

Plastizität des visuellen Systems nach Hirnschädigung

E. Kasten, B. A. Sabel

*Institut für Medizinische Psychologie,
Medizinische Fakultät der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg*

Zusammenfassung

Lange Zeit ist angenommen worden, das visuelle System sei unveränderlich fest verschaltet und jede plastische Anpassungsfähigkeit auf eine frühe Lebensphase begrenzt. Diese Konzepte wurden in den letzten zehn Jahren radikal verändert. Aus heutiger Sicht sind Nervenzellen des visuellen Systems schon auf einer frühen Stufe der Verarbeitung in ihren Eigenschaften und Funktionen anpassungsfähig und können Informationen aus einem viel größeren, umliegenden Teil des Sehzentrums verarbeiten als bisher angenommen wurde. Diese Plastizität erlaubt nicht nur eine Anpassung an Veränderungen der Umwelt, sondern auch an Erkrankungen des Sehsystems. Zum Beispiel zeigten tierexperimentelle Studien, dass sich Tiere von Schäden des Sehsystems gut erholen können. Unter anderem fand man bei rezeptiven Feldern im Randbereich von Skotomen eine Vergrößerung in den blinden Bereich hinein. Auch zeigen eine Reihe von unabhängigen klinischen Studien aus den letzten 20 Jahren, dass durch Sehtraining eine Gesichtsfeldvergrößerung bei Patienten mit Gesichtsfeldeinschränkungen erzielt werden kann. Der Artikel gibt eine generelle Übersicht über aktuelle Studien und diskutiert Erklärungsmodelle für diese Effekte eines Gesichtsfeldtrainings.

Schlüsselwörter: Hemianopsie, Gesichtsfeld, Plastizität, visuelles System

Plasticity of the visual system after brain damage

E. Kasten, B. A. Sabel

Abstract

It has long been assumed that the visual system is hard-wired and any plasticity was thought to be restricted to a period early in life. These concepts have been radically modified in the past ten years. The present view is that even at the earliest stages of the visual pathway, cells are highly adaptable in their functional properties and are capable of integrating information over a much larger part of the surrounding visual cortex than originally believed. This plasticity allows an adaptation to changes of the environment as well as to defects of the visual system. Animals can recover quite well from loss of vision. Also, animal experiments reveal that receptive fields in the border area of a scotoma show an enlargement into the blind visual field. In addition, several independent clinical studies which were conducted during the last 20 years show a training-dependent increase of the visual field borders in patients with visual field loss. The article gives a general overview of current studies and discusses how these effects of visual field training can be explained.

Key words: Hemianopia, visual field, plasticity, visual system

Neurol Rehabil 2003; 9 (3-4): 113-128

Wie fest verschaltet ist das Sehsystem?

Es ist nicht nur das Auge, das dafür verantwortlich ist, ob etwas gesehen wird oder nicht. Das eigentliche Abbild der Umwelt, d.h. die bewusste Wahrnehmung, wird erst vom Hirn generiert. Lange Zeit sah man das Gehirn als unveränderlich fest verschaltet an. Aber schon alleine die Alltagsbeobachtung, dass erwachsene Tiere wie auch Menschen ihr Verhalten durch Lernprozesse ständig verändern können, zeigt die Anpassungsfähigkeit dieses Organs an eine sich laufend wandelnde Umwelt. Diese Flexibilität, die letztlich auf Änderungen der Verschaltungen zwischen

Nervenzellen beruht, hat sich in der Evolution als notwendiger Vorteil zum Überleben herausgestellt. Das Dogma, das ausgereifte Gehirn sei so hoch spezifisch aufgebaut, dass eine geschädigte Funktion unwiderruflich verloren ist, gilt heute als veraltet. Eine Vielzahl von Untersuchungen zeigt, dass sich nicht nur das jugendliche, sondern auch das Hirn Erwachsener spontan von Läsionen erholen kann und dass Patienten durch gezieltes Training beträchtliche Verbesserungen zeigen können. Bei Symptomen wie etwa der Aphasie oder der Hemiplegie würde heute niemand mehr ernsthaft den Wert gezielter therapeutischer Bemühungen anzweifeln. Die enorme Anpassungsfähigkeit, die

andere Areale des Gehirns offensichtlich besitzen, wurde dem visuellen System seltsamerweise lange Zeit nicht zugebilligt. Obwohl auch andere Funktionsareale, etwa der für die Bewegungssteuerung zuständige motorische Kortex, ebenso hoch spezifisch aufgebaut sind und sich trotzdem plastisch verändern [16], wurde ausgerechnet bei der kortikalen Repräsentation der visuellen Wahrnehmung angenommen, sie sei rigide und unveränderlich. Dieses starre Paradigma kommt nun endgültig ins Wanken. Obwohl schon seit den sechziger Jahren tierexperimentelle Befunde vorliegen, die darauf hindeuteten, dass das Sehsystem Schäden durchaus bis zu einem gewissen Grad ausgleichen kann, wurden erst in den letzten Jahren Ergebnisse publiziert, die zeigen, dass auch das visuelle System eine erhebliche Plastizität besitzt und sich nicht nur an krankheitsbedingte Ausfälle anpassen kann, sondern auch einer gezielten Therapie zugänglich ist. Der folgende Artikel fasst die wesentlichen Daten der aktuellen Forschung der letzten Jahre zusammen und gibt einen Einblick in neue Behandlungsmethoden.

Können rezeptive Felder sich plastisch verändern?

Die Untersuchung der Funktionen rezeptiver Felder, den kleinsten Einheiten in der Verarbeitung von visuellen Informationen, spielt in der Forschung heute eine besonders große Rolle. In vielen Lehrbuchabbildungen werden rezeptive Felder manchmal rechteckig oder kreisförmig so dargestellt, als würden sie in der Sehrinde ordentlich nebeneinander liegen; jedes Teil gehört zu einer hoch spezifischen Kolumne. Man war lange der Meinung, dass ein ausgefallenes Feld deshalb keinesfalls durch das daneben liegende, intakte ersetzt werden kann. Diese Darstellungsweise gilt heute jedoch als simplifiziert. Aus tierexperimentellen Studien weiß man schon lange, dass sich rezeptive Felder im primären visuellen Kortex erheblich überlappen und auch an gleichen Exzentrizitäten des Gesichtsfeldes ganz erhebliche Unterschiede der Größe haben können [13, 46].

Die Papille, die Austrittsstelle des Sehnerven aus dem Auge, müsste man zumindest bei monokularem Sehen im subjektiven Erleben als kleines Skotom im Gesichtsfeld wahrnehmen können. Dies ist bekanntlich jedoch nicht der Fall, da das Gehirn diesen Blinden Fleck mit Informationen aus dem Randbereich auffüllt. Eine Frage, welche die Wissenschaftler in den letzten Jahren beschäftigt hat, ist, ob dieser Effekt auch bei willkürlich gesetzten Schäden der Netzhaut auftritt. Anhand von Tierversuchen fand man ein interessantes Ergebnis: Nach der gezielten Zerstörung eines Bereiches der Netzhaut ordneten sich die zugehörigen rezeptiven Felder im primären Sehzentrum tatsächlich um und versuchen nun, Informationen aus dem intakten Grenzbereich zu bekommen [3, 7, 16]. Eysel konnte 1991 zeigen, dass es einen »Filling-in«-Effekt nicht nur beim Blinden Fleck, sondern auch bei kleinen Skotomen der Retina gibt, der dazu führt, dass diese schon nach mehreren Wochen kaum noch nachweisbar sind [4].

Monokulare Läsionen kann das Gehirn natürlich ohnehin ausgleichen, wenn es noch ausreichend Information aus dem anderen, intakten Auge bekommt. Wie aber verhält sich das Gehirn, wenn die Läsion in beiden Augen so gesetzt wird, dass sie dasselbe Gesichtsfeldareal auslöscht? Gilbert [8] stellte bei retinalen Läsionen mit gleichen Positionen in beiden Augen fest, dass die kommunizierende Zone im Sehkortex zunächst still war, da sie nun keine Erregung mehr erhielt. Nach einigen Monaten zeigte sich aber erstaunlicherweise doch wieder eine Aktivität. Die den rezeptiven Feldern entsprechenden Nervenzellen verarbeiteten nun Informationen aus dem Randbereich der Läsion. Das Ausmaß der Reorganisation konnte bis zu einem Zentimeter Kortexoberfläche umfassen. Als Erklärung für dieses Phänomen vermutet Gilbert lange horizontale Verbindungen (»long-range horizontal connections«) von außerhalb des rezeptiven Feldes, die normalerweise nur unterschwellige Erregungen erzeugen.

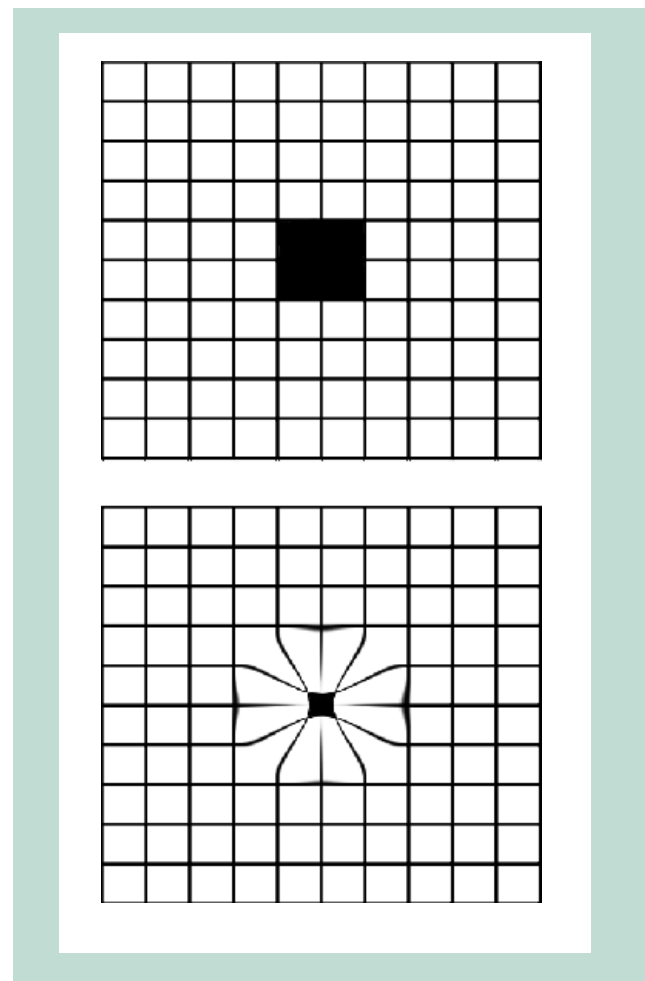


Abb. 1: Beispiel für den »filling-in«-Prozess. Die Quadrate deuten rezeptive Felder in der Area 17 (V1) an. Ein Skotom (schwarzer Bereich) infolge einer Läsion des Gehirns (oberer Teil) wird nach einiger Zeit teilweise dadurch ausgeglichen, dass rezeptive Felder aus dem Randbereich ihre Größe verändern und einen Teil der Information mitverarbeiten, die in den Bereich der Schädigung projiziert wird (unterer Teil). Die Abbildung ist nur schematisch, da rezeptive Felder sich in der Realität stark überlappen und unterschiedliche Größen haben.

Um diese Anpassungsphänomene zu verstehen, muss man wissen, dass Nervenzellen nicht nur zu einer Ja/Nein-Antwort fähig sind, sondern wie kleine Rechenmaschinen die von anderen Nervenzellen eingehende Erregung oder Hemmung (abhängig von Ort und Stärke der Verschaltung) verrechnen und erst feuern, wenn die Aktivierung ein bestimmtes Niveau überschreitet. Da es zwischen Neuronen nicht nur erregende, sondern auch hemmende Einflüsse gibt, kann dieselbe Erregung einer vorgeschalteten Nervenzelle das eine Mal zum Feuern führen, das andere Mal jedoch nicht. Das Umfeld kann die Eigenschaften eines rezeptiven Feldes also beeinflussen. Noch komplizierter wird diese Verrechnung, da nicht alle Eingangskanäle einer Zelle gleich stark sind, oft muss außerdem ein gemeinsames Set von Reizen gleichzeitig eintreffen, um eine Zelle überhaupt ausreichend erregen zu können. Der Informationsfluss aus einer benachbarten Zelle, der alleine zwar keine Aktivierung auszulösen vermag, kann daher modulatorische Effekte haben. Zu diesem Zweck sind benachbarte Nervenzellen über die von *Gilbert* gefundenen, vergleichsweise langen Verbindungen miteinander verschaltet und beeinflussen sich gegenseitig. Hierdurch können sich auch rezeptive Felder in ihrer Größe verändern.

Nervenzellen im primären Sehzentrum, die keine eigene Information mehr erhalten, wenn das korrespondierende Netzhautareal vernichtet wurde, müssten normalerweise degenerieren und absterben. Dies tun sie in der Regel vor allem bei kleineren Schäden nicht; über die long-range horizontal connections können sie sich Informationen von benachbarten Zellen holen, dadurch wieder eine Aufgabe übernehmen und überleben [6].

Was aber, wenn die Augen intakt sind, aber eine Schädigung der primären Sehrinde vorliegt? Gibt es auch hier Anpassungsprozesse? Die »filling-in«-Methode scheint bis zu bestimmten Grenzen auch zu funktionieren, wenn das Netzhautareal intakt ist, aber eine Zerstörung des korrespondierenden Bereiches im visuellen Kortex vorliegt. Das Rahmenwerk der vielfältigen Verbindungen kann den Informationsaustausch zwischen kortikalen Neuronen so beeinflussen, dass die rezeptiven Felder aus dem Randbereich sich sogar in ein kortikales Skotom hinein auszudehnen vermögen. Nervenbahnen aus der Retina, die eigentlich in das zerstörte Areal projizieren, aber noch Verschaltungen zu benachbarten, intakten Neuronen des Sehkortex haben, aktivieren diese zusätzlich. Auch die Quelle dieser Reorganisation dürften nach Ansicht von *Gilbert* long-range-Verbindungen sein, die bis zu 6–8 mm Länge umfassen können. Diese Verbindungen müssen allerdings irgendwie gestärkt werden, um von ihrer (normalerweise) unterschwelligem, modulierenden Bedeutung zu einem überschwelligem Einfluss zu kommen. Vermutlich werden hier über Lernprozesse kollaterale Verbindungen gefestigt, Verschaltungen über zwischengeschaltete Interneurone ausgebaut und durch Aufbau neuer Schaltstellen (»Synaptogenese«) sogar noch weitere Verbindungen entwickelt. Möglicherweise haben auch Feedback-Mechanismen aus höheren visuellen Arealen eine Bedeutung.

Wenn derartige Anpassungsprozesse im Fall einer Schädigung des Sehsystems nachweisbar sind, müssten sie auch im gesunden Individuum zu finden sein. *Gilbert* stellte in mehreren Arbeiten fest, dass auch im völlig intakten visuellen System Zellen in ihren funktionalen Eigenschaften sehr viel flexibler sind als man bisher glaubte. Veränderungen der Größe rezeptiver Felder können insbesondere durch Erfahrung (Lernen) beeinflusst werden [8].

Wörgötter und Mitarbeiter [43, 44] gehen noch über diese Annahmen hinaus und vermuten, dass rezeptive Felder sich ohnehin ständig je nach Anforderungen, Aufmerksamkeit und Arousal vergrößern und verkleinern können. Wahrscheinlich spielt die Aufmerksamkeit eine wichtige

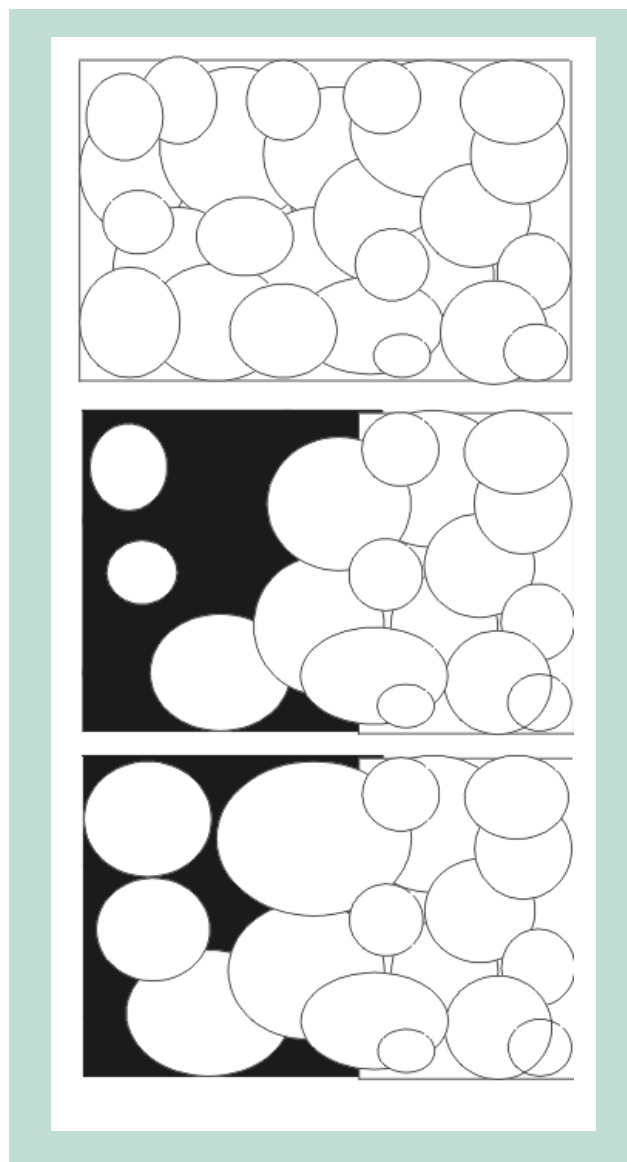


Abb. 2: Modellhafte Vorstellung der Veränderung rezeptiver Felder. Oben wurde der Zustand im intakten Gehirn dargestellt. Rezeptive Felder überlappen sich. Mitte: Nach einer Läsion haben im Randbereich zwischen intaktem und blindem Gesichtsfeld einige Felder überlebt. Unten: Diese können ihren Einzugsbereich vergrößern. Dies geschieht allerdings nicht durch lapidare Vergrößerung, wie in der Abbildung dargestellt, sondern vermutlich eher über bessere Nutzung bestehender neuronaler Verbindungen.

Rolle, um die Aktivierung der Neurone zu steigern und die unterschwellige Information über die Wahrnehmungsschwelle zu heben. So wiesen *Wörgötter* et al. darauf hin, dass Zellen in der primären Sehbahn ihr räumliches und zeitliches Verhalten ständig ändern. Diese Autoren konnten zeigen, dass sich die Form rezeptiver Felder im primären visuellen Kortex der Katze in Korrelation zum generellen Synchronisationszustand des Gehirns verändert. Rezeptive Felder sind größer während synchroner (schläfriger) und kleiner während nicht-synchroner (aktiverter, aufmerksamer) Zustände des EEGs. Diese dynamischen Veränderungen der Größe kortikaler rezeptiver Felder passen das räumliche Auflösungsvermögen an unterschiedliche Erregungszustände des Gehirns an. Die Antwort einer Zelle auf einen lokalen Reiz wird also nicht nur durch die Natur des Reizes, sondern auch erheblich durch das Umfeld moduliert, in dem der Reiz dargeboten wird.

Offenbar ist Lernen nicht nur eine Angelegenheit des Gedächtnisses und höherer kortikaler Areale, sondern auch Neurone des primären visuellen Systems scheinen durchaus lernfähig zu sein (sog. perzeptuelles Lernen) und können hierdurch ihre Leistung in einfachen Wahrnehmungsaufgaben verbessern. Mitunter kommt es innerhalb weniger Sitzungen zum perzeptuellen Lernen, andere Lernphänomene entwickeln sich allerdings mitunter erst über Tage und Wochen.

Eysel, *Eyding* und *Schweigart* [5, 6] entwickelten hierzu ein interessantes Versuchsdesign. Die Autoren prüften Eigenschaften einzelner rezeptiver Felder im visuellen Kortex der Katze in vivo. Infolge einer assoziativen, synchronen Co-Stimulation von vorher nicht-antwortenden Regionen im Randbereich eines rezeptiven Feldes dehnten diese Zellen ihre rezeptiven Felder innerhalb von wenigen Minuten aus, veränderten ihre Struktur dann aber gleich für die Dauer mehrerer Stunden. Offenbar gibt es also eine benutzungsabhängige Vergrößerung rezeptiver Felder.

Auch Ergebnisse über Untersuchungen der Aufmerksamkeit des Gehirns mittels neuer Verfahren der funktionellen Bildgebung [39] zeigen, dass die neurale Repräsentation der visuellen Welt nur zum Teil automatisch in fest installierten Schaltkreisen verläuft: Der ›Bottom-up‹ Fluss der Signale von der Netzhaut bis zur Hirnrinde wird kontrolliert durch ›Top-Down‹ Signale von der Hirnrinde abwärts in die Peripherie. Die aufsteigenden Signale werden gefiltert, verstärkt oder unterdrückt. Diese Selektion, die wir als Aufmerksamkeit erleben, ist ein essentieller Mechanismus des Zentralnervensystems. Er macht es möglich, dass die begrenzten mentalen Ressourcen optimal auf Ereignisse ausgerichtet werden können, um diese schnell und präzise verarbeiten zu können. Wie der Lichtkegel einer Taschenlampe beleuchtet die neurale Selektion die Repräsentation der Welt im Hirn, trennt Wichtiges von Unwichtigem und erlaubt so adäquates Verhalten in einer ständig sich wandelnden Umgebung. Mittels funktioneller Kernspintomographie kombiniert mit Elektrophysiologie wurde von *Treue* und *Martinez-Trujillo* [39] gezeigt, dass visuelle Wahrnehmung im Gehirn kein automatischer Prozess ist,

sondern dass Kontext und Einstellung darüber entscheiden, wie Ereignisse verarbeitet werden.

Der heutige Kenntnisstand zeigt also, dass rezeptive Felder keine simple, wabenförmig angeordnete 1:1-Abbildung der Umgebung liefern, sondern hochkomplexe, übereinandergelagerte Strukturen bilden, die sich auch noch in ständiger Veränderung befinden. Wie das Bewusstsein es schafft, daraus eine stabile Wahrnehmung der Umwelt zu schaffen, bleibt bisher noch ein Rätsel, an dem die Neurowissenschaftler derzeit mit computergestützten Modellen arbeiten. Diese Anpassungsfähigkeit des visuellen Systems führt aber auch zu der Frage, ob es nach einer Schädigung auch möglich sein kann, Sehfunktionen durch ein Training wieder gezielt zu verbessern.

Lassen sich Schäden des visuellen Systems trainieren?

Eine der wichtigsten, ersten Arbeiten zu dieser Frage stammt ebenfalls aus dem tierexperimentellen Bereich. Nachdem *Hubel* und *Wiesel* im Verlauf der sechziger Jahre gezeigt hatten, welche Auswirkungen visuelle Deprivation auf die normale Entwicklung des visuellen Systems hat [8, 9, 10, 11, 12, 13], stellten *Chow* und *Steward* im Jahr 1972 die Frage, ob es auch möglich ist, die Sehfunktionen deprivierter Tiere durch gezielte Übungen zu verbessern [2]. Bei fünf neugeborenen Katzen wurde ein Augenlid völlig verschlossen. Erst nach einem Zeitraum von rund zwei Jahren (16–24 Monate) wurde dieses deprivierte Auge wieder geöffnet. Die Tiere benutzten es jedoch gar nicht, sondern verließen sich ausschließlich auf das intakte Auge. Nun aber verschlossen *Chow* und *Steward* bei drei dieser Katzen das gesunde Auge. Die Tiere verhielten sich zunächst wie völlig blind, dann aber verbesserte sich ihr Sehvermögen allmählich. Nach einem gezielten Training konnten die drei Katzen schließlich sogar Musterdiskriminations-Aufgaben lösen. Den Autoren gelang bei diesen Tieren später unter anderem der Nachweis einer Erhöhung der Anzahl binokulär erregbarer Zellen. Die monokulare Deprivation hatte bei den zwei nicht-behandelten Tieren das Soma der korrespondierenden Zellen für okuläre Dominanz im Corpus geniculatum um durchschnittlich 35% verringert, dieser Wert wurde jedoch bei den drei behandelten Tieren durch die nachfolgende Übung wieder soweit verbessert, dass die Zellgröße nur noch 12–13% unter der normalen Größe lag.

Auch ein frühes Experiment von *Mohler* und *Wurtz* (1977) zeigt die Trainierbarkeit visueller Funktionen [27]. Die Autoren übten mit Affen das Ausführen sakkadischer Blickbewegungen zu einem Lichtreiz, wenn der Fixationspunkt erlosch. Sie entfernten dann bei zwei Tieren einseitig den striären Kortex. Die Affen waren zunächst nicht in der Lage, die Lichtreize zu entdecken; erst bei einer starken Erhöhung der Leuchtdichte von 11 auf 1.700 cd/m² reagierten sie. Aber schon nach einem Monat Training machten die Tiere auch wieder Augenbewegungen zu Stimuli mit geringerer Leuchtdichte hin. Trotz Spontanerholung glaubten die Autoren an einen echten Trainingseffekt, denn

es verbesserte sich die Reizerkennung in häufig trainierten Gesichtsfeldteilen sehr viel mehr als in wenig-stimulierten Bereichen.

Sind Verbesserungen eingeschränkter Sehfunktionen auch beim Menschen möglich?

Nun könnte man argumentieren, dass das visuelle System der meisten Tiere, selbst das von Menschenaffen, beträchtliche Unterschiede zu dem des Menschen aufweist. Beispielsweise hat die obere Vierhügelplatte bei Tieren oft eine wesentlichere Bedeutung für das Sehen als dies beim Menschen der Fall zu sein scheint. Nach völliger Entfernung eines Okzipitalpols könnten die Colliculi superiores bei Tieren für die Reizentdeckung verantwortlich sein. Beim Menschen ist dies umstritten.

Aber auch beim Menschen sind inzwischen vielfältige Anpassungsprozesse nachgewiesen worden. Der Münchener Professor *Ernst Pöppel* und seine Mitarbeiter wiesen schon in den siebziger Jahren in mehreren Aufsätzen auf plastische Prozesse des menschlichen visuellen Systems hin [28, 29, 30], etwa rhythmische Veränderungen der Gesichtsfeldgröße bei Hemianopikern in Abhängigkeit von der Tageszeit. *Zihl* (1980) stellte im Verlauf von wiederholten Messungen der Inkrementalschwellen an der Grenze zum blinden Bereich als erster fest, dass sich der intakte Bereich mit jeder Messwiederholung allmählich immer mehr ausweitete [48]. Dieser Effekt wurde in einer weiteren Arbeit [47] an 55 Patienten gezielt geprüft. Hier konnte bei 80% der Patienten ein signifikanter Gesichtsfeldzuwachs erreicht werden. Die Amerikaner *Balliet*, *Blood* und *Bachy-Rita* [1] waren allerdings nicht fähig, diese Ergebnisse zu replizieren, was wahrscheinlich damit zu erklären ist, dass diese Arbeitsgruppe ihre Patienten im Vergleich zu *Zihl* nur mit einem sehr viel kleineren Reiz ($6'$) stimulierte und auch nur über einen sehr kurzen Zeitraum (durchschnittl. 29 Sitzungen). Ergebnisse einer Lübecker Arbeitsgruppe [35] dagegen wiesen anhand von Einzelfallstudien gleichfalls auf die prinzipielle Möglichkeit einer funktionellen Gesichtsfeldrestitution hin, insbesondere wenn sehr lange Trainingszyklen von bis zu mehreren hundert Stunden durchgeführt wurden. Allerdings fehlten bislang placebo-kontrollierte Blindstudien.

Mehrere umfangreiche klinische Prüfungen stammen aus unserer Arbeitsgruppe. Wir behandelten Anfang der 90er Jahre in einer Pilotstudie zunächst 14 Patienten mit einer ersten Version eines speziellen computergestützten Trainingsverfahrens [17]. Da in den bisherigen Untersuchungen überwiegend die als ungenau geltende dynamische Perimetrie benutzt worden war, wurden spezielle hochauflösende statische Messverfahren entwickelt [18, 21]. Neun der insgesamt elf trainierenden Patienten zeigten eine Verbesserung erkannter Reize in der hochauflösenden Kampimetrie am Computermonitor, jedoch keiner der drei Kontrollpatienten, die nicht am Training teilgenommen hatten. Durch diese Ergebnisse ermutigt, wurden im Anschluss strengere Kontrollgruppenstudien durchgeführt [19]. Bei

den Probanden der zweiten Trainingsstudie, die unter Doppelblindbedingungen durchgeführt wurde, handelte es sich um Patienten mit postchiasmatischer Schädigung ($n=19$). Das schädigende Ereignis lag in allen Fällen mehr als ein Jahr zurück (durchschnittl. 7,2 Jahre). Die mittlere Veränderung nach Abschluss des Trainings (150 Übungsstunden in ca. sechs Monaten) zeigte bei der Experimentalgruppe einen Zuwachs von rund 7,8%. Demgegenüber wurde bei den Kontrollgruppenprobanden, die lediglich ein Fixations-training durchgeführt hatten, eine tendenziöse Verschlechterung von -3,1% gefunden. Die mittlere Erweiterung des Gesichtsfeldes im trainierten Bereich lag bei 4,9°, bei der Placebogruppe kam es dagegen zu einer Verkleinerung des intakten Bereiches um -0,9°.

In einer weiteren parallelisierten Kontrollgruppenstudie [19, 45] wurde untersucht, ob entsprechende Effekte auch bei prächiasmatisch geschädigten Probanden mit Altläsionen zu erreichen sind, durchschnittlich waren hier 6,8 Jahre seit der Schädigung vergangen. Es wurden Patienten aufgenommen, die unter einer partiellen Schädigung des Nervus opticus infolge vaskulärer, entzündlicher oder traumatischer Prozesse litten ($n=19$). Die Behandlungsphase umfasste gleichfalls sechs Monate, in denen die Teilnehmer täglich eine Stunde zu Hause an einem Personal-Computer behandelt wurden. In der Kontrollgruppe wurde auch hier ein reines Fixationstraining angeboten. Der durchschnittliche Wert nach Abschluss der Behandlung zeigte bei der Experimentalgruppe sogar einen Zuwachs von 21,9%. Demgegenüber zeigten die Kontrollgruppenprobanden hier eine Erhöhung der Anzahl erkannter Reize um 6,0%. Die Anzahl absoluter Defekte im Tübinger Automatik Perimeter bildete sich im Trainingszeitraum bei der Restitutionsgruppe um 24,1 Reize zurück, bei der Placebogruppe dagegen nur um 4,8. Bei der Restitutionsgruppe wurde eine durchschnittliche Vergrößerung des intakten Bereiches um 5,8°, bei der Placebo-Gruppe allerdings auch um 4,3° festgestellt. Alle prächiasmatisch geschädigten Probanden zeigten nach Abschluss des Sehtrainings außerdem auch verbesserte Leistungen im Nahvisus.

Durch die Behandlung zeigte sich noch ein weitgehend unerwarteter Nebeneffekt: Insbesondere Patienten mit

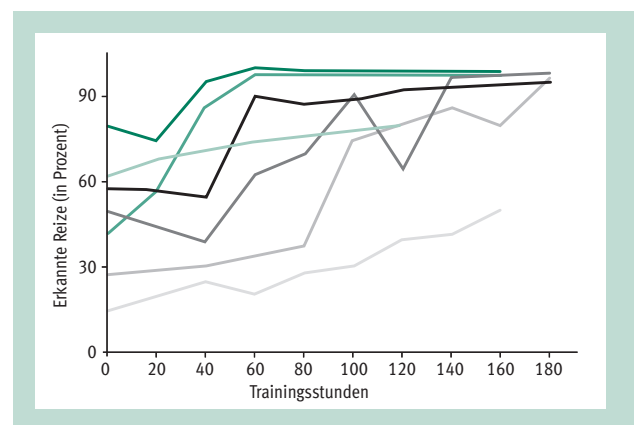


Abb. 3: Teilergebnis der ersten Pilotstudie [17]. Gesichtsfeldzuwachs von 7 Patienten im Verlauf des Gesichtsfeldtrainings.

postgenikulärer Schädigung nehmen den Gesichtsfeldausfall subjektiv kaum wahr, da das blinde Areal nicht als unscharf oder gar schwarz wahrgenommen wird, sondern schlichtweg völlig fehlt. Der Arzt muss bekanntlich oft erst aus sekundären Symptomen schließen, dass möglicherweise eine homonyme Hemi- oder Quadrantenanopie vorliegt. Nach jedem Trainingsdurchgang zeigt das von uns entwickelte Übungsprogramm das aktuelle Gesichtsfeld bzw. einen Punktwert an, um dem Patienten Verbesserungen zu verdeutlichen und die Motivation zu erhöhen. Ein positiver Nebeneffekt war, dass vielen Patienten hierdurch überhaupt erst richtig bewusst wurde, wo genau ihr blinder Bereich lag; schon alleine dadurch lernten sie, besser mit der Störung umzugehen.

Fraglich war, ob die relativ geringe Gesichtsfeldvergrößerung von rund 5° im subjektiven Erleben der Patienten überhaupt eine Verbesserung bewirkt. Mit einem Fragebogen haben wir die Patienten unserer Studien hierzu befragt. Hinsichtlich der Alltagsrelevanz wurden subjektive Verbesserungen des Sehvermögens von 72,2% der Patienten aus den Trainingsgruppen, jedoch nur von 16,6% der Placebopatienten berichtet. Viele Patienten erzählten darüber hinaus, nun weniger Probleme im Alltag zu haben und Objekte im blinden Gesichtsfeld früher wahrnehmen zu können als vor der Therapie. Manche Patienten sagten, sie seien durch das Training in ihrer Mobilität sicherer geworden.

Eine Auswertung der Daten von 82 Patienten [23], die von der »NovaVision Klinik für Sehtherapie« behandelt wurden, zeigte folgende Aufschlüsselung:

16% erlebten keine subjektive Verbesserung.

84% berichteten von Verbesserungen in einem oder mehreren Lebensbereichen.

43% erwähnten einen generellen Anstieg visueller Leistungen.

73% berichteten, dass sie mehr Vertrauen in ihr Sehvermögen erhalten haben bzw. sich wieder besser zu Hause oder außerhalb des Hauses bewegen können.

43% berichteten von besseren Leistungen beim Lesen.

28% der Patienten stießen infolge der Therapie seltener mit Personen oder Objekten zusammen.

23% gaben an, weniger Probleme bei spezifischen Tätigkeiten zu haben (z. B. Hobby, Sport, Handarbeiten).

Eine uns in den letzten Jahren häufig gestellte Frage lautet, ob die Verbesserungen überhaupt stabil bleiben oder nach Beendigung der Behandlung wieder verschwinden. Dieser Frage konnten wir erst jetzt nachgehen, nachdem auch der letzte Studienpatient einen angemessenen Zeitraum seit Therapieende verbracht hat. In einer katamnestischen Nachuntersuchung an 31 der ursprünglich 38 Patienten nach einem mindestens 6 Monate andauernden trainingsfreien Intervall ließen sich stabile Werte feststellen. Hier fand sich in der Trainingsgruppe nur ein minimaler Verlust (-0,8%) des zuvor gewonnenen Gesichtsfeldes. Die Placebogruppe zeigte praktisch gar keinen Unterschied (0,3% Zuwachs).

Das menschliche Sehen besteht nicht nur aus der Wahrnehmung von hell und dunkel. Um Objekte richtig iden-

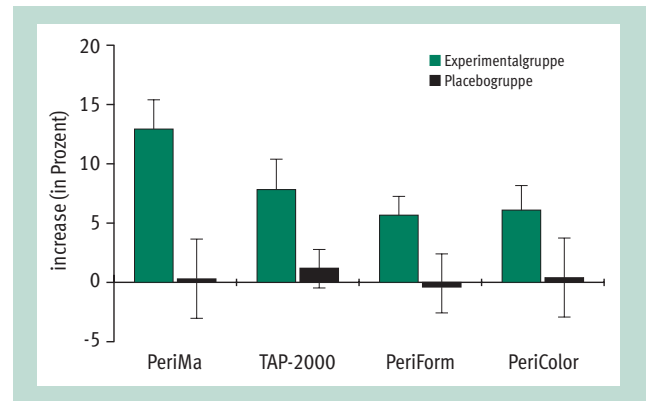


Abb. 4: Generalisierung der Gesichtsfeldvergrößerung auf die perimetrische Form- und Farberkennung und Vergleich mit den Daten des Tübinger Automatikerimeters (TAP-2000).

tifizieren zu können, muss man auch Formen und Farben unterscheiden können. Ob und in welchem Ausmaß ein reines Lichtdetektionstraining auch auf andere visuelle Funktionen generalisiert, wurde zunächst einmal an einigen Patienten mit postgenikulären Schäden geprüft. Die Ergebnisse zeigen, dass Patienten, die eine Gesichtsfelderweiterung erreichen konnten, in diesem Bereich auch Formen und Farben besser unterscheiden konnten. Dies galt jedoch nicht für die Patienten der Placebogruppe und auch nicht für eine kleine Gruppe von Patienten, die trotz Behandlung keine Verbesserung gezeigt hatten.

Mehrere aktuelle Studien anderer Arbeitsgruppen bestätigen, dass eine Gesichtsfeldvergrößerung möglich ist. *Kerkhoff et al.* [24, 25] stellten nach einem Sehtraining nicht nur eine Vergrößerung des Blickfeldes um durchschnittlich 30° fest, sondern auch eine Gesichtsfelderweiterung von rund 6,7°. *Potthoff* [31] fand in zwei Einzelfallstudien, bei denen die blinden Gesichtsfeldanteile durch unterschiedliche Reize stimuliert wurden, spezifische Effekte. Training mit weißen Lichtpunkten erhöhte nach diesen Daten nur die Wahrnehmungsfähigkeit für weißes Licht; Übungen mit farbigem Licht vergrößerten das Farbgesichtsfeld; Stimulation mit Linien verschiedener Neigung führte zu einer Verbesserung der Sehschärfe. *Tegenthoff, Widdig, Rommel und Malin* [37] führten mit einem zwanzigjährigen Patienten nach Schädel-Hirn-Trauma, der nach einem Unfall nur noch sporadisch hell und dunkel unterscheiden konnte, eine sechsmonatige Stimulationstherapie an einem Personal-Computer durch. Der Patient lernte, zunächst Grundfarben und dann auch einfache Formen zu unterscheiden. Später war er sogar in der Lage, wieder einfache Wörter zu differenzieren, und konnte letztlich sogar ganze Sätze lesen. *Julkunen, Tenovuo, Jääskeläinen und Hämäläinen* [14] replizierten unsere Untersuchungen in einer unabhängigen Studie an bislang 5 Patienten mit einem eigenen Trainingsprogramm und kamen zu vergleichbaren Ergebnissen. In der Arbeit dieser finnischen Gruppe ist besonders hervorzuheben, dass die Gesichtsfelderweiterung auch mit Hilfe von visuell evozierten Potenzialen nachgewiesen werden konnte.