

Kognitive neuro-visuelle Rehabilitation und Fahrtüchtigkeit I

W. H. Zangemeister, A. Becker, H. Hökendorf¹

Neurologische Universitätsklinik Hamburg-Eppendorf

¹Neurologische Klinik, REHA-Zentrum Soltau

Zusammenfassung

Im ersten Teil wird über eine quantitative Auswertung von Bildbetrachtungen bei 20 hemianopischen Patienten im Vergleich mit Normalprobanden berichtet. Dabei wurden abstrakte Bilder präsentiert und die Augenbewegungen bei der Bildbetrachtung festgehalten, bevor ein spezielles Trainingsprogramm durchlaufen wurde. Im Anschluß an dieses Trainingsprogramm wurden diese Bilder erneut präsentiert und die gesehenen Bilder mit den aufgezeichneten Augenbewegungen in geometrische a priori Regions of Interest (ROIs) und subjektive a posteriori ROIs eingeteilt und mittels Region-String-Editing (RSE), des Vector-String-Editing (VSE) sowie der Markov-Analyse (MA) quantitativ untersucht. Die Ergebnisse zeigen deutlich, daß trotz langer Latenz zwischen dem Zeitpunkt der Läsion und dem Beginn des speziellen Trainings ein guter Rehabilitationserfolg erzielt werden kann. Im zweiten Teil wird ein Überblick gegeben über die Ergebnisse des Trainings von neurologischen Patienten am Fahrsimulator der Neurologischen Klinik am REHA-Zentrum Soltau aus den vergangenen 10 Jahren. Dabei fällt auf, daß bei nicht wenigen Patienten diese bei deutlich unterdurchschnittlichen Labortestergebnissen, einschließlich der Tests am Übungs-Pkw, in der praktischen Fahrprobe unauffällig oder sogar gut bewertet wurden. Solange nicht Tests verfügbar sind, die hoch mit der Fahrprobe korrelieren und sich bei der Vorhersage der Fahrtauglichkeit bewährt haben, werfen solche Diskrepanzen Probleme bei der Bewertung der Fahrtauglichkeit auf. Es muß also die Frage beantwortet werden, ob die mit den Tests festgestellten Defizite überhaupt für das praktische Fahren relevant sind und inwieweit sie kompensiert werden können.

Der Rehabilitationserfolg in beiden Gruppen findet sein neuropsychologisch-neurophysiologisches Korrelat in einer »facilitated mobilisation of information«, einer Integration und Reorganisation extrastriärer High-Level-Information. In der Summe der Ergebnisse ergibt sich eine starke Top-Down-Komponente bei der Bildbetrachtung nach dem Training, die eine maladaptierte Bottom-Up-Komponente vor dem Training ablöst. Es ist daher von besonderem Stellenwert, diese kognitiven Aspekte des menschlichen Sehens bei der Rehabilitation von hemianopischen Patienten durch ein spezielles Trainingsprogramm zu berücksichtigen.

Schlüsselwörter: Neuro-Visuelle Rehabilitation, Fahrtüchtigkeit, Hemianopsie, String Editing, Scanpath Theory

Cognitive neuro-visual rehabilitation and driving ability I

W. H. Zangemeister, A. Becker, H. Hökendorf

Abstract

In the first part, we report about a quantitative evaluation, where we compare eye movements (EM) of 20 hemianopic patients with EM of healthy subjects while viewing abstract and realistic pictures before and after a special training. After this special training, the viewed pictures were presented again, and after this presentation, the viewed pictures with the registered EM were distributed into geometric a priori regions of interest (ROIs) and subjective a posteriori ROIs. The evaluation of the EM was performed by application of Region-String-Editing (RSE), Vector-String-Editing (VSE) and Markov analysis (MA). In the second part, we report the results of ten years of training experience with neurological patients using the car driving simulator used at the neurological rehabilitation clinic at the REHA-Center Soltau. Our results showed that although the patients showed distinct deficits in the laboratory tests they were able to perform very well in the driving test. This discrepancy demonstrates that we have to develop lab tests that are really relevant for testing driving abilities and record more accurately the true driving capabilities of the patients, in order to receive a better correlation.

The results of both groups clearly show, despite a long latency between the time of lesion and the beginning of training, that there was a significant success of rehabilitation. This finds its neuropsychological-neurophysiological correlation in a facilitated mobilisation of information, integration and reorganisation of extrastriatal high level information. After the training, there was a strong top-down-component during viewing the picture, that was in contrast to the maladapted bottom up component before training. It is particularly significant that these cognitive aspects of human vision in the rehabilitation of hemianopic patients will be considered in a special training.

Key words: neuro-visual rehabilitation, driving ability, hemianopia, string editing, scanpath theory

Neurol Rehabil 2002; 8 (4): 173-186

Einleitung

Wir berichten über Untersuchungen zur verbesserten Rehabilitation von Patienten mit Gesichtsfeldstörungen unter Einbeziehung von intakten kognitiven blickmotorischen Funktionen während des Trainings von alltagsüblichen bewegten Situationen im Verkehr etc. in den Therapieprozess. Durch geeignete Übungen werden den Patienten effiziente Blickstrategien zur Umgehung ihrer Störung nahegebracht. Das damit einhergehende Training kognitiver Sehleistungen ermöglicht das schnelle Erkennen und Begreifen von visuell wahrgenommenen Situationen, u. a. auch durch Einbeziehung der aktiven Kopfbewegung.

Es sind – auch bei gesunden Personen – vor allem kognitive Funktionen, die den Eindruck eines geschlossenen, kopfzentrischen Gesichtsfeldes erzeugen. Deutlich wahrgenommen wird nur ein etwa 1 Sehwinkelgrad großer Bereich um den jeweiligen Blickpunkt (Fixationsort). Schnelle, oft nicht bewußt wahrgenommene Augenbewegungen (Sakkaden) dienen dazu, den Bereich des scharfen Sehens auf dem mentalen Abbild der Umwelt hin- und herzubewegen. Dabei werden nicht alle im Blickfeld vorhandenen Objekte genau abgetastet. So genügt es z. B. im Straßenverkehr festzustellen, daß an einer bestimmten Stelle ein Baum steht – die Art des Baumes ist von geringerem Interesse. Anstatt einer genauen Betrachtung des Baumes findet nur ein kurzer Blick zu ihm statt, danach vertritt das kognitive Modell »Baum« das reale Objekt im mentalen Gesichtsfeld, und im visuellen Gedächtnis sind lediglich die relativen Raumkoordinaten hierfür gespeichert – alles andere ist in der umgebenden Realität »gespeichert«, d. h. nur bei ihrer Veränderung erfolgt eine neue Zuwendung von Aufmerksamkeit, Sehen, Bewerten und Speichern. Das unscharfe periphere Sehen unterstützt das mentale Gesichtsfeld, indem es Informationen über die relative Lage der modellhaft wahrgenommenen Objekte liefert. Seine Hauptfunktion ist jedoch das schnelle Erkennen von Änderungen der Umwelt: Entsprechend haben die Randgebiete der Netzhaut zwar eine schlechte räumliche, aber eine gute zeitliche Auflösung. Schnelle Änderungen wie z. B. ein flackernder Bildschirm werden eher peripher als im direkten Blick wahrgenommen.

Die Patienten, mit denen sich diese Studie befaßt, hatten eine zentrale Sehstörung, z. B. einen halb- oder viertelseitigen Ausfall des Sehens: Einen sehr häufig durch einen Schlaganfall verursachten Ausfall der primären Hirnrindfelder für das Sehen.

Im Gegensatz dazu hatten unsere Patienten keinen visuellen Neglect, das heißt ihr mentales Gesichtsfeld oder die Vorstellung, die sie von ihrer Umwelt hatten, inklusive der dazugehörigen Aufmerksamkeit, war nicht halbseitig gestört bzw. sie nahmen andere als visuelle Reize auf der kranken Seite wahr. In ihrem Fall war also das »reale« Abbild der Umgebung teilweise gestört, im Neglect-Fall ist es das mentale Abbild, das fehlt – vereinfacht ausgedrückt. Über das Training eines beschleunigten und verbesserten Zugriffs des mentalen Abbildes hinaus kommt es in der

Therapie zum einen darauf an zu trainieren, häufig zu der gestörten Seite hinzublicken, denn die Peripherie als Indikator für schnelle Änderungen ist dort ausgefallen, zum anderen muß die kognitive Modellbildung neu trainiert werden: Die Objekte werden nur »halb« gesehen und deswegen häufig nicht dem richtigen Modell zugeordnet. Es ist vor allem dieser Ausfall, der zu Orientierungsproblemen führt.

Neben den gängigen Therapien wie Sakkadentraining und Ergotherapie werden den Patienten deshalb Suchaufgaben und Aufgaben zur Verbesserung und Prüfung ihrer kognitiven Sehleistung gestellt. Bei letzteren kommen mehrdeutige Bilder wie der Necker Würfel oder die trivalente Darstellung eines Kopfes zum Einsatz. Aufgrund ihrer Gesichtsfeldstörung sind die Patienten anfänglich bei Betrachten von typischen Verkehrssituationen und des Necker Würfels nicht in der Lage, zwischen den beiden Interpretationsmöglichkeiten (Ansicht eines Würfels von oben bzw. unten) hin- und herzuschalten. Auch die Interpretationsmöglichkeiten von trivalenten Bildern bereiten ihnen trotz Erläuterung Schwierigkeiten. Es hat sich herausgestellt,

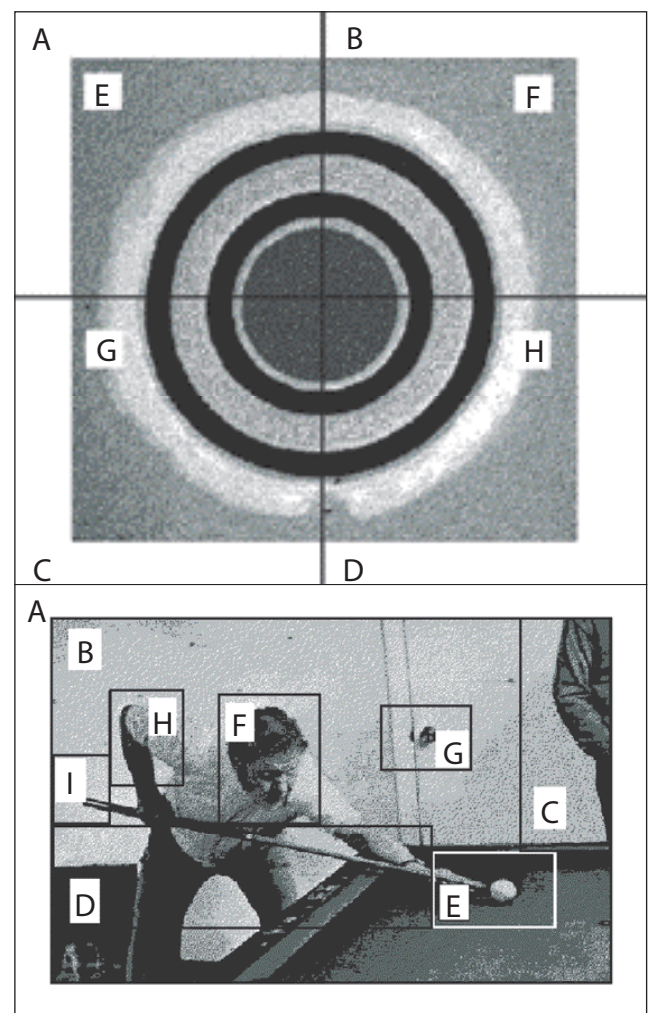


Abb. 1: oben: a priori ROI-Definition (geometrisch); unten: a posteriori ROI-Definition (subjektive Subfeatures)

daß diese und andere kognitive Sehleistungen gute Indikatoren für einen therapeutischen Erfolg darstellen.

Die Analyse therapiebegleitender Blickbewegungsmessungen liefert eine Fülle objektiver Informationen über den Stand und schließlich den Erfolg der Therapie. Aus den bisherigen Ergebnissen [61] folgern wir, daß die Hauptzielrichtung der Studie, die kognitiven Aspekte des Sehens verstärkt zur Durchführung und zur Kontrolle der Therapie von Gesichtsfeldstörungen zu verwenden, fruchtbar und erfolgversprechend ist. Wie eingangs beschrieben, ist es das abstrahierende, modellhafte Erfassen des Blickfeldes, das eine Orientierung in einer komplexen Umwelt ermöglicht. Eine kognitiv orientierte Therapie kann dort gezielt und offensichtlich erfolgreich eingreifen.

Im einzelnen beschreiben wir die quantitative Auswertung von Bildbetrachtungen komplexer Bilder bei Patienten mit homonymer Hemianopsie in Hinblick auf die Suche nach geeigneten therapeutischen Strategien bei der neuropsychologischen Rehabilitation sowie das damit verbundene neuropsychologische und neurophysiologische Korrelat. Hierfür wurden bei hemianopischen Patienten nach vaskulären zerebralen Ereignissen die Augenfixationspunkte bei der Betrachtung verschiedener komplexer Bilder aufgezeichnet. Für die Auswertung wurden die Bilder zunächst in geometrische (a priori) regions of interest (ROIs) und anschließend in intelligente (a posteriori) ROIs entsprechend der Szenerie des Bildes eingeteilt, so daß auch höhere kognitive Leistungen des Sehens, sogenannte High-level-Leistungen, mit in diese Studie eingehen (siehe Abb. 1). Nach Absolvieren des speziellen Trainingsprogrammes unter Einbeziehung kognitiv-blickmotorischer Funktionen wurden die Patienten erneut dieser Messung unterzogen und die Ergebnisse vor und nach dem Training verglichen.

Sehbahn und Hemianopsie

Der N. opticus erreicht das Chiasma opticum, wo 50% der Fasern des N. opticus nach kontralateral kreuzen. Der Tractus opticus hat drei Ziele: Der größte Faseranteil endet im Corpus geniculatum laterale des Thalamus zur visuellen Verarbeitung von Sehipulsen, während ein weiteres Faserkontingent zur Area prætectalis des Mesencephalons zieht, um hier die Pupillenreflexe zu realisieren. Ein dritter Anteil des Faserkontingentes zieht zu den Colliculi superiores, wo unterschiedliche motorische Effekte generiert werden. Von den Corpora geniculata lateralia erreicht die Sehbahn als Gratioletsche Sehstrahlung die Sehrinde im Okzipitalappen.

Die homonyme Hemianopsie ist die häufigste Folge einer postchiasmatischen Schädigung [33]. Auch Schädigungen der Capsula interna pars retrolentiformis können zu kompletten homonymen Hemianopsien führen. Neben den aphasischen und motorischen Störungen sind homonyme Hemianopsien häufigste Folge von Hirnerkrankungen unterschiedlicher Ätiologie [67]. Über 20–30% aller Patienten, die einer rehabilitativen Maßnahme zugeführt wurden, haben eine homonyme Hemianopsie [49].

Therapie von Störungen der visuellen Wahrnehmung

Da Gesichtsfeldverluste meist keine ausreichende Spontanrückbildung zeigen [36] und sich oft auch nur unvollkommene spontane Kompensationsstrategien entwickeln, stehen funktionelle Verbesserungen der Sehleistung im blinden Gesichtsfeld (Restitutionstraining) oder Verbesserungen von Kompensationsstrategien im Mittelpunkt therapeutischer Bemühungen. Bis zu einem gewissen Maß kann das visuelle Defizit durch kompensatorische Augenbewegungsstrategien jedoch kompensiert werden [43, 56, 57, 66, 67], wobei Kopfbewegungen aufgrund einer gestörten Augen-Kopf-Koordination hier nur eine geringe Bedeutung haben [56, 57]. Aber auch Kurzzeitadaption als Effekt eines gezielten Kurzzeittrainings sind bei homonymen Hemianopsien möglich. Ein solches spezifisches Training besteht in der Verwendung und Optimierung von top-down visuell-motorischen Strategien bei Suchaufgaben (Searchpath) und Betrachtungsaufgaben (Scanpath) [58, 59].

Methodik

Verfahren zur Auswertung von Bildbetrachtungen

Wir vergleichen hier die Ergebnisse einer gezielten, kleineren Studie zur Wirkung der kognitiv visuellen Therapie an 20 Patienten mit homonymen Hemianopsien mit den gesammelten Resultaten der neurovisuellen Therapie am Fahrsimulator der Neurologischen REHA-Klinik Soltau von 155 von insgesamt 706 Patienten aus den letzten 10 Jahren.

String Editing

Bei der Bildbetrachtung bildet eine Anzahl von gesehenen ROIs einen String, der aus vielen Labels besteht. Nachfolgend wird die minimale Anzahl von Editieroperationen wie das Löschen und Einfügen oder das Vertauschen der Labels ermittelt, die für die Veränderung eines erhobenen Strings im Vergleich zu einem anderen String notwendig sind. Hierbei werden den verschiedenen Editieroperationen einzelne Gewichtungen zugeordnet. Zwischen »Haus« und »Klaus« liegt eine String-Distanz von 2, da »K« eingefügt und »H« gegen »l« ausgetauscht wurde.

Vector String Editing

Hier findet eine Diskretisierung der die Fixation verbindenden Blicksakkaden statt, so daß eine Umgehung der subjektiven Regionalisierung möglich ist. Die Vektoren werden hinsichtlich ihrer Richtungen (0–360°) und entsprechend ihrer Länge (0–max. Länge des Gesichtsfeldes) beschrieben und einem hexadezimalen System zugeordnet, so daß 256 mögliche Vektoren beschrieben werden können, die bei der Betrachtung eines Bildes ein Vector-String ergeben. Beim Vector-String-Editing werden die gleichen Methoden wie beim String-Editing (VSE) angewandt. Bei der gewichteten Form des VSE, dem weighted VSE, werden

den Editieroperationen Einfügen oder Löschen als Kosten der Wert des eingefügten Vektors bzw. des gelöschten Vektors zugeordnet, während einem Vertauschen durch den Betrag des Differenzvektors Rechnung getragen wird.

Markov Analysen

Eine Markov-Analyse nullter Ordnung berechnet die Wahrscheinlichkeit dafür, daß eine bestimmte ROI fixiert wurde. Eine Markov-Analyse erster Ordnung berücksichtigt die Übergangswahrscheinlichkeit zwischen ROI *A* und ROI *B*, d. h. die Wahrscheinlichkeit, mit der *B* fixiert wird, wenn zuvor *A* fixiert wurde. Diese Übergangswahrscheinlichkeiten lassen sich durch Matrizen darstellen, wobei p_{ij} die Wahrscheinlichkeit dafür ist, daß auf den Zustand ROI *i* der Zustand ROI *j* folgt und *N* die Zahl der ROIs angibt. Beruhend auf der Markov-Analyse erster Ordnung wurde ein Verfahren zum Vergleich von ROI-Strings entworfen, welche die Markov-Distanz zwischen zwei Bildbetrachtungen als mittlere betragsmäßige Differenz der Elemente der zugehörigen Markov-Matrizen definiert [22], d. h. für zwei Bildbetrachtungen *a* und *b* mit jeweils *N* ROIs. Die maximale Markov-Distanz zwischen den Bildbetrachtungen mit jeweils *N* ROIs beträgt $2N$. Somit haben identische Strings die Similarity 1, völlig unterschiedliche Strings die Similarity 0.

Versuchsaufbau und -ablauf

Die Patienten wurden in einem für diesen Versuch präparierten Stuhl plaziert, der es ermöglichte, den Kopf fest zu fixieren. Die Bildbearbeitung erfolgte mittels eines 21"-

Monitor in einem Abstand von 56 cm. Die Bildschirmfläche entsprach so einem wirksamen Gesichtsfeld von horizontal 44° und vertikal 34° . Die Bewegungen der Augen wurden mit einem Infrarotoculographen (ASL 210, Applied Science Laboratories) gemessen. Die analogen Daten wurden über einen Analog-Digital-Wandler mit einer Abtastrate von 200 Hz in einen Rechner übernommen. Vor jeder Messung und nach jeder Gruppe von zusammengehörenden Einzelmessungen wurde der Oculograph neu kalibriert.

Patienten

An der Studie nahmen 20 Patienten im Alter von 27 bis 75 Jahren (Median 57 Jahre) mit homonymer Hemianopsie nach ischämischem Insult teil. Hierbei hatten vier Patienten eine homonyme Hemianopsie nach links, 6 Patienten dieselbe Gesichtsfeldstörung nach rechts. Ein visueller Neglect wurde durch den Behavioral Inattention Test (deutsche Bearbeitung: *Fels* und *Geissner* [14]) ausgeschlossen.

Bildbetrachtungen

Zur Betrachtung kamen fünf Bilder. Die Probanden wurden einmal, die Patienten einmal vor, ein weiteres Mal nach dem Training einer Aufzeichnung der Augenbewegung unterzogen. Bei jeder Konsultation wurden drei Versuche durchgeführt. In jedem Versuch wurden die Bilder zweimal dargeboten, womit ein Bild pro Konsultation sechsmal betrachtet wurde. Dreimal wurde eine a priori- und dreimal eine a posteriori-ROI-Definition gewählt (Abb. 2). Die einzelnen Betrachtungen wurden mit 0, 1 und 2 bezeichnet.

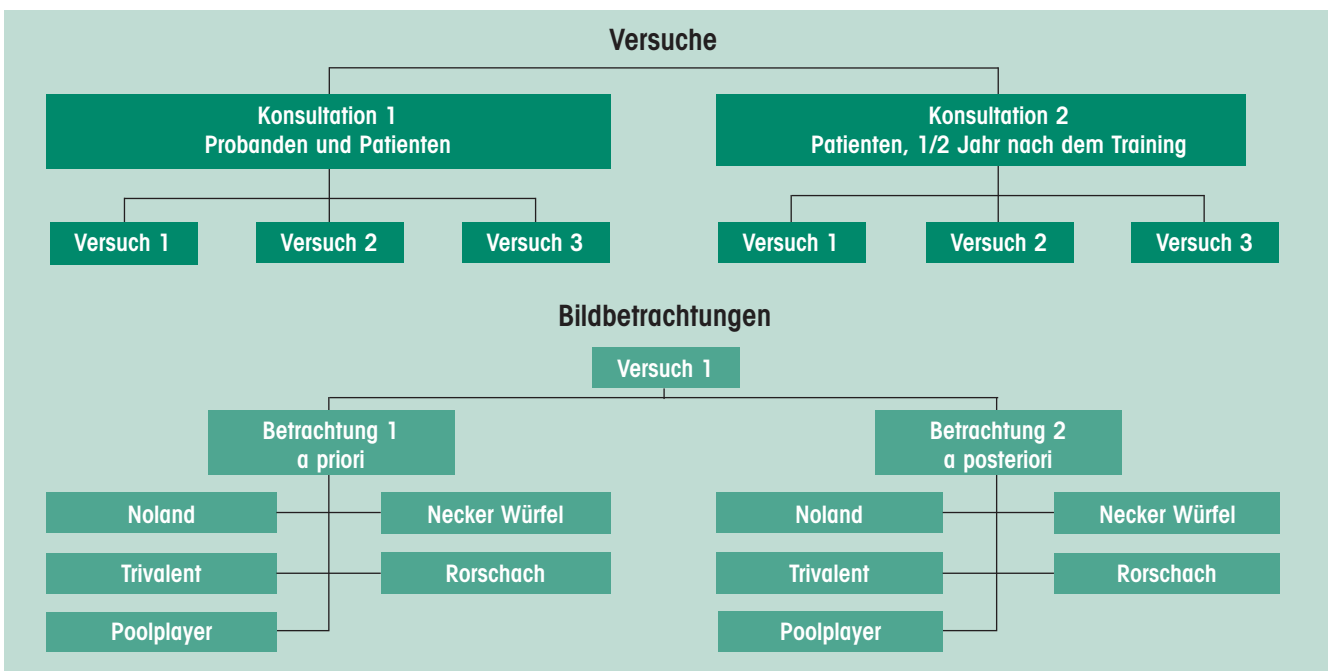


Abb. 2: Oben: Bei jeder Konsultation wurden drei Versuche durchgeführt. Unten: Pro Versuch wurden die fünf Bilder zweimal betrachtet. Da sowohl in der Konsultation 1 als auch in der Konsultation 2 drei Versuche stattfanden, wurde z.B. der Necker-Cube pro Konsultation sechsmal betrachtet.

Die Ähnlichkeiten (Similarities) der Betrachtungen erfolgten nach dem Schema 0–1, 0–2 und 1–2 jeweils für a priori und a posteriori ROI Definition, wobei ein Ähnlichkeitsmaß zur Auswertung kam.

Ablauf der Therapie:

Nach der Bildbetrachtung wurden die Patienten instruiert, täglich eine halbe Stunde entsprechend einer beigelegten Übungsanleitung [61] zu trainieren. Bei der zweiten Konsultation wurden tägliche Übungsdauer und Übungsintensität erfragt. 19 Patienten trainierten mit guter bis durchschnittlicher Motivation, ein Patient trainierte sporadisch und wenig motiviert. Die mittlere tägliche Trainingszeit betrug 35 Minuten an durchschnittlich sechs Tagen in der Woche.

Übungsbogen: Im nachfolgenden werden die Übungsaufgaben für das ambulante Training in ihrer wörtlichen Form wiedergegeben, so wie sie dem Patienten als Anweisung für das Training mitgegeben wurden.

Augenbewegungsübungen: »Setzen Sie sich bequem auf einen Stuhl in etwa 2 bis 3 Meter Abstand von der Wand. Suchen Sie sich zwei Markierungspunkte auf gleicher Höhe links und rechts Ihres Kopfes, die ebenfalls etwa 2 bis 3 Meter auseinander liegen (z. B. Gegenstände im Bücherregal oder Bilder/Fotos an der Wand). Die beiden Punkte sollten so weit auseinander liegen, daß Sie diese ohne Kopfbewegung gerade noch gut mit Augenbewegungen nach rechts und links erkennen können. Schauen Sie nun ohne den Kopf zu bewegen systematisch zwischen den beiden Punkten hin und her. Achten Sie hierbei besonders darauf, immer den rechten Markierungspunkt zu erfassen. Zur Unterstützung kann ein Helfer Ihren Kopf von hinten mit beiden Händen festhalten, so daß Sie die Übung möglichst ohne Kopfbewegungen durchführen können. Falls Ihnen diese Übung nach einiger Zeit sehr leicht fallen sollte, können Sie den Abstand zwischen den beiden Punkten noch etwas erweitern.«

Übungen beim Fernsehen: »Es gibt zwei Möglichkeiten, während des Fernsehens Ihre Augenbewegungen zu üben: Falls Sie ein stehendes Bild (z. B. Testbild oder Bildschirmtext) empfangen können, so sollten Sie die Übungen möglichst oft mit diesen stehenden Bildern durchführen. Falls Sie kein stehendes Bild empfangen können, sollten Sie Sendungen auswählen, die möglichst viele Bewegungsabläufe zeigen (z. B. Sportsendungen). Setzen Sie sich bitte in recht nahem Abstand (50–100 cm) vor ein möglichst großes Fernsehgerät und führen Sie mehrmals täglich für einige Minuten die folgenden Übungen durch, ohne den Kopf zu bewegen. Schauen Sie sich bitte das gesamte Fernsehbild über die gesamte Bildschirmgröße systematisch von links nach rechts und Zeile für Zeile an. Achten Sie auch hierbei besonders auf die rechte Bildschirmseite und versuchen Sie, alles dort zu erkennen.«

Übungen im Kino: »Wenn möglich schauen Sie sich im Kino einige Breitbandfilme an. Setzen Sie sich ins vordere Drittel des Kinos und betrachten Sie mehrmals während des Filmes für einige Minuten systematisch die gesamte

Leinwand von links nach rechts und Zeile für Zeile. Achten Sie auch hier besonders auf die rechte Leinwandhälfte und versuchen Sie, dort so viel wie möglich zu erkennen. Beginnen Sie, ohne den Kopf mitzubewegen. Bewegen Sie den Kopf nur im zweiten Schritt, wenn die Augenbewegungen nicht ausreichen.«

Übungen beim Lesen (4 x täglich 10 Minuten): »Besorgen Sie sich kurze Texte aus Zeitschriften in verschiedenen Spalten- bzw. Blockbreiten. Lesen Sie sorgfältig Zeile für Zeile die Texte. Beginnen Sie mit der schmalsten Blockbreite und steigern Sie die Breite jeweils pro Übungseinheit bis auf ganzseitiges Querformat. Achten Sie bitte bei den Leseübungen besonders darauf, immer auch die Zeilenenden rechts genau zu erfassen und zu verstehen. Wechseln Sie die Texte im Laufe der Zeit aus. Kopf möglichst nicht bewegen.«

Basale Leistungsmerkmale:

Blickfolgebewegungen, Prädiktive Sakkaden und Random Sakkaden: Zur Bestimmung der basalen Leistungsmerkmale wird den Patienten auf einem Computerbildschirm ein sinusförmig bewegtes (Blickfolgebewegungen), vorhersagbar hin- und herspringendes (Prädiktive Sakkaden) und zufällig hin- und herspringendes (Random Sakkaden) Blickziel (Target) dargeboten. Die Aufgabe der Patienten ist, dem Blickziel mit den Augen zu folgen. Die Analyse der während der Tests binokular aufgenommenen Augenbewegungen gestattet die Prüfung der folgenden Kriterien:

Sakkadierung der Blickfolgebewegungen: Bewegt sich das Blickziel in Richtung des blinden Halbfeldes der Patienten, so sind diese schon bei niedriger Bewegungsgeschwindigkeit nicht mehr in der Lage, dem Kreuz zu folgen. Dies ist erkennbar an häufigen z. T. erratischen Sakkaden. Die Anzahl dieser Sakkaden war nach der Therapie deutlich verringert. Bei Bewegung des Targets in Richtung des sehenden Halbfeldes ergab sich nur eine leichte (nicht signifikante) Verringerung der Sakkadierung.

Prädiktive Sakkaden: Prädiktive Stimuli springen zwischen zwei Positionen hin und her. Erkennen Probanden die prädiktive Natur des Stimulus, so neigen sie dazu, vorauszuweichen. Diese Tendenz war bei Patienten wie Normalprobanden gleichermaßen vorhanden und durch die Therapie nicht beeinflusst. Durch die Therapie verringert wurde die Anzahl der treppenstufenartigen Suchsakkaden, wenn der Stimulus in das blinde Halbfeld springt. Diese wurden zunehmend durch große, über das Ziel hinausgehende Sakkaden (Overshoots) und anschließende Korrektursakkaden (Steps) ersetzt. Durch die Overshoots »klappen« die Patienten den intakten Teil ihres Gesichtsfeldes über den Bildschirmbereich, in dem das gesuchte Objekt zu finden ist (Hemianopiker mit dem blinden Feld auf der rechten Seite sehen z. B. auf den rechten Bildschirmrand). Dadurch kann das Objekt peripher gesehen und nach einer Korrektursakkade erfaßt werden. Diese Vorgehensweise ist zeitlich wesentlich effizienter als die

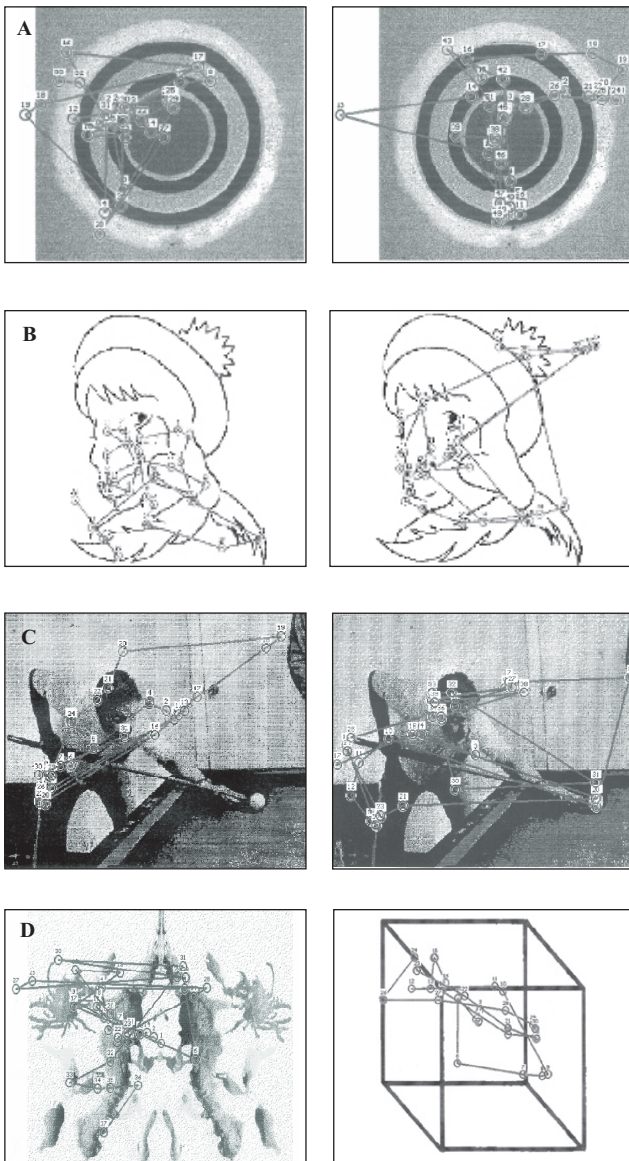


Abb. 3: Verwendete Stimuli und Ergebnis-Beispiele:
A links vor, rechts nach Therapie Scanpath Augenbewegungen (AB): Fixationen sequentiell nummeriert und verbunden (Ken Noland's Bild: Spring Cool, 1962), Hemianopsie n. rechts
B links vor, rechts nach Therapie Scanpath Augenbewegungen (AB): Fixationen sequentiell nummeriert und verbunden: Trivalentes Bild, Hemianopsie n. rechts
C links vor, rechts nach Therapie Scanpath Augenbewegungen (AB): Fixationen sequentiell nummeriert und verbunden: Lane Terry's Bild: Dead Eye, 1971, Hemianopsie n. rechts
D Scanpath Augenbewegungen (AB): Fixationen sequentiell nummeriert und verbunden. Links eines der farbigen Rohrschach Bilder vor Therapie, Hemianopsie n. rechts. Rechts Necker Würfel, Normalproband

Ausführung vieler Suchsakkaden. Liegt die überschießende Sakkade bereits nahe am Objekt, so wird die Korrektursakkade durch eine gleitende Augenbewegung (Drift) ersetzt. Dieses Verhalten kam bei unseren Patienten selten vor und wurde durch die Therapie nicht beeinflusst.

Random Sakkaden: Beim Test der Random-Sakkaden bewegt sich der Stimulus in zufälligen, für den Patienten nicht vorhersagbaren Sprüngen über den Bildschirm. Die Leistungskriterien entsprechen denen der prädiktiven Sakkaden. Auch hier wurde der oben beschriebene therapeutische Effekt gefunden.

Leistungsmerkmale bei Suchaufgaben: Die Hauptleistungsmerkmale für Suchaufgaben bestehen naturgemäß darin, ob das Target gefunden wurde, und wenn ja, wieviel Zeit dafür benötigt wurde. Bei der Suche eines im blinden Halbfeld der Patienten dargebotenen Objektes wurden beide Faktoren durch die Therapie deutlich verbessert. Keinen signifikanten Unterschied gab es bei der Suche von im sehenden Halbfeld dargebotenen Objekten. Weitere Leistungsmerkmale für die Bewältigung der Suchaufgabe sind der Global/Local-Index und die mittlere Sakkadenamplitude. Der Global/Local-Index ist das Verhältnis der Zahl der Sakkaden mit einer Amplitude von mehr als 1,5 Grad (deg) (global) zu der Zahl der Sakkaden mit geringerer Amplitude (local). Er liefert gemeinsam mit der mittleren Sakkadenamplitude Informationen darüber, ob vom Patienten zur Exploration des Gesichtsfeldes vorwiegend lokale oder weitergreifende globale Augenbewegungen durchgeführt wurden. Therapiebedingt fand die im Sinne verbesserter Effizienz erwünschte Verstärkung der globalen Exploration statt. Damit einhergehend fanden wir eine Verschiebung der relativen Fixationshäufigkeit in Richtung des blinden Feldes (BHF). Während auch die Gesamtzahl der Fixationen durch die Therapie verringert wurde, blieb die relative Dauer der Fixationen erwartungsgemäß unbeeinflusst.

Leistungsmerkmale des Kognitiven Sehens (Scanpath): Die in der Einleitung erwähnten mehrdeutigen Bilder trainieren und prüfen die Fähigkeit der Patienten zur Bildung eines kognitiven Modells des Betrachteten. Nach der Therapie zeigte sich eine deutliche Verbesserung beim Erkennen der verschiedenen Interpretationsmöglichkeiten. Besonders deutlich ist die wiedergewonnene Fähigkeit, zwischen den Interpretationen des Necker Würfels umzuschalten und beim trivalenten Bild den »alten Mann« zu erkennen. Weniger deutlich, aber durchaus signifikant, fallen die Verbesserungen bei der »jungen Frau« und der »alten Frau« aus. Dies ist nicht verwunderlich, da vor allem die letztere Interpretation auch vielen Normalsichtigen Probleme bereitet (Abb. 3).

Als weiterer Test für die Adaptation der Patienten an ihre Störung wurden sog. Visual Imagery Versuche durchgeführt. Beim Visual Imagery bekommen die Patienten zunächst für 10 s ein Bild dargeboten. Nach 5, 30 und 60 s wird (wieder für 10 s) der leere »Rahmen« des Bildes dargeboten, der die Position andeuten soll, an der sich das Bild vorher befand. Die Patienten werden aufgefordert, sich während der Darstellung des »Rahmens« das Bild noch einmal vorzustellen und es in Gedanken zu betrachten. Vergleicht man die während dieser Versuche gemessenen

Augenbewegungen, so findet man bei Normalprobanden deutliche Ähnlichkeiten zwischen den Augenbewegungen bei der Betrachtung und denen bei der mentalen Vorstellung (dem »Imagery«) des Bildes. Noch größer sind die Ähnlichkeiten zwischen den drei aufeinander folgenden Imageries. In einem frühen Stadium zeigen Hemianopiker stärkere Unterschiede zwischen der Bildbetrachtung und den Imageries. Gut adaptierte Patienten zeigen dagegen das gleiche Verhalten wie Normalprobanden. Setzt man voraus, daß das mentale Abbild keine »Gesichtsfeldstörungen« aufweist, so deutet dies darauf hin, daß bereits kurz nach der Darbietung ein kognitives Modell der betrachteten Szene gebildet wird, das die Augenbewegungen wesentlich mitbestimmt. Ohne Modellbildung bestimmen die bei Hemianopikern halbseitig wegfallenden peripheren Reize das Ziel der Augenbewegungen.

Bezüglich Global/local-Index, mittlerer Sakkadenamplitude, Fixationsdauer und -anzahl ergaben sich die gleichen Ergebnisse wie bei den Suchaufgaben.

Auswertung

Das zu betrachtende Bild wurde zunächst in regions of interest (ROIs) aufgeteilt (siehe Abb. 1) und jedem ROI ein eindeutiges Label (hier einen Buchstaben) zugewiesen. Diese Einteilung in ROIs ist das am häufigsten angewandte Verfahren zur Bildbetrachtung [22, 53]. Jede Fixation wurde durch ein eindeutiges Label gekennzeichnet, so daß eine Bildbetrachtung durch einen String gekennzeichnet wurde. Diese Strings können anschließend mit den oben erwähnten Verfahren ausgewertet werden. Um das String-Editing Verfahren sowie die Markov-Analysen durchzuführen, wurden in dieser Arbeit zwei verschiedene Verfahren zur Festlegung der ROIs verwendet, die als a priori ROIs bzw. als a posteriori ROIs bezeichnet werden. Die so erhobenen stetigen Merkmale wurden zunächst mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung geprüft, wobei eine Signifikanzschwelle von $p < 0.05$ gewählt wurde, um einen Vergleich mit anderen Arbeiten zu ermöglichen. Anschließend wurden die Similarities der einzelnen Verfahren für die Bildbetrachtung einem verbundenen t-Test unterzogen.

Vergleiche

Es wurden die Blickbewegungen der Probanden mit den Blickbewegungen der hemianopischen Patienten vor und nach dem Training verglichen, ferner wurden die Blickbewegungen der hemianopischen Patienten vor und nach dem Training untereinander verglichen.

Resultate

Normalprobanden (Abb. 4)

Die höchsten Similarities fanden sich beim VSE und seiner gewichteten Form. Beim RSE, cRSE sowie beim VSE

und wVSE gingen die Vergleiche 0–1 mit 0–2 mit hohen Similarities einher, was als Kurzzeidadaption zu werten ist. Lediglich beim Verfahren der Markov-Analyse und seiner komprimierten Form finden sich derartige Zeichen einer Kurzzeidadaption nicht. Beim Vergleich (0–1 a priori/0–1 posteriori) sowie (0–2 a priori/0–2 a posteriori) und (1–2 a priori/1–2 a posteriori) waren die Unterschiede lediglich beim RSE und cRSE hochsignifikant, während beim VSE und wVSE sowie bei der MA und der komprimierten Form, dem cMA, keine signifikanten Unterschiede vorlagen. Jedoch zeigten sich beim Vergleich der Betrachtung (0–1 a priori/0–1 posteriori) sowie (0–2 a priori/0–2 a posteriori) und (1–2 a priori/1–2 a posteriori) sehr hohe Similarities. Betrachtet man nun die Similarities der einzelnen Betrachtungen für alle Verfahren zur Auswertung der Bildbetrachtungen, so erkennt man, daß die Similarities der Bildbetrachtungen für das RSE und das cRSE unter a posteriori ROI-Definition steigen, während die Similarities für die MA und cMA unter derselben ROI-Definition sinken und sich den Similarities des RSE bzw. dem cRSE nähern.

Hemianopiker vor dem Training (Abb. 5 oben)

Während bei den Normalprobanden bei keinem Verfahren zur Bildbetrachtung signifikante Unterschiede beim Vergleich der Betrachtungen unter Verwendung sowohl der a priori als auch der a posteriori ROI-Definition zu finden waren, ergab sich unter Verwendung des RSE und des cRSE lediglich für den Vergleich der Betrachtung 0–1 mit 0–2 kein signifikanter Unterschied. Dies galt in diesem Falle sowohl für die a priori als auch für die a posteriori ROI-Definition. Hier finden sich trotz fehlender Signifikanz geringere Ähnlichkeiten als bei den Normalprobanden. Beim VSE und wVSE unter a priori-ROI-Definition sind die Ähnlichkeiten der Vergleiche der Bildbetrachtungen für die Normalprobanden hoch, für die Hemianopiker finden sich lediglich bei dem wVSE keine signifikanten

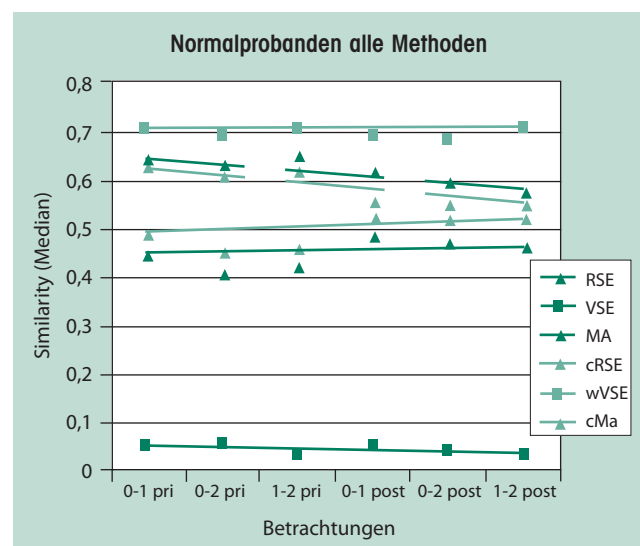


Abb. 4: Normalprobanden alle Methoden

Unterschiede. Bei der MA und cMA sowohl unter a priori als auch unter a posteriori-ROI-Definition ergeben sich wie bei den Probanden keine signifikanten Unterschiede beim Vergleich der Bildbetrachtung. Beim Vergleich (0–1 a priori/0–1 posteriori) sowie (0–2 a priori/0–2 a posteriori) und (1–2 a priori/1–2 a posteriori) waren die Unterschiede lediglich beim RSE und cRSE wie bei den Normalprobanden hochsignifikant.

Hemianopiker nach dem Training (Abb. 5 unten)

Während bei den hemianopischen Patienten vor dem Training im Gegensatz zu den Ergebnissen der Normalprobanden sowohl beim RSE und cRSE unter a priori und a posteriori ROI-Definition als auch beim VSE unter a priori ROI-Definition signifikante Unterschiede beim Vergleich der Bildbetrachtung erhoben werden konnten, finden sich nach dem Training insbesondere beim RSE und cRSE sowohl bei a priori als auch bei a posteriori ROI-Definition

zum Teil höhere Similarities als bei den Normalprobanden (Abb. 6a). Beim VSE finden sich nach dem Training deutlich höhere Similarities unter a posteriori ROI-Definition als vor dem Training und bei den Probanden. Bei der MA zeigte sich nach dem Training insbesondere unter a posteriori ROI-Definition eine hohe Similarity der Bildbetrachtungen. Beim Vergleich (0–1 a priori/0–1 posteriori) sowie (0–2 a priori/0–2 a posteriori) und (1–2 a priori/1–2 a posteriori) konnte eine Erhöhung der Similarities für den Vergleich (0–1 a priori/0–1 posteriori) und (1–2 a priori/1–2 a posteriori) erhoben werden, die vor dem Training hochsignifikante Unterschiede aufwiesen (Abb. 6b)

Darstellung der Ergebnisse im Differenz-Balken-Diagramm

Im folgenden sollen die in dieser Arbeit erhobenen Ergebnisse in einem Differenz-Balken-Diagramm dargestellt werden. Während oberhalb der Abszisse die Differenzen der Similarities der Hemianopiker in bezug zu den Probanden vor dem Training zu finden sind, finden sich diese nach dem Training unterhalb der Abszisse. Nehmen die Balken einen Verlauf nach links, so sind die erhobenen Ähnlichkeiten der Vergleiche der Bildbetrachtungen entsprechend der Länge des Balkens für die Hemianopiker in bezug auf die Normalprobanden niedriger, ein rechtsseitiger Verlauf zeigt höhere Ähnlichkeiten beim Vergleich der Bildbetrachtungen in bezug auf die Normalprobanden. Zur Beachtung kommen die Ergebnisse des RSE und seiner komprimierten Form, des VSE und seiner gewichteten Form sowie die MA und ihre komprimierte Form (Abb. 5a, unten links; 5b, unten rechts).

Diskussion

Ergebnisse der klinisch-experimentellen Hemianopsiestudie

Sakkaden- und Fixationen-Charakteristika der Bildbetrachtung: Wir untersuchten zunächst basale Scanpath-Parameter der Bildbetrachtung, um Rückschlüsse auf Differenzen und Gemeinsamkeiten zwischen unserem Normalprobanden- und Patientenkollektiv auf einer niedrigeren blickmotorischen Ebene zu erhalten. Wir bezogen ferner nach Gesichtsfelddefekten getrennte Subgruppenanalysen innerhalb des Patientenkollektivs hinsichtlich des bilateralen Blickverhaltens sowie auf einer höheren kognitiven Ebene Aufgabenlösungen zweier Bilder mit ein, um auch hier eventuell beschriebene und z. T. in der Literatur besonders bei kurzzeitadaptierten Hemianopikern beschriebene Charakteristika der Blicksteuerung zu erfassen. Die nachfolgend diskutierten Resultate sprechen für eine günstige Adaptationslage unserer Patientengruppe.

Als Parameter für das globale, raumgreifende bzw. das lokale, eher detailorientierte Sehen dienten uns die Sakkaden-Amplitude und die Global/Lokal-Rate der auf den Bildbetrachtungen ausgeführten Sakkaden. Entsprechend des Bildaufbaus mit Searchpath und abstraktem Schach-

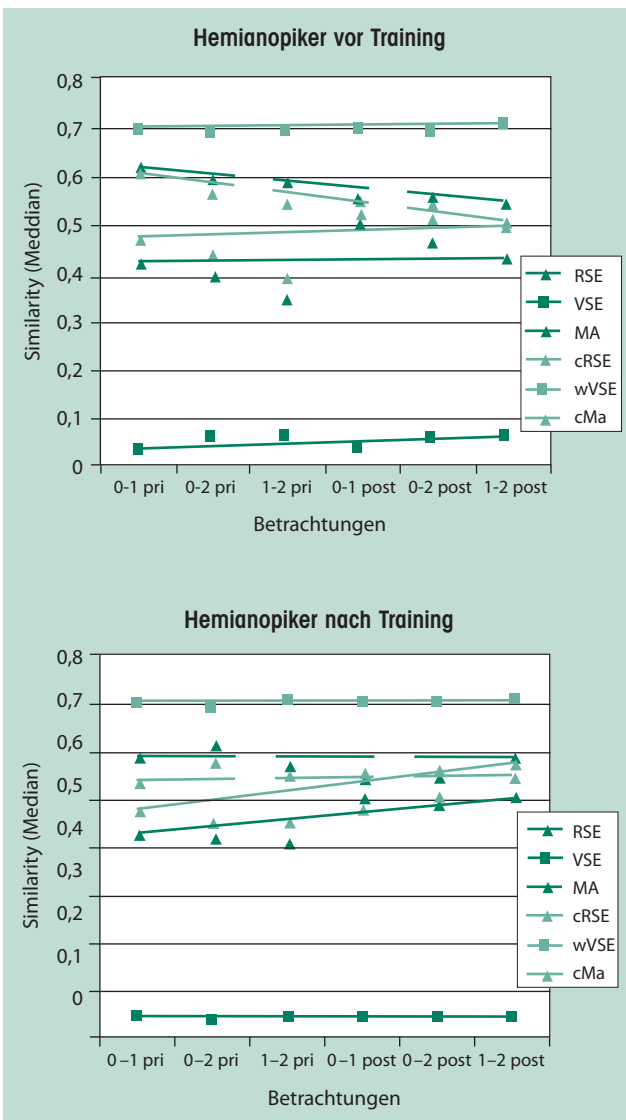


Abb. 5: Hemianopiker vor (oben) und nach dem Training (unten)

brettmuster fanden sich in beiden Gruppen die im Median größten Sakkaden in den Bildern »Poolplayer« (Abb. 1, unten) und dem »trivalenten« Bild mit Interpretationsmöglichkeiten: Alte Frau, junge Frau, Mann mit Schnauzbart. Hier waren auch entsprechend der im Vordergrund stehenden großen Sakkaden zum Erfassen des Bil-

des mit Absuchen bzw. Registrieren eines Musters die G/L-Indizes entsprechend hoch. Die nur geringen Differenzen zwischen den Kollektiven waren jedoch nicht signifikant, offensichtlich war unser Patientenkollektiv genauso wie die Normalprobanden zu raumgreifendem Sehen mit vorwiegend großamplitudigen Sakkaden in der Lage. Die Anzahl

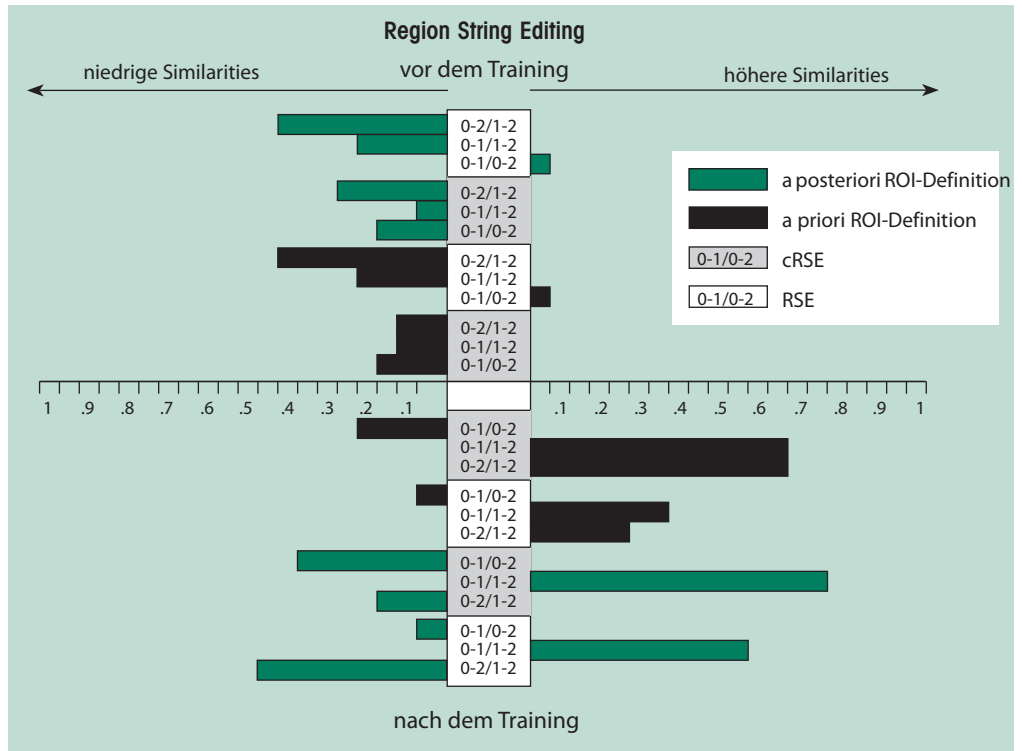


Abb. 6a: Veränderung der Similarities im RSE und cRSE durch Training

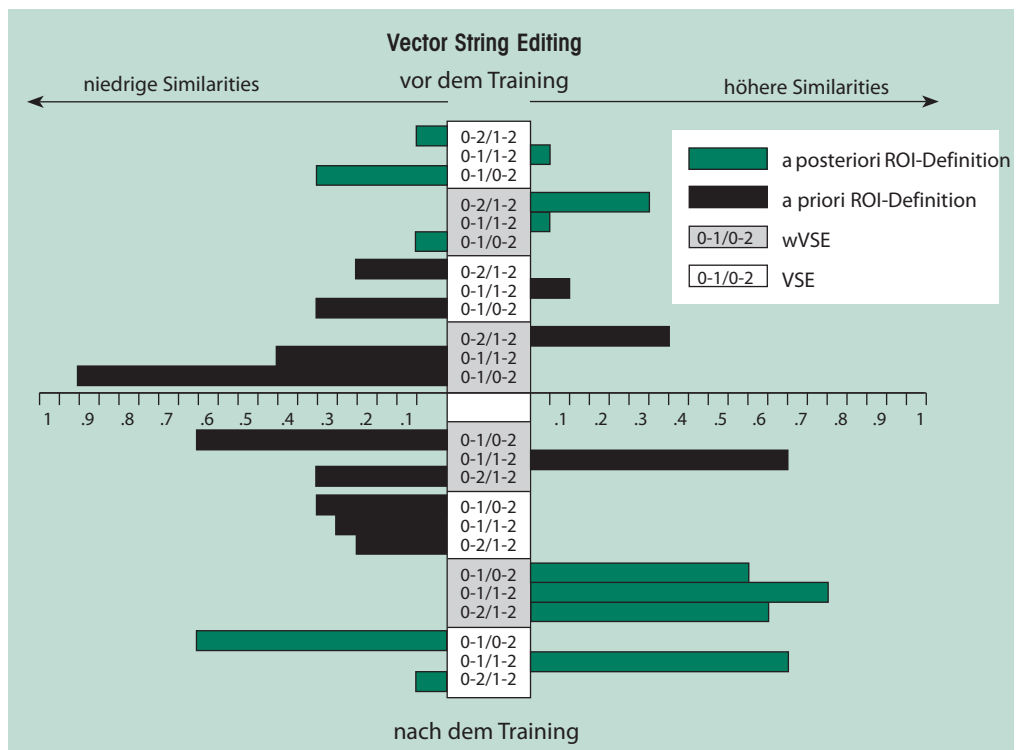


Abb. 6b: Veränderung der Similarities im VSE und wVSE durch Training

der Fixationen als Maß für die Aufnahme von Bilddetails während der Bildbetrachtung sowie die hierzu in reziproker Relation stehende Fixationsdauer waren über Probanden und Bilder annähernd gleich verteilt. Diese Ergebnisse ergaben erste Hinweise auf dem Normalen weitgehend angeglichenes Blickverhalten unserer Patienten, welches innerhalb des Kollektivs ohne größere Schwankungen festzustellen war.

Kognitive Merkmale und bilaterale Verteilung der Blickpositionen: Die Analyse der bilateralen Verteilung der Fixationen ergab ein zunächst überraschendes Ergebnis [17]. Die Links-Rechts-Fixationsverteilung (Anzahl, Dauer) war bei den Patienten mit vorwiegenden Gesichtsfeldstörungen nach links bzw. rechts gleichmäßig ohne Präferenz des jeweiligen gesunden Gesichtsfeldes verteilt. Diese Verteilung bestand über alle Bilder und mit nur geringen Abweichungen einzelner Probanden (so zeigte einer der sehr kurz adaptierten Hemianopiker erwartungsgemäß eine Prädominanz seines gesunden Gesichtsfeldes). Die Normalprobanden hingegen wiesen eine ausgesprochene und hinsichtlich der Fixationsanzahl und -dauer signifikante Bevorzugung des linken Gesichtsfeldes respektive Monitorhalbfeldes bei den Bildbetrachtungen auf. Asymmetrien innerhalb der Bilder konnten als Erklärung ausgeschlossen werden, da diese hinsichtlich der interessanten Merkmale bilateral symmetrisch aufgebaut waren und sich dieses Phänomen über alle Bilder hinweg beobachten ließ. Eine mögliche Erklärung sehen wir in der Rechtshändigkeit unserer Normalprobanden. In der Literatur findet die Hypothese der funktionellen Asymmetrie der Hemisphären stützende Abhandlungen. So berichten *Hier et al.* (1983) [24] von einer Spezialisierung der rechten Hirnhemisphäre bei untersuchten rechtshändigen Probanden für die visuo-motorische Kontrolle. Es zeigte sich bei diesen Rechtshändern eine präzisere Blicksteuerung im linken als im rechten Gesichtsfeld. In einer anderen Untersuchung von *Farah et al.* (1994) [13] wurde die Hypothese der hemisphärischen Asymmetrie latenter Augenbewegungen an Links- und Rechtshändern mittels Messung der lateralen Sakkaden-Latenzen untersucht. Da in der Gruppe der Rechtshänder signifikant kürzere Latenzen beim Links-Rechts- als beim Rechts-Links-Blick gefunden wurden, wurden auch hier zentral integrative Mechanismen der funktionellen Asymmetrie beider Hirnhemisphären postuliert.

Adaptationsgrad des Patientenkollektivs: Die von uns untersuchten Patienten hatten durchaus heterogene Voraussetzungen. Sie unterschieden sich einerseits in Ätiologie sowie Ausmaß und Ausrichtung des Gesichtsfelddefektes, zum anderen durch die große Streuung des Zeitfaktors zwischen Eintritt der Gesichtsfeldstörung und Messung. Dementsprechend muß von unterschiedlichen Adaptationszeiten und -graden ausgegangen werden. Die am häufigsten geforderte Leistung im Alltag der Patienten stellt das Auffinden von Details bei der Betrachtung von realen Umweltszenen, z. B. Straßenverkehr, oder beim Lesen etc. dar.

Dementsprechend entsteht nach Eintritt der Gesichtsfeldstörung der weiter im Alltagsleben aktiven Patienten ein entsprechender Übungs- und Adaptationsdruck. Unsere insbesondere auf basalem Niveau sich ausgesprochen gut kompensiert zeigenden Patienten müssen wir unter diesem Aspekt als selektiert ansehen: Nur wenige der Patienten zeigen Charakteristiken des frühen und schweren sensorischen Defizits.

Verschiedene Autoren beschreiben, daß Patienten ohne spezifisches Training auch Monate und Jahre nach dem Gesichtsfeldausfall nicht in der Lage sind, großamplitudige Sakkaden in das blinde Gesichtsfeld zu machen [8, 34, 67]. *Zihr* und von *Cramon* [68] zeigten durch perimetrisches Sakkadentraining einen dauerhaften Rückgang der Größe des Gesichtsfeldausfalls, was in anderen Studien jedoch nicht reproduzierbar war [6, 26]. *Zangemeister, Poppensieker* und *Hökendorf* [61] stellten schließlich fest, daß mittels kognitiven Trainings der Blickmotorik quasi sekundär auf die Blicksteuerung von Hemianopikern Einfluß genommen werden kann und insbesondere kognitive visuelle Aufgaben strategien-koordiniert besser gelöst werden.

Unser Kollektiv belegt, daß schon auf basalem Niveau eine gute Exploration des blinden Gesichtsfeldes durch kompensierende Augenbewegungen erreicht werden kann. Raumgreifendes Sehen, Detailaufnahmen und eine gleichmäßige bilaterale Verteilung der Blickpositionen zeigen einen insgesamt hohen Adaptationsgrad mit nur wenigen Ausnahmen bei den kurzadaptierten Patienten. Auch die Searchpaths wurden nur wenig schlechter als von den Normalprobanden gelöst, deutliche Unterschiede finden sich auf höherem kognitiven Niveau beim Erkennen des trivalenten Bildes. Hier erst zeigen sich die trotz Adaptation bestehenden Defizite des Kollektivs. Das Erkennen komplexerer Bilder scheint einerseits auf sensorischer Ebene durch eine langsamere respektive mühsamere Orientierung und Integration der Einzelkomponenten des Bildes (welches sich in unseren basalen Leistungsmerkmalen nicht widerspiegelt), andererseits in einer konsekutiv eingeschränkten Modellbildung auf höherem kognitiven Niveau erschwert. Diese Erkenntnis ist sicherlich ein bedeutsames Argument für die angeführte Methode der kognitiven Rehabilitation von Hemianopsie-Patienten nach *Zangemeister, Poppensieker* und *Hökendorf* [61]. Dies gilt sowohl für Hemianopiker, die schlecht, als auch für solche, die spontan oder durch konventionelle Rehabilitation auf basaler Ebene (wie bei uns) bereits gut adaptiert sind. Auf der Ebene des »High-Level-Vision« belegt dieses Ergebnis die These der Relevanz kognitiv beeinflusster Kompensationsstrategien für Patienten mit Gesichtsfelddefekten.

Visual Imagery Scanpath: Als basale Parameter des Scanpath der Visual Imagery bestimmten wir die Mediane von Sakkaden-Amplitude, Fixationsanzahl und -dauer der Scanpaths in den Imagery-Phasen unserer Messungen. Diese verglichen wir mit den während der Bildbetrachtung erhobenen Werten für beide Probandengruppen. Es ergaben sich in beiden Kollektiven hochsignifikante und über alle

Bilder reproduzierbare Differenzen in der Charakteristik der Scanpaths. Es fand sich eine »Miniaturisierung« der Scanpathsequenzen mit verkleinerten Sakkaden-Amplituden, geringerer Fixationsanzahl und erhöhter Fixationsdauer während des Visual Imagery. Dies geschah trotz expliziter Vorgabe eines Referenzrahmens beim Imagery, welcher den Probanden die Dimension des zuvor gesehenen Bildes angab. Über einen analogen Befund berichteten *Brandt* und *Stark* [4] in ihrer Ableitung von Augenbewegungen bei Normalprobanden während Visual Imagery. Sie fanden bei ihren Messungen ebenfalls eine erhöhte Fixationsdauer und größere Sakkaden-Amplituden bei einer herabgesetzten Fixationsanzahl während der Visual-Imagery-Phasen. Hieraus wurde gefolgert, daß die räumlichen und zeitlichen Charakteristiken der Scanpaths, die während des Visual Imagery produziert werden, andere sein müssen als die bei der Bildbetrachtung. Aus der niedrigeren Fixationszahl ergibt sich zwangsläufig eine längere Dauer der einzelnen Fixationen. Die »Miniaturisierung« des zuvor gesehenen Bildes in Form der kleinen Sakkaden-Amplituden findet trotz der Aufforderung (anhand des Referenzrahmens), sich das Bild in Originalgröße anzusehen, bei allen Probanden statt. Offenbar erfordert das mentale Modell des Geschehens keine Sakkaden in Originalgröße, sondern besitzt seine eigene räumliche Dimension. Nach der Feature-Ring-Hypothese verbinden im mentalen Modell die motorischen Schritte die kardinalen »Subfeatures« des visualisierten Objektes. Die räumliche Dimension spielt hierbei nicht dieselbe Rolle wie bei der Bildbetrachtung, bei der der visuelle Stimulus zur Erfassung aller entscheidenden Merkmale entsprechend große Sakkaden erfordert. Das Verhalten der Patienten mit Gesichtsfelddefekten ist hierbei aufgrund eines postulierten erhaltenen mentalen Modells identisch mit dem der Normalprobanden. Ähnliches gilt auch für die Fixationsdauer und Anzahl. Hier kommt die Hypothese von *Ditchburn* (1980) zum Tragen, daß die längere Verweilzeit das »Überladen des visuellen Informationsspeichers« verhindern kann. Die Feature-Ring-Hypothese beinhaltet das Reproduzieren des Scanpaths aus dem Gedächtnis als seriellen Prozeß mit korrekter Positionierung der interessanten »Subfeatures« eines Bildes. Dieser Top-Down-Prozeß nimmt offensichtlich mehr Zeit und Kapazität in Anspruch als das einfache Abtasten eines Bildes. Der kognitive Prozeß während des Imagery beeinflusst offenbar die Fixationen in der genannten Weise und läßt sich für alle Probanden gut mit der von uns postulierten Top-Down-Strategie bzw. Ausführung eines mentalen Modells beim Visual Imagery vereinbaren.

Für die praktische Anwendung bei Rehabilitationsaufgaben bedeutet dies, daß es durch die kombinierte und repetitive Übung und Vorstellung von einfachen und komplexen Aufgaben des Alltags und des Straßenverkehrs zu einer Verbesserung und damit »Erleichterung« des mentalen Modells für den praktischen Umgang mit der Gesichtsfeldstörung kommt. Das letztere, nämlich die positive Wirkung der visual Imagery auf den Therapieerfolg, wäre dann im

einzelnen zu prüfen, ggf. auch mittels funktioneller Bildgebung und Aktivationsstudien (fMRT und PET).

Ansprechen höherer Hirnleistungen als positiver Effekt auf die Rehabilitation von Hemianopikern: Die Verwendung verschiedener ROI-Definitionen (geometrisch a priori und subjektiv a posteriori-ROI-Definition) wird zeigen, daß komplexe und abstrakte Bildinhalte und somit das Ansprechen höherer Hirnleistungen einen positiven Effekt auf die Rehabilitation von Hemianopikern haben. Von Bedeutung ist hier die bildliche Vorstellung (Visual Imagery). Diese und die bildliche Wahrnehmung sowie der Vergleich der beiden zur Konstruktion eines sinnlichen Substrates werden in der Literatur durch das Postulat zweier Informationsspeicher kontrovers diskutiert [28, 29, 30]. Während das eine Informationssystem visuelle Langzeiterinnerung speichert, ist das zweite System (visual buffer) die vorübergehende Repräsentanz für eine bildliche Vorstellung im räumlichen Format. Die aus dem Langzeitspeicher stammende Informationen sollen beim Imagery in den visual buffer übernommen und dort untersucht und verändert werden. Sowohl die bildliche Vorstellung als auch die bildliche Wahrnehmung greifen auf diese Repräsentanz zurück. Bei der Wahrnehmung werden die Merkmale eines Objektes in den visual buffer zusammengetragen und durch Aktivierung von Erinnerungen erkannt und anschließend im Langzeitspeicher abgelegt. Beim Imagery werden die assoziativen Erinnerungen wieder in den visual buffer übernommen. Ob nun visuelle Wahrnehmung oder bildliche Vorstellung, beide sollen sich gleicher neuronaler Strukturen bedienen [29, 30]. *Kosslyn* behauptet, daß Visual Imagery die Brodmann Areale 17 und 18 aktiviert und daß eine retinotopische Organisation des visual buffer besteht. Dem gegenüber steht die kasuistische Beschreibung dreier kortikal blinder Patienten, bei denen durch PET-Studien gezeigt werden konnte, daß die Areale 17 und 18 nicht notwendig seien, um die Repräsentationen zu erinnern, womit kortikale Blindheit Visual Imagery nicht ausschließt [7]. Die Autoren sind sich jedoch darüber einig, daß das neuroanatomische Korrelat der bildlichen Vorstellung und der visuellen Perzeption im extrastriären parieto- und okzipitalen Assoziationscortex lokalisiert ist [15]. Die regionalen Blutflüsse der extrastriären Cortexareale während Visual Imagery ähneln somit denen der visuellen Perzeption, so daß ein gemeinsames Modell zur Beschreibung von Visual Imagery und visueller Perzeption sinnvoll erscheint [15]. Einigkeit besteht weiterhin darin, daß die Areale der Perzeption und des Imagery wechselseitig Informationen austauschen. Basierend auf diesem Prinzip entwickelte *Kosslyn* ein Modell, welches die Vorstellung (Imagery) und das Erkennen von Bildern und Objekten und das Abgleichen der Form dieser Bilder und Objekte mit dem inneren mentalen Modell erklärt (Abb. 8). Die Übermittlung einer Information eines extrastriären »High-Level-Areals« in das retinotopische V1-Areal stellt das geistige Auge dar. Hierbei ist das V1-Areal aber auch gleichzeitig die Eingangsstation für retinale Bilder. Der Entwurf des Imagery

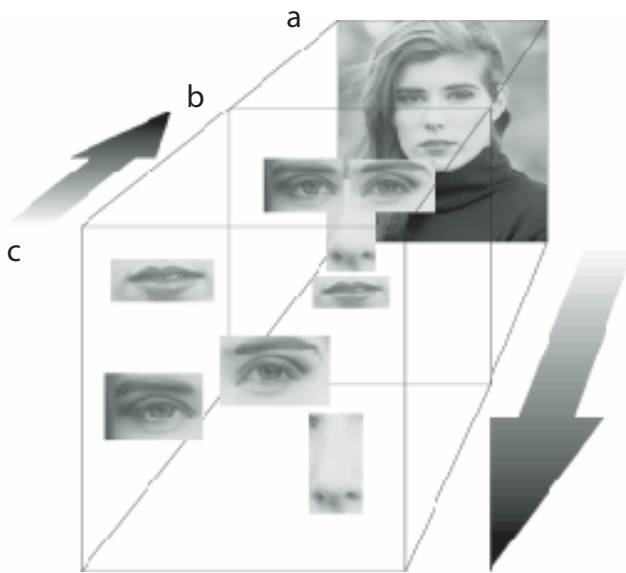


Abb. 7: Kosslyn'sches Prinzip der visuellen Perzeption. Das gesehene Bild (a) wird zunächst in den visual buffer (b) des Striatums übertragen, der das gesehene Bild im räumlichen Format darstellt. Hier ist es die sinnvolle Anordnung von Augen, Nase und Mund, die dem räumlichen Format Rechnung trägt. In den extrastriären Langzeitspeicher (c) werden anschließend die Details abgelegt. Beim Visual Imagery werden nun die Details wieder in den visual buffer des Striatums übernommen

erfolgt vor der Übermittlung in das V1-Areal im High-Level-Areal. Das Striatum als Eingangsstation der Basalganglien stellt den oben erwähnten visual buffer dar, also die vorübergehende Repräsentanz für eine bildliche Vorstellung im räumlichen Format. Ein innerhalb des visual buffer postuliertes »attention window« konzentriert sich auf einen bestimmten Bildinhalt, der subjektiv von Interesse ist. *Gbadamosi* beschreibt in seiner Arbeit über Augenbewegungen während Visual Imagery bei Hemianopiker und Normalprobanden, daß bei Imagery ähnliche Augenbewegungen durchgeführt werden wie bei der tatsächlichen Bildbetrachtung [17]. Hierbei wird bei der realen Bildbetrachtung ein mentales Abbild des Gesehenen erzeugt, das beim nachfolgenden Imagery nur wenig verändert wird. Im visual buffer wird somit das gesehene Bild voranalysiert und von den High-Level-Arealen in einen Prototyp des Gesehenen umgewandelt. Ausgehend von diesem Prototyp wird beim Imagery das Bild in den visual buffer zurückgelesen und generiert hierauf die ähnlichen Augenbewegungen. Unsere Ergebnisse zeigen deutlich, daß trotz morphologischer Schädigung des einseitigen visuellen Cortex auch nach langer Latenz zwischen Zeitpunkt der Läsion und Beginn des speziellen Trainings Top-Down Prozesse dazu beitragen, einen positiven Effekt über das Maß der Strategien einfacher blickmotorischer Übungen zu erzeugen. Die Beteiligung höherer Hirnleistungen wird besonders deutlich beim Vergleich der Bildbetrachtungen unter Verwendung der a posteriori ROI-Definition. Diese sind Ausdruck des Szenarios mit den Aspekten der Bekanntheit einzelner Elemente der Szenerie und der damit verbundenen sinnlichen Verknüpfung über Nutzen und Gebrauch dieser

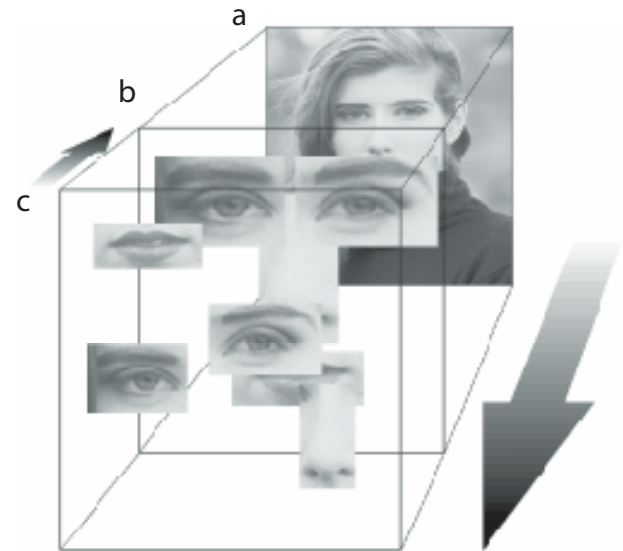


Abb. 8: Kosslyn'sches Prinzip der visuellen Perzeption nach Training. Durch eine schnellere Bereitstellung der Inhalte aus dem Langzeitspeicher (c) wird der visual buffer im Sinne eines »quick fill of visual buffer« mit Informationen gefüllt, die Strecke c → b wird im Gegensatz zur selben Strecke in der Abbildung links verkürzt. Ferner wird die Information erleichtert freigegeben, was wir als »facilitated mobilisation of information« bezeichnen, entsprechend sind die Subfeatures in (7) größer als in (6)

einzelnen Bildelemente auf dem Boden einer bekannten Assoziation. Auf diese Leistungen greift der Hemianopiker trotz einseitiger Läsion seines visuellen Cortex im Sinne eines »quick fill of visual buffer« aus den extrastriären High-Level-Arealen zurück. Dies wird mit aller Deutlichkeit unter Verwendung des Region-String-Editing klar: Bei den Hemianopikern fielen die Similarities der Bildbetrachtungen vor dem Training stetig für die weiteren Bildbetrachtungen der Konsultation. Der Anstieg der Similarities nach dem Training für die a posteriori ROI-Definition und der weitere Anstieg der Similarities für die weiteren Betrachtungen während dieser Kontrollkonsultation nach dem Training zeigt deutlich, daß nicht nur die Strategien koordinierter Augenbewegungen maßgeblich an dem Therapieerfolg beteiligt sind, sondern der bereits oben erwähnte schnelle Zugriff auf die High-Level-Areale und die schnelle Umsetzung einer Szenerie im visual buffer die Möglichkeit der schnellen Adaption an eine gegebene, bereits bekannte Szenerie einen entscheidenden Beitrag zur neurovisuellen Rehabilitation leisten. Dies läßt sich weiterhin an dem Anstieg der Similarities unter Verwendung der Markov-Analyse beweisen, welche die Wahrscheinlichkeit zum Ausdruck bringt, daß ein Punkt x fixiert wird, wenn zuvor der Punkt y fixiert wurde. Nach dem Training stiegen diese Übergangswahrscheinlichkeiten bei den Hemianopikern unter a posteriori ROI-Definition an, während sie vor dem Training aber auch bei den Normalprobanden beim Vergleich der Bildbetrachtungen abnahmen. Dies unterstützt noch einmal die Aussage, wie sehr kognitive Aspekte bei der Rehabilitation von Patienten mit Gesichtsfeldausfällen zu berücksichtigen sind.

Unsere Studie betont die Präsenz und die Reproduzierbarkeit von Visual Imagery mittels abgeleiteter Scanpaths bei Hemianopsie-Patienten im Vergleich mit unseren Normalprobanden. Die Auswertung der basalen Parameter zeigte uns jedoch, daß auf komplexerem Niveau, z. B. dem trivalenten Bild, Probleme in der Modellbildung bereits bei der Bildbetrachtung auftreten und man so auch eine Einschränkung des mentalen Modells, das in sich konsistent ist, annehmen kann. Die von uns formulierte Hypothese der »Konvergenz der Vorstellung« in unseren beiden Kollektiven steht im Einklang mit der These der Involvierung identischer Strukturen für die Prozesse des Wahrnehmens und Erinnerns.

Unter dem Paradigma der Feature Ring Hypothese nach *Noton* und *Stark* [38, 39] sehen wir die von uns abgeleiteten Augenbewegungen als wesentlichen Teil der Repräsentation von Objekten im visuellen Cortex. Es zeigte sich anhand unserer Ergebnisse, daß bei beiden Kollektiven ungeachtet von Einschränkungen bei der Exploration gleiche Mechanismen zugrunde liegen. Beginnend mit einer tendenziell mehr Bottom-Up betonten Sehstrategie bei Ansicht eines unbekanntes Bildes, folgten nach der Modellbildung ähnlich ausgeführte, Top-Down gesteuerte Scanpaths in den Imagery-Durchläufen. Die Ähnlichkeiten der Bildbetrachtung-Imagery Scanpaths zeigen, daß der Inhalt der gesehenen Szene in den Sakkaden-Fixationen-Sequenzen gespeichert ist.

Brandt und *Stark* [4] beobachteten in ihrer Ableitung von Augenbewegungen bei Normalprobanden während Visual Imagery eines abstrakten visuellen Stimulus zunächst die Existenz von Scanpaths ohne spezifische Aufforderung. Auch sie konnten anhand von String-Editing Methoden nachweisen, daß während Visual Imagery ähnliche Augenbewegungen gemacht werden wie bei der vorherigen Bildbetrachtung. In Übereinstimmung mit unseren Ergebnissen wurde von einem Top-Down-Prozeß bei Visual Imagery ausgegangen unter dem Verweis, daß bei Imagery der peripher »Input« zum Ausführen eines Scanpaths fehlt und somit nur das mentale Modell hierzu maßgeblich ist. Wie bereits erwähnt fand sich ebenfalls eine Übereinstimmung der »basalen« Charakteristiken des Imagery-Scanpaths, die wir als »Miniaturisierung« beschrieben.

Maßgebliche Erkenntnisse für alle Probanden war der Nachweis einer »Konvergenz« der visuellen Vorstellung unter Stützung der Feature Ring Hypothese und des Postulats eines gemeinsamen morphologischen Korrelats sowie einer funktionellen Übereinstimmung der Funktionen visuelle Perception und Visual Imagery. Auch wenn die Beschaffenheit der mentalen Abbilder abhängig von Schwere der Läsion, Adaptationsgrad und damit verbundener eingeschränkter Bildbetrachtung bei Gesichtsfeldstörungen eine andere zu sein scheint als die von Normalprobanden, so zeigt unsere Studie, daß der Mechanismus der Top-Down-Steuerung ungeachtet dessen bei beiden Kollektiven vorliegt, mittels der Augenbewegungen auch nachzuweisen ist und eine wesentliche Rolle für die Rehabilitation spielt.

Literatur

1. Becker A: Quantitative Bildbetrachtungsauswertung bei der neurovisuellen Rehabilitation von hemianopischen Patienten. Med Diss Univ Hamburg 2000
2. Behrmann M, Winur G, Moscovitch M: Dissociation between mental imagery and object recognition in a brain-damaged patient. *Nature* 1992; 359: 636-637 und Comments in *Nature* 1992; 359: 590-591
3. Brandt S, Ploner C, Meyer BU, Leistner S, Villringer A: Effects of repetitive transcranial magnetic stimulation over dorsolateral prefrontal and posterior parietal cortex on memory-guided saccades. *Exp Brain Res* 1998; 118: 197-204
4. Brandt S, Stark LW: Spontaneous Eye Movements During Visual Imagery Reflect the Content of the Visual Scene. *Journal of Cognitive Neuroscience* 1997; 9 (1): 27-38
5. Butter CM, Kosslyn S, Mijovic-Prelec D, Riffle A: Field-specific deficits in visual imagery following hemianopia due to unilateral occipital infarcts. *Brain* 1997; 120: 217-228
6. Campion J, Latto W, Smith YM: Is blindsight an effect of scattered light, spared cortex, and near threshold vision? *Behav Brain Sci* 1983; 6: 423-486
7. Chatterjee A, Southwood MH: Cortical blindness and visual imagery. *Neurology* 1995; 45: 2189-2195
8. Chedru F, Leblanc M, Lhermitte F: Visual searching in normal and brain damaged subjects. *Cortex* 1973; 9: 94-111
9. Choi YS, Mosley AD, Stark LW: String editing analysis of human visual earch. *Optom Vis Sci* 1995; 72: 439-451
10. Dinkin EB, Juschkewitsch AA: Sätze und Aufgaben über Markoffsche Prozesse. Springer-Verlag, Heidelberg 1996
11. Ellis SR, Stark L: Eye movements during viewing of Necker cubes. *Perception* 1978; 7: 575-581
12. Farah M, Peronnet F, Gonon MA, Girard MH: Electrophysiological evidence for a shared representational medium for visual images and visual percepts. *J Exp Psychol Gen* 1988; 117: 248-257
13. Farah M; Ratcliff G: *The Neuropsychology of High-Level Vision, Collected Tutorial Essays*, edited by Farah M u. Ratcliff G, 1994
14. Fels M, Geissner E: Neglect Test NET. Ein Verfahren zur Erfassung visueller Neglectphänomene. Hogrefe, Göttingen 1996
15. Fink GR, Halligan PW, Marshall JC, Frith CD, Frackowiak RSJ, Dolan RJ: Neural mechanisms involved in the processing of global and local aspects of hierachically organized visual stimuli. *Brain* 1997; 120: 1779-1791
16. Gassel MM, Williams D: Visual function in patients with homonymous hemianopia. Part 2. Oculomotor mechanisms. *Brain* 1963; 86: 1-36
17. Gbadamosi J, Zangemeister WH: Visual Imagery in Hemianopic patients. *J Cog Neurosci* 2001; 13 (7): 912-926
18. Goldenberg G, Poderka I, Steiner M, Suess E, Deecke L: Regional cerebral blood flow patterns in visual imagery. *Neuropsychologia* 1989; 27: 641-664
19. Goldenberg G: The neural basis of mental imagery. Review. *Baillieres Clin Neurol* 1993; 2: 265-286
20. Goldenberg G, Mullbacher W, Nowak A: Imagery without perception – a case of anosognosia for cortical blindness. *Neuropsychologia* 1995; 33: 1373-1382
21. Gulyas B, Persson H, Stone-Elander S, Eriksson L: Neuroimaging studies in visual imagery of reading with Positron Emission Tomography (PET), Nuclear Magnetic Resonance (MR) imaging and Brain Electric Activity Mapping (BEAM). *European Journal of Neuroscience* 1992; Suppl 5: 22
22. Hacisalihzade SS, Stark LW, Allen JS: Visual perception and sequences of eye movement fixations: A stochastic modeling approach. *IEEE Trans Systems, Man, Cyb* 1992; 22: 474-481
23. Hebb DO: Concerning Imagery. *Psychological Review* 1968; 75 (6): 466-477
24. Hier DB, Mondlock J, Caplan LR: Recovery of behavioural abnormalities after right hemisphere stroke. *Neurol* 1983; 33: 345-350
25. Jankowiak J, Kinsbourne M, Shalev RS, Bachmann DL: Preserved visual imagery and categorization in a case of associative visual agnosia. *J Cogn Neurosci* 1992; 4: 119-31
26. Kemeny JG, Snell JL: *Finite Markov Chains*. Springer, New York 1983
27. Kerkhoff G, Muenssingern U, Haaf E, Eberle-Straus G, Stoegerer E: Rehabilitation of homonymous scotoma in patients with postgeniculate damage of the visual system: saccadic compensation training. *rest Neurol Neurosci* 1992; 14: 245-254

28. Kosslyn SM, Alpert LM, Thopson WL, Maljkovic V, Weise SB, Chabris CF et al: Visual mental imagery activates topographically organized visual cortex: PET investigations. *J Cogn Neurosci* 1993; 5: 263-287
29. Kosslyn SM: *Image and Brain*. MIT Press, Cambridge, Mass. 1994
30. Kosslyn SM, Shin LM: Visual Mental Images in the Brain: Current Issues. The Neuropsychology of High-Level Vision, Collected Tutorial Essays edited by Farah M u. Ratcliff G, 1994: 269-296
31. Kruskal WH, Wallis WA: Use of ranks in one-criterion variance analysis. *J Amer Statst Assoc* 1952; 47: 583-621
32. LeBihan D, Turner R, Zeffiro TA, Cunod CA, Jezzard P, Bonnerot V: In: LeBihan D, Turner R, Mosley M, Hyde J (eds): *Functional MRI of the brain: a workshop presented by the Society of Magnetic Resonance in Medicine and the Society for Magnetic Resonance Imaging*. Society of Magnetic Resonance in Medicine 1993: 183-190
33. Lenz G: *Zur Pathologie der cerebralen Sehbahn unter besonderer Berücksichtigung ihrer Ergebnisse für die Anatomie und Physiologie*. Verlag von Wilhelm Engelmann, Leipzig 1909
34. Meienberg O, Zangemeister WH, Rosenberg M, Hoyt WF, Stark LW: Saccadic eye movement strategies in patients with homonymous hemianopia. *Ann Neurol* 1981; 9: 537-544
35. Meienberg O: Clinical examination of saccadic eye movements in hemianopia. *Neurolo* 1983; 33: 1311-1315
36. Messing B, Gänshirt H: Spontanverlauf vaskulärer, retrogenikulärer Gesichtsfeldstörungen. *Verh dt Gesell Neurol* 1986: 228-236
37. Morgan HL: Spelling correction in system programs. *Comm ACM* 1970; 13: 90-94
38. Noton D, Stark LW: Eye movements and visual perception. *Scientific American* 1971; 224: 34-43
39. Noton D, Stark LW: Scanpaths in eye movements during pattern perception. *Science* 1971; 171: 308-311
40. Oechsner U, Zangemeister WH: Verification of short- and long-term adaptation of eye movements in patients with visual hemifield defects. *Ocular Motor Symposium*, San Francisco, October 9th 1994
41. Parker RE: Picture processing during recognition. *Journal of Experimental Psychology: General* 1978; 4: 284-292
42. Pommerenke K, Markowitsch HJ: Rehabilitation training of homonymous visual field defects in patients with postgeniculate damage of the visual system. *Restor Neurol Neurosci* 1989; 1: 47-63
43. Poppelreuter W: *Die psychischen Schädigungen durch Kopfschuß im Kriege Vol. 1: Die Störungen der niederen und höheren Schleistungen durch Verletzungen des Okzipitalhirns*. Voss, Leipzig 1917
44. Rabiner LR: A tutorial on hidden markov models and selected applications in speech recognition. *Proc IEEE* 1986; 77: 257-286
45. Rayner K, McConkie GW: What guides a reader's eye movements? *Vision Research* 1976; 16: 829-837
46. Riddoch G: Dissociation in visual perception due to occipital injuries, with special reference to appreciation of movement. *Brain* 1917; 40: 15-57
47. Roland PE, Gulyas B: Visual representations of scenes and objects: retinotopical or non-retinotopical? *Trends Neurosci* 1994; 17: 294-297
48. Roland PE, Gulyas B: Visual imagery and visual representation. *Trends Neuroscience* 1994; 17 (7): 281-287
49. Rossi PW, Kheifets S, Reding MJ: Fresnel prisms improve visual perception in stroke patients with homonymous hemianopia or unilateral visual neglect. *Neurology* 1990; 40: 1597-1599
50. Sankoff D, Kruskal JB: *Time Warps, String Edits and Macromolecules: The Theory and Practice of Sequence Comparison*. Addison-Wesley, Reading, Mass. 1983
51. Schoepf D, Zangemeister WH: Correlation of coordinated gaze strategies to the status of adaptation in patients with hemianopic visual field defects. *Ann NY Acad Sci* 1993; 682: 404-409
52. Stark LW, Choi YS: Experimental metaphysics: The scanpath as an epistemological mechanism. In: Zangemeister WH, Stiehl HS, Freksa C (eds): *Visual Attention and Cognition*. Elsevier Publishers, Amsterdam 1996: 3-69
53. Stark LW, Ellis S: Scanpaths revisited: Cognitive models in active looking. In: Fisher B, Monty C, Sanders M (eds): *Eye Movements, Cognition and Visual Perception*, Erlbaum Press, New Jersey 1981: 193-226
54. Treisman A, Gelade G: A feature integration theory of attention. *Cognitive Psychology* 1980; 12: 97
55. Wagner RA, Fischer MJ: The string-to-string correction problem. *J ACM* 1974; 21: 168-173
56. Zangemeister WH, Meienberg O, Stark L, Hoydt WF: Eye-Head Coordination in Homonymous Hemianopia. *J Neurol* 1982; 225: 243-254
57. Zangemeister WH, Dannheim F, Kunze K: Adaption of gaze to eccentric fixation in homonymous hemianopia. In: Keller EL, Zee DS (eds): *Adaptive processes in visual and oculomotor systems*. Pergamon Press, Oxford 1986
58. Zangemeister WH, Canavan AGM, Hoemberg V: Frontal and parietal transcranial magnetic stimulation (TMS) disturbs programming of saccadic eye movements. *J Neurol Sci* 1995; 133: 42-52
59. Zangemeister WH, Oechsner U, Freksa C: Short-term adaptation of eye movements in patients with visual hemifield defects indicates high level control of human scanpath. *Optom Vis Sci* 1995; 72, 467-477
60. Zangemeister WH, Oechsner U: Evidence for scanpaths in hemianopic patients shown through string editing methods. In: Zangemeister WH, Stiehl HS, Freksa C (eds): *Visual Attention and Cognition*. Elsevier Publishers, Amsterdam 1996: 197-221
61. Zangemeister WH, Poppensieker K, Hoekendorf H: *Kognitive Gesichtsfeldrehabilitation mittels Strategien-koordinierter Blickmotorik*. Shaker Verlag, Aachen 1999
62. Zeki S: The functional organization of projections from striate to prestriate visual cortex in the rhesus monkey. *Cold Spring Harbor Symp Quant Biol* 1996; 40: 591-600
63. Zeki S: Uniformity and diversity of structure and function in rhesus monkey prestriate cortex. *J Physiol (Lond)* 1978; 277: 273-290
64. Zeki S: The distribution of wavelength and orientation selective cells in different areas of monkey visual cortex. *Proc R Soc Lond (Biol)* 1983; 217: 449-470
65. Zeki S: *A vision of the brain*. Blackwell Scientific Publications, Oxford 1993: 22-32
66. Zihl J: Recovery of visual functions in patients with cerebral blindness: Effect of specific practice with saccadic localization. *Experimental Brain Research* 1981; 44: 159-169
67. Zihl J, Cramon D v: *Neuropsychologische Rehabilitation*, Springer, Berlin 1988
68. Zihl J, Cramon Y v: *Zerebrale Sehstörungen*. Kohlhammer, Stuttgart 1986

Korrespondenzadresse:

Prof. Dr. med. W. H. Zangemeister
 Neurologische Universitätsklinik Hamburg-Eppendorf
 Martinistr. 52
 20251 Hamburg
 zangemei@uke.uni-hamburg.de