

**Aus der Universitäts-Augenklinik Tübingen  
Abteilung Augenheilkunde II  
Ärztlicher Direktor: Professor Dr. E. Zrenner**

**Versuche zum perzeptuellen Lernen mit manipulierten  
Rückmeldesignalen und mit dichoptischer  
Nonienpräsentation**

**Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Medizin**

**der Medizinischen Fakultät  
der Eberhard-Karls-Universität  
zu Tübingen**

**vorgelegt von  
Knut Richard Fritz Ewald  
aus  
Horb a. Neckar**

**2004**

Dekan: Professor Dr. C. D. Claussen

1. Berichterstatter: Professor Dr. M. Fahle

2. Berichterstatter: Privatdozent Dr. M. Herzog

Meinen Eltern.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
	1.1 Perzeptuelles Lernen	4
	1.2 Überauflösung	5
	1.3 Nonien	6
	1.4 Perzeptuelles Lernen von Nonien im Überauflösungsbereich	7
	1.5 Lernmodelle	8
	Entscheidungstheorie	9
	1.6 Aufgabenstellung	12
<b>2</b>	<b>Material &amp; Methoden</b>	<b>14</b>
	2.1 Versuchsaufbau und Auswertung	14
	2.2 Versuchspersonen	15
	2.3 Versuchsablauf	16
	2.3.1 Versuche zum Verschiebungseffekt	17
	2.3.2 Dichoptische Nonienpräsentation	18
<b>3</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>22</b>
	3.1 Versuche zum Verschiebungseffekt	22
	3.1.1 Experiment A1: Große Separation	22
	3.1.2 Experiment A2: Nicht unterscheidbare Versetzungsweiten	25
	3.1.3 Experiment A3: Verschiedene Orientierungen	27
	3.1.4 Experiment A4: Zwei Positionen	34
	3.1.5 Experiment A5: Kein Feedback	40
	3.2 Versuche mit dichoptischer Nonienpräsentation	45
	3.2.1 Experiment B: Verschiebungseffekt dichoptisch	45
	3.2.2 Experiment C1: 75 % linksversetzte Nonien	47
	3.2.3 Experiment C2: Unangeglichen Lernen	50
	3.2.4 Experiment C3: Rückmeldung für ein Auge	50
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>55</b>
	4.1 Zusammenfassung der Resultate	55
	4.1.1 Versuche zum Verschiebungseffekt	55
	4.1.2 Versuche mit dichoptischer Nonienpräsentation	62
	4.2 Implikationen bezüglich mathematischer Modelle	65
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>67</b>
<b>6</b>	<b>Literatur</b>	<b>69</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

Sehen ist mehr eine Leistung des Gehirns als der Augen. Damit ein Bild unserer Umwelt entstehen kann, müssen visuelle Informationen erst verarbeitet werden, um zum Beispiel das Erkennen von Personen oder Gegenständen zu ermöglichen. Die Vorgänge bei der Verarbeitung der visuellen Information sind bisher nur bruchstückhaft bekannt. Optische Signale werden nach dem Durchtritt durch die lichtdurchlässigen Anteile des Auges (Hornhaut, Linse und Glaskörper) in der Retina in elektrische Signale (Feuerraten von Neuronen) umgewandelt. Diese elektrischen Signale gelangen über den Nervus Opticus, das Corpus Geniculatum Laterale (CGL) und die Gratiolet-Sehstrahlung zum primären visuellen Cortex, V1 (Area 17 nach Brodmann). Eine Möglichkeit, die Mechanismen der Informationsverarbeitung des visuellen Systems zu erforschen, ist die Untersuchung dieser Strukturen mit histologischen und neurophysiologischen Methoden. Hubel und Wiesel haben durch Potenzialableitungen einzelner Neurone herausgefunden, dass die Neurone der verschiedenen Nervenzellschichten auf immer komplexere optische Reize reagieren, je weiter sie in der Signalweiterleitung von der Netzhaut entfernt liegen (Hubel, 1989). Mehrere Photorezeptorzellen der Retina bilden durch ihre Verbindung mit je einer Ganglienzelle (Neuron einer der nachfolgenden Nervenzellschichten) so genannte receptive Felder. Bei einem On-Zentrum-Neuron der Ganglienzellschicht wirken die Photorezeptoren der Retina im Zentrum des rezeptiven Feldes aktivierend auf diese Ganglienzelle, während die Zellen am Rande des rezeptiven Feldes hemmend auf sie wirken. Diese Ganglienzelle wird am stärksten erregt durch einen Lichtreiz, der nur auf die Retinazellen im Zentrum des rezeptiven Feldes fällt, zum Beispiel durch einen Lichtpunkt mit entsprechendem Durchmesser. Zellen im primären visuellen Kortex, V1, ändern dagegen ihre Feuerrate nur auf komplexere Reize, wie zum

Beispiel Konturen einer Orientierung oder Bewegungsrichtung (Hubel, 1989). Übergeordnete Bildmerkmale werden dagegen erst in V1 nachfolgenden Arealen des Gehirns verrechnet (Felleman & von Essen, 1994).

Eine weitere Möglichkeit, die Verarbeitungsprozesse des visuellen Systems zu erforschen, ist die Durchführung psychophysikalischer Experimente. Unter dem auf Weber und Fechner zurückgehenden Begriff der Psychophysik versteht man die Lehre von funktionellen Beziehungen zwischen Körper und Seele. Dabei werden objektivierbare physikalische Reize subjektiven Empfindungen zugeordnet, um diese Empfindungen zu quantifizieren. Auf diese Weise sollen Reiz- und Empfindungsintensität metrisch aufeinander abgebildet werden, wodurch Rückschlüsse auf die im Nervensystem ablaufenden Operationen gezogen werden können. Mit Hilfe von Modellen, zum Beispiel Computermodellen, wird versucht, Leistungen des menschlichen Gehirns zu simulieren, um so die Funktionsweise des Gehirns zu verstehen. Gegenstand dieser Arbeit ist die Darstellung psychophysikalischer Versuche zum perzeptuellen Lernen im Überauflösungsbereich des Auges.

## 1.1 Perzeptuelles Lernen

Der Erwerb von neuen Fähigkeiten der Wahrnehmung oder die Verbesserung von Wahrnehmungsleistungen wird als perzeptuelles Lernen bezeichnet. Allerdings gibt es bis heute noch keine allumfassende und anerkannte Definition dafür. Als ein Kriterium für perzeptuelles Lernen wird von Sowden (1996) die Spezifität des Lernens bezüglich bestimmter Merkmale der Reize vorgeschlagen. Dabei ist mit Merkmalen, im Falle von visuellen Reizen, zum Beispiel die Orientierung der Sehzeichen (Poggio, Fahle & Edelman, 1992; Fahle & Edelman, 1993) oder das Netzhautareal gemeint, auf das die Reize projiziert werden (Karni & Sagi, 1991; Poggio, Fahle & Edelman, 1992).

Perzeptuelles Lernen findet nicht ausschließlich wie früher angenommen (Marr, 1982; Shapley, Caelli, Grossberg, Morgan & Rentschler, 1990) in frühen ontogenetischen Stadien der Entwicklung, so genannten kritischen Phasen,

statt. Für einfache Reize, die mit der Verarbeitung von Basismerkmalen zusammenhängen, können auch Erwachsene ihre Wahrnehmungsleistungen durch Training verbessern. Beispiele für perzeptuelles Lernen mit solchen einfachen Reizen sind die Diskrimination von Nonien (Poggio, Fahle & Edelman, 1992; Fahle & Edelman, 1993; Herzog & Fahle, 1997), die Texturdiskrimination (Karni & Sagi, 1991) und die Diskrimination von orientierten Balken (Shiu & Pashler, 1992).

## 1.2 Überauflösung

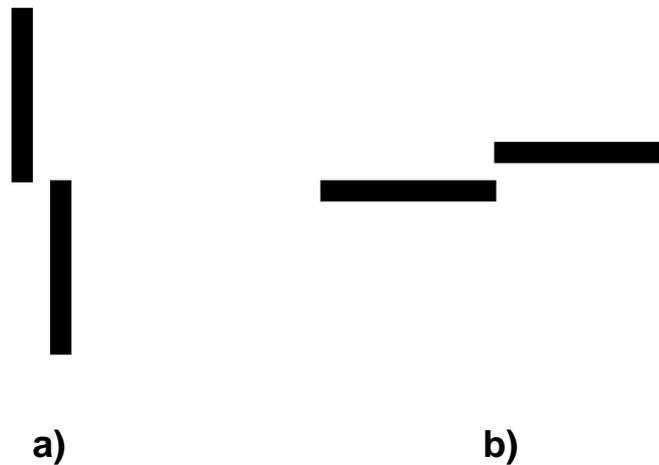
Die weitverbreiteste Methode zur Untersuchung der Sehleistung ist die Bestimmung der Sehschärfe. Dabei wird die 2-Punkt-Diskriminationsfähigkeit des Auges durch die Messung des kleinstmöglichen Abstands zweier Punkte, die noch getrennt wahrnehmbar sind, geprüft. Die Sehschärfe ist zum einen durch die optischen Eigenschaften des Auges (optischer Apparat: Hornhaut, Linse und Glaskörper), zum anderen durch den mittleren Durchmesser der Photorezeptorenzellen in der Retina begrenzt (Fahle, 1991). Bei jungen Probanden können unter optimalen Bedingungen Schwellenwerte der Sehschärfe bis circa 30“ erreicht werden (Hubel, 1989). Für andere Wahrnehmungsleistungen des optischen Systems wie zum Beispiel die Noniensehschärfe, die Krümmungsdetektion oder die räumlich-zeitliche Interpolation werden von den Probanden Schwellen erreicht, die weit unter den Schwellen der Sehschärfe liegen (Fahle, 1991). Da hierbei Abstände erkannt werden, die kleiner sind als der mittlere Durchmesser der Photorezeptorzellen in der Retina, spricht man von Überauflösungsleistungen.

Interessanterweise werden Überauflösungsleistungen der optischen Wahrnehmung gerade durch die relativ schlechten optischen Eigenschaften des Auges ermöglicht. Durch den optischen Apparat wird ein Punkt der Umwelt nicht als Punkt, sondern als Zerstreungskreis auf die Retina abgebildet. Dadurch werden mehrere Rezeptoren gleichzeitig erregt. Dies entspricht einer Ortsfrequenzfilterung. Nach Shannons Abtasttheorem der Informationstheorie

(Shannon,1948) kann ein Signal, das zuerst gefiltert und dann abgetastet wird, mit beliebiger Genauigkeit rekonstruiert werden, wenn die Abtastfrequenz mindestens doppelt so hoch ist wie die höchste im Signal vorkommende Ortsfrequenz. Diese Voraussetzungen sind im menschlichen Auge erfüllt (Barlow 1979, Snyder 1982).

### 1.3 Nonien

In dieser Arbeit wurden ausschließlich Versuche zum perzeptuellen Lernen mit Liniennonien (im Weiteren nur noch Nonien oder auch Nonius genannt) durchgeführt. Ein Nonius besteht aus zwei Balken derselben Orientierung, die eine kleine seitliche Versetzung zueinander aufweisen (siehe Abbildung 1). Die vertikalen und horizontalen Versetzungen der in den Experimenten präsentierten Sehzeichen waren immer kleiner als 30“ und damit im Überauflösungsbereich des Auges. Bei Nonien mit vertikaler Orientierung wird die Versetzungsrichtung durch den unteren der beiden Balken definiert. Ist der untere Balken links des oberen Balkens, spricht man von einem linksversetzten Nonius. Ist der untere Balken rechts des oberen Balkens spricht man entsprechend von einem rechtsversetzten Nonius. Bei horizontal orientierten Nonien ist bei nach oben versetzten Nonien das höher liegende Segment auf der rechten, bei nach unten versetzten Nonien ist das höher liegende Segment auf der linken Seite.



**Abbildung 1:** Liniennonien, a) ein nach rechts versetzter vertikaler Nonius; b) ein nach oben versetzter horizontaler Nonius.

#### 1.4 Perzeptuelles Lernen von Nonien im Überauflösungsbereich

Durch wiederholte Präsentation von Nonien können erwachsene Versuchspersonen ihre Diskriminationsfähigkeit für diese einfachen Reize zum Teil enorm steigern. Dieser Lernprozess ist bezüglich mehrerer Eigenschaften der Reize spezifisch und erfüllt damit das Kriterium nach Sowden für perzeptuelles Lernen. Probanden zeigen zum Beispiel nur einen geringen Leistungstransfer von einem Auge auf das andere Auge bei monokularen Lernbedingungen (Fahle & Edelman, 1993). Auch bei Aufgaben mit zueinander orthogonal orientierten Nonien zeigt sich kein Lerntransfer (Fahle, Edelman & Poggio, 1995). Lernen der Versetzungsdiskrimination von Nonien ist also orientierungsspezifisch und, zumindest zum Teil, augenspezifisch. Da Neurone, die diese

Eigenschaften aufweisen, vor allem in V1 (Hubel & Wiesel, 1959) vorkommen, wird angenommen, dass perzeptuelles Lernen von Nonien auch mit Veränderungen auf dieser Ebene der Verarbeitung des visuellen Systems einhergeht.

Das Erkennen der Versetzungsrichtung von Nonien und eine Verbesserung der Erkennungsleistung durch Training kann durch eine Anpassung von rezeptiven Feldern erklärt werden. Wie in Herzog & Fahle (1998) ausgeführt, würde bei einem vertikal orientierten rezeptiven Feld die Präsentation von rechts- und linksversetzten Nonien zu einer gleich großen Aktivierung des zugehörigen Neurons führen. Dagegen würde ein von rechts unten nach links oben schräg orientiertes rezeptives Feld durch die Präsentation eines nach rechts versetzten vertikalen Nonius stärker erregt werden, als durch die Präsentation eines linksversetzten Nonius. Dadurch wäre eine Unterscheidung von rechts- und linksversetzten Nonien möglich. Mit einer Anpassung der Größe des Aktivierenden Zentrums könnten auch kleinere Versetzungen wahrgenommen, und damit die Erkennungsleistung verbessert werden.

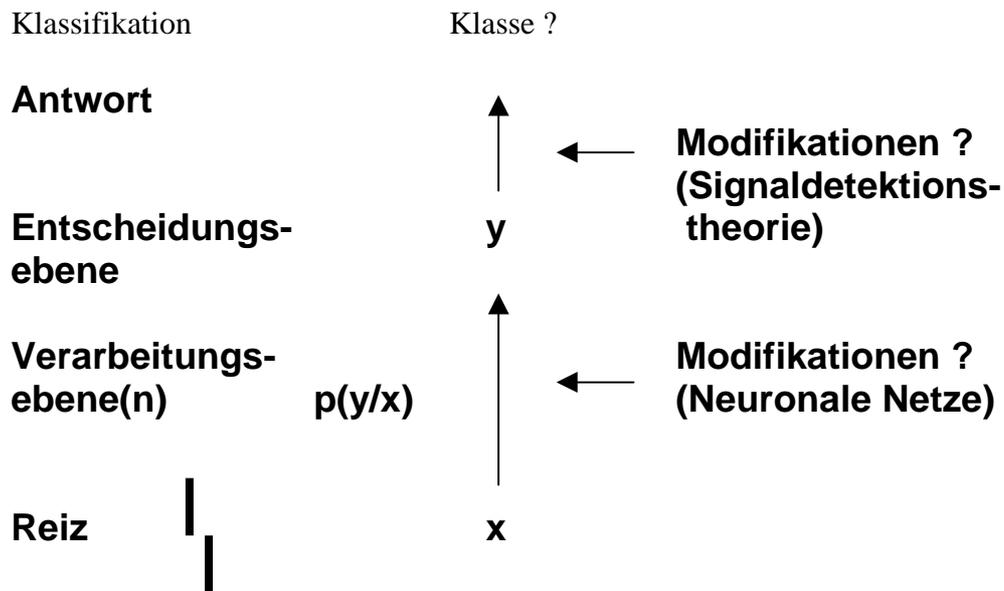
## 1.5 Lernmodelle

Im einfachsten Modell von Wahrnehmungsprozessen sind zwei Ebenen, die Verarbeitungsebene und die Entscheidungsebene, direkt hintereinander geschaltet (siehe Abbildung 2). Die Verarbeitungsebene entspricht einem Kanal, der die Signale von einer Quelle (Photorezeptoren) an einen Empfänger (Entscheidungsebene) weiterleitet. Durch Rauschen wird die Information der Quelle verfälscht und kann nur noch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit dem ursprünglichen Signal zugeordnet werden. Auf der Entscheidungsebene müssen Kriterien gefunden werden, die eine möglichst fehlerfreie Klassifikation der Reize auf der Basis der in der Verarbeitungsebene gewonnenen Informationen ermöglichen. Eine Verbesserung von Wahrnehmungsleistungen kann in diesem System mit Veränderungen auf beiden Ebenen erklärt werden. Durch eine Verbesserung der Kanaleigenschaften kann das Rauschen

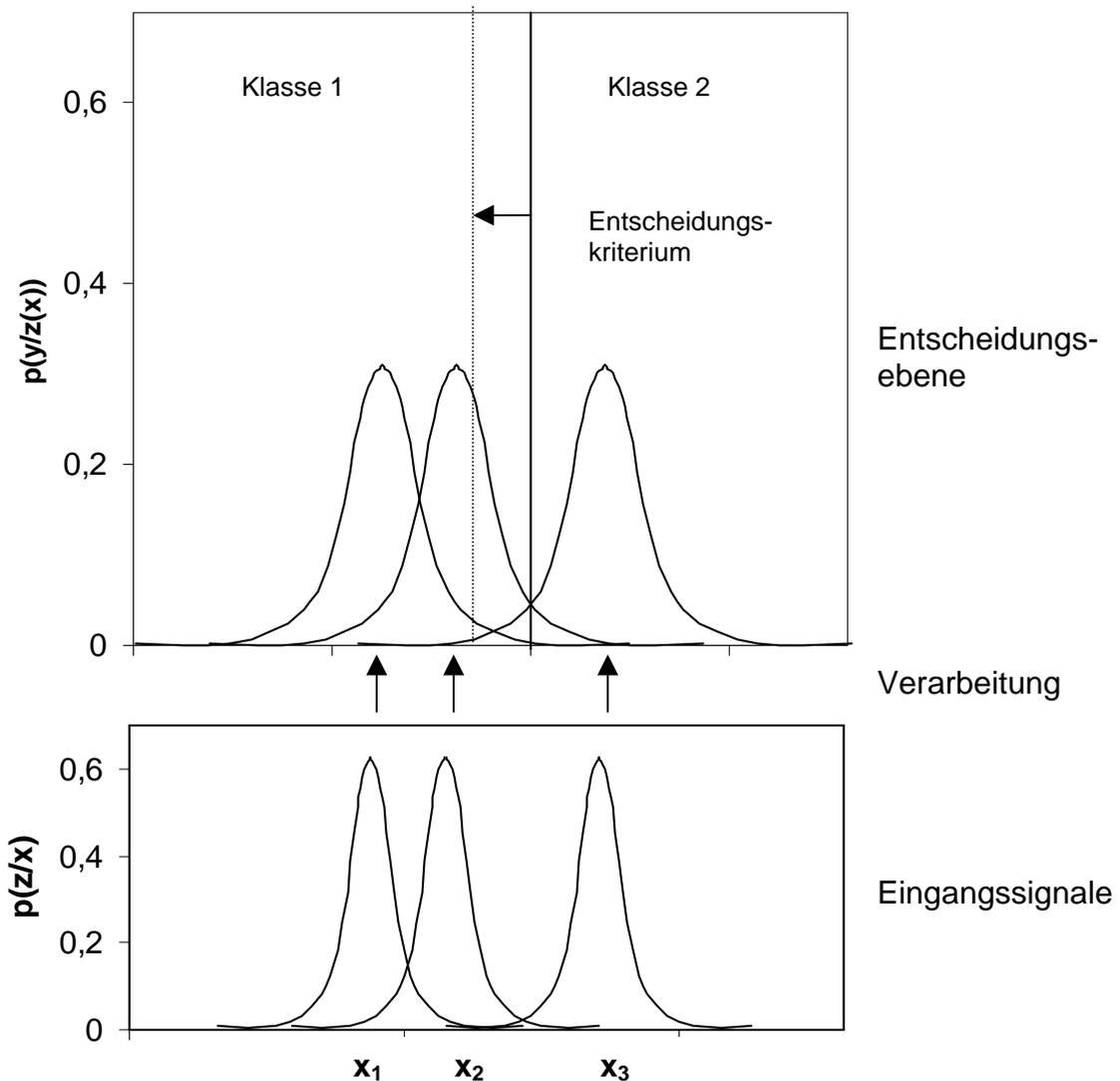
vermindert und damit die Zuordnung der Signale verbessert werden. In der Entscheidungsebene kann die Fehlerrate durch eine Anpassung von Entscheidungskriterien gesenkt werden. Zur Erklärung der Veränderungen auf der Verarbeitungsebene werden oft Modelle mit neuronalen Netzen benutzt. Da die Ergebnisse der Experimente dieser Arbeit vor allem mit Vorhersagen der Entscheidungstheorie übereinstimmen, wird auf eine Darstellung der Modelle der neuronalen Netze verzichtet.

## **Entscheidungstheorie**

Die Entscheidungstheorie oder Signaldetektionstheorie für die Psychophysik wurde 1966 von Green und Swets formuliert. Grundlage ist eine Quelle, von der Signale  $x$  einer Reizmenge  $X$  ausgesendet werden. Diese Signale gelangen über einen Kanal an den Empfänger. Durch Störungen im Kanal (Rauschen) kann der Empfänger die empfangenen Werte  $y$  nur noch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit  $p(y/x)$  dem ursprünglichen Signal zuordnen (Abbildung 3). Um die Fehlerrate bei den Entscheidungen möglichst gering zu halten, muss der Empfänger ein Entscheidungskriterium finden, das, zum Beispiel bei einer modifizierten Aufgabe mit zwei Alternativen (m2AFC), die beiden Antwortklassen trennt. Bei der Noniendiskrimination kann die Menge der Testbilder als Quelle betrachtet werden. Der Kanal besteht aus der Kombination von Sinnesorgan und Verarbeitungsprozessen des visuellen Systems. Der Empfänger soll dem Ort entsprechen, an dem die Entscheidungen getroffen werden (Entscheidungsebene). Als Wahrscheinlichkeitsfunktion wird oft die Gaussfunktion (Abbildung 3) verwendet.  $x_1$  und  $x_2$  stehen für zwei verschiedene Nonien. Da sich die Gaussfunktionen beider Nonien überlappen, kann nicht zwingend von den Werten  $y_1$  beziehungsweise  $y_2$  auf das ursprüngliche Signal zurückgeschlossen werden. Ziel der Entscheidungstheorie ist es, ein Entscheidungskriterium (EK) zu finden, so dass die Zahl der Fehlentscheidungen möglichst klein ist.



**Abbildung 2:** Entscheidungstheoretisches Modell von Wahrnehmungsprozessen. Verarbeitungsebene und Entscheidungsebene sind hintereinander geschaltet. Das Testbild  $x$  wird in der Verarbeitungsebene analysiert und führt mit einer Wahrscheinlichkeit  $p(y/x)$  zu einem Wert  $y$  auf der Entscheidungsebene. Dieser Wert  $y$  wird mit Hilfe von Entscheidungskriterien klassifiziert. Der Verarbeitungsprozess kann mit Hilfe von Modellen der neuronalen Netze beschrieben werden, der Entscheidungsprozess mit Hilfe der Signaldetektionstheorie. Eine verbesserte Wahrnehmung kann durch Veränderungen der neuronalen Netze oder durch Anpassung von Entscheidungskriterien erklärt werden (Abbildung nach Herzog & Fahle, 1999).



**Abbildung 3:** Präsentation von zwei linksversetzten Nonien unterschiedlicher Versetzungen und eines rechtsversetzten Nonius. Aufgrund von Rauschen führt die wiederholte Darbietung eines Nonius  $x$  mit einer Versetzung  $x_i$  in der Eingangsebene zu einer Wahrscheinlichkeitsfunktion  $p(z/x_i)$  der Eingangssignale. Diese Eingangssignale  $z$  führen wiederum zu Signalen auf der Entscheidungsebene mit einer Wahrscheinlichkeitsverteilung  $p(y/z(x_i))$ . Die Wahrscheinlichkeitsfunktionen der Eingangssignale und der Signale auf der Entscheidungsebene sind hier als Gaußfunktionen modelliert. Die Funktionen  $p(y/z(x_i))$  in der Entscheidungsebene überlappen sich viel breiter als die Funktionen in der Eingangsebene, da das System die Stimuli noch nicht unterscheiden kann. Aufgrund des Wertes  $y$  und der Lage des Entscheidungskriteriums wird der Reiz einer der beiden Klassen zugeordnet. Eine Verschiebung des Entscheidungskriteriums nach links hätte eine Leistungsabnahme für beide linksversetzten Nonien und eine Verbesserung für den rechtsversetzten Nonius zur Folge.

Dabei hängt die Wahl des EK von der Kenntnis der Wahrscheinlichkeitsfunktion  $p(z/x)$  von der Reizmenge  $X$ , der Darbietungswahrscheinlichkeit  $p(x_i)$  und von den Kosten  $r(x_j, x_i)$  einer Fehlentscheidung ab. Damit ergibt sich das optimale EK im Schnittpunkt der beiden Wahrscheinlichkeitsfunktionen mit:

$$\min(\text{EK}) \sum_{(x_i, x_j) \in X \times X} r(x_i, x_j) p_k(x_i/x_j) p(x_j) .$$

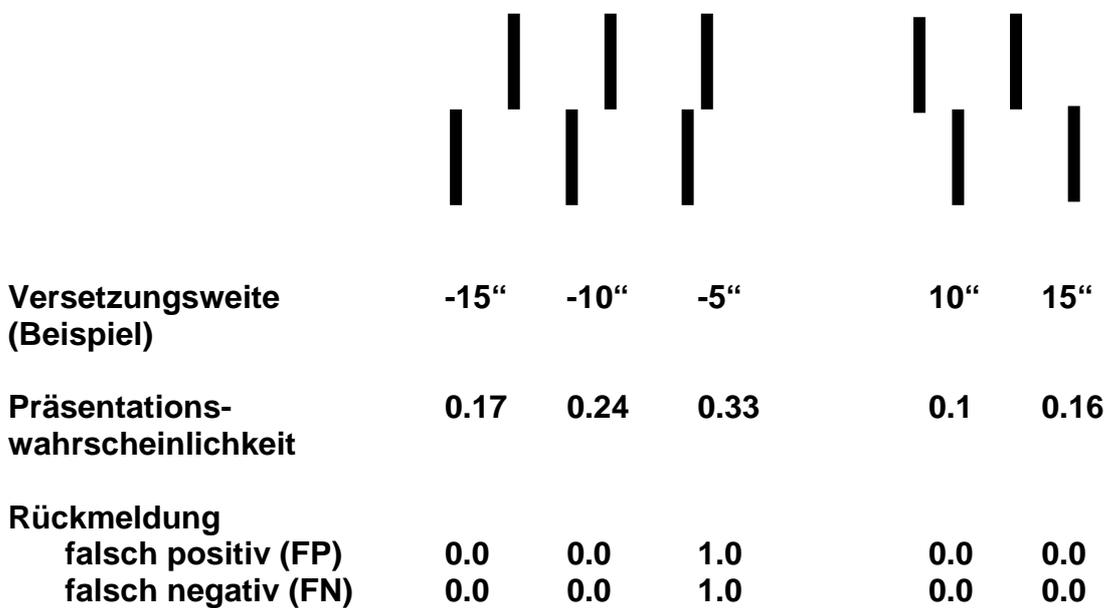
## 1.6 Aufgabenstellung

Herzog & Fahle (1999) führten Versuche zum perzeptuellen Lernen mit manipulierten aber konstanten Rückmeldesignalen durch. Der Grundaufbau der Experimente ist in Abbildung 4 dargestellt. Den Probanden wurden insgesamt fünf verschiedene Nonien gezeigt. Zwei Nonien mit einer größeren Versetzung und zwei Nonien einer mittleren Versetzung wurden auf beide Seiten versetzt präsentiert. Ein Nonius mit einer kleineren Versetzung wurde nur auf eine Seite versetzt dargeboten. Die Rückmeldesignale für den Nonius mit der kleinsten Versetzung waren so manipuliert, als ob dieser Nonius auf die entgegengesetzte Seite versetzt wäre. Beim Training mit einem solchen Versuchsaufbau kam es zu einer Leistungsabnahme für alle Nonien, die auf die selbe Seite versetzt waren wie der kleinste Nonius, dessen Rückmeldesignale manipuliert waren. Da diese Leistungsänderungen am besten mit einer Verschiebung von Entscheidungskriterien auf der Entscheidungsebene zu erklären sind, wird dieser Effekt zur Vereinfachung der Darstellung Verschiebungseffekt genannt. Im ersten Teil dieser Arbeit werden weitere Versuche zum Verschiebungseffekt vorgestellt. Dabei interessieren besonders die Auswirkung der Präsentation von Nonien mit sehr großen beziehungsweise sehr kleinen Unterschieden der Versetzungsweiten und die Spezifität des Effekts bezüglich der Orientierung der Nonien und bezüglich der Position der Sehzeichen im Gesichtsfeld der Probanden.

Im zweiten Teil werden Versuche mit dichoptischer Präsentation von Nonien dargestellt. Durch einen besonderen Versuchsaufbau konnten die gezeigten

Sehzeichen von den Probanden jeweils nur von einem Auge, also monokular, wahrgenommen werden. Experimente, die Broos (2000) durchgeführt hat, wurden wiederholt, zum Teil mit veränderten Versuchsbedingungen.

In der Diskussion sollen die Ergebnisse der Versuche in Bezug auf Vorhersagen bisheriger Modelle zum perzeptuellen Lernen (Signaldetektionstheorie, Neuronale Netze) dargestellt werden.



**Abbildung 4:** Versuchsaufbau von Experiment 2 aus Herzog & Fahle (1999). Präsentation von fünf Nonien. Negative Versetzungsweiten entsprechen einer Versetzung auf die linke Seite. Bei der Rückmeldebedingung FP wird trotz einer richtigen Antwort ein Fehlersignal erzeugt. Bei der Bedingung FN wird trotz einer falschen Antwort kein Fehlersignal generiert. Bei den verschiedenen Versuchen wurden die Versetzungsweiten, die Präsentationswahrscheinlichkeiten und die Rückmeldebedingungen der einzelnen Nonien variiert.

## Kapitel 2

### Material & Methoden

#### 2.1 Versuchsaufbau und Auswertung

In allen Versuchen wurden den Probanden als Testbilder Liniennonien präsentiert. Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand darin, die Versetzungsrichtung der gezeigten Nonien mittels zweier Druckknöpfe anzugeben. Diese Art von Aufgabe wird auch modifizierte Wahlaufgabe mit zwei Alternativen genannt (m2AFC).

Die beiden Segmente der Nonien hatten eine Länge von 10 Winkelminuten und eine Breite von 2 Winkelminuten. Der Abstand zwischen den Segmenten in Richtung der Längsachse betrug 1 Winkelminute. Der Abstand der beiden Segmente orthogonal zur Längsachse wurde als Versetzungsweite in den verschiedenen Experimenten variiert.

Die Präsentation der Testbilder erfolgte auf einem Analogmonitor vom Typ Tektronix 608 oder Hewlett-Packard 1332 A. Die Monitore wurden von einem Macintosh-Computer IIfx oder einem Power-Macintosh über eine 16 Bit D/A Schnittstelle (etwa 1 MHz Pixelrate) angesteuert. Der Abstand der Testpersonen zum Monitor betrug 2 m. Bei einem minimalen Punktabstand von 2,4 bis 3,1  $\mu\text{m}$  der Bildpunkte lag die rechnerische Auflösung des Monitors in 2 m Entfernung bei 0,25" bis 0,32" und ist damit deutlich kleiner als die verwendeten Versetzungsweiten. Die Leuchtdichte der Sehreize betrug bei den Versuchen zum Verschiebungseffekt 130  $\text{cd}/\text{m}^2$ , bei den Versuchen mit dichoptischer Nonienpräsentation 25  $\text{cd}/\text{m}^2$ . Die Einstellung der Leuchtdichte erfolgte mit Hilfe eines Minolta LS-110 Photometer. Die Testbilder wurden jeweils für 150 ms gezeigt. Durch diese kurze Präsentationsdauer sollte verhindert werden, dass zusätzliche Informationen durch gerichtete Augenfolgebewegungen (Westheimer, 1954; Burr, 1979; Morgan, 1980) gewonnen werden können. Das

nächste Testbild wurde immer 500 ms nach der letzten Antwort präsentiert. Durch eine schwache Hintergrundbeleuchtung wurde sichergestellt, dass die Versuchspersonen mit dem photopischen Sehsystem trainierten.

Für die Auswertung der Versuchsergebnisse wurden die Antworten von 80 Nonienpräsentationen zu einem Block zusammengefasst. Die Angabe der Leistung für Nonien der verschiedenen Versetzungen erfolgt mit dem Prozentsatz richtiger Antworten der Probanden innerhalb eines Blockes. Diese Prozedur wird auch als Prozentstrategie bezeichnet.

Zur besseren Anpassung der Versuchsbedingungen an das jeweilige Leistungsniveau der Probanden wurde der Schwellenwert als Versetzungsweite definiert, bei der ein Prozentsatz von 75% korrekter Antworten für Nonien dieser Versetzung erreicht wird. Dieser Schwellenwert wurde vor den Experimenten in einem Block mit 80 Nonienpräsentationen mit der adaptiven Treppenprozedur PEST (Parameter Estimation by Sequential Testing, Taylor & Creelman, 1967) bestimmt. Der Schwellenwert diente lediglich zur Anpassung der Versetzungsweiten der präsentierten Nonien an die individuelle Diskriminationsfähigkeit der jeweiligen Versuchspersonen, daher wird hier nicht näher auf diese Prozedur eingegangen.

Als Standardfehlerrückmeldesignal wurde bei jeder falschen Antwort der Probanden vom Computer ein Ton erzeugt. Handelt es sich bei den Rückmeldesignalen für Nonien um das Standardfehlerrückmeldesignal, werden diese im Folgenden auch korrekte Rückmeldesignale oder korrektes Feedback genannt.

Für die statistische Auswertung der Daten wurde ein Niveau von 95% (Fehler erster Art  $\alpha \leq 0,05$ ) als signifikant festgesetzt.

## 2.2 Versuchspersonen

Die Versuchspersonen waren ausschließlich Studenten und Mitarbeiter der Universität Tübingen und wurden für die Teilnahme an den Experimenten bezahlt. Alle Probanden verfügten über eine normale oder eine auf normale

Werte korrigierte Sehschärfe. Keiner der Versuchspersonen hatte vorher an einem psychophysikalischen Experiment im Überauflösungsbereich teilgenommen.

## 2.3 Versuchsablauf

Nach einer allgemeinen Aufklärung der Probanden über den Versuch und den Versuchsverlauf, bestätigten diese ihre freiwillige Teilnahme mit ihrer Unterschrift. Dann folgte bei allen Versuchspersonen die Prüfung der Augendominanz mit dem Rosenbach'schen Zeigerversuch. Dazu mussten die Probanden einen Punkt in 2-3 m Entfernung mit beiden Augen fixieren, und dann mit einem Finger verdecken. Anschließend wurden beide Augen abwechselnd geschlossen. Beim Schließen des dominanten Auges verdeckte der Finger den ausgewählten Punkt nicht mehr.

Um eine ausreichende Sehfähigkeit der Probanden sicherzustellen, wurde im Anschluss der Freiburger Visustest für die Ferne (FVT; Bach, 1995), für jedes Auge einzeln in einer Entfernung von 3 m beziehungsweise 5 m, durchgeführt. Um an den Experimenten teilzunehmen, mussten die Versuchspersonen eine Sehleistung von mindestens 1,0 auf einem Auge erreichen.

Vor dem Beginn der eigentlichen Versuche wurde bei allen Probanden der individuelle Schwellenwert für vertikal orientierte Nonien mit PEST bestimmt. Bei Versuchen mit dichoptischer Präsentation erfolgte die Bestimmung der Schwellenwerte für jedes Auge einzeln.

Um Ermüdungserscheinungen zu vermeiden wurden längerdauernde Versuche (Versuche A2, A3, B1 und C3) in mehrere Sitzungen unterteilt. Eine Sitzung dauerte nie länger als 1,5 bis 2 Stunden, und pro Versuchstag fand nur eine Sitzung statt. Zwischen zwei Versuchstagen verging nie mehr als eine Woche.

### 2.3.1 Versuche zum Verschiebungseffekt

In den Versuchen zum Verschiebungseffekt (Versuche A1-5 und Versuch B) wurde ein Versuchsaufbau gewählt, der dem Versuchsaufbau bei Herzog & Fahle (1999) sehr ähnlich ist (siehe Abbildung 4). Damals hatten die Versuchspersonen mit insgesamt fünf verschiedenen Nonien trainiert. Zwei Nonien mit einer größeren und zwei Nonien mit einer mittleren Versetzungsweite wurden nach rechts und links versetzt präsentiert. Der Nonius mit der kleinsten Versetzungsweite hatte kein Gegenüber. Bei einer falschen Antwort der Probanden bei Präsentation des Nonius mit der kleinsten Versetzung wurde kein Signaltone erzeugt. Andererseits folgte auf jede richtige Antwort ein Fehlerton. Diese Rückmeldebedingungen werden auch als reverse Rückmeldesignale oder reverses Feedback bezeichnet. Durch reverse Rückmeldesignale wird den Probanden suggeriert, dass der Nonius mit der kleinsten Versetzung auf die entgegengesetzte Seite versetzt ist, als es in Wirklichkeit der Fall ist. Für die übrigen Nonien wurde das Standardfehlersignal generiert.

In dieser Arbeit ist dieser Versuchsaufbau von Herzog & Fahle insofern modifiziert, dass in den Versuchen zum Verschiebungseffekt nur drei verschiedene Nonien präsentiert (Abbildung 5) wurden. Zwei dieser Nonien hatten die gleiche Versetzungsweite aber entgegengesetzte Versetzungsrichtungen. Die Versetzungsweite für den dritten Nonius war in allen Versuchen kleiner als für die beiden Nonien mit der gleichen Versetzungsweite. Alle drei Nonien wurden mit derselben Präsentationswahrscheinlichkeit gezeigt ( $p=0.33$ ). Als Rückmeldesignale für die Nonien mit der größeren Versetzungsweite wurde das Standardfehlersignal generiert. Für den Nonius mit der kleineren Versetzung waren die Rückmeldesignale revers (auf korrekte Antworten der Probanden folgte ein Fehlerton, bei falschen Antworten folgte kein Fehlersignal).

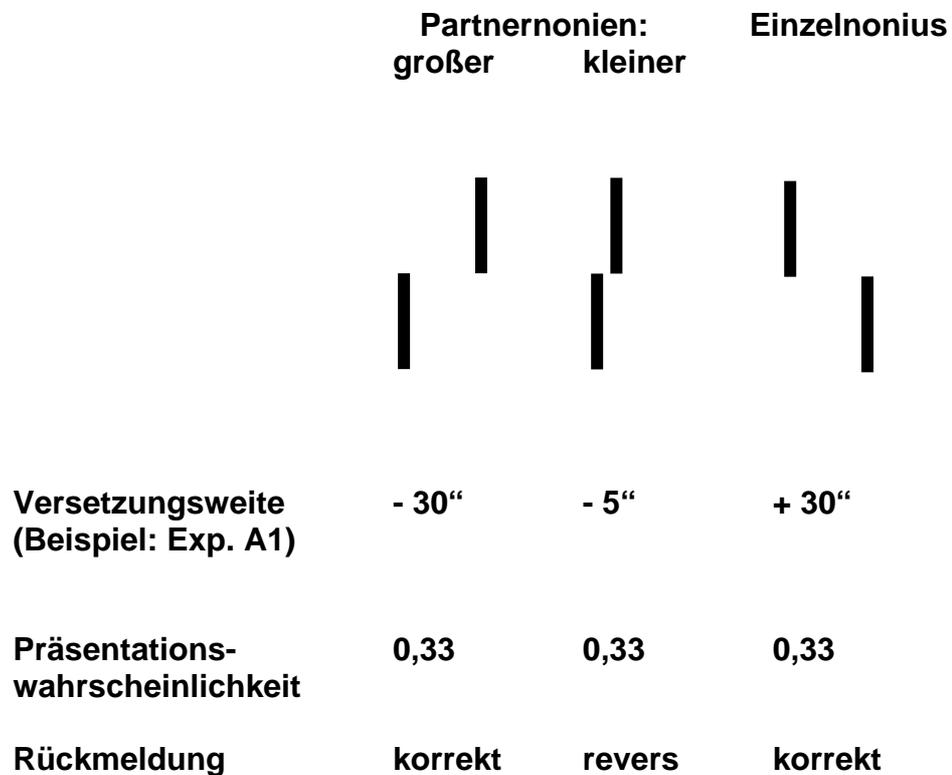
Zur Vereinfachung der Darstellung werden im Folgenden die Nonien mit der selben Versetzungsrichtung Partnernonien genannt (Abbildung 5). Dabei wird der Partnernonius mit der größeren Versetzungsweite als großer Partnernonius,

der Partnernonius mit der kleineren Versetzungsweite als kleiner Partnernonius bezeichnet. Der Nonius mit der gleichen Versetzungsweite aber der entgegengesetzten Versetzungsseite wie der große Partnernonius wird Einzelnonius genannt.

Manche Versuchspersonen weisen in ihrem Antwortverhalten eine Vorliebe für eine der beiden Antwortmöglichkeiten auf. Diese Vorliebe für eine der möglichen Antworten wird auch als Bias bezeichnet. Um mögliche Effekte eines zu Beginn der Experimente schon vorhandenen Bias (auch natürlicher Bias genannt) zu vermeiden, wurde der kleine Partnernonius bei jedem Probanden auf die Seite des vorhandenen Bias versetzt dargeboten. Hatte sich, zum Beispiel, ein Proband bei der Schwellenwertbestimmung vermehrt für die linke Seite entschieden, so wurde der kleine Partnernonius ebenfalls nach links versetzt dargeboten. Durch die Assymetrie dieses Versuchsaufbaus, mit drei präsentierten Nonien bei gleicher Darbietungswahrscheinlichkeit, waren die Rückmeldesignale für diejenige Seite häufiger positiv, die entgegengesetzt zu der anfangs bevorzugten Antwortseite lag. Die Probanden wurden über die Anzahl der präsentierten Nonien und über die manipulierten Rückmeldesignale bei den Versuchen nicht informiert.

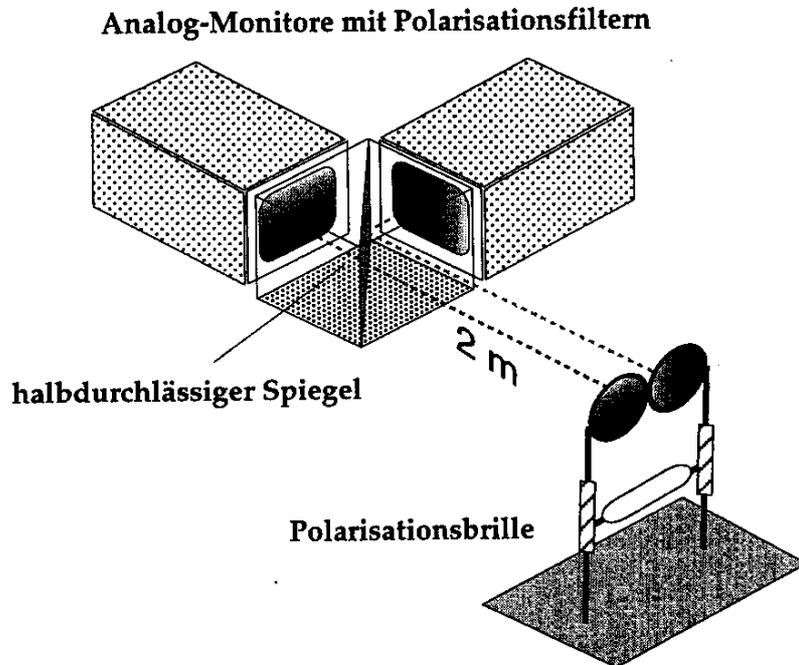
### 2.3.2 Dichoptische Nonienpräsentation

Im zweiten Teil der Arbeit war es mit einem speziellen Versuchsaufbau (Fahle & De Luca, 1994; siehe Abbildung 6) möglich, Nonien selektiv nur einem Auge zu präsentieren. Dazu mussten die Probanden mit jedem Auge durch einen Polarisationsfilter, der in einem Brillengestell montiert war, auf einen halbdurchlässigen Spiegel schauen. Die Polarisationsachsen der beiden Filter waren senkrecht zueinander angeordnet. Der halbdurchlässige Spiegel war im  $45^\circ$  Winkel zur Blickrichtung montiert. Hinter dem Spiegel und im  $90^\circ$ -Winkel davon standen zwei Oszilloskope. Vor den Oszilloskopen war je ein Polarisationsfilter angebracht, deren Polarisationsachsen wiederum senkrecht



**Abbildung 5:** Versuchsaufbau zum Verschiebungseffekt am Beispiel von Experiment A1. Den Probanden wurde pro Darbietung einer der drei Nonien in randomisierter Reihenfolge gezeigt. Großer und kleiner Partnernonius hatten die gleiche Versetzungsseite aber verschiedene Versetzungsweiten, der große Partnernonius und der Einzelnonius hatten die gleiche Versetzungsweite aber verschiedene Versetzungsseiten. Der kleine Partnernonius erhielt reverse Rückmeldesignale, die beiden anderen Nonien korrekte Rückmeldesignale. Dieser Versuchsaufbau wurde in den weiteren Versuchen zum Verschiebungseffekt nur bezüglich der Versetzungsweiten und der Orientierungen der Nonien variiert.

zueinander waren. Aufgrund dieses Aufbaus konnte mit jedem Auge nur das Testbild von einem der Oszilloskope gesehen werden. Die Bildschirme wurden ebenfalls von einem Macintosh-Computer des Typs PowerMac über 16 Bit D/A Wandler einer Schnittstelle angesteuert. Der Abstand von der „Polarisationsbrille“ zum Spiegel betrug 2 m. Die Probanden wurden über die dichoptische Präsentation der Sehzeichen nicht informiert.



**Abbildung 6:** Dichoptische Präsentation der Nonien. Beide Oszilloskope senden, durch davor angebrachte Polfilter, Licht mit orthogonal zueinander stehenden Schwingungsebenen aus. Die Beobachter schauen durch eine Polarisationsbrille auf einen halburchlässigen Spiegel. Da die Schwingungsebenen der Polarisationsfolien vor den beiden Augen des Betrachters ebenfalls senkrecht zueinander stehen, kann das Bild von jedem Oszilloskop nur mit einem Auge wahrgenommen werden. (Abbildung nach Fahle & De Luca, 1994).

## Kapitel 3

### Ergebnisse

#### 3.1 Versuche zum Verschiebungseffekt

##### 3.1.1 Experiment A1: Große Separation

In diesem Experiment wurden den Probanden Nonien gezeigt, die aufgrund sehr großer Unterschiede der Versetzungsweiten von den Versuchspersonen gut differenziert werden konnten. Fünf Beobachter nahmen an diesem Versuch teil.

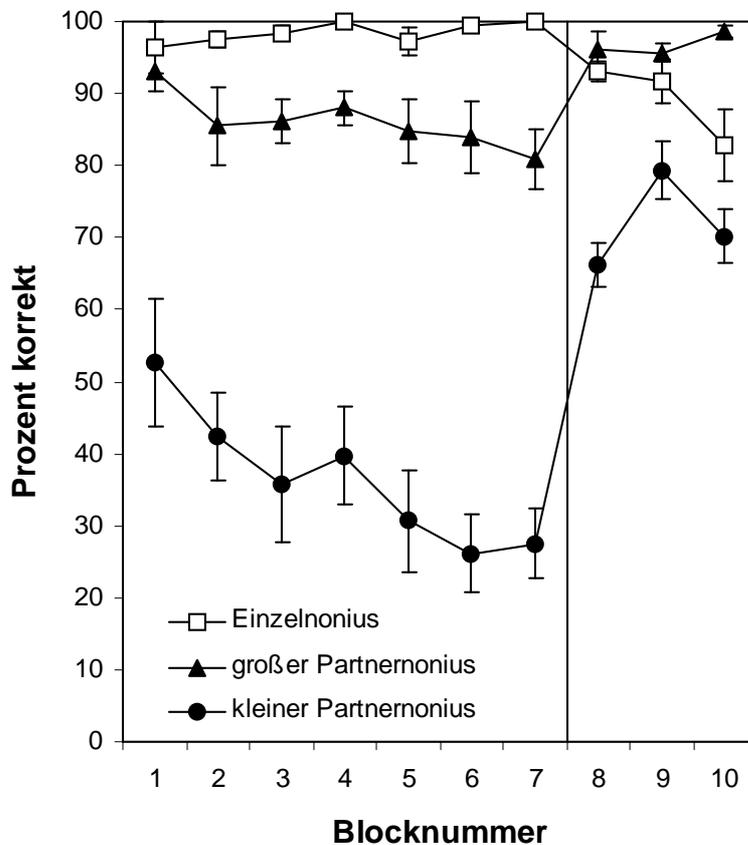
Den Probanden wurden vertikal orientierte Nonien mit drei verschiedenen Versetzungen präsentiert (siehe Versuchsaufbau zum Verschiebungseffekt). Die Versetzungsweiten der Nonien wurden willkürlich auf +30“ und –30“ für die Nonien mit der größeren Versetzung (Einzelnonius und großer Partnernonius) festgelegt. Eine Versuchsperson trainierte aufgrund des niedrigen Schwellenwertes von unter 10“ mit einer größeren Versetzungsweite von 20“. Der kleine Partnernonius wurde mit einer Versetzung von 5“ präsentiert. Die Versetzungsweiten von 30“ beziehungsweise 20“ lagen bei allen Probanden um mindestens 10“ über dem individuellen Schwellenwert. Die Versetzung des kleinen Partnernonius war immer deutlich kleiner als der Schwellenwert. Die Versetzungsseite des kleinen Partnernonius war entgegengesetzt der Richtung des natürlichen Bias der Probanden aus den Vorversuchen (siehe Material & Methoden). Das Feedback für die beiden Nonien mit den größeren Versetzungen war korrekt. Der kleine Partnernonius erhielt reverse Rückmeldesignale. Mit dieser Anordnung trainierten die Versuchspersonen sieben Blöcke lang. Anschließend folgten nochmals drei Blöcke mit korrektem Feedback für alle drei Nonien.

Das Ergebnis dieses Experiments ist in Abbildung 7 dargestellt. Vergleichbar mit den Ergebnissen von Herzog & Fahle (1999) nimmt die Leistung für den kleinen Partnernonius, für den reverse Rückmeldesignale gegeben wurden,

deutlich von 53 % in Block 1 auf 27 % in Block 7 ab. Die Steigung der Regressionsgeraden der Leistung der Probanden für den kleinen Partnernonius in den Blöcken 1-7 beträgt im Mittel  $s = -4,04$  mit einem Standardfehler von 1,03. Ein Einstichproben-t-Test dieser Steigungen mit der Nullhypothese, dass kein Lernen, beziehungsweise keine Verschiebung von Entscheidungskriterien, stattgefunden hat (Steigung  $s = 0$ ), zeigt eine signifikante Leistungsverschlechterung für diesen Nonius:  $p = 0,017$ .

Die Leistungen für die beiden überschweligen Reize sind erwartungsgemäß auf einem sehr hohen Niveau. Dabei nimmt die Leistung für den großen Partnernonius, der dieselbe Versetzungsrichtung hat wie der Nonius, für den die Rückmeldesignale revers sind, in den ersten sieben Blöcken nicht signifikant ab. Die Leistung für den großen Partnernonius liegt in den ersten sieben Blöcken aber immer unter der Leistung für den Einzelnonius, obwohl beide Nonien dieselbe Versetzungsweite hatten und beide korrektes Feedback erhielten. Um dies statistisch zu belegen wurde der Mittelwert der Differenz zwischen den Leistungen beider Nonien mit der größeren Versetzungen in den Blöcken 3-7 gebildet. Die ersten beiden Blöcke wurden von der Analyse ausgeschlossen, um Anfangseffekte nicht einzubeziehen. In einem Einstichproben-t-Test ergibt sich eine signifikant schlechtere Leistung für den großen Partnernonius ( $p = 0,0031$ ). Dies zeigt, dass trotz des deutlichen Unterschieds der Versetzung zwischen kleinem und großem Partnernonius die reversen Rückmeldesignale für den kleinen Partnernonius das Entscheidungsverhalten für den großen Partnernonius beeinflusst haben.

Nach der Korrektur des Feedbacks kommt es zu einer sprunghaften Leistungsverbesserung für beide Partnernonien. Vor allem für den Nonius, der reverse Rückmeldesignale bekommen hatte (kleiner Partnernonius), verbessert sich die Leistung auf Werte, die über der Anfangsleistung liegen. Dies könnte darauf hinweisen, dass es bereits im ersten Block des Versuches zu einer Verschiebung von Entscheidungskriterien gekommen ist. Ein Gepaarter-t-Test zwischen den Leistungen in Block 7 und Block 8 der Probanden zeigt sowohl für den kleinen Partnernonius ( $p = 0,0042$ ) als auch für den großen



**Abbildung 7:** Experiment A1: Verschiebungseffekt bei Präsentation von drei Nonien mit großen Unterschieden der Versetzungsweite für fünf Beobachter. Man sieht die deutliche Abnahme der Leistung für den Nonius mit der kleinsten Versetzung (kleiner Partnernonius) während der Präsentation mit reversen Rückmeldesignalen (Block 1-7). Der Einzelnonius und der große Partnernonius hatten beide dieselbe Versetzungsweite und erhielten korrektes Feedback. Der große Partnernonius wurde auf dieselbe Seite versetzt dargeboten wie der kleine Partnernonius, der Einzelnonius auf die Gegenseite. Die Leistungen für den großen Partnernonius liegen in den ersten sieben Blöcken immer unter den Leistungen für den Einzelnonius. Nach der Korrektur des Feedbacks zwischen Block 7 und Block 8 verbessern sich die Leistungen für beide Partnernonien, für den kleinen Partnernonius sogar auf Werte, die über der Anfangsleistung liegen. Für den Einzelnonius ergibt sich eine leichte Verschlechterung der Leistung.

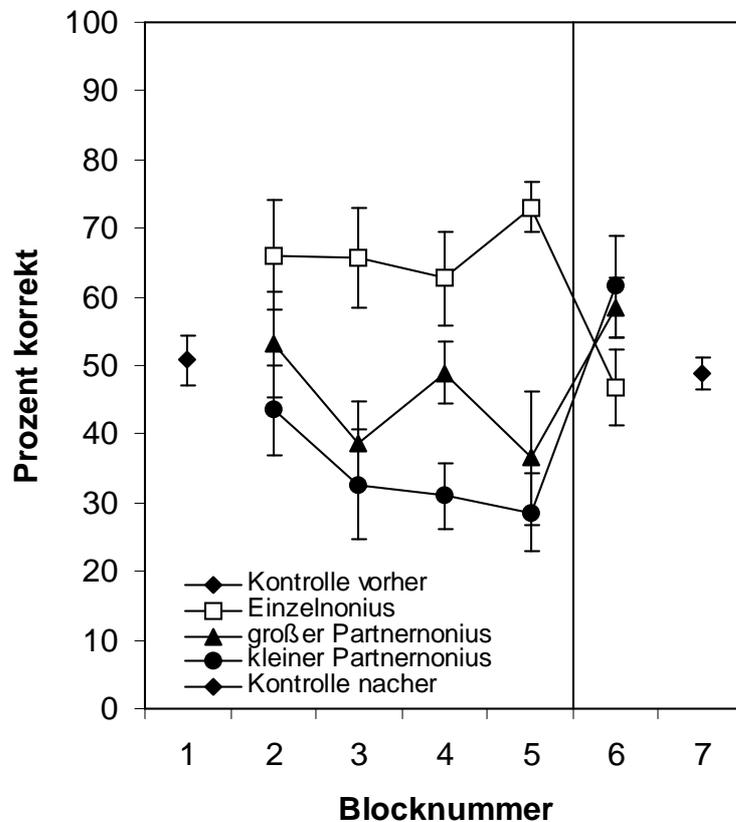
Partnernonius ( $p= 0.035$ ) eine signifikante Verbesserung nach der Korrektur der Rückmeldesignale. Die Leistung der Probanden für den Einzelnonius geht ab Block 8 dagegen leicht zurück.

Zwei der Probanden berichteten im Anschluss an die Experimente, dass die „kleineren Nonien“ immer auf eine Seite versetzt gewesen wären. Die Probanden konnten die Sehzeichen also deutlich unterscheiden und bewusst verschiedenen Klassen zuordnen, was die starke Abnahme der Leistung beider Versuchspersonen für den kleinen Partnernonius erklärt. Dennoch lag auch bei diesen Versuchspersonen die Leistung für den großen Partnernonius stets unter der Leistung für den Einzelnonius.

Auch bei einem Versuchsaufbau mit deutlich unterscheidbaren Versetzungen der gezeigten Nonien führt die Präsentation von Nonien mit reversem Feedback zu einer Verschiebung von Entscheidungskriterien. Diese Veränderungen scheinen bereits ab dem ersten Block wirksam zu sein.

### 3.1.2 Experiment A2: Nicht unterscheidbare Versetzungsweiten

Die Unterschiede der Versetzungsweiten in diesem Versuch waren so gewählt, dass die sechs Probanden die einzelnen Sehzeichen nicht mehr bewusst unterscheiden konnten. Für vertikale Nonien wurden zwei Versetzungen bestimmt, bei denen die Probanden jeweils eine Leistung von circa 50% korrekter Antworten erreichten. Dabei wurden für jeweils einen Block Nonien dieser Versetzungen ohne Feedback präsentiert. Da diese Leistung der Ratewahrscheinlichkeit entspricht, konnten die Nonien von den Probanden nicht unterschieden werden. Anschließend trainierten die Probanden mit dem Versuchsaufbau für den Verschiebungseffekt. Die Versetzungsweite des großen Partnernonius und des Einzelnonius entsprach der größeren der vorher bestimmten Versetzungen. Der kleine Partnernonius, der wiederum reverses Feedback erhielt, war um die kleinere der vorher bestimmten Versetzungsweiten versetzt. Nach vier Blöcken wurde das Feedback für einen weiteren Block korrigiert. Zwei der Probanden trainierten mit insgesamt fünf



**Abbildung 8:** Experiment A2: Verschiebungseffekt mit sehr kleinen Unterschieden der Versetzungsweiten der gezeigten Nonien. In Block 1 und Block 7 wurden jeweils Nonien mit einer Versetzung, die der Versetzung des großen Partnernonius entspricht, ohne Feedback gezeigt. Die Leistung der Probanden entspricht für Nonien dieser Versetzung sowohl vor, als auch nach dem Versuch ungefähr der Ratewahrscheinlichkeit. Die Rückmeldesignale für den kleinen Partnernonius sind von Block 2 bis Block 5 revers. Der Einzelnonius und der große Partnernonius erhalten immer korrektes Feedback. In Block 6 wird das Feedback für den kleinen Partnernonius korrigiert. Obwohl die Versetzungen der Nonien so klein sind, dass sie nicht diskriminiert werden können, ist die Leistung für den kleinen Partnernonius bei der Präsentation mit reversen Rückmeldesignalen immer kleiner, als die Leistung für den großen Partnernonius.

Nonien, jeweils einem Nonienpaar mit einer größeren und einer mittleren Versetzung und einem Nonius mit einer kleineren Versetzung. Die beiden Nonienpaare erhielten korrekte Rückmeldesignale, der Nonius mit der kleinsten Versetzung, der nur auf eine Seite versetzt gezeigt wurde, erhielt reverse Rückmeldesignale. Von diesen Versuchspersonen wurden nur die Leistungen für die Nonien mit der größten Versetzungen und die Leistung für den Nonius mit der kleinsten Versetzung mit ausgewertet.

Die Versetzungsunterschiede der Partnernonien lag zwischen 2“ und 4“, im Mittel bei  $d = 3,33$ “. In Block 1 und Block 7 von Abbildung 8 sind die Leistungen der Probanden für Nonien dargestellt, die um die Versetzungsweite des großen Partnernonius versetzt waren und ohne Feedback präsentiert wurden. Vor und nach dem Versuch entsprechen die Leistungen mit circa 50% korrekter Antworten der Ratewahrscheinlichkeit. Es zeigt sich wieder der für diesen Versuchsaufbau typische Verlauf der Leistungen. Für den großen und den kleinen Partnernonius kommt es wieder zu einer Abnahme der Leistungen. Nach der Korrektur der reversen Rückmeldesignale für den kleinen Partnernonius steigt die Leistung sprunghaft an. Überraschenderweise spiegeln die Leistungsunterschiede für die Nonien die Unterschiede der Versetzungsweiten wieder. Obwohl die einzelnen Nonien nicht bewusst unterschieden werden konnten, ist die Leistung für den Nonius mit der kleineren Versetzung schlechter. Für die statistische Auswertung wurde für jeden Probanden der Mittelwert der Differenz der Leistungen zwischen dem großen und dem kleinen Partnernonius ermittelt. Diese Differenz der Leistungen wurde in einem Einstichproben-t-Test mit der Hypothese verglichen, dass diese Differenz null ist. Dies bedeutet, dass beide Versetzungen von den Probanden nicht unterschieden werden können. Es ergibt sich eine statistisch signifikante Leistungsdifferenz mit einem p-Wert von  $p = 0.020$ . Die Leistung für den Einzelnonius steigt in den Blöcken, in denen reverses Feedback gegeben wurde, leicht an und fällt nach der Korrektur der Rückmeldesignale ab.

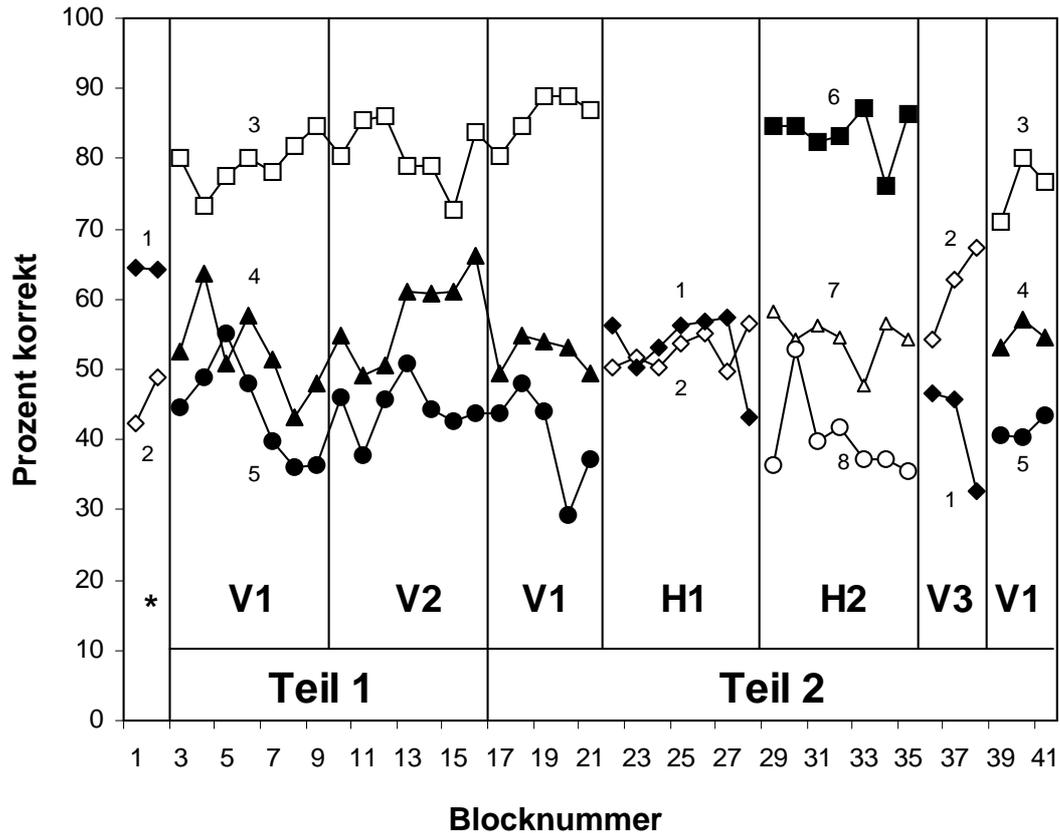
### 3.1.3 Experiment A3: Verschiedene Orientierungen

Bei den Versuchen zum Verschiebungseffekt kommt es nach der Korrektur der Rückmeldesignale immer zu einer sprunghaften Leistungsverbesserung für die beiden Partnernonien. Im ersten Teil dieses Versuches soll geprüft werden, wie sich die Leistungen der Probanden bei Abschalten des Feedbacks nach einer Trainingsperiode mit reversen Rückmeldesignalen für den kleinen Partnernonius verhalten. Im zweiten Teil wird untersucht, ob eine Verschiebung von Entscheidungskriterien Auswirkungen auf Nonien einer anderen Orientierung hat. Das Experiment wurde über drei Sitzungen hinweg durchgeführt. Die Pausen wurden immer nach Block 10 und nach Block 23 eingelegt. An diesem Experiment haben insgesamt sechs Beobachter teilgenommen.

In Abbildung 9 ist der Versuchsverlauf dargestellt. Zu Beginn des Experiments wurden den Versuchspersonen über zwei Blöcke lang horizontale Nonien mit den Versetzungsweiten von  $-5''$  und  $+5''$  bei gleicher Präsentationswahrscheinlichkeit ohne Rückmeldesignale dargeboten. Damit wurde getestet, ob sich die Probanden am Anfang häufiger für eine der beiden Antworten (Bias) bei horizontalen Nonien entscheiden.

In Bedingung V1 trainierten die Probanden mit dem Versuchsaufbau für den Verschiebungseffekt mit drei vertikalen Nonien. Die Versetzungsweite der beiden größeren Nonien entsprach dem individuellen Schwellenwert der Versuchspersonen. Die Versetzung des kleinen Partnernonius betrug die Hälfte des Schwellenwerts. Da alle Probanden für vertikale Nonien einen Bias auf die rechte Seite zeigten, wurde der kleine Partnernonius immer nach rechts versetzt präsentiert. Das Feedback für diesen Nonius war revers, für die beiden größeren Nonien war das Feedback korrekt. Anschließend wurden die Rückmeldesignale für alle Nonien abgestellt (Bedingung V2). Die übrigen Parameter wurden nicht verändert.

Zu Beginn des zweiten Teils des Experiments trainierten die Probanden noch einmal fünf Blöcke lang mit der Bedingung V1, um eine Verschiebung der Entscheidungskriterien und damit einen Bias für vertikale Nonien



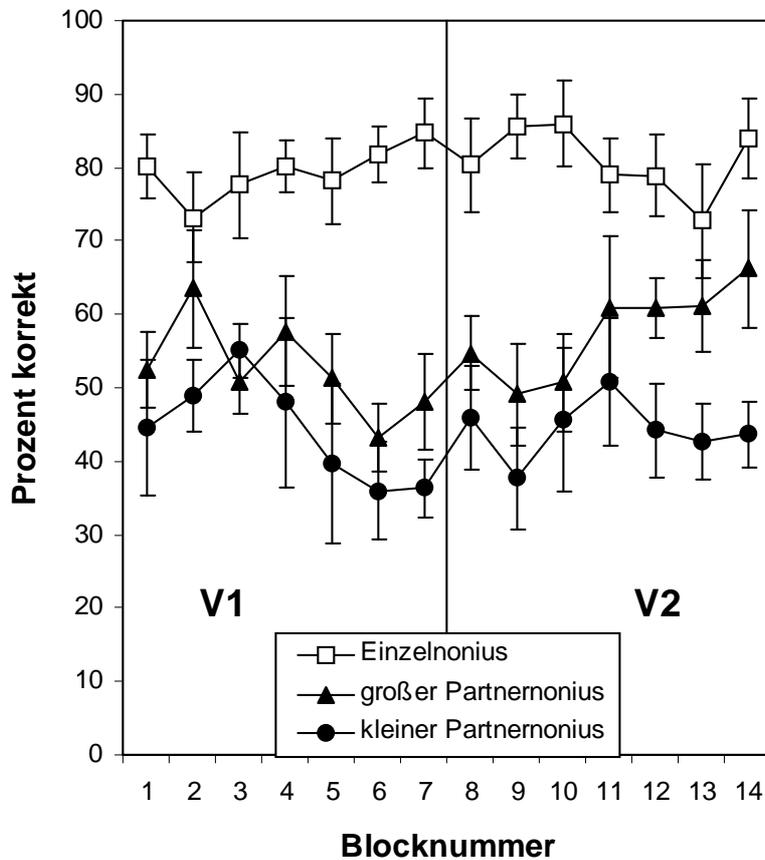
	Orientierung	Versetzungsweiten	Rückmeldesignale
*	horizontal	1: + 5"; 2: - 5"	keine
V1	vertikal	3: - SW; 4: + SW; 5: + 0,5 SW	3: korrekt; 4: korrekt; 5: revers
V2	vertikal	3: - SW; 4: + SW; 5: + 0,5 SW	keine
V3	vertikal	1: + 1"; 2: -1"	keine
H1	horizontal	1: + 1"; 2: -1"	keine
H2	horizontal	6: + SW; 7: - SW; 8: - 0,5 SW	6: korrekt; 7: korrekt; 8: revers

(SW:= individueller Schwellenwert)

**Abbildung 9:** Überblick über den Versuchsablauf von Experiment A3. In den ersten beiden Blöcken zeigt sich ein Bias für horizontale Nonien auf die rechte Seite. Im ersten Versuchsteil wird, nach der Induktion eines Bias für vertikale Nonien auf die linke Seite in V1, das Feedback in Bedingung V2 abgestellt. Es kommt zu einer langsamen Leistungsverbesserung vor allem für den großen Partnernonius. In Teil zwei zeigt sich nach der Wiederholung von V1 in H1 für horizontale Nonien kein Bias mehr. In H2 wird ein Bias induziert, der auf die rechte Seite gerichtet ist, also auf die andere Seite wie der Bias für vertikale Nonien. In V3 zeigt sich, dass sich die Richtung des Bias für vertikale Nonien trotz der Induktion eines entgegengerichteten Bias für horizontale Nonien nicht geändert hat. Bedingung V1 wurde für drei Probanden nochmals wiederholt.

sicherzustellen. In Bedingung H1 wurden zwei horizontale Nonien mit den Versetzungsweiten von +1“ und –1“ und derselben Präsentationswahrscheinlichkeit gezeigt. Die Rückmeldesignale wurden abgestellt. Mit dieser Anordnung wurde sieben Blöcke lang geübt. Mit Bedingung H2 folgte der Versuchsaufbau für den Verschiebungseffekt mit horizontalen Nonien. Die Versetzungsweiten und die Rückmeldesignale entsprachen Bedingung V1. Lediglich der kleine Partnernonius wurde auf die entgegengesetzte Seite wie in V1, also auf die linke Seite versetzt, präsentiert. Der damit in Bedingung H2 induzierte Bias ist entgegengesetzt zu dem mit vertikalen Nonien induziertem Bias in Bedingung V1. Nach einer Trainingsperiode von sieben Blöcken wurde wiederum die Orientierung der Nonien um 90° gedreht und der Bias für vertikale Nonien getestet. Dazu wurden in Bedingung V3 für drei Blöcke zwei vertikale Nonien mit den Versetzungsweiten von + 1“ und – 1“ ohne Rückmeldesignale gezeigt. Drei der sechs Beobachter trainierten anschließend noch drei Blöcke lang mit der Anfangsbedingung V1.

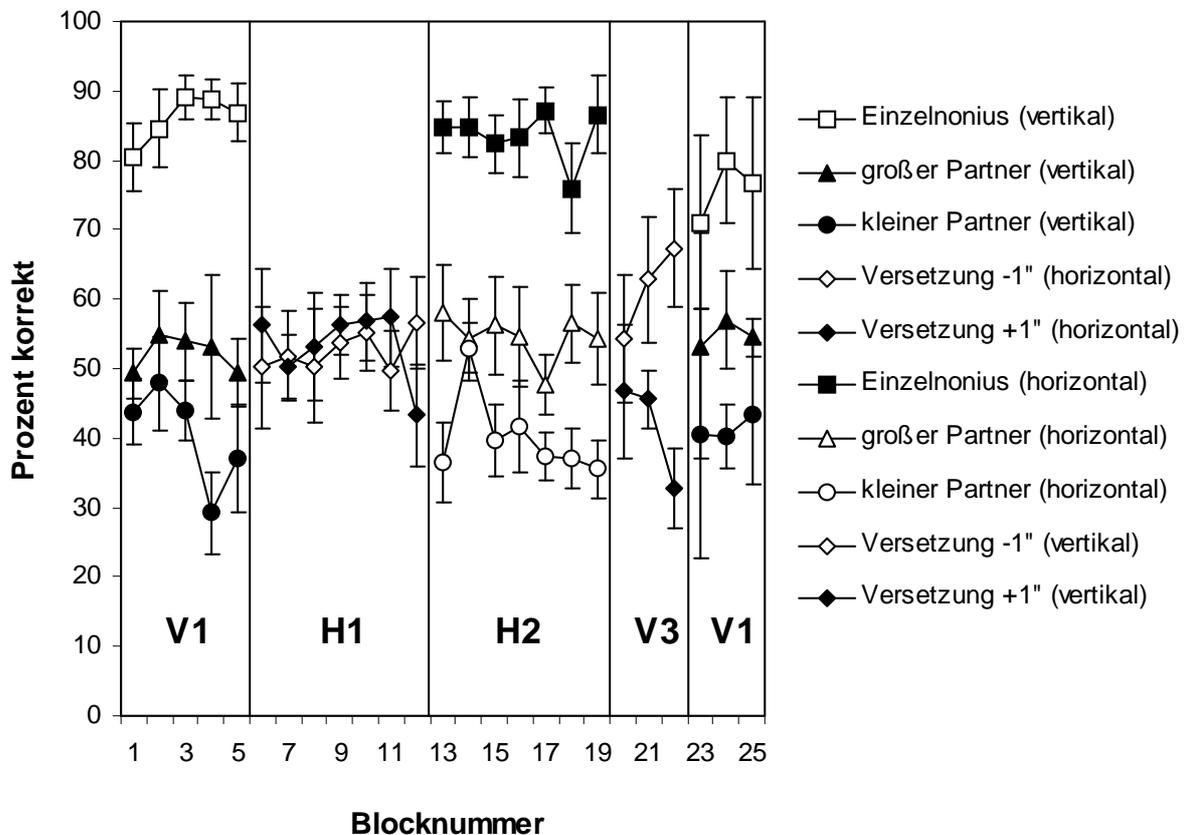
In den Vorversuchen zeigten alle Probanden sowohl für vertikale Nonien (mit PEST) als auch für horizontale Nonien einen Bias nach rechts. 60% der Antworten waren Entscheidungen für die rechte Seite. Für Bedingung V1 zeigt sich in Abbildung 10 der typische Leistungsverlauf beim Verschiebungseffekt. Die Leistungen für beide Partnernonien nehmen ab, die Leistung für den auf die entgegengesetzte Seite präsentierten Nonius nimmt dagegen zu. Die Regressionsanalyse ergibt eine statistisch signifikante Leistungsver schlechterung für die beiden Partnernonien, während sich die Leistung für den Einzelnonius nur leicht verbessert. Die Steigung der Regressionsgeraden der Leistung für den großen Partnernonius beträgt im Mittel  $s = -1,92$  mit einem p-Wert von  $p = 0,0369$ . Für den kleinen Partnernonius ist die Steigung der Regressionsgeraden  $s = -2,417$ . Diese Steigung ist in einem 1-Stichproben-t-Test signifikant mit einem p-Wert von  $p = 0,0047$ . Am Ende dieser Lernphase ist bei den Versuchspersonen ein deutlicher Bias auf die linke Seite zu erkennen mit 67 % der Entscheidungen für diese Seite.



**Abbildung 10:** Erster Teil von Experiment A3. Verschiebungseffekt für drei vertikale Nonien. In V1 erhalten der Einzelnonius und der große Partner korrekte Rückmeldesignale, das Feedback des kleinen Partners ist revers. In V2 ist das Feedback für alle Nonien ausgeschaltet. Man sieht, dass sich die Leistung für den großen Partnernonius auch ohne die Korrektur der Rückmeldesignale verbessert. Allerdings ist diese Leistungszunahme wesentlich langsamer als nach der Korrektur des Feedbacks. Für den kleinen Partnernonius bessert sich die Leistung nicht signifikant.

In Bedingung V2 sind die Vorzeichen der Regressionsgeraden der Leistungen der Probanden genau umgekehrt wie in V1. Für die Regressionsanalyse wurde der letzte Wert der Vorbedingung (Block 7 von Bedingung V1) als Anfangswert mit einbezogen. Die Leistung für den großen Partnernonius verbessert sich signifikant. Der Mittelwert der Steigung der Regressionsgeraden beträgt  $s = 2,433$  mit einem p-Wert von  $p = 0,0036$ . Für den kleinen Partnernonius verbessern sich die Probanden im Mittel nicht. Der Mittelwert für die Steigung der Regressionsgeraden der Leistung des Einzelnonius beträgt  $s = -0,856$  mit einem signifikanten p-Wert von  $p = 0,0120$ . Auch ohne Rückmeldesignale kommt es zu einer Erholung der Leistung zumindest für den, von den Rückmeldesignalen richtig klassifizierten, großen Partnernonius. Allerdings ist diese Erholung wesentlich langsamer als nach Korrektur des Feedbacks. In Block 7 entscheiden sich die Probanden mit 67% der Antworten für die linke Seite, nach dem Abstellen des Feedbacks in Block 8 geht dieser Prozentsatz innerhalb eines Blocks auf 60% zurück. Während der Bedingung V2 nimmt dieser Prozentsatz nur noch gering, bis auf 58% der Antworten nach links, ab. Auch hier wirkt sich die Änderung der Rückmeldebedingungen sofort aus. Nach der Wiederholung von Bedingung V1 (siehe Abbildung 8) für fünf Blöcke zeigt sich wieder ein deutlicher Bias von 68% der Antworten auf die linke Seite, der dem Bias nach sieben Blöcken mit Bedingung V1 zu Beginn des Versuchs entspricht. Die Induktion eines Bias und damit die Verschiebung von Entscheidungskriterien kann somit wiederholt werden.

Bei der Präsentation von horizontalen Nonien in H1 (Abbildung 11) zeigt sich keine Vorliebe für eine Antwortseite. Auch der anfängliche Bias für horizontale Nonien in den Vorversuchen hat sich nicht erhalten. In der anschließenden Lernphase mit drei horizontalen Nonien (Bedingung H2) zeigt sich nur eine schwache Leistungsänderung. Die Regressionsanalyse für alle drei Nonien ergibt keine Signifikanz. Es zeigt sich jedoch schon ab dem ersten Block der Bedingung H2 ein Bias, der entgegengesetzt des in V1 induzierten Bias gerichtet ist (64% der Antworten nach rechts in Block 1 von H2, 66% der Antworten nach rechts in Block 7 von H2).



**Abbildung 11:** Ergebnis von Teil 2 des Experiments A3. Ausgefüllte Symbole stehen für rechtsversetzte Nonien, offene Symbole für linksversetzte Nonien. Am Ende der Trainingsphase mit Bedingung V1 haben die Probanden einen deutlichen Bias auf die linke Seite. Anschließend zeigt sich in H1 kein Bias für horizontale Nonien. Die Noniengrößen und die Feedbackbedingungen in H2 entsprechen den Bedingungen aus V1 für horizontale Nonien. Lediglich die Versetzungsseiten haben sich geändert. Kleiner und großer Partnernonius sind jetzt nach links, der Einzelnonius ist in H2 nach rechts versetzt. Die Leistungen für die einzelnen Nonien verändern sich während des Trainings mit reversen Rückmeldesignalen für den kleinen Partnernonius nicht deutlich. Aber es zeigt sich ein Bias für horizontale Nonien, diesmal auf die rechte Seite. Bei der Kontrolle des Bias für vertikale Nonien in V3 hat sich der in V1 induzierte Bias nach links erhalten. Drei der Probanden trainierten noch einmal drei Blöcke lang mit Bedingung V1.

Die Leistungsniveaus für die einzelnen Nonien entsprechen den Leistungsniveaus in Bedingung V1. Für vertikale Nonien (vergleiche Bedingung V3) zeigt sich auch nach der Induktion eines Bias nach rechts für horizontale Nonien wieder ein Bias auf die linke Seite. Dieser Bias nach links scheint dabei mit der Trainingsdauer anzusteigen. Für die Regressionsgerade der nach links versetzten Nonien für diese drei Blöcke ergibt sich eine signifikant positive Steigung von im Mittel  $s = 6,55$  ( $p = 0.036$ ). Die Steigung für die links versetzten Nonien ist negativ, verfehlt aber bei der Analyse die Signifikanz ( $p = 0.064$ ). Für drei Beobachter zeigt sich in den letzten drei Blöcken mit der Bedingung V1 nochmals der Bias auf die linke Seite. Auch hier ist der Bias ab dem ersten Block mit dieser Bedingung vorhanden. Die Leistungen für die einzelnen Nonien zeigen keine großen Veränderungen.

Wie die Wiederholung von Bedingung V1 zeigt, ist die Verschiebung von Entscheidungskriterien bei Präsentation von Nonien mit reversem Feedback erneut möglich. Der mit vertikalen Nonien induzierte Bias scheint sich nicht auf Nonien auszuwirken, die um 90 Grad gedreht sind. In Bedingung H2 lässt sich ein Bias für horizontale Nonien induzieren, der entgegengesetzt ist zu dem mit vertikalen Nonien induzierten Bias. Bei erneuter Präsentation von vertikalen Nonien zeigen die Probanden immer noch einen Bias auf die Seite des vorher mit vertikalen Nonien induzierten Bias.

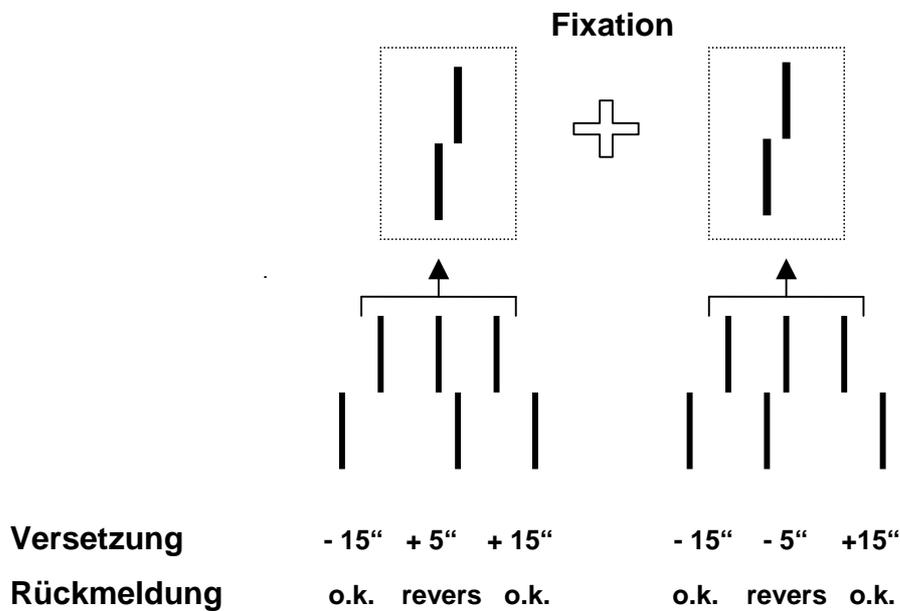
### 3.1.4 Experiment A4: Zwei Positionen

Durch den Versuchsaufbau zum Verschiebungseffekt, mit der Präsentation von drei Nonien mit gleicher Darbietungswahrscheinlichkeit und reversem Feedback für den kleinen Partnernonius, sind die Rückmeldesignale für die Versetzungsrichtung des Einzelnonius häufiger positiv als für die entgegengesetzte Versetzung. Wenn die Probanden diesen Bias erkennen würden, könnte der typische Leistungsverlauf beim Verschiebungseffekt damit erklärt werden, dass sich die Probanden öfter für die vermeintlich häufiger richtige Antwortseite entscheiden. Kann die Verschiebung der

Entscheidungskriterien durch eine solche globale Analyse der Feedbackraten oder der Motorik der Versuchspersonen erklärt werden?

Damit die globale Feedbackrate ungefähr vergleichbar ist, wurden jeweils drei Nonien mit dem Versuchsaufbau für den Verschiebungseffekt an zwei verschiedenen Orten im Gesichtsfeld der Probanden gezeigt. Dabei waren die Versetzungsrichtungen der beiden kleinen Partnernonien immer entgegengesetzt, wodurch beide Antwortmöglichkeiten ungefähr gleich häufig richtig waren. Die Nonien wurden randomisiert entweder links oder rechts in einem Abstand von 2000“ von einem Fixationskreuz in der Mitte des Bildschirms gezeigt (siehe Abbildung 12). Diese Netzhautareale liegen aufgrund des geringen Abstands zur Mitte noch innerhalb der Stelle des schärfsten Sehens (Fovea Centralis). Durch die kurze Präsentationsdauer von 150 ms und die randomisierte Präsentation wurden gerichtete Augenbewegungen verhindert. Segmentgröße und Abstände der Nonien entsprachen den vorherigen Versuchen. Acht Versuchspersonen nahmen an diesem Experiment teil.

Die Individuellen Schwellenwerte für beide Positionen wurden in einen Block von 120 Nonienpräsentationen mit PEST bestimmt. Mit Hilfe der Schwellenwerte wurde die Größe der Versetzungen auf beiden Positionen so gewählt, dass die Probanden vergleichbare Leistungen auf beiden Seiten erzielten. Bei vier der Probanden entsprach die Versetzungsweite der größeren Nonien dem individuellen Schwellenwert. In einer zweiten Gruppe lag diese Versetzungsweite um 20% über dem Schwellenwert. Der kleine Partnernonius wurde auf beiden Positionen auf die entgegengesetzte Seite versetzt präsentiert (siehe Abbildung12). Die Wahl der Versetzungsseite wurde entsprechend des Bias bei der Schwellenwertbestimmung getroffen. Auf der Position mit dem stärker ausgeprägten Bias wurde der kleine Partnernonius auf die Seite versetzt, die der Richtung des Bias entsprach. War zum Beispiel der stärkere Bias des Probanden auf der rechten Position, dann wurde der kleine

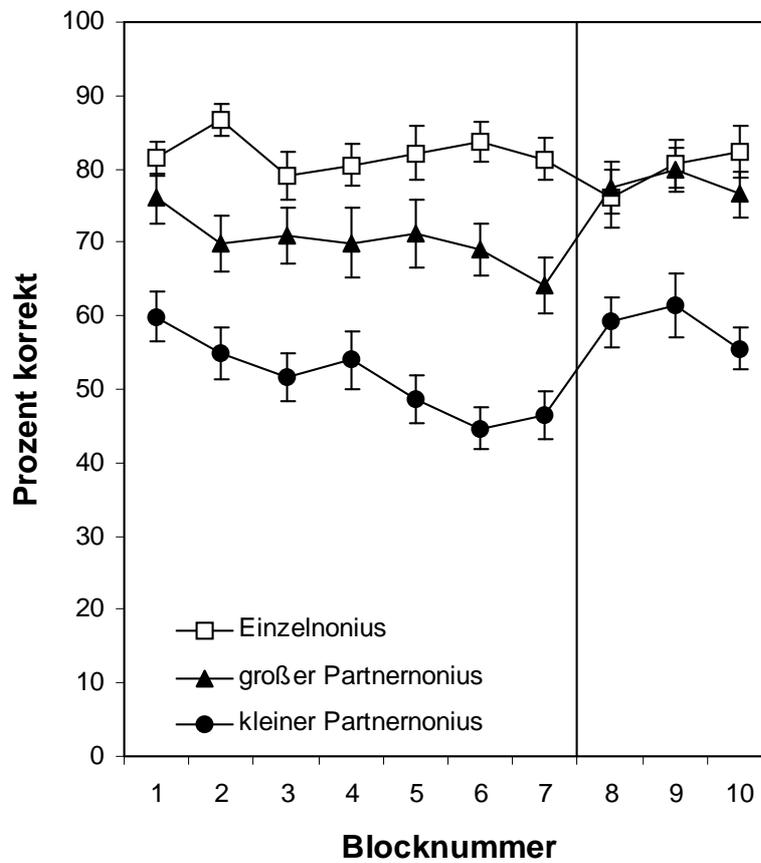


**Abbildung 12:** Versuchsaufbau von Experiment A4: 2 Positionen. Die Nonien werden links beziehungsweise rechts von einem Fixationskreuz im Abstand von  $2000''$  präsentiert. Auf beiden Positionen wird in randomisierter Form einer von drei Nonien nach dem bekannten Schema zum Verschiebungseffekt mit gleicher Präsentationshäufigkeit gezeigt. Die Rückmeldesignale für die beiden kleinen Partnernonien sind revers. Mit Hilfe dieser Anordnung werden insgesamt ungefähr gleich viele rechts- wie linksversetzte Sehzeichen präsentiert.

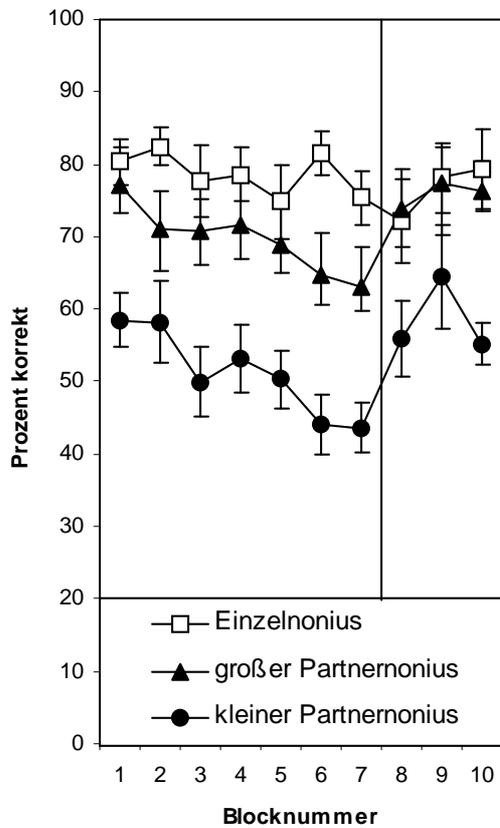
Partnernonius auf der rechten Position auf die Seite versetzt dargeboten, die dem Bias entsprach. Die Versuchspersonen trainierten mit diesem Aufbau 14 Blöcke lang mit jeweils 80 Nonienpräsentationen. Danach wurden für weitere sechs Blöcke korrekte Rückmeldesignale für alle Nonien gegeben. Um das Ergebnis besser mit den Ergebnissen der anderen Versuche vergleichen zu können, wurden bei der Auswertung jeweils zwei aufeinander folgende Blöcke zu einem Block zusammengefasst.

Der Lernverlauf zeigt große Schwankungen sowohl zwischen den Versuchspersonen, als auch zwischen beiden Positionen einer Versuchsperson. In Abbildung 13 ist die Leistung der sich entsprechenden drei Nonien von allen acht Versuchspersonen und von jeweils beiden Positionen gemittelt dargestellt. Auch hier zeigen sich wieder die analogen Lernkurven wie in den vorangegangenen Versuchen mit manipulierten Rückmeldesignalen. Die Leistungen für beide Partnernonien nehmen nahezu parallel während der Trainingsphase mit reversem Feedback ab und steigen nach der Korrektur des Feedbacks sprunghaft an. Die Leistung für den Einzelnonius bleibt dagegen über den ganzen Versuch konstant.

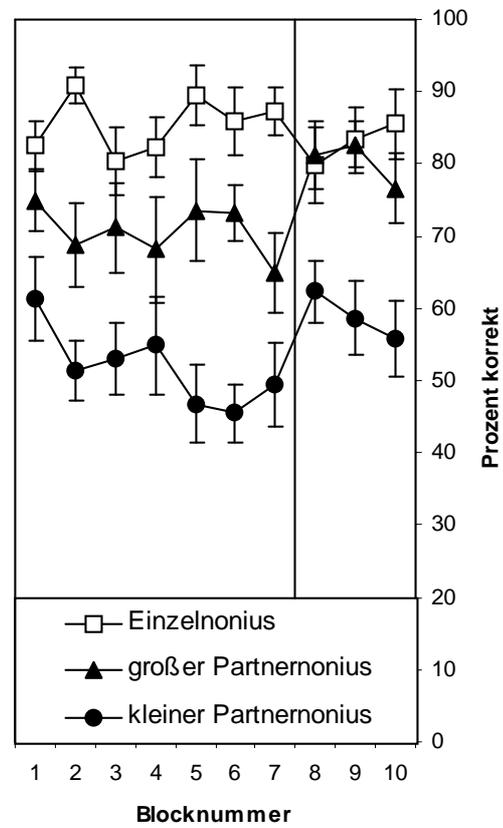
Um die Leistungsveränderungen auf beiden Positionen einzeln beurteilen zu können, wurden von allen Probanden die Leistungen für beide Seiten getrennt ausgewertet. Wie man in Abbildung 14 sieht, kommt es auf beiden Positionen zu einem vergleichbaren Lernverlauf. Für den kleinen Partnernonius ergibt sich während der Blöcke 1-7 eine mittlere Steigung der Lernkurve von  $s = -1,9$  auf der Position links vom Fixationskreuz und von  $s = -2,6$  auf der rechten Position. Daraus ergibt sich eine signifikante Leistungsverschlechterung mit  $p = 0,049$  auf der linken und  $p = 0,005$  auf der rechten Position. Vergleicht man die Leistungen von Block 7 mit den Leistungen nach der Korrektur der Rückmeldesignale in Block 8 mit einem gepaarten t-Test, zeigen sich auf beiden Positionen signifikante Leistungsänderungen (links:  $p = 0,004$ , rechts:  $p = 0,0016$ ). Da durch den Versuchsaufbau beide Antwortmöglichkeiten gleich häufig positive Rückmeldesignale erhalten, kann der Lernverlauf nicht durch eine globale Analyse der Rückmeldesignale oder der Motorik erklärt werden. Bei der getrennten Auswertung der beiden Gruppen von Versuchspersonen, die mit



**Abbildung 13:** Experiment A4: 2 Positionen. Präsentation des Versuchsaufbaus zum Verschiebungseffekt mit jeweils drei Nonien auf zwei unterschiedlichen Arealen der Netzhaut. Die Lernverläufe von acht Beobachtern und von beiden Positionen sind gemittelt dargestellt. Die beiden kleinen Partnernonien wurden an beiden Positionen jeweils auf die entgegengesetzte Seite versetzt dargeboten und erhielten reverses Feedback. Ab Block 8 wurde korrektes Feedback für alle Nonien gegeben.



rechte Position



linke Position

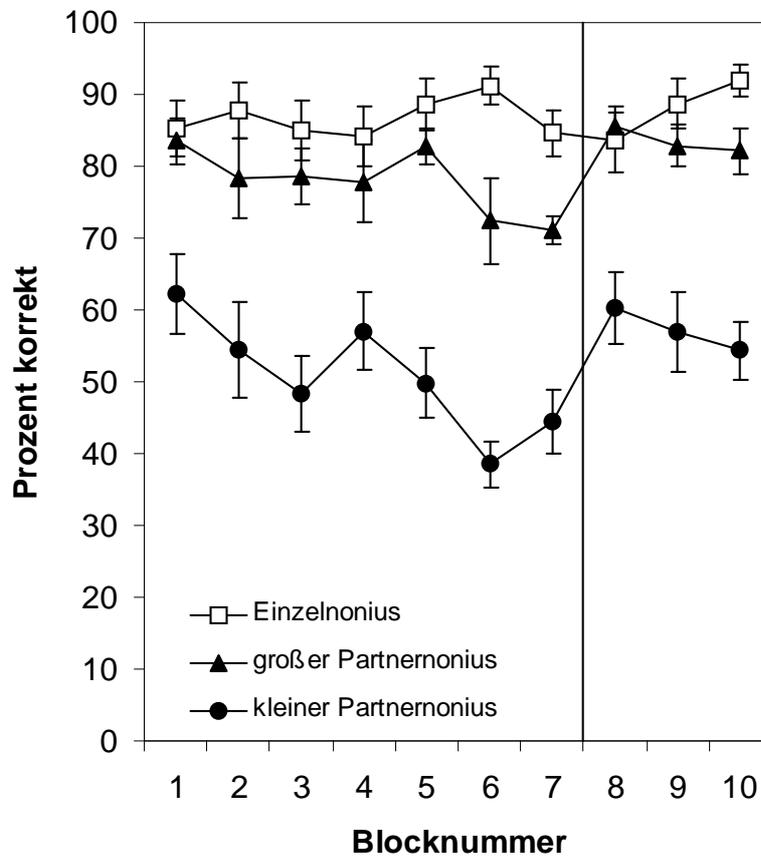
**Abbildung 14:** Experiment A4: Getrennte Auswertung der Lernverläufe auf beiden Positionen von acht Probanden. Auf beiden Seiten kommt es für den kleinen Partnernonius zu einer Leistungsverschlechterung. Da die beiden kleinen Partnernonien entgegengesetzt versetzt sind, ist eine Entscheidung für eine der beiden Antwortmöglichkeiten ungefähr gleich häufig richtig. Es scheint möglich zu sein, Entscheidungskriterien zur gleichen Zeit entgegengesetzt zueinander verschieben zu können.

unterschiedlich großen Versetzungen trainierten, sieht man ähnliche Unterschiede wie in Versuch A1, verglichen mit Versuch A3 (siehe Abbildungen 15 und 16). Durch die Präsentation von Nonien mit größeren Unterschieden der Versetzungsweite als in Versuch A1 scheint der große Partnernonius nicht so stark durch die manipulierten Rückmeldesignale beeinflusst zu werden. Die Leistungskurve für den großen Partnernonius verläuft bei der Präsentation mit größeren Versetzungsunterschieden wesentlich flacher als die Leistungskurve des kleinen Partnernonius. Beim Training mit Nonien kleinerer Versetzungsunterschiede verlaufen die Leistungen für die beiden Partnernonien annähernd parallel. Außerdem sind die Unterschiede zwischen den Leistungen der Probanden für den großen Partnernonius und dem Einzelnonius bei der Präsentation mit kleineren Versetzungsunterschieden viel größer. Trotzdem zeigt sich auch bei größeren Abständen der gezeigten Nonien ein Einfluss des reversen Feedbacks auf den Nonius mit der gleichen Versetzungsseite. Die Leistung des großen Partnernonius fällt während der Präsentation mit reversen Rückmeldungen ab und liegt, bis auf den ersten Block, immer unterhalb der Leistung für den Einzelnonius. Nach Korrektur des Feedbacks ist bei beiden Gruppen ein sprunghafter Anstieg der Leistungen für die beiden Partnernonien zu beobachten.

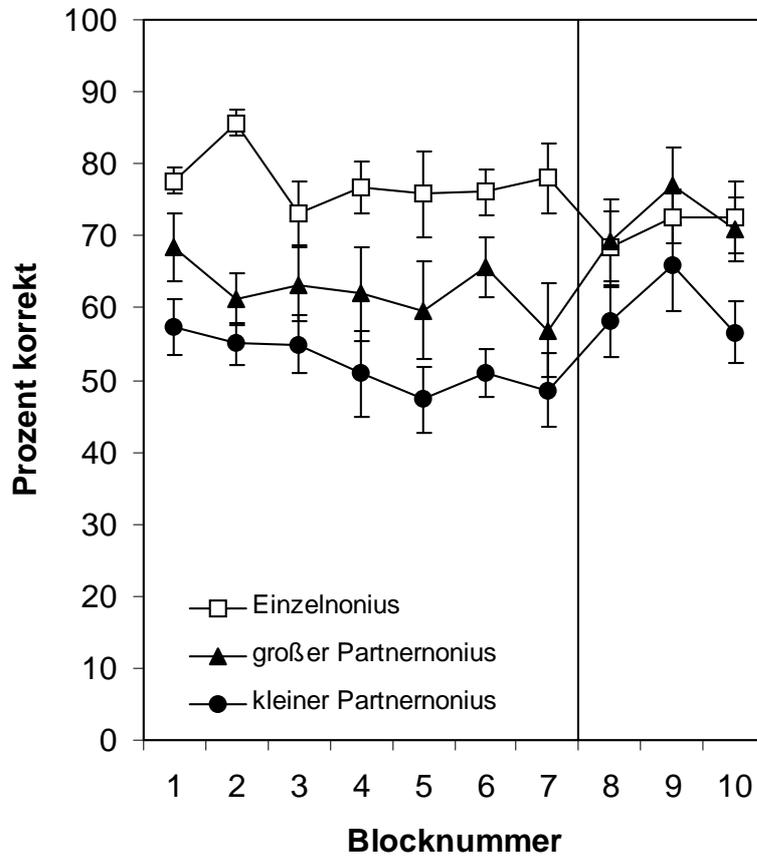
Der Verschiebungseffekt lässt sich an mindestens zwei verschiedenen Orten des Gesichtsfelds zur selben Zeit provozieren. Dabei führt die Präsentation von Nonien verschiedener Versetzungsgrößen zu vergleichbaren Unterschieden der Leistungsverläufe wie bei Experimenten mit nur einem Darbietungsort.

#### 3.1.4 Experiment A5: Kein Feedback

Der Versuchsaufbau dieses Experiments entspricht dem Versuchsaufbau in Bedingung V1 des Experiments A2, mit der Ausnahme, dass die Probanden gar keine Rückmeldesignale für den kleinen Partnernonius erhielten. Für die beiden anderen Nonien mit der größeren Versetzungsweite war das Feedback korrekt. Nach sieben Blöcken wurde auch für den kleinen Partnernonius das



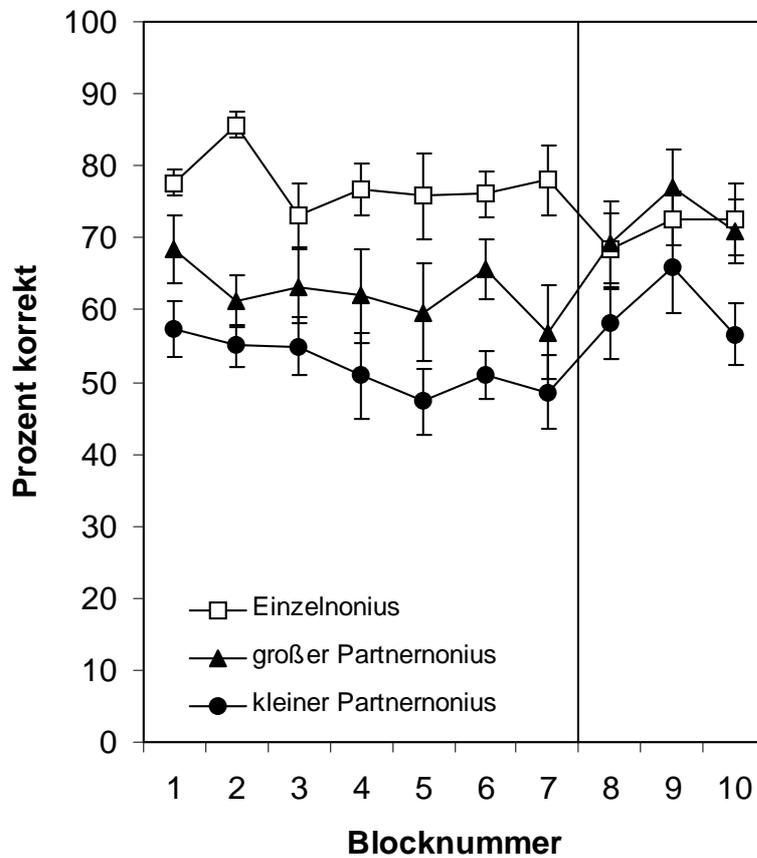
**Abbildung 15:** Experiment A4: Verschiebungseffekt für vier Probanden an zwei verschiedenen Orten im Gesichtsfeld. Die Versetzungsweite des Einzelnonius und des großen Partnernonius wurde circa 20% größer als der Schwellenwert der Beobachter gewählt. Bei der Präsentation mit reversen Rückmeldesignalen (Blöcke 1-7) fällt die Leistung für den kleinen Partnernonius steiler ab als die Leistung für den großen Partnernonius. Wie in Experiment A1 liegt die Leistung für den großen Partnernonius während der Darbietung mit reversem Feedback immer unter der Leistung für den Einzelnonius.



**Abbildung 16:** Experiment A4: Verschiebungseffekt für vier Probanden an zwei verschiedenen Orten im Gesichtsfeld. Als Versetzungsweite des Einzelnonius und des großen Partnernonius wurde der Schwellenwert der Beobachter gewählt (vergleichbar mit Experiment A3). Die reversen Rückmeldesignale für den kleinen Partnernonius haben eine deutlich ausgeprägteren Einfluss auf die Leistung für den großen Partnernonius als bei größeren Versetzungen (siehe Abbildung 15). Die Leistungen für beide Partnernonien fallen annähernd parallel ab, und die Leistung für den großen Partnernonius liegt deutlich unter der Leistung für den Einzelnonius.

Standardrückmeldesignal generiert, so dass das Feedback für alle Nonien korrekt war. Der Versuch wurde mit fünf Versuchspersonen durchgeführt.

Die Leistungen für alle Nonien ändern sich während des ganzen Versuchs kaum (Abbildung 17). Entgegen der Leistungsänderungen bei der Präsentation der Nonien mit dem Versuchsaufbau zum Verschiebungseffekt zeigt sich für den kleinen Partnernonius dabei im ersten Teil eher eine leichte Steigerung der Leistung. Für den Einzelnonius nimmt die Leistung dagegen scheinbar leicht ab. Auch nach der Korrektur des Feedbacks zeigt sich keine statistisch signifikante Änderung. Die Leistungen bleiben für alle Nonien relativ konstant. Der Versuchsaufbau zum Verschiebungseffekt ohne manipuliertes externes Feedback führt nicht zu einer Verschiebung von Entscheidungskriterien. Außerdem wird eine Leistungsverbesserung für die beiden Nonien mit der größeren Versetzung, obwohl sie korrektes Feedback erhalten, verhindert. Bei diesem Experiment zeigt sich wieder der starke Einfluss von Rückmeldesignalen auf den Lernverlauf.



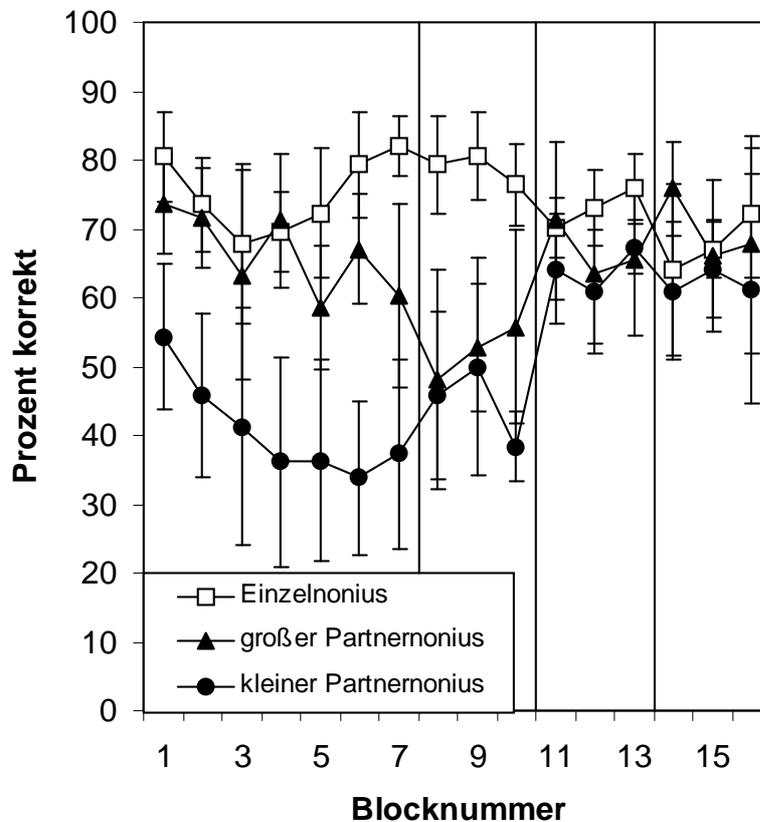
**Abbildung 17:** Experiment A5: Die Versetzungsweiten entsprechen der Bedingung V1 in Versuch A3. In diesem Experiment erhielten die Probanden in den ersten sieben Blöcken keine Rückmeldesignale für den kleinen Partnernonius. Der große Partnernonius und der Einzelnonius erhielten korrektes Feedback. Ab Block 8 war das Feedback für alle Nonien korrekt. Man sieht keine deutliche Leistungsänderung für einen der Nonien.

## 3.2 Versuche mit dichoptischer Nonienpräsentation

### 3.2.1 Experiment B: Verschiebungseffekt dichoptisch

Dieser Versuch ist eine Verbindung zwischen den Versuchen zum Verschiebungseffekt und den Versuchen mit dichoptischer Präsentation von Nonien. Das Experiment wurde mit vier Probanden durchgeführt.

Vor dem Experiment wurde die Augendominanz und anschließend der Schwellenwert für jedes Auge einzeln bestimmt. Mit Hilfe des Versuchsaufbaus zur dichoptischen Nonienpräsentation (siehe Material & Methoden) wurde der kleine Partnernonius immer auf das andere Auge wie die Nonien mit der größeren Versetzung projiziert. In den ersten sieben Blöcken wurde der kleine Partnernonius nur dem dominanten Auge dargeboten. Die beiden Nonien mit der grösseren Versetzung konnten dagegen nur mit dem nicht dominanten Auge wahrgenommen werden. Die Nonien mit der größeren Versetzung erhielten korrekte Rückmeldungen, während der kleiner Partnernonius reverses Feedback erhielt. Nach einer Trainingsdauer von sieben Blöcken wurden die Nonien auf das jeweils andere Auge projiziert. Der kleine Partnernonius wurde für weitere drei Blöcke nur dem nicht dominanten Auge, die Nonien mit der größeren Versetzung nur dem dominanten Auge dargeboten. Die Feedbackbedingungen wurden nicht verändert. Anschließend wurden die Rückmeldesignale für alle Nonien korrigiert. Die dichoptische Projektion der Nonien mit der größeren Versetzung auf das dominante Auge wurde für drei Blöcke beibehalten. In den letzten drei Blöcken wurden die größeren Nonien wieder auf das nicht dominante, der kleine Partnernonius auf das dominante Auge projiziert. Die Rückmeldesignale waren weiterhin korrekt. Das Ergebnis ist in Abbildung 18 dargestellt. Innerhalb der ersten sieben Blöcke verlaufen die Leistungskurven analog zu den Versuchen zum Verschiebungseffekt im ersten Teil dieser Arbeit. Die Leistung der Probanden für den kleinen Partnernonius nimmt während des Trainings mit reversen Rückmeldesignalen ab. Die Steigungen der Regressionsgeraden der vier Probanden beträgt im Mittel



**Abbildung 18:** Experiment B: Präsentation der beiden Nonien mit der großen Versetzung auf das nicht dominante Auge von vier Probanden. Der kleine Partnernonius wurde zu Beginn den Beobachtern nur auf das dominante Auge dargeboten. Die Rückmeldesignale waren für die großen Nonien korrekt und für den kleineren Nonius revers. Nach 7 Blöcken wurde gewechselt und der kleine Partnernonius auf das nichtdominante Auge präsentiert. Ab Block 11 wurde das Feedback für den kleinen Partnernonius korrigiert. Für den letzten Teil des Experiments wurde dann nochmals die Projektion der Nonien auf die Augen gewechselt. Auch in diesem Versuch wird die Leistung des großen Partnernonius durch die manipulierten Rückmeldungen deutlich beeinflusst. Nach dem Wechsel der Projektion des kleinen Partners vom dominanten auf das nicht dominante Auge ergeben sich keine klaren Veränderungen der Leistungen. Nach der Korrektur des Feedbacks gleichen sich die Leistungen für alle drei Nonien innerhalb eines Blocks an. Auch ein nochmaliger Wechsel der Augenpräsentation zeigt keine Änderung der Leistungen.

$s = -2,87$  und variiert in einem Bereich von  $-5,47$  und  $0,15$ . Obwohl der kleine Partnernonius, der reverse Rückmeldesignale erhält, nur mit dem dominanten Auge wahrgenommen werden konnte, wird die Leistung des großen Partnernonius, der nur mit dem nichtdominanten Auge gesehen werden konnte, beeinflusst. Die Steigung der Regressionsgeraden für den großen Partnernonius beträgt im Mittel  $s = -2,48$ , mit Werten zwischen  $-4,67$  und  $-0,91$ . Die Steigung der Regressionsgeraden der Leistung für des Einzelnonius beträgt im Mittel  $s = 0,33$ , mit Werten zwischen  $-0,94$  und  $2,0$ .

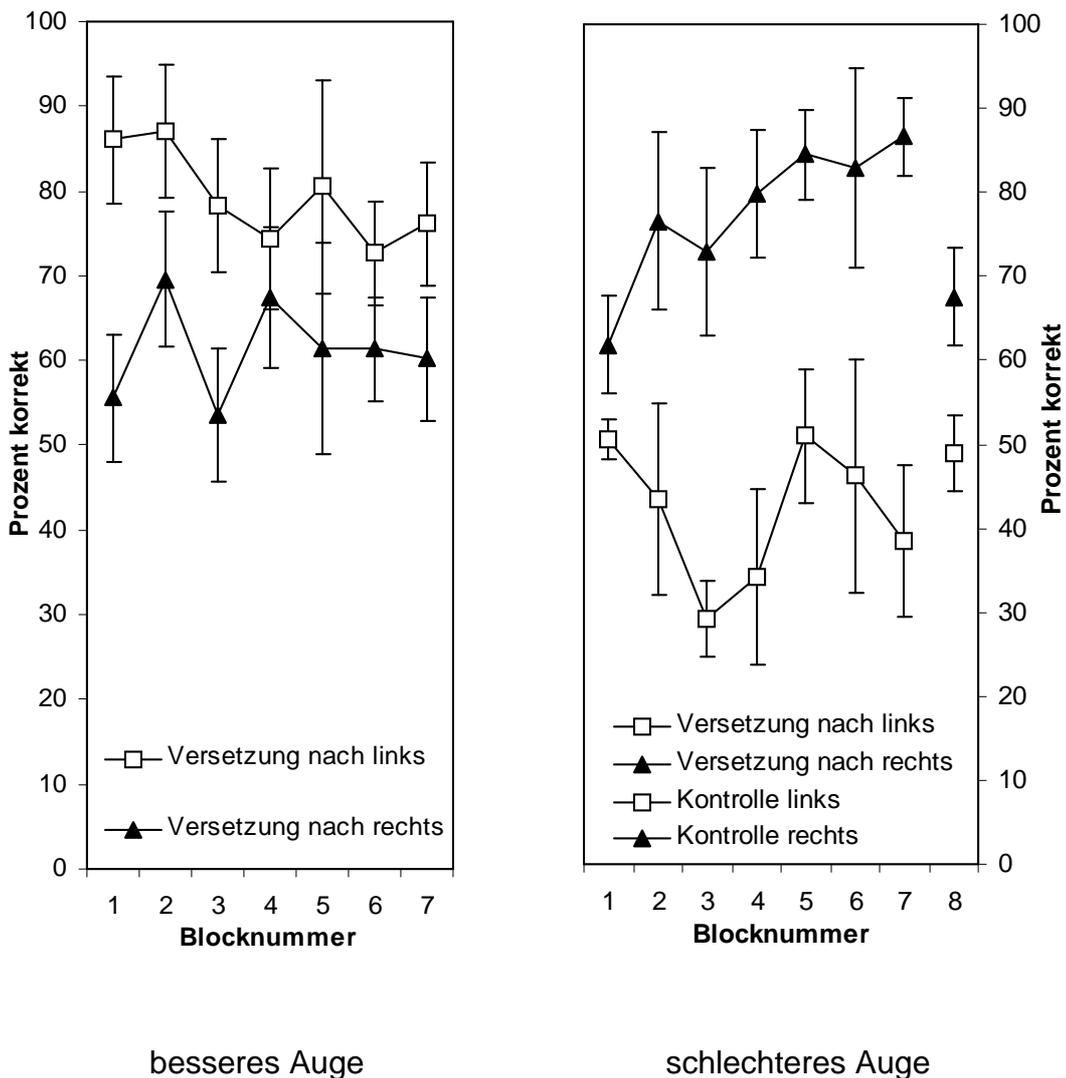
Durch den Wechsel der Darbietung des kleinen Partnernonius auf das nichtdominante Auge und der Darbietung der beiden Nonien mit der großen Versetzung auf das dominante Auge resultiert keine klare Leistungsänderung. Die Steigungen von Regressionsgeraden für die Leistungen der einzelnen Probanden von Block 7 bis Block 10 zeigen keine eindeutige Tendenz. Wie in den anderen Versuchen zum Verschiebungseffekt kommt es auch hier nach der Korrektur der Rückmeldesignale des kleinen Partnernonius zu einem deutlichen Anstieg der Leistung der Probanden für die beiden Partnernonien. Auch unter dichoptischen Bedingungen führt manipuliertes Feedback zu einer Verschiebung von Entscheidungskriterien.

### 3.2.2 Experiment C1: 75% linksversetzte Nonien

Bei den Versuchen C1-C3 wurden jeweils drei Nonienpaare mit gleicher Versetzungsweite aber entgegengesetzter Versetzungsrichtung gezeigt. Die Versetzungsweite wurde mit Hilfe des Schwellenwertes so eingestellt, dass die Anfangsleistung der Probanden circa 60-65 % korrekter Antworten betrug. Die Einstellung der Anfangsleistung sollte zum einen verhindern, dass die Probanden die Sehzeichen bereits am Anfang zu gut erkennen und damit ihre Leistung durch späteres Training nicht mehr signifikant verbessern können (Deckeneffekt). Zum anderen sollten zu kleine Versetzungsweiten der Nonien, die nicht mehr unterschieden werden können (Bodeneffekt), vermieden werden.

In Experiment S1a bei Broos (2000) wurden den Probanden mit dem Versuchsaufbau für die dichoptische Präsentation von Nonien monokular auf den beiden Augen Nonien mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,75 auf eine Seite versetzte Nonien gezeigt. Dem linken Auge wurden zu 75% linksversetzte Nonien, dem rechten Auge zu 75% rechtsversetzte Nonien dargeboten. Da beiden Augen insgesamt ungefähr gleich viele Nonien präsentiert wurden, waren, nach der binokularen Fusion, ungefähr gleich häufig rechts- und linksversetzte Sehzeichen präsentiert worden. Vor den Versuchen wurden binokular drei Versetzungsweiten bestimmt, für die die Probanden insgesamt eine Erkennungsleistung von circa 65% korrekter Antworten erreichten. Die Versuchspersonen trainierten ohne Feedback. Es zeigte sich eine mittlere Leistungsverbesserung in einem Übungszeitraum von sieben Blöcken. Bei der getrennten Auswertung der Leistungen von beiden Augen sah man, dass die Leistungsverbesserung ausschließlich von einer Leistungssteigerung auf dem Auge mit der schlechteren Ausgangsleistung herrührte. Auf dem Auge mit der höheren Leistung zu Beginn des Versuchs blieb die Leistung der Probanden annähernd konstant. Um die Theorie zur Erklärung dieser Veränderungen zu stützen, wurden in Experiment C1 Nonien in ganz ähnlicher Weise ohne Rückmeldesignale gezeigt. Insgesamt wurden die Nonien mit gleicher Häufigkeit auf das linke sowie auf das rechte Auge projiziert. Diesmal waren jedoch auf beiden Augen 75% der Sehzeichen linksversetzte Nonien. Alle Personen, die an den Versuchen C1 und C2 teilnahmen, zeigten in den Vorversuchen einen deutlichen Unterschied der individuellen Schwellenwerte zwischen den Augen. Vier Probanden nahmen an diesem Versuch teil.

Da sich bei der gemeinsamen Auswertung der Lernverläufe auf beiden Augen im Mittel keine Änderung der Leistungen ergab, sind in Abbildungen 19 die Ergebnisse sowohl nach Versetzungsrichtung, als auch nach den Augen getrennt dargestellt. Auf dem Auge mit der besseren Sehleistung verschlechtern sich die Beobachter leicht für Nonien, die auf die linke Seite versetzt dargeboten wurden. Die Leistung für rechtsversetzte Nonien bleibt über die sieben Blöcke konstant. Auf dem schlechteren Auge kommt es dagegen zu einer deutlichen Verbesserung der auf die rechte Seite versetzten Nonien. Die



**Abbildung 19:** Experiment C1: Dichoptische Präsentation von Nonien, die auf beiden Augen zu 0,75 nach links versetzt waren, ohne Feedback. Auf dem Auge mit der besseren Ausgangsleistung gleichen sich die Ergebnisse auf beiden Augen während des Trainings immer mehr an, wobei die Leistung für linksversetzte Nonien deutlich abnimmt, während die Leistung für rechtsversetzte Nonien konstant nahe der Ratewahrscheinlichkeit bleibt. Die Probanden verschlechtern sich dagegen für die Linksversetzung auf dem schlechteren Auge leicht und verbessern sich deutlich für rechtsversetzte Nonien. Auf dem schlechteren Auge wurde zum Schluss ein Block mit einer Gleichverteilung der Versetzungen präsentiert.

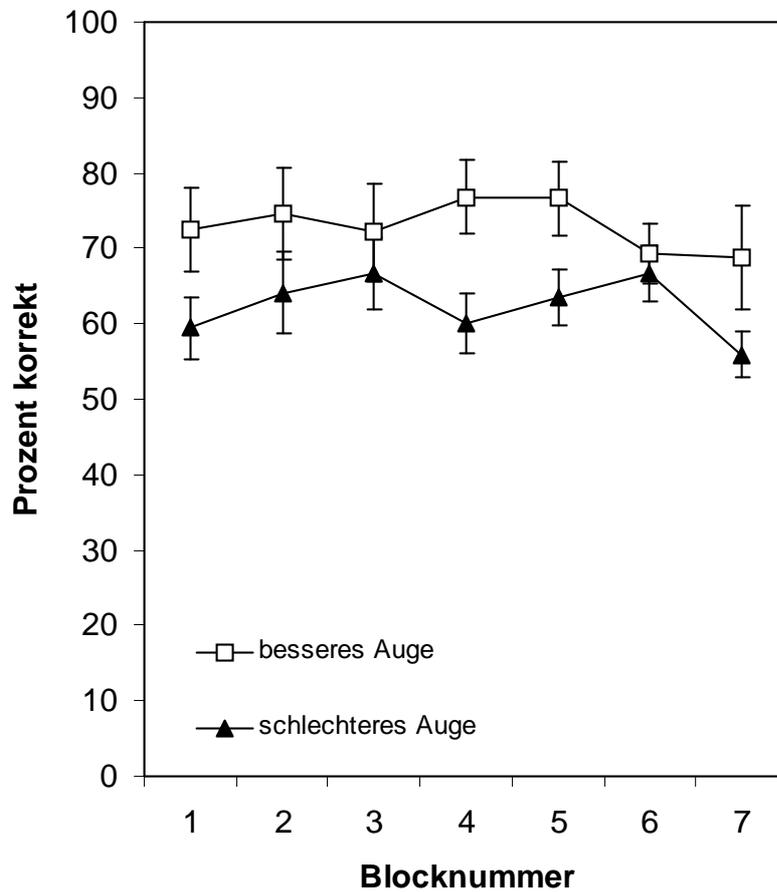
Regressionsgeraden der einzelnen Probanden haben im Mittel eine Steigung von  $s = 3,5$ . Daraus ergibt sich eine signifikante Leistungsverbesserung für die rechtsversetzten Nonien, die auf das schlechtere Auge projiziert wurden. Die Leistung für die weitaus häufiger präsentierten Nonien mit einer Versetzung nach links nimmt dagegen während des Trainings leicht ab. Die Steigungen der Regressionsgeraden liegen im Mittel bei  $s = -0,3$ , mit Werten zwischen  $-1,8$  und  $2,4$ ,

### 3.2.3 Experiment C2: unangeglichen Lernen

Wie in Versuch C1 hatten die fünf Versuchspersonen auf beiden Augen unterschiedliche Schwellenwerte. Entsprechend von Experiment S2b bei Broos (2000) trainierten die Probanden mit gleich verteilten Nonien auf beiden Augen. Die Nonien hatten mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,5 eine Versetzung nach links beziehungsweise nach rechts und wurden mit der gleichen Wahrscheinlichkeit dem rechten oder dem linken Auge gezeigt. Wie in Abbildung 20 zu erkennen ist, sind die Leistungen auf beiden Augen entsprechend der unterschiedlichen Schwellenwerte verschieden. Während des Trainings ändert sich das Leistungsniveau auf beiden Augen nicht. Im Gegensatz zum vorangegangenen Experiment C1 kommt es in diesem Versuch zu keiner Leistungsänderung.

### 3.2.4 Experiment C3: Rückmeldung für ein Auge

Um Ergebnisse von früheren Arbeiten zu verifizieren, übten vier Probanden mit dem Versuchsaufbau aus Experiment R1 von Broos (2000). Beiden Augen wurden jeweils drei Nonien einer konstanten Versetzung mit einer Ausgangsleistung im Mittel zwischen 60% und 65% korrekter Antworten gezeigt. Die Versuchspersonen übten 14 Blöcke lang mit korrekten Rückmeldesignalen für die Sehzeichen, die auf das dominante Auge projiziert

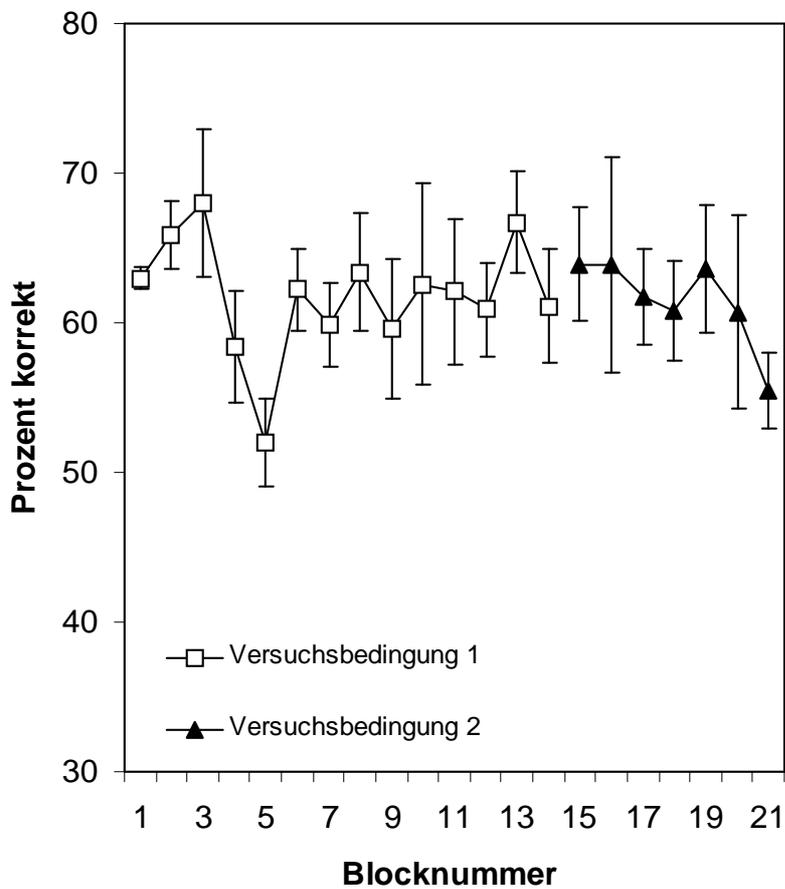


**Abbildung 20:** Experiment C2: Präsentation von 50% rechts- sowie linksversetzten Nonien. Die Beobachter zeigten in den Vorversuchen eine Leistungsdifferenz zwischen beiden Augen. Innerhalb der sieben Blöcke ohne Feedback kommt es zu keiner Veränderung der Leistungen. Fünf Probanden nahmen an diesem Experiment teil.

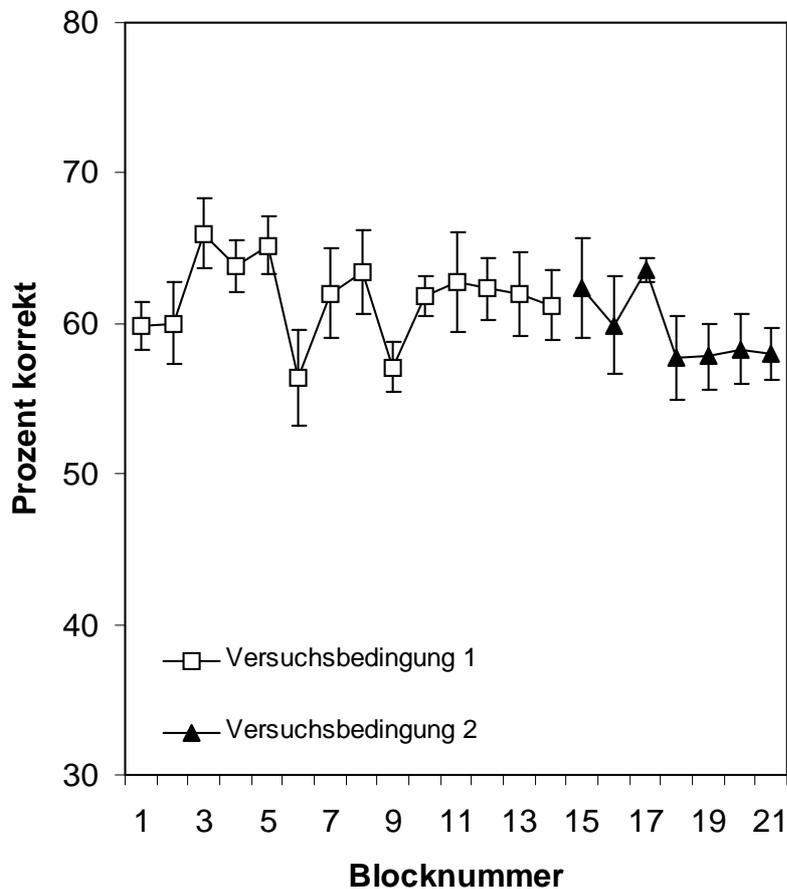
wurden. Für Nonien, die auf das nichtdominante Auge projiziert wurden, erhielten die Probanden kein Feedback. Anschließend wurde für weitere sieben Blöcke das Regime gewechselt, so dass nur Nonien, die dem nichtdominanten Auge gezeigt wurden, Feedback erhielten.

Die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen die Resultate der früheren Experimente. In der ersten Phase der Versuche kommt es zu keiner Leistungsänderung. Nach dem Feedbackwechsel verschlechtern sich die Leistungen der Probanden. Die Steigungen der Regressionsgeraden der Leistungen der Blöcke 1-14 betragen im Mittelwert  $s = 0,024$  mit einem Standardfehler von 0,16. Die mittlere Steigungen der Leistungen nach dem Wechsel des Feedbacks auf das nichtdominante Auge betrug  $s = -0,67$  mit einem Standardfehler von 0,2. Auch in unseren Ergebnissen wird ein Lernen durch die manipulierten Bedingungen verhindert. Trotzdem zeigt sich ein Einfluss der Rückmeldesignale, die das dominante Auge erhalten hatte, in dem Leistungsabfall nach dem Wechsel der Rückmeldesignale auf das nichtdominante Auge, obwohl die Feedbackrate über den gesamten Versuch ungefähr vergleichbar war.

Sechs weitere Probanden trainierten mit umgekehrter Reihenfolge der Rückmeldebedingungen. Während der ersten 14 Blöcke erhielt lediglich das nichtdominante Auge Feedback. Anschließend wurde das Feedback für nochmals sieben Blöcke nur für das dominante Auge generiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 16 dargestellt. Die Leistung der sechs Probanden nimmt nach dem Wechsel des Feedbacks nicht signifikant ab. Die Steigung der Regressionsgeraden liegt im Mittel bei  $s = -0,65$  mit einem Standardfehler von 0,31. Für die Leistung der ersten 14 Blöcke beträgt die Steigung der Regressionsgeraden im Mittel  $s = -0,03$ . Auch unter diesen Versuchsbedingungen scheint es nach dem Wechsel des Auges, das Rückmeldesignale erhält, zu einem leichten Leistungsabfall zu kommen. Dieser Effekt ist aber weniger deutlich ausgeprägt wenn zuerst das nichtdominante Auge Feedback erhält.



**Abbildung 21:** Wiederholung der Versuchsbedingungen des Experiment R1 bei Broos 2000. Drei Versuchspersonen trainieren 14 Blöcke lang mit dichoptisch präsentierten Nonien. In Versuchsbedingung 1 erhält nur das dominante Auge Rückmeldesignale. Nach dem Wechsel in Block 15 wechselt das Feedback auf das nichtdominante Auge. Obwohl es in Bedingung 1 zu keiner Leistungsänderung kommt, zeigt sich nach dem Wechsel der Feedbackbedingungen eine Wirkung der Rückmeldesignale in einem Leistungsabfall. Die Feedbackrate in beiden Bedingungen war vergleichbar.



**Abbildung 22:** Experiment C3: Leistungen von sechs Beobachtern, die bei gleich verteilten Nonien mit dichoptischer Präsentation in Versuchsbedingung 1 korrekte Rückmeldesignale nur für die Nonien, die dem nichtdominanten Auge dargeboten wurden, erhalten haben. Nach einem Übungszeitraum von 14 Blöcken wurde das Feedback in Bedingung 2 gewechselt, und nur das dominante Auge erhielt Feedback. Im ersten Teil des Experiments bleibt die Leistung der Probanden relativ konstant. Auch nach dem Wechsel zeigt sich keine deutlich Leistungsänderung, lediglich eine leichte Verschlechterung der Sehleistungen.

## Kapitel 4

### Diskussion

In der Diskussion werden zuerst die Ergebnisse der Experimente dieser Arbeit zusammengefasst und mit Experimenten aus früheren Arbeiten verglichen. Im zweiten Teil werden allgemeinere Aspekte erörtert und Implikationen der Experimente in Hinsicht auf verschiedene mathematische Modelle diskutiert.

#### 4.1 Zusammenfassung der Resultate

##### 4.1.1 Versuche zum Verschiebungseffekt

In der Arbeit von Herzog & Fahle (1999) wurden, wie in dieser Arbeit, Versuche mit manipuliertem aber konstantem Feedback durchgeführt. Die Probanden trainierten mit fünf Nonien, einem Nonienpaar mit einer größeren Versetzungsweite, einem Nonienpaar mit einer mittleren Versetzungsweite und einem Nonius mit einer kleineren Versetzung, der nur auf eine Seite versetzt präsentiert wurde. Bei der Darbietung mit reversen Rückmeldesignalen für den Nonius mit der kleinsten Versetzung kam es zu einer Verschlechterung der Leistung für alle Nonien, die die gleiche Versetzungsrichtung hatten wie der Nonius mit der kleinsten Versetzung. Die Größenunterschiede der Nonien wurden dabei beachtet, was bedeutet, dass Nonien einer größeren Versetzung auch im Mittel häufiger richtig erkannt wurden. Nach der Korrektur der Rückmeldesignale kam es zu einer sprunghaften Verbesserung der Leistung für alle Nonien, die auf die Seite des kleinsten Nonius versetzt waren und zu einer Verschlechterung der Leistung der Nonien der anderen Versetzungsseite. Dieser Effekt lässt sich gut durch eine Verschiebung von Entscheidungskriterien auf der Entscheidungsebene erklären. Deshalb wurde dieser Effekt Verschiebungseffekt genannt.

Auch bei den Experimenten in dieser Arbeit lässt sich der Verschiebungseffekt unter den unterschiedlichen Versuchsbedingungen in allen Experimenten mit

reversen Rückmeldesignalen provozieren. Die Basiskonstellation der Nonien war für alle Versuche zum Verschiebungseffekt vergleichbar (siehe Versuchsaufbau zum Verschiebungseffekt). Es wurden drei Nonien mit derselben Darbietungswahrscheinlichkeit von 0.33 den Probanden gezeigt. Der große Partnernonius und der Einzelnonius hatten dieselbe Versetzungsweite, die Versetzungsrichtung war entgegengesetzt. Der kleine Partnernonius hatte eine kleinere Versetzungsweite und die gleiche Versetzungsrichtung wie der große Partnernonius. Die Rückmeldesignale für den kleinen Partnernonius waren zu Beginn der Experimente immer revers und für die beiden Nonien mit der größeren Versetzung immer korrekt. Herzog & Fahle (1999) konnten zeigen, dass die Höhe der Leistungsniveaus, die beim Verschiebungseffekt asymptotisch erreicht werden, vor allem von der Häufigkeit der generierten reversen Rückmeldesignale abhängt. Die in dieser Arbeit benutzte Feedbackrate von 33% reverser Rückmeldungen ist ausreichend, um eine Verschiebung der Entscheidungskriterien zu provozieren, aber zu schwach, um den Bias kognitiv wahrzunehmen.

In allen Experimenten mit reversen Rückmeldesignalen kam es, auch unter den unterschiedlichen Versuchsbedingungen, zu einer Leistungsabnahme für die beiden Partnernonien und zu einem Leistungsanstieg beziehungsweise einer gleichbleibend hohen Leistung für den Einzelnonius. Nach der Korrektur des Feedbacks stieg vor allem die Leistung für den kleinen Partnernonius innerhalb der ersten Blocks sprunghaft an. Durch die schnelle Leistungsänderung erscheinen Veränderungen von synaptischen Gewichten im Sinne der Modelle der neuronalen Netze als Erklärung für diesen Effekt unwahrscheinlich. Zur Korrektur von Änderungen synaptischer Gewichte wäre eine etwa gleich lange Trainingsdauer nötig wie die Zeit zum Erreichen des Leistungsniveaus vor der Korrektur. Die schnelle Leistungsänderung nach der Feedbackkorrektur und die Leistungsabnahme der beiden Nonien der Versetzungsseite, die manipulierte Rückmeldungen erhalten hat, machen eine Verschiebung von Entscheidungskriterien als Erklärung dieses Effekts deshalb sehr wahrscheinlich.

In einem einfachen Modell der Wahrnehmung (siehe oben) kann jeder präsentierte Nonius  $x$  nach Verarbeitung im optischen System einer

Wahrscheinlichkeitsfunktion  $p(y/x)$  in der Entscheidungsebene zugeordnet werden. Als Wahrscheinlichkeitsfunktion wird oft die Gausssfunktion angenommen. Ein "Fehllernen" der gezeigten Sehzeichen könnte verhindert werden, wenn die Abstände der einzelnen Versetzungen sehr gering sind. Durch die großen Überschneidungen der zugeordneten Gausssfunktionen in der Entscheidungsebene könnten die Rückmeldesignale nicht mehr den Sehzeichen zugeordnet und damit ein Lernen dieser Nonien verhindert werden. In Experiment A1 wurden den Probanden Nonien mit großen Unterschieden der Versetzungsweiten gezeigt. Der Unterschied der Versetzungen der Nonien wurde so groß gewählt, dass die einzelnen Sehzeichen mit deutlich unterscheidbaren Signalen auf der Entscheidungsebene einhergehen. Die Leistung für den großen Partnernonius, der dieselbe Versetzungsrichtung aufweist wie der kleine Partnernonius, verschlechtert sich im Gegensatz zu den Versuchen mit kleineren Unterschieden der Versetzungen in der Trainingsphase mit reverssem Feedback statistisch nicht signifikant. Dies gilt sowohl für die willkürlich gewählten Abstände von 30" zu 5", als auch von 20" zu 5". Trotzdem wird die Leistung für den großen Partnernonius durch die manipulierten Rückmeldungen beeinflusst. Bei dem statistischen Vergleich der Leistungen für die beiden Nonien mit der größeren Versetzung mit einem Einstichproben-t-Test zeigt sich eine signifikant schlechtere Leistung für den Nonius, der auf dieselbe Seite versetzt gezeigt wurde wie der Nonius, der reverse Rückmeldesignale erhielt. Der Einfluss des manipulierten Feedbacks auf den großen Partnernonius scheint direkt von der Größe der Versetzungsunterschiede abzuhängen.

Wie ebenfalls bei Herzog & Fahle (1999) ausgeführt wird, kommt die sprunghafte Leistungsverbesserung nach Korrektur der Rückmeldesignale beim Verschiebungseffekt durch so genannte interne Kriterien in Verbindung mit einer Analyse des Bias der Rückmeldesignale zustande. Interne Kriterien basieren auf der Kenntnis von allgemeinen Zusammenhängen der Welt. Wie in Versuchen bei Herzog (1996) und Broos (2000) gezeigt werden konnte, wird Lernen bei Experimenten mit manipulierten Parametern wie zum Beispiel die Häufigkeit von Rückmeldesignalen oder die statistische Häufung einer Versetzungsrichtung der Nonien verhindert. Dabei wird der Lernvorgang

wahrscheinlich durch ein Vetosignal unterdrückt, weil interne Kriterien im Widerspruch zu den externen Reizen stehen. In Bezug auf den Verschiebungseffekt scheinen diese internen Kriterien einen schwächeren Einfluss zu haben als externe Rückmeldesignale, da die Entscheidungskriterien zur manipulierten Seite verschoben werden. Die Leistung nähert sich asymptotisch einem Leistungsniveau an, in dem sich interne und externe Signale die Waage halten. Die Zeit, bis dieses Leistungsniveau erreicht wird, ist wesentlich länger, als wenn externe und interne Signale übereinstimmen. In Experiment A1 verbessern sich die Probanden nach der Feedbackkorrektur auf Werte, die über der Anfangsleistung liegen. Dies könnte darauf hinweisen, dass die Verschiebung der Entscheidungskriterien bereits während der ersten 80 Nonienpräsentationen induziert wird. Dieser Prozess könnte durch den großen Unterschied der Versetzungsweiten beschleunigt werden, da die Reize besser diskriminiert werden können und damit die Klassenzugehörigkeit schneller gelernt wird. Aus diesen Gründen könnte nach der Korrektur des Feedbacks auch die erneute Verschiebung der Entscheidungskriterien schneller auftreten. In Versuch A2 wurden die Versetzungsunterschiede der gezeigten Nonien so klein gewählt, dass die Probanden die unterschiedlich versetzten Nonien nicht unterscheiden konnten. Vor und nach dem Versuch entsprach die Leistung für Nonien der Versetzungsweite des großen Partnernonius und des Einzelnonius mit 50% korrekter Antworten der Ratewahrscheinlichkeit. Die verschiedenen Versetzungen der Nonien haben zu keinen deutlich unterscheidbaren Signalen auf der Entscheidungsebene geführt. Dennoch waren auch bei den Ergebnissen dieses Experiments die Leistungen für die einzelnen Versetzungen entsprechend der wirklichen Versetzungsunterschiede gestaffelt. Die Leistung der Probanden für den großen Partnernonius liegt während der Präsentation mit reversem Feedback statistisch signifikant über der Leistung für den kleinen Partnernonius. Auch bei ungeübten Beobachtern ist das visuelle System in der Lage, Versetzungsunterschiede um die 3“ zumindest unterbewusst zu unterscheiden. Dieses Ergebnis liefert einen ersten Hinweis dafür, dass die Entscheidungskriterien nicht nur am Ende einer Verarbeitungskaskade auf einer kognitiv zugänglichen Ebene operieren.

Bei Herzog & Fahle (1999) wurde in Experiment 5 statt der üblichen Korrektur der Rückmeldesignale für zwei Blöcke kein Feedback gegeben. Die Leistung der Versuchspersonen blieb dabei nahezu unverändert. Im ersten Teil von Experiment A3 wurde nach einer Trainingsphase von sieben Blöcken mit reversen Rückmeldesignalen das Feedback für alle Nonien für die Dauer von sieben Blöcken ausgeschaltet. Das Ergebnis zeigt eine deutliche Verbesserung der Probanden lediglich für den großen Partnernonius, der vorher keine reversen Rückmeldesignale erhalten hat. Diese Leistungsverbesserung ist dabei wesentlich langsamer als der Leistungsanstieg nach Korrektur des Feedbacks. Die Leistung für den kleinen Partnernonius, der reverses Feedback erhalten hatte, verändert sich nur leicht. Für den Einzelnonius verschlechtern sich die Probanden signifikant während der Präsentation ohne Rückmeldungen. Diese Leistungsänderungen könnten durch eine Rückverschiebung der Entscheidungskriterien zustande kommen. Allerdings wäre in diesem Fall auch eine Verbesserung der Leistung für den kleinen Partnernonius zu erwarten. Wie Herzog (1996) und Broos (2000) zuvor schon ausführten, scheinen die Versuchspersonen bei Nonienpräsentationen ohne Rückmeldesignale von einer Gleichverteilung der Nonien auf beide Antwortklassen auszugehen. Diese a priori Annahme könnte zu diesem Leistungsverlauf nach dem Abschalten des Feedbacks führen. Die Leistung für den kleinen Partnernonius bleibt konstant, während sich die Leistungen für die beiden Nonien mit den größeren Versetzungen innerhalb der sieben Blöcke ohne Feedback immer weiter annähern. Dabei gleicht sich auch der bei der Präsentation mit Feedback induzierte Bias immer mehr aus. Die Verschiebung von Entscheidungskriterien kann, wie Experiment A3 zeigt, wiederholt werden. Allerdings wird das Leistungsniveau für die einzelnen Nonien viel früher erreicht als bei der ersten Darbietung von manipulierten Rückmeldesignalen.

Einen ersten Hinweis darauf, dass der beobachtete Verschiebungseffekt reizspezifisch ist, gibt der zweite Teil dieses Experiments. Der zu Beginn der Versuche vorhandene Bias für horizontal versetzte Nonien auf die rechte Seite lässt sich nach der Induktion eines Bias auf die linke Seite für vertikale Nonien nicht mehr nachweisen. Dabei ist diesem schon vorhandenen oder auch natürlichen Bias ein nicht so starker Einfluss zuzuschreiben, da er nicht der

Aufgabe spezifisch zugeordnet ist. Der mit vertikalen Nonien induzierte Bias überträgt sich nicht auf horizontale Nonien, die Leistungen für beide Antwortmöglichkeiten liegen bei der Ratewahrscheinlichkeit von 50%. Bei der anschließenden Präsentation von horizontalen Nonien mit manipuliertem Feedback sieht man in den Lernverläufen keine große Dynamik. Die Leistungen der Probanden ändern sich während des Trainings nicht statistisch signifikant. Trotzdem zeigt sich an dem gleich zu Beginn dieser Bedingung vorhandenen Bias und an den vorhandenen Leistungsänderungen eine Verschiebung von Entscheidungskriterien. Da der horizontale kleine Partnernonius die entgegengesetzte Versetzungsrichtung im Vergleich zum vorher gezeigten vertikalen kleinen Partnernonius im ersten Teil des Experiments hat, ist der Bias der Probanden auf die entgegengesetzte Seite gerichtet. Bei der anschließenden Probepäsentation von vertikalen Nonien zeigt sich, dass sich der am Anfang des Experiments induzierte Bias mit vertikalen Nonien erhalten hat. Bei der Wiederholung von Bedingung V1 für drei Beobachter sind die Leistungsniveaus für alle drei vertikalen Nonien trotz der Induktion eines Bias für horizontale Nonien nahezu gleich geblieben. Die Leistung der Probanden für Nonien einer Orientierung scheint durch eine Verschiebung von Entscheidungskriterien von orthogonalen Sehzeichen nicht beeinflusst zu werden.

Das Experiment A4 zeigt, dass der Verschiebungseffekt weder durch eine globale Analyse von motorischen Bewegungen, noch durch eine globale Analyse des Bias der Rückmeldesignale zustande kommt. Es wurden auf zwei Positionen im Gesichtsfeld jeweils drei Nonien mit der Anordnung zum Verschiebungseffekt präsentiert. Die kleinen Partnernonien auf beiden Positionen wurden auf die entgegengesetzten Seiten versetzt gezeigt und erhielten reverses Feedback. Mit diesem Aufbau wurden insgesamt ungefähr gleich viele rechts- wie linksversetzte Nonien gezeigt. Für beide Positionen ergaben sich die für den Verschiebungseffekt typischen Leistungskurven mit einer Abnahme der Leistung für die beiden Partnernonien und einer Leistungssteigerung für den Einzelnonius. Nach der Korrektur des Feedbacks zeigt sich eine sprunghafte Verbesserung auf beiden Positionen. Die Entscheidungskriterien sind auf beiden Präsentationsorten entgegengesetzt

verschoben worden. Dadurch wird eine globale Analyse der Motorik oder der Rückmeldesignale als Erklärung für den Verschiebungseffekt unwahrscheinlich. Wie in Versuch A1, im Vergleich mit den Versuchen von Herzog & Fahle (1999), führt die Präsentation von Nonien mit einem größeren Unterschied der Versetzungen zu einer zwar vorhandenen aber doch schwächer ausgeprägten Beeinflussung des großen Partnernonius. Der Verschiebungseffekt scheint sowohl reiz- als auch positionsspezifisch zu sein. In dem Kontrollexperiment A5 trainierten die Probanden mit dem gleichen Versuchsaufbau zum Verschiebungseffekt, allerdings erhielt der kleine Partnernonius anstatt von reversen Rückmeldesignalen kein Feedback. Die Rückmeldesignale für die beiden Nonien mit der größeren Versetzung waren korrekt. Das Ergebnis zeigt einen ungeordneten Verlauf, der sich statistisch nicht beschreiben lässt. Ab dem dritten Block scheinen die Nonien der verschiedenen Versetzungen für das System ununterscheidbar zu sein. Auch bei der folgenden Präsentation mit korrektem Feedback für alle Nonien zeigt sich keine Änderung der Leistungskurven. Sowohl bei Herzog & Fahle (1999) als auch bei Broos (2000) zeigt sich, dass bei Experimenten mit manipulierten Parametern wie unkorreliertem Feedback oder statistischen Häufungen der gezeigten Versetzungen Lernen verhindert wird. Auch bei diesem Versuch kommt es zu keinem Lernen, auch für Nonien mit Versetzungsweiten und korrekten Rückmeldesignalen, deren Präsentation unter anderen Versuchsbedingungen in früheren Versuchen zu einem Lernerfolg geführt haben. Interne Kriterien werden dafür verantwortlich gemacht, dass Lernen unter manipulierten Versuchsbedingungen auch für die nichtmanipulierten Sehzeichen unterdrückt wird.

#### 4.1.2 Versuche mit dichoptischer Präsentation der Nonien

Im zweiten Teil dieser Arbeit wurden Versuche mit dichoptischer Präsentation von Nonien durchgeführt. Diese Experimente sollen dazu dienen, die monokularen Anteile beim perzeptuellen Lernen zu untersuchen. Da bisher noch nicht viele Versuche mit diesem Aufbau durchgeführt wurden, ist über die monokulare Verarbeitung der visuellen Information wenig bekannt.

Bei der Verbindung der Versuche zum Verschiebungseffekt mit den Versuchen mit dichoptischer Noniendarbietung in Experiment B zeigt sich, dass auch in diesem Experiment der große Partnernonius durch die manipulierten Rückmeldesignale beeinflusst wird. Da es auch hier nach der Feedbackkorrektur zu einem sprunghaften Leistungsanstieg für die beiden Partnernonien kommt, ist auch hier eine Anpassung von Entscheidungskriterien als Erklärung sehr wahrscheinlich. Dabei muss die Entscheidungsebene Informationen aus beiden Augen erhalten. Der Wechsel der Präsentation des kleinen Partnernonius vom dominanten auf das nichtdominante Auge in Block 8 zeigt eine deutliche Änderung der Leistung der Probanden vor allem für den großen Partner. Der Wechsel der Augen hat einen Einfluss auf die Leistung der Probanden. Dies könnte mit einer unterschiedlichen Sehfähigkeit der Versuchspersonen auf beiden Augen oder der unterschiedlichen Priorität der Informationen aus dem dominanten und dem nichtdominanten Auge zusammenhängen. Die Leistungsveränderungen sind jedoch so unspezifisch, dass eine genaue Interpretation der Ursachen beziehungsweise der Mechanismen unmöglich wird. Nach der Korrektur des Feedbacks sind die Leistungen für alle Nonien annähernd gleich und verändern sich auch nach nochmaligem Wechsel der Augenprojektion nicht mehr. Auch bei der dichoptischen Präsentation von Nonien mit dem Versuchsaufbau zum Verschiebungseffekt kommt es zu einer Verschiebung von Entscheidungskriterien. Dies zeigt den starken Einfluss von externen Rückmeldesignalen auf den Lernverlauf, da unter anderen Versuchsbedingungen Lernen durch die dichoptische Nonienpräsentation verhindert wird (siehe Broos (2000)). Experiment A2 hat gezeigt, dass

Entscheidungskriterien wahrscheinlich schon auf früheren Stufen der visuellen Informationsverarbeitung wirksam sind. Das Ergebnis von Experiment B macht ein Operieren von Entscheidungskriterien bereits auf monokularer Ebene unwahrscheinlich.

Um einen genaueren Aufschluss über das Lernverhalten der beiden Augen zu erhalten, wurden in Versuch S1a bei Broos (2000) dichoptisch Nonien so auf beide Augen projiziert, dass Nonien, die dem dominanten Auge präsentiert wurden, zu 75% auf eine Seite versetzt waren. Nonien, die dem nicht dominanten Auge präsentiert wurden, waren zu 75% auf die andere Seite versetzt. Die Versetzungsweiten waren für beide Augen gleich. Es zeigte sich, dass sich die Probanden auf dem dominanten Auge nicht verbessern konnten. Für das nichtdominante Auge verbesserten sie sich dagegen so deutlich, dass es insgesamt zu einer signifikanten Leistungssteigerung kam (siehe Abbildung 11 und 12 bei Broos (2000)). Wahrscheinlich kommt dieser Effekt durch eine bessere Sehleistung auf dem dominanten Auge zustande. Da Versuchspersonen bei Experimenten ohne Rückmeldesignale scheinbar eine Gleichverteilung der Reize annehmen, müssten sie eine Ungleichverteilung auf dem Auge mit der besseren Diskriminationsfähigkeit wahrnehmen. Auf dem Auge mit der schlechteren Diskrimination müssten sie sich dann kompensatorisch häufiger für die andere Versetzungsseite entscheiden, um insgesamt ungefähr gleich häufig beide Antwortmöglichkeiten zu wählen. Da während der Vorversuche das dominante Auge und das Auge mit der besseren Sehleistung nicht immer übereinstimmten, wurde bei den Versuchen dieser Arbeit anstatt des dominanten und des nicht dominanten Auges das Auge mit der besseren und der schlechteren Sehleistung verwendet. Wenn diese Theorie richtig ist, würde es in Versuch C1 auf dem schlechteren Auge zu einer deutlichen Verbesserung für rechtsversetzte Nonien und einer Verschlechterung für linksversetzte Nonien kommen. Wie in Abbildung 19 zu erkennen ist, treffen diese Vorhersagen zu. Die Leistungen auf dem besseren Auge nähern sich während der Trainingsphase immer mehr an. Für das schlechtere Auge kommt es insgesamt zu einer leichten Leistungsverschlechterung. Die Leistung für rechtsversetzte Nonien auf dem

schlechteren Auge steigt signifikant an, während die Leistung für linksversetzte Nonien abnimmt.

Was passiert aber, wenn keine unterschiedliche Verteilung der Versetzungsweiten besteht? In Versuch C2 trainierten die Versuchspersonen mit einer Gleichverteilung der Nonien auf beiden Augen. Nonien wurden gleich häufig dem linken und dem rechten Auge präsentiert und hatten gleich oft eine Versetzung nach links und rechts. Wie Abbildung 20 verdeutlicht, bleiben die Leistungen auf beiden Augen während des ganzen Experiments konstant. Unter diesen experimentellen Bedingungen lassen sich die Daten am besten durch Verschiebungen von Entscheidungskriterien erklären. Veränderungen, die mit einer Anpassung von rezeptiven Feldern in Verbindung stehen, scheinen nicht wahrscheinlich. Die Verschiebung von Entscheidungskriterien wird bei den Experimenten durch unterschiedliche Effekte verursacht. Zum einen durch manipulierte Rückmeldesignale zum anderen durch die a priori Annahme einer Gleichverteilung der Versetzungsseiten der Sehzeichen verbunden mit einer auf einem Auge besseren Wahrnehmungsleistung.

Überraschenderweise hat Feedback trotzdem eine Wirkung auf den "Nicht-Lernverlauf". Entsprechend zu den Versuchen bei Broos (2000) kommt es bei dichoptischer Präsentation der Nonien, wenn nur das dominante Auge Rückmeldesignale erhält, zu keinem Lernerfolg. Trotzdem zeigt sich nach einem Wechsel des Feedbacks vom dominanten auf das nichtdominante Auge eine Leistungsverschlechterung. Die Leistungen auf beiden Augen sind vor dem Wechsel gleich hoch, und auch die Feedbackrate ist in beiden Versuchsbedingungen dieselbe. Bei der Durchführung dieses Versuchs in umgekehrter Reihenfolge mit Feedback für das nichtdominante Auge in Versuchsbedingung 1 für sechs Beobachter zeigt sich dieser Effekt deutlich schwächer ausgebildet.

## 4.2 Implikationen für mathematische Modelle

Die Ergebnisse der Experimente des ersten Teils dieser Arbeit unterstreichen die Resultate vorangegangener Versuche zum Verschiebungseffekt. Die Änderung der Entscheidungskriterien scheint dabei vor allem von der Präsentation von Nonien mit manipuliertem aber konstantem Feedback abzuhängen. Änderungen der Anzahl der präsentierten Nonien, der Versetzungsweiten oder der Orientierung der Sehzeichen scheinen keinen Einfluß auf diesen Effekt zu haben. Außerdem scheint dieser Effekt sowohl orientierungsspezifisch, als auch positionsspezifisch bezüglich des Projektionsortes auf der Retina der Beobachter zu sein. Das zeigen die Experimente A3 und A4.

Was bedeutet dies für Modelle des Lernens und Entscheidens? Wie in Herzog & Fahle (1999) ausgeführt, lässt sich der beobachtete Verschiebungseffekt am Besten dadurch erklären, dass keine Veränderungen auf den sehr frühen Stufen der visuellen Wahrnehmung wie zum Beispiel eine Modifikation der Eigenschaften von rezeptiven Feldern eintreten. Es scheint viel plausibler, dass allein eine Verschiebung von Entscheidungskriterien stattgefunden hat. In dem Modell von Herzog & Fahle (1998) findet eine Modifikation der Eigenschaften der rezeptiven Felder auf den frühen Stufen der Wahrnehmung nur dann statt, wenn auf der Entscheidungsebene kein zu starker Bias errechnet wird. In allen anderen Fällen versucht sich das System durch ein Veto-Signal davor zu schützen, dass Reize gelernt werden, die auf der Entscheidungsebene einen Fehler anzeigen. Überraschenderweise zeigen die Experimente A3 und A4, dass die Signale auf der Entscheidungsebene sowohl reiz- als auch positionsspezifisch verarbeitet werden, was bedeutet, dass der Bias auf diesen Ebenen getrennt ermittelt werden muss. Es gibt somit nicht nur eine Entscheidungsebene.

Allerdings ist selbst das differenziertere Modell von Herzog & Fahle (1999), in dem frühe Signalverarbeitungs- und Entscheidungsebenen hintereinander geschaltet sind, nicht ausreichend. Das zeigt Experiment A2. Dieser Versuch kann als das Gegenstück zu Versuch A1 gesehen werden, in dem gar keine

Separierung der Signale auf der Entscheidungsebene existiert. Trotzdem ergibt sich eine versetzungsspezifische Verschlechterung für die einzelnen Reize. Dieses Phänomen kann mit der Annahme erklärt werden, dass die Analyse von Entscheidungskriterien bereits auf den frühen Stufen der Wahrnehmung operiert. Dies kann leicht durch eine Erweiterung des Modells von Herzog & Fahle (1998) erreicht werden. Ein operieren der Entscheidungssignale auf den ganz frühen Stufen der Wahrnehmung macht das Ergebnis von Experiment B unwahrscheinlich, da die Entscheidungsebene Informationen von beiden Augen zu erhalten scheint.

Die Rolle der Rückmeldesignale bleibt weiterhin unklar. Der starke Einfluss des Feedbacks auf den Lernverlauf wird auch in den Resultaten dieser Arbeit deutlich. Die gute Übereinstimmung mit den Resultaten des Experiments F1 von Broos (2000) zeigt, dass Feedback, auch wenn es zu keinem Lernerfolg kommt, einen Einfluss auf die Leistung der Versuchspersonen hat. Dabei scheinen Rückmeldesignale, die für das dominante Auge generiert werden, einen stärkeren Einfluss auf den Lernverlauf zu haben, als Rückmeldesignale, die für das nichtdominante Auge generiert werden.

## Kapitel 5

### Zusammenfassung

Die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen Resultate und Hypothesen aus vorangegangenen Arbeiten. Die Präsentation von Nonien mit manipuliertem, aber konstantem, Feedback mit dem Versuchsaufbau zum Verschiebungseffekt führt zu Leistungsänderungen, die eine Verschiebung von Entscheidungskriterien auf der Entscheidungsebene als sehr wahrscheinlich erscheinen lassen. Veränderungen, die mit einer Anpassung von neuronalen Netzen einhergehen, sind zur Erklärung dieses Effekts dagegen weniger plausibel. Dabei kommt es bereits zu Beginn der Versuche zu Änderungen auf der Entscheidungsebene. Der Verschiebungseffekt erweist sich gegenüber Änderungen des Versuchsaufbaus wie Nonienanzahl, Unterschiede der Versetzungen und dichoptischer Präsentation als sehr stabil. Der Verschiebungseffekt ist damit in erster Linie von der Anzahl der Präsentationen von Nonien mit reversen Rückmeldesignalen abhängig. Eine Erklärung des Verschiebungseffekts durch eine Analyse des Bias der Motorik oder der Rückmeldesignale konnte ausgeschlossen werden. Überraschenderweise zeigt sich für Entscheidungskriterien sowohl eine Positions-, als auch eine Orientierungsspezifität. Dies bedeutet, dass beim perzeptuellen Lernen mehrere Entscheidungskriterien unabhängig voneinander verändert werden können. Dabei scheinen die Entscheidungskriterien weder auf den späten, noch auf sehr frühen Stufen der visuellen Verarbeitung zu operieren. Bereits bestehende Modelle zum perzeptuellen Lernen müssen dahingehend erweitert werden.

Die Leistungsänderungen bei den Experimenten mit dichoptischen Präsentationen von Nonien in dieser Arbeit können ebenfalls am Besten mit einer Verschiebung von Entscheidungskriterien erklärt werden. Die Änderungen auf der Entscheidungsebene werden dabei durch unterschiedliche Mechanismen, wie externe Rückmeldesignale oder durch eine auf beiden Augen verschiedene Sehleistung, zusammen mit der Annahme einer

Gleichverteilung der Nonien bei Experimenten ohne Feedback, hervorgerufen.  
Es bedarf weiterer Experimente, um das Zusammenspiel der verschiedenen  
Effekte, die beim perzeptuellen Lernen wirksam werden, zu verstehen.

## Kapitel 6

### Literatur

Bach M. (1995).  
Der Freiburger Visustest.  
*Der Ophthalmologe* 92, 174-178.

Barlow H.B. (1979).  
Reconstructing the visual image in space and time.  
*Nature*, 279, 189-190.

Burr D.C. (1979).  
On the visibility and appearance of objects in motion.  
*D. Phil. Thesis*, University of Cambridge.

Fahle M., De Luca (1994).  
Spatio-Temporal Interpolation in Depth.  
*Vision Research*, 34, 343-348.

Fahle M., Edelman S., Poggio T. (1995).  
Fast perceptual learning in visual hyperacuity.  
*Vision Research*, 35, 3003-3013.

Fahle M. (1987).  
Auflösung und Überauflösung- von den Grenzen visueller Auflösung.  
*Medizinische Habilitationsschrift, Universität Tübingen*.

Fahle M. (1991).  
Sinnesphysiologie der „Überauflösung“: Wahrnehmung jenseits des  
Photorezeptoren-Durchmessers.  
*Stuttgart: Enke*.

Fechner G.T. (1860).  
Elemente der Psychophysik.  
*Leipzig: Breitkopf und Härtel*.

Felleman-DJ, Van-Essen-DC. (1994).  
Multiple processing streams in occipitotemporal visual cortex.  
*Nature*, 371(6493), 151-4.

Green D., Swets J. (1966).  
Signal Detection Theorie and Psychophysics.  
*Huntington, New York: Robert E. Krieger Publishing Company*.

Herzog M.H., Fahle M. (1994).

- Learning without attention.  
*Proceedings of the 22<sup>nd</sup> Göttingne Neurobiology Conference 1994.*  
 Volume II, No. 817; Elsner N., Breer H.; Thieme Stuttgart.
- Herzog (1996).  
 Mathematische Modelle und Experimente zum perzeptuellen Lernen.  
*Dissertation, Universität Tübingen.*
- Herzog M.H., Fahle M. (1997a).  
 Effects of biased feedback on learning and deciding in a vernier discrimination task.  
*Inverstigative Ophthalmology & Visual Science No. 38/4/4460.*
- Herzog M.H., Fahle M. (1997c).  
 The role of feedback in learning a vernier discrimination task.  
*Vision Research, 37, 2133-2142.*
- Herzog M.H., Fahle M. (1998a).  
 Modeling perceptual learning: difficulties and how they can be overcome.  
*Biological Cybernetics, 78, 107-117.*
- Hubel D. (1989).  
 Auge und Gehirn: Neurobiologie des Sehens.  
*Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft, 1989-238S.*
- Karni A., Sagi D. (1991).  
 Where Practice Makes Perfect in Texture Discrimination:  
 Evidence for Primary Visual Cortex Plasticity.  
*Proceedings of the National Academy of Science, 88, 4966-4970.*
- Marr D. (1982).  
 Vision.  
*Freeman, San Francisco.*
- McKee S.P., Westheimer G.(1978).  
 Improvement in vernier acuity with practice.  
*Perception & Psychophysics, 24, 258-262.*
- Poggio T., Fahle M., Edelman S. (1992).  
 Fast learning in visual hyperacuity.  
*Science, 256, 1018-1021.*
- Shapley R., Caelli T., Grossberg S., Morgan M., Rentschler I. (1990).  
 Computational Theories of Visual Perception. In: Spillmann L., Werner J.S.(eds.).  
 Visual Perception, The Neurophysiological Foundations, Academic Press Inc.
- Shiu L., Pashler H.(1992).

Improvement in line orientation discrimination is retinally local but dependent on cognitive set.

*Perception & Psychophysics*, 52 (5), 582-588.

Shannon C.E. (1948).

A mathematical theory of communication.

*Bell System Technical Journal*, 27, 623-656.

Sowden P.T. (1996).

On Perceptual Learning.

*PhD Thesis*, University of Surrey.

Snyder A.W. (1982).

Hyperacuity and interpolation by the visual pathways.

*Vision research*, 22, 1219-1220.

Taylor M.M., Creelman C.D. (1967).

PEST: Efficient estimates on probability functions.

*The Journal of the Acoustical Society of America* 41, 782-787.

Weiss Y., Edelman S., Fahle M. (1993).

Models of Perceptual Learning in Vernier Hyperacuity.

*Neural Computation*, 5, 695-718.

Westheimer G. (1954).

Eye movement response to a horizontally moving visual stimulus.

*Archs. Ophthalm.*, N.Y., 52, 932-941.

## **Danksagung**

Zuerst möchte ich mich bei Prof. Dr. M. Fahle für die Überlassung des Themas und die freundliche Unterstützung bedanken. Mein ganz besonderer Dank gilt Prof. Dr. M. Herzog für die geduldige Betreuung. Ohne sein Engagement und seine Hilfestellungen wäre diese Arbeit nie zustande gekommen.

Martina Stein und Frau Weller waren mir ebenfalls eine große Hilfe, vor allem in organisatorischen Fragen. Meine Schwester Eva Ewald und Mathias Schwardt haben mir bei der Korrektur der Arbeit sehr geholfen.

Schließlich möchte ich mich noch bei meinen Eltern Brunhilde und Rolf Ewald für ihre Unterstützung bedanken.

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name: Knut Richard Fritz Ewald  
Geburt: 19. Mai 1973 in Horb a. Neckar  
Familienstand: ledig

## Schulbildung

1979 – 1983 Grundschule: Goetheschule, Asperg  
1983 – 1992 Friedrich-List-Gymnasium, Asperg

## Zivildienst

1992 – 1993 individuelle Schwerstbehindertenbetreuung,  
DRK-Ludwigsburg

## Studium

1993 – 1995 Elektrotechnik, Universität Stuttgart  
1995 – 2002 Humanmedizin, Eberhard-Karls-Universität, Tübingen  
16.05.2002 Abschluß: Staatsexamen  
Auslandssemester: Universidad de Extremadura,  
Badajoz, Spanien  
Praktisches Jahr: Universidad de los Andes, Merida,  
Venezuela; Katharinenhospital, Stuttgart

## Beruf

2002 – 2004 Arzt im Praktikum, Katharinenhospital, Stuttgart