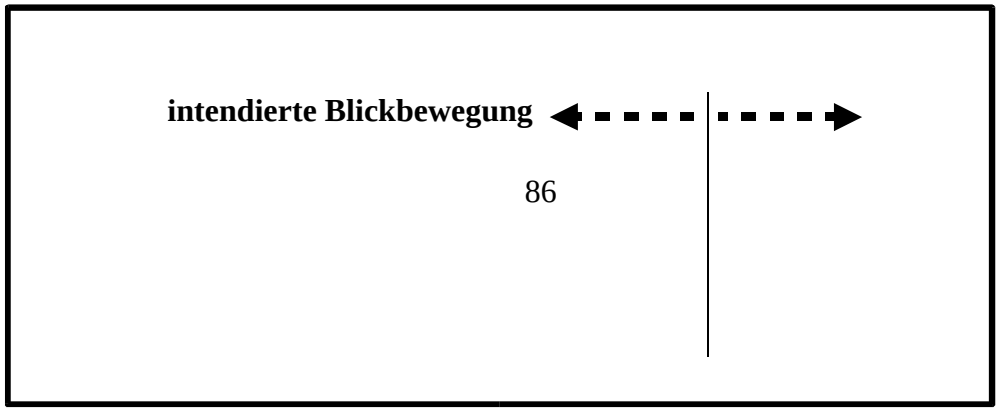


Abb. 103: Minor motor anomalies durch post-tetanische Potenzierung

3.5. Das Reafferenzprinzip

3.5.1. Reafferenz und Exafferenz

Solche Befunde lassen sich sehr gut mit dem **Reafferenzprinzip** von v. HOLST, E. & MITTELSTAEDT, H. (1951) (s.a. MITTELSTAEDT, H., 1971) erklären:

- **Reafferenz** ist eine Afferenz, also **Sinnesinformation**, und zwar diejenige Änderung der retinalen Abbildung der Umwelt, die durch **Eigenbewegung** erzeugt wird. Der Begriff Re-Afferenz bezeichnet gleichsam die **afferente Rückmeldung der eigenen Bewegung.** Wende ich den Blick in einer starren unbewegten Umgebung, dann ist die gesamte Afferenz die Reafferenz. Die Reafferenz ist zu unterscheiden von der

- **Exafferenz:** Dies ist diejenige afferente Änderung, die durch eine Änderung in der **Außenwelt** erzeugt wird. Wenn ich also meine Augen nicht bewege (indem ich z.B. einen ruhenden Punkt fixiere) während ein Reiz sich bewegt, dann ist die gesamte afferente Änderung die Exafferenz.

In den meisten Fällen haben wir beides: Wir bewegen uns, erzeugen also Reafferenzen und zugleich bewegt sich auch was in der Umwelt, wir haben also auch Exafferenzen. D.h. Der ökologische Regelfall ist, dass die Gesamtafferenz aus Exafferenz und Reafferenz besteht.

REAFFERENZ + EXAFFERENZ = GESAMT-AFFERENZ

Das Reafferenzprinzip dient zur Lösung der Frage: **Wie kann der Organismus zwischen Reafferenz und Exafferenz unterscheiden?**

3.5.2. Efferenzkopie

Die Antwort des Reafferenzprinzips lautet: Die Unterscheidung erfolgt dadurch, dass die Efferenz (also die Information über die **beabsichtigte** Bewegung) bei der Interpretation der Afferenz in Rechnung gestellt wird: Das Kommando zur Steuerung der Blickbewegung **überdauert die Blickbewegung** in Form einer

EFFERENZKOPIE

Das Reafferenzprinzip impliziert die Annahme, dass die Efferenzen in der benachbarten Ganglienmasse eine Erregungsausbreitung bedingen, welche die Bewegung überdauert. Diese Efferenzkopie ist natürlich ganz spezifisch für die jeweilige Bewegung und sie entspricht genau der durch diese Bewegung zu erzeugenden Reafferenz. Inzwischen sind physiologische Korrelate entdeckt worden, welche die Funktion der Efferenzkopie erfüllen könnten (z.B. Thier, 2001).

Das Reafferenzprinzip besagt nun: **Die retinale Afferenz wird mit der Efferenzkopie verglichen, und die Differenz zwischen der aufgrund der Efferenz zu erwartenden Reafferenz einerseits und der tatsächlichen Afferenz andererseits bestimmt die Wahrnehmung** (Abb. 104). Wenn, wie im ökologischen Normalfall, intendierte und tatsächliche Blickbewegung übereinstimmen, entspricht diese Differenz genau der Exafferenz.

GESAMTAFFERENZ* minus *REAFFERENZ* = *EXAFFERENZ

bzw.:

GESAMTAFFERENZ* plus *EFFERENZKOPIE* → *WAHRNEHMUNG

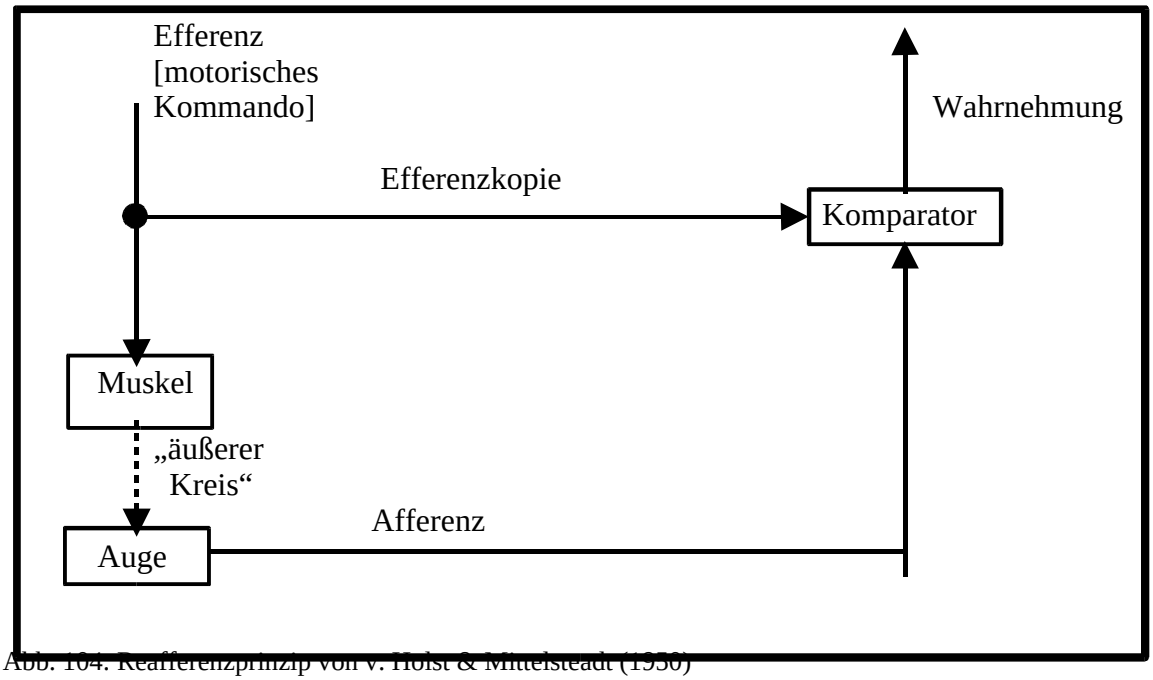


Abb. 104: Reafferenzprinzip von v. Holst & Mittelsteadt (1950)

Nach v. Holst & Mittelsteadt (1950) (s. auch Mittelsteadt, 1971) können Efferenz (motorische Kommandoinformation) und Afferenz (Sinnesdaten) miteinander „verrechnet“ werden, weil beides Nervenimpulse sind. Sie sind also gewissermaßen in derselben Sprache kodiert.

3.5.3. Erklärung von Bewegungswahrnehmung durch das Reafferenzprinzip

Zur Anwendung des Reafferenzprinzips auf die Bewegungswahrnehmung verwenden wir folgende Abkürzungen:

EK=Efferenzkopie, GA=Gesamtafferenz

also: **GA + EK → Wahrnehmung**

- **Passive Augenbewegungen** (s.o. u. Abb. 104)**: EK = 0;**
  d.h. **GA → Wahrnehmung**, also: GA wird auf die Umwelt attribuiert: Man sieht eine der Gesamtafferenz entsprechende Bewegung. Da die Afferenz der passiven Bewegung entgegen gerichtet ist, ist auch die gesehene Bewegung der passiven Bewegung entgegengerichtet.

- Blockade **einer aktiven Augenbewegung (s.o.): GA=0;**

d.h. **EK Wahrnehmung,** also: EK wird auf die Umwelt attribuiert: Man sieht eine Bewegung in Weite und Richtung der intendierten (aber verhinderten) Bewegung.

- **Verfolge ich einen fliegenden Vogel am Firmament**, so ändert sich die Lage seines Retinabildes kaum, trotzdem nehme ich ihn bewegt wahr:
  GA=0; EK Wahrnehmung, also: EK wird auf die Umwelt attribuiert: Man sieht die Flugbewegung in Richtung der intendierten und realisierten Blickbewegung.

Anwendung auf das **Negative Nachbild** (s. Abb.105): Wenn man längere Zeit auf eine helle Form blickt, und dann den Blick auf eine helle Wand richtet, nimmt man diese Form als dunkle Figur wahr. Dieses **negative Nachbild ist einer Reizung äquivalent, die ihre retinale Position beim Blickwechsel nicht ändert.** Daher sind die Wahrnehmungen, welche die Blickbewegungen begleiten, beim retinalen Nachbild genau umgekehrt wie bei einem externen Reiz:

Bewegungswahrnehmung bei negativem Nachbild (vgl. Abb. 105):

- **Aktive Augenbewegung: GA=0;** d.h.
  EK Wahrnehmung, also: EK wird auf die Umwelt attribuiert. Das Nachbild springt mit den Blicken mit. So ist es.

- **Passive Augenbewegung bei intendierter Fixation: GA=0; EK=0;**
  d.h. man nimmt **keine Bewegung** des negativen Nachbildes während passiver Augenbewegungen wahr. So ist es tatsächlich, wie BRINDLEY & MERTON (1960) fanden.

Gleichzeitig mit v. HOLST & MITTELSTAEDT hat SPERRY (1950) die gleiche Idee entwickelt. Das Konstruktum, das v.HOLST & MITTELSTAEDT als Efferenzkopie bezeichnen, heißt bei SPERRY

COROLLARY DISCHARGE (begleitende Entladung)**.**

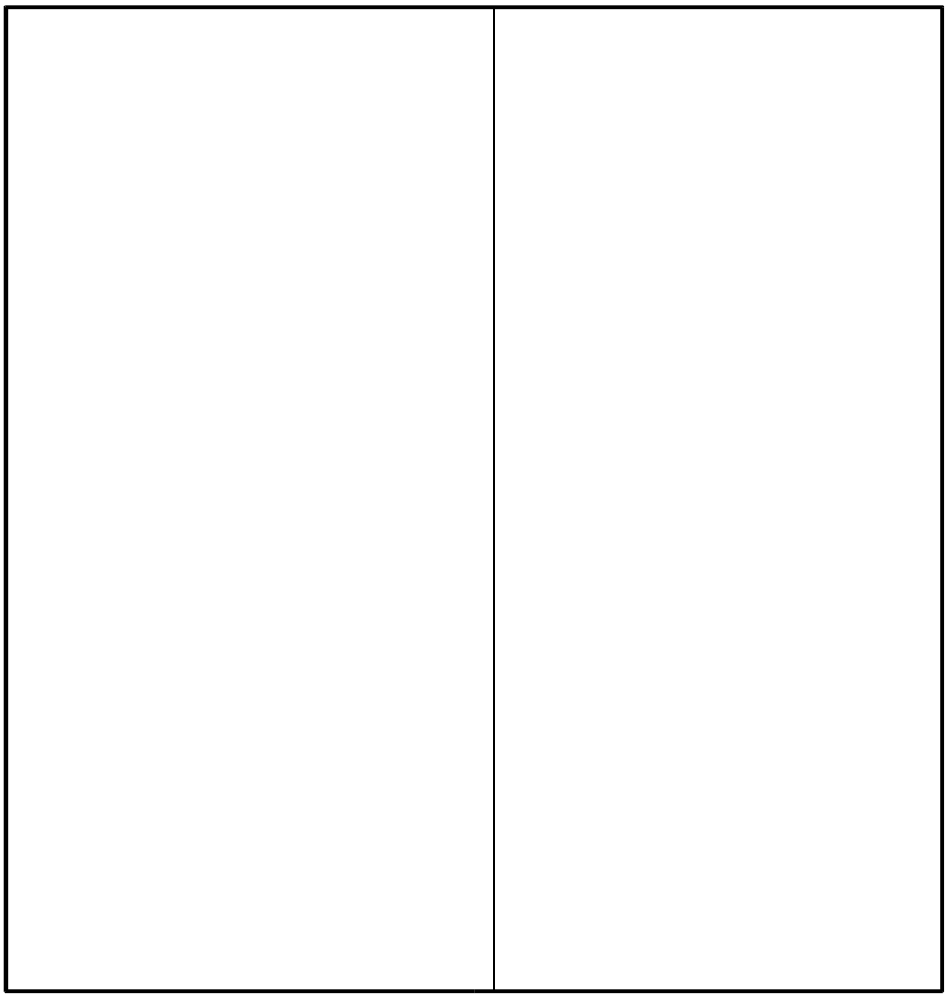
Die Grundidee der Reafferenzprinzips hat schon von **Hermann v. Helmholtz** formuliert: Er berichtet von einem Patienten mit einer Augemuskellähmung, der Scheinbewegungen wahrnahm, wenn seine Blickbewegungsintentionen durch die Muskellähmung vereitelt wurden (s. S. 12f, Abb. 14). Helmholtz sprach statt von Efferenzkopie von

WILLENSANSTRENGUNG.

3.5.4. Revision des klassischen Reafferenzprinzips: Evaluation

Nach dem klassischen Reafferenzprinzip erfolgt die Unterscheidung zwischen Reafferenz und Exafferenz durch Elimination. Die Reafferenz wird wie eine „**Störung**“ behandelt. Bedenkt man aber, dass Blickbewegungen im Dienste von Exploration und Selektion stehen, so sind die durch sie zu erzeugenden Reafferenzen ihr **Ziel**, und keineswegs zu eliminierende unerwünschte Nebenwirkungen der Bewegungen (WOLFF, 1984, 1985, 1999). D. M. MacKAY hat schon in der 50er Jahren eine Revision des klassischen Reafferenzprinzips gefordert, die diese Erkenntnis impliziert. Nach seiner Theorie (Überblick bei MacKAY,

1973) erfolgt die Unterscheidung zwischen Reafferenz und Exafferenz nicht durch Elimination, sondern durch **EVALUATION**. Das visuelle System „erwartet“ eine reafferente Änderung als Folge einer Willkürsakkade und geht vom **Regelfall einer stabilen Umwelt** aus. Diese Stabilität ist eine Eigenschaft eines **internen Weltmodells**. Die Gesamtafferenz wird im Hinblick darauf „bewertet“, ob sie von der „Erwartung“ abweicht oder nicht. Entspricht sie der „Erwartung“, so ist dies zugleich **Evidenz für die Stabilität der Umwelt**, erst die Abweichung erfordert eine Änderung des internen Weltmodelles. Man sieht, dass in diesem Modell die Unterscheidung zwischen Reafferenz und Exafferenz auf einem viel „kognitiveren“ Niveau erfolgt als im klassischen Reafferenzmodell. Die **an der Evaluation beteiligten Efferenzen, sind keine spezifischen Muskelkommandos, sondern Information über die intendierte Reafferenz**. Mittelstaedt hat sich in einem gemeinsamen Artikel (MacKAY & MITTELSTAEDT, 1974) diesem attraktiven Gedankengang angeschlossen.



Das **Nachbild** bleibt während der passiven Augenbewegung anschaulich unbewegt

Das **Nachbild** springt mit jeder aktiven Blickbewegung mit

Das **ruhende Objekt** scheint sich entgegen der passiven Augenbewegung zu bewegen.

Das **ruhende Objekt** wird während der aktiven Blickbewegung als stationär gesehen

Abb. 104: Wahrnehmung von Nachbild (oben) und ruhendem Objekt (unten) bei aktiver und passiver Augenbewegung

3.6. Zwei Bewegungssysteme: STIER- und SCHAU-System

Die Efferenztheorien haben sich zur Erklärung der Wahrnehmung bei Blickbewegungen durchgesetzt. Allerdings werden heute verschiedene Blickbewegungsefferenzen unterschieden. BRIDGEMAN (1986 a, b) und LEIBOWITZ (1986) diskutieren 2 Systeme zur Blickbewegungskontrolle, die von TER BROOK (1936) mit den Begriffen STIER- und SCHAU-System bezeichnet wurden. BRIDGEMAN und LEIBOWITZ nehmen an, dass nur die Efferenzen des SCHAU-Systems, nicht jedoch die Efferenzen des STIER-Systems die **gesehene** Bewegung und Richtung der Wahrnehmungsdinge bestimmt.

3.6.1. STIER-System (OKN-System u. VOR-System)

Das STIER-System ist

- **phylogenetisch älter** als das Schausystem.
- Es dient der **Stabilisierung der Augen relativ zur Umgebung**. Bei einfacheren Lebewesen, bei denn die Augen nicht im Leib beweglich sind, ermöglicht es das STIER-System, dass sich die Tiere an der Umgebung optisch festhalten (z.B. Fisch).

- Es ist sensitiv gegenüber
  - **Bewegungen der gesamten Retinastruktur, d.h. globale** im Gegensatz zur lokalen Bewegungen. Z.B. Beim Blick aus dem fahrenden Zug „halten“ sich die Augen an der optischen Umgebung „fest“, bewegen sich also entgegen der Fahrtrichtung (**optokinetischer Reflex)**, bis die Augenmuskelspannung zu groß wird. Dann macht das Auge eine Sakkade in Fahrtrichtung, und alles beginnt von vorne. Dieser „sägezahnartige“ Bewegungsverlauf heißt **optokinetischer Nystagmus (OKN).**
  - **Reizung des Vestibular-Organs,** das ist das **Gleichgewichtsorgan mit den Bogengängen** im Innenohr. Es wird z.B. bei Beschleunigung des Kopfes gereizt. Der **Vestibulo-Okular-Reflex (VOR),** auch Dodge-Reflex genannt (nach Raymond Dodge, 1871-1942), leistet ebenfalls eine Stabilisierung der Augen bei Körperbewegungen (z.B. Kopfbewegungen, s.u. S. 109), und zwar auch bei völliger Dunkelheit. Er ist Grundlage des bekannten **Dreh – Nystagmus**, der sich einstellt, wenn man einige Minuten lang z.B. auf einem Drehstuhl rotiert wurde.

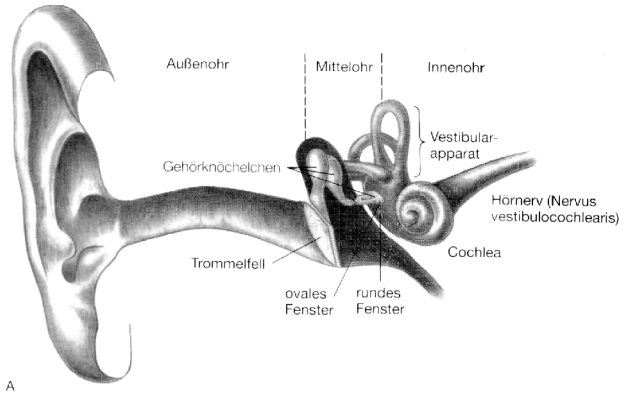


Abb. 105: Vestibularorgan im Innenohr

Das STIER-System umfasst also das OKN- und das VOR-System.

3.6.2. SCHAU-System (PURSUIT-System)

Das SCHAU-System ist

- **phylogenetisch jünger** als das STIER-System.
- Es dient der **Stabilisierung des zentralen Fixationsobjektes.**
- Es ist sensitiv gegenüber **Abweichung** des retinalen Abbildes **des Fixationsobjektes** von der Fovea.

Das Schau-System wird heute auch PURSUIT-System genannt, weil es dem Fixationsobjekt nachfolgt, es gleichsam „verfolgt“, wenn dieses sich bewegt.

Nach BRIDGEMAN (1986 a, b) und LEIBOWITZ (1986) wirken sich nur die Efferenzen des SCHAU-Systems auf die wahrgenommene Bewegung und Richtung der Sehdinge aus, nicht aber die Efferenzen des STIER-Systems. Dies lässt sich funktional begründen: Die Efferenzen des SCHAU-Systems dienen dem „Verfolgen“ des Fixationsobjektes (s.o.). Sie bilden also gewissermaßen die Bewegungen von Fixationsobjekten ab, während die Efferenzen des STIER-Systems der Stabilisierung der Augen relativ zur Umgebung dienen. Meist

kompensieren sie Eigenbewegungen des Beobachters, z.B. Kopfbewegungen und Lokomotion. Sie bilden also keine Umweltbewegungen ab, eher Eigenbewegungen.

3.6.3. Induzierte Bewegung

BRIDGEMAN (1986 a, b, 1987) und LEIBOWITZ et al. (1986) können viele verschiedene Phänomene wahrgenommener Bewegung erklären. Bewegungstäuschungen kommen nach ihrer Theorie oft dadurch zustande, dass STIER- und SCHAU-System **einander entgegenwirken**: Eine der bekanntesten Bewegungstäuschungen ist die **induzierte Bewegung**. Sie lässt sich z.B. beobachten, wenn man den Mond hinter vorbeiziehenden Wolken betrachtet: Der Mond scheint sich dann entgegen der Bewegungsrichtung der Wolken zu bewegen.

Erklärung: Die bewegte Wolkenstruktur aktiviert als eine **globale** retinale Bewegung das STIER-System, was eine Mitbewegung der Augen bewirkt (optokinetischer Reflex). Die Absicht, den Mond zu betrachten, also das intendierte konstante Fixieren, kann jetzt nur noch dadurch verwirklicht werden, dass das SCHAU-System der Innervation durch das STIER-System entgegenwirkt. Diese Gegensteuerung bewirkt

das konstante Fixieren des Mondes, d.h. trotz der Aktivierung des Stiersystems bewegt sich das Auge nicht,
eine Efferenz (vom SCHAU-System), die wegen GA=0 auf die Umwelt attribuiert wird: Der Mond scheint sich in Richtung der SCHAU-Innervation (entgegen der Bewegungsrichtung der Wolken) zu bewegen.

3.7. Dissoziation zwischen bewusster Wahrnehmung und Handlungssteuerung

3.7.1. Räumliche Dissoziation

3.7.1.1. Zeigen bei induzierter Bewegung

BRIDGEMAN (1987, 1999) hat mit induzierter Bewegung eine interessante Dissoziation zwischen der bewussten Repräsentation von Reizen und ihrem Einfluss auf die Handlungssteuerung nachgewiesen: Es wurde die wahrgenommene Positionsverlagerung eines in Wahrheit ruhenden Zielreizes durch die Ruckbewegung des strukturierten Hintergrundes (Rahmen) induziert (Abb. 106). Die Vp hatte vor wie nach der induzierten Positionsverlagerung auf den Zielreiz zu zeigen, und zwar **open-loop**, d.h. ohne dass sie ihre zeigende Hand sehen konnte.

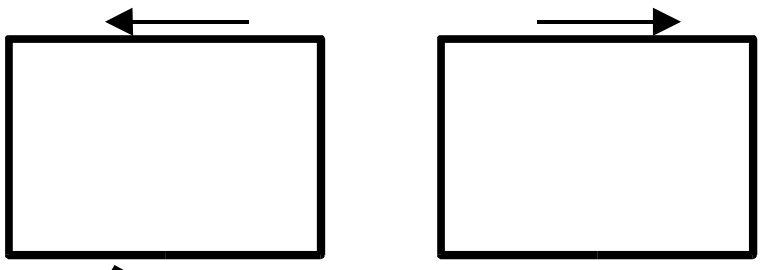


Abb. 106: Scheinbare ( ) Punktbewegungen durch tatsächliche ( ) Rahmenbewegungen

Ergebnis: Obwohl die Vp eine Positionsverlagerung des Zielreizes wahrnahm, beeinflusste diese induzierte Positionsverlagerung nicht ihre Zeigebewegung. Die Vp zeigte nach der Bewegungsinduktion auf die korrekte unveränderte Zielreizposition. Dies ist also eine Bedingung, in der **eine Bewegungsinformation isoliert in das System der bewussten Wahrnehmung eingespeist wird, nicht aber in das motorische System.**

Bridgeman hat ferner gezeigt, dass sich auch der **entgegengesetzte Fall** herstellen lässt, nämlich dass ein **Bewegungsinput isoliert in das motorische System eingespeist** werden kann, ohne dass er zugleich in das System der bewussten Wahrnehmung eingespeist wird: Zunächst ließ er die Vpn die induzierte Bewegung durch eine **reale Bewegung des Zielreizes kompensieren:** Mit der Herstellungsmethode (s.o.) bestimmte er diejenige Zielreizverlagerung, bei welcher der Reiz als ruhend wahrgenommen wurde. Unter dieser Bedingung bewegte sich der Reiz tatsächlich, und zwar synchron mit dem Hintergrund und in gleicher Richtung wie dieser, jedoch mit geringerer Amplitude (s. Abb. 105). Obwohl der Zielreiz sich nun **nicht zu bewegen schien**, variierte die Richtung der Zeigebewegung in Abhängigkeit von seiner wirklichen Position: Die Zeigebewegungen vor und nach der „induzierten Ruhe“ unterschieden sich um genau den Betrag, um den der Zielreiz sich tatsächlich mit dem Rahmen mitbewegt hatte.

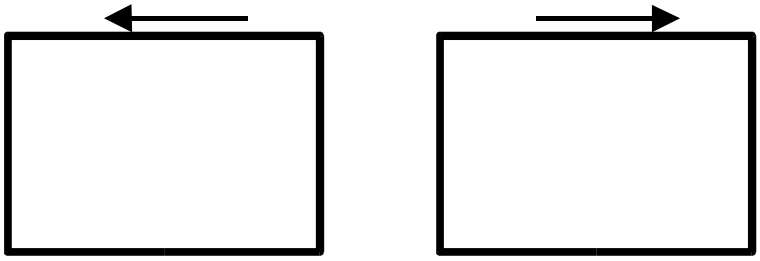


Abb. 107: Scheinbare Ruhe von Punkten, die sich mit den Rahmen mitbewegen (die Bewegungsamplituden der Punkte sind geringer als die der Rahmen)

Die Experimente zeigen eine **Dissoziation zwischen bewusster Wahrnehmung und Verhaltensteuerung**. In jedes System kann unabhängig vom anderen Information eingespeist werden. Bridgeman erklärt diese Dissoziation mit der Annahme, dass die bewusste Wahrnehmung nur die Efferenzen des **SCHAU**-Systems (s.o.) berücksichtigt, die Motorik hingegen die Efferenzen **beider** Systeme (STIER + SCHAU). Dies ist sinnvoll, da unter ökologischen Bedingungen die SCHAU- Efferenzen bevorzugt Objektbewegungen repräsentieren (s.o.), die Motorik aber durch die Berücksichtigung beider Efferenzen über die tatsächliche räumliche Relation zwischen Beobachter und Umwelt informiert bleibt.

Möglicherweise sind die Efferenzen des STIER - Systems in der bewussten Wahrnehmung durchaus repräsentiert, zwar nicht als Umweltbewegung sondern als **wahrgenommene Eigenbewegung** (Augen- u. Kopfbewegung, Lokomotion). In der Tat ist ja die retinale Reafferenz bei Kopfbewegungen und Lokomotion von genau der für das STIER-System spezifischen Qualität: Bei **Eigenbewegungen** ändert sich die **gesamte** Retinastruktur (s.u. ökologischer Ansatz), was der adäquate Reiz für das Stier-System ist. Wenn dies stimmt, dann sind auch die **Efferenzen des Stier - Systems wahrnehmungswirksam**, jedoch werden die Efferenzen des Stier-Systems auf die **Eigenbewegung** attribuiert, während die des Schau - Systems auf die **Umweltbewegung** attribuiert werden. Neueste Ergebnisse von Bridgeman (2002) scheinen diese Interpretation zu bestätigen. Demnach handelt es sich bei den soeben

berichteten Phänomenen möglicherweise nicht wirklich um eine Dissoziation zwischen der bewussten Wahrnehmung von Reizen und ihrer handlungssteuernden Funktion.
Inzwischen gibt es eine Fülle von Belegen für echte räumliche Dissoziation. AGLIOTI, DESOUZA & GOODALE (1995) und HAFFENDEN & GOODALE (1998) arbeiteten mit der Ebbinghaus-Täuschung (s. Abb. 108).

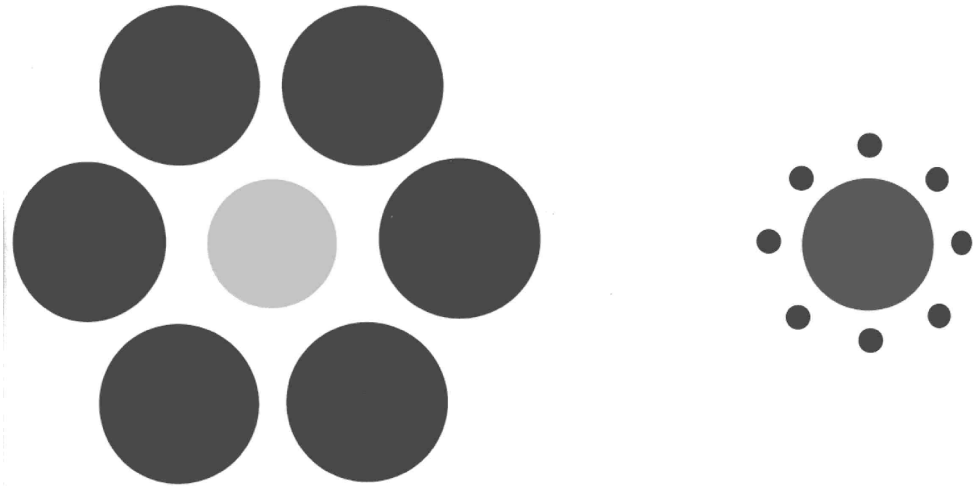


Abb. 108: Ebbinghaus-Täuschung: Die mittlere Scheibe links erscheint kleiner als rechts, obwohl beide gleich groß sind.

Die Vpn hatten in der „Greifaufgabe“ nach der mittleren Scheibe (Zielscheibe) zu greifen und in der „manuellen Schätzaufgabe“ mit Zeigefinger und Daumen die Durchmesser der Zielscheiben anzuzeigen. In beiden Aufgaben wurde die Fingeröffnung registriert (Abb. 109).

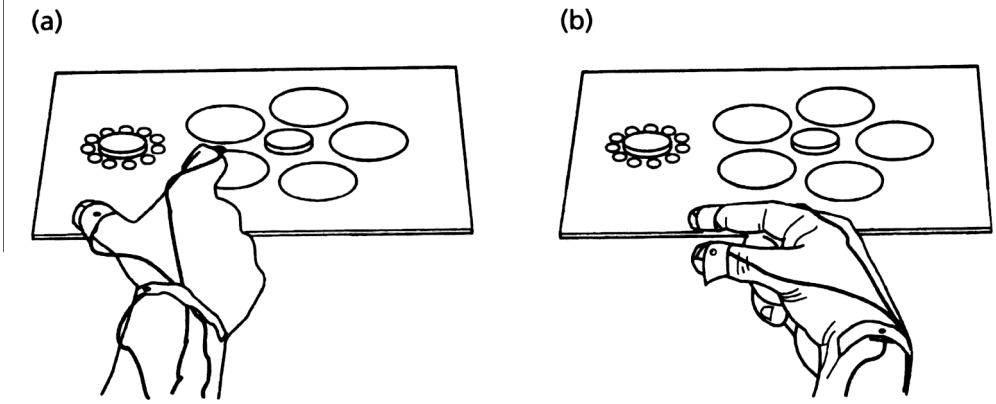


Abb. 109: „Greifaufgabe“ (a) und „manuelle Schätztaufgabe“ (b) in den Versuchen von AGLIOTI, DESOUZA & GOODALE (1995) und HAFFENDEN & GOODALE (1998) ZUR EBBINGHAUSTÄUSCHUNG.

Während die Fingeröffnungen in der „manuellen Schätzaufgabe“ der Größentäuschung unterlag (die Vpn zeigten für die Zielscheibe im kleinen Scheibenring einen größeren Durchmesser an), korrelierten die Fingeröffnungen in der „Greifaufgabe“ mit den tatsächlichen Durchmessern der Zielscheiben. Dies war auch dann der Fall, wenn die Zielscheibe im großen Scheibenring größer, war, so dass sie gleich erschein, wie die andere Zielscheibe (Abb. 110).

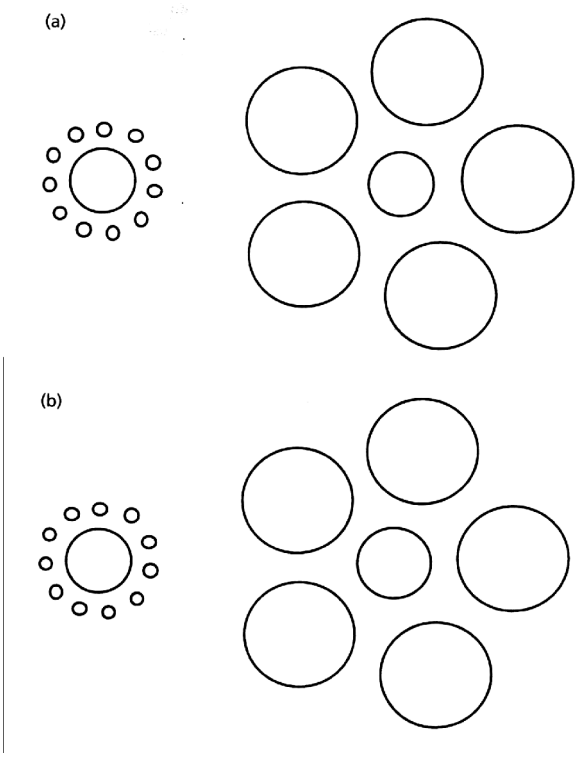


Abb. 110: Ebbinghaus-Täuschung. (a) Standardversion; (b) ungleiche mittlere Scheiben, die aber gleich erscheinen.

3.7.1.2. Blindsight

Räumliche Dissoziation wurde erstmals von PÖPPEL (1972) und WEISKRANTZ et al. (1974) als neuropsychologisches Phänomen berichtet. Bei WEISKRANTZ et al. handelte es sich um eine Patientin mit einer Läsion im Okzipitallappen (Hinterhauptslappen). Die Patientin litt unter einem Sehverlust in der linken Gesichtsfeldhälfte (**Hemianopsie**). Sie gab an, links nichts zu sehen. Gelegentlich berichtete sie von einem Gefühl, dass sich etwas nähert oder dass dort etwas „Glattes“ oder „Zackiges“ vorhanden sei. Aber dieses Gefühl hatte mehr die Qualität von Raten als von Sehen. Diese Patientin konnte erstaunlicherweise recht gut auf die Position eines leuchtenden Punktes zeigen, der in der cortical „blinden“ Gesichtsfeldhälfte dargeboten wurde, den sie also nicht sehen konnte. Außerdem konnte sie die Orientierung von Gittern unterscheiden. WEISSKRANTZ bezeichnete dieses Phänomen als **Blindsight.**

3.7.1.3. WO-System, WAS-System bzw. dorsaler und ventraler Strang

UNGERLEIDER & MISHKIN (1982) erklären derartige Befunde mit der Annahme, dass außer dem **Okzipitallappen** noch zwei weitere Systeme an der visuellen Informationsverarbeitung beteiligt sind: Das **Wo**- und das **Was**-System (vgl. Abb. 111).

- Das **Wo-System** ist ein **dorsaler Strang**, der von **okzipital (Hinterkopf) nach parietal (Scheitel)** führt. Dieses System dient der **Lokalisation**. Belege: Parietale Läsionen führen zu Schwierigkeiten, Augen und Glieder auf Punkte im Raum zu richten.

- Das **WAS-System** ist ein **ventraler Strang**, der von **okzipital nach temporal (Schläfe)** führt. Dieses System dient der **Identifikation**. Belege: Temporale Läsionen führen zum Verlust des visuellen Erkennens.

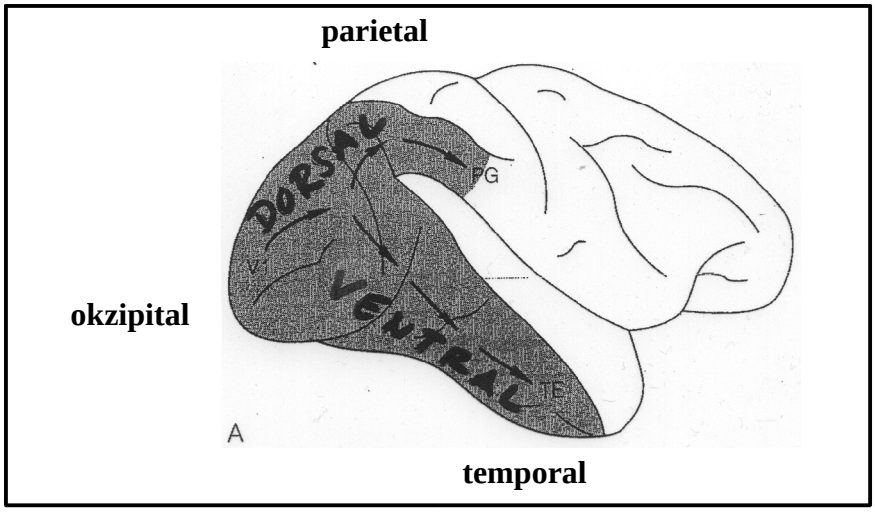


Abb. 111: Ungerleider & Mishkins Vorstellung von dorsalem und ventralem Informationstrom

Diese sehr einflussreiche Theorie wurde neuerdings von MILNER & GOODALE (1993, 1995) modifiziert. Die Autoren berichten von einer Patientin (D.F.) mit einer Kohlenmonoxydvergiftung. Diese Patientin kann Strichzeichnungen von Gegenständen erkennen, ist aber nicht in der Lage, Gegenstände abzuzeichnen, obwohl sie die Gegenstände aus dem Gedächtnis zeichnen kann (Abb. 112).

Abb. 112: Abzeichnen von Objekten und Zeichnen der gleichen Objekte aus dem Gedächtnis durch eine Patientin mit einer Kohlenmonoxydvergiftung. (aus Millner & Goodale, 1995)

Dieselbe Patientin kann **horizontal orientierte Linien von vertikal orientierten nicht unterscheiden,** ist aber in der Lage, **Karten in Schlitze verschiedener Orientierung** zu stecken und dabei die Karte vor dem Einstecken **korrekt nach der Schlitzorientierung auszurichten (**Abb. 113).

Abb. 113: Wahrnehmung und Verwendung von Schlitzorientierungen durch Patientin D.F. und eine gesunde Kontrollperson. Die Orientierungen wurden auf die Vertikale normiert. (aus Millner & Goodale, 1995)

Ein weiterer Patient ist blind, kann aber zum Greifen die Finger und Hände korrekt vor dem eigentlichen Zugriff den Formen der zu ergreifenden Objekte anpassen. Demgegenüber gibt es andere Patienten, die Objekte sehen und erkennen können, die aber nicht mit ihnen umzugehen verstehen.

Diese Berichte führten Millner & Goodale (1995) zu der Überzeugung, dass die Systeme sich nicht im Hinblick darauf unterscheiden, **welche Information** sie verarbeiten (dorsaler Strang Positionsinformation; ventraler Strang Identitätsinformation), sondern im Hinblick darauf, **wofür** sie die Information verarbeiten, **ob sie die Information für die bewusste Wahrnehmung (ventraler Strang) oder für die Bewegungsteuerung (dorsaler Strang)** zur Verfügung stellen.

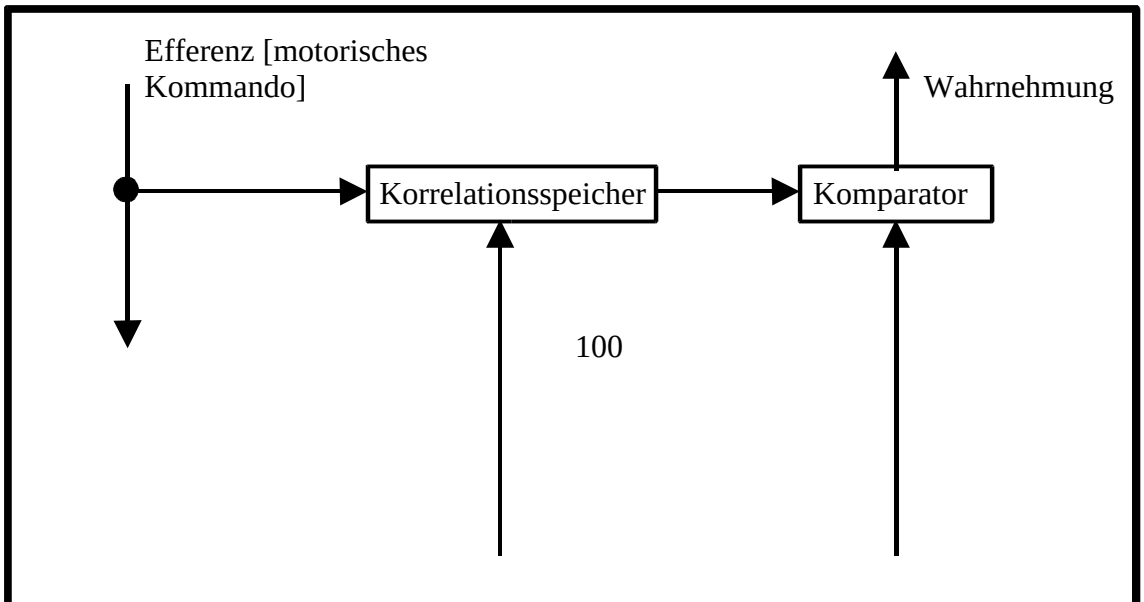
3.7.2. Zeitliche Dissoziation

Es gibt Beleg dafür, dass die **Latenz der bewussten Repräsentation** und die **Latenz der Reaktion** auf einen Reiz dissoziiert sind. LIBET (1960, 1980) und LIBET et al. (1964, 1972) erzeugten durch **direkte Reizung des operativ freigelegten Gehirns** (Gyrus postcentralis) eine somästhetische Empfindung. Diese bewusst erlebte Empfindung stellte sich aber nur ein, wenn die direkte Reizung länger als 500 ms (nie kürzer als 200 ms) andauerte. Dies steht in starkem Kontrast zu dem Befund, dass die **Latenz für die einfache Reaktion auf einen entsprechenden (dieselbe Empfindung auslösenden) Außenreiz** deutlich kleiner als 200 ms ist.

3.8. Wahrnehmungslernen

3.8.1. Reafferenzmodell und Katzenversuche von Hein & Held

Es stellt sich die Frage, wodurch garantiert wird, dass die Efferenzkopie mit der tatsächlichen Reafferenz übereinstimmt. HEIN & HELD (1962) nehmen an, dass dies gelernt wird. Sie haben ein **Reafferenzmodell** vorgeschlagen, in welchem das Reafferenz-Prinzip um einen **Korrelationsspeicher** erweitert ist, wo die Beziehungen zwischen den Efferenzen und den durch sie verursachten Reafferenzen ständig aktualisiert werden. Diese Beziehung geht in den Vergleichsprozeß ein Abb. 114).



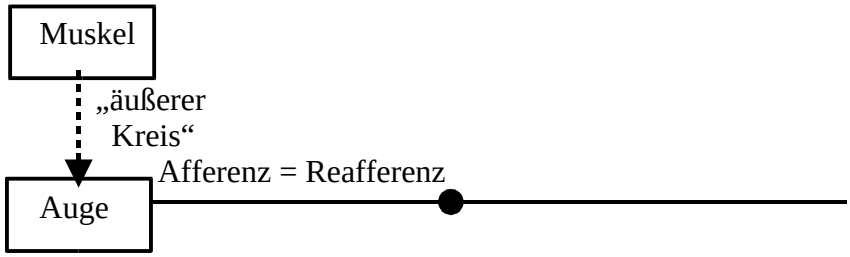


Abb. 114: Reafferenzmodell von Hein & Held (1962) (aus Heuer, 1983). Diese Darstellung gilt für den Fall einer starren Umwelt, so dass die Reafferenz der Gesamtafferenz entspricht (vgl. Abb. 104).

Eine wichtige Eigenschaft des Modells von HEIN & HELD ist die Implikation, dass für das Lernen die **aktive Bewegung** unerlässlich ist. Sie muss es nach ihrer Theorie sein, da der Korrelationsspeicher natürlich nur bei aktiven Bewegungen aktualisiert werden kann. Die Frage nach der Bedeutung der aktiven Bewegung beim Wahrnehmungslernen ist prinzipiell unabhängig von der Frage nach der Gültigkeit des Modells von HEIN & HELD.

HEIN & HELD (1963) haben mit ihren berühmten **Katzenversuchen** die Rolle aktiver Bewegung beim Wahrnehmungslernen untersucht: **Junge Katzen**, die bis zum Versuchsbeginn (12. Woche) in absoluter Dunkelheit aufgezogen wurden, wurden in einen **Streifenzylinder** gebracht, in welchem sich ein **Waagebalken mit** einem **Laufgeschirr** und einer **Gondel** befanden. An jedem Versuch nahmen jeweils 2 Katzen teil. Die **Katze im Laufgeschirr** konnte sich frei bewegen und **übertrug ihre Bewegungen auf die Gondel**, in welcher die andere Katze saß, die keinen Einfluss auf die Fortbewegung im Zylinder hatte (Abb. 115).

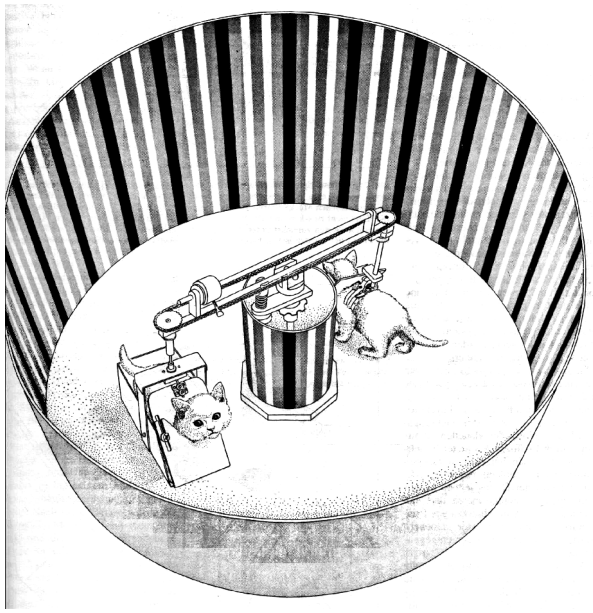


Abb. 115: Katzenversuche von Hein und Held (1962):

Obwohl sowohl die aktiven wie auch die passiven Katzen im wesentlichen dieselbe visuelle Information erhielten, entwickelten **nur die aktiven eine normale sensumotorische**

Koordination (z.B. Ausstrecken der Vorderpfoten wenn sie auf den Boden gesetzt wurden). Die passiven holten diesen Vorsprung erst auf, nachdem sie sich einige Tage frei bewegen konnten.

3.8.2. Humanversuche zum Wahrnehmungslernen

3.8.2.1. Typen von optischen Transformationen

Es gibt eine ausgedehnte Literatur über Versuche zum Wahrnehmungslernen beim Menschen (Überblick bei DOLEZAL, 1982 und WELCH, 1978). Die Technik dieser Versuche besteht darin, dass die **retinale Abbildung der Umwelt durch eine optische Vorrichtung (z.B. Brille) modifiziert** wird. Die Fülle von optischen Modifikationen, die eine Adaptation erlauben, ist beachtlich (Abb. 116).

Besondere Berühmtheit haben die **Umkehrbrillenversuche** von KOHLER (1951) erlangt. Kohler trug seine Umkehrbrille (ein in den Schirm einer schirmmützenähnlichen Vorrichtung montierter Spiegel bei gleichzeitiger Abdeckung des restlichen Gesichtsfeldes) über einen langen Zeitraum und war in der Lage, Tätigkeiten (auch Skifahren, Radfahren, etc.) unbeeinträchtigt auszuführen. (Siehe den Film am Ende des Semesters).

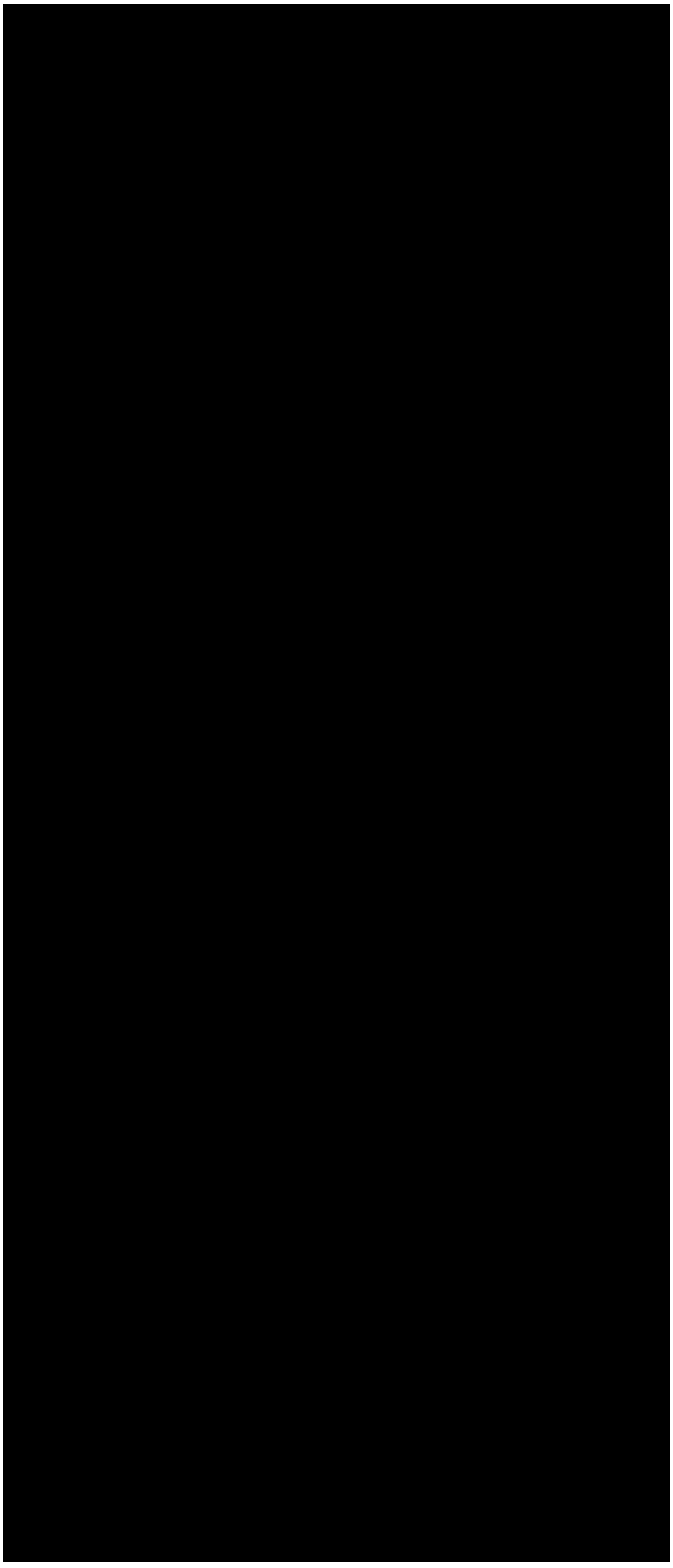


Abb. 116: Optische Modifikationen, die eine Adaptation erlauben. (aus Dolezal, 1982)

Es gibt auch Bedingungen, die keine Adaptation erlauben. Wird eine Umkehr-**Kontaktlinse** verwendet, die sich mit jeder sakkadischen Blickbewegung mitbewegt, so sind die Vpn zu einer Anpassung **nicht** in der Lage. Die Vpn stehen derartige Versuche nicht einmal durch (SMITH, 1972).

3.8.1. Prismenparadigma

Die prismatische Modifikation ist die häufigste Methode zur Untersuchung des Wahrnehmungslernens. Das Prisma bewirkt sowohl eine virtuelle Verlagerung als auch eine virtuelle Verzerrung (Abb. 117).

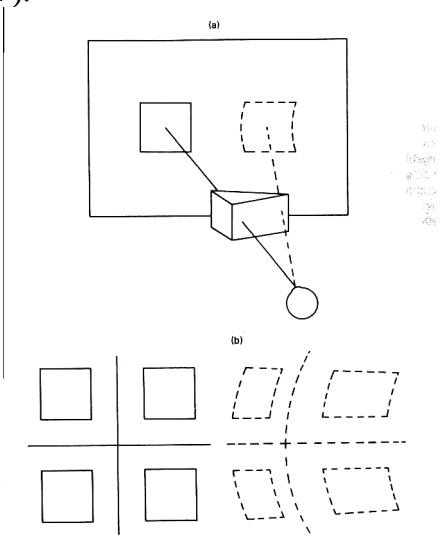


Abb. 117: Prismatische Verschiebung (a) und prismatische Verformung (b) (aus Prinz, 1990).

Verpasst man einer Vp eine solche Prismenbrille, so geschieht zunächst zweierlei:

- Die Vp nimmt die Objekte verlagert und verzerrt wahr. Versucht sie ein Objekt zu ergreifen oder darauf zu zielen oder zu zeigen, so macht sie **Fehler**.

- Jede Kopfbewegungen der Vp ist von einer scheinbaren „gummiartigen" Deformation der Umgebung begleitet (sog. **Rubbery-Effekte**, WELCH, 1978). Letzteres beruht darauf, dass die eine Kopfbewegung begleitenden **Reafferenzen** modifiziert sind, da mit der Kopfbewegung das Prisma mitbewegt wird. (Rubbery-Effekte erlebt man als Brillenträger, wenn man erstmals Gleitsichtgläser trägt: Mit jeder Kopfbewegung deformiert sich die Umgebung in der Gesichtsfeldperipherie scheinbar.)

Trägt man eine solche Prismenbrille über einen längeren Zeitraum, dann kommt es zur **ADAPTATION**, d.h.

- die Wahrnehmungswelt normalisiert sich: Die wahrgenommenen Verlagerungen und Verzerrungen reduzieren sich oder verschwinden sogar. Die **Treffsicherheit** der Greif- und Zeige- bzw. Zielbewegungen nimmt zu.
- Die **Rubbery-Effekte** nehmen ab. (Der Gleitsichtbrillenträger merkt die Deformationen, die seine Kopfbewegungen begleiten, kaum noch.)

Unmittelbar nach dem Entfernen der Prismenbrille, nimmt die Vp eine scheinbare Verlagerung und Deformation in einer der prismatischen Verzerrung während der Adaptationsphase **entgegengesetzten Richtung** wahr (Nacheffekt bei perzeptiver Adaptation; Abb. 118). Ferner kommt es zu **Greif-, Zeige-** und **Zielfehlern** sowie zu **Rubbery - Effekten**, wie zu Beginn der Adaptationsphase, jedoch in geringerem Ausmaß und in genau **entgegengesetzter Richtung**. Dieser **NACHEFFEKT**, der sich in allen Fällen von Adaptation (s.u.) einstellt, verschwindet nach kurzer Zeit.

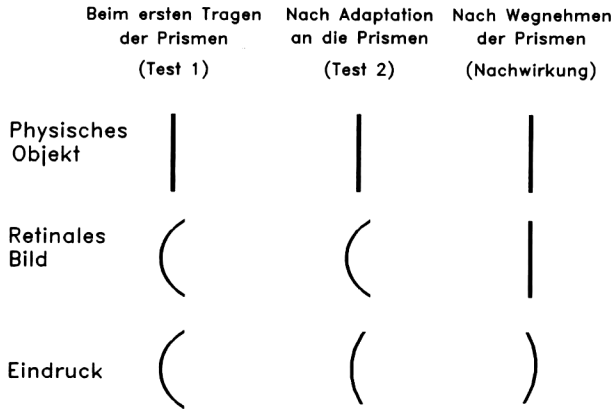


Abb. 118: Perzeptive Adaptation an einen prismatische Verzerrung und Nacheffekt (aus Guski, 1996).

3.8.4. Wie misst man Adaptation?

Es gibt 2 grundsätzliche Möglichkeiten die Adaptation zu messen (vgl. Abb. 119):

Abb, 119: Messoptionen bei Adaptationsstudien. t= optimaler Messzeitpunkt; X= Zeigeposition bzw. wahrgenommene Zielposition,. Die Fehlwahrnehmung bzw. Zeigefehler sind unmittelbar nach Aufsetzen der transformierenden Brille (B) am größten und nehmen kontinuierlich ab (C1-Cn), bis sie bei D verschwunden sind (100% Adaptation). Nach Entfernen der Brille (E) stellt sich ein Nacheffekt ein (Fehlwahrnehmung bzw. Zeigefehler in entgegengesetzter Richtung), der bald verschwunden ist (Fn). (aus Dolezal, 1982).

1. Man misst Wahrnehmung und/oder Verhalten (mit den üblichen psychophysischen Verfahren), und zwar
    - **unmittelbar NACH der Anbringung der optischen Modifikation (B** in Abb. 119) und
    - **unmittelbar VOR ihrer Entfernung (D** in Abb. 119).

    Die Differenz zwischen den Messungen ist ein Maß für die Adaptation.

2. Man misst
    - **unmittelbar VOR der Anbringung der optischen Modifikation (A** in Abb. 119) und
    - **unmittelbar NACH ihrer Entfernung (E** in Abb. 119).

    Die Differenz zwischen den Messungen ist der **NACHEFFEKT** (s.o.), ein Maß für die Adaptation. Diese Methode, die am häufigsten verwendet wird, hat den Vorteil, dass die Messungen jeweils bei bloßem Auge (ohne die Vorrichtung für die optische Modifikation) durchgeführt werden können.

In jedem Fall muss man berücksichtigen, dass die Messung selbst Einfluss auf den gemessenen Adaptationseffekt ausüben kann.

**** Demonstration mit Prismenbrille ****

3.8.5. Aktive vs. passive Bewegung

HEIN & HELD haben die Rolle der aktiven Bewegung in zahlreichen Humanversuchen demonstriert. Hier ein Versuch mit einer **prismatischen** Modifikation, in welchem die Adaptation durch den **Nacheffekt** gemessen wurde (Held, 1985):

Vor dem Versuch markierten die Vpn die Eckpunkte eines Quadrates „open loop“, d.h. ohne dass sie ihre Hand sehen konnten (**Vortest**). Dann beobachteten sie ihre Hand durch eine Linse, welche eine scheinbare Verlagerung der Objekte bewirkte (**Adaptationsphase**) (Abb. 120). Schließlich wiederholten sie den Markierungsversuch (**Nachtest**). Die Differenz zwischen Vortest und Nachtest ist der **Nacheffekt**.

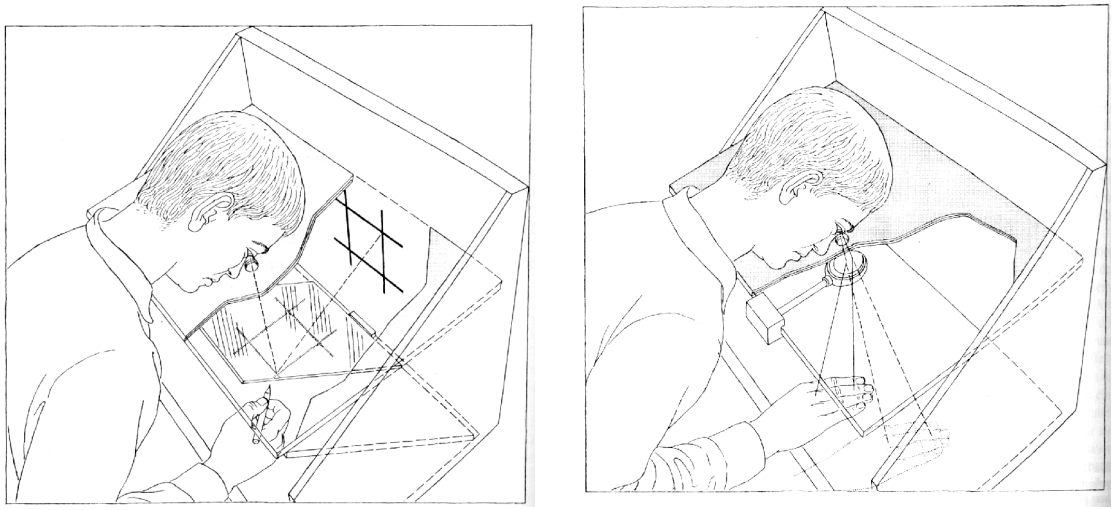


Abb. 120: Test- und Adaptationsbedingungen im Prismenversuch (aus Held, 1985).

Es gab drei Adaptationsbedingungen:

- Die **Kontrollgruppe** beobachtete ihre **unbewegte** Hand.
- Die **aktive** Gruppe bewegte ihre Hand hin und her.
- Bei der **passiven** Gruppe wurde der Arm durch eine Vorrichtung hin und her bewegt.

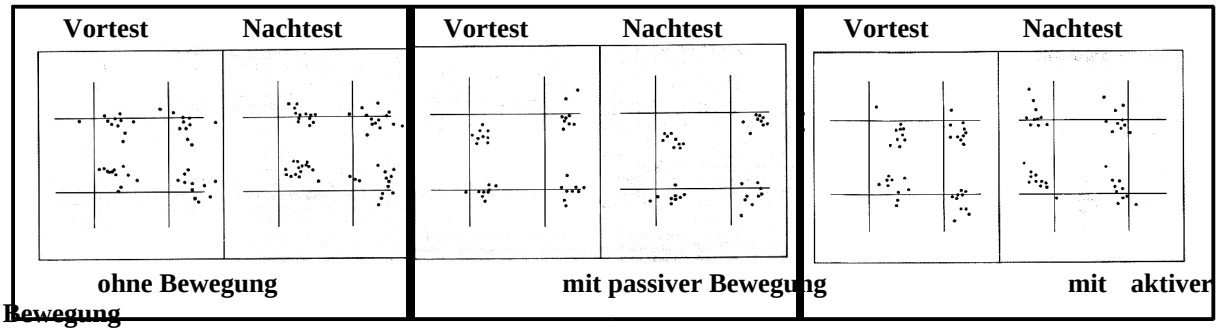


Abb. 121: Vor- und Nachtest beim Punktmarkierungsversuch von Hein & Hheld

Das Ergebnis zeigt Abb. 121: **Nacheffekte ergaben sich nur bei der aktiven Gruppe.**

In einem weiteren Versuch wurde die Bedeutung der **Korrelation** zwischen aktiver Bewegung (**Efferenz**) und ihrer sensorischen Rückmeldung (**Reafferenz**) demonstriert: In der Adaptationsphase wurden zwei **gegeneinander rotierende** Prismen verwendet, welche bewirkten, dass sich der Arm ständig hin und her zu bewegen schien, und zwar unabhängig von seiner wirklichen Bewegung. Diese Dekorrelation galt aber nur für eine Dimension (**entweder nur für die Vertikale oder Horizontale**), nicht für die andere Dimension. Die sensorische Rückmeldung war also nur in vertikaler oder horizontaler Richtung von den Armbewegungen dekorreliert (Abb. 122, links).

Ergebnis: Die Präzision im Markierungsversuch nahm vom Vortest zum Nachtest **nur entlang der dekorrelierten Dimension** ab. Dieser Befund stellte sich **nur bei aktiver Bewegung** ein, nicht bei passiver.

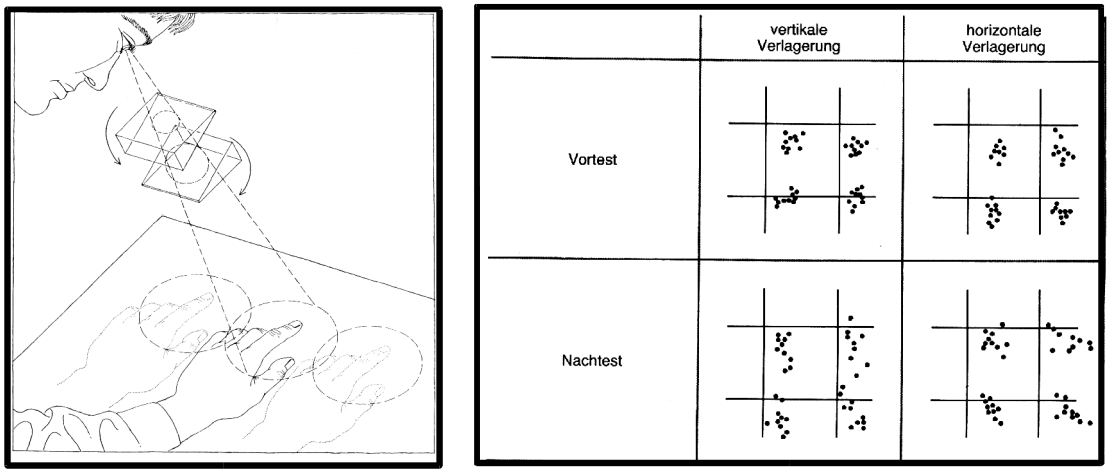


Abb. 122: Dekorrelationsversuch. Links: Paradigma; rechts: Vor- und Nachtest der Markierungsleistungen bei vertikaler und horizontaler Dekorrelation.

Aktiv-Passiv Kontroverse Heute: Inzwischen sind, in Widerspruch zu Hein und Held, zahlreiche Adaptationeffekte bei passiven Bewegungen berichtet worden. Die Adaptation gelingt aber bei aktiven Bewegungen besser.

3.8.6. Mechanismen der Adaptation

Worin besteht die Anpassung? Drei Möglichkeiten sind denkbar:

- **Perzeptive Adaptation**: Normalisierung der Wahrnehmungswelt trotz optischer Modifikation: Man sieht die Umgebung wieder veridikal; z.B. würden die Vpn im Markierungsversuch (Held, 1985, s.o.) die Eckpunkte des Quadrates an ihrem richtigen Ort sehen. KOHLER berichtet in seinem Film, dass sich nach längerer Zeit (ab 10 Tagen) des Tragens der Umkehrbrille die Wahrnehmungswelt aufrichtet. Dieser Bericht ist allerdings nicht ganz eindeutig zu interpretieren. An anderer Stelle (KOHLER, 1951) berichtet Kohler, dass dann, wenn er, gefragt ob ihm die Welt tatsächlich aufrecht erscheint, sorgfältig darauf achtet, die Wahrnehmungswelt doch noch auf dem Kopfe steht, dies ihn aber nicht mehr störe.

Vielleicht handelt es sich hierbei doch um einen Fall von sensumotorischer Adaptation (s.u.). Genuin perzeptive Adaptation lässt sich mit dem Telestereoskop erzeugen (s.u.).

Bei der perzeptiven Adaptation äußert sich der **Nacheffekt** darin, dass die Umgebung in einer der optischer Modifikation entgegengesetzten Richtung verzerrt (verschoben, etc.) erscheint. Nach Kohler erscheint die Umgebung unmittelbar nach Abnahme der Umkehrbrille für einige Sekunden auf dem Kopfe zu stehen.

- **Sensumotorische Adaptation**: Normalisierung des Verhaltens trotz optischer Modifikation: Man greift (zeigt, zielt) richtig, obwohl die Wahrnehmungswelt verzerrt ist. KOHLER berichtet in seinem Film, dass die Normalisierung des Verhaltens der Normalisierung der Wahrnehmungswelt vorausgeht, d.h. obwohl die Welt noch auf dem Kopfe zu stehen scheint, findet er sich zurecht.

- **Kognitive Adaptation**: Abweichungen können bewusst bewertet und korrigiert werden. Weder die Wahrnehmungswelt noch das Verhalten haben sich angepasst, aber die Vp greift bewusst neben die wahrgenommene Zielposition um das Ziel zu treffen. Die kognitive Adaptation scheidet als Erklärung immer dann aus, wenn sich ein Nacheffekt einstellt, also ohne modifizierende Brille.

- Schließlich sind Kombinationen zwischen den genannten drei Adaptationsformen denkbar.

Paillard (1999) bringt sensumotorische und kognitive Adaptation (er spricht von **Calibrierung**) in Beziehung zu zwei visuellen Teilsystemen, dem peripheren und dem zentralen Sehen (s.u.).

Für jede der 3 möglichen Adaptationsformen gibt es experimentelle Belege. Ein Grund für diese Komplexität könnte folgender sein: Die Modifikation der retinalen Abbildung ist für den Beobachter erst durch Eigenbewegung feststellbar. Verschiedene optische Modifikationen verändern die Reafferenzen **verschiedener** Bewegungssysteme. Es hängt von der konkreten Bedingungen der optischen Modifikation ab, die Reafferenz **welchen Bewegungssystem** modifiziert ist. Wir können uns dies am Beispiel der prismatischen Modifikation verdeutlichen (Abb. 123):

prismatische Kontaktlinse **Prismenbrille**

Abb. 123: Einfluss des prismatischen Mediums auf die Blickbewegungsreafferenz. Durchgezogene Darstellung des Auge: Blickposition vor der Sakkade; gestrichelt: Blickposition nach der Sakkade. Links: Die prismatische Kontaktlinse bewegt sich mit jeder Blickbewegung mit. Daher modifiziert sie die Reafferenz des okulomotorischen Systems. Rechts: Die Prismenbrille bewegt sich nicht mit den Blickbewegungen. Sie modifiziert daher nicht die Reafferenz des okulomotorischen Systems.

Trägt die Vp eine **Prismenbrille**, so sind die Reafferenzen von **Lokomotion** und **Kopfbewegungen** modifiziert, nicht aber die Reafferenzen der sakkadischen Blickbewegungen, da sich das Prisma nur mit Lokomotions- und Kopfbewegungen, nicht aber mit den sakkadischen (wohl aber mit den **kompensatorischen**, s.u.) Blickbewegungen mitbewegt. Trägt die Vp hingegen eine **prismatische Kontaktlinse** (FESTINGER, et a. 1967.; HOWARD & TEMPLETON, 1966, SLOTNIK, 1969, TAYLOR, 1962), so sind die Reafferenzen **aller Bewegungssysteme** modifiziert (vgl. Abb. 118). Im **Markierungsversuch** von Held (1985, s.o.), ist allein die reafferente Rückmeldung der **Armbewegung** prismatisch modifiziert. Möglicherweise hängt die Adaptationsform davon ab, **welches Bewegungssystem** durch die Modifikation betroffen ist.

Es gibt gute Gründe anzunehmen, dass **genuin perzeptive Adaptation** daran gebunden ist, dass die **Reafferenz der Blickbewegung (Sakkade)** modifiziert ist. FESTINGER et al. (1967) berichten von ausgeprägter genuin visueller Adaptation bei der Verwendung einer prismatischen Kontaktlinse. TAYLOR (1962) berichtet sogar einen perzeptiven Adaptationseffekt von 100%.

Spezifische visumotorische Adaptation

Wie spezifisch die Adaptation unter bestimmten Bedingungen sein kann, zeigt ein neuer Versuch von Kaernbach, Munka & Cunningham (2002):

Die Vp saß vor einem Bildschirm (touch screen), auf dem an verschiedenen Positionen ein Kreuz erschienen, das die Vp berühren sollte. Die Vp wurde akustisch darüber informiert, mit welcher Hand und welchem Bewegungspfad (Trajektorie: von unten oder von oben) sie das Kreuz berühren sollte. Z.B. bedeutet „rechts oben“, dass die Vp mit der rechten Hand von oberhalb des Balkens den Arm bewegen sollte. Der Kopf der Vp ruhte auf einer Kinnstütze und die Hände auf Schaltern, so dass elektronisch die benutzte Hand registriert wurde. Nach einer Eingewöhnungsphase folgte der Vortest (20 Durchgänge): Kreuz anschauen, Augen

schließen, Kreuz berühren. In diesem Vortest gab es **vier (2 Hände x 2 Trajektorien) Bewegungsbedingungen**:

Rechts oben, rechts unten, links oben, links unten.

Es folgten dann 80 Adaptationsdurchgänge mit Prismenbrille und offenen Augen, in der **nur eine Bewegungsbedingung (eine Hand und eine Trajektorie)** trainiert wurden. Dann folgte der Nachtest, der mit dem Vortest identisch war.

Abb. 124: Versuchsaufbau von Kaernbach, Munka & Cunningham (2002)

Abbildung 125zeigt die Verteilung der Differenzen zwischen Vor- und Nachtest Für die nicht adaptierte und die adaptierte Hand in Abhängigkeit von der trainierten und nicht trainierten Trajektorie. Negative Differenzen zeigen einen Nacheffekt an.

Abb.125: Verteilung der Differenzen zwischen Vor- und Nachtest für die nicht adaptierte (oben; AH) und die adaptierte (unten; GH) Hand in Abhängigkeit von der trainierten (GT) und nicht trainierten (AT) Trajektorie. Negative Differenzen zeigen einen Nacheffekt an.

Wie man sieht, verteilen sich die Vor-Nachtest-Differenzen für die nicht adaptierte Hand um Null, sowohl für die trainierte als auch für die **nicht trainierte Trajektorie** (oberes Histogramm). Es gibt also **keinen Nacheffekt** für die nicht adaptierte Hand. Dagegen verteilen sich die Vor-Nachtest-Differenzen für die adaptierte Hand um einen negativen Wert. Es stellt sich also ein Nacheffekt ein. Dieser **Nacheffekt ist für die trainierte Trajektorie signifikant stärker** (-46 mm) als für die nicht trainierte Trajektorie (-26 mm). Kaernbach folgert aus seinen Befunden, dass die Adaptation spezifisch für die eingeübte Bewegung erfolgt und dass räumliches Wissen verteilt vorliegt, verteilt auf die verschiedenen Gliedmaßen und sogar auf die verschiedenen Bewegungspfade. Eine zentrale Repräsentation räumlichen Wissen ist nicht Grundlage des Handelns, sondern dient möglicherweise allein dem abstrakten Planen.

3.8.7. Wahrnehmungslernen durch Blickbewegung

Ein besonderer Fall von Wahrnehmungslernen lässt sich mit der Technik der retinalen Stabilisierung herstellen. **Retinale Stabilisierung** ist eine Bedingung in der die **sakkadische** Reafferenz verhindert wird. Retinale Stabilisierung bedeutet, dass die Lage des Retinabildes während der Blickbewegungen konstant gehalten wird, d.h., wie die Vp auch immer ihr Auge bewegt, die retinale Reizung bleibt immer dieselbe (ähnlich, wie es auch für das Nachbild (s.o. S. 88 u. Abb. 104) gilt). Hierzu gibt es eine Reihe verschiedener Techniken (DITCHBURN, 1973). Bei retinaler Stabilisierung gibt es also keine blickbewegungsspezifische Reafferenz. Unter dieser Bedingung kommt es zu einem **Verlust der Wahrnehmungswelt**. Die Wahrnehmungswelt bricht schon nach wenigen Sekunden zusammen. Die Vpn berichten das „schwärzestes Schwarz ihres Lebens“ (DITCHBURN, 1973). Der Zusammenbruch der Wahrnehmungswelt geschieht **objektweise**: Die Wahrnehmungswelt verschwindet nicht an allen Stellen des Gesichtsfeldes gleichzeitig, sondern es verschwinden zunächst einzelnen Objekte; es ist also nicht einfach ein peripheres Phänomen, was oft behauptet wurde, sondern es ist ein Spezialfall von Wahrnehmungslernen.

Man kann auch **Einzelobjekte stabilisieren**; d.h. mit jedem Blickwechsel bleibt das Retinabild des einen stabilisierten Objektes an seiner retinalen Stelle, während die retinale Abbildung aller anderen Objekte durch die Blickbewegung wie üblich reafferent bewegt wird. In diesem Fall **verschwindet nur das retinal stabilisierte Objekt aus der Wahrnehmung**. An seiner Stelle im Gesichtsfeld wird der Hintergrund ergänzt, und zwar ebenso, wie der „blinde Fleck“ ergänzt wird (s.o. Abb. 83 u. 84).

Die Retina wird durch ein Kapillarsystem mit Blut versorgt, das sich vor den lichtempfindlichen Sinneszellen befindet und folglich einen Schatten auf die Retina wirft (Abb. 119). Dieser **Kapillarschatten** ist ein retinal stabilisiertes Muster, das in der Wahrnehmungswelt nicht vertreten ist. Man kann ihn sichtbar machen, indem man seitlich durch den Augapfel leuchtet und die Lichtquelle bewegt, so dass der Schatten nun nicht mehr stabilisiert ist, sondern hin und her schwankt. Dann nimmt man den bewegten Kapillarschatten wahr. Aber, nach kurzer Zeit verschwindet er wieder, obwohl er bewegt, also nicht stabilisiert ist. Offenbar ist die Stabilisierung der Retinabildes nicht entscheidend für den Wahrnehmungsverlust, sondern die **Dekorrelation zwischen Blickwechsel und Reafferenz** (s.o.). Dieser Befund zeigt einmal mehr, dass die sakkadische **Reafferenz das Ziel** der Sakkade ist. Es kommt darauf an, sie zu produzieren. Bei Dekorrelation gelingt das eben nicht (Wolff, 1985, 1986, 1987, 1999, 2002).

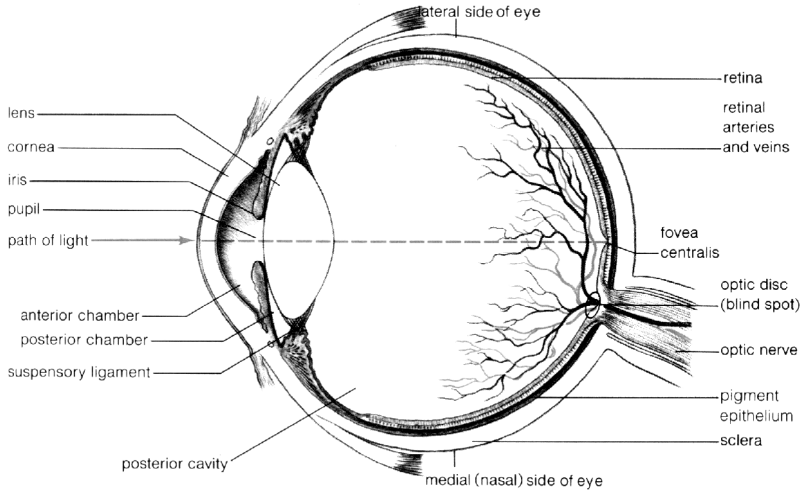


Abb. 121: Auge mit Kapillaren

Hierzu ein einfallsreiches Experiment von COREN & PORAC (1974), das zeigt, dass die **Intention einer Willkürsakkade auf die Herstellung einer spezifischen Reafferenz** gerichtet ist. COREN & PORAC verwendeten eine Technik, mit der sich ein stabilisiertes Retinabild herstellen lässt: Projiziert man **blaues polarisiertes** Licht in das Auge, so entsteht infolge spezifischer Eigenschaften der Linse ein stabilisiertes Retinabild, ein Schatten, der wie ein Propeller aussieht und als **Haidinger’s Brush** bezeichnet wird. Derartige Phänomene, die erst im Auge selbst entstehen nennt man **entoptisch**.

Abb. 122: Haidinger's Brush. **Im Gegensatz zu dieser Abbildung ist die Haidinger's Brush ein homogener Schatten**

Die Haidinger's Brush hat einen Gesichtswinkeldurchmesser von 3,75°. (1° entspricht 1cm = ca. Daumendicke in einer Entfernung von 57 cm = ca. Armlänge). Das Zentrum der Haidinger's Brush liegt genau auf der Fovea. Man kann die Haidinger's Brush wegen ihrer retinalen Stabilisierung nur kurze Zeit wahrnehmen (COREN, 1971). Rotiert man jedoch den Polarisationsfilter, dann **rotiert auch die Haidinger's Brush auf der Netzhaut** und wird wieder sichtbar. Sie springt dann, ähnlich dem negativen Nachbild, mit jedem Blick mit. Sie verschwindet nach einiger Zeit allerdings wieder, da sie unabhängig von den tatsächlichen Blickbewegungen rotiert, d.h. die retinalen Bewegungen (Bewegungen der Haidinger's Brush **)** und die Blicke sind **dekorreliert**. Dass dies wirklich der Grund ist, zeigt das Experiment von COREN & PORAC (1974):

Sie boten die Haidinger's Brush zusammen mit 4 quadratisch angeordneten Lichtpunkten dar, die **nicht** stabilisiert waren. Es gab 4 Bedingungen (vgl. Abb. 120):

- **Fixationsbedingung**: Die Vp hatte das Zentrum der Haidinger's Brush zu fixieren, was leicht möglich war, da das Zentrum der Haidinger's Brush auf der Fovea liegt.
- **Irrelevante Blickbewegung**: Die Vp hatte zwischen den Lichtpunkten hin und her zu blicken, was möglich war, da die Lichtpunkte nicht stabilisiert waren.
- **Relevante Blickbewegung**: Die Vp hatte einen der rotierenden Flügel der Haidinger's Brush mit den Blicken zu verfolgen, was **nicht** möglich war, da das Zentrum der Haidinger's Brush unabhängig von den Blickbewegungen auf der Fovea bleibt.
- In der **Kontrollbedingung** wurde kein entoptisches Phänomen erzeugt, sondern es wurde eine nicht stabilisierte rotierende Reizvorlage dargeboten, die so konstruiert war, dass sie genau wie eine Haidinger's Brush aussah. Die Vp hatte das Zentrum zu fixieren, was natürlich leicht möglich war.

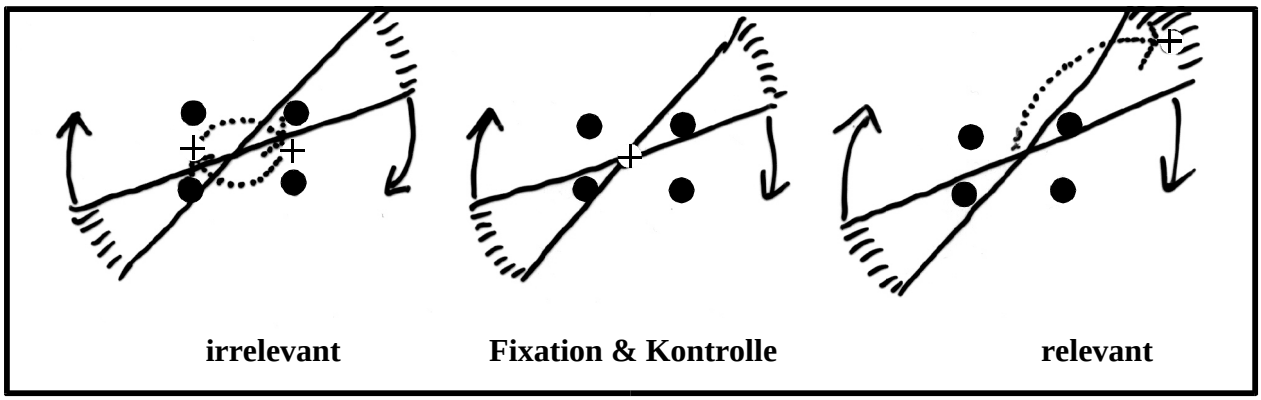


Abb. 123 : Coren & Porac (1974): Die schwarzen Punkte stehen für die nicht stabilisierten Lichtpunkte, die Kreuze für die intendierten Fixationen.

In jeder der 4 Gruppen hatten die Vpn fortlaufend die Klarheit der wahrgenommenen Figur zu beurteilen.

Ergebnis (Abb. 121): Die Klarheit der wahrgenommenen Figur sank in allen Bedingungen, aber am weitaus stärksten in der Bedingung „**relevante Blickbewegung**".

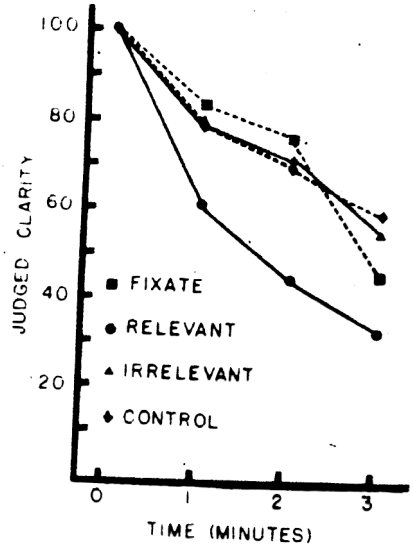


Abb. 124: Beurteilte Klarheit in Abhängigkeit von den Fixationsbedingungen in dem Versuch von Coren & Porac (1974).

Den Verlust der Klarheit in den anderen Bedingung führten die Autoren auf Faktoren zurück, die nicht mit retinaler Stabilisierung zu tun haben, nämlich den geringen Kontrast der Haidinger's Brush sowie die Rotationsfrequenz.

Bedeutung: Man kann dem Befund entnehmen, dass die Dekorrelation von Bewegung und Reafferenz nur dann wahrnehmungswirksam ist, wenn die Blickwechsel**intention** durch sie vereitelt wird. Das wird besonders deutlich, wenn man die „**relevante Blickbewegung**" mit der **irrelevanten** vergleicht: In beiden Bedingungen ist die Beziehung der Blickbewegung zu der Bewegung der Haidinger's Brush in gleichem Maße dekorreliert. Trotzdem bewirkt dies nur in der Bedingung „**relevante Blickbewegung**", in welcher die Dekorrelation den intendierten Blickwechsel zur Propellerspitze verhindert, einen Wahrnehmungsverlust.

Wir sehen hier besonders klar, wie sehr die Blickwechselintention an die Herstellung einer spezifischen Reafferenz gebunden ist und dass die Möglichkeit, Blickwechselintentionen zu realisieren, für die Wahrnehmungswelt konstitutiv ist.

3.9. Raumwahrnehmung

Ein bevorzugtes Problem des Konstruktivismus ist die 3-dimensionale Tiefenwahrnehmung. Da das **Netzhautbild 2-dimensional** ist, stellt sich die Frage, wie die Wahrnehmung der **räumlichen Anordnung der Objekte** zustande kommt. Wie gelangt das visuelle System zur

3. Dimension? Die Gestaltpsychologen erblickten in der 3. Dimension gewissermaßen eine Zutat der Seele. Ihrer Auffassung nach ist die Wahrnehmungswelt von Natur aus räumlich.
Zum Nachweis führten sie Versuche am **„Ganzfeld“**aus: Die Vpn blickten in eine Halbkugel (Abb. 125), die so homogen ausgeleuchtet war, dass nicht die geringste Struktur zu erkennen war. Unter diesen Bedingungen sieht man einen **räumlichen** Nebel, der in einer Entfernung von 2-3 Metern beginnt.

Nach Auffassung des Konstruktivismus, ist die 3-Dimensionalität der Wahrnehmungswelt eine Konstruktion unter Verwendung von Tiefenhinweisen. Das visuelle System benutzt sog. CUEs über die Tiefenstaffelung der Objekte. Man unterscheidet monokulare und binokulare Tiefencues.

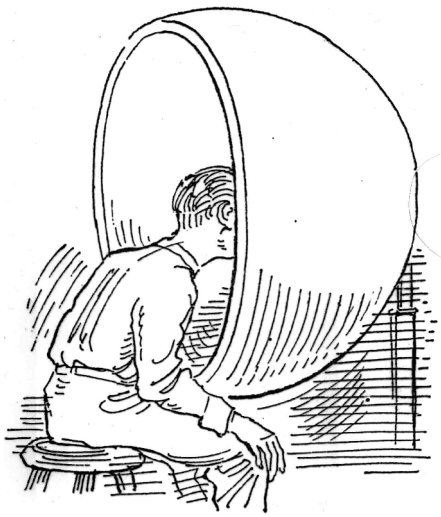


Abb. 125: Untersuchungen am „Ganzfeld“

Monokulare Cues sind Tiefenhinweise die jedes Auge zur Verfügung stellt und die es ermöglichen, dass man sich auch einäugig vorzüglich orientieren z.B.: Autofahren kann. Wiley Post, der als erster einen Alleinflug um die Welt unternahm, war einäugig. Die monokularen Tiefencues liegen auch der Tiefenwirkung von Gemälden oder Photographien zugrunde. Binokulare Tiefencues werden erst durch das Zusammenspiel beider Augen wirksam.

3.9.1. Einige Monokulare Tiefencues

Die Abbildungen 126-133 illustrieren die monokularen Tiefencues: Linearperspektive, Größe, Luftperspektive, Schattierung und Textur.

Abb. 126: **Linear-Perspektive**: Linienkonvergenz als Information für in die Tiefe sich erstreckende Parallelen

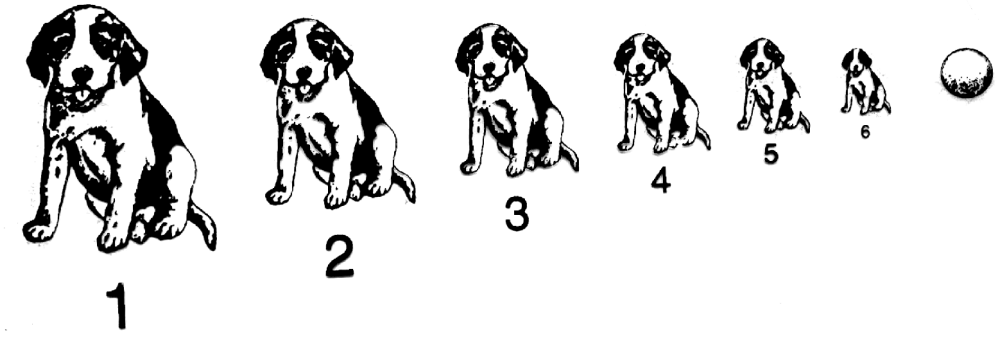


Abb. 127: **Größe**: Das Kleine erscheint weiter entfernt.

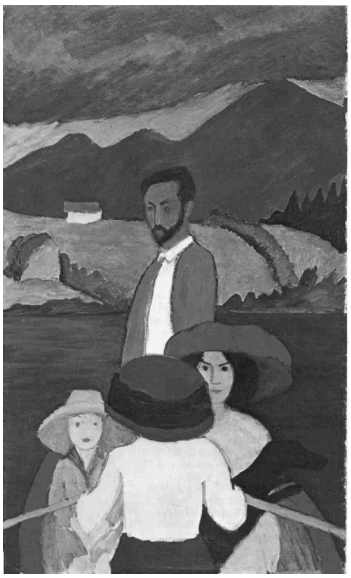


Abb. 128: **Verdeckung** erzeugt Tiefenstaffelung (Gemälde von Gabriele Münter).

.

Abb. 129: **Luftperspektive**: Helle und kontrastschwache Objekte erscheinen entfernt

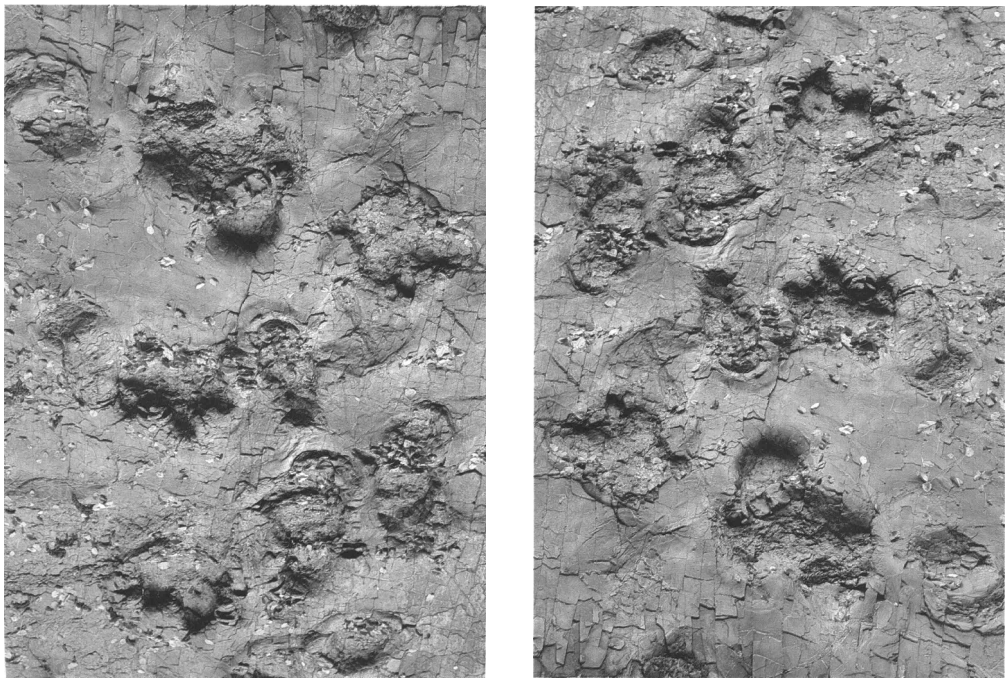


Abb.130: Tiefencue der **Schattierung**: Die Abbildung zeigt die Saurierspuren von Barkhausen. Links die Abbildung aus dem *Bild-Atlas Osnabrücker Land und Tecklenburg* (1985, Hamburg: HB-Verlagsgesellschaft.), in welchem die Spuren als Erhebungen erscheinen, weil das Bild versehentlich auf dem Kopf abgedruckt wurde. Rechts: Dieselbe Abbildung in korrekter Orientierung. Jetzt sehen wir die Spuren als deutliche Vertiefungen. Das Beispiel zeigt, dass die Schattierung bevorzugt unter der Voraussetzung gedeutet wird, dass das Licht, wie meistens, von oben kommt.

Ein besonders wichtiger Tiefenhinweis ist der **Texturgradient**. Was ist Textur? Oberflächen sind nicht homogen, sondern haben, wenn sie nicht spiegelblank sind, feine Elemente (Kies, Sandkörner, Blätter, Gras, Holzmaserung, Narben), welche für das jeweilige Material spezifisch sind (Abb. 135). Dies sind Texturelemente, die, obwohl

Abb. : 131: Texturen

sie nicht identisch sind (jeder Kiesel ist verschieden), eine statistische Regelhaftigkeit besitzen. Die mittlere Größe und der mittlere Abstand der Texturelemente bleibt für eine gegebene Art von Textur konstant. Wenn nun eine Oberfläche zum Beobachter geneigt ist, dann ändert sich im retinalen Abbild dieser Oberfläche die Größe der Texturelemente und ihre Dichte, und zwar in einer gesetzmäßigen Weise (Abb. 136).

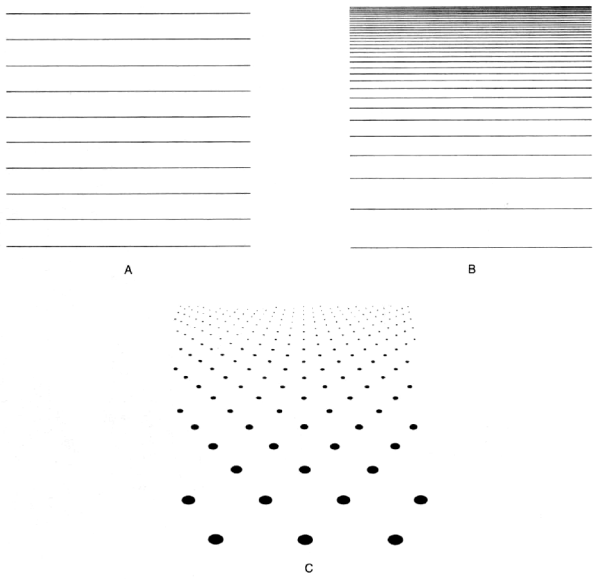


Abb. 132: Texturgradienten für eine frontalparallele Wand (a) und zwei Bodenflächen (B) und (C) (GIBSON, 1950)

Dieser Gradient, d.h. die Änderung der Texturdichte ist bei allen Oberflächen, welche dieselbe Neigung zum Beobachter haben, gleich, und zwar unabhängig von der Größe der Texturelemente. Z.B. Die Neigung des Bodens auf dem wir stehen erzeugt einen Gradienten in vertikaler Richtung des Retinabildes. Die Neigung einer Wand erzeugt einen Gradienten in horizontaler Richtung des Retinabildes. Der Grad der Gradientenänderung spezifiziert jeweils den Neigungswinkel zum Beobachter (Abb. 132. Texturgradienten sind in der Malerei ein beliebtes Stilmittel (Abb. 133).

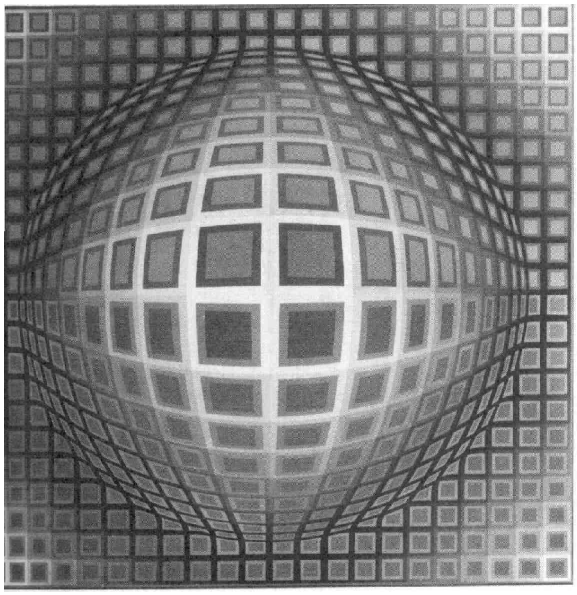


Abb. 133: Texturgradienten in der Kunst: *Vega-Nor* von Victor Vasareley (1969)

Bewegungsparallaxe ist ein weiterer wichtiger monokularer Tiefencue**:**
Der Begriff stammt ursprünglich aus der Astronomie. Gemeint ist eine Reafferenz, nämlich die Verschiebung und perspektivische Änderung der retinalen Abbildung durch Eigenbewegung.

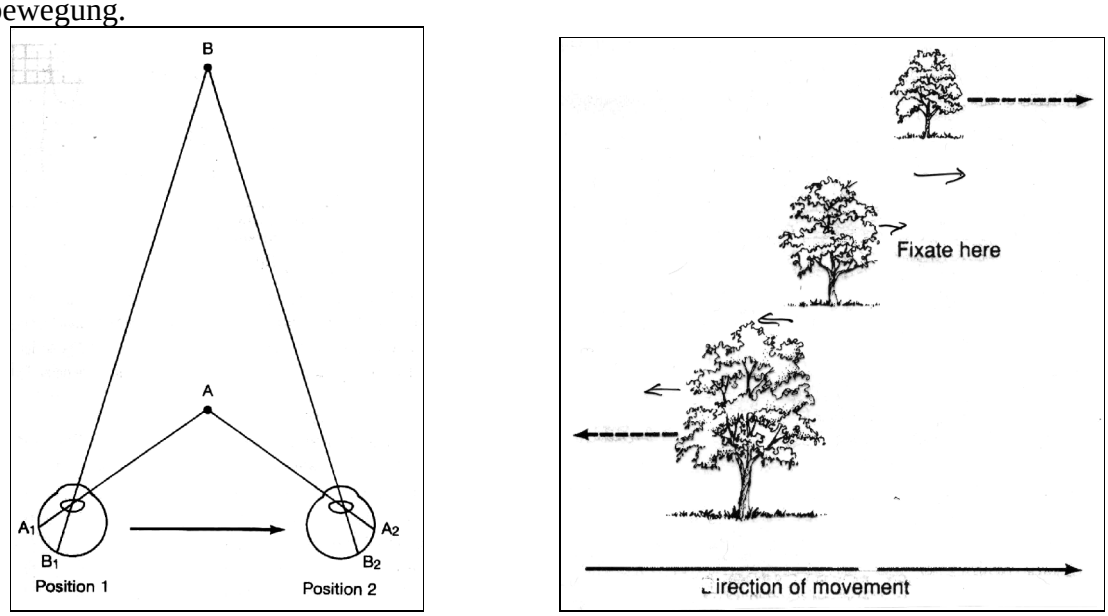


Abb. 134: Bewegungsparallaxe (links) und durch sie bedingte „Scheinbewegungen“ (rechts)

Die Bewegungsparallaxe ist ein sehr wirksamer Cue: Filme, die aus einer bewegte Kamera aufgenommen wurden, erzeugen einen sehr starken Raumeffekt. Viele Tiefentäuschungen funktionieren nur, wenn der Beobachter sich nicht bewegt:

Z.B. Der **AMES'scher Raum** (Abb. 135-136) ist ein schiefwinkliger Raum, der durch ein Loch betrachtet rechtwinklig erscheint. Die Innenbemalung des Raumes erleichtert diese

Wahrnehmungsstruktur. Infolge dieser „guten Gestalt“ variiert die anschauliche Größe von Personen im Ames’schen Raum. Diese wunderschöne Täuschung ist aber an die Lochperspektive gebunden. Sobald die Lochwand entfernt wird und die Vpn sich bewegen können, verschwindet die Täuschung, da nun die Bewegungsparallaxe die wahren Tiefenhinweise verfügbar macht.

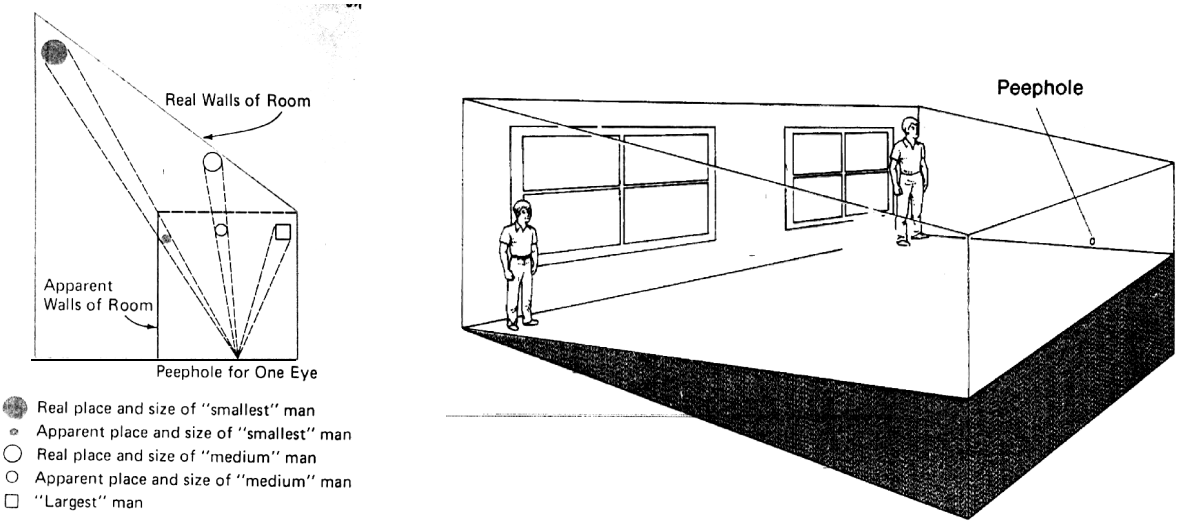


Abb. 135: Ames’scher Raum: Links: Tatsächlicher und scheinbarer Grundriss; rechts: Seitenansicht.

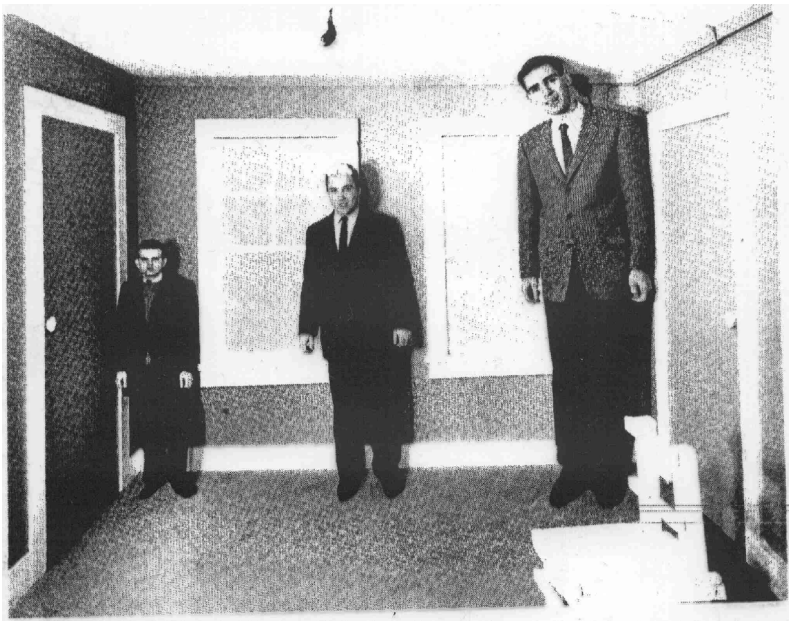


Abb. 136: So erscheint dem Betrachter der Ames’sche Raum, wenn er durch das Guckloch blickt. Die tatsächlichen Verhältnisse sind in der Abb. 135 dargestellt.

Kein Tiefencue ist die **Akkommodation**: Die Ciliarmuskelbewegung verändert die Brechkraft der Linse (Abb. 141). Die Linse ist elastisch und zieht sich zusammen. Sie wäre damit automatisch auf Nah eingestellt, wenn nicht der Ciliarmuskel sie auseinanderziehen würde und ihre Brechkraft der Entfernung des Fixationspunktes anpassen würde. Der Ciliarmuskel ist ein Ringmuskel. Seine Fasern sind so angeordnet, dass bei **Kontraktion des Muskels** der Innendurchmesser des Ringes **kleiner** wird. Ergebnis: Die Linse wird dicker,

d.h. auf Nähe eingestellt. Akkommodationsbewegungen und Konvergenzbewegungen (s.u.) gehen Hand in Hand. Efferenzen oder Afferenzen über die Akkomodation könnten als Entfernungscue verwendet werden. Dies ist aber nicht der Fall. **Die Akkomodation spielt als Entfernungscue keine wesentlich Rolle.**

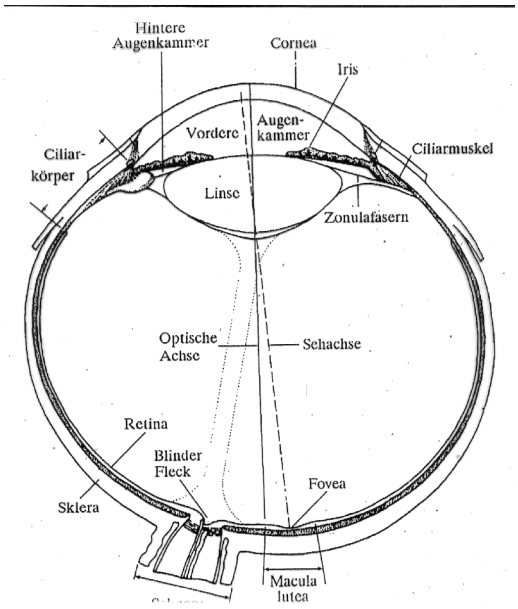


Abb. 137: Auge mit Ciliarmuskel und Fovea

3.9.2. Binokulare Tiefencues

Spielen eine wichtige Rolle beim Nahsehen (Greifraum). z.B.: Einfädeln

Grundlage: Beim Fixieren treffen sich die optischen Achsen der Augen in einem Punkt der Außenwelt = Fixationspunkt. **Konsequenz:** Fixationsobjekt wird in beiden Augen auf die **Fovea centralis** (Durchmesser 0,2 mm, F< 1mm^2) projiziert (Abb. 137). Die Fovea ist der Retinabereich mit besonders hohem räumlichem Auflösungsvermögen, d.h.: Die Struktur des Retinabildes am Fixationspunkt und in der unmittelbare Umgebung (**Macula lutea** Abb. 137) erfahren eine besonders feine räumliche Auflösung, eine präzise Analyse lokaler Details. Welches sind die binokularen Tiefencues, die mit einer Tiefenveränderung einhergehen?

Es gibt 2 Kandidaten, einen **extraretinalen (Konvergenzwinkel)** und einen **retinalen (Querdisparation)**:

3.9.2.1. Konvergenzwinkel

Der extraretinale Kandidat ist der **Konvergenzwinkel**, in welchem die Augen zueinander stehen. Er ist abhängig von der Entfernung und Richtung des Fixationspunktes. Beispiel: Finger fixieren und an die Nase führen.

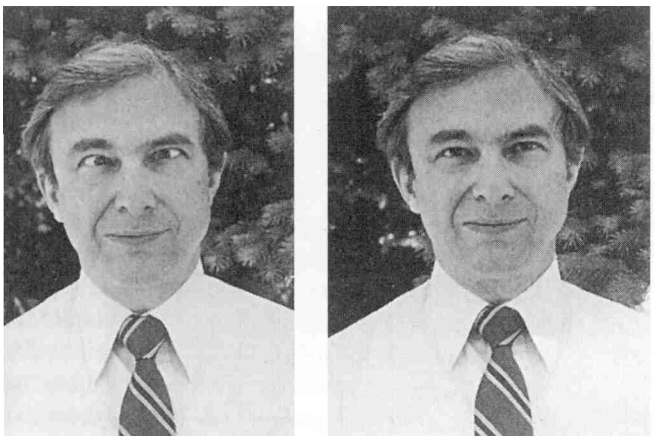


Abb. 138: Vergenzwinkel bei naher (links) und ferner (rechts) Fixation.

Die Efferenzen (und/oder Afferenzen) für die Vergenzbewegungen (Divergenz- und Konvergenz-) werden als **Entfernungsinformation für die Lage des Fixationspunktes** verwendet.

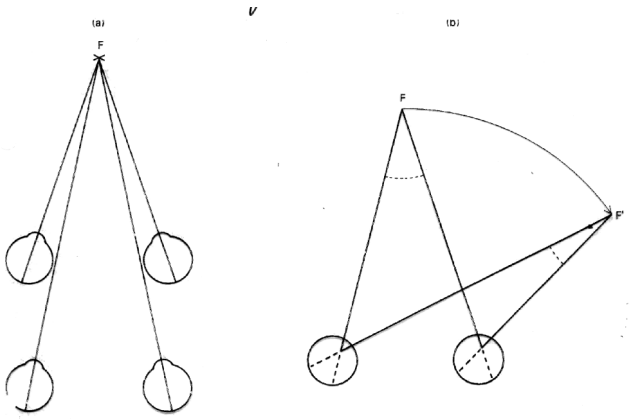


Abb. 139: Der Konvergenzwinkel wächst mit der Nähe zum Fixationspunkt (links), hängt aber auch von der Richtung des Fixationspunktes ab (rechts).

Befunde: In Dunkelheit sind die Augen keineswegs parallel ausgerichtet, sondern die Blicklinien konvergieren auf einen Punkt in einer Entfernung von ca. 1m (interindividuell variabel): **Dunkelvergenz = Ruhevergenz.** Durch andauerndes Fixieren unterhalb (vor) oder oberhalb (hinter) der Ruhevergenz kann diese verändert werden. Die Ruhevergenz verlagert sich in Richtung der andauernd fixierten Entfernung (s.o. Wahrnehmungslernen). Diese Verlagerungen rufen Entfernungstäuschungen hervor unter Bedingungen, in denen keine visuellen Entfernungscues zur Verfügung stehen. Wenn also eine Näherin den ganzen Tag genäht und somit im Nahbereich fixiert hat, könnte sich ihre Ruhevergenz verkürzen, mit dem Effekt, dass sie bei einer anschließenden Nachtfahrt Entfernungen überschätzt.

3.9.2.2. Querdisparation

Der Konvergenzwinkel kann natürlich nur über die Entfernung des **Fixationspunktes** informieren, nicht über die Entfernung anderer Objekte. Dazu nutzt das visuelle System den **retinalen** binokularen Cue.

Abb. : 140: Zwei im Augenabstand zueinander aufgenommene Fotos. Das linke Foto entspricht der Perspektive des linken, das rechte der des rechten Auges. Schielt man so, dass sich die Sehachsen beider Augen hinter der Bildebene treffen und das linke Auge das linke Foto, das rechte das rechte Foto betrachtet, oder betrachtet man beide Bilder durch eine Stereoskop, so ergibt sich ein plastischer Raumeffekt.

Jedes Auge sieht die Umgebung aus einer anderen Perspektive. Dadurch stehen Hinweise über die räumliche Anordnung der Objekte zur Verfügung. Dass sie genutzt werden, hat bereits WHEATSTONE (1838) mit seinem Stereoskop nachgewiesen. Das Stereoskop ermöglicht es, zwei Ansichten einer Szene (z.B. die aus Abb. 140), die den beiden Retinabildern ungefähr entsprechen, beiden Augen getrennt (**dichoptisch**) darzubieten. Der Beobachter hat eine plastische Raumwahrnehmung. Denselben Effekt kann man mit Schieltechnik erreichen (vgl. Legende zu Abb. 140) oder mit Anaglyphen. Bei Anaglyphen sind beide Bilder übereinander gedruckt, und zwar das eine in roter, das andere in grüner Farbe. Betrachtet man eine solche Vorlage mit einer Rot-Grün-Brille, so gelangt das rote Bild in das Auge mit dem Grünfilter, das grüne Bild in das Auge mit dem Rotfilter. Beide Bilder werden dann also dichoptisch dargeboten.

Würde man die beiden Retinabilder **ortsgerecht** aufeinander legen (wie im Zyklopenauge in Abb. 141), so dass die beiden **Foveae** sowie die **horizontale** und **vertikale** Achse genau übereinstimmten, dann zeigte sich, dass die Retinastellen, auf die ein und derselbe Raumpunkt in beiden Augen projiziert wird, von der Fovea unterschiedlich weit **entfernt** und **gerichtet** sind (**nicht korrespondierende** Netzhaustellen). (Ausnahmen: Fixationspunkt und Punkte des Horopter, s.u.).

Die Abweichung der retinalen Lage der beiden Projektionen ein- und desselben Raumpunktes ist seine **QUERDISPARATION, RETINALE BREITENABWEICHUNG oder BINOKULARE DISPARITÄT.**

Abb. 141 zeigt, wie sich die Querdisparation beim Fixationswechsel ändert.

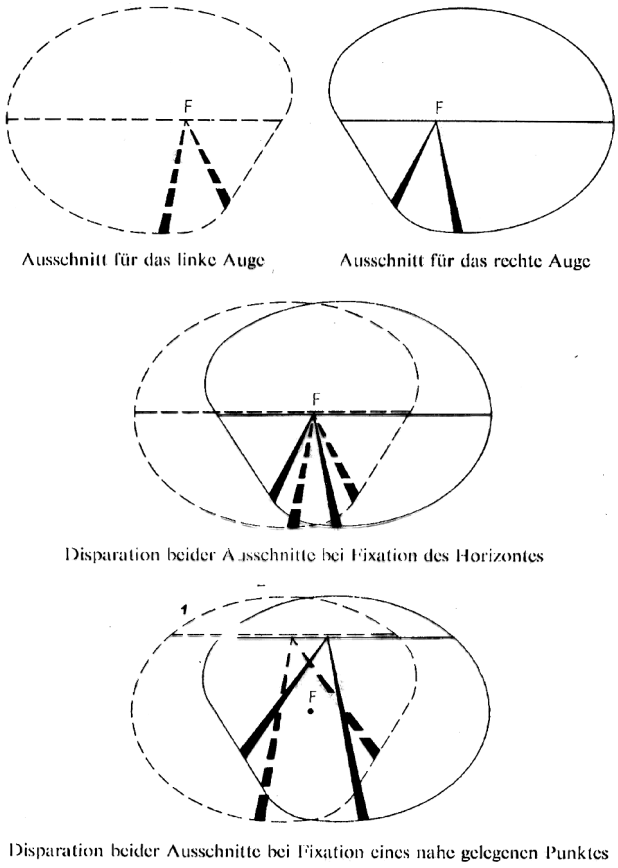


Abb. 141: Querdisparation und ihre Änderung beim Fixationswechsel

Zwischen **Querdisparation** und **Bewegungsparallaxe** besteht ein Zusammenhang (GIBSON, 1966): Durch Bewegung eines Auges können nacheinander dieselben Reizbedingungen hergestellt werden, wie binokular gleichzeitig.

An eine Modifikation der Querdisparation kann man sich anpassen. WALLACH verwendete ein **Telestereoskop** (Abb. 142), dass die Querdisparation **vergrößert.** Durch das Telestereoskop erscheinen die Objekte in der Tiefendimension gestreckt. Wenn sie rotieren, macht ihre Form eine fortlaufende Deformation durch. Unter Rotationsbedingungen findet Wallach eine 100% -ige perzeptive Anpassung. Entfernt man das Telestereoskop, so erscheinen die Objekte gestaucht (Nacheffekt). Man kann also lernen, eine geänderte Querdisparation auszunutzen.

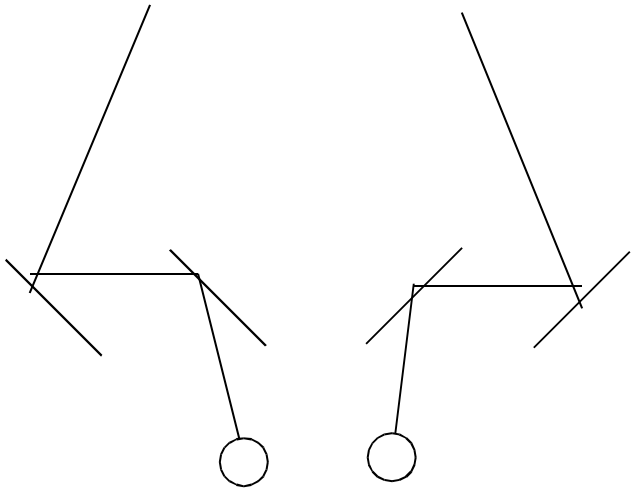


Abb. 142: Telestereoskop nach Wallach

Dies ist relevant für die **Schieltherapie**: Wird eine angeborene Schielstellung der Augen durch eine Schieloperation (Muskelverkürzung) oder prismatische Linse korrigiert, dann beobachtet man, dass einige Patienten die ursprüngliche Schielstellung **aktiv** wiederherstellen. CAMPOS (1986) bezeichnet das als „**Eating the prism**". Offenbar haben die Patienten bzw. Probanden gelernt, ihre angeborene abnorme Querdisparation als Tiefencue auszunutzen. Diese Information steht ihnen nun nach der Korrektur nicht mehr zur Verfügung. Diese Ergebnisse sprechen gegen die bei Kindern häufig verwendete Schieltherapie, das gesunde Auge abzudecken, um die Muskeln des abweichenden Auges zu trainieren. Diese Therapie behindert den Erwerb des Stereosehens, da der Patient nur monokulare Erfahrungen macht und die versäumten Erfahrungen später nicht mehr nachholen kann: BLAKEMORE (1976) zog Katzen unter monokulare Bedingungen auf, wobei das abgedeckte Auge täglich wechselte. Ergebnis: Die Katzen verloren die Fähigkeit zum Stereosehen.

3.9.3. Korrespondierende Netzhautstellen, Horopter, Panum'scher Bereich

Folgende Raumpunkte haben **keine** Querdisparation.

1. **Fixationspunkt.**
2. **Alle Punkte, die auf einem Kreis liegen, der durch den Fixationspunkt und die Drehpunkte beider Augen geht. = HOROPTER** (kommt vorn Horós = Grenze)

Die ideale Kreisform gilt für den **theoretischen oder auch Vieth - Müller – Horopter** (Abb. 143). Der empirische Horopter ist aus anatomischen und physiologischen Gründen weniger regelmäßig (Abb. 144).

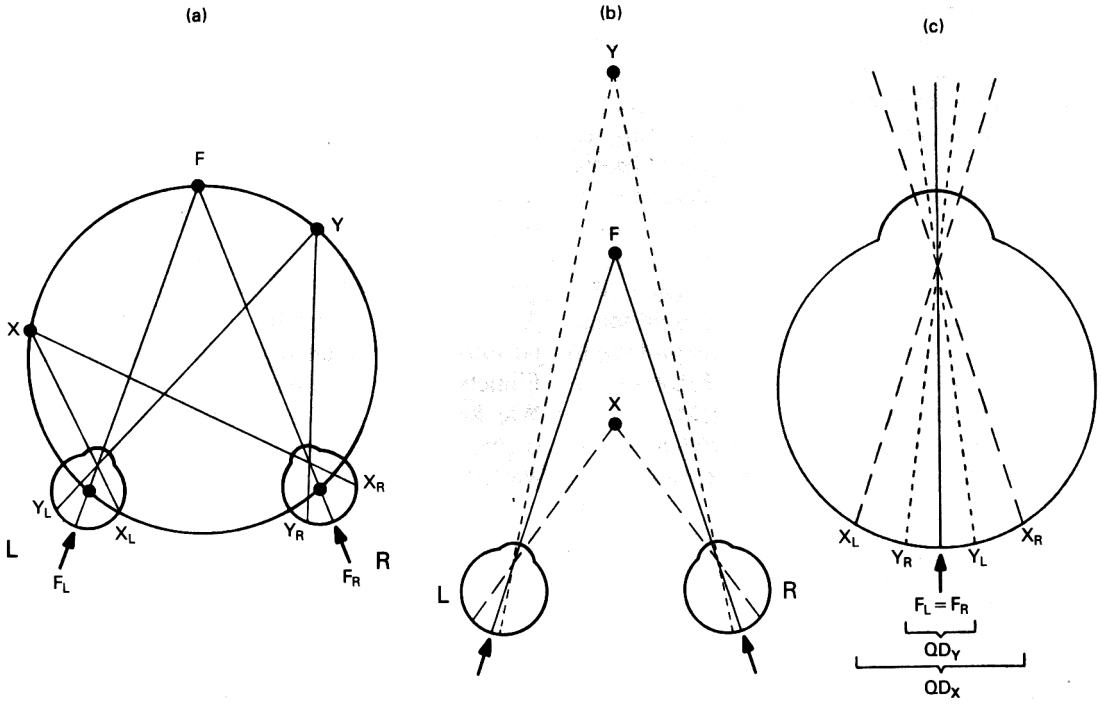


Abb. 143: **a:** Vieth - Müller – Horopter, F = Fixationspunkt; **b:** Raumpunkte (X,Y), die auf nicht korrespondierenden Netzhautstellen abgebildet werden; **c:** „Zyklopenauge“ (Überlagerung beider Augen aus b); F_L, F_R = Fovea im linken ($_L$) und rechten ($_R$) Auge; X_L, X_R, Y_L, Y_R= Retinastellen, auf welche die Raumpunkte X und Y im linken und rechten Auge abgebildet werden; QD=Querdisparation (aus Prinz, 1990)

Vor allem bei weit entferntem Fixationspunkt ist der Horopter nur gering gekrümmt. **Alle Raumpunkte, die auf dem Horopter liegen, haben keine Querdisparation, d.h., sie werden auf korrespondierenden Netzhautstellen abgebildet, deren Entfernung und Richtung von der Fovea gleich ist.**

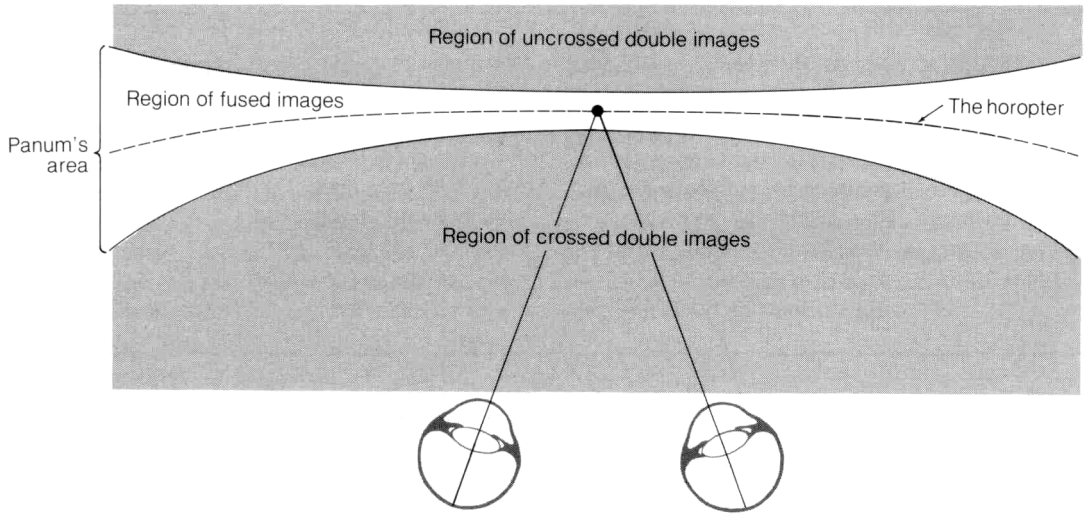


Abb. 144: Horopter und Panum’scher Bereich

Ausmaß und Richtung der Querdisparation korrelieren eindeutig mit der Objektentfernung relativ zum Fixationspunkt (Cyklopenauge, Abb. 146).

Die Querdisparation wird in Gesichtswinkel angegeben. Die Querdisparation eines nicht fixierten Punktes *X* entspricht der Differenz γ zwischen dem Konvergenzwinkel α und dem Winkel der Sichtlinien beider Augen β (Abb. 145). Normalsichtige Personen können noch Tiefenunterschiede erkennen, die einer Querdisparation von 10 Bogensekunden und damit einer Relativverschiebung der beiden Netzhautbilder um nur einen Mikrometer entsprechen.

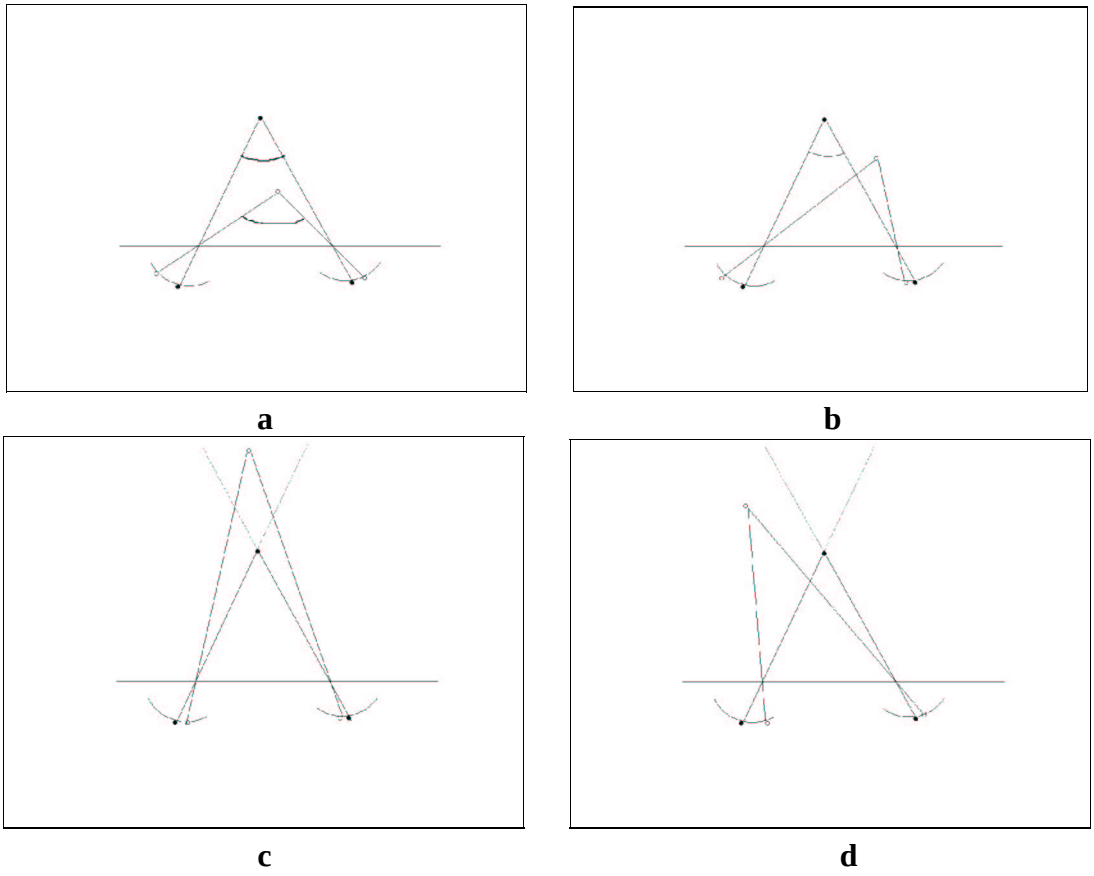


Abb. 145: Querdisparation in Winkelmaß: $\gamma = \alpha - \beta$ **(Die Abb. Ist noch unfertig!!!)**

Konsequenz der Querdisparation:

3. **Gesehene Tiefe und**
4. **Doppelbilder (bei hinreichender Größe der Querdisparation)**

Wenn die Querdisparation einen kritischen Wert **nicht** überschreitet, dann gibt es **keine** Doppelbilder, sondern nur den Tiefeneindruck. **Der kritische Bereich, in welchem beide Bilder fusionieren, heißt PANUMscher Bereich** (nach dem dänischen Physiologen P.L. Panum 1820-1885, vgl. Abb. 144). Der Panumsche Bereich ist nicht konstant. Er ist z.B. bei 2 einzelnen Punkten kleiner als bei einer ganzen Struktur, wo er ca. 2° beträgt.

3.9.4. Das Zuordnungsproblem

Die Ausnutzung der Querdisparation ist nur möglich, wenn das visuelle System weiß, auf welche nicht korrespondierenden Netzhautstellen derselbe Raumpunkt in beiden Augen

projiziert wird. Denn wenn die Querdisparation als Entfernungscue verwendet wird, dann müssen ja jeweils die Retinastellen gefunden werden, zwischen denen die Querdisparation ermittelt werden soll.

Naheliegende **Annahme**, die bis in die 60er Jahre aktuell war: Zuerst monokulare Identifikation von Formen und erst anschließend Fusion (Abb. 146 b).

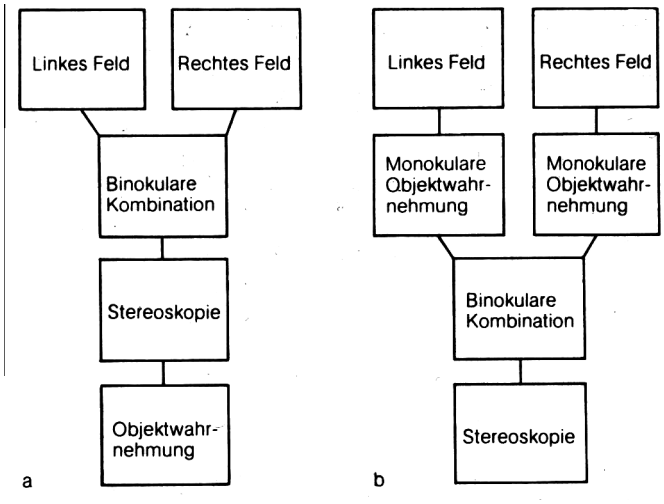


Abb. 146: Annahmen zur Stereoskopie. Julesz Experimente mit den Zufallsstereogrammen zeigt, dass die Fusion beider Netzhaubilder dem Objekterkennen vorausgehen kann (a).

Dass das **monokulare Erkennen** von Objekten **keine Voraussetzung für stereoskopes Sehen** ist (Abb. 146 a), hat BELA JULESZ gezeigt durch die Konstruktion der **Zufallsstereogramme** (Abb. 147)**.**

JULESZ erzeugte ein Zufallsmuster aus schwarzen und weißen Quadraten. In einer identischen Kopie dieses Zufallsmusters verlagerte er einen quadratischen Ausschnitt nach rechts und füllte den links frei gewordenen Bereich mit der rechts überzähligen Partie aus:

Betrachtet man beide Muster dichoptisch, z.B. in einem Stereoskop, oder schielt man so, dass das linke Auge auf das linke Muster blickt, das rechte Auge auf das rechte Muster, so nimmt man ein Quadrat wahr, das vor einem Hintergrund schwebt. Dieses Quadrat entsteht erst als Folge der Verarbeitung der binokularen Disparität. JULESZ Technik liegt den Autostereogrammen zugrunde, die vor ein paar Jahren Furore machten (z.B. „Das magische Auge“).

Zuordnungsproblem

Woher weiß das visuelle System, welche schwarzen und welche weißen Quadrate, die auf nicht korrespondierende Netzhaustellen fallen, jeweils zueinander gehören, so dass ihre Disparität als Entfernungsinformation auszuwerten ist? Mit dieser Frage werden wir uns im Zusammenhang mit dem Computerwissenschaftlichen Ansatz befassen.

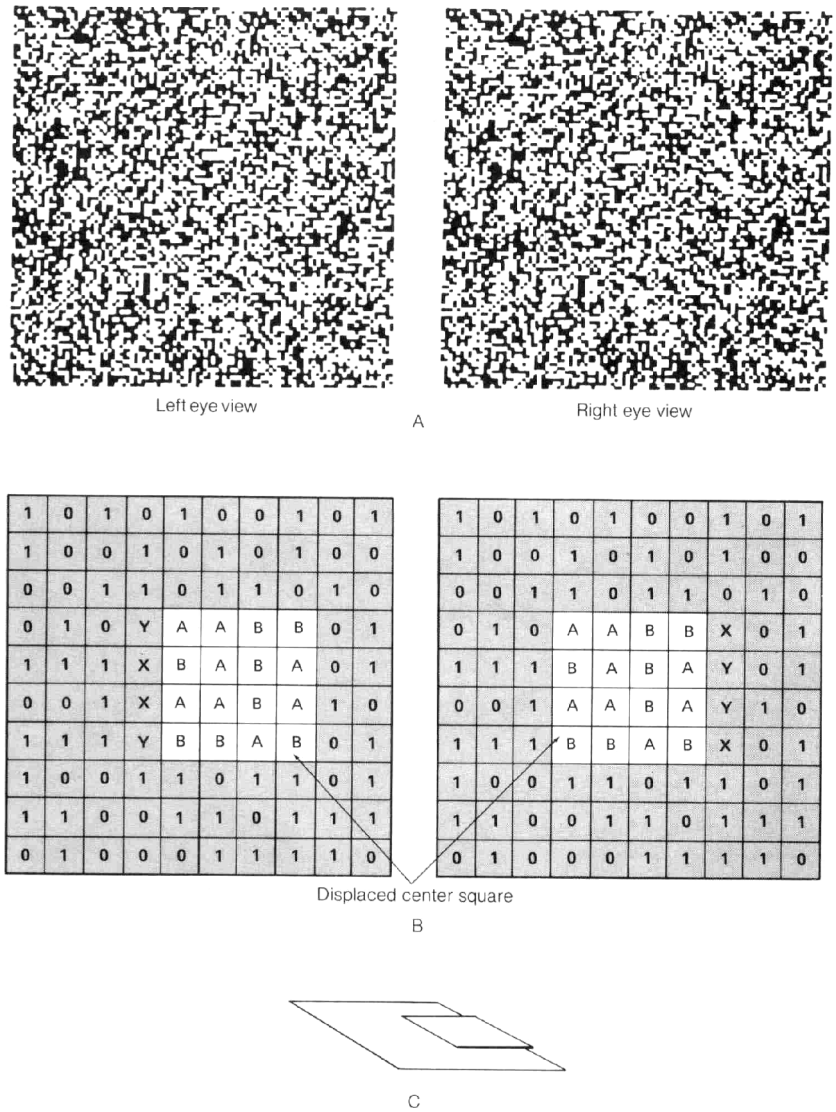


Abb. : 147: Prinzip der Zufallsstereogramme von Julesz.

LITERATUR (NOCH UNVOLLSTÄNDIG!!)

AGLIOTI, S., DESOUZA, J.F.X. & GOODALE, M.A. (1995). Size-contrast illusions deceive the eye but not the hand. *Current Biology, 5,* 679-685.

BEDFORD, F. (1993). Perceptual Learning. In *The psychology of learning and motivation,* Vol. 30. D. Medin (Ed.). Academic Press, San Diego, CA, pp. 1-60

BLAKEMORE, C. (1976). The conditions required for the maintenance of binocularity in the kitten's visual cortex. *Journal of Physiology, 261,* 423-444.

BRIDGEMAN, B. (1986). Multiple source of outflow in processing spatial information. *Acta Psychologica. 86,* 35-48.

BRIDGEMAN, B. (1986). Implikationen des Augendrückens für die visuelle Wahrnehmung. *Umschau, 3,* 185-189

BRIDGEMAN, B. (1981). Cognitive factors in subjective stabilization of the visual world. *Acta Psychologica, 48,* 111-121.

BRIDGEMAN, B. (1986). Relations between the physiology of attention and the physiology of consciousness. *Psychological Research, 48,* 259-266

BRIDGEMAN, B. (1999). Separate representations of visual space for perception and visually guided behavior. In Aschersleben, G., Bachmann, T. & Müsseler, J.. *Cognitive contributions to the perception of spatial and temporal events.* Amsterdam, etc.: Elsevier.

BRIDGEMAN, B., VAN DER HEIJDEN, A.H.C. & VELICHKOVSKY, B.M. (1994). A theory of visual stability across saccadic eye movements. *Behavioral and Brain Sciences, 17,* 247-292.

CAMPOS, E. (1986). Sensory and senori-motor adaptations in strabismus: Their role in space perception. *Acta Psychologica. 86,* 281-295.

COREN, S. (1971). The use of Haidinger's brushes in the study of stabilized retinal images. *Brain research Methods and Instrumentation, 3;* 295-297.

COREN, S. & PORAC, C. (1974). The fading of stabilized images: Eye movements and information processing. *Perception & Psychophysics, 16,* 529-534.

DITCHBURN, R.W. (1973). *Eye-movements and visuel perception.* Oxford: Clarendon Press.

DOLEZAL, H. (1982). *Living in a world transformed.* New York etc.: Academic Press.

FESTINGER, L., BURNHAM, C.A., ONO, H., & BAMBER, D. (1967). Efference and the conscious experience of perception. *Journal of Experimental Psychology,* Monograph, 74 (4)

GRÜSSER, O.-J. (1986). Interaction of efferent and afferent signals in visual perception. A history of ideas and experimental paradigms. *Acta Psychologica, 86,* 3-21.

HAFFENDEN, A. & GOODALE, M.A. (1998). The effect of pictorial illusion on prehension and perception. *Journal of Cognitive Neuroscience, 10,* 122-136.

HEIN, A. & HELD, R. (1962). A neural model for labile sensorimotor coordinations. In Bernard, E.E. & Kare, M.R. (Eds.). *Biological prototypes and synthetic systems. Vol. 1.* New York: Plenum Press.

HELD, R. & HEIN, A. (1963). Movement-produced stimulation in the development of visually guided behavior. *Journal of Comparative and Physiological Psychology, 56,* 872-876.

v. HOLST, E. & MITTELSTAEDT, H. (1950) Das Reafferenzprinzip. (Wechselwirkungen zwischen Zentralnervensystem und Peripherie). *Die Naturwissenschaften, 37,* 464-476.

HOWARD, I. P. & TEMPLETON, W.B. (1961). *Human spatial orientation.* London etc.: Wiley.

KAERNBACH, C., MUNKA, L. & CUNNINGHAM, D. (2002). Prism adaptation: Dependency on motion trajectory. Vortrag auf dem Symposium *Visual space perception and action"*. 20.9.-23.9.02, Ohlstadt.

KOHLER, I. (1951). *Über Aufbau und Wandlungen der Wahrnehmungswelt.* Abhandlungen der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Philosophisch-historische Klasse, Wien.

LEIBOWITZ, H.W., POST, R.B. & SHEEHY, J.B. (1986) Efference perceived movement, and illusiory displacement. *Acta Psychologica, 86,* 23-34.

LIBET (1960, 1980)

LIBET, B. (1973). Electrical stimulation of cortex in human subjects and conscious sensory aspekts. In Iggio, A. (Ed.), *Handbook of sensory physiology. Vol. II: Somatosensory system* (S. 743.790). Heidelberg: Springer.

LIBET et al. (1964, 1972)

MARTIN, T.A., KEATING, J.G., GOODKIN, H.P., BASTIAN, A.J., and THACH, W.T. (1996). Throwing while looking through prisms. II. Specificity and storage of multiple gaze-throw calibrations. *Brain,* 119, 1199-1211

MACK, A., FENDRICH, R. & PLEUNE, J. (1978). Adaptation to an altered relation between retinal image displacements and saccadic eye movements. *Vision Research, 18,* 1321-1327.

MacKAY, D.M. (1973). Visual stability and voluntary eye movements. In R. Jung (Ed.), *Handbook of sensory physiology,* (Vol. 7/3). Berlin etc.: Springer.

MacKAY, D.M. & MITTELSTAEDT, H. (1974) Visual stability and motor control (reafference revisited). In W.D. Keidel, W. Händler, & M. Spreng (Hrg.), *Kybernetik und Bionik. Cybernetics and bionics.* München: Oldenbourg.

MILNER, A.D. & GOODALE, M.A. (1993). Visual pathways to perception and action. *Progress in Brain Reserach, 95,* 317-337.

MITTELSTAEDT, H. (1971) Reafferenzprinzip - Apologie und Kritik. In W.D. Keidel & K.-H. Plattig (Hrg.), *Vorträge der Erlanger Physiologentagung 1970.,* Berlin, etc.: Springer.

TAYLOR, J.G. (1962) *The behavioral basis of perception.* New Haven: Yale University Press. Neudruck: Westport, CT: Greenwood Press Publ., 1975

SHERRINGTON (1906) *An integrative action of the nervous system.* Cambridge University Press.

SHERRINGTON, C.S. (1918). Observations on the sensual role of the proprioceptive nerve supply of the extrinsic eye muscles. *Brain, 41,* 332-343.

SLOTNIK, R.S. (1969). Adaptation to curvature distortion. *Journal of Experimental Psychology, 81,* 441-448.

THIER, HAARMEIER, CHAKRABORTY, LINDNER & TIKHONOV (2001)

UNGERLEIDER, L.G. & MISHKIN, M. (1982). Two cortical visual systems. In: D.J. Ingle, M.A. Goodale & R.J.W. Mansfield (Eds.), *Analysis of visual behavior*. MIT Press: Cambridge, Mass.

WALLACH, H., (1986). Wahrgenommene Stabilität der Umgebung und Eigenbewegung. *In Wahrnehmung und visuelles System.* Heidelberg: Spektrum der Wissenschaften.

WALLACH, H. (1987). Perceiving a stable environment when one moves. *Annual Review of Psychology, 38,* 1-27.

WALLACH & KRAVETZ, (1965 a).

WALLACH & KRAVETZ, (1965 b).
WALLACH & KRAVETZ, (1968).
WALLACH & CANAL, (1976)
WALLACH & BACON, (1976)
WEISSKRANTZ, L.; WARRINGTON, E.K.; SANDERS, M.D. & MARSHALL, J. (1974). Visual capacity in the hemianopic field following a restricted occipital ablation. *Brain, 97,* 709-728.
WELCH, R.B. (1978). *Perceptual modification. Adapting to altered sensory environments.* New York etc.: Academic Press.