

**Untersuchungen zur Visuomotorik des Menschen.
Zeitliche Verzögerung der visuellen Rückmeldung und
intermanueller Transfer**

Dissertation
zur Erlangung des Grades
"Doktor der Naturwissenschaften"

am Fachbereich Biologie
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Georg Stephan Hoffmann
geb. am 17.04.1974 in Alicante

Mainz, 2004

Inhaltsverzeichnis:

Abstract

	Seite
<u>1. Einleitung</u>	1
1.1 Die Visuomotorik: Auge-Hand-Koordination	1
1.2 Die visuomotorische Differenz	2
1.3 Die Sehbahnen und die Projektion im Gehirn	4
1.4 Das Reafferenzprinzip	5
1.5 Die Fragestellungen der Arbeit	6
<i>1.5.1 Die zeitliche Verzögerung des visuellen Feedbacks</i>	6
<i>1.5.2 Der Intermanuelle Transfer</i>	7
<u>2. Material und Methode</u>	8
2.1 Die Prismenversuche	8
2.2 Der Versuchsaufbau mit Digitalisierungstabledt	10
2.3 Die Versuchsgliederung: Adaptations- und Folgeeffektphase	12
2.4 Die Durchführung des Versuches	13
2.5 Die Reaktionen der Versuchspersonen	14
2.6 Die Variationen der Versuchsparameter	16
<i>2.6.1 Die zeitliche Verzögerung des visuellen Feedbacks Δt</i>	16
<i>2.6.2 Die Dauer die Zieldarbietung x_t</i>	17
<i>2.6.3 Der Intermanueller Transfer</i>	17
<i>Lernübertragung von der aktiven auf die passive Hand</i>	
<u>3. Ergebnisse</u>	20
3.1 Die Vorversuche	20
3.1.1 <i>Der Vorlesungsversuch</i>	20
3.1.2 <i>Die Adaptationsbewegungen mit und ohne visuelle Rückmeldung</i>	21
3.1.3 <i>Der intermanuelle Transfer I</i>	24
3.1.4 <i>Die zeitliche Verzögerung des visuellen Feedbacks I</i>	27
3.1.5 <i>Der Intermanuelle Transfer II</i>	30
<i>und die zeitliche Verzögerung des visuellen Feedbacks II</i>	
3.1.6 <i>Der intermanuelle Transfer bei der visuelle Rückmeldung der richtigen und der falschen Hand</i>	33
3.1.7 <i>Die Darstellungsdauer des optischen Zielkreuzes</i>	34
3.1.8 <i>Zusammenfassung der Vorversuche</i>	35
3.2 Die Hauptversuche	37
3.2.1 <i>Die Versuche zur zeitlichen Verzögerung des visuellen Feedbacks Δt</i>	37
3.2.1.1 <i>Die Adaptation</i>	37
3.2.1.2 <i>Der Folgeeffekt</i>	43
3.2.1.3 <i>Wirkung der zeitlichen Verzögerungen auf den Folgeeffekt</i>	46
3.2.2 <i>Die Versuche zum intermanuellen Transfer</i>	52
3.2.2.1 <i>Die Versuchsdurchführung</i>	52
3.2.2.2 <i>Die Referenzmessung</i>	53
3.2.2.3 <i>Die Auswertung unter Berücksichtigung der Beziehung zwischen Hemisphäre und Hand</i>	54
3.2.2.4 <i>Die individuelle Auswertung</i>	59

<u>4. Diskussion</u>	73
4.1 Das minimale visuelle Feedback	73
4.2 Der Adaptationsverlauf	73
4.3 Die Bewertung des Nacheffekts / Folgeeffekts	74
4.4 Die Richtung des intermanuellen Transfers	75
4.5 Ausblick	76
<u>5. Zusammenfassung</u>	78
<u>Literaturverzeichnis</u>	81
<u>Anhang</u>	87
Daten zur zeitlichen Verzögerung des visuellen Feedbacks	88
Daten zum intermanuellen Transfer (Projektion)	96

Abstract

Movement-precision is controlled by visual feedback. With technical means, e.g. prismgoggles, differences between optical perception and haptic experience can be induced to test the human visuomotoric system, specially its flexibility to compensate for induced differences between visual and haptic input. In this study a new computer-based method was developed to simulate a visuomotoric displacement: On a digitalisation tablet a target is presented which the subjects try to hit with a ballistic arm-movement. The subjects observe the target by looking into a mirror which projects a monitor picture - a black cross on a white background - onto the surface of the digitalisation tablet. The position of a hit is mapped by the tablet and can be presented as a point on the monitor. The subjects therefore see the target on the tablet and perceive their visual feedback of the movement by watching the presented points. The digitalizing area of the tablet is controlled by the PC and a visuomotoric difference can be simulated by displacing the area of the tablet.

The interest of the main experiment is in time-delayed visual feedback and intermanual transfer.

The results showed:

- The subjects adapt to spatial displacement. The course of the adaptation can be calculated with an exponential function
- The adaptation is independent from the type of visual feedback. Observed movements of the hand during the adaptation show the same results as observing only a projection of a point representing the mark set.
- The exponential course of the adaptive process is independent from a tested delay of the visual feedback.
- With increasing time-delay of the visual feedback, the strength of the “past-effect” decreases during adaptation. As a result, the efficiency of an adaptation decreases with increasingly delayed visual feedback.
- The “past-effect” varies for individuals, i.e. subjects adapt differently to simulated displacements. A correlation between visuomotoric challenges in the subject’s history and the individual “past-effect” was detected. The human visuomotoric system is trainable and, depending upon its status, adapts differently to a perceived displacement.
- The intermanual transfer was demonstrated under different conditions.
- If the perceived visuomotoric difference between aim and hit-spot is projected in one brain hemisphere and the “past-effect” is performed with the hand controlled by this hemisphere, a clearly stronger “past-effect” can be observed. The intermanual transfer is therefore advantageous, if the hemisphere which is passive during the adaptation acquires the visual projection of the visuomotoric difference.

1 Einleitung:

1.1 Die Visuomotorik: Auge-Hand-Koordination

Nahezu jede Bewegung, die man in der Umwelt durchführt, wird sensorisch über den optischen Sinn kontrolliert. Tatsächlich benötigt man zunächst die gesammelten Informationen über die Umwelt, um kontrolliert in dieser agieren oder reagieren zu können. Durch die Wahrnehmung wird ein Modell der Umwelt konstruiert, welches es ermöglicht die motorischen Handlungen zielgerichtet durchzuführen. Dabei wählt man beispielsweise ein Zielobjekt aus, visiert es mit den Augen an und leitet ein motorisches Signal an die Muskeln, um das Objekt anzufassen oder aufzuheben. Wie das motorische Signal aussehen muss, damit sich die Muskeln entsprechend zielgerichtet bewegen, hat man im Laufe des Lebens durch die visuelle Kontrolle gelernt und dieses visuomotorische Kontrollsystem ist fortwährend aktiv. Man beobachtet ständig die eigenen komplexen Bewegungen, um nicht mit der Umwelt zu kollidieren, zumal sich diese laufend ändert. Bereits ganz einfache Bewegungen sind von dieser Kontrolle betroffen. Fixiert man den Stift auf dem Schreibtisch, schließt die Augen und greift danach, scheint die Aufgabe noch ganz simpel; erinnert man sich aber an die Kaffeetasse, die noch weiter rechts am Tischrand steht und versucht sie mit immer noch geschlossenen Augen zu greifen, wird es schon etwas komplizierter und die Bewegung vorsichtiger, meist durch Tasten kontrolliert. Der Mensch verlässt sich in hohem Maße auf seine optische Wahrnehmung und steuert sich ständig über das visuelle Feedback seiner Handlung in der Umwelt.

Das visuomotorische Kontrollsystem ist wie zuvor erwähnt nicht statisch, sondern muss erst erlernt werden. Motorische Folgereaktionen sind bei Säuglingen bereits ab der Geburt zu beobachten. So folgen sie mit den Augen interessanten visuellen Reizen. Ab dem dritten Monat beginnen Säuglinge die eigenen Hände und deren Bewegungen zu beobachten und nach der eigenen Hand zu greifen. In dieser Phase lernen und üben sie den Zusammenhang zwischen visueller Wahrnehmung des eigenen Körpers und motorischer Bewegung. Die Integration dieser Informationen aus Optik und Motorik wird aber erst ab dem vierten Monat als kontrollierte Auge-Hand-Koordination durchgeführt.

Das visuomotorische System muss ständig Veränderungen der motorischen Eigenschaften kompensieren. Diese Flexibilität ermöglicht es, sich an das Wachstum des Körpers anzupassen. Durch das Längenwachstum der Gliedmaßen und die Gewichtszunahme müssen andere motorische Signale entwickelt werden, um die Muskeln entsprechend zu steuern. Das

ungleiche Körperwachstum von Armen, Beinen und Rumpf, sowie die rasche Wachstumsgeschwindigkeit während der Pubertät kann das visuomotorische System nicht vollständig ausgleichen. Dies macht sich in der Motorik bemerkbar und es kommt zu den schlaksigen, ungelassenen Bewegungen und Unsicherheiten in Bezug auf die Koordination. Ist die körperliche Veränderung abgeschlossen, passt sich das System wieder an. Doch auch im ausgewachsenen Zustand des Körpers bleibt es noch flexibel. Beispiele dafür kennt man aus dem Alltag, wie etwa die Steuerung eines unbekanntes Fahrzeuges, mit dem man sich auseinandersetzt, oder eine neue Brille, an deren optischen Eigenschaften man sich gewöhnen muss.

1.2 Die visuomotorische Differenz

Als visuomotorische Differenz wird ein Zustand bezeichnet, bei dem ein Widerspruch zwischen der visuellen und motorischen Raumvorstellung herrscht. Einfach ausgedrückt befindet sich ein Objekt nicht an der Position, wo man es sieht. Versucht man es zu greifen, greift man daneben.

Der Mediziner Johann Nepomuk Czermak beschrieb dieses Phänomen nach einer Operation an einer schielenden Person (Czermak 1855). Durch die Korrektur der Augenfehlstellung erfuhr der Patient eine visuomotorische Differenz. Anhand eines Prismenversuches erklärte er dieses Phänomen. Die Disharmonie der Raumvorstellung tritt auf, sobald die Lage eines Objektes auf der Netzhaut eine andere ist, als sie sein würde, wenn unser Auge tatsächlich auf dieses Objekt gerichtet wäre. Ein Prisma verursacht eine solche optische Verschiebung. Diese visuelle Veränderung steht nun im

Gegensatz zu unserer wahrgenommenen Stellung der Augen, die auf einen Raumpunkt gerichtet sind, der nicht mit dem Objekt übereinstimmt. Das Muskelgefühl der Augenstellung vermittelt die Vorstellung der Richtung für die Armbewegung. Da die optische Raumvorstellung nun aber nicht der haptischen, in diesem Fall realen Raumvorstellung entspricht, entsteht der Konflikt.

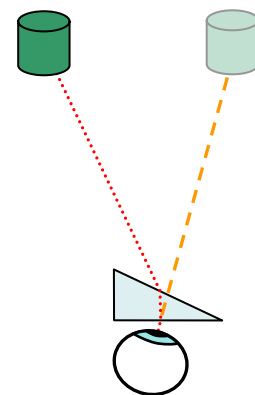


Abb. 1.1: Prismenversuch

Hermann Ludwig Ferdinand Helmholtz untersuchte und beschrieb dieses Phänomen und die Folgen (Helmholtz 1867). In seinen physiologischen Studien beschrieb er einen Versuch, bei dem man durch eine Prismenbrille ein Objekt betrachten sollte:

„Man schließe dann die Augen und versuche mit geschlossenen Augen das Objekt mit dem Zeigefinger zu treffen; man wird natürlich links daneben vorbeifahren. Wenn man aber diesen Versuch eine Weile fortgesetzt hat, oder noch schneller, wenn man die Hand in das Gesichtsfeld bringt und mit ihr kurze Zeit hindurch unter Leitung des Auges die Objekte betastet, so wird man finden, dass man bei Wiederholungen des erst beschriebenen Versuchs nicht mehr vorbeifährt, sondern die Objekte richtig trifft; ebenso auch neue Objekte, die man an Stelle der schon bekannten bringt. Hat man dies erreicht und versucht man nun, nachdem man die Hand aus dem Gesichtsfeld entfernt, die Prismen weggenommen und irgend ein Objekt angeblickt hat, dies bei geschlossenen Augen zu greifen, so wird man finden, dass man jetzt mit der Hand rechts vorbeifährt, bis durch mehrere vergebliche Versuche die Beurteilung der Richtung, in der die Augen stehen, wieder berichtigt ist.“

(Helmholtz 1867, Seite 601)

Helmholtz beschreibt hier erstmals den Nacheffekt, der bei einer visuomotorischen Adaptation auftritt. Durch die neu erlernte optisch-haptische Raumwahrnehmung mit der Prismenbrille, entsteht ohne die Prismenbrille erneut eine Differenz zwischen den beiden Raumwahrnehmungen, die wie zuvor kompensiert werden muss. Diese Readaptation geschieht jedoch sehr viel schneller, da sie auf eine lang erlernte Koordination zurückspringt. Durchaus erwähnenswert ist der folgende Abschnitt des Berichtes von Helmholtz über das Lernen der nicht aktiven Hand.

„ Dass hierbei nicht etwa das Muskelgefühl der Hand und die Beurteilung von deren Ort, sondern die Beurteilung der Blickrichtung gefälscht wird, ergibt sich daraus, dass, wenn man, durch die Prismen blickend, sich gewöhnt hat, mit der rechten Hand die gesehenen Objekte zu treffen, und man die mit der Rechten Hand berührten Objekte nun bei geschlossenen Augen mit der linken, vorher gar nicht benutzten und nicht im Gesichtsfelde gewesene Hand zu treffen sucht, man sie ganz sicher und richtig trifft. Man bestimmt also in einem solchen Falle durch das Tastgefühl den Ort vollkommen richtig und weiß ihn nach dieser Angabe durch ein anderes tastendes Organ sicher zu finden.“

(Helmholtz 1867, Seite 602)

Eine Modifikation des visuomotorischen Systems ist demnach nicht nur an die aktiven Muskelgruppen gebunden, sondern wirkt nach Helmholtz generalisiert auf die ganze Körpermotorik.

Ebenso beschreibt schon Helmholtz die bereits erwähnte Beobachtung der motorischen Entwicklung bei Säuglingen:

„ Dass vierteljährige Kinder erst sehr langsam lernen ihre Hände nach Gesichtsoobjekten hin zu dirigieren, wenn sie schon sehr gut wissen, sie nach dem Munde oder nach einer juckenden Hautstelle, also mittels Tastempfindung zu lenken, lehrt die Erfahrung. Wie also hier die Übereinstimmung zwischen Augenbewegung und Handbewegung erst durch Versuche gelernt wird, so muss ihre Genauigkeit auch bei Erwachsenen durch immer erneute Versuche und Beobachtungen fortwährend kontrolliert werden.“ (Helmholtz 1867, Seite 602)

Das beschriebene Zusammenspiel zwischen visuomotorischer Differenz und adaptivem Bewegungslernen wirft einige Fragen auf. Die Verarbeitung der visuellen Reize erfolgt im Auge und im Gehirn. Wie ein motorisches Signal für eine kontrollierte Bewegung aus der Verarbeitung entwickelt wird ist noch weitestgehend unklar. Erklärungsversuche werden im Folgenden beschrieben. Zunächst wird die Weiterleitung der visuellen Reize ins Gehirn erläutert.

1.3 Die Sehbahnen und die Projektion im Gehirn

Licht fällt durch die Pupille ins Auge. Durch die Projektion auf die Retina, wird die Umwelt dort invers abgebildet. Jedes Auge besitzt seinen eigenen monokularen Bereich, jedoch überschneiden sich ihre visuellen Regionen in einem zentralen Feld des binokularen Sehens. Aufgrund des Augenabstandes ist das Retinabild des rechten Auges nicht identisch dem des linken Auges. Die Ganglienneurone der Retina (Sehnerv – Nervus Opticus) verlaufen über das Chiasma Opticum (Sehnervkreuzung) zum Corpus Geniculatum Laterale und von dort zum visuellen Cortex. Am Chiasma werden die von der

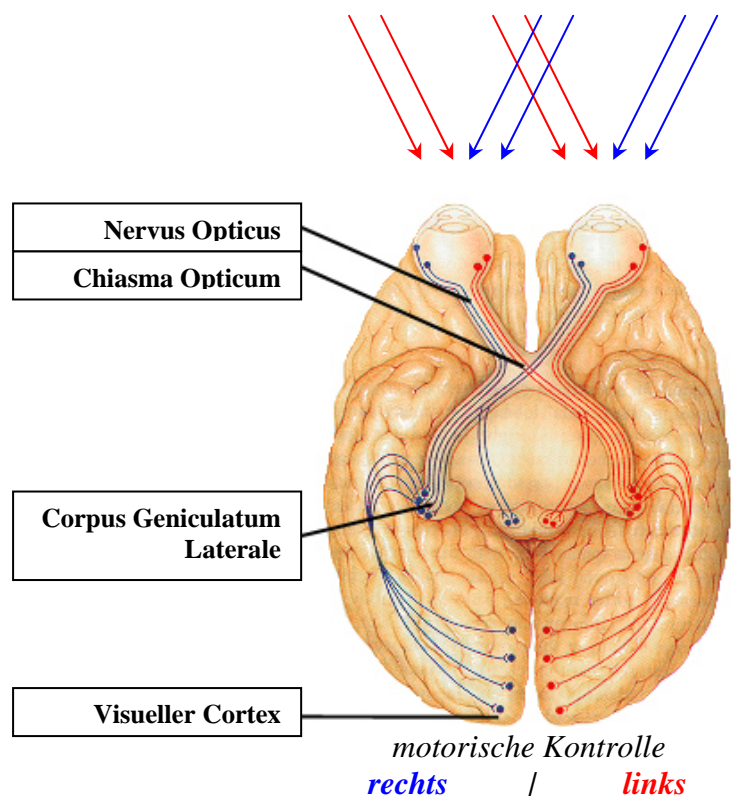


Abb. 1.2: Sehbahnen

Schläfenseite des Auges kommenden Axone in die gleiche Hirnhemisphäre geleitet, die nasenseitigen in die gegenüberliegende Hemisphäre. Diese nasale Contralateral- und temporale Ipsilateral-Projektion in den visuellen Cortex bedeutet letztlich, dass alles vom Fixierpunkt rechts im Blickfeld liegende (blau) in die linke Gehirnhälfte, alles vom Fixierpunkt links liegende (rot) in die rechte Gehirnhälfte projiziert wird. Die motorische Kontrolle des Armes erfolgt zunächst mit einer Aktivierung in der primären Region der Hirnrinde (Motor Cortex). Bei der Weiterleitung des Bewegungssignals zum Rückenmark kreuzen die Bahnen in Höhe des Hirnstammes zur Gegenseite. Im Rückenmark erfolgt daraufhin eine Umschaltung in den Motoneuronen auf die peripheren Nerven, die die Muskelgruppen steuern. Einer Bewegung der rechten Hand geht daher eine Aktivierung in der linken Hirnhemisphäre voraus und umgekehrt.

Die optischen Informationen und die motorische Kontrolle werden jeweils gleichseitig in den Hirnhemisphären verarbeitet. Visuelle Informationen, die rechts im Blickfeld liegen, werden ebenso wie die Steuerung der rechten Hand in der linken Hirnhemisphäre kontrolliert und umgekehrt.

1.4 Das Reafferenzprinzip

Erich von Holst und Horst Mittelstaedt haben 1950 ein theoretisches System erstellt, mit dem sich Bewegungen, deren Kontrolle und Verarbeitung erklären lässt: das Reafferenzprinzip (von Holst 1950).

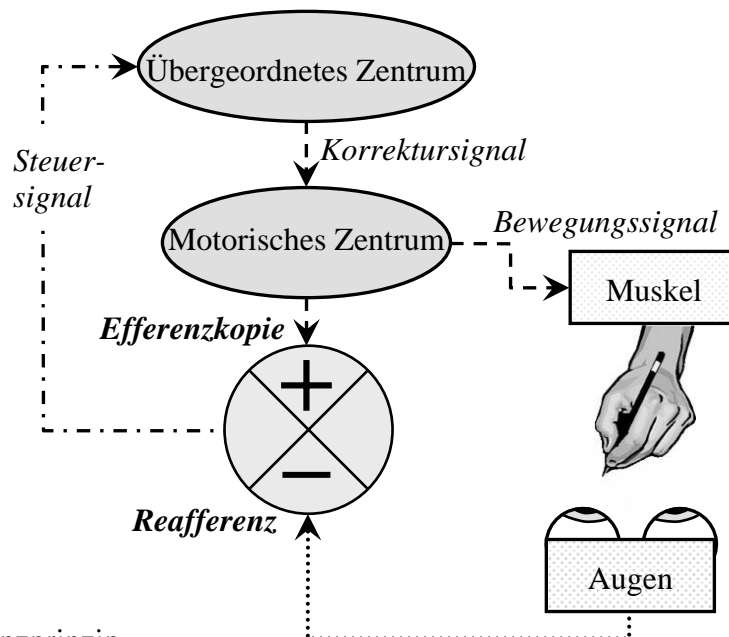


Abb. 1.3: Reafferenzprinzip

Demnach speichert das zentrale Nervensystem die selbstproduzierte Bewegung als Efferenzkopie. Die sensorischen Folgen der eigenen Aktion bezeichneten sie als Reafferenz, welche nach dem Reafferenzprinzip über einen zentralen Rückmeldeprozess mit der Efferenzkopie verrechnet wird. Stimmen Efferenzkopie und Reafferenz nicht überein, wird ein Steuersignal zur Korrektur der Efferenz und somit der Bewegung weitergeleitet. Dies nennt man die von E. von Holst und H. Mittelstaedt bezeichnete „Konstanz der objektiven Umwelt“. Sollte nun eine Differenz zwischen Efferenzkopie und der Reafferenz auftreten - wie bei einer prismatischen Verschiebung - so wird ein entsprechendes Korrektursignal weitergeleitet und das flexible visuomotorische System angepasst.

Unter normalen Umständen wird die Ausführung eines motorischen Signals direkt optisch kontrolliert und so die Efferenzkopie ohne Zeitverlust mit der Reafferenz verglichen. Ein längeres Gedächtnis, um die Efferenzkopie zu speichern, wäre daher unnötig. Sie sollte verschwinden, um nicht eine folgende Bewegung und ihre Verrechnung zu blockieren

1.5 Die Fragestellungen der Arbeit

Durch vorangegangene Versuche, die im ersten Teil der Ergebnisse beschrieben werden, entwickelten sich zwei primäre Fragestellungen, welchen im Hauptteil nachgegangen wird. Eine kurze Einleitung soll den theoretischen Hintergrund vermitteln.

1.5.1 Die zeitliche Verzögerung des visuellen Feedbacks

Im Zuge der Technisierung kommen immer mehr ferngelenkte Maschinen zum Einsatz, die über große Distanzen hinweg gesteuert werden können. Durch diese Entfernungen wie beispielsweise bei einem Mini-U-Boot, welches mehrere tausend Meter tief tauchen kann, kommt es zu zeitlichen Verzögerungen der Informationsübertragung. Koordinationen durch Schall, wie beim Sonar beispielsweise, besitzen eine lange Übertragungszeit. Eine zunehmende Zeitverzögerung der Reafferenz verhindert eine korrekte Verrechnung mit der Efferenzkopie und erschwert die Steuerung oder eine visuomotorische Anpassung. Daher wird in entsprechend wichtigen Bereichen mit großem Aufwand gearbeitet, um diese Zeitdifferenz möglichst gering zu halten, wie z.B. bei einer Tele-Operation 2001, bei der Ärzte in New York und ein Patient in Straßburg waren. Die Daten wurden hier mittels Glasfaserkabeln transferiert, wobei die zeitliche Verzögerung nur 155 msec betrug.

Wird die visuelle Rückmeldung einer Bewegung zeitlich verzögert, treffen die Reafferenz und die Efferenzkopie um eben jene zeitliche Differenz zur Verrechnung zusammen (siehe 1.4 Das Reafferenzprinzip). Bei einer Verzögerung der Reafferenz, käme es zu einer zeitlichen Entkopplung von Efferenzkopie und Reafferenz. Angenommen die Efferenzkopie verschwindet oder wird mit der Zeit kleiner, hätte dies zur Folge, dass die Verrechnung der Reafferenz mit der Efferenzkopie mangelhaft ist. Das resultierende Steuersignal würde das Verhältnis zwischen Bewegung und visueller Kontrolle nicht umweltgerecht widerspiegeln und eine Korrektur des motorischen Signals wäre dementsprechend nicht mehr oder nur bedingt möglich.

Eine hieraus entwickelte Arbeitshypothese lautet:

⇒ *Bei einer visuomotorischen Differenz bewirkt die zeitliche Verzögerung der optischen Rückmeldung eine verminderte Leistung des visuomotorischen Systems den beobachteten Fehler zu korrigieren.*

1.5.2 Der Intermanuelle Transfer

Als intermanueller Transfer wird die Fähigkeit bezeichnet, eine mit einer Hand neuerlernte Bewegung, auf die passive Hand zu übertragen. Wie in 1.3 Sehbahnen und Projektion im Gehirn bereits kurz aufgezeigt, werden die Hände von der jeweils gegenüberliegenden Hirnhemisphäre gesteuert. Der visuelle Input der rechten Seite wird in die linke Gehirnhälfte projiziert und umgekehrt. Wie wird nun ein motorisches Signal der passiven Hand erzeugt wird um die hier neuerlernte visuomotorische Verschiebung zu adaptieren?

Welche Bedingungen der visuellen Projektion und motorische Aktivität der Hirnhemisphären erfüllt sein müssen, damit ein intermanueller Transfer möglich ist und auf welche Art und Weise dies stattfindet, ist unter den Forschungsgruppen noch strittig. Mehrere Versuche in dieser Arbeit beschäftigen sich mit diesem Problem und sollen einen Erklärungsversuch liefern.

2. Material + Methode

2.1 Die Prismenversuche

Die Versuche dieser Arbeit basieren auf den Experimenten von Hermann von Helmholtz. Entsprechend wurden die ersten Tests und Arbeiten (Diplomarbeit und Fortgeschrittenenpraktika) mit Prismenbrillen durchgeführt. Grundlage für diese Untersuchungen der visuomotorischen Differenz ist die Eigenheit von Prismen, Licht zu brechen. Dabei wird ein in das Prisma einfallender Lichtstrahl in eine andere Richtung abgelenkt. Beim Eintritt in ein optisch dichteres Medium wird der Lichtstrahl zum Lot auf die Grenzfläche hin, beim Austritt vom Lot weg gebrochen (ε - brechender Winkel / δ - Ablenkwinkel). Die Ablenkung ist Abhängig vom Einfallswinkel des Lichts, dem Material bzw. Brechungsindex und dem Winkel des Prismas

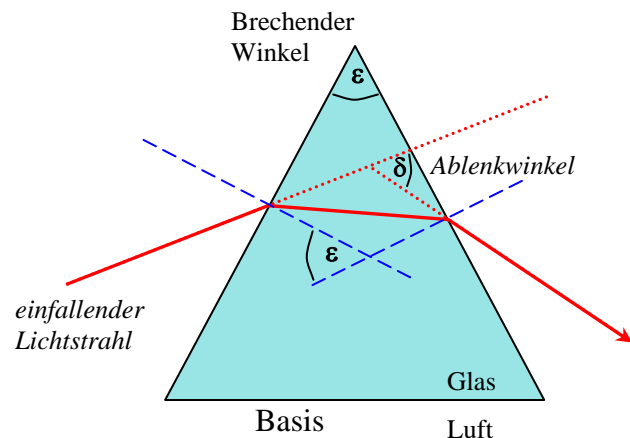


Abb. 2.1 Strahlengang durch ein Prisma

Ein durch ein Prisma beobachtetes Objekt befindet sich daher nicht an dem Ort, an dem man es sieht. Die beobachtete verschobene Umwelt steht nun in Konflikt mit der gefühlten

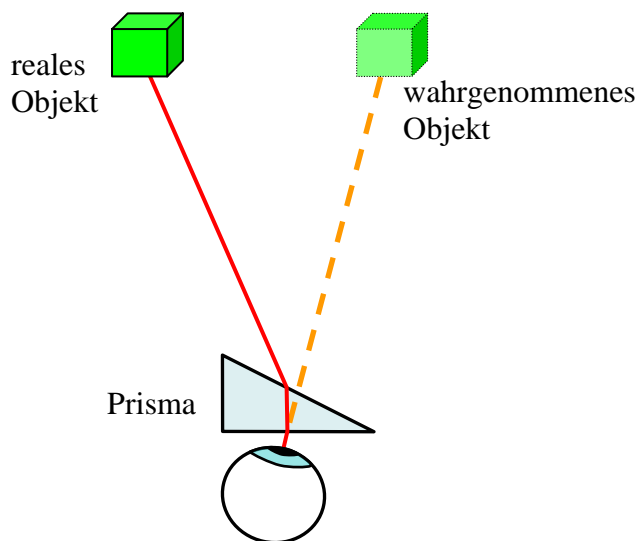


Abb. 2.2: Prismenversuch

Wahrnehmung der Körperorientierung (Propriozeption). Versucht man den Gegenstand schnell zu greifen, greift man an die Position, an der man das Objekt sieht. Die Distanzdifferenz zum tatsächlichen Objekt ist durch die Prismenverschiebung (Winkel, Material, Abstand) vorgegeben. Bewegt man die Hand aber langsam in das Sichtfeld hinein, erkennt man die Differenz und kann die Bewegung beobachtet korrigieren (Kontrolle durch die visuelle Rückmeldung). Mit einer

wie oben beschriebenen schnellen oder ballistischen Bewegung, deren motorisches Signal bereits vor der Durchführung festgelegt ist und so schnell verläuft, dass sie nicht korrigierbar in ihrer Ausführung ist, greift man daneben, zur Position des Abbildes. Diesen Fehler nimmt man optisch wahr und versucht ihn in der darauf folgenden Bewegung zu korrigieren. Der nächste Greifversuch wird etwas besser verlaufen, der Abstand zum Objekt von Mal zu Mal geringer werden. Diese Annäherung an das Objekt sowie die damit verbundene Anpassung des visuomotorischen Systems wird als Adaptation bezeichnet. Nach dem 5. bis 10. Zielversuch erreicht man bei solch einfachen Bewegungen sein Ziel und hat sich fortan an die Verschiebung gewöhnt.

Die optische Verschiebung durch das Prisma wurde in einem Teil der vorangegangenen Arbeiten genutzt. Durch die Brechungseigenschaften eines Prismas ergeben sich aber die im Folgenden beschriebenen optischen Phänomene, die für die Versuche der Visuomotorik störend sind.

Bei der chromatischen Aberration oder auch Dispersion wird das einfallende Licht in seine spektralen Bestandteile zerlegt. Der Brechungsindex eines Prismas ist neben dem Material auch von den Wellenlängen des einfallenden Lichts abhängig. Die verschiedenen Wellenlängen werden unterschiedlich gebrochen, die kurzen Wellenlängen (blau) stärker als die längeren (rot). Dadurch entstehen an Objektkanten farbige Ränder.

Besonders störend ist die geometrische Aberration. Durch die Prismenform eines Keils bilden die einfallenden

Lichtstrahlen durch die Brechung verschiedene Brennpunkte. Für den Betrachter kommt es dadurch zu Verzerrungen der beobachteten Umwelt (Ziehharmonika-Effekt).

Um diese Aberrationen auszuschließen, wurde ein neuer Versuchsaufbau zur visuomotorischen Verschiebung entwickelt.

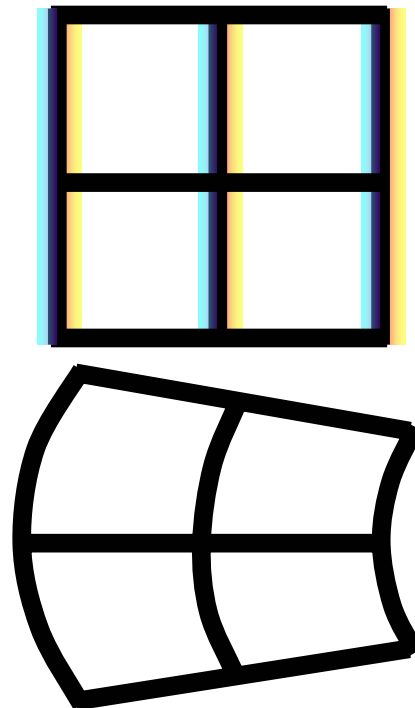


Abb. 2.3: Aberrationen bei einem Prisma
Chromatische und geometrische Aberration

2.2 Der Versuchsaufbau mit Digitalisierungstablett

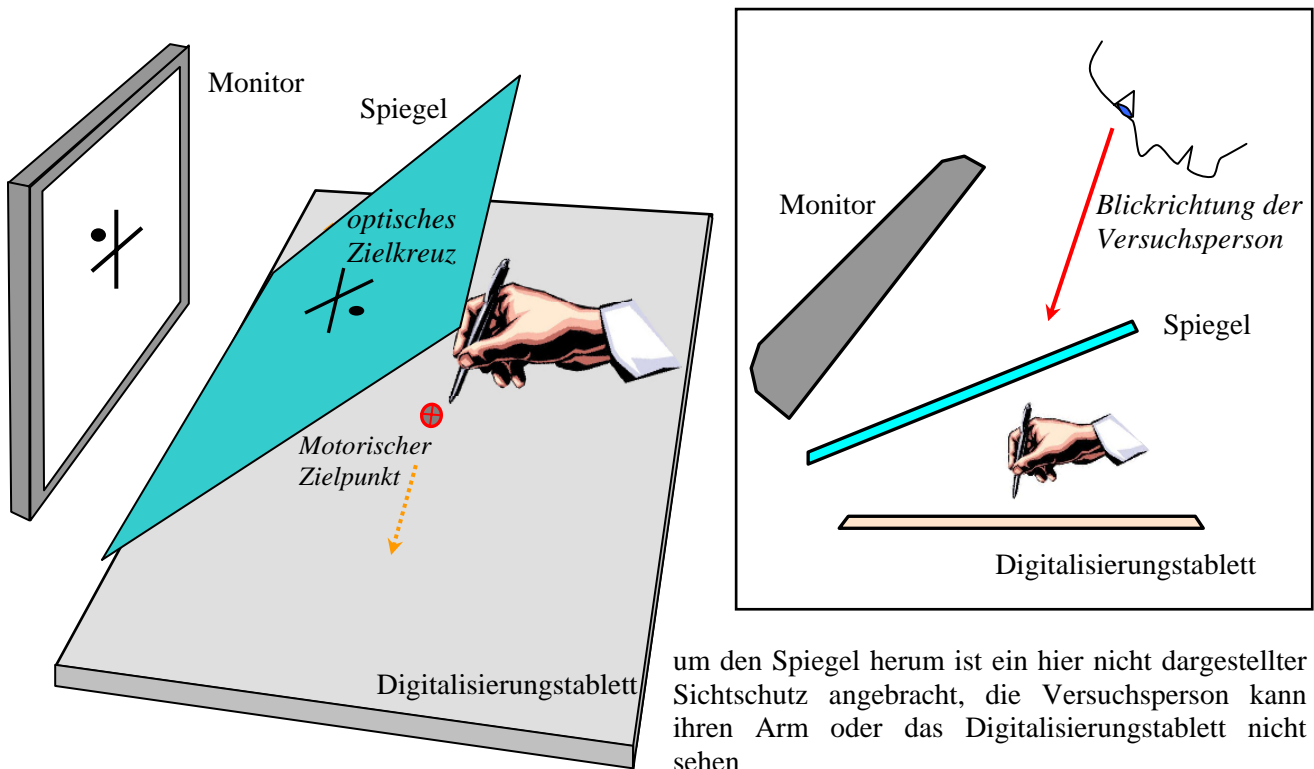


Abb. 2.4: Darstellungen des Versuchsaufbaus

Um die Daten der Versuchspersonen direkt und präzise aufnehmen zu können, wird als Versuchsfläche ein Digitalisierungstablett benutzt. Ein Zielpunkt auf dem Digitalisierungstablett soll getroffen werden. Mit dem entsprechenden Stift werden die Trefferpunkte als X/Y – Koordinaten im Computer gespeichert. Ein definierter Digitalisierungsbereich (300 mm x 230 mm) bestimmt die Zielfläche des Versuchs. In diesem Bereich liegt zentriert der im PC eingestellte motorische Zielpunkt.

Über einen Monitor ist es möglich, die Trefferposition des Stiftes zu verfolgen. Durch ein Programm wird ein weißer Hintergrund generiert, der die Zielfläche simuliert. Auf diesem Hintergrund ist ein schwarzes Kreuz dargestellt (Länge und Breite der Kreuzlinien: 15 mm, Dicke der Linien: 1 mm), welches dem motorischen Zielpunkt entspricht. Die Trefferdaten werden als schwarze, kurz aufblinkende Punkte (\varnothing 4 mm) in Relation zum motorischen Zielpunkt dargestellt. Hierbei ist die Projektion des Digitalisierungstabletts so eingerichtet, dass der Digitalisierungsbereich 1:1 dem Monitorbild entspricht.

Da auf dem Tablett weder der Digitalisierungsbereich, noch der motorische Zielpunkt sichtbar sind und somit kein Ziel für die Versuchspersonen zu sehen ist, wurde ein Spiegel so montiert, dass er das Monitorbild derart spiegelt, dass es für die Versuchspersonen als

Zielfläche auf dem Digitalisierungstablett wahrgenommen wird. Schaut eine Versuchsperson in den Spiegel, erkennt sie das Monitorbild mit dem Zielkreuz und nimmt es als Oberfläche des Digitalisierungstabletts wahr. Um den Spiegel herum ist ein Sichtschutz angebracht, so dass die Versuchsperson weder ihre Umwelt noch ihren Arm beobachten kann.

Dieses visuelle Zielkreuz wird als motorischer Nullpunkt definiert – es liegt immer mittig vor der Versuchsperson und ändert optisch die Position nicht. Weil es sich um eine horizontale Spiegelung des Monitors handelt, wurde das punktprojizierende Programm mit inversen Y-Koordinaten eingerichtet, so dass die Oben-Unten-Vertauschung wieder umgekehrt wird. Da die Versuchspersonen durch den Spiegel ihre Hand und somit ihre Bewegung nicht sehen können, bleibt ihnen der über den Computer projizierte Punkt als visuelle Rückmeldung ihres Trefferortes.

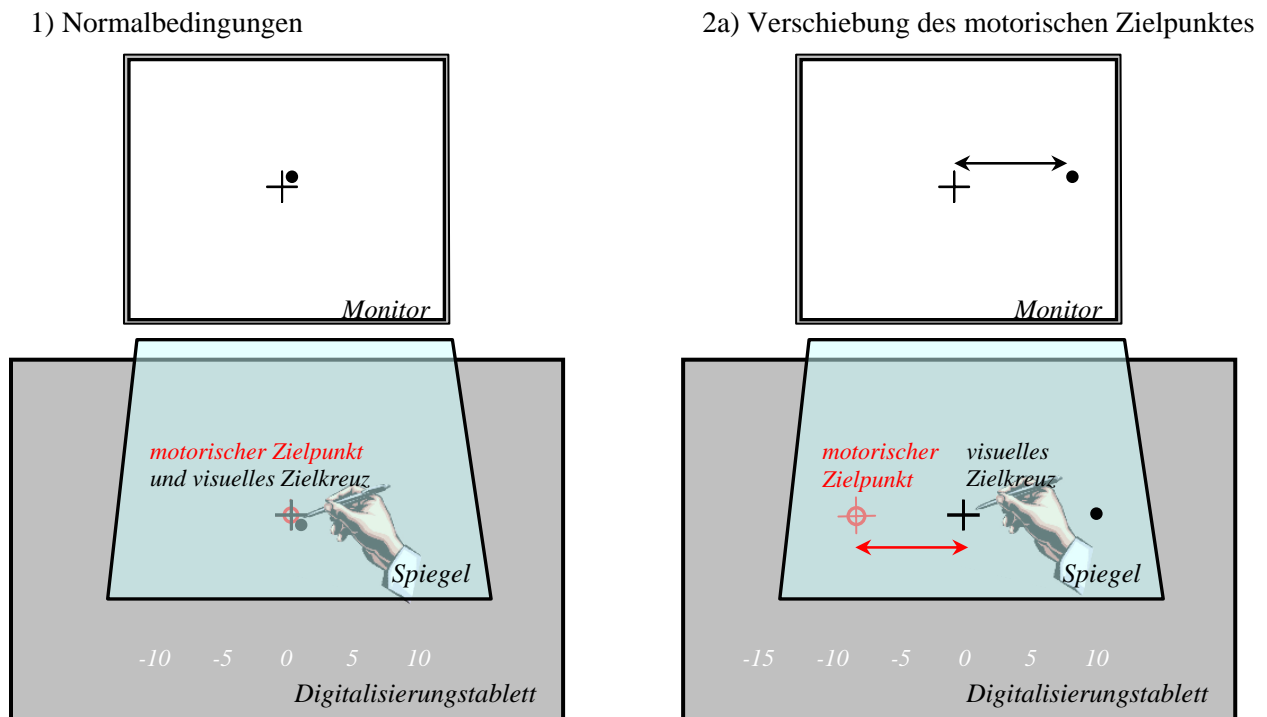


Abb. 2.5: Ansicht des Versuchs - 1) Normalbedingungen / 2a) Verschiebung

Die Versuchsperson schaut auf den Spiegel und nimmt das gespiegelte Monitorbild als Zielfläche wahr

- ⊕ visuelles Zielkreuz (entspricht motorischem Nullpunkt) und projizierter Punkt (durch Monitor dargestellt)
- ⊕ motorischer Zielpunkt (nicht sichtbar für die Versuchsperson)

Dieses reduzierte Feedback ist durchaus ausreichend, um visuomotorische Verschiebungen zu erkennen und an diese zu adaptieren, wie in den Diplomarbeiten von G. S. Hoffmann, C. Wieck und A. Deichmann gezeigt werden konnte. Um nun ähnlich dem

Prismenbrillenversuch eine visuomotorische Verschiebung zu erzeugen, wird das motorische Zielkreuz an einer anderen Position auf dem Digitalisierungstabletts eingerichtet. Hierbei handelt es sich im Gegensatz zur Verschiebung durch eine Prismenbrille, die eine optische Verschiebung erzeugt, um eine motorische Verschiebung.

Bei einer Verschiebung des motorischen Zielpunktes über den PC, behält das optische Zielkreuz die Position bei. Dieses visuell wahrnehmbare Zielkreuz entspricht dem motorischen Nullpunkt, während der motorische Zielpunkt auf dem Digitalisierungsbereich verschoben wird. Der Stift wird entsprechend des wahrgenommenen optischen Zielkreuzes, bei der ersten Zielbewegung der Versuchspersonen, auf den motorischen Nullpunkt gesetzt. Die Differenz zwischen Trefferpunkt und motorischem Zielpunkt wird über das Digitalisierungstablett registriert. Die Trefferdaten werden in Bezug zum motorischen Zielpunkt (9cm nach links verschoben) als weiter rechts aufgenommen. Da das optische Zielkreuz auf dem Monitorbild dem motorischen Zielpunkt in seinen Koordinaten entspricht, wird der Trefferpunkt rechts vom optischen Zielkreuz projiziert. Diese Differenz kann von der Versuchsperson als visuelles Feedback wahrgenommen werden (siehe Abb. 2.5: Ansicht des Versuchs - 2a) Verschiebung, Seite 11).

2.3 Die Versuchsgliederung: Adaptations- und Folgeeffektphase

Der Versuchsablauf ist derart programmiert, dass die ersten 23 aufgenommenen Trefferdaten als kurz aufleuchtende Punkte auf dem Monitor erscheinen. Die folgenden Trefferdaten werden zwar registriert, aber die Punktdarstellung unterbleibt. Das bedeutet, dass die Versuchspersonen in der ersten Phase ein visuelles Feedback ihrer Bewegungsergebnisse bekommen, ab dem 24. Trefferversuch jedoch keine Rückmeldung mehr erhalten. Ohne optischen Hinweis ihrer Bewegungen sollte die Versuchsperson nicht mehr in der Lage sein, Fehler zu korrigieren. Ein Konflikt zwischen der gefühlten Position des Armes und dem anvisierten Ziel kann nicht mehr wahrgenommen werden. Die folgenden Trefferversuche sollten daher einheitlich von den Versuchspersonen auf eine Position gesetzt werden. Diese kann je nach Adaptationszustand der Testperson und Versuchsanweisung unterschiedlich ausfallen. Bei einer Gewöhnung an die Testbedingungen mit einem verschobenen motorischen Zielpunkt wird die Versuchsperson nahe diesem Zielpunkt die Trefferversuche setzen.

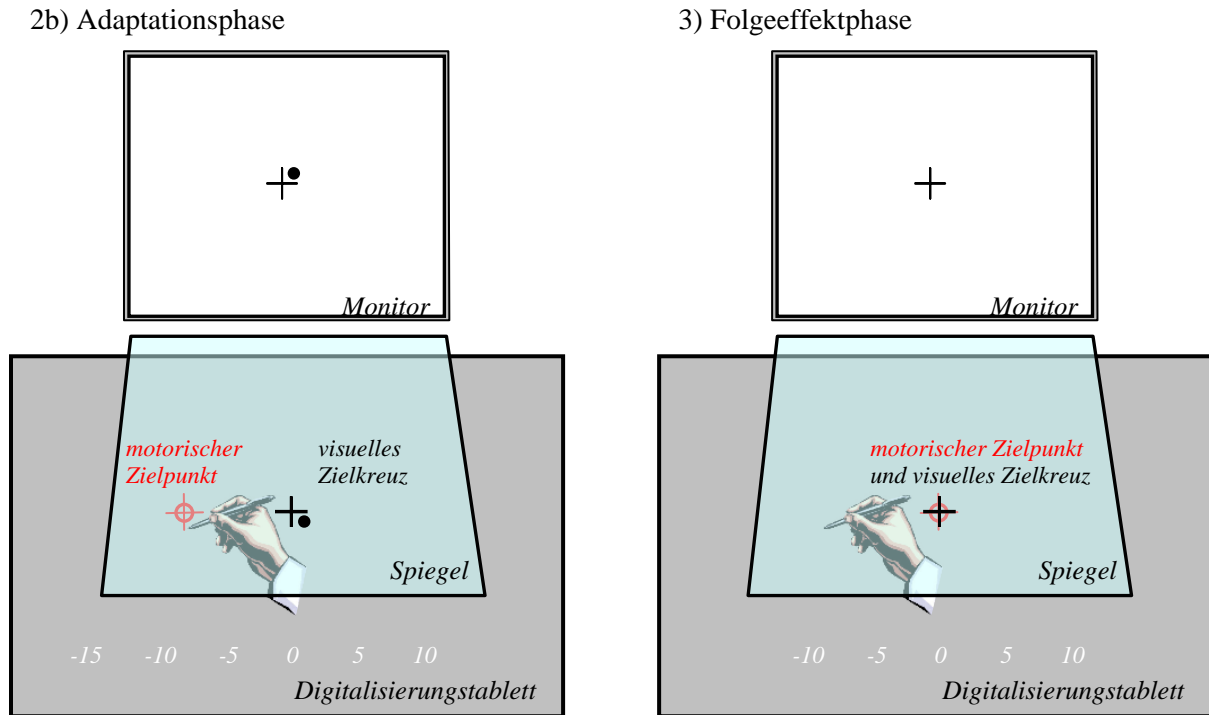


Abb. 2.6: Ansicht des Versuchs – 2b) Adaptationsphase / 3) Folgeeffektphase

Die Versuchsperson schaut auf den Spiegel und nimmt das gespiegelte Monitorbild als Zielfläche wahr

- ⊕ Visuelles Zielkreuz (entspricht motorischem Nullpunkt) und projizierter Punkt (nicht während 3) Folgeeffektphase)
- ⊗ Motorischer Zielpunkt (nicht sichtbar für die Versuchsperson)

2.4 Die Durchführung des Versuchs

Zu Beginn der Versuche werden die Versuchspersonen kurz in den Versuchsaufbau eingewiesen und an diesen gewöhnt, indem sie einige Testbewegungen unter normalen Bedingungen machen. Während der Versuchsdurchführung dürfen die Versuchspersonen nicht den Blick von der Zielfläche abwenden. Dies ist wichtig, um bereits erlernte Adaptationen im Versuchsdurchlauf nicht zu verlieren. Eine erlernte Gewöhnung an eine Test- oder Verschiebungsbedingung kann durch Beobachten der normalen Umwelt readaptieren. Die Testpersonen werden angewiesen, in der ersten Experimentphase den dargestellten Punkt auf das visuelle Zielkreuz zu setzen. Sie werden informiert, dass ab dem 23. Punkt das visuelle Feedback des Punktes nicht mehr projiziert wird. Daraufhin ändert sich die Versuchsanweisung in der Hinsicht, dass die Testpersonen in dieser zweiten Phase direkt das visuelle Zielkreuz anvisieren sollen und den Stift dort absetzen, wo sie dieses wahrnehmen. Nach weiteren 20-25 Punkten wird der Versuch vom Versuchsleiter abgebrochen. Der Unterschied der Anweisungen besteht darin, dass die Versuchspersonen

zunächst den verschobenen motorischen Zielpunkt treffen sollen und in der nächsten Phase den motorischen Nullpunkt. Eine Adaptation an die Verschiebung des motorischen Zielpunktes wird dann in der zweiten Phase getestet, indem die Differenz zwischen dem motorischen Nullpunkt und den Trefferpunkten der Versuchspersonen ausgewertet wird. Ist eine Adaptation an die Verschiebung erfolgt, werden die Versuchsdaten weiter links vom Nullpunkt in Richtung der Verschiebung liegen.

2.5 Die Reaktionen der Versuchspersonen

Die Testpersonen setzen in dem Versuch den ersten Punkt entsprechend der normalen visuomotorischen Erfahrungen auf das visuelle Zielkreuz oder was dem motorischen Nullpunkt entspricht. Der projizierte Punkt wird in Relation zum motorischen Zielpunkt dargestellt und somit um die Verschiebungsdistanz rechts vom visuellen Zielkreuz. Die Versuchsperson kann diesen Fehler als visuelle Rückmeldung wahrnehmen und korrigieren. Hierbei wandert sie mit den Zielbewegungen von Trefferversuch zu Trefferversuch weiter nach links auf den motorischen Zielpunkt zu, bis der dargestellte Punkt auf das optische Zielkreuz fällt. ⇒ Adaptationsphase

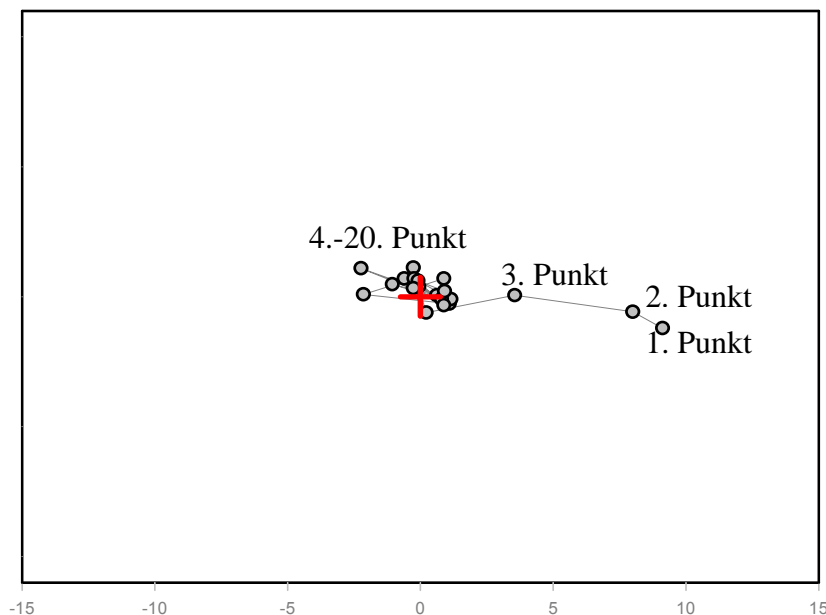


Abb. 2.7: Monitorbild mit projizierten Punkten eines Adaptationsversuches

Die Punkte blinken unter Versuchsbedingungen auf und verschwinden wieder, sie sind in dieser Darstellung miteinander verbunden um die Folge der ersten Punkte zu verdeutlichen: der erste Punkt wurde ca. 9 cm rechts vom Zielkreuz gesetzt, die folgenden Punkte nähern sich an das Zielkreuz an.

Ohne visuelles Feedback (ab dem 24. Trefferversuch) visiert die Testperson das visuelle Zielkreuz direkt an.

An dieser Stelle berichteten manche Versuchspersonen ein Problem in der Entscheidung, weiterhin den motorischen Zielpunkt oder das visuelle Zielkreuz zu treffen. In solchen Fällen wurde die Anweisung, den Stift dort abzusetzen, wo das visuelle Zielkreuz wahrgenommen wird, wiederholt.

Die nach folgenden Punkte dieser \Rightarrow Folgeeffektphase werden von den Versuchspersonen in einem individuell unterschiedlichen Abstand zwischen motorischem Nullpunkt und motorischem Zielpunkt gesetzt. Hat die Versuchsperson an die vorangegangene Phase visuomotorisch adaptiert, liegen die Punkte nahe dem motorischen Zielpunkt, hat sie nicht adaptiert, liegen sie fast auf dem motorischen Nullpunkt. Durch die ausbleibende visuelle Rückmeldung und Fehlerkorrektur der Versuchspersonen, sind die gesetzten Punkte nahezu auf einer Position.

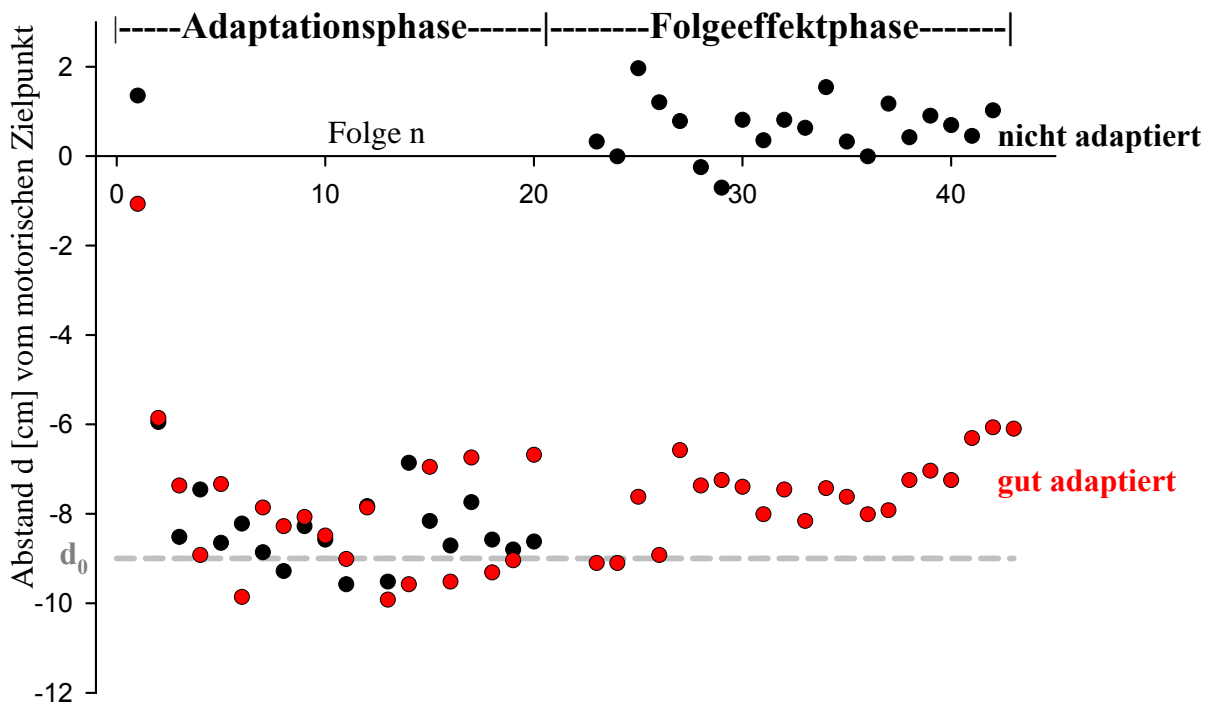


Abb. 2.8: Beispieldiagramm – Adaptationsphase / Folgeeffektphase

Abstand der gesetzten Trefferpunkte vom motorischen Zielpunkt über die Folge der Trefferversuche zweier Versuchspersonen (schwarz: nicht adaptiert / rot: gut adaptiert)

Um den Phasenwechsel einheitlich für alle Versuchspersonen darzustellen, werden die ersten 20 Trefferpunkte für die Adaptationsphase, sowie die letzten 20 Punkte für die Folgeeffektphase in die Diagramme aufgenommen. Die Ordinate ($Y = 0$) beschreibt die

Position des visuell wahrgenommenen Zielkreuzes bzw. des motorischen Nullpunktes, gestrichelt der Verschiebungsabstand bei $-9,1$ cm.

Um die Eigenschaften und Grenzen dieser Adaptationsvorgänge näher zu untersuchen, wird der Versuch unterschiedlich eingerichtet und die Versuchspersonen auf diese Modifikationen getestet.

2.6 Die Variationen der Versuchsparameter

Im Folgenden wird eine kurze Einleitung zu den durchgeführten Versuchen und ihren Variationen gegeben.

2.6.1 Die zeitliche Verzögerung des visuellen Feedbacks Δt

Basierend auf dem Reafferenzprinzip (von Holst und Mittelstaedt 1950) ergibt sich die Überlegung nach der Beständigkeit der Efferenzkopie bzw. die Frage nach dem Zeitfaktor in der Verrechnung von Efferenzkopie und Reafferenz. Um dies zu testen, kann eine zeitliche Verzögerung der Punktprojektion in der darstellenden Delphisoftware programmiert werden. Dadurch wird nach der Trefferbewegung und dem Registrieren der Trefferdaten eine Pause erzeugt, bis der Trefferpunkt auf dem Monitor dargestellt wird. Die Reafferenz trifft zur Verrechnung der visuomotorischen Kontrolle um diese zeitliche Differenz später mit der Efferenzkopie zusammen. Diese zeitlichen Verzögerungen [Δt] wurden mit ...

▶ **0,000 sec** (als Referenz)

0,125 sec

▶ **0,250 sec**

0,375 sec

0,500 sec

▶ **0,625 sec**

0,750 sec

0,875 sec

▶ **1,000 sec**

... getestet.

Die Versuchspersonen wurden hauptsächlich mit den hervorgehobenen zeitlichen Differenzen getestet und die entsprechenden Daten ausgewertet. Die dazwischen liegenden Zeiten wurden ebenfalls gemessen – die größeren Intervalle erwiesen sich aber als ausreichend und sind letztendlich aufgrund der Datenfülle übersichtlicher.

Die Versuchspersonen durchliefen die oben genannte Versuchsdurchführung mit Einweisung, Adaptationsphase und Folgeeffektphase. Während der Adaptationsphase erhielten sie ihr visuelles Feedback (projizierter Punkt des verschobenen Trefferortes) um den zeitlichen Faktor verzögert; da in der Folgeeffektphase keine Rückmeldung gegeben wurde, verlief diese wie oben beschrieben.

2.6.2 Die Dauer die Zieldarbietung xt

Ein weiterer zeitlicher Faktor wurde im Rahmen dieser Versuche in einem Fortgeschrittenenpraktikum mit M. Fassbender, P. Gospodinov und M. Lautermann getestet. Statt wie in 2.6 das visuelle Feedback der Punktprojektion zu verändern, wurde hierbei dem anzuvisierenden optischen Zielkreuz eine zeitliche Komponente zugewiesen. Die Projektionsdauer des Zielkreuzes wurde modifiziert mit den Aufblinkzeiten von ...

0,1 sec

0,5 sec

0,9 sec

1,8 sec

sowie ein dauerhaft dargestelltes Zielkreuz um eine Referenz zu erhalten.

Die Versuchspersonen wurden wie zuvor in den Versuch eingewiesen und zusätzlich angewiesen, die folgende Zielbewegung erst bei Verschwinden des Zielkreuzes zu starten. Sie erhielten direkt ihr visuelles Feedback als Punktprojektion des Trefferortes. Nach Verschwinden des Punktes wurde das optische Zielkreuz wieder sofort für das entsprechende Zeitintervall dargestellt.

2.6.3 Der Intermanueller Transfer

Lernübertragung von der aktiven auf die passive Hand

Um die Übertragbarkeit von der einen auf die andere Hand zu testen, wird der Versuch wie anfangs dargestellt durchgeführt (siehe 2.4 Die Versuchsanweisung). Daraufhin wechselt die Versuchsperson in der nächsten Versuchsdurchführung nach der Adaptationsphase (mit der

aktiven Hand) den Druckstift in die passiv gebliebene Hand, und führt damit die Zielbewegungen in der Folgeeffektphase durch.

Hierbei ergeben sich durch die Verschiebungsrichtung und Handseite 8 Kombinationen:

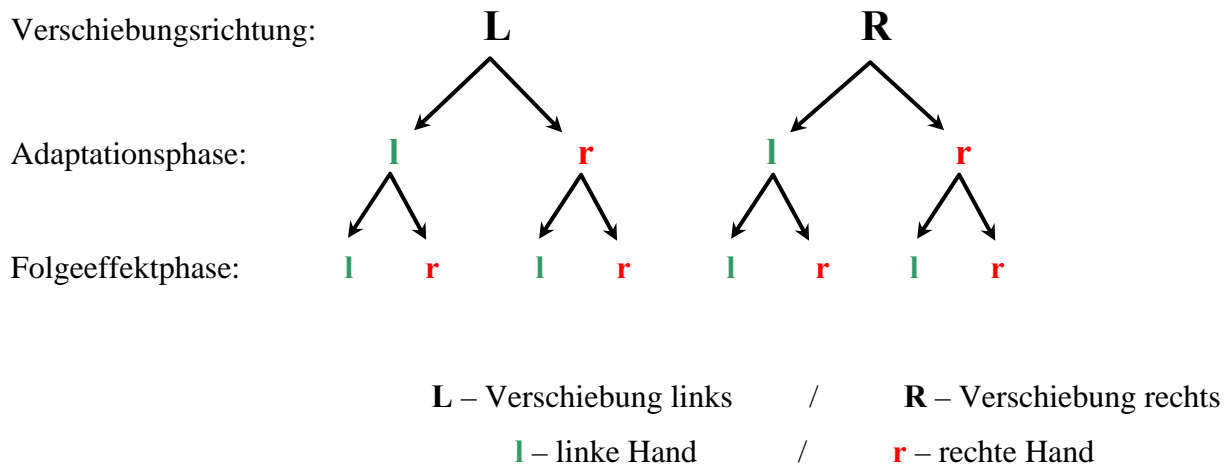


Abb. 2.9: Versuchskombinationen

L – ll	→	Verschiebung links, Adaptation links, Folgeeffekt links
L – lr	→	Verschiebung links, Adaptation links, Folgeeffekt rechts
L – rl	→	Verschiebung links, Adaptation rechts, Folgeeffekt links
L – rr	→	Verschiebung links, Adaptation rechts, Folgeeffekt rechts
R – ll	→	Verschiebung rechts, Adaptation links, Folgeeffekt links
R – lr	→	Verschiebung rechts, Adaptation links, Folgeeffekt rechts
R – rl	→	Verschiebung rechts, Adaptation rechts, Folgeeffekt links
R – rr	→	Verschiebung rechts, Adaptation rechts, Folgeeffekt rechts

Die Verschiebungsrichtung bestimmt, in welche Hirnhemisphäre der visuelle Input gelangt (siehe 1.3 Die Sehbahnen und die Projektion im Gehirn, Seite 4f). Zu beachten ist bei den folgenden Graphiken, dass eine Verschiebung des motorischen Zielpunktes eine entgegengesetzte Verschiebung des projizierten Punktes bewirkt. Eine Verschiebung des motorischen Zielpunktes nach links erzeugt bei einer Zielbewegung auf das visuelle Zielkreuz eine Punktprojektion rechts vom Ziel. Rechts von dem anfixierten optischen Ziel wahrgenommene Objekte werden in die linke Hirnhemisphäre projiziert. (siehe auch 2.2 Der Versuchsaufbau, Seite 10).

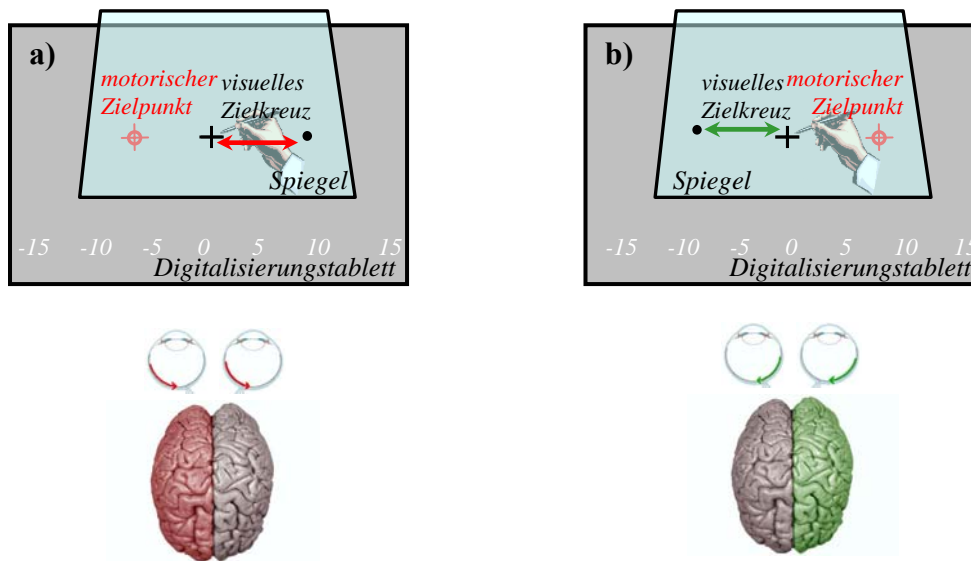


Abb. 2.10: motorische Verschiebung und Projektion in die Hirnhemisphäre

- a) Verschiebung nach links, Punktprojektion von rechts, linke Hemisphäre aktiv
- b) Verschiebung nach rechts, Punktprojektion von links, rechte Hemisphäre aktiv

Die gleichseitige Hand zur Verschiebungsrichtung wird gegen die gegenseitige Hand zur Verschiebungsrichtung getestet und jeweils der Folgeeffekt der aktiven und passiven Hand gemessen.

3. Ergebnisse:

3.1 Die Vorversuche

Die Methodik, das visuomotorische System des Menschen anhand einer visuomotorischen Differenz (siehe 1.2 Die visuomotorische Differenz, Seite 2f), sei es durch Prismen oder virtuell mit einem Digitalisierungstablett erzeugt, zu testen, ist verhältnismäßig einfach. Mit Hilfe des Einsatzes eines Digitalisierungstabletts sind die Versuche relativ schnell durchzuführen und liefern eine große Masse an Daten. Ebenso bietet dieses Verfahren eine Vielfalt an methodischen Variationen und eine experimentelle Flexibilität für neue Ideen und Möglichkeiten. Die Zeit fehlte, um auf alle Ideen und Variationen einzugehen, aber einige konnten in so genannten Vorversuchen bearbeitet werden. Diese Experimente wurden noch mit wechselnden experimentellen Randbedingungen durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit können sie daher nur kurz dargestellt. Die Hauptversuche boten die Möglichkeit, die wichtigsten Aspekte unter den schließlich entwickelten Standardbedingungen noch einmal zu untersuchen. Damit die vorläufigen Ergebnisse der Vorversuche nicht verloren gehen, werden sie hier kurz dargestellt.

Die Methodik ist grundsätzlich bei allen Versuchen die Selbe, die graphische Auswertung variiert je nach Versuch etwas.

3.1.1 Der Vorlesungsversuch

Die Arbeit wurde angeregt durch einen Vorlesungsversuch von C. v. Campenhausen. Mit einer Prismenbrille vor den Augen sollten Studenten ein Kreuz auf einem Blatt Papier mit einem Stift treffen. Über eine Videokamera und einen Bildschirm konnte die Zielbewegung für alle sichtbar beobachtet werden. Wichtig bei diesem Versuch war die Art der Bewegung. Es sollte eine Bewegung sein, die in ihrer Ausführung nicht mehr korrigiert wird. Da Bewegungen normalerweise visuell kontrolliert und entsprechend während ihrer Durchführung nachkorrigiert werden, kann dies durch schnelle, ballistische Bewegungen ausgeschlossen werden. Die ersten Treffer wurden entsprechend der optischen Verschiebung der Prismen neben das anvisierte Ziel gesetzt. Die Testperson näherte sich mit jeder Zielbewegung dem Kreuz an, da sie den zuvor begangenen Fehler beobachtet und in der folgenden Bewegung korrigiert. Der Versuch wurde in seiner Durchführung daraufhin so abgeändert, dass die Versuchsperson ihre Bewegung nicht mehr beobachten sollte. Das Kreuz

sollte anvisiert werden, dann die Augen geschlossen, die Zielbewegung blind durchgeführt und die Hand wieder zurückgezogen werden, bevor die Augen geöffnet wurden. Auf diese Weise erhielt die Testperson nur ein visuelles Feedback des Resultates (Punkt auf der Folie) ihrer Bewegung und so die Differenz zum Zielkreuz, jedoch konnte sie ihre selbstproduzierte Bewegung nicht beobachten. Dieses „*Feedback of selfproduced motion*“ ist nach Richard Held (Held 1978) Grundlage für die Adaptation an eine visuomotorische Verschiebung. Die Versuchspersonen schafften es nicht, die Zielbewegung an das Kreuz anzunähern und zu adaptieren. Die Beobachtung der eigenen Bewegung ist demnach für den Adaptationserfolg nötig. Wird diese - wie hier durch das Schließen der Augen - verhindert, können die Versuchspersonen nicht mehr adaptieren. Dieses Ergebnis wird im nächsten Abschnitt näher untersucht und zeigte sich als falsch interpretiert.

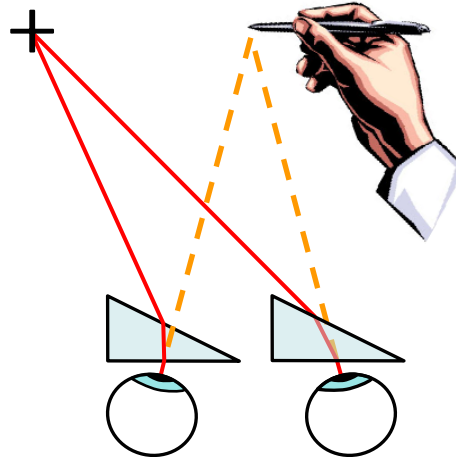


Abb. 3.1.1: – Vorlesungsversuch - Prismenbrille

3.1.2 Die Adaptationsbewegungen mit und ohne visuelle Rückmeldung

Zu diesem Vorlesungsversuch entstand 2000 meine Diplomarbeit (Hoffmann 2000). Hier wurde der Prismenbrillenversuch bei offenen Augen getestet, wobei die Beobachtung der Handbewegung gewährt oder verhindert wurde. Der Versuchsaufbau war das Vorgängermodell zu dem in dieser Arbeit beschriebenen Aufbau. Ein Digitalisierungstablett als Versuchsfläche nahm die Daten auf, diese wurden im Computer verrechnet und konnten auf einem Monitor dargestellt werden. Über eine Reflexionsfläche wurde das Monitorbild mit einem Zielkreuz und den dargestellten Trefferpunkten auf die Ebene des Digitalisierungstablettes projiziert. Während des Versuches mussten die Versuchspersonen durch eine fixierte Prismenbrille schauen und erfuhren somit die optische Verschiebung der Umwelt. Die Reflexionsfläche konnte je nach Versuchsvorgabe entsprechend ausgetauscht werden.

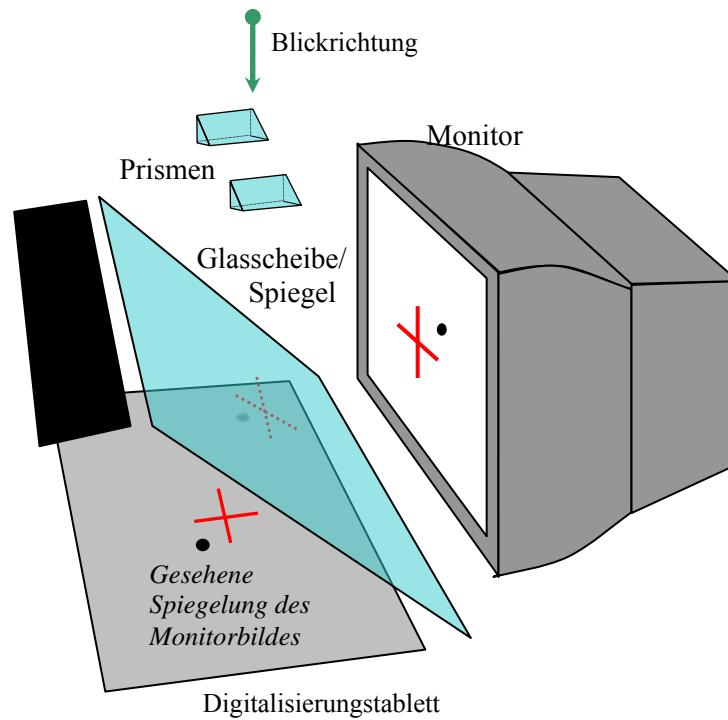


Abb. 3.1.2: Versuchsaufbau Diplomarbeit – die Versuchsperson schaut durch die Prismen auf die Reflexionsfläche und nimmt über die Spiegelung das Monitorbild auf dem Digitalisierungstablett liegend wahr. Je nach Reflexionsfläche (Glasscheibe oder Spiegel) kann die Hand in ihrer Bewegung beobachtet werden oder nicht.

- **Versuchsbedingung 1):** entsprechend des Vorlesungsversuches – Prismenbrille, Zielversuch mit offenen Augen
 ⇒ um der Versuchsperson die Möglichkeit zu geben, die eigene Zielbewegung zu beobachten, wurde als Reflexionsfläche eine Glasscheibe eingesetzt. Zum einen reflektierte diese das Monitorbild und projizierte so das Zielkreuz auf das Tablett, zum anderen konnte die eigene Bewegung der Hand beobachtet werden. Durch die optische Verschiebung und die vorgegebene ballistische Bewegung, verfehlte die Versuchsperson zunächst das anvisierte Ziel. Durch den beobachteten Fehler wurde die nächste Bewegung in Richtung optisch verschobenes Zielkreuz korrigiert. Alle Versuchspersonen schafften es innerhalb der ersten 10 Zielversuche, die optische Verschiebung zu kompensieren und das Ziel zu treffen. Diese Ergebnisse entsprachen denen des Vorlesungsversuches von Prof. C. v. Campenhausen und den in der Literatur beschriebenen Prismenbrillenversuchen (Helmholtz 1867) und Adaptationsversuchen (Held 1978).

- Versuchsbedingung 2): entsprechend des Vorlesungsversuches – Prismenbrille, Zielversuch mit geschlossenen Augen
 ⇒ In diesem Versuchsteil sollte die Versuchsperson nicht wie in den Vorlesungsversuchen die Augen schließen. Stattdessen wurde als Reflexionsfläche ein Spiegel eingesetzt. So konnte die Versuchsperson das Monitorbild auf dem Tablett projiziert wahrnehmen, ihre Zielbewegung unter dem Spiegel jedoch nicht beobachten. Durch die Prismenbrille verschob sich optisch die Umwelt und der Trefferort konnte als dargestellter Punkt wahrgenommen werden.

Die Ergebnisse der zweiten Versuchsbedingung entsprachen nicht wie erwartet denen des Vorlesungsversuches mit geschlossenen Augen. Es zeigte sich, dass es keine signifikanten Unterschiede zu den Ergebnissen der ersten Versuchsbedingung gab: obwohl die Versuchspersonen kein visuelles Feedback der Armbewegung erhielten, adaptierten sie.

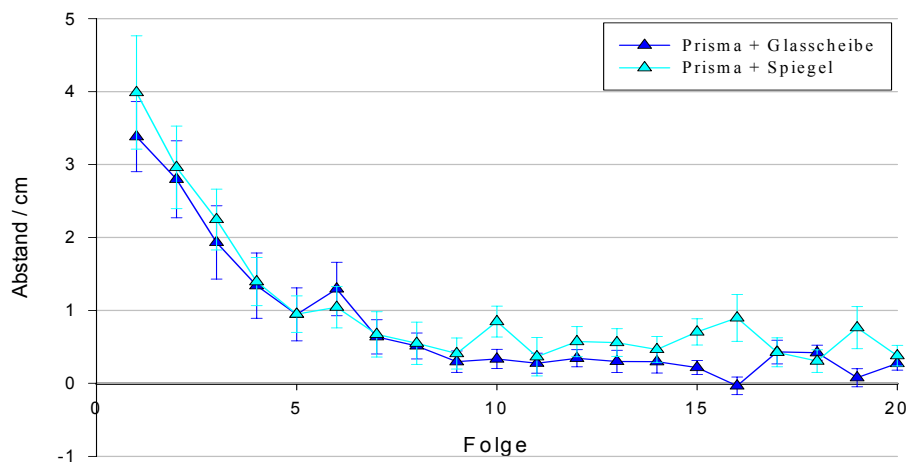


Abb. 3.1.3: Ergebnisse Diplomarbeit – Versuchsbedingungen:

1) Prismenbrille mit Glasscheibe als Reflexionsfläche ▲

2) Prismenbrille mit Spiegel als Reflexionsfläche ▲

Dargestellt sind die Mittelwerte der Trefferabstände vom Zielkreuz über die Folge der Trefferversuche (11 Versuchspersonen); (abgewandelt nach G.S. Hoffmann; Diplomarbeit - Adaptation von Handbewegungen bei Menschen mit und ohne visuelle Rückmeldung -)

Während des Vorlesungsversuches mussten die Versuchspersonen die Augen schließen, die Bewegung durchführen, wieder den Arm zurückziehen und dann die Augen öffnen, um das Ergebnis der Bewegung zu betrachten. In dem Diplomversuch erhielten die Versuchspersonen das Ergebnis direkt mit Auftreffen am Bewegungszielort. Die unterschiedlichen Ergebnisse aus Vorlesungsversuch und Diplomarbeit resultierten vermutlich aus einem zeitlichen Faktor.

In den Diplomversuchen entstand keine zeitliche Differenz zwischen Auftreffen der Zielbewegung und optischer Rückmeldung. Dem gegenüber entstand bei den Vorlesungsversuchen durch Schließen der Augen, der Zielbewegung, der Rückführung des Arms und dem erneuten Öffnen Augen, eine zeitliche Verzögerung. Diese zeitliche Differenz zwischen Zielbewegung und dem visuellen Feedback könnte dazu geführt haben, dass die Versuchspersonen nicht mehr an die optische Verschiebung adaptierten (siehe 1.5.1 Die zeitliche Verzögerung des visuellen Feedbacks, Seite 6f).

Die Diplomarbeit zeigte jedoch, dass eine optische Rückmeldung des Trefferortes zum Zeitpunkt des Treffens ausreicht, um eine visuomotorische Verschiebung zu kompensieren. Eine Beobachtung der tatsächlichen Bewegung oder des bewegten Armes ist nicht nötig. Das Aufblinken eines über den Computer dargestellten Trefferpunktes zeitgleich mit Ende der Zielbewegung gibt dem visuomotorischen System genügend Informationen, um sich an neue Bedingungen anzupassen.

3.1.3 Der intermanuelle Transfer I

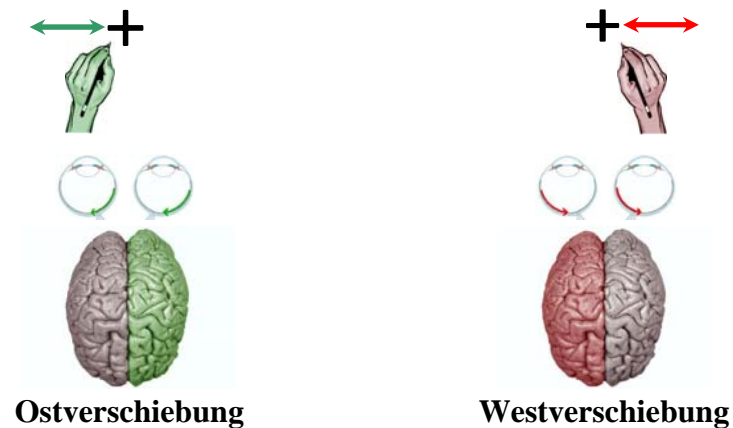
[Die Frage nach dem intermanuellen Transfer wird mit anderer Methodik später in den Vorversuchen (siehe 3.1.5 Der intermanuelle Transfer II und die zeitliche Verzögerung des visuellen Feedbacks II, Seite 29f) sowie in den Hauptversuchen (siehe 3.2.2 Die Versuche zum intermanuellen Transfer, Seite 49) weiterverfolgt.]

Im Laufe dieser Dissertation wurde im Rahmen einer Diplomarbeit von Antje Deichmann (Deichmann 2002) die Frage erörtert, ob ein intermanueller Transfer, von einer neuerlernten adaptiven Zielbewegung, mit der von mir entwickelten Methode (siehe 2.2 Der Versuchsaufbau mit Digitalisierungstablett, Seite 10) möglich ist. Anhand der Folgeeffekte sollte weiterführend beobachtet werden, ob eine Transfer-Richtung von der linken auf die rechte Hand oder umgekehrt, bevorzugt wird.

Der Versuchsaufbau entsprach dem im vorangegangenen Kapitel beschriebenen (Vgl. Abb. 3.1.2: Versuchsaufbau Diplomarbeit, Seite 22), jedoch wurde aufgrund der optischen Nebeneffekte auf die Prismenbrille verzichtet (siehe 2.1 Die Prismenversuche, Seite 8f). Die Reflexionsfläche bestand aus einem Spiegel, da eine motorische Verschiebung simuliert wurde und die Versuchspersonen diese nicht beobachten durften (siehe 2.3 Die Versuchsgliederung: Adaptations- und Folgeeffektphase, Seite 12f).

Die Versuchsbedingungen wurden derart gewählt, dass die optische Rückmeldung der Trefferpunkte in die entsprechende Hirnhemisphäre projiziert wurde, die für die motorische Kontrolle der adaptierenden Hand zuständig ist.

Durch die Projektion auf dem Monitor erschien bei einer Linksverschiebung der Trefferpunkt zunächst rechts vom Zielkreuz, da die Versuchspersonen an die Verschiebung noch nicht adaptiert waren und entsprechend den Punkt zu weit rechts setzten. Rechts im Blickfeld erscheinende Objekte werden auf der Retina links von der Fovea abgebildet in die linke Gehirnhemisphäre projiziert. Diese ist für die Kontrolle des rechten Armes zuständig. Entsprechendes gilt für die Rechtsverschiebung bei Versuchen mit der linken, adaptierenden Hand. Verschiebungen nach Westen wurden in der Adaptationsphase mit der rechten Hand getestet, Verschiebungen nach Osten mit der linken Hand getestet. (siehe auch 2.6.3 Der Intermanuelle Transfer, Seite 17).



Die visuomotorische Verschiebung wurde ähnlich dem Versuch dieser Arbeit durch Verschieben des Nullpunktes bzw. motorischen Zielpunktes erreicht und durch das Digitalisierungstablett erzeugt (siehe Abb. 2.5/2.6: Ansicht des Versuchs 1-3, Seite 11f).

Der Nacheffekt wurde direkt anschließend ohne visuelles Feedback getestet mit

- a) der aktiven, dann der passiven Hand
- b) der passiven, dann der aktiven Hand.

Die Darstellung der Diagramme zeigt die motorische Mitte (Körpermitte) der Versuchsperson als Nullpunkt (Ursprung). Der verschobene Zielpunkt liegt somit bei $\pm 5,2$ cm.

3.1 Ergebnisse

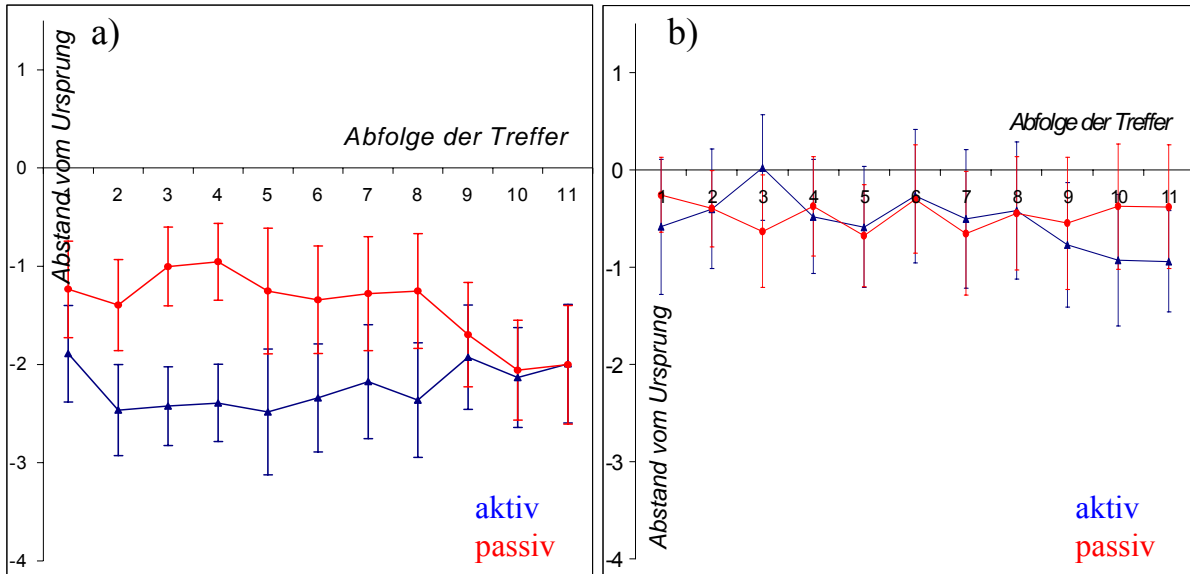


Abb. 3.1.4: Nacheffekte der Verschiebung West (links)

a) zunächst der **aktiven** (linken) und dann der **passiven** (rechten) Hand (12 VP)

b) zunächst der **passiven** (rechten) und dann der **aktiven** (linken) Hand (11 VP)

(abgewandelt nach A. Deichmann; Diplomarbeit - Adaptationsversuche von Handbewegungen bei visuomotorischer Diskrepanz ohne Prismenbrille -) / VP = Versuchspersonen

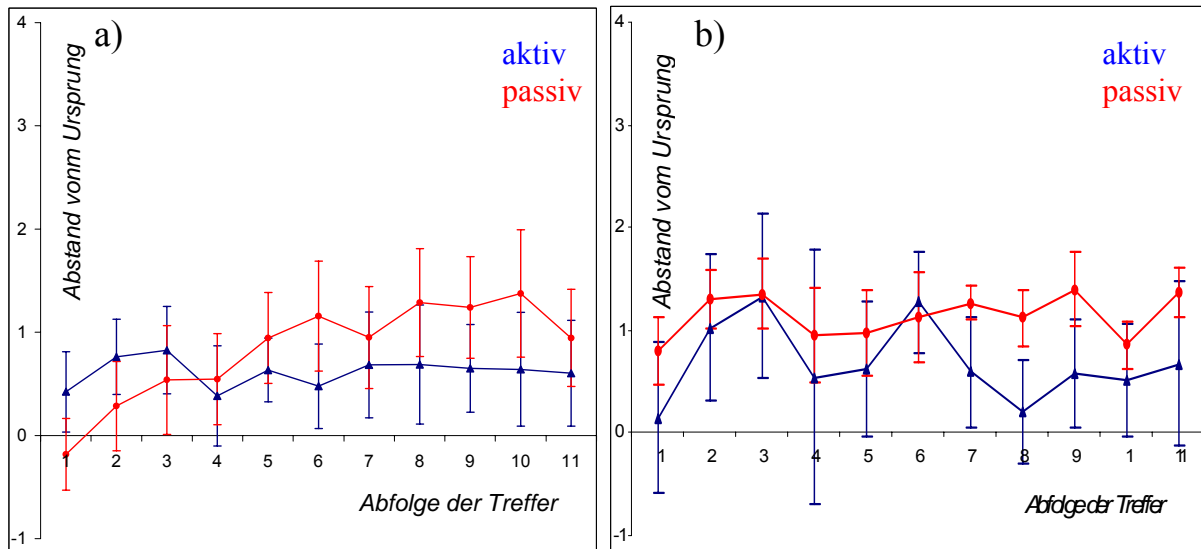


Abb. 3.1.5: Nacheffekte der Verschiebung Ost (rechts)

a) zunächst der **aktiven** (linken) und dann der **passiven** (rechten) Hand (8 VP)

b) zunächst der **passiven** (rechten) und dann der **aktiven** (linken) Hand (7 VP)

(abgewandelt nach A. Deichmann; Diplomarbeit - Adaptationsversuche von Handbewegungen bei visuomotorischer Diskrepanz ohne Prismenbrille -) / VP = Versuchspersonen

Die Unterschiede in den Nacheffekten der Westverschiebung (Abb. 3.1.4 a) und b)) wurden leider nicht geklärt. Da alle Versuchspersonen Rechtshänder waren, könnte dies der Grund für den hohen Folgeeffekt der aktiven Hand bei der Verschiebung West (Abb. 3.1.4 a)) sein. Die Versuchspersonen lernten mit der rechten Hand und führten den Folgeeffekt zuerst mit dieser

dominanten Hand aus. Während dieser ersten Folgeeffektphase könnte die erlernte Differenz noch weiter einen Einfluss auf das Lernverhalten der linken Hand ausgeübt haben, wodurch sich ein erhöhter Folgeeffekt der linken, passiven Hand erklärte. Diese, nach der Adaptationsphase weiterführende Übertragung war in Versuch b) (siehe Abb. 3.1.4 b, Seite 26) nicht gegeben. Die passive Hand wurde zuerst auf ihren Folgeeffekt getestet – daher geringe Werte – während die rechte Hand vermutlich wieder readaptierte und ebenso einen geringen Folgeeffekt aufzeigte. War die linke Hand aktiv während der Adaptationsphase (siehe Abb. 3.1.5 a/b, Seite 26) schien diese nichtdominante Seite generell nur einen geringen Folgeeffekt zu zeigen. Für die passive, rechte Hand ließ sich zum Einen vermuten, dass ein Transfer von der linken auf die rechte Hand nicht bevorzugt wurde und daher nur gering ausfiel, oder zum Anderen, dass die schlechte Lernleistung der linken Hand übertragen wurde und entsprechend kein besserer Folgeeffekt der rechten, passiven Hand zu erwarten war.

Beide Ergebnisse stimmen überein, weil sie dieselbe, wenn auch quantitativ etwas unterschiedliche, Verschiebung der Trefferpunkte zum Ziel hin zeigen. Die Nacheffekte der sowohl aktiven als auch passiven Hand zeigten eine Adaptation für beide Verschiebungsrichtungen und somit war der intermanuelle Transfer einer visuomotorischen Lernleistung unter den Versuchsvorgaben von der aktiv lernenden Hand auf die passiv bleibende Hand auch ohne Prismenbrille bestätigt.

3.1.4 Die zeitliche Verzögerung des visuellen Feedbacks I

[Die Folgen einer zeitlichen Verzögerung der optischen Rückmeldung wird weiterführend mit abgewandelter Methodik in einem weiteren Vorversuch (siehe 3.1.5 Der intermanuelle Transfer II und die zeitliche Verzögerung des visuellen Feedbacks II, Seite 29f) und einem Hauptversuch (siehe 3.2.1 Die Versuche zur zeitlichen Verzögerung des visuellen Feedbacks Δt , Seite 34f) erforscht.

Die Fragestellung, welchen Einfluss eine Zeitverzögerung des visuellen Feedbacks auf die Adaptationsleistung hat, ergab sich durch meine Diplomarbeit (siehe 3.1.2 Die Adaptationsbewegungen mit und ohne visuelle Rückmeldung, Seite 21f). Die Reduktion des visuellen Feedbacks auf ein kurzes Aufblinken des Trefferortes, zeigte keine Verschlechterung der Adaptationsleistung. Dies führte zu der Hypothese, dass eine zeitliche Verzögerung (Schließen der Augen, Zielbewegung, danach erst erneutes Öffnen der Augen – siehe 3.1.1 Der Vorlesungsversuch, Seite 20) für das Ausbleiben einer Adaptation an eine Verschiebung verantwortlich war (siehe 1.5.1 Die zeitliche Verzögerung des visuellen Feedbacks, Seite 6).

Hier wird der erste Test dieser Hypothese vorgestellt.

Ziel dieses Versuches war es, eine Grenze für die zeitliche Differenz zu bestimmen, mit der das visuelle Feedback als Reafferenz mit der durchgeführten Bewegung bzw. die Efferenzkopie verrechnet wird.

Der Versuch entsprach dem vorangegangenen, die Daten wurden über ein Digitalisierungstablett aufgenommen, das Zielkreuz und die Trefferpunkte auf einem Monitor dargestellt, dessen Abbild man über einen Spiegel reflektiert auf dem Digitalisierungstablett liegend wahrnahm. Eine programmierte Verschiebung des motorischen Zielpunktes um 5,2 cm nach links war Testvorgabe. Graphisch liegt der verschobene motorische Zielpunkt hier auf der Ordinate, der motorische Nullpunkt somit bei +5,2 cm.

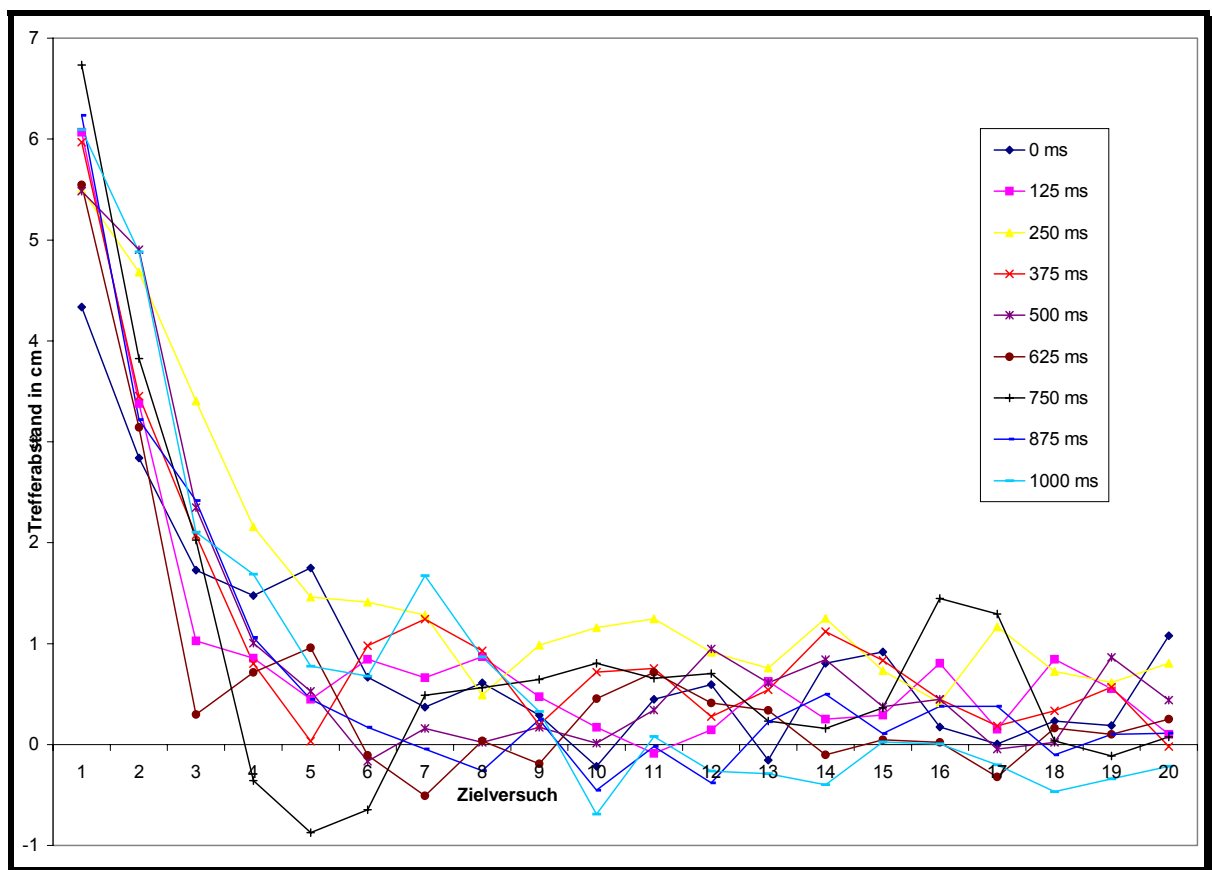


Abb. 3.1.6: Adaptationskurven bei unterschiedlichen Zeitverzögerungen

Dargestellt sind die Mittelwerte der Trefferabstände vom Zielkreuz über die Folge der Trefferversuche. (6 Versuchspersonen)

Während der Adaptationsphase machte sich eine zeitliche Verzögerung in den Ergebnissen der Versuchspersonen nicht bemerkbar. Die Versuchspersonen korrigierten bewusst den beobachteten Fehler – es handelte sich hierbei nicht um eine gezielte, sondern um eine geplante Bewegung weiter links des Zielkreuzes.

3.1 Ergebnisse

Die Verzögerung machte sich dagegen im Folgeeffekt bemerkbar.

Für die Folgeeffekte wurde die Verschiebung aufgehoben und kein visuelles Feedback geliefert. Durch fehlende visuelle Rückmeldung readaptierten die Versuchspersonen nicht und behielten den adaptierten Abstand bei. Die Darstellung im Diagramm zeigt entsprechend den motorischen Nullpunkt als Ordinate. Der verschobene Zielpunkt liegt bei $-5,2$ cm.

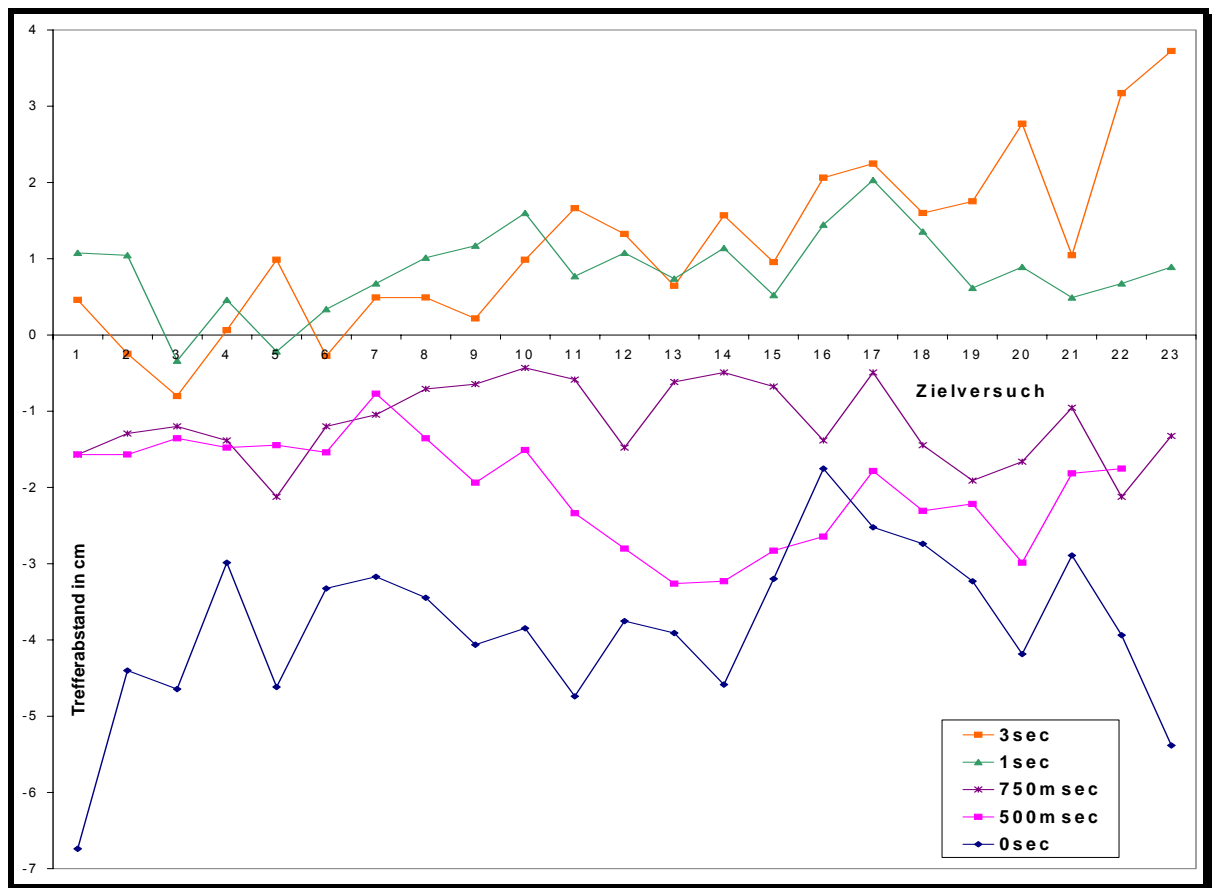


Abb. 3.1.7: Nacheffektcurven der zeitlichen Verzögerungen

Dargestellt sind die Nacheffektwerte der Trefferabstände vom Nullpunkt ohne visuelle Rückmeldung über die Folge der Trefferversuche.
(1 Versuchsperson als Beispiel)

Wie man sieht, war der Folgeeffekt groß, wenn der Trefferpunkt sofort dargestellt wurde (Abb. 3.1.7: unterste Kurve, keine zeitliche Verzögerung – 0 sec). Bei steigender zeitlichen Verzögerung des visuellen Feedbacks sank der Folgeeffekt kontinuierlich ab (500 msec, 750 msec) und ab 1 sec (3 sec) zeigte sich kein Folgeeffekt mehr.

Die Versuchspersonen zeigten untereinander große Unterschiede in ihren Folgeeffektwerten, so dass eine Mittelung der Daten nicht sinnvoll war. Die anderen Versuchspersonen lieferten

ähnliche Ergebnisse, jedoch mit nicht ganz so deutlichen und optimalen Differenzen zwischen den Zeitverzögerungen.

Dieser Versuch zeigte, dass eine Verzögerung des visuellen Feedbacks keinen Einfluss auf das Verhalten der Versuchspersonen während der Adaptationsphase, jedoch einen erheblich Einfluss auf die Folgeeffekte hat. In den Folgeeffekten zeigten die Versuchspersonen so große Unterschiede, dass eine individuelle Untersuchung sinnvoll wurde.

Dies wird im Hauptversuch (3.2.1 Die Versuche zur zeitlichen Verzögerung des visuellen Feedbacks Δt , Seite 34f) ausführlich untersucht.

3.1.5 Der Intermanuelle Transfer II und die zeitliche Verzögerung des visuellen Feedbacks II

Dieser Versuch zum intermanuellen Transfer beschäftigt sich mit der Frage, ob die Verschiebungsrichtung – und somit die Projektion in die rechte oder linke Gehirnhälfte – einen Einfluss auf die Übertragungsleistung auf die passive Hand hat. Getestet wurde in der Adaptationsphase die dominante Hand, in der Folgeeffektphase die nichtdominante Hand auf eine erfolgte Lernübertragung. Die Verschiebungsrichtung ergab sich aus der Projektion in die Hirnhemisphäre:

- a) Verschiebung zur nichtdominanten Hand
→ Projektion in die Gehirnhälfte, welche die dominante Hand steuert

- b) Verschiebung zur dominanten Hand
→ Projektion in die Gehirnhälfte, welche die nichtdominante Hand steuert

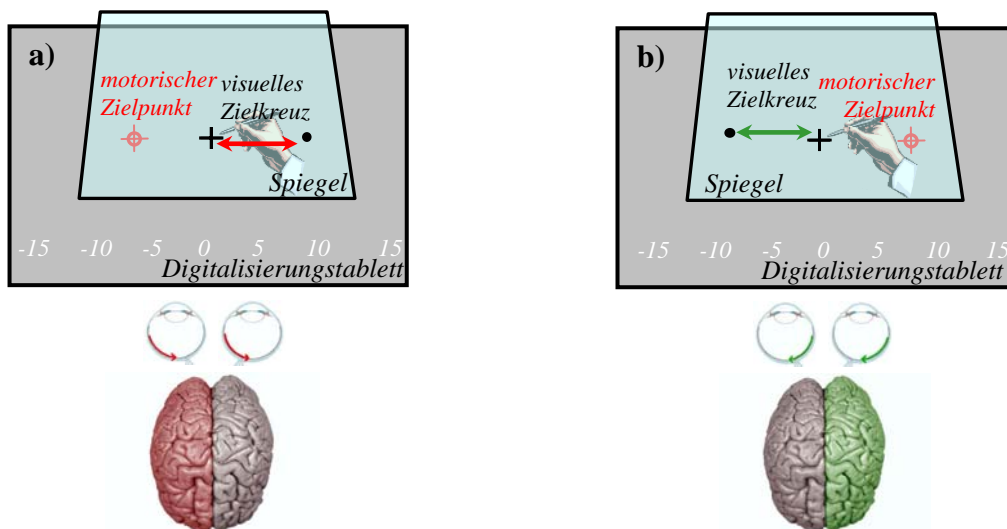


Abb. 3.1.8 Verschiebungsrichtungen (bei Rechtshänder)

- a) zur nichtdominanten Hand hin (links)
b) zur dominanten Hand hin (rechts)

Auf diese Weise sollte überprüft werden, in wieweit die Projektion in die Hirnhemisphäre, welche die aktive (oder passive) Hand steuerte, Einfluss auf den Transfer nahm.

Bei diesem Versuch zum intermanuellen Transfer wurde untersucht, ob die Verschiebungsrichtung zur Seite der dominanten Hand oder nichtdominanten Hand einen Einfluss auf die Übertragungsleistung auf die passive Hand hat.

Die gewonnenen Adaptationsdaten wurden getrennt ausgewertet nach den ersten Treffern (Lernphase) und den letzten Treffern (adaptierte Phase). Die adaptierte Phase kennzeichnet sich dadurch, dass die Versuchspersonen sich an die visuomotorische Verschiebung gewöhnt haben, ihre Trefferpunkte um das Zielkreuz herum setzten. Diese letzteren Daten der Adaptationsphase wurden gemittelt und verwandt um die Referenzdaten für die Nacheffektwerte (Folgeeffekte) zum Vergleich zu liefern. Die Nacheffekte wurden jeweils mit der nichtdominanten Hand getestet und ebenso gemittelt.

Die Diagramme stellen den mittleren Abstand vom Nullpunkt dar. AD beschreibt die mittleren Werte der adaptierten Daten aus der Adaptationsphase, NE die gemittelten Nacheffektwerte. Getestet wurden Versuchspersonen A bis E (A, B, C, D - Rechtshänder, E - Linkshänder). Die Verschiebung betrug jeweils +/-4,5 cm.

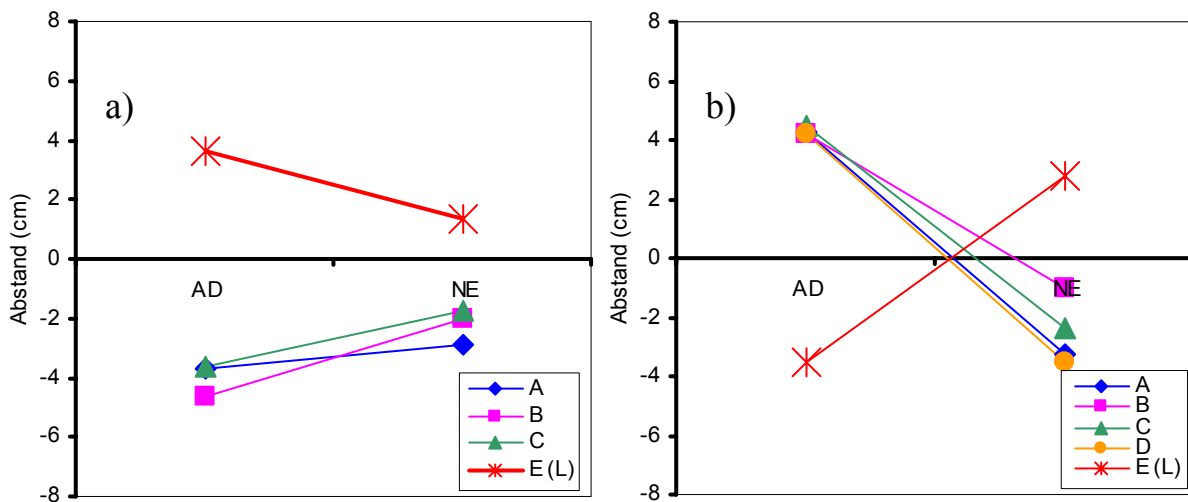


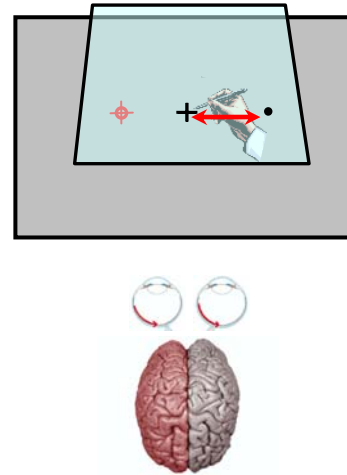
Abb. 3.1.9: Intermanueller Transfer

Adaptationswerte und Nacheffektwerte im Vergleich

- a) Verschiebung zur nichtdominanten Hand (4 Versuchspersonen)
- b) Verschiebung zur dominanten Hand (5 Versuchspersonen)

Die Ergebnisse der Verschiebung in Richtung der nichtdominanten Hand (a) zeigten, dass die gemittelten Nacheffektwerte nahe den Werten der adaptierten Phase lagen (annähernd waagerechte Verbindungskurven). Bei dieser Projektion in die Gehirnhälfte, die die dominante Hand steuert, hatte die nichtdominante, passive Hand somit in diesem

Versuchsabschnitt einen Lerneffekt erfahren. Gesah die Verschiebung zur dominanten Hand und die visuellen Informationen wurden in die Hirnhemisphäre der nichtdominanten Hand projiziert, so zeigten die Nacheffekte eine deutliche Differenz zu den Adaptationswerten (Verbindungskurven diagonal, überschneiden die X-Achse). Die nichtdominante, passive Hand schien in dieser Versuchsanordnung demnach keinen Lerneffekt zu erfahren und lag sogar erheblich vom Nullpunkt in die Gegenrichtung entfernt. Die Projektion in die Hemisphäre der dominanten Hand während der Adaptationsphase war in diesem Versuch demnach von Bedeutung für einen intermanuellen Transfer der adaptiven Lernleistung.



Parallel zu diesem Versuch wurde ein weiterer Test zur zeitlichen Verzögerung des visuellen Feedbacks getestet, um die gesammelten Daten aus vorhergehendem Versuch (3.1.4 Die zeitliche Verzögerung des visuellen Feedbacks I, Seite 27f) zu überprüfen.

Die Verschiebung wurde aufgrund der gerade beschriebenen Ergebnisse zur nichtdominanten Hand hin vorgenommen. Die Daten der Versuchspersonen wurden wiederum individuell ausgewertet. Die gemittelten Adaptationsdaten wurden mit den Nacheffekten der jeweiligen Zeitverzögerungen verglichen.

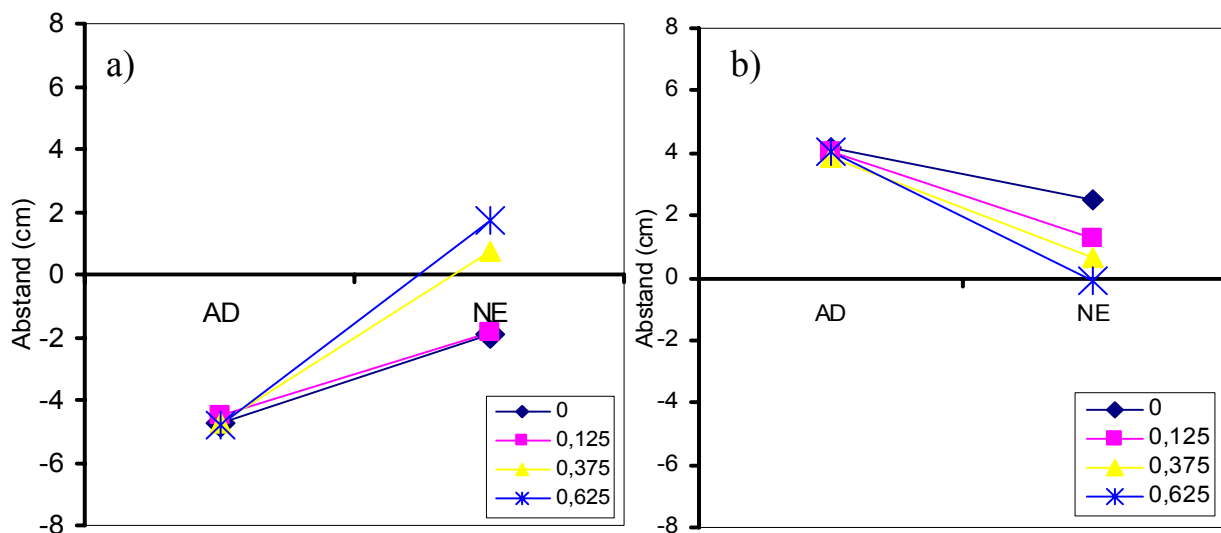


Abb. 3.1.10: zeitliche Verzögerung des visuellen Feedbacks

Adaptationswerte und Nacheffektwerte im Vergleich; Verschiebung zur nichtdominanten Hand

- a) Versuchsperson C – Rechtshänder
- b) Versuchsperson E – Linkshänder

Die dargestellten Ergebnisse der Versuchspersonen zeigten, dass mit zunehmender zeitlicher Verzögerung, die Nacheffekte der Versuchspersonen abnahmen und sich von den gemittelten Adaptationswerten entfernten. Die Daten bestätigten die Ergebnisse aus Versuch 3.1.4, dass mit zunehmender zeitlicher Verzögerung des visuellen Feedbacks die Werte der Folgeeffekte abnahmen und somit eine verminderte Adaptationsleistung zu beobachten war.

Eine ausführliche Untersuchung zur zeitlichen Verzögerung des visuellen Feedbacks folgt in den Hauptversuchen (3.2.1 Die Versuche zur zeitlichen Verzögerung des visuellen Feedbacks Δt , Seite 34f).

3.1.6 Der intermanuelle Transfer bei der visuelle Rückmeldung der richtigen und der falschen Hand

Zu einer Adaptationsleistung ist, wie bereits in meiner Diplomarbeit gezeigt (siehe 3.1.2 Die Adaptationsbewegungen mit und ohne visuelle Rückmeldung, Seite 21), keineswegs das Beobachten der Handbewegung notwendig. Es genügt eine kurze Anzeige des Trefferortes. In diesem Versuch soll getestet werden, ob eine Wahrnehmung der ganzen Hand nicht doch wirksam ist, ggf. einen größeren Effekt auf die Adaptationsleistung ausübt als eine einfache Trefferpunkt-Projektion. Die Versuchspersonen beobachten hier nicht ihre Hand, stattdessen werden digitale Bilder einer rechten oder linken Hand zusätzlich zur Punktprojektion dargestellt (Hand mit Stift, dessen Spitze auf der Punktprojektion liegt).

Weiterführend stellte sich die Frage, ob die Präsentation eines Bildes der passiven Hand während der Adaptationsphase, vielleicht einen verbesserten intermanuellen Transfer ermöglicht.

Beim Training der rechten Hand während der Adaptationsphase wurde entweder die richtige, rechte Hand oder die falsche, linke Hand präsentiert und die Lernleistung der passiven linken Hand untersucht.

Die Verschiebung des motorischen Zielpunktes erfolgte um 4,5 cm nach links (Westen). Die Adaptationsphase wurde mit der rechten Hand durchgeführt, wobei im ersten Versuch eine rechte Hand zu sehen war, im zweiten Versuch eine linke Hand. Der Folgeeffekt wurde dann jeweils mit der linken Hand getestet.

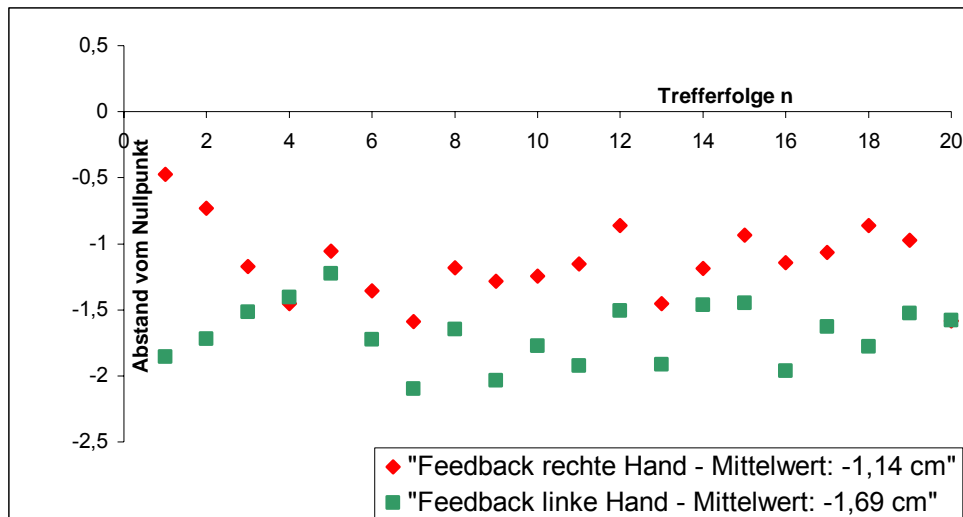


Abb. 3.1.11: Folgeeffekte mit linker Hand nach Adaptation mit rechter Hand und

- a) visuelles Feedback der richtigen, **rechten** Hand (Mittelwert: 1,14 cm)
- b) visuelles Feedback der falschen, **linken** Hand (Mittelwert: 1,69 cm)

Während bei einer optischen Rückmeldung der aktiven rechten Hand ein mittlerer Folgeeffekt von -1,14 cm der linken Hand zu beobachten war, ist eine Erhöhung des mittleren Folgeeffektes auf -1,69 cm erfolgt, bei der Projektion dieser passiven Hand.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Wahrnehmung der Hand offensichtlich doch von Bedeutung ist: Die passive Hand erfuhr eine verbesserte Lernleistung, wenn das visuelle Feedback während der Adaptationsphase auch eine Projektion dieser passiven Hand war.

3.1.7 Die Darstellungsdauer des optischen Zielkreuzes

In Bezug auf die visuomotorische Adaptation war ein weiterer Zeitfaktor Testgrundlage. In diesem Fall wurde nicht das visuelle Feedback variiert, sondern das optische Zielkreuz mit einer bestimmten Zeitdauer präsentiert (500 msec, 900 msec, 1800 msec oder zur Referenz ein dauerhaft angezeigtes Zielkreuz). Die Versuchspersonen waren angewiesen, direkt nach Verschwinden des optischen Zielkreuzes ihre Zielbewegung durchzuführen. Nach Auftreffen des Stiftes und der Projektion des Zielpunktes erschien das Zielkreuz wieder für die angegebene Dauer. Es wurde eine Linksverschiebung um 9,1 cm rechtshändig getestet (Adaptation und Folgeeffekt). Anders als bisher wurde der verschobene motorische Zielpunkt als Nullpunkt dargestellt, der visuelle Zielpunkt liegt entsprechend bei +9,1 cm.

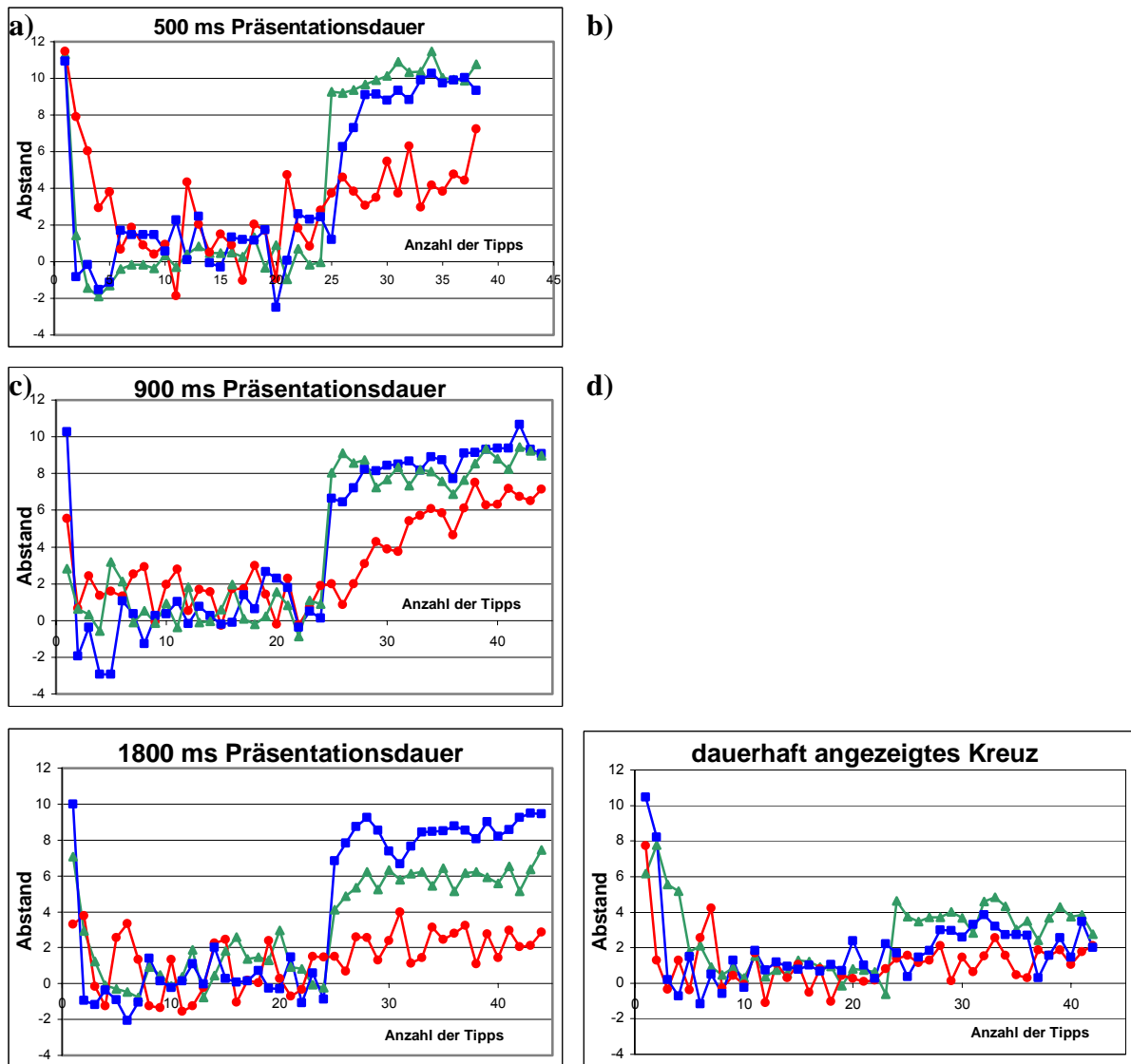


Abb. 3.1.12: Ergebnisse Adaptationen und Folgeeffekte nach Präsentationsdauer

3 Versuchspersonen als Beispiele

- a) Präsentationsdauer des optischen Zielkreuzes von 500 msec
- b) Präsentationsdauer des optischen Zielkreuzes von 900 msec
- c) Präsentationsdauer des optischen Zielkreuzes von 1800 msec
- d) Dauerhaft präsentiertes optisches Zielkreuz

Die Variationen der Präsentationsdauer des Zielkreuzes zeigten keinen Einfluss auf die Adaptationsphase. Die Differenzen ergaben sich aber, ähnlich des vorangegangenen Versuches mit einer zeitlichen Verzögerung des visuellen Feedbacks (3.1.4 zeitliche Verzögerung des visuellen Feedbacks), im Folgeeffekt. Trotz individueller Unterschiede zeigte sich eine deutliche Zunahme der adaptiven Lernleistung, je länger das Zielkreuz dargestellt wurde. Während Versuchsperson rot schon früh bei 500 msec eine adaptive Leistung zeigt, reagiert Versuchsperson grün ab 1800 msec und Versuchsperson blau erst bei einem dauerhaften Zielkreuz adaptierend.

3.1.8 Zusammenfassung der Vorversuche

Die Vorversuche bieten die Möglichkeit, verschiedene Gedanken, Methoden und experimentelle Varianten auszuprobieren. So können die eigentlich interessanten Fragestellungen herausgefiltert werden. Da aber nicht alle bearbeitet werden konnten, wurden nur zwei der Schwerpunkte zur weiteren Untersuchung ausgewählt.

Zusammenfassend boten die Vorversuche folgende Ergebnisse:

- Das visuelle Feedback kann auf eine kurze Anzeige des Trefferpunktes reduziert werden, um an eine visuomotorische Verschiebung zu adaptieren.
- Dennoch hat die Beobachtung einer Hand einen Einfluss auf die Ergebnisse. Im Folgeeffekt zeigte sich eine verbesserter intermanueller Transfer, wenn ein Bild der passiven Hand während der Adaptationsphase dargestellt wurde.
- Ein gesteigerter intermanueller Transfer der Adaptationsleistung konnte auch dann gezeigt werden, wenn die visuelle Projektion in die dominante Hirnhemisphäre erfolgte und diese während der Adaptationsphase aktiv war.
- Eine zeitliche Verzögerung des visuellen Feedbacks hat keinen Einfluss auf die Adaptationsphase. Dagegen verringern sich die Folgeeffekte mit zunehmender Zeitverzögerung der optischen Rückmeldung.
- Die individuellen Unterschiede der Versuchspersonen, bezüglich ihrer visuomotorischen Eigenheiten, sind von besonderer Bedeutung bei der Auswertung und müssen berücksichtigt werden.

3.2 Die Hauptversuche

Die in den Vorversuchen angesprochenen Experimente zur zeitlichen Verzögerung des visuellen Feedbacks und zum intermanuellen Transfer werden hier einheitlich und ausführlich mit der entwickelten Methode durchgeführt.

[Als Reflexionsfläche wird ausschließlich ein Spiegel verwendet, die dargestellte Hand in den Abbildungen dient nur zur Veranschaulichung, für die Versuchsperson ist die durchgeführte Bewegung sowie der motorische Zielpunkt nicht sichtbar.]

3.2.1 Die Versuche zur zeitlichen Verzögerung des visuellen Feedbacks Δt

Die Versuchspersonen führen den Adaptationsversuch mit unterschiedlicher zeitlicher Verzögerung der Punktprojektion von 0,0 sec bis 1,0 sec aus und werden nach jedem Versuch auf ihren Folgeeffekt hin untersucht. Die höhere Anzahl an Versuchspersonen ermöglicht eine intensive Analyse der einzelnen Phasen des Experiments. Außerdem sollen die individuellen Unterschiede untersucht werden.

3.2.1.1 Die Adaptation

Die Adaptation beschreibt die visuomotorische Korrektur und Kompensation der simulierten Verschiebung ohne direktes visuelles Feedback der Handbewegung, aber Rückmeldung über den Trefferort. Durch die programmierte Verschiebung ist der motorische Zielpunkt um 9cm nach links versetzt (siehe Abb. 3.2.1.1 Ansicht des Versuchs). Die Versuchsperson visiert das visuelle Zielkreuz an und versucht den Ort, an dem das Zielkreuz auf dem Digitalisierungstablett projiziert ist, zu treffen. Durch die Verschiebung des motorischen Zielpunktes, ergibt sich ein Fehler um 9cm zu weit rechts. Der Trefferort wird auf dem Monitor um diesen Abstand rechts vom Zielkreuz als Punkt dargestellt. Die Versuchsperson beobachtet diesen Fehler und versucht ihn durch eine weiter nach links gesetzte Zielbewegung zu korrigieren. Entsprechend der Vorgabe versuchen die Testpersonen mit dem Stift den motorischen Zielpunkt zu treffen und somit den projizierten Punkt auf das visuelle Zielkreuz zu setzen.

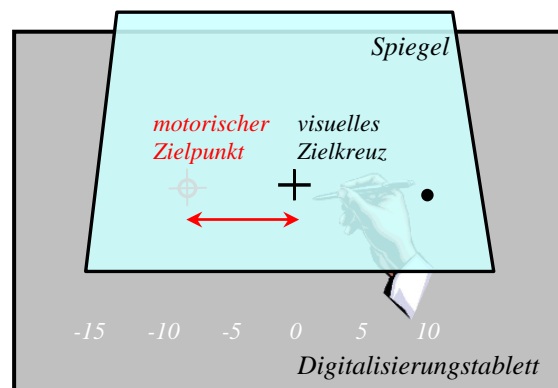


Abb. 3.2.1.1 Ansicht des Versuchs
Verschiebung des motorischen Zielpunktes

Die vorangegangene Zielbewegung wird jeweils korrigiert und der Stift näher an dem motorischen Zielpunkt, weiter nach links gesetzt. Da diese Zielbewegung nicht der Position des visuell wahrgenommenen Zielkreuzes entspricht, wird sie nicht vollständig korrigiert, sondern unterliegt einem Lernmechanismus zwischen gefühlter Wahrnehmung der Körpermitte bzw. des Zielkreuzes (Propriozeption) und beobachteter Differenz durch die Verschiebung. Aufgrund der wiederholten Zielversuche, der beobachteten Fehler und deren Korrektur im nächsten Zielversuch verringert sich der Abstand der Zielbewegung zum motorischen Zielpunkt.

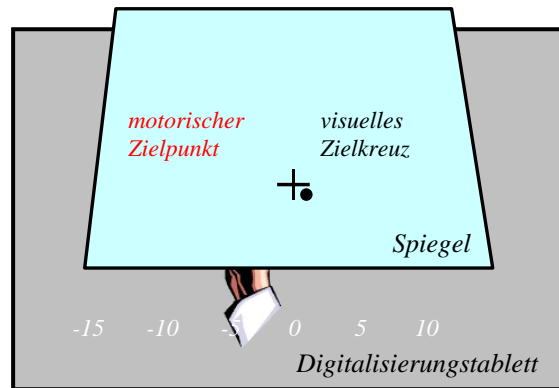


Abb. 3.2.1.2: Ansicht des Versuchs
– Adaptationsphase

Trägt man die erhaltenen Trefferdaten der Versuchspersonen in einem Diagramm auf, welches auf der Ordinate die Folge der Trefferversuche und auf der Abszisse den Abstand der Trefferversuche vom motorischen Nullpunkt aufzeigt, erhält man eine charakteristische Lernkurve. Der Abstand der Verschiebung des motorischen Zielpunktes ist jeweils als grau gestrichelte Linie bei -9,1 cm aufgetragen.

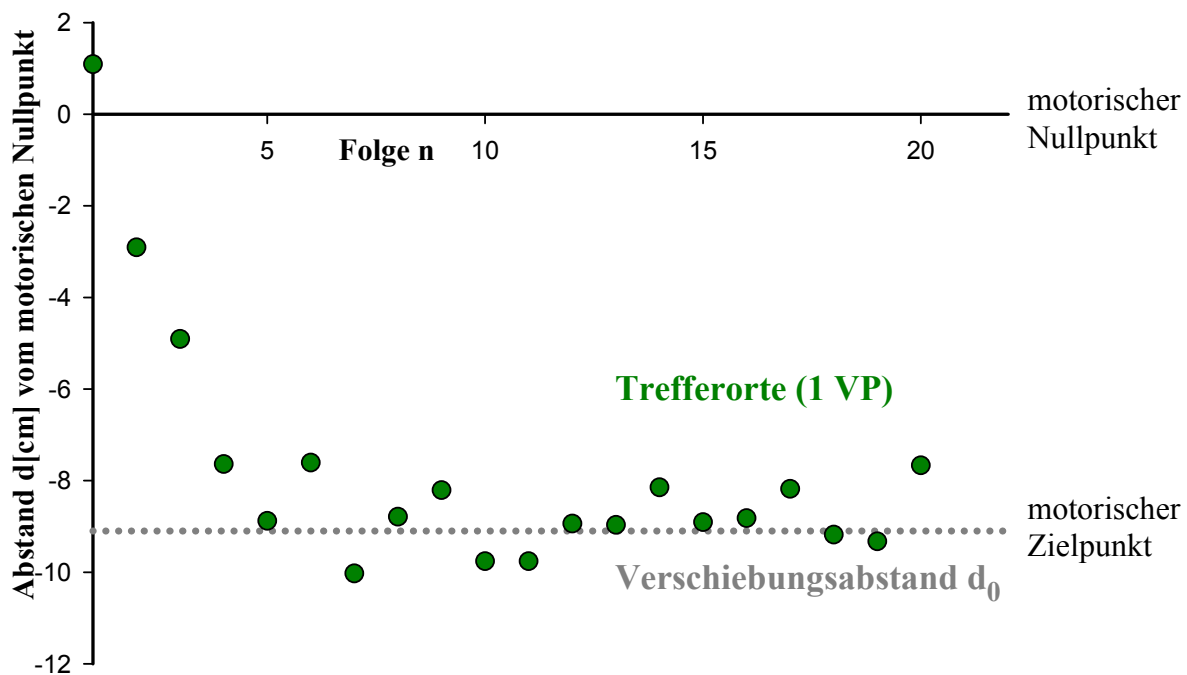


Abb. 3.2.1.3: Lernkurve – Abstand der Trefferversuche vom motorischen Zielpunkt

über die Folge der Trefferversuche bei keiner zeitlichen Differenz des visuellen Feedbacks (eine Versuchsperson als Beispiel)
 Dass die Verschiebung vollkommen kompensiert wird, konnte in keinem der folgenden Versuche oder bei keiner Versuchsperson festgestellt werden. Die Zielbewegungen werden meist etwas zu kurz durchgeführt, der motorische Zielpunkt im Mittel nie ganz erreicht. Alle 17 Versuchspersonen zeigen ein sehr ähnliches Adaptationsverhalten (siehe Abb. 3.2.1.4: Adaptationsphase).

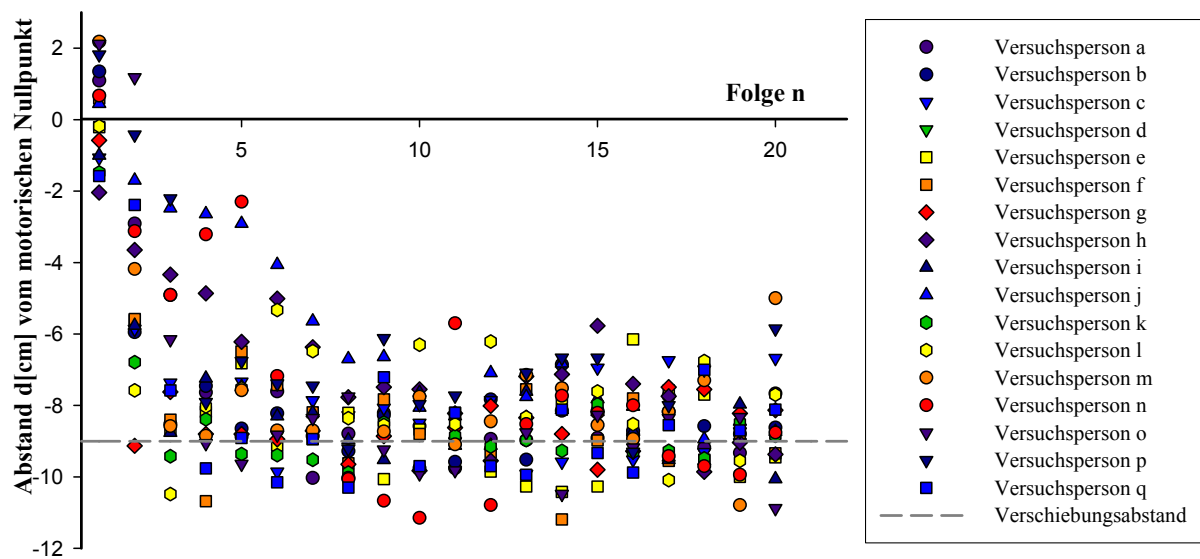


Abb. 3.2.1.4: Adaptationsphase - Abstand der Trefferversuche vom motorischen Zielpunkt über die Folge der Trefferversuche bei keiner zeitlichen Differenz des visuellen Feedbacks (17 Versuchspersonen)

Innerhalb der ersten 8 gesetzten Trefferpunkte adaptieren die Versuchspersonen an die Verschiebung und setzen die Zielbewegung von da an nahe an den motorischen Zielpunkt. Der Grund für dieses ähnliche Verhalten in der Adaptationsphase, ist die Methodik der Durchführung. Die Versuchspersonen sollen den dargestellten Punkt auf das visuelle Zielkreuz setzen. Hierbei wird ganz bewusst die Zielbewegung in Richtung des verschobenen motorischen Zielpunktes durchgeführt.

Werden die Werte der Versuchspersonen über die Folge der Trefferversuche n gemittelt, ergibt sich die schwarze Punktcurve (siehe Abb. 3.2.1.5: Adaptationskurve) inklusiv ihrer Standardabweichung.

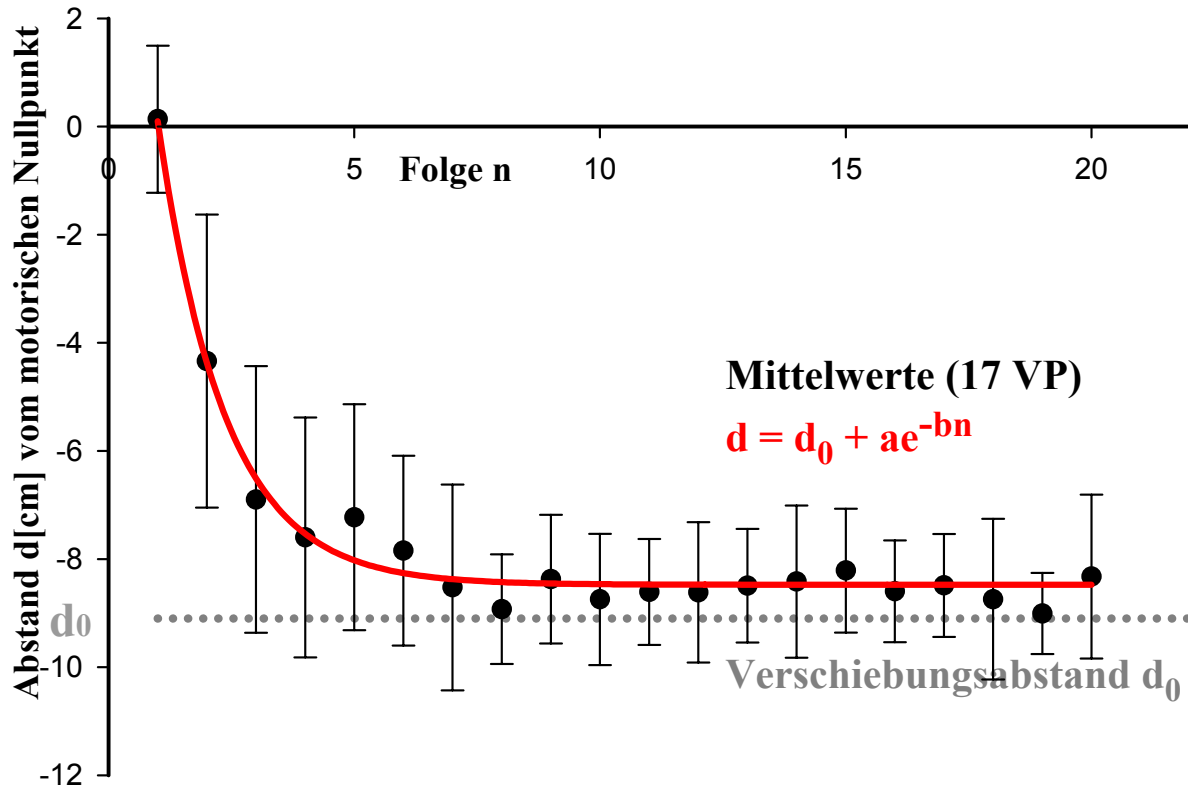


Abb. 3.2.1.5: Adaptationskurve - Mittelwerte der Versuchsdaten mit Standardabweichung und mathematischer Berechnung. Abstand der Trefferversuche vom motorischen Zielpunkt über die Folge der Trefferversuche bei keiner zeitlichen Differenz des visuellen Feedbacks (17 Versuchspersonen)

Die Lernkurve kann durch eine einfache Exponentialfunktion dargestellt werden. Da die Versuchspersonen nicht vollständig an die Verschiebung adaptieren, wird die Funktion mit den Konstanten a bzw. b erweitert. Auf diese Weise wird eine Kurve erzeugt, die nahezu ideal die Lernkurve der Versuchspersonen während der Adaptationsphase beschreibt (Korrelationskoeffizient $R: 0,99$ / $R^2: 0,97$; mit $a = 17,89$ und $b = 0,74$; für $n = 1 - \infty$).

$$d = d_0 + ae^{-bn}$$

- d → Abstand zum motorischen Nullpunkt
- d_0 → Verschiebungsabstand ($-9,1$ cm)
- n → Folge der Trefferpunkte (für $n = 1 - \infty$)

Mit diesem Ergebnis als Basis wurden, bei verschiedenen zeitlichen Verzögerungen des visuellen Feedbacks, die Adaptationen gemessen.

3.2 Ergebnisse

Die programmierte Punktdarstellung wurde so modifiziert, dass der projizierte Punkt je nach

Versuch um ...

0,000 sec

0,125 sec

0,250 sec

0,375 sec

0,500 sec

0,625 sec

0,750 sec

0,875 sec

1,000 sec

... verzögert auf dem Monitor erscheint.

Die ausgewählten Zeiten von 0,000 sec, 0,250 sec, 0,625 sec und 1,000 sec wurden mit der größten Anzahl an Versuchspersonen getestet und hier repräsentativ dargestellt.

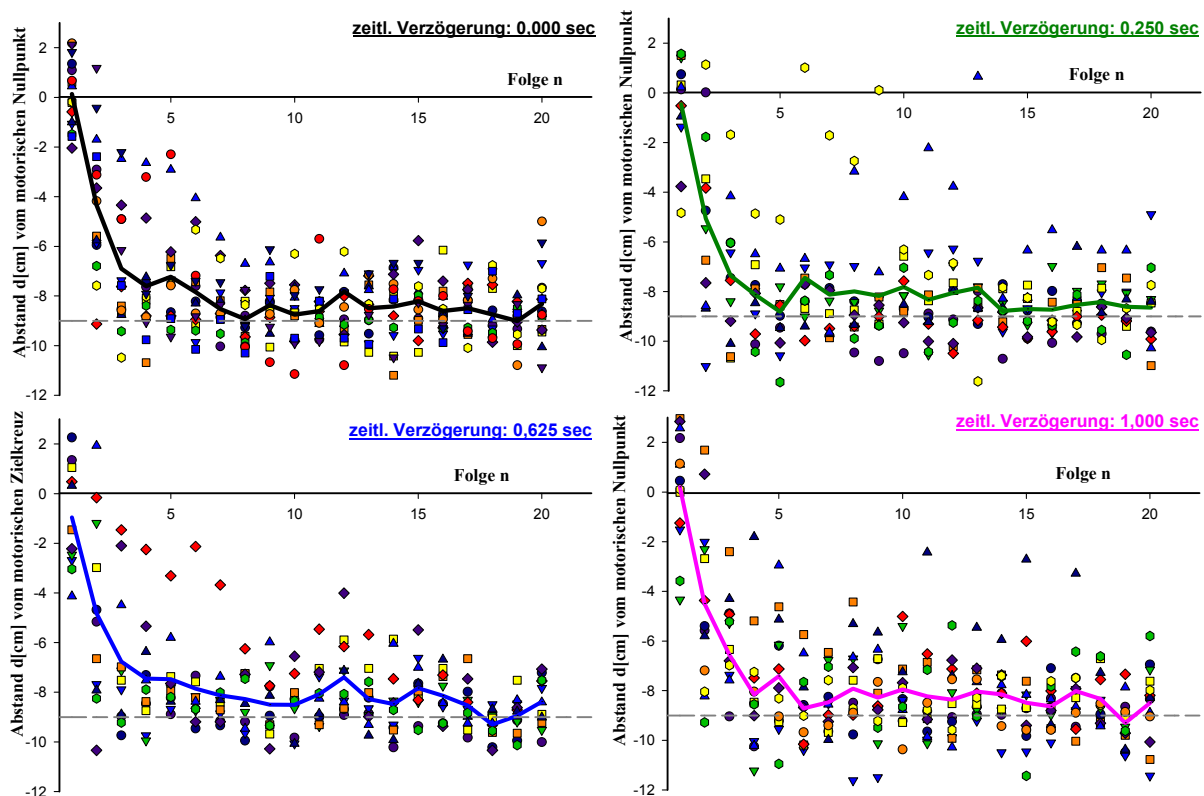


Abb. 3.2.1.6: Adaptationskurven - Mittelwerte der Versuchsdaten mit 0,000 sec / 0,250 sec / 0,625 sec / 1,000 sec Zeitdifferenz des visuellen Feedbacks. Abstand der Trefferversuche vom motorischen Zielpunkt über die Folge der Trefferversuche (0,000 sec – 17 Versuchspersonen / 0,250 sec – 12 Versuchspersonen / 0,625 sec – 11 Versuchspersonen / 1,000 sec – 13 Versuchspersonen)

Die graphisch dargestellten Daten lassen keine Unterschiede erkennen, auch nicht, wenn man die Mittelwertskurven übereinander anordnet:

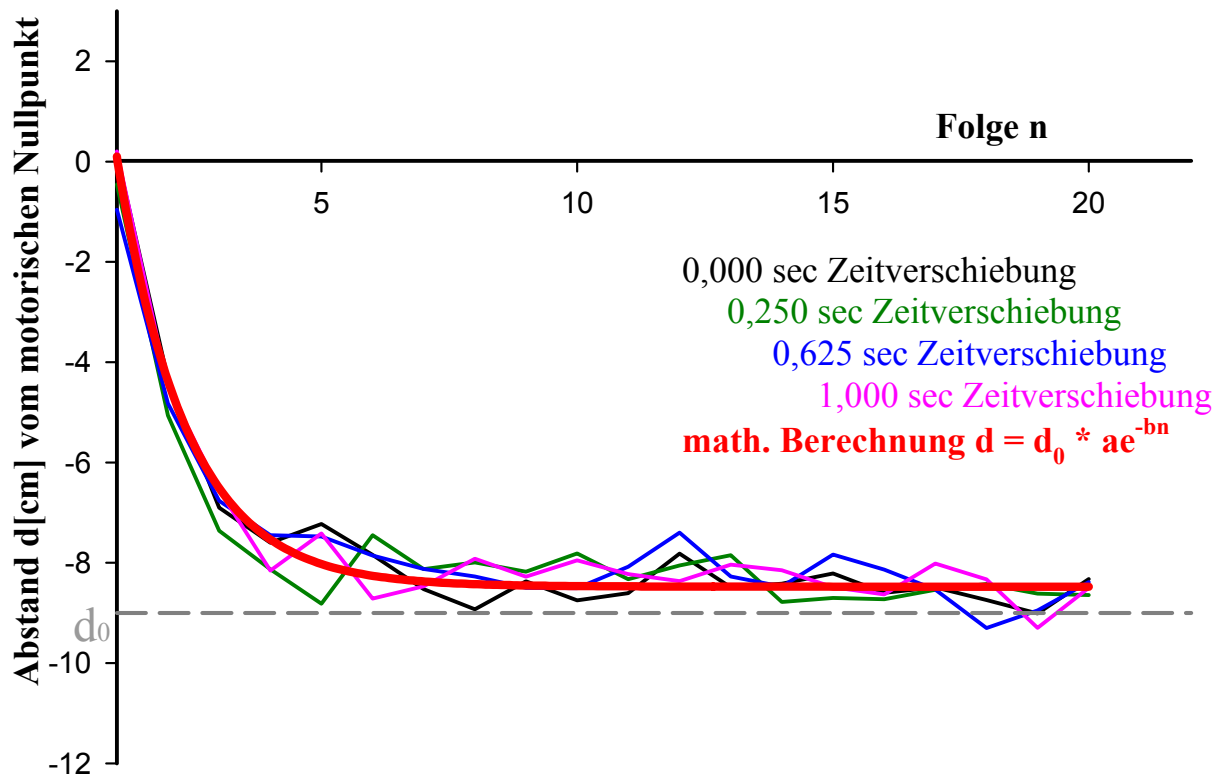


Abb. 3.2.1.7: Adaptationskurven – Mittelwertskurven für 0,000 sec / 0,250 sec / 0,625 sec / 1,000 sec Zeitverzögerung sowie die mathematische Berechnung (0,000 sec – 17 Versuchspersonen / 0,250 sec – 12 Versuchspersonen / 0,625 sec – 11 Versuchspersonen / 1,000 sec – 13 Versuchspersonen)

Keine der Verzögerungen zeigt signifikante Unterschiede zur Basismessung mit 0,000 sec, also ohne Zeitverzögerung auf. Die gesammelten Daten der Versuchspersonen entsprechen der aufgestellten mathematischen Funktion ohne Verzögerung. Legt man die Mittelwertskurven der unterschiedlichen zeitlichen Verzögerungen übereinander, so liegen diese nahezu deckungsgleich mit minimalen Abweichungen:

Eine zeitliche Verzögerung des visuellen Feedbacks hat keinen Einfluss auf diesen Adaptationsverlauf.

3.2.1.2 Der Folgeeffekt

Anhand des Folgeeffektes kann die Adaptation an die visuomotorische Verschiebung bewertet werden. Bei dieser Messung, die direkt an die Adaptationsphase anschließt, unterbleibt die Punktdarstellung des Trefferortes (siehe Abb. 2.6.3 Ansicht des Versuchs, Seite 13). Da die Versuchspersonen weder einen Fehler, noch eine Bestätigung ihrer Treffgenauigkeit erhalten, korrigieren sie ihre Zielbewegung nicht und setzen den Stift konstant an eine Position. Diese Position wird bestimmt durch den Grad der Adaptation und ist individuell sehr unterschiedlich.

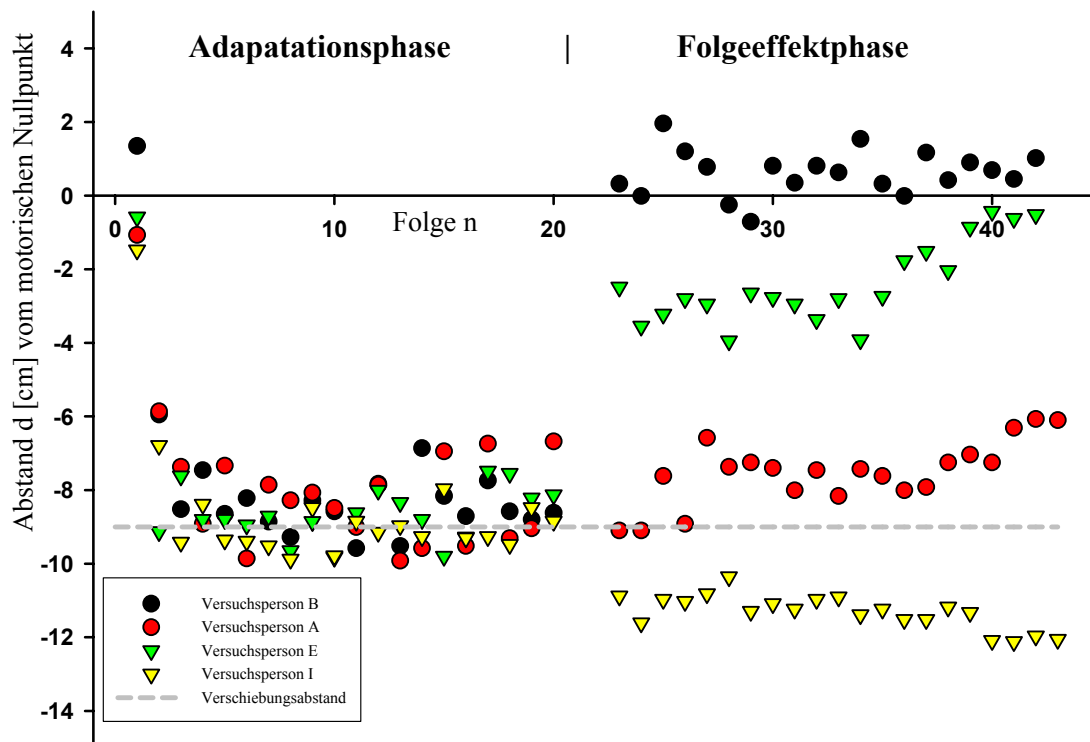


Abb. 3.2.1.8: Folgeeffektbeispiele – unterschiedliche Ausprägung der Folgeeffekt bei 4 Versuchspersonen (schwarz/grün/rot/gelb) – keine zeitliche Verzögerung

Bei einer zeitlichen Verzögerung des visuellen Feedbacks um 0,0 sec zeigen die Folgeeffekte trotz gleichen Adaptationsverhaltens bei den Versuchspersonen große Unterschiede. Die anschauliche Darstellung mit vier Beispielversuchspersonen zeigt zum einen die konstante Bewegungswiederholung der einzelnen Versuchspersonen ohne große Abweichung der Punkte voneinander, des Weiteren die große Differenz der Folgeeffektgröße zwischen den Versuchspersonen. Die einen bleiben dem gelernten, neuen Ziel treu (rot/gelb), die anderen scheinen nicht gelernt zu haben (schwarz). Versuchsperson schwarz zeigt keinen Effekt der Adaptation an die Versuchsbedingungen in ihrem Folgeeffekt, sie setzt die Punkte um den motorischen Nullpunkt herum. Dies bedeutet eine relativ exakte Zielbewegung auf das

optisch wahrgenommene Zielkreuz ohne visuomotorische Anpassung. Die meisten Testpersonen setzen die Punkte dazwischen (Abb. 3.2.1.8 - grün).

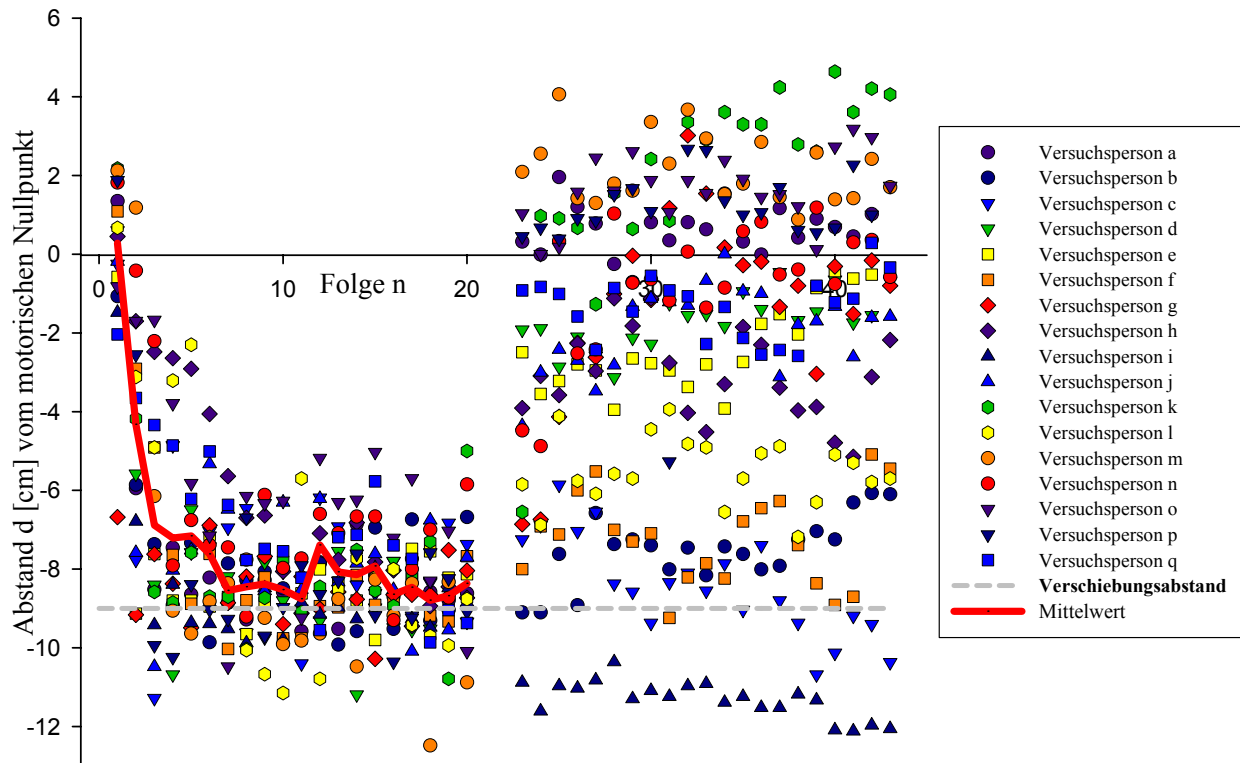


Abb. 3.2.1.9: Adaptationsphase und Folgeeffektphase

Abstand der Trefferversuche vom motorischen Zielpunkt über die Folge der Trefferversuche bei keiner zeitlichen Differenz des visuellen Feedbacks (17 Versuchspersonen)

Die adaptiven Unterschiede in den Ergebnissen der Folgeeffekte warfen die Frage nach den visuomotorischen Eigenschaften der Versuchspersonen auf. Eine Befragung der Testpersonen hinsichtlich Tätigkeiten oder Hobbys im täglichen Leben ergab in den meisten Fällen keinen Hinweis. Viele Versuchspersonen konnten leider keine Angaben über besondere visuomotorische Tätigkeiten geben, die hier korrelieren würden. Aber besonders bei den Extremfällen zeigten sich deutliche Zusammenhänge zwischen den gesammelten Daten und ausgeübten Aktivitäten.

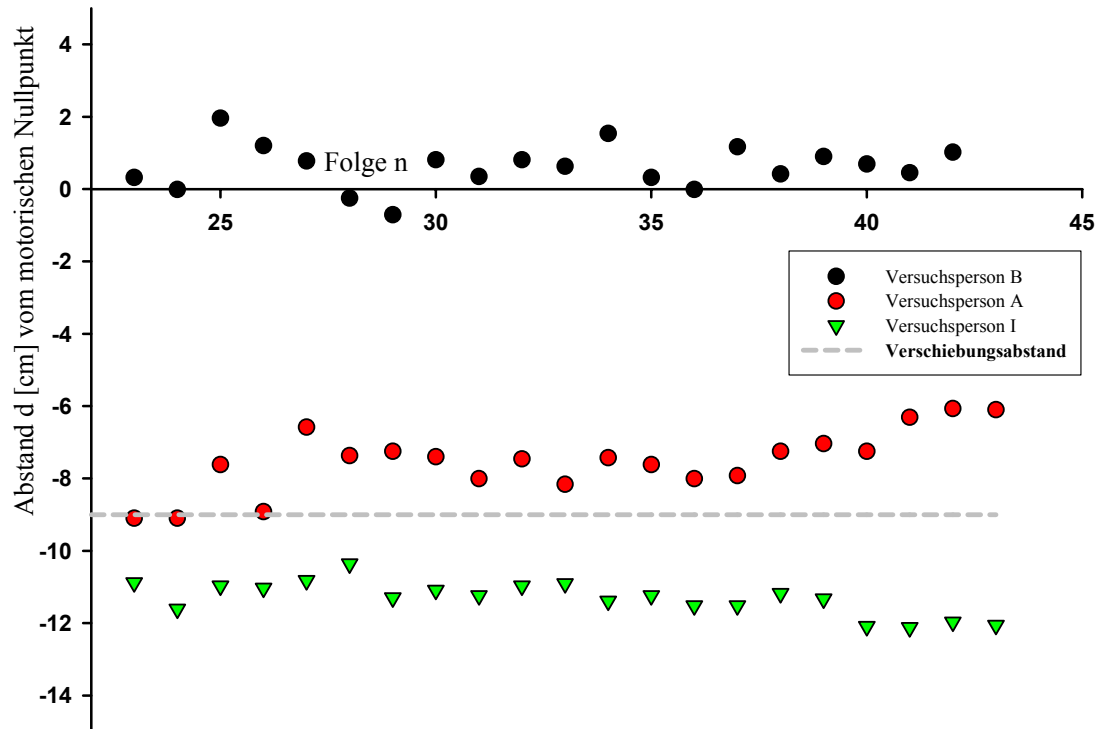


Abb. 3.2.1.10: Folgeeffekte ausgewählter Versuchspersonen mit repräsentativen Werten und korrelierenden visuomotorischen Tätigkeiten (schwarz – Sportschütze / rot – Pilot / grün - Kanufahrer)

Versuchspersonen mit einem geringen oder keinem Folgeeffekt erwiesen sich als Personen mit rein visuell gesteuerten Hobbys und Aktivitäten wie Sportschiessen und Fotografieren (schwarz), deren Ausübung keine motorische Zielfindung erfordert. Diejenigen Versuchspersonen mit einem hohen Folgeeffekt dagegen betrieben Tätigkeiten, die eine visuomotorische Gewöhnung erfordern, wie das Steuern von Autos, Flugzeugen (rot) oder Booten (grün). Hinzu kommen bei der letzten Gruppe ein ständiger Wechsel der Gefährty-Typen und somit jeweils neuartige Steuereigenschaften, an die adaptiert werden müssen. Offensichtlich unterliegt das optisch-haptische System bei jedem Individuum einem eigenen Einstellmechanismus. Die Hauptmenge der Daten liegt zwischen den Extrema liegende Bandbreite an Daten mit einer mehr oder minder ausgeprägten Tendenz zu hohen oder niedrigen Folgeeffekten.

Diverse Versuchspersonen wurden bei unterschiedlichen Verschiebungsabständen getestet. Dabei stellte sich heraus, dass der Folgeeffekt auf die Adaptationsphase anteilsmäßig annähernd gleich ist.

3.2 Ergebnisse

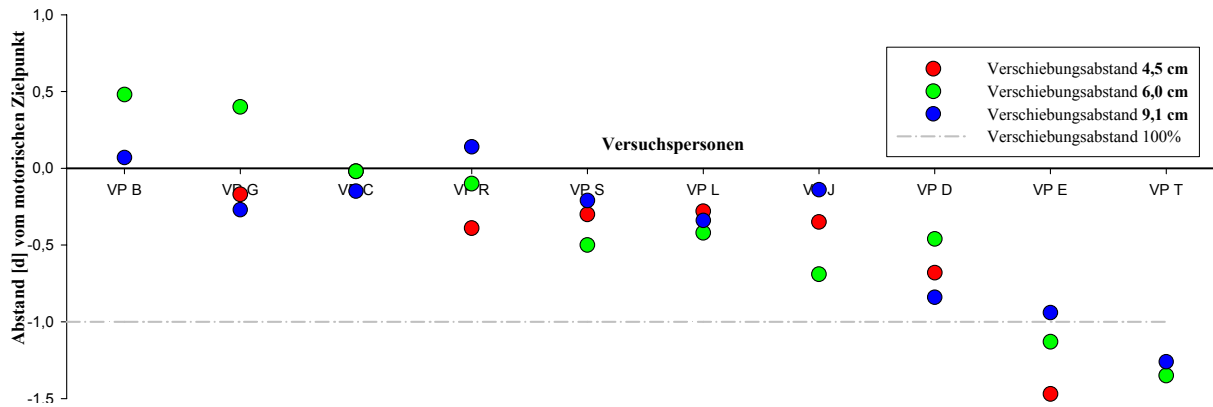


Abb. 3.2.1.11: mittlere Folgeeffektwerte (genormt) bei unterschiedlichen Verschiebungsabständen (4,5 cm / 6,0 cm / 9,1 cm)

Die Folgeeffektgröße, die als Anteil des Folgeeffekts in Relation zum Verschiebungsabstand verstanden werden kann, ist individuell unterschiedlich, aber annähernd konstant für die jeweilige Versuchsperson (siehe Abb. 3.2.1.11: mittlere Folgeeffektwerte). Das heißt, bei unterschiedlichen Verschiebungsabständen bleibt der Folgeeffekt einer Versuchsperson prozentual zu der Verschiebungsdifferenz erhalten. Sehr deutlich ist die Konstanz bei Versuchsperson L zu erkennen, deren mittlere Folgeeffektwerte bei drei verschiedenen Verschiebungsabständen nahezu identisch sind.

3.2.1.3 Wirkung der zeitlichen Verzögerungen auf den Folgeeffekt

Entsprechend der aufgestellten Hypothese (siehe 1.5 der Zeitfaktor, Seite 6) sollten die Adaptationsfähigkeiten bei diesen visuomotorischen Tests mit zunehmender zeitlicher Verzögerung der optischen Rückmeldung schlechter werden.

Während der Adaptationsphase konnte dieser Effekt nicht festgestellt werden. Daher werden für die weiteren Versuche die Folgeeffekte und somit eine anhaltende Lernleistung des visuomotorischen Systems bewertet.

Alle Versuchspersonen wurden getestet, auch jene, die nur einen geringen oder keinen Folgeeffekt zeigten. Trotz der unterschiedlichen zeitlichen Differenzen des visuellen Feedbacks in der vorangegangenen Adaptationsphase, erkennt man eine ähnliche Verteilung der Folgeeffekte.

3.2 Ergebnisse

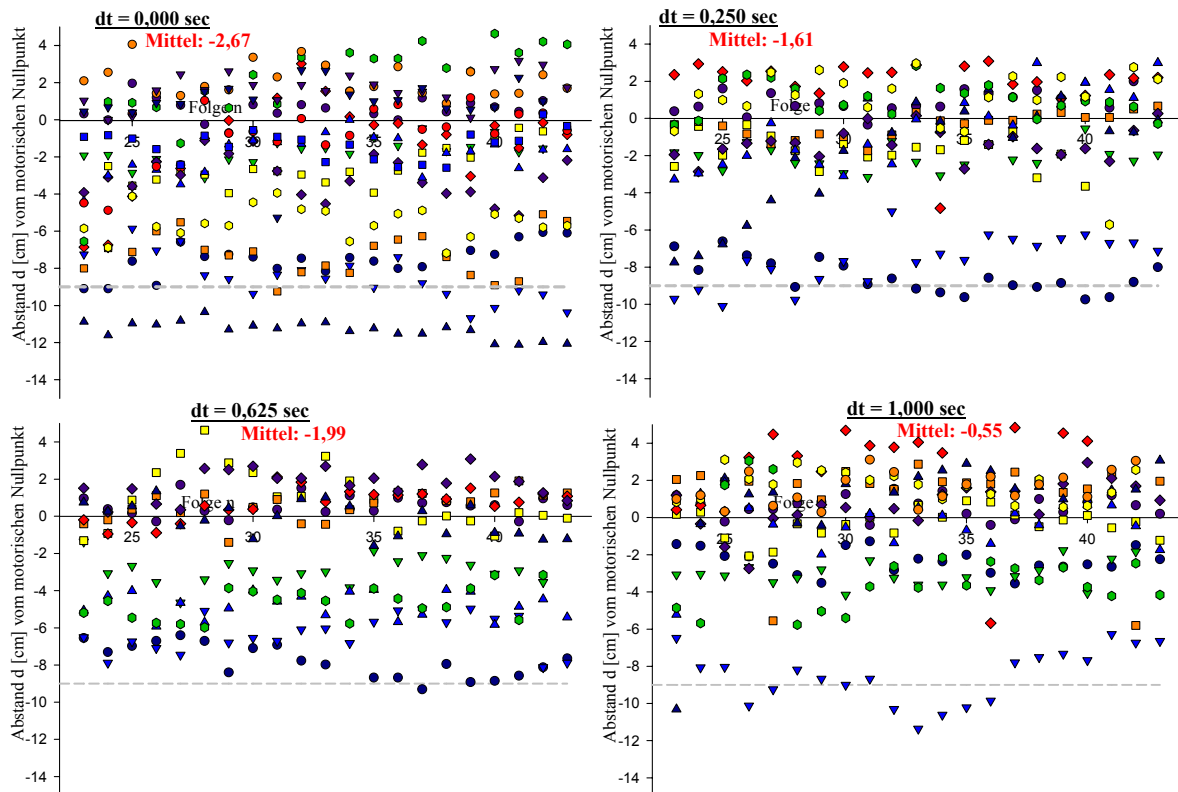


Abb. 3.2.1.12: Folgeeffektdaten aller Testpersonen – Trefferorte der Versuchspersonen sowie der Mittelwert bei 0,000 sec (-2,67) / 0,250 sec (-1,61) / 0,625 sec (-1,99) / 1,000 sec (-0,55) Zeitdifferenz (0,000 sec – 17 Versuchspersonen / 0,250 sec – 12 Versuchspersonen / 0,625 sec – 11 Versuchspersonen / 1,000 sec – 13 Versuchspersonen)

Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass mit zunehmender Verzögerung die höheren Folgeeffekte abnehmen und sich dem motorischen Nullpunkt annähern. Mit der Mittelung aller Daten bestätigt sich dieser Befund. Je größer die zeitliche Differenz des visuellen Feedbacks während der Adaptationsphase ist, desto geringer fällt der Folgeeffekt (Mittelwert) aus.

In den Diagrammen sind alle Versuchspersonen aufgenommen, auch jenen die einen geringen oder keinen Folgeeffekt bei keiner Zeitdifferenz der optischen Rückmeldung zeigen. Auf diese Testpersonen kann die Hypothese der Verschlechterung der visuomotorischen Fähigkeiten bei zunehmender zeitlicher Verzögerung des visuellen Feedbacks nur bedingt zutreffen, weil eine Abnahme des Folgeeffekts in diesen Fällen nicht mehr messbar ist.

Betrachtet man dementsprechend nur die gut adaptierten Versuchspersonen und deren Daten über die verschiedenen zeitlichen Differenzen hinweg, so verdeutlicht sich der schwächer werdende Folgeeffekt.

3.2 Ergebnisse

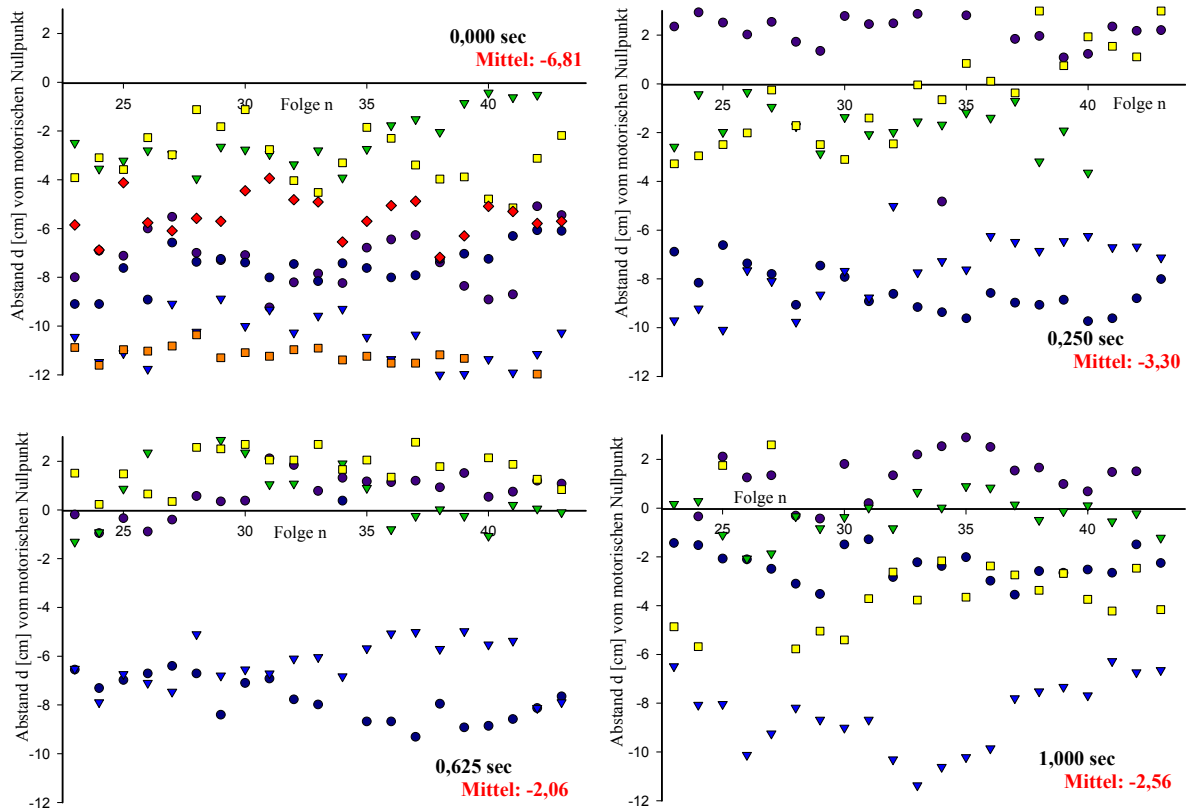


Abb. 3.2.1.13: Folgeeffektdata gut adaptierender Testpersonen – Trefferorte der Versuchspersonen sowie der Mittelwert bei 0,000 sec (-6,81) / 0,250 sec (-3,30) / 0,625 sec (-2,06) / 1,000 sec (-2,56) Zeitdifferenz (0,000 sec – 7 Versuchspersonen / 0,250 sec – 5 Versuchspersonen / 0,625 sec – 5 Versuchspersonen / 1,000 sec – 5 Versuchspersonen)

Mit Ausnahme einer Versuchsperson (▼) verringert sich bei allen anderen gut adaptierenden Testpersonen der Folgeeffekt mit zunehmender Zeitverzögerung.

Δt	0,000 sec	0,250 sec	0,625 sec	1,000 sec
Mittelwert Folgeeffekt	-2,67 cm	-1,61 cm	-1,99 cm	-0,55 cm
Mittelwert Folgeeffekt - gut adaptierend -	-6,81 cm	-3,30 cm	-2,06 cm	-2,56 cm

Bei keiner Verzögerung des visuellen Feedbacks, liegt der mittlere Folgeeffekt aller Daten bei - 2,67 cm, bzw. - 6,81 cm für die gut adaptierenden Versuchspersonen. Über die zeitlichen Verzögerungen der optischen Rückmeldung von 0,250 sec und 0,625 sec auf 1,0 sec, sinkt der Mittelwert auf - 0,55 cm für alle gesammelten Daten, bzw. - 2,56 cm für die gut adaptierenden Testpersonen ab.

Die graphische Auswertung der Mittelwerte der Folgeeffekte aller Testpersonen sowie der Mittelwerte der gut adaptierenden Testpersonen zeigt eine deutliche Folgeeffektabschwendung bei größer werdender zeitlicher Verzögerung (Δt) des visuellen Feedbacks.

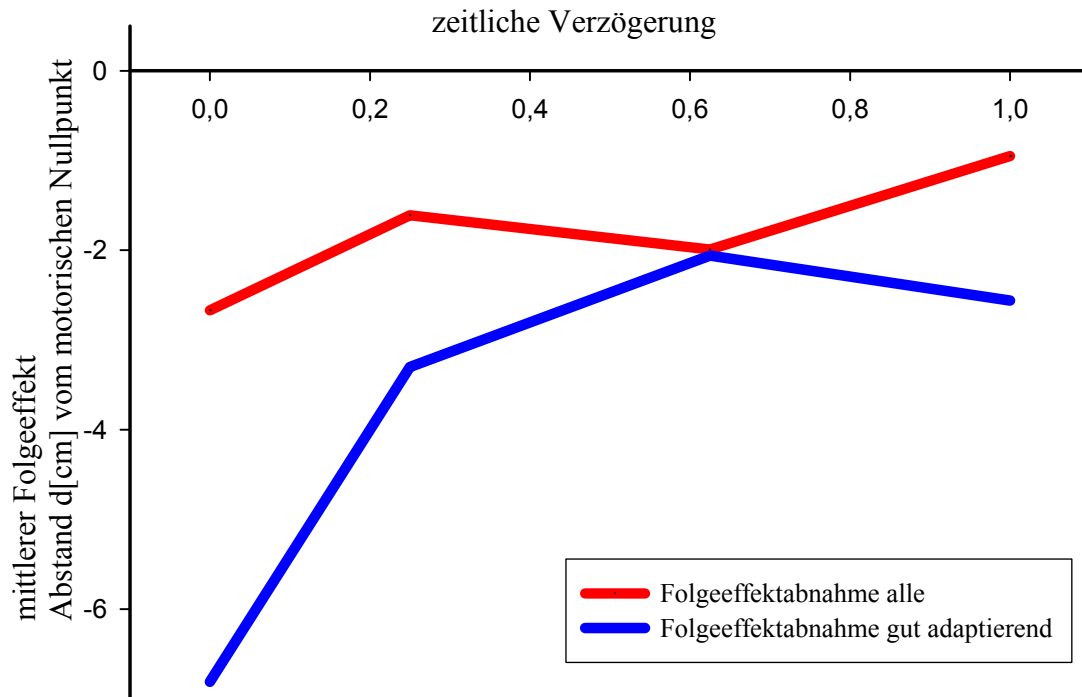


Abb. 3.2.1.14: Folgeeffektabschwendung - Verringerung des Folgeeffektes in Abhängigkeit von der zeitlichen Verzögerung des visuellen Feedbacks. Aufgetragen ist der mittlere Folgeeffekt aller Versuchsdaten (rot) und die Versuchsdaten gut adaptierender Testpersonen (blau) (Vgl. Folgeeffekt-daten Abb. X.x und X.x)

Individuelle Beobachtungen der Versuchspersonen beschreiben die Δt -abhängige Abnahme des Folgeeffektes noch klarer. Um eine sinnvolle Beschreibung dieses Effektes liefern zu können, werden unterschiedliche Werte berechnet.

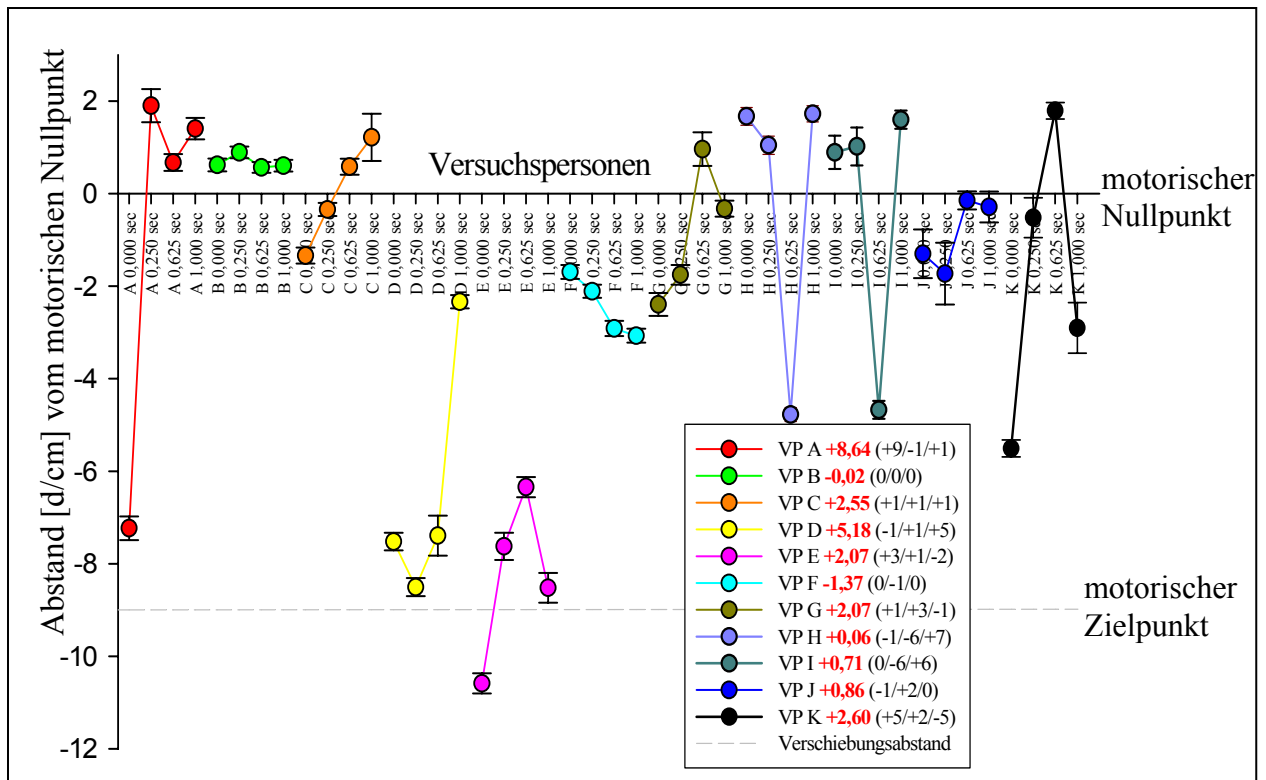
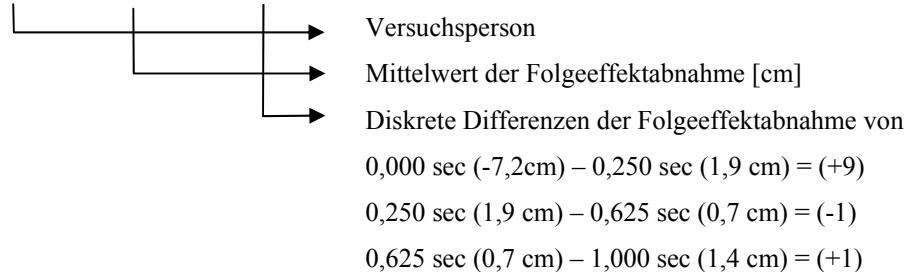


Abb. 3.2.1.15: einzelne Folgeeffektabnahmen bei einigen Versuchspersonen

In der Legende angegeben sind:

VP A **+8,46** (+9/-1/+1)



Der Mittelwert der Folgeeffektabnahme beschreibt die generelle Tendenz des Folgeeffektes über die Verzögerung der visuellen Rückmeldung während der Lernphase. Für die motorische Reaktion der Versuchspersonen während des Folgeeffekts bedeuten positive Werte eine Verschiebung vom links gelegenen motorischen Zielpunkt in Richtung des motorischen Nullpunktes. Bei fast allen Testpersonen zeigt sich die Abnahme der Folgeeffekte über die zeitliche Differenz in dem sinkenden Abstand zum motorischen Nullpunkt. Um den genauen Verlauf des Folgeeffekts über die zeitliche Verzögerung zu veranschaulichen, werden die Abstandsdifferenzen der Mittelwerte der aufeinander folgenden Zeitverzögerungen notiert. Die Aufteilung der Werte ist nötig, weil die Versuchsdaten keine konstante Steigung aufweisen und der Mittelwert alleine keine Informationen darüber liefert, ab welcher Zeitdifferenz eine Folgeeffektabnahme erfolgt. Versuchsperson A beispielsweise hat eine

maximale Folgeeffektabschmälerung im Bereich 0,0 sec (-7,2 cm) bis 0,250 sec (+1,9 cm; Differenz: +9 cm) Zeitverzögerung und bleibt daraufhin annähernd konstant (bei 1,9 cm / 0,7 cm / 1,4 cm; Differenz: -1/+1). Versuchsperson D dagegen behält fast konstante Werte bis 0,625 sec zeitliche Verzögerung (mit -7,5 cm bei 0,0 sec / -8,5 cm bei 0,250 sec und -7,4 cm bei 0,625 sec; Differenz: -1/+1) und zeigt erst dann eine starke Folgeeffektabschmälerung (von -7,4 cm bei 0,625 sec auf -2,3 cm bei 1,0 sec; Differenz: +5). So zeigt sich nicht nur, dass die Folgeeffektgröße der Versuchspersonen unterschiedlich ist, sondern auch die Dynamik der Folgeeffektabschmälerung über die zeitliche Verzögerung hinweg sehr individuell ausfällt.

3.2.2 Die Versuche zum intermanuellen Transfer

Grundlage für diesen Versuch ist wiederum die Bewegungsadaptation an eine simuliert verschobene Umwelt. Die Frage, unter welchen Bedingungen eine erlernte Neuoordination des visuomotorischen Systems von der aktiven Hand auf die passive Hand übertragbar ist, wird untersucht. Hierbei wird die Projektion in eine Hirnhemisphäre, die von der Verschiebungsrichtung abhängig ist, in Verbindung mit der Adaptationsübertragung untersucht. Da, wie in dem vorangegangenen Kapitel beschrieben, die Adaptationsphase keine Unterschiede zeigt, sollen auch hier die Folgeeffekte beobachtet werden um Rückschlüsse zu ziehen.

Motorische Verschiebungen sowohl nach links als auch nach rechts wurden getestet. Die Adaptationsphasen wurden mit der rechten oder der linken Hand durchgeführt. Daran schloss sich jeweils eine Folgeeffektphase mit der aktiven oder passiven Hand an (siehe Abb. 2.10, Seite 19).

3.2.2.1 Die Versuchsdurchführung

Da die Folgeeffekte ohne visuelles Feedback erfolgen und die Versuchspersonen somit keine Korrekturinformationen erhalten, sind die gesammelten Trefferdaten je Versuchsperson nahezu konstant und können gemittelt werden. Diese aufgenommenen Daten werden wiederum von allen Versuchspersonen je Teilversuch zu einem Mittelwert zusammengefasst, um die Versuche miteinander zu vergleichen. Vier Teilversuche ergeben sich aus der Verschiebungsrichtung und der adaptierenden Hand. Auf diese Weise können die Werte einer Linksverschiebung und einer Rechtsverschiebung miteinander verglichen werden (siehe auch 2.8.1 Intermanueller Transfer, Seite 18).

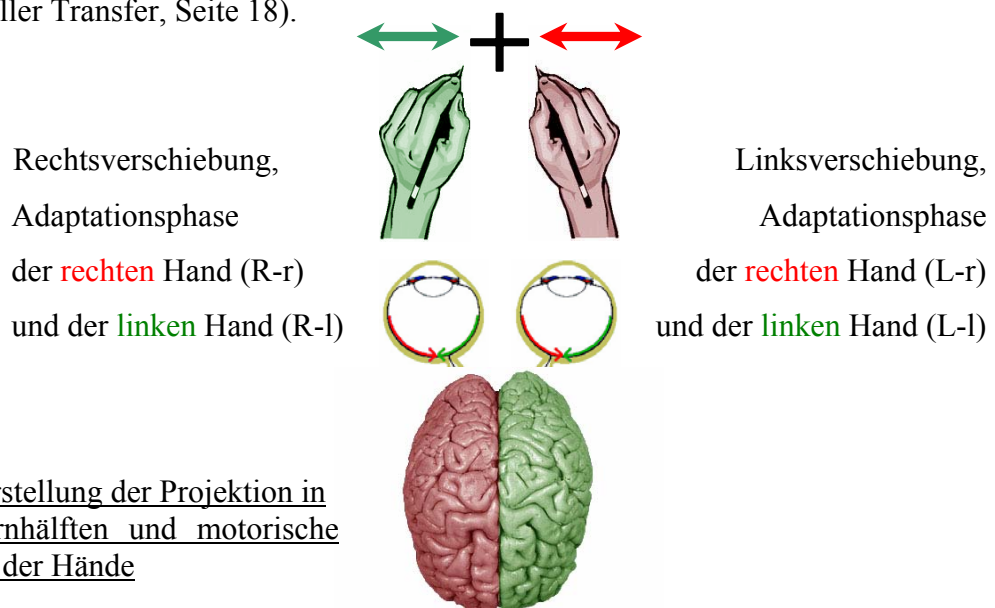


Abb. 3.2.2.1: Darstellung der Projektion in die Gehirnhälften und motorische Kontrolle der Hände

Um einen Informationsaustausch der aktiven Hand auf die passive Hand zu testen, werden die Folgeeffekte der rechten und linken Hand je Teilversuch gegenübergestellt.

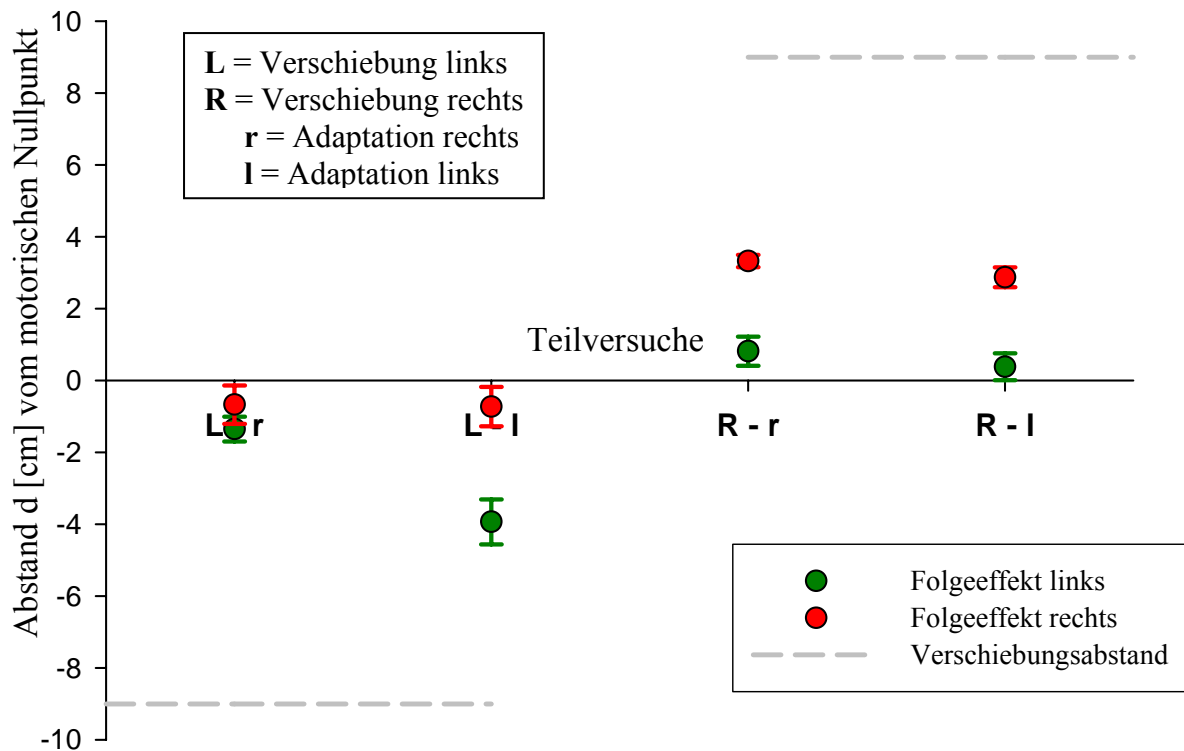


Abb. 3.2.2.2: Mittelwerte der Folgeeffekte (rechts / links) sowie Standardfehler aller Versuchspersonen je Teilversuch (jeweils 11 Versuchspersonen mit je 20 Daten)

Die Darstellung der Ergebnisse erweist sich im Vergleich der individuellen Ergebnisse als ungenügend, da die Versuchspersonen in ihren Folgeeffekten stark variieren (Vgl. 3.2.2 Folgeeffekte). Solche Testperson-abhängigen Eigenarten werden im Folgenden individuell beobachtet und ausgewertet. Dennoch wurde die Darstellung mit in die Ergebnisse aufgenommen, weil sie die generelle Tendenz zeigt, dass die Werte der rechten Hand positiver ausfallen als die der linken Hand. Dieser Anhaltspunkt wird durch einen weiteren Versuch untermauert.

3.2.2.2 Die Referenzmessung

Um die Genauigkeit zu bestimmen, mit dem die Versuchspersonen den anvisierten Zielpunkt treffen, wird ein Versuch unter Normalbedingungen getestet. Unter diesen Bedingungen wird keine Verschiebung simuliert; motorischer Nullpunkt und motorischer Zielpunkt sind identisch und werden durch das optische Zielkreuz präsentiert (siehe Abb. 2.5: Ansicht des Versuchs 1), Seite 12). Die Versuchspersonen werden hierbei angewiesen, das Kreuz ohne visuelle Rückmeldung zu treffen.

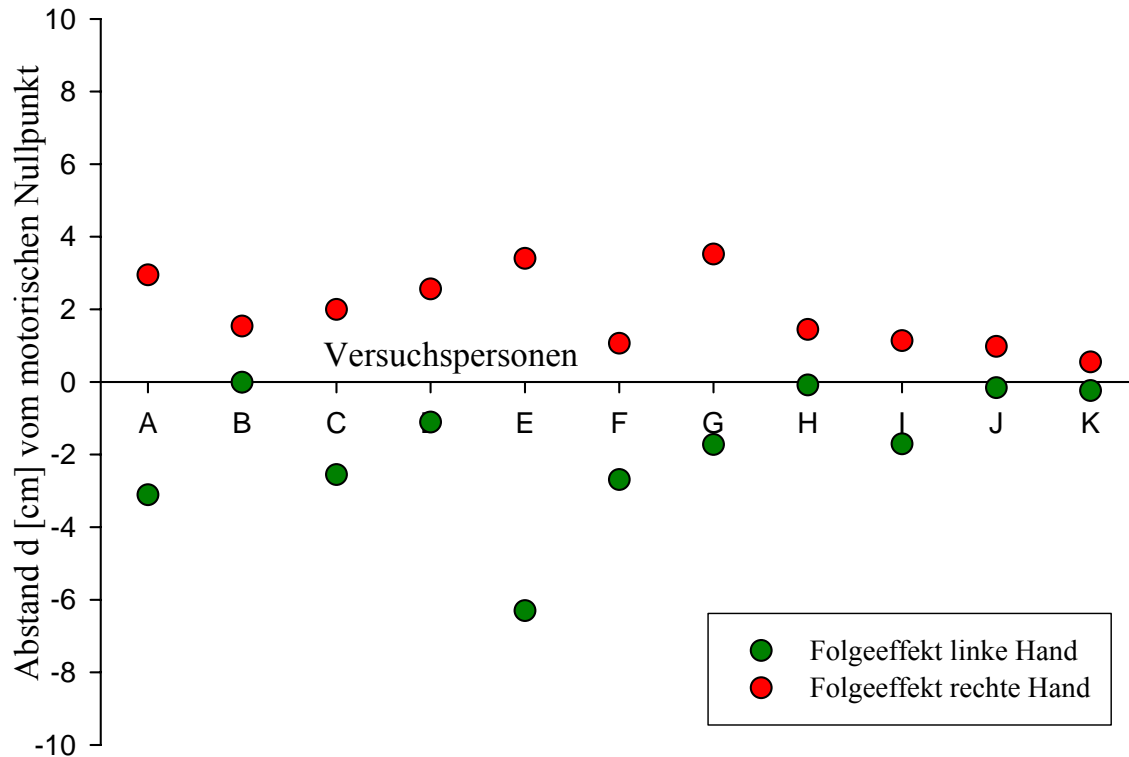


Abb. 3.2.2.3: Referenzmessung - Mittelwerte der Folgeeffekte ohne Verschiebung (rechts / links) (11 Versuchspersonen, je 20 Daten)

Es stellt sich heraus, dass die Versuchspersonen in ihrer Treffervariation um den Zielpunkt herum grundsätzlich eine verkürzte Bewegung ausführen. Auf diese Weise erreichen sie im Mittel den motorischen Zielpunkt nicht, die Werte der rechten Hand liegen rechts vom Zielpunkt - also positiv, die Werte der linken Hand links vom Zielpunkt und somit negativ. Diese Werte werden in den folgenden Auswertungen als Referenz dargestellt und eine Abweichung bewertet.

3.2.2.3 Die Auswertung unter Berücksichtigung der Beziehung zwischen Hemisphäre und Hand

Abhängig von der Verschiebungsrichtung, wird das visuelle Feedback der Punktdarstellung in die rechte oder linke Gehirnhälfte projiziert. Die folgenden Versuche sind darauf hin ausgelegt, die motorisch aktive oder passive Gehirnseite mit der optischen Rückmeldung der Trefferposition zu versorgen und die Folgeeffekte der rechten oder linken Hand zu messen. Über den Vergleich der aktiven mit der passiven Hand werden dann Rückschlüsse gezogen, welchen Einfluss die Projektion in die Hirnhemisphäre auf die Lernübertragung hat.

L - r Verschiebung Links, Adaptation rechte Hand

Die Versuchspersonen fixieren das optische Zielkreuz, das in ihrer Körpermitte liegt. Durch die Verschiebung des motorischen Zielpunktes wird ein auf den motorischen Nullpunkt gesetzter Punkt rechts vom optischen Zielkreuz dargestellt. Aufgrund der korrigierenden Bewegung, den motorischen Zielpunkt zu treffen, wandert der Punkt zum visuellen Zielkreuz. Die Projektion wird in die linke Hirnhemisphäre geleitet und die Adaptationsphase mit der rechten Hand ausgeübt. Somit ist die linke Hirnhemisphäre motorisch aktiv, in die auch die optische Projektion des Punktes fällt.

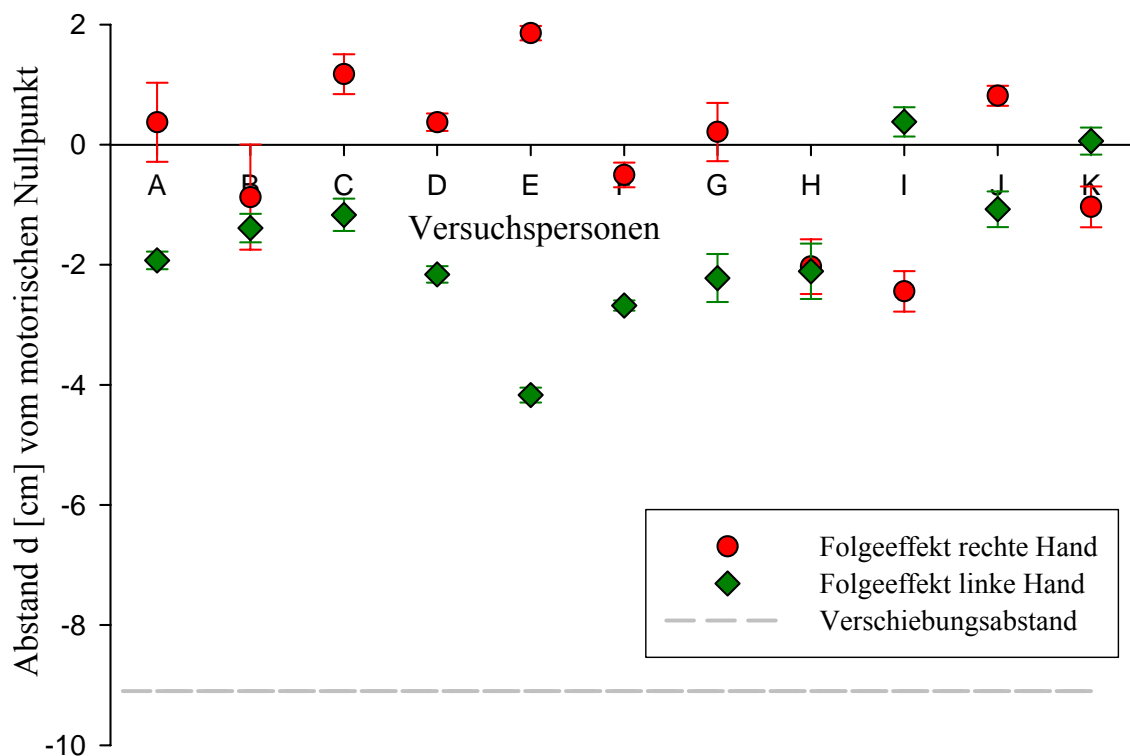


Abb. 3.2.2.4: Mittelwerte der Folgeeffekte [L - r] - Verschiebung Links, Adaptation rechte Hand sowie Standardfehler (rechts / links) (11 Versuchspersonen, je 20 Daten)

Aufgetragen sind die Folgeeffekte mit der passiven (hier linken Hand, grün) und der aktiven Hand (hier rechte Hand, rot) der einzelnen Versuchspersonen. Die Ergebnisse lassen sich in drei Kategorien einteilen: Testpersonen die

- keine signifikante Veränderungen (A, C, D, J),
- eine leichte Verschiebungsadaptation beider Hände (F, G, H),
- eine leichte Verschiebungsadaptation der aktiven Hand (B, I, K) zeigen.

Versuchsperson E zeigt eine höhere Adaptationsantwort der passiven Hand, als der aktiven Hand.

L - I Verschiebung Links, Adaptation linke Hand

Die vorhergehenden Versuchseinstellungen werden nun mit der linken Hand als aktive adaptierende Hand durchgeführt. Das bedeutet, dass die rechte Hirnhemisphäre während dieser Phase motorisch aktiv ist und die optische Projektion in die gegenüberliegende, linke Hirnhemisphäre fällt. Die motorische Aktivität während der Adaptationsphase ist somit von der Projektion des visuellen Feedbacks getrennt. Beim Folgeeffekt wird die passive Hand von der Gehirnhälfte gesteuert, in die das visuelle Feedback während der Adaptation geleitet wurde.

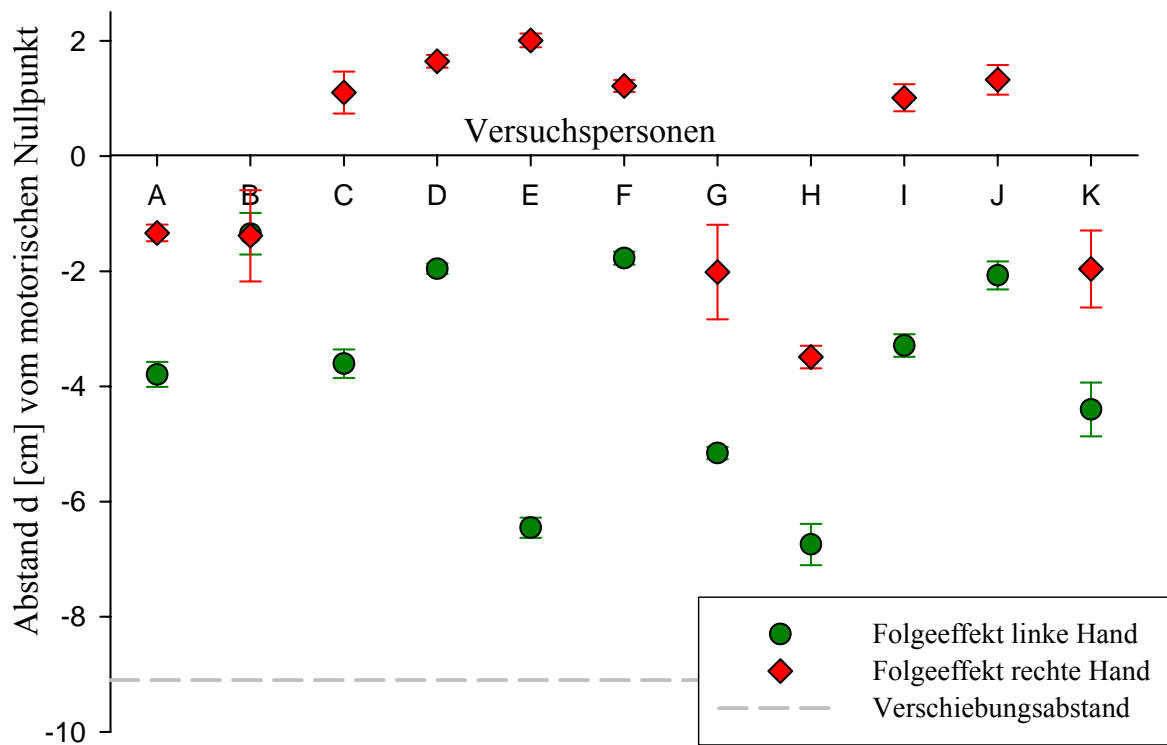


Abb. 3.2.2.5: Mittelwerte der Folgeeffekte [L - I] - Verschiebung Links, Adaptation linke Hand sowie Standardfehler (rechts / links) (11 Versuchspersonen, je 20 Daten)

Auch in dieser Versuchsanordnung lassen sich mehrere Kategorien voneinander unterscheiden. Ähnlich dem vorhergehenden Versuch gibt es Testpersonen, die

- keine signifikante Änderung (D, F, J),
- eine leichte Verschiebungsadaptation beider Hände (A, G, H, K),
- eine leichte Verschiebungsadaptation nur der aktiven Hand (C, E, I),
- eine leichte Verschiebungsadaptation nur der passiven Hand (B) zeigen.

R - r Verschiebung Rechts, Adaptation rechte Hand

Die Verschiebung des motorischen Zielpunktes nach rechts bewirkt bei den Zielbewegungen, dass der dargestellte Trefferpunkt von links in das Blickfeld wandert und in die rechte Hirnhemisphäre projiziert wird. Bei der Adaptation mit der rechten Hand wird das visuelle Feedback in die linke Gehirnhälfte geleitet, ähnlich dem vorangegangenen Versuch liegen somit die motorische Kontrolle und die optische Projektion während der Adaptationsphase in verschiedenen Gehirnhälften.

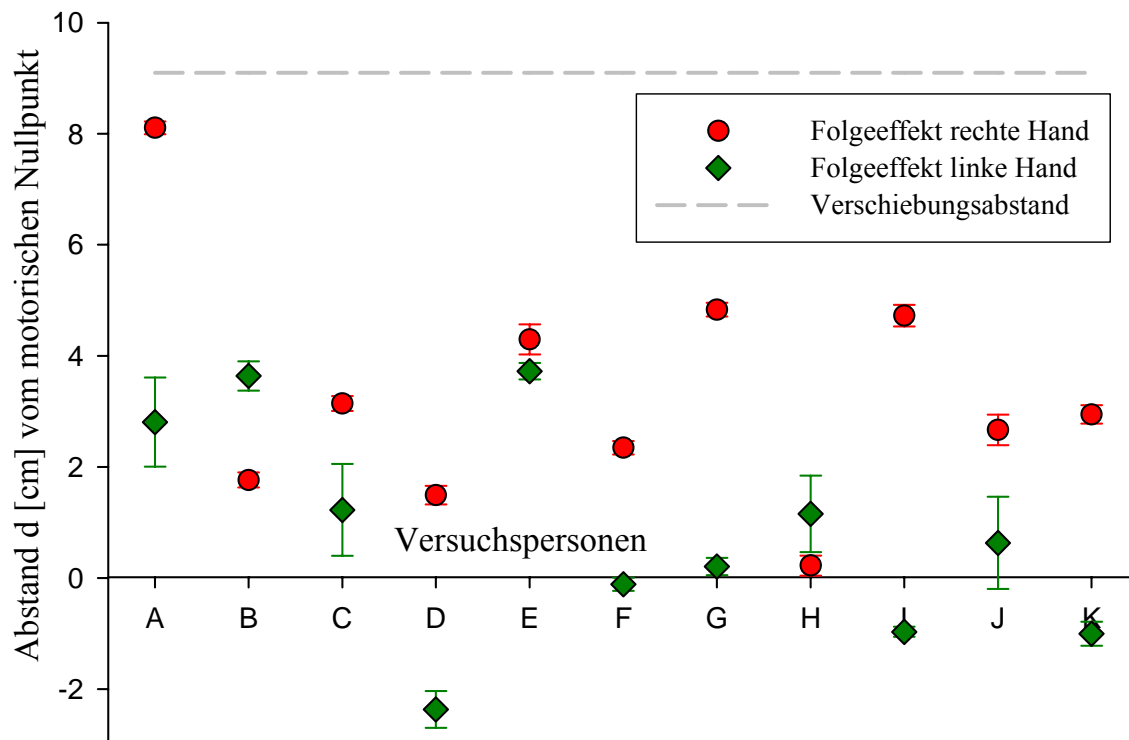
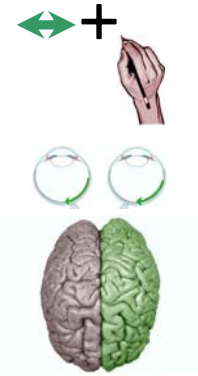


Abb. 3.2.2.6: Mittelwerte der Folgeeffekte [R - r] - Verschiebung Rechts, Adaptation rechte Hand sowie Standardfehler (rechts / links) (11 Versuchspersonen, je 20 Daten)

Die Testpersonen dieses Teilversuchs lassen sich wiederum einteilen in Kategorien die

- keine signifikante Änderung (D),
- eine leichte Verschiebungsadaptation beider Hände (A, C, E, G),
- eine leichte Verschiebungsadaptation nur der aktiven Hand (I, K),
- eine leichte Verschiebungsadaptation nur der passiven Hand (B, F, H, J) zeigen.

Deutlich in diesem Versuchsteil ist die häufigere Verschiebungsadaptation besonders mit der passiven Hand (Versuchsperson B und H haben eine höhere passive als aktive Adaptation).

R - I Verschiebung Rechts, Adaptation linke Hand

Wie zuvor wandert der dargestellte Punkt von der linken Seite durch das Blickfeld der Versuchspersonen und wird dementsprechend in die rechte Hirnhemisphäre projiziert. Diese Gehirnhälfte ist bei der Adaptationsphase mit der rechten Hand aktiv. Motorische Kontrolle und optische Projektion liegen in der gleichen Hirnhemisphäre.

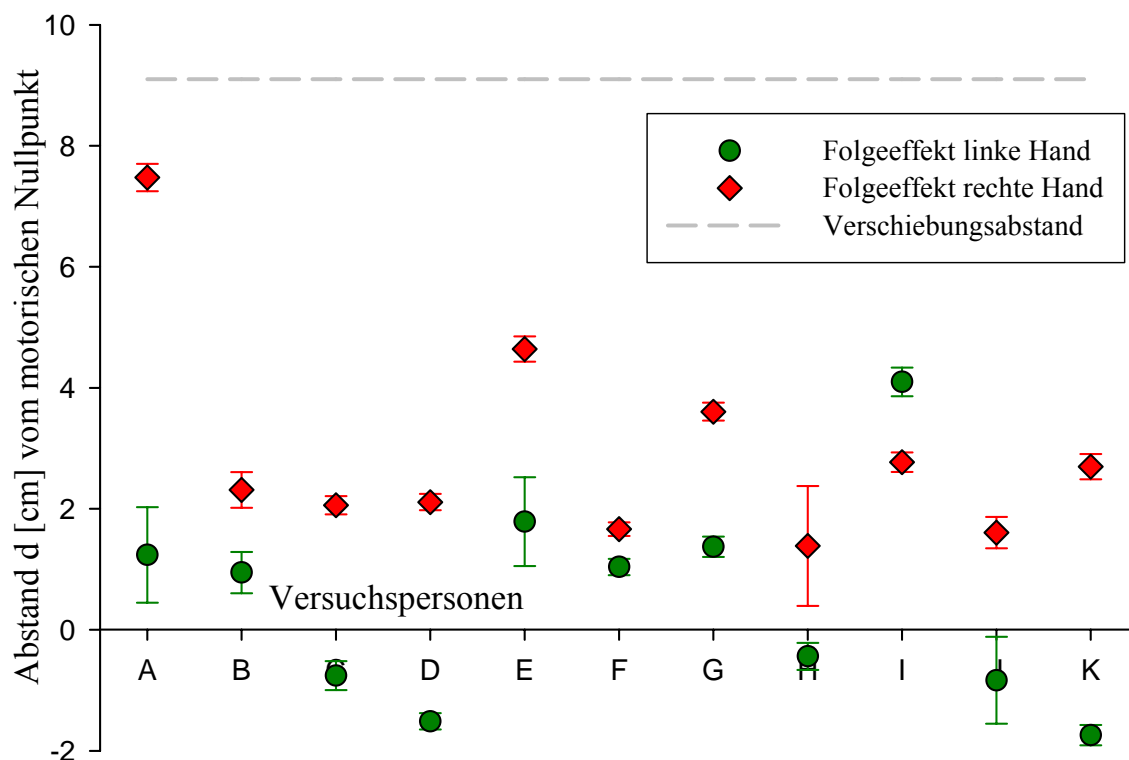
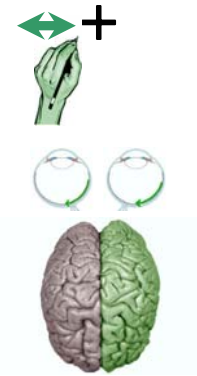


Abb. 3.2.2.7: Mittelwerte der Folgeeffekte [R - I] - Verschiebung Rechts, Adaptation Linke Hand sowie Standardfehler (rechts / links) (11 Versuchspersonen, je 20 Daten)

Diese Testreihe zeigt bei der Einteilung in

- keine signifikante Änderung (C, D, H, J, K),
- eine Verschiebungsadaptation beider Hände (A, E, G),
- eine leichte Verschiebungsadaptation nur der aktiven Hand (B, F, I)

Bei Versuchsperson A ist eine sehr starke Adaptationsausprägung der passiven Hand zu beobachten, während Testperson I eine sehr hohe Folgeeffektantwort der aktiven Hand zeigt.

Zusammenfassend zeigen die Folgeeffektergebnisse eine schon beschriebene Eigenheit aller Versuchspersonen deutlich positivere Werte (weiter rechts) mit der rechten Hand als mit der linken Hand zu setzen. Die individuellen Unterschiede lassen kein eindeutiges Gesamtergebnis bei dieser Betrachtung zu und werden daher im Folgenden getrennt voneinander untersucht.

3.2.2.4 Die individuelle Auswertung

In diesem Abschnitt werden die gesammelten Daten für jede Versuchsperson einzeln ausgewertet, um einen Zusammenhang zwischen Versuchsbedingung und Lerneffekt der passiven Hand herauszufinden. Trotz der bereits erwähnten individuellen Unterschiede im Folgeeffekt, sollen hier nun ähnliche Verhaltensweisen unter den Versuchspersonen aufgezeigt werden.

In den folgenden Diagrammen sind die mittleren Abstände der Folgeeffekte zum motorischen Nullpunkt für den jeweiligen Versuch aufgetragen.

rot kennzeichnet den Folgeeffekt der rechten Hand,

grün den Folgeeffekt der linken Hand

grau gestrichelt der Verschiebungsabstand mit $-9,1\text{cm}$ für die Linksverschiebung **L** und $+9,1\text{cm}$ für die Rechtsverschiebung **R**.

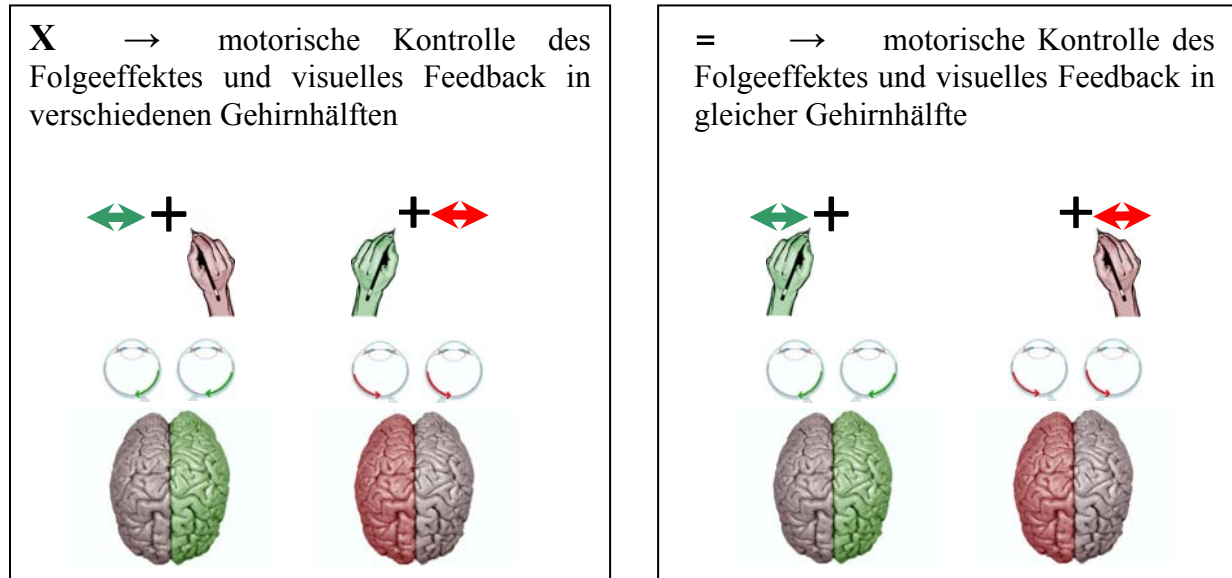
Der als Referenz angegebene Versuch wurde ohne Verschiebung und ohne visuelles Feedback durchgeführt - der durchschnittliche Abstand zum Zielkreuz wird so für jede Versuchsperson ermittelt und kann als mit den Folgeeffekten verglichen werden.

Die Versuche sind durch ihre Verschiebung (L/R) und der trainierenden, aktiven Hand (l/r) in der Adaptationsphase gekennzeichnet:

L – r	Linksverschiebung des motorischen Zielpunktes, rechte Hand adaptierend
L – l	Linksverschiebung des motorischen Zielpunktes, linke Hand adaptierend
R – r	Rechtsverschiebung des motorischen Zielpunktes, rechte Hand adaptierend
R – l	Rechtsverschiebung des motorischen Zielpunktes, linke Hand adaptierend

In den Tabellen sind die Versuche aufgetragen und die Ergebnisse der Folgeeffekte derjenigen Hand, die eine erlernte Änderung gegenüber ihrer Referenz aufweist. Neben der Handseite ist weiterhin angegeben, ob die Hand aktiv oder passiv in der Adaptationsphase war.

Die Beziehung zwischen visueller Projektion in die Hirnhemisphären während der Adaptationsphase und motorischer Aktivität in der Folgeeffektphase wird durch **X** / = dargestellt.



Somit gelten für alle Teilversuche folgende Einteilungen der Folgeeffekte:

Teilversuch	Folgeeffekt rechte Hand	Folgeeffekt linke Hand
L - r	= - aktiv	X - passiv
L - l	= - passiv	X - aktiv
R - r	X - aktiv	= - passiv
R - l	X - passiv	= - aktiv

Beim Teilversuch L-**r** wird das visuelle Feedback in der Adaptationsphase in die linke Hirnhemisphäre projiziert. Die motorische Kontrolle bei der Folgeeffektphase mit der **rechten** (aktiven) Hand wird ebenso durch die linke Gehirnhälfte gesteuert. Diese Beteiligung derselben Hemisphären wird mit „=“ gekennzeichnet. Führt die **linke** (passive) Hand den Folgeeffekt aus, ist die rechte Gehirnhälfte motorisch aktiv, welche in diesem Versuch nicht das visuelle Feedback erhielt. Diese Konstellation ist mit „X“ dargestellt.

Die Größe des Folgeeffektes ist dadurch gekennzeichnet, dass hohe Effekte **fett**, geringe Effekte klein in der Tabelle eingetragen sind. Ist kein Folgeeffekt zu beobachten, bleibt das entsprechende Feld leer.

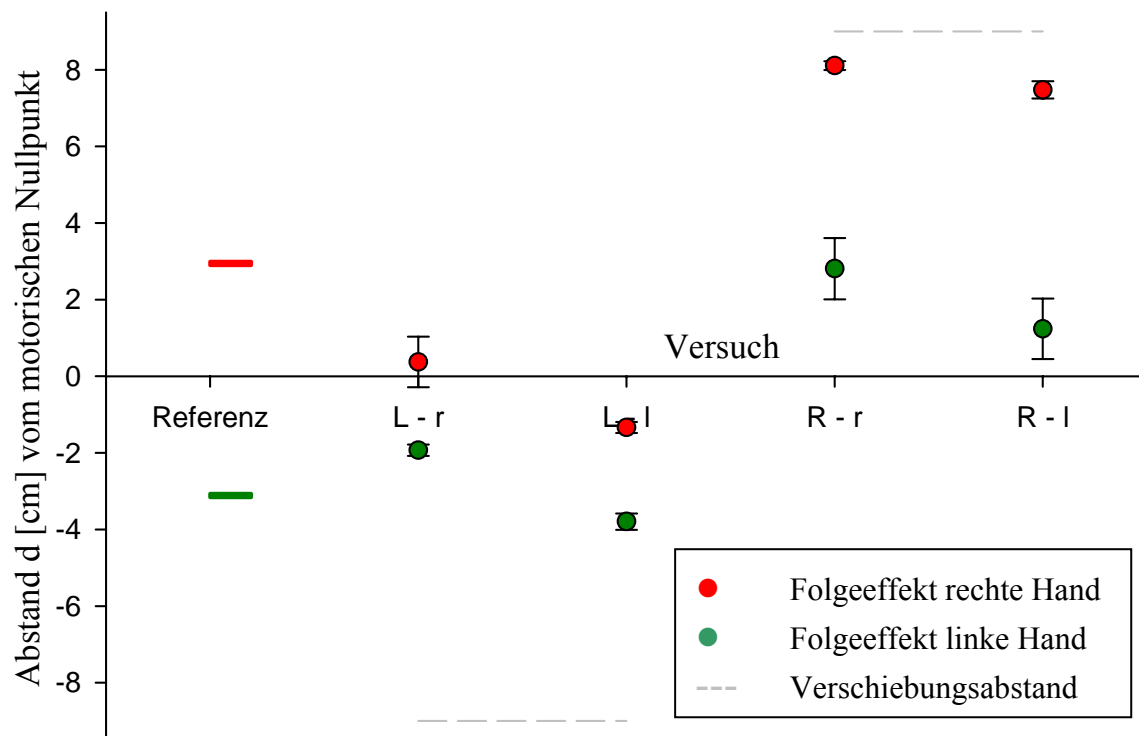
Versuchsperson A

Abb. 3.2.2.8: Folgeeffekte Versuchsperson A auf Rechts-/Links- Verschiebungen und Adaptation der rechten/linken Hand (L-r/L-l/R-r/R-l)

Ergebnisse:

Teilversuch	Folgeeffekt rechte Hand	Folgeeffekt linke Hand
L - r	= - aktiv	
L - l	= - passiv	
R - r	X - aktiv	= - passiv
R - l	X - passiv	= - aktiv

Die Versuchsperson A zeigt deutlich höhere Folgeeffekte für eine Rechtsverschiebung und einen besseren Folgeeffekt mit der dominanten rechten Hand. Wird das visuelle Feedback während der Adaptationsphase in eine Hirnhemisphäre projiziert, lernt grundsätzlich die Hand, die durch diese Gehirnhälfte gesteuert wird, unabhängig davon, ob sie aktiv oder passiv in der Adaptationsphase war.

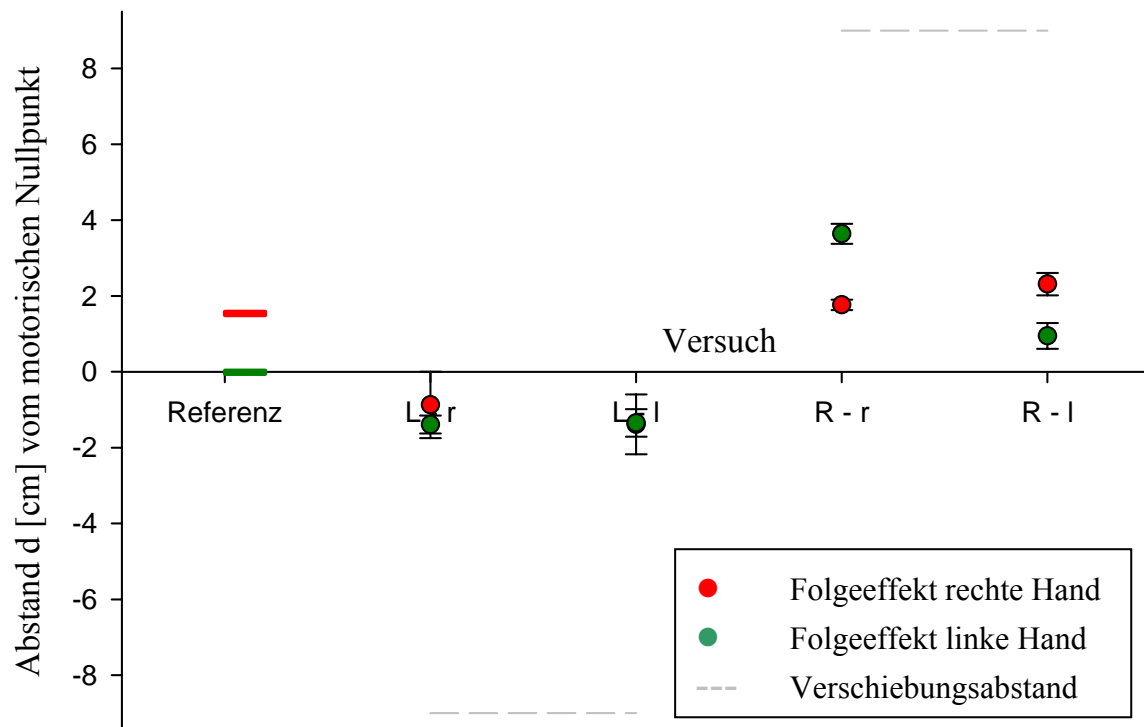
Versuchsperson B

Abb. 3.2.2.9: Folgeeffekte Versuchsperson B auf Rechts-/Links- Verschiebungen und Adaptation der rechten/linken Hand (L-r/L-l/R-r/R-l)

Ergebnisse:

Teilversuch	Folgeeffekt rechte Hand	Folgeeffekt linke Hand
L - r	= - aktiv	X - passiv
L - l	= - passiv	
R - r		= - passiv
R - l		= - aktiv

Diese Versuchsperson B zeigt insgesamt nur geringe Folgeeffekte. Jedoch ist jedes Mal ein Folgeeffekt für die Hand zu beobachten, die von der Hirnhemisphäre gesteuert wird, in die das visuelle Feedback in der Adaptationsphase projiziert wurde

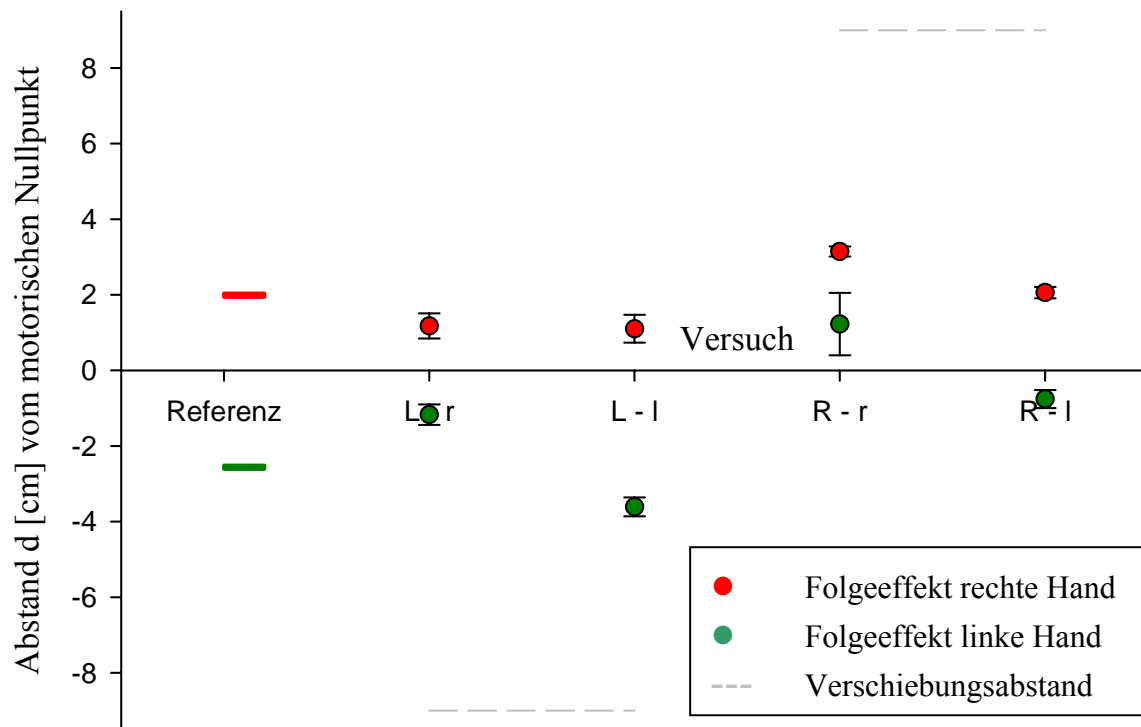
Versuchsperson C

Abb. 3.2.2.10: Folgeeffekte Versuchsperson C auf Rechts-/Links- Verschiebungen und Adaptation der rechten/linken Hand (L-r/L-l/R-r/R-l)

Ergebnisse:

Teilversuch	Folgeeffekt rechte Hand	Folgeeffekt linke Hand
L - r		
L - l		
R - r		= - passiv
R - l		= - aktiv

Die Folgeeffekte der Versuchsperson C sind - wenn vorhanden - nur minimal. Es zeigt sich jedoch bei der Rechtsverschiebung die Tendenz einer Adaptation, wenn die Gehirnhälfte, welche die Hand beim Folgeeffekt steuert, während der Adaptationsphase mit dem visuellen Feedback versorgt wurde.

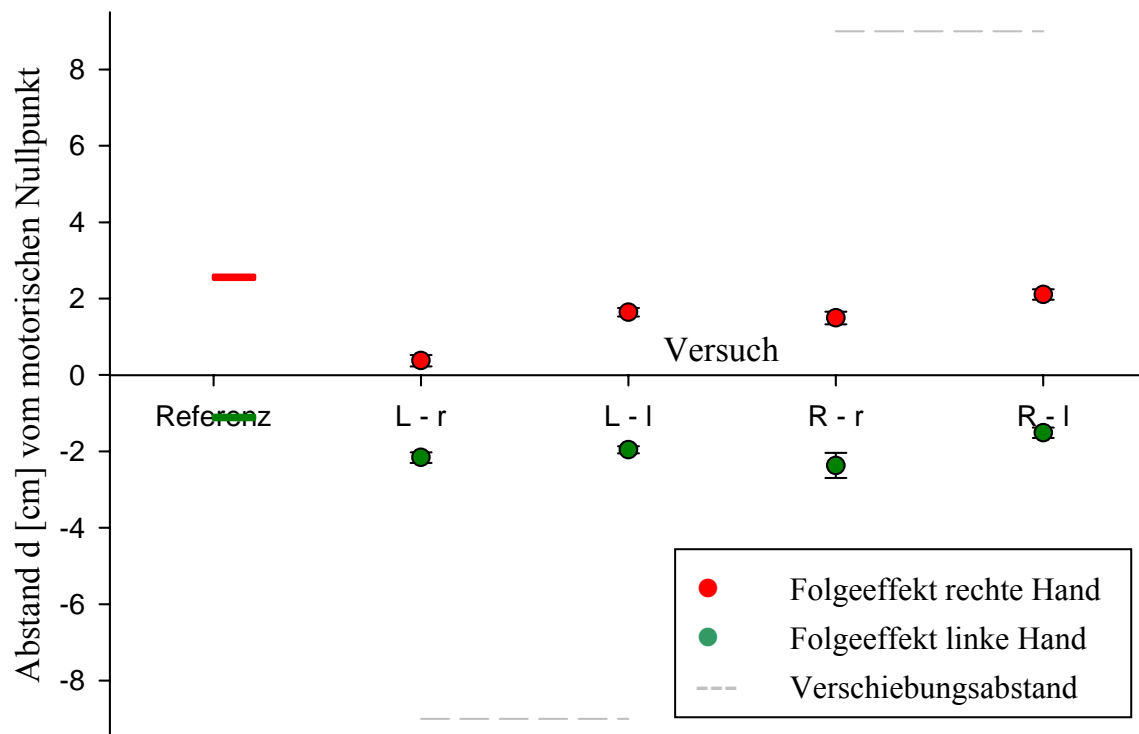
Versuchsperson D

Abb. 3.2.2.11: Folgeeffekte Versuchsperson D auf Rechts-/Links- Verschiebungen und Adaptation der rechten/linken Hand (L-r/L-l/R-r/R-l)

Ergebnisse:

Teilversuch	Folgeeffekt rechte Hand	Folgeeffekt linke Hand
L - r	= - aktiv	
L - l		
R - r		
R - l		

Diese Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß so gut wie keinen Folgeeffekt. Die Testperson D entspricht Versuchsperson „schwarz“ aus dem Abschnitt 3.2.1.2 Folgeeffekte (Vgl. Abb. 3.2.1.10: Folgeeffekte, Seite 43). Aufgrund der rein visuell gesteuerten Tätigkeit des Sportschützen ohne motorische Zielfindung, ist kein Folgeeffekt zu erwarten.

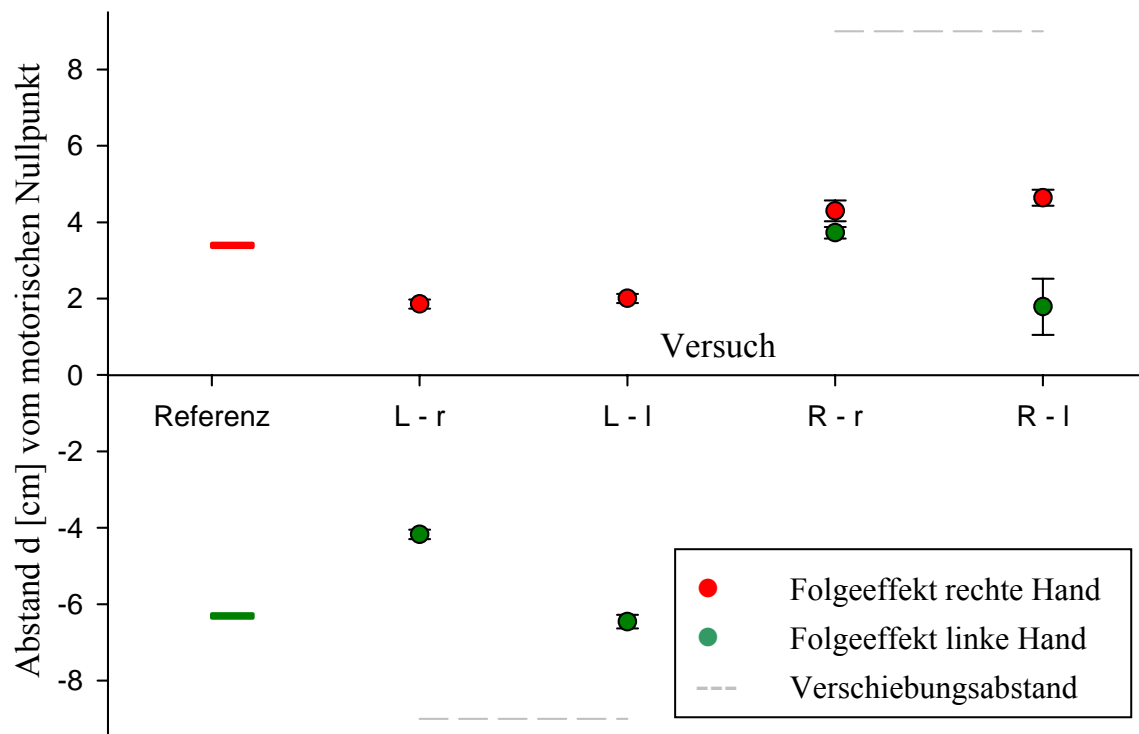
Versuchsperson E

Abb. 3.2.2.12: Folgeeffekte Versuchsperson E auf Rechts-/Links- Verschiebungen und Adaptation der rechten/linken Hand (L-r/L-l/R-r/R-l)

Ergebnisse:

Teilversuch	Folgeeffekt rechte Hand	Folgeeffekt linke Hand
L - r	= - aktiv	
L - l	= - passiv	
R - r		= - passiv
R - l		= - aktiv

Dadurch, dass Versuchsperson E bereits sehr hohe Referenzwerte - besonders für die linke Hand - aufweist, ist ein Folgeeffekt mit dieser Hand bei einer Linksverschiebung schwer zu erkennen. Mehr oder weniger deutlich zeigen sich aber erhöhte Folgeeffektwerte für die Situationen, bei der die die Projektion des visuellen Feedbacks während der Adaptationsphase in die Gehirnhälfte erfolgt, welche die Hand beim Folgeeffekt steuert.

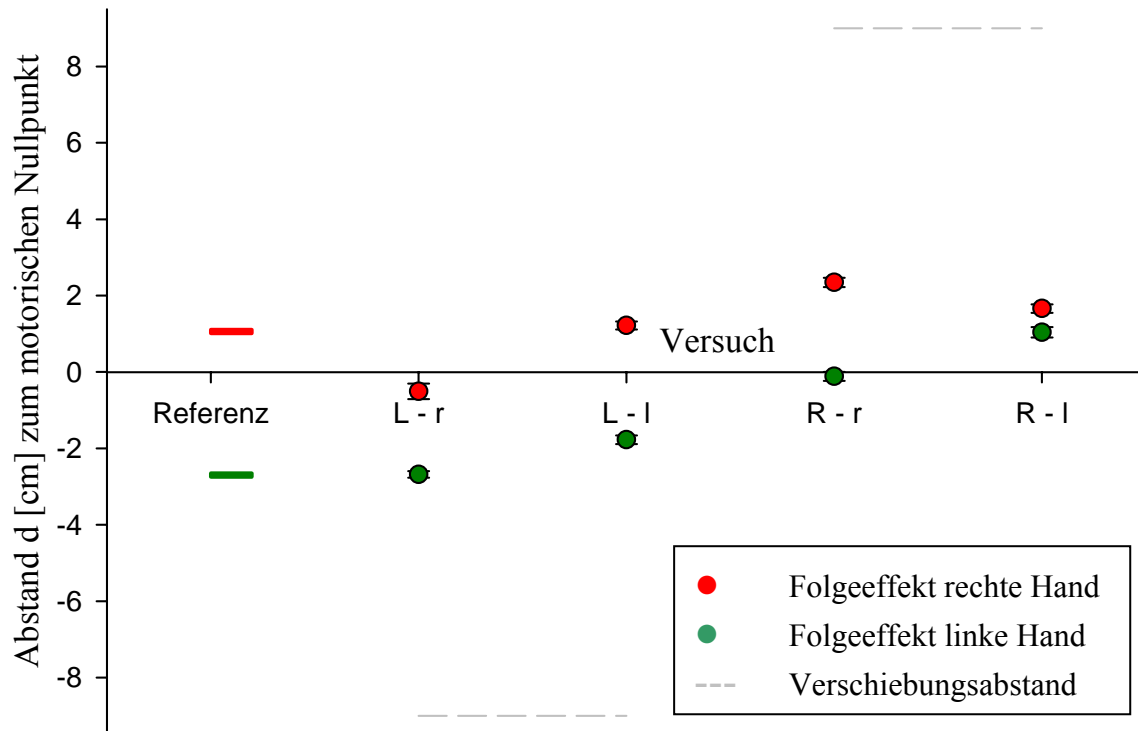
Versuchsperson F

Abb. 3.2.2.13: Folgeeffekte Versuchsperson F auf Rechts-/Links- Verschiebungen und Adaptation der rechten/linken Hand (L-r/L-l/R-r/R-l)

Ergebnisse:

Teilversuch	Folgeeffekt rechte Hand	Folgeeffekt linke Hand
L - r	= - aktiv	
L - l		
R - r	X - aktiv	= - passiv
R - l		= - aktiv

Diese Versuchsperson zeigt nur einen sehr geringen Folgeeffekt in allen Teilversuchen, leicht erhöhte Mittelwerte jedoch, wenn die Projektion des visuellen Feedbacks während der Adaptationsphase in die im Folgeeffekt motorisch aktive Hirnhemisphäre fällt.

Versuchsperson G

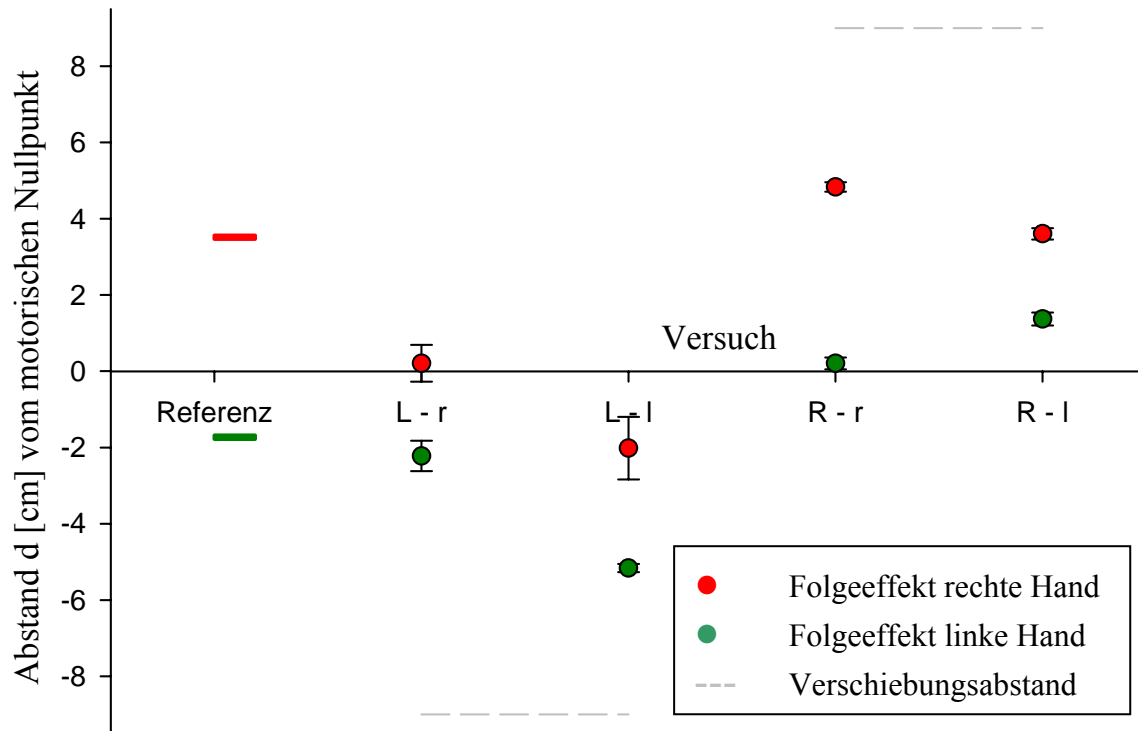


Abb. 3.2.2.14: Folgeeffekte Versuchsperson G auf Rechts-/Links- Verschiebungen und Adaptation der rechten/linken Hand (L-r/L-l/R-r/R-l)

Ergebnisse:

Teilversuch	Folgeeffekt rechte Hand	Folgeeffekt linke Hand
L - r	= - aktiv	
L - l	= - passiv	X - aktiv
R - r	X - aktiv	= - passiv
R - l		= - aktiv

Die Trefferdaten dieser Versuchsperson beschreiben Folgeeffekte, die erhöht sind wenn die aktive Hand getestet wird. Ein deutlicher Folgeeffekt ist auch hier wieder zu erkennen, wenn das visuelle Feedback in der Adaptationsphase in die entsprechend Folgeeffekt-steuernde Hirnhälfte projiziert wurde.

Versuchsperson H

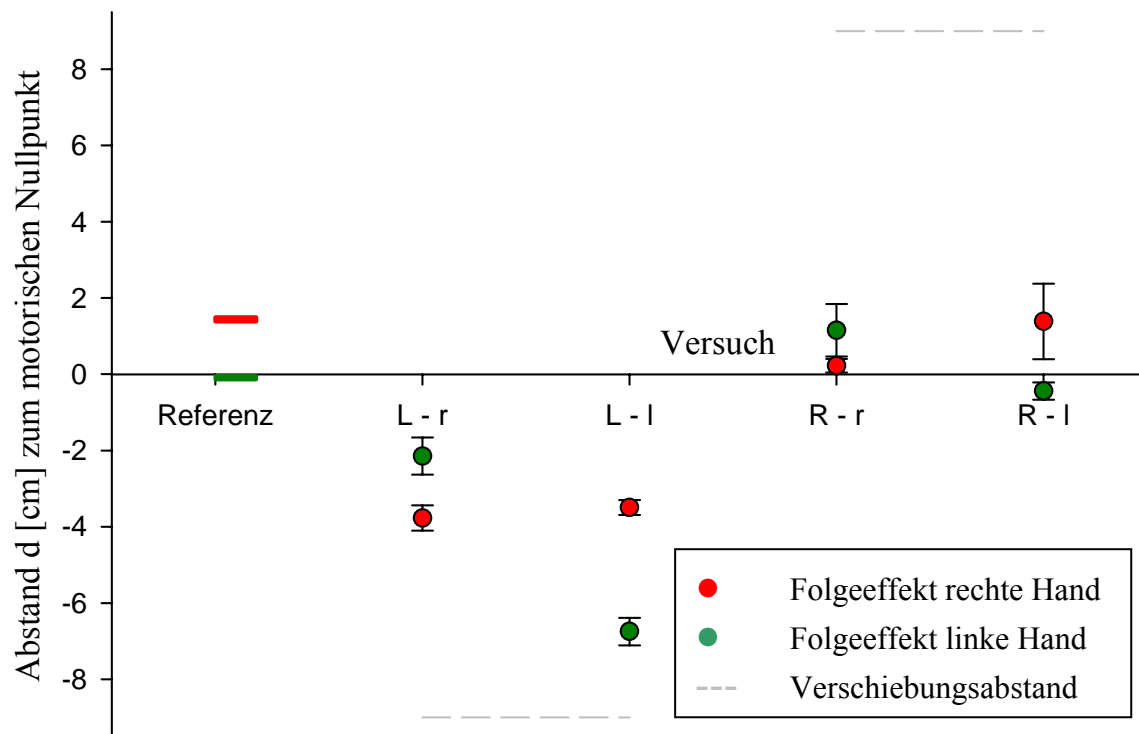


Abb. 3.2.2.15: Folgeeffekte Versuchsperson H auf Rechts-/Links- Verschiebungen und Adaptation der rechten/linken Hand (L-r/L-l/R-r/R-l)

Ergebnisse:

Teilversuch	Folgeeffekt rechte Hand	Folgeeffekt linke Hand
L - r	= - aktiv	X - passiv
L - l	= - passiv	X - aktiv
R - r		
R - l		

Bei dieser Testperson zeigt sich eine deutliche Präferenz der Linksverschiebung.

Versuchsperson I

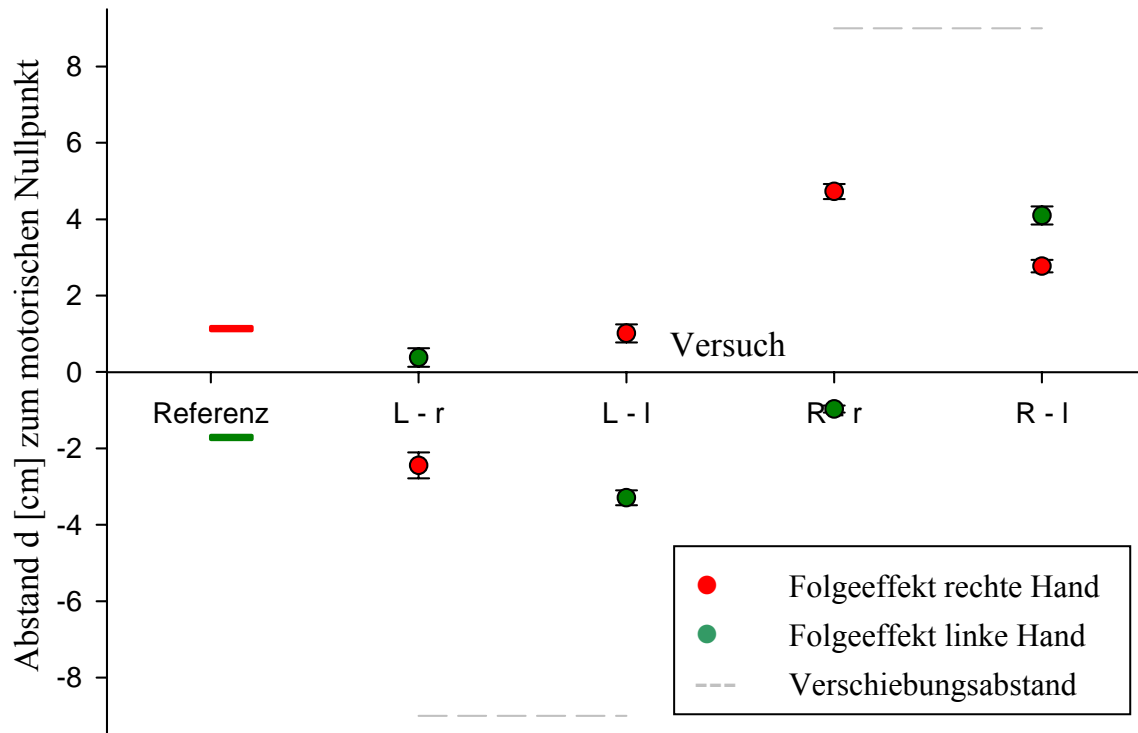


Abb. 3.2.2.16: Folgeeffekte Versuchsperson I auf Rechts-/Links- Verschiebungen und Adaptation der rechten/linken Hand (L-r/L-l/R-r/R-l)

Ergebnisse:

Teilversuch	Folgeeffekt rechte Hand	Folgeeffekt linke Hand
L - r	= - aktiv	
L - l		X - aktiv
R - r	X - aktiv	
R - l	X - passiv	= - aktiv

Wird der Folgeeffekt mit der in der Adaptationsphase aktiven Hand durchgeführt, zeigt diese Versuchsperson I eine meist deutliche Adaptation, kaum bis gar keinen Effekt mit der untrainierten Hand.

Versuchsperson J

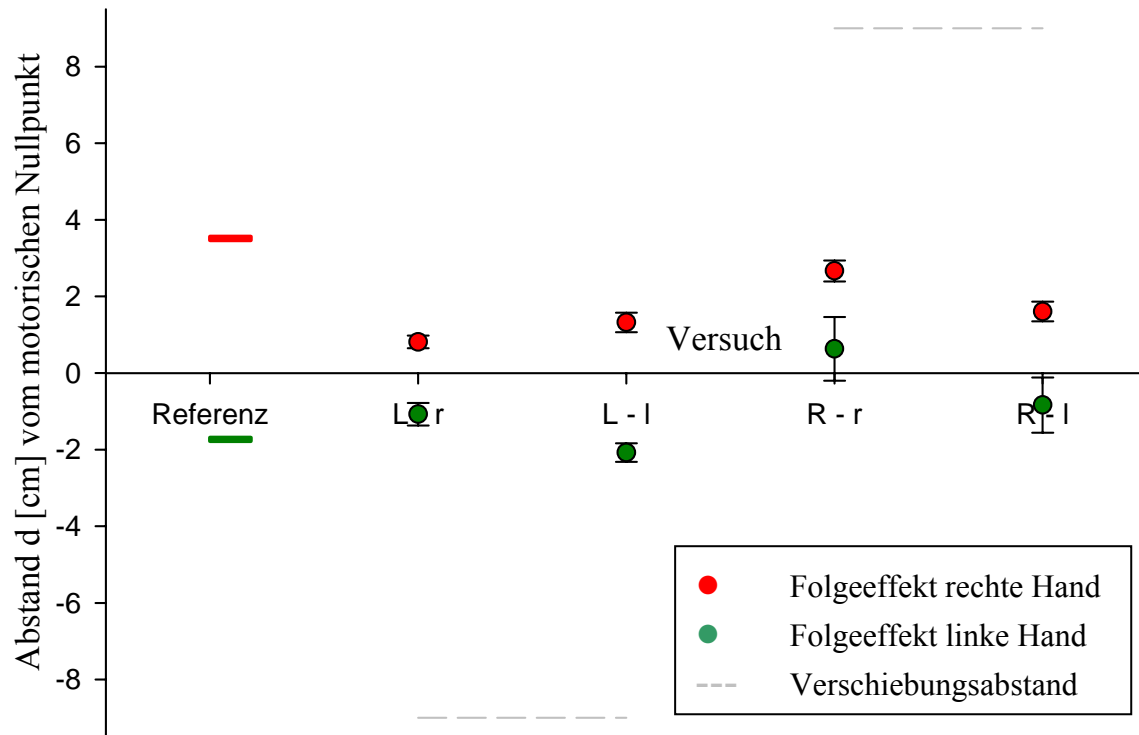


Abb. 3.2.2.17: Folgeeffekte Versuchsperson J auf Rechts-/Links- Verschiebungen und Adaptation der rechten/linken Hand (L-r/L-l/R-r/R-l)

Ergebnisse:

Teilversuch	Folgeeffekt rechte Hand	Folgeeffekt linke Hand
L - r	= - aktiv	
L - l	= - passiv	
R - r		= - passiv
R - l		

Wird das visuelle Feedback bei der Adaptationsphase in eine Hirnhemisphäre projiziert, zeigt diese Versuchsperson einen höheren Folgeeffekt für jene Hand, welche von dieser Gehirnhälfte gesteuert wird.

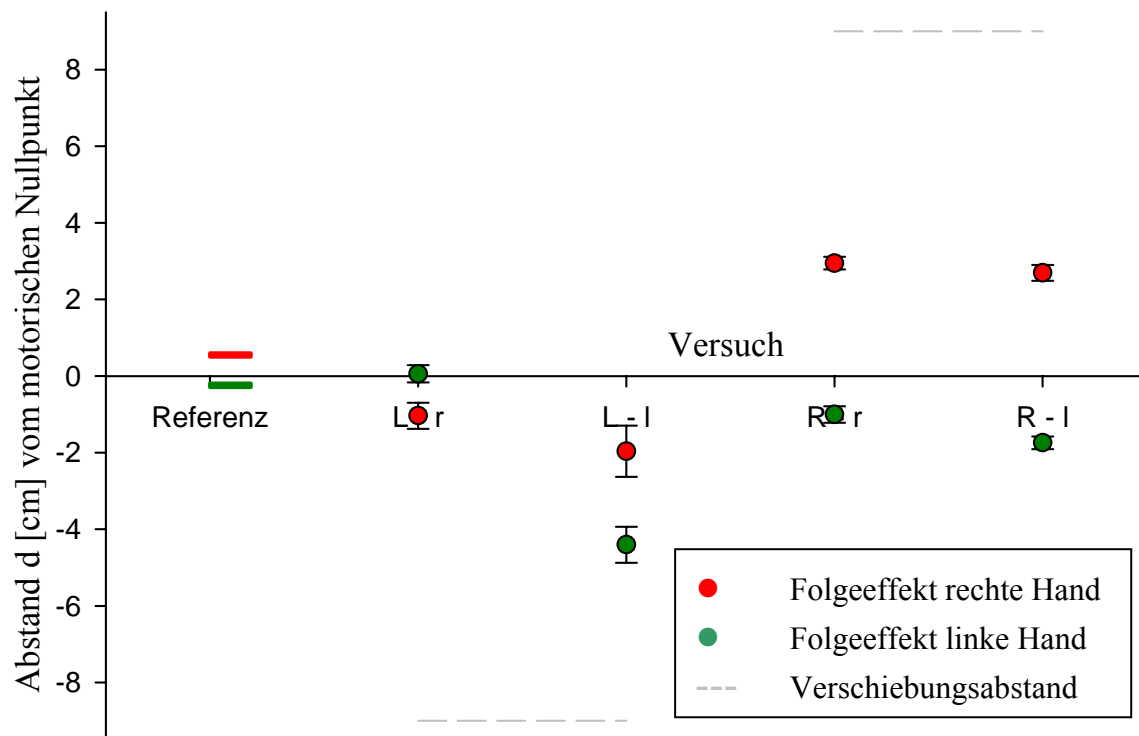
Versuchsperson K

Abb. 3.2.2.18: Folgeeffekte Versuchsperson K auf Rechts-/Links- Verschiebungen und Adaptation der rechten/linken Hand (L-r/L-l/R-r/R-l)

Ergebnisse:

Teilversuch	Folgeeffekt rechte Hand	Folgeeffekt linke Hand
L - r	= - aktiv	
L - l	= - passiv	X - aktiv
R - r	X - aktiv	
R - l	X - passiv	

Die rechte Hand wird bei ihrem Folgeeffekt von dieser Versuchsperson bevorzugt und zeigt eine deutlichere Adaptation als die linke Hand. Eine Ausnahme ist der Versuch **L - l**. Die aktive Hand hat einen höheren Folgeeffektwert als die passive rechte Hand. Bei dieser Versuchsperson kann die bisherige Beobachtung, dass der Folgeeffekt besser ausfällt, wenn das visuelle Feedback während der Adaptationsphase in die Folgeeffektsteuernde Hirnhemisphäre projiziert wird, nicht verfolgt werden.

3.2.2.5 Zusammenfassung

Der Transfer einer erlernten visuomotorischen Verschiebung mit einer Hand auf die andere Hand wurde weiter vorne nachgewiesen (siehe 3.1.3 Der intermanuelle Transfer, Seite 24). Durch die Kombinationen des visuellen Inputs mit dem motorischen Output von der rechten und/oder linken Gehirnhälfte sollte In diesem Versuch der Frage nachgegangen werden, ob die Hemisphären in ihrem Lern- bzw. Transferverhalten gleich oder verschieden sind.

Die Ergebnisse zeigen, dass für den intermanuellen Transfer die Richtung der Verschiebung bzw. die Projektion in die Hirnhemisphäre wichtig ist.

Wird während der Adaptationsphase der zu beobachtende Fehler links vom anvisierten Objekt wahrgenommen, so lernt auch die Hand auf dieser Seite - unabhängig davon, ob sie aktiv oder passiv ist – diese Verschiebung besser. Korrekter formuliert lernt die rechte Gehirnhälfte diese visuomotorische Differenz besser zu adaptieren, weil in diese das visuelle Feedback des beobachteten Fehlers projiziert wird. Durch die überkreuzende Projektion in die Hirnhemisphären und die gegenseitige motorische Kontrolle der Arme, adaptiert die linke Hand besser, wenn die Verschiebung links wahrgenommen wird.

Zusätzlich zu berücksichtigen ist die Dominanz einer Hand. So lernen Rechtshänder mit ihrer dominanten Hand scheinbar besser an eine visuomotorische Differenz zu adaptieren als mit der linken Hand. Da sich eine erhöhte Lernleistung auch dann zeigt, wenn die dominante Hand passiv ist, kann dies nicht auf einen rein motorischen Lernprozess zurückzuführen sein. Grundsätzlich ist qualitativ kein signifikanter Unterschied in den Transferleistungen der Hirnhemisphären zu erkennen, wobei quantitativ die motorische Dominanz einer Hand bzw. der steuernden Gehirnhälfte zu berücksichtigen bleibt.

4 Diskussion:

Viele Studien, angefangen bei Hermann von Helmholtz (von Helmholtz 1867), haben sich bisher mit dem Problem der visuomotorischen Koordination des Menschen befasst. Wie die unterschiedlichen intrinsischen und extrinsischen Informationen der Optik und Motorik miteinander verrechnet und zu einer zielgerichteten Bewegung transformiert werden, ist nicht in allen Einzelheiten klar.

Um die Verarbeitung näher zu untersuchen wird die Flexibilität des Systems ausgenutzt sich an neue Bedingungen anzupassen. Häufig wurden Prismen - die eine optische Verschiebung erzeugen - eingesetzt, mit denen Zielversuche durchgeführt werden. Hier wird eine Methode getestet, die durch den Einsatz eines Digitalisierungstabletts, Computer und Monitor größere Variationsmöglichkeiten visuomotorische Differenzen zu testen ermöglicht, Datenaufnahmen effektiver gestaltet und optische Nebeneffekte, wie Aberrationen der Prismen, umgeht.

4.1 Das minimale visuelle Feedback

In meiner Arbeit konnte ich zeigen, dass ein minimales visuelles Feedback der Zielbewegung ausreicht, um an eine visuomotorische Differenz zu adaptieren. Die Beobachtung der ganzen Hand, kann durch einen auf dem Monitor kurz aufblinkenden Punkt am Trefferort ersetzt werden. Die Ergebnisse zeigten, dass diese Darstellung dem visuomotorische System genügend Informationen liefert für eine Kontrolle und Korrektur der Bewegung. Allerdings hat die Betrachtung der Hand, während der Adaptationsphase, einen qualitativen Einfluss auf den Folgeeffekt.

Wird über den Monitor zusätzlich zu der Punktprojektion die falsche Hand als Bild präsentiert, so zeigt die passive Hand, dessen Bild während der Adaptationsphase dargestellt wurde, einen höheren Folgeeffekt als im Versuch ohne Handprojektion. Somit steigt für die nicht aktiv lernende Hand mit zunehmender visueller Information die Präzision der Anpassung.

4.2 Der Adaptationsverlauf

Während der Adaptationsphase muss ein kognitiver Einfluss auf die Bewegung berücksichtigt werden, d.h. dass die Versuchspersonen bei der Beobachtung des visuomotorischen Fehlers eine bewusste Korrektur der nachfolgenden Bewegung durchführen, welche nicht mit einer Adaptation gleichzusetzen ist. Die Angleichung in der Adaptationsphase zeigt bei allen Versuchspersonen einen relativ ähnlichen Verlauf der Annäherung an den verschobenen Zielpunkt, welche über 5 bis 8 Trefferbewegungen verläuft. Später im Folgeeffekt zeigen sich große Unterschiede im visuomotorischen Verhalten der Testpersonen. In der Adaptationsphase wird der Versuchsperson im Gegensatz zur Folgeeffektphase ein visuelles Feedback des Fehlers präsentiert. Diese Präsentation lässt eine bewusste Steuerung der Zielbewegung zu, indem die beobachtete Differenz zum Zielkreuz entgegen der gefühlten Raumwahrnehmung korrigiert wird. Hierdurch erklären sich die Ähnlichkeiten der Testpersonen im Adaptationsverlauf und die Differenzen in den Folgeeffekten, welche nicht optisch nachkontrolliert werden. Das menschliche visuomotorische System ist einer Feineinstellung (Fernandez-Ruiz and Diaz 1999) unterworfen. Dennoch ist es in der Lage, größere Differenzen zu kompensieren. Dies zeigt sich in der schrittweisen Annäherung an das Ziel über mehrere Zielversuche. Die Kinetik dieser Leistung, von mir als Lernkurve bezeichneter Verlauf, lässt sich mit einer Exponentialfunktion beschreiben.

$$d = d_0 + ae^{-bn} \quad \text{für } n = 1, 2, 3 \dots$$

Eine anfangs aufgestellte Hypothese, nach der die Anpassungsleistung während der Adaptationsphase geringer wird, je größer die zeitliche Verzögerung des visuellen Feedbacks ist, musste ich verwerfen. Die Ergebnisse verdeutlichen trotz Variation der Zeitdifferenz den soeben beschriebenen Verlauf. Die entsprechenden Unterschiede zeigen sich erst im Nacheffekt.

4.3 Die Bewertung des Nacheffekts / Folgeeffekts

Die Adaptation an eine visuomotorische Verschiebung kann durch den Nacheffekt (Fernandez-Ruiz, Hall-Haro et al. 2000) gemessen werden. Da die Dauer des Nacheffektes abhängig ist von der Anzahl der durchgeführten Zielbewegungen nach abgeschlossener Adaptation (Fernandez-Ruiz and Diaz 1999), wird in dieser Arbeit ein von mir bezeichneter Folgeeffekt gemessen. Ohne visuelles Feedback der Zielbewegung behalten die

Versuchspersonen den erlernten Adaptationszustand bei. So können die Werte des Folgeeffektes über mehrere Zielbewegungen hinweg aufgenommen werden.

Tatsächlich zeigt sich jetzt in den Folgeeffekten das erwartete Resultat, dass mit zunehmender Zeitdifferenz der optischen Rückmeldung die Adaptation an die visuomotorische Differenz abnimmt. Klare Grenzen in denen das System arbeitet sind in diesem Versuch nicht zu beobachten. Individuelle Unterschiede im Folgeeffekt auf eine Verschiebung der Optik oder der motorischen Umwelt, lassen sich auf einen Trainingszustand des visuomotorischen Systems zurückführen. Testpersonen, die durch ihre Tätigkeiten motorisch trainiert sind (Steuerung verschiedener Flugzeuge, Autos oder Boote), adaptieren besser auf eine visuomotorische Differenz als solche, die durch ihre Tätigkeiten visuell trainiert sind (Fotografen und Sportschützen). Für letztere ist eine visuomotorische Adaptation überflüssig – das Ziel wird nur optisch erfasst und dann „abgedrückt“ (Kimme und Korn – Technik). Die relativen Folgeeffektgrößen bleiben auch bei unterschiedlichen Verschiebungen individuell annähernd konstant.

Weitere Experimente in dieser Richtung werden besonders interessant für technische Bereiche, die eine Kontrolle mit zeitlicher Verzögerung, wie Tele-Operationen, ferngelenkte Roboter oder Koordination per Sonar beinhalten (Foulkes and Miall 2000).

4.4 Die Richtungen des intermanuellen Transfers

Um an eine visuomotorische Verschiebung adaptieren zu können, reicht es nicht, sie nur wahrzunehmen, sie muss auch aktiv erfahren werden. Das heißt, die Versuchspersonen müssen sich aktiv mit ihr auseinandersetzen (Held 1965; Welch and Rhoades 1969; Fink, Marshall et al. 1999). Dass es sich dabei nicht alleine um eine motorische Anpassung der beteiligten Muskeln handelt, zeigt die Übertragbarkeit einer Adaptation von der einen Hand auf die andere, passive Hand. Bereits Hermann von Helmholtz (Helmholtz 1867) beschreibt bei seinen Prismenbrillenversuchen den intermanuellen Transfer. In der Literatur lassen sich dazu die unterschiedlichsten Ergebnisse finden. Während einige den Transfer einer erlernten Adaptation nur von der dominanten auf die nichtdominante Hand beschreiben, zeigen andere den umgekehrten Effekt einer Lernübertragung - von der nichtdominanten Hand auf die dominante Hand. Bei dieser asymmetrischen Lernübertragung werden zwei verschiedene visuomotorische Systeme diskutiert. Zum einen sind bei einer linksarmigen Aktivität die rechte, als auch die linke Hälfte des Gehirns beteiligt, wodurch eine visuomotorische Differenz auch von der passiven, rechten Hand gelernt wird (Lavrysen, Helsen et al. 2003).

Auf der anderen Seite steht die Theorie, dass beim Lernen der rechten Hand die Informationen in die linke Gehirnhälfte projiziert werden. Diese dominante Hirnhemisphäre besitzt wiederum neurale Bahnen zur Steuerung des rechten, als auch des linken Armes. Somit reicht eine erlernte Adaptation der linken Gehirnhälfte um einen Transfer auf beide Arme zu erlangen (Criscimagna-Hemming, Donchin et al. 2003).

Die Vorversuche zeigten, dass eine kurze virtuelle Information über den Trefferort in Relation zum Zielpunkt, zur visuomotorischen Adaptation ausreicht. Die intermanuelle Transferleistung jedoch steigt mit zunehmender optischer Information. Wird während der Adaptationsphase die passive Hand statt die aktive Hand dargestellt, überträgt sich die Adaptation stärker. Die passive Hand lernt schneller, wenn als visuelles Feedback diese Hand präsentiert wird.

Die Ergebnisse dieser Arbeit eröffnen einen weiteren Blickwinkel für die Übertragbarkeit einer erlernten Visuomotorischen Differenz von der aktiven auf die passive Hand. Tatsächlich ist es der Blickwinkel, der für den intermanuellen Transfer von großer Bedeutung ist. Diskutierte Hypothesen der ipsilateralen motorischen Kontrolle (Netz, Lammers et al. 1997; Mayston, Harrison et al. 1999) oder eine Verteilung der sensorischen Informationen in die linke und rechte Hälfte des Gehirns (Ramachandran and Hirstein 1998) konnten die gesammelten Daten nicht bestätigen. Dagegen ist der visuelle Input – die optische Projektion in die Hirnhemisphäre - entscheidend, ob der von dieser Gehirnhälfte gesteuerte passive Arm die adaptierende Verschiebung durch den anderen Arm lernt oder nicht. Erscheint das visuelle Feedback des Fehlers rechts vom Fixierpunkt (in diesem Versuch das optische Zielkreuz), wird es in die linke Hirnhemisphäre projiziert. Diese Gehirnhälfte steuert den rechten Arm und ermöglicht es ihm auch passiv die Differenz zu erlernen. Entsprechend umgekehrt lernt der linke, inaktive Arm, wenn die optische Information links vom Fixierpunkt dargestellt und in die rechte Gehirnhälfte geleitet wird.

Ein intermanueller Transfer ist dementsprechend möglich, wenn das visuelle Feedback während der Adaptationsphase in die Hirnhemisphäre projiziert wird, welche die passive Hand steuert.

4.5 Ausblick

Im Laufe dieser Arbeit sind einige Fragen für weitere Experimente aufgetaucht. Die individuellen Unterschiede der Versuchspersonen in den Folgeeffekten (3.2.1.2 Der Folgeeffekt, Seite 43) ließen sich aufgrund einer Befragung mit visuomotorischen Aktivitäten

der Testpersonen verbinden. Eine Längsschnittuntersuchung über einen längeren Trainingszeitraum – von visuomotorisch untrainiert bis visuomotorisch trainiert – einer oder mehrerer Versuchspersonen könnte einen genaueren Zusammenhang offen legen. Der entwickelte computergestützte Aufbau hat sich hier bewährt und ist für Experimente dieser Art sehr gut geeignet.

5 Zusammenfassungen

Motorische Bewegungen werden über die visuelle Rückmeldung auf ihre Genauigkeit kontrolliert und ggf. korrigiert. Über einen technischen Eingriff, wie beispielsweise einer Prismenbrille, kann man eine Differenz zwischen optisch wahrgenommener und haptisch erlebter Umwelt erzeugen, um die Fähigkeiten des visuomotorischen Systems zu testen.

In dieser Arbeit wurde eine computergestützte Methode entwickelt, eine solche visuomotorische Differenz zu simulieren.

Die Versuchspersonen führen eine ballistische Bewegung mit Arm und Hand aus in der Absicht, ein vorgegebenes Ziel zu treffen. Die Trefferpunkte werden durch einen Computer mit Hilfe eines Digitalisierungstablettes aufgenommen. Die visuelle Umwelt, welche den Versuchspersonen präsentiert wird, ist auf einem Monitor dargestellt. Das Monitorabbild – ein Kreuz auf weißem Hintergrund – betrachten die Testpersonen über einen Spiegel. Dieser ist in einem entsprechenden Winkel zwischen Monitor und Digitalisierungstablett angebracht, so dass das Zielbild auf dem Digitalisierungstablett projiziert wird. Die Testpersonen nehmen das Zielkreuz auf dem Digitalisierungstablett liegend wahr. Führt die Versuchsperson eine Zielbewegung aus, können die aufgenommenen Koordinaten als Punkte auf dem Monitor dargestellt werden und die Testperson erhält über diese Punktanzeige ein visuelles Feedback ihrer Bewegung. Der Arbeitsbereich des Digitalisierungstabletts kann über den Computer eingerichtet und so motorische Verschiebungen simuliert werden.

Die verschiedenartigen Möglichkeiten dieses Aufbaus wurden zum Teil in Vorversuchen getestet um Fragestellungen, Methodik und technische Einrichtungen aufeinander abzustimmen. Den Hauptversuchen galt besonderes Interesse an der zeitlichen Verzögerung des visuellen Feedbacks sowie dem intermanuellen Transfer. Hierbei ergaben sich folgende Ergebnisse:

- Die Versuchspersonen adaptieren an eine räumlich verschobene Umwelt. Der Adaptationsverlauf lässt sich mit einer Exponentialfunktion mathematisch berechnen und darstellen.
- Dieser Verlauf ist unabhängig von der Art des visuellen Feedbacks. Die Beobachtung der Handbewegung während der Adaptation zeigt die gleiche Zielabfolge wie eine einfache Punktprojektion, die den Trefferort der Bewegung darstellt.

- Der exponentielle Verlauf der Adaptationsbewegung ist unabhängig von den getesteten zeitlichen Verzögerungen des visuellen Feedbacks.
- Die Ergebnisse des Folgeeffektes zeigen, dass bei zunehmender zeitlicher Verzögerung des visuellen Feedbacks während der Adaptationsphase, die Größe des Folgeeffektwertes geringer wird, d.h. die anhaltende Anpassungsleistung an eine visuomotorische Differenz sinkt.
- Die Folgeeffekte weisen individuelle Eigenheiten auf. Die Testpersonen adaptieren verschieden stark an eine simulierte Verschiebung. Ein Vergleich mit den visuomotorischen Herausforderungen im Vorleben der Versuchspersonen ließ vermuten, dass das visuomotorische System des Menschen trainierbar ist und sich - je nach Trainingszustand – unterschiedlich an wahrgenommene Differenzen anpasst.
- Der intermanuelle Transfer konnte unter verschiedenen Bedingungen nachgewiesen werden.
- Ein deutlich stärkerer Folgeeffekt kann beobachtet werden, wenn die wahrgenommene visuomotorische Differenz zwischen Ziel und Trefferpunkt in eine Gehirnhälfte projiziert wird und der Folgeeffekt mit der Hand erfolgt, welche von dieser Hirnhemisphäre gesteuert wird. Der intermanuelle Transfer wird demnach begünstigt, wenn die visuelle Projektion der Fehlerbeobachtung in die Gehirnhälfte erfolgt, die während der Adaptationsphase motorisch passiv ist.

Literaturverzeichnis

- Amedi, A., R. Malach, et al. (2001). "Visuo-haptic object-related activation in the ventral visual pathway." Nat Neurosci **4**(3): 324-30.
- Baizer, J. S., I. Kralj-Hans, et al. (1999). "Cerebellar lesions and prism adaptation in macaque monkeys." J Neurophysiol **81**(4): 1960-5.
- Baraduc, P. and D. M. Wolpert (2002). "Adaptation to a visuomotor shift depends on the starting posture." J Neurophysiol **88**(2): 973-81.
- Batista, A. P., C. A. Buneo, et al. (1999). "Reach plans in eye-centered coordinates." Science **285**(5425): 257-60.
- Blakemore, S. J., D. M. Wolpert, et al. (1998). "Central cancellation of self-produced tickle sensation." Nat Neurosci **1**(7): 635-40.
- Blakemore, S. J. and J. Decety (2001). "From the perception of action to the understanding of intention." Nat Rev Neurosci **2**(8): 561-7.
- Blakemore, S. J., C. D. Frith, et al. (2001). "The cerebellum is involved in predicting the sensory consequences of action." Neuroreport **12**(9): 1879-84.
- Criscimagna-Hemminger, S. E., O. Donchin, et al. (2003). "Learned dynamics of reaching movements generalize from dominant to nondominant arm." J Neurophysiol **89**(1): 168-76.
- Crowell, J. A., M. S. Banks, et al. (1998). "Visual self-motion perception during head turns." Nat Neurosci **1**(8): 732-7.
- Cuijpers, R. H., A. M. Kappers, et al. (2000). "Investigation of visual space using an exocentric pointing task." Percept Psychophys **62**(8): 1556-71.
- Cuijpers, R. H., A. M. Kappers, et al. (2000). "Large systematic deviations in visual parallelism." Perception **29**(12): 1467-82.
- Cuijpers, R. H., A. M. Kappers, et al. (2001). "On the role of external reference frames on visual judgements of parallelity." Acta Psychol (Amst) **108**(3): 283-302.
- Cunningham, D. W., A. Chatziastros, et al. (2001). "Driving in the future: temporal visuomotor adaptation and generalization." J Vis **1**(2): 88-98.
- Czermak, J. N. (1855). Physiologische Studien. II. Abteilung. Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. Wien, Aus der K.K. Hof- und Staatsdruckerei. **17. Band**.
- Day, P. N. O. B. H., Patrik; Russel, George T. (2000). A Comparison of Real and Virtual Worlds for Human Factors Experimentation.

- Deichmann, A. (2002). Adaptationsversuche von Handbewegungen bei visuomotorischer Diskrepanz ohne Prismenbrille. Institut für Zoologie (Abteilung Neurobiologie). Mainz, Johannes Gutenberg Universität: 67.
- Deubel, H., B. Bridgeman, et al. (1998). "Immediate post-saccadic information mediates space constancy." Vision Res **38**(20): 3147-59.
- Donchin, O., S. C. de Oliveira, et al. (1999). "Who tells one hand what the other is doing: the neurophysiology of bimanual movements." Neuron **23**(1): 15-8.
- Donchin, O., L. Sawaki, et al. (2002). "Mechanisms influencing acquisition and recall of motor memories." J Neurophysiol **88**(4): 2114-23.
- Doricchi, F. and C. Incoccia (1998). "Seeing only the right half of the forest but cutting down all the trees?" Nature **394**(6688): 75-8.
- Ernst, M. O., M. S. Banks, et al. (2000). "Touch can change visual slant perception." Nat Neurosci **3**(1): 69-73.
- Fassbender, M. G., P.; Lantermann, M. (2003/2004). Visuomotorisches Lernen bei verschiedenen Stimuli. Mainz, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Institut für Zoologie, Abteilung III - Neurobiologie.
- Fernandez-Ruiz, J. and R. Diaz (1999). "Prism adaptation and aftereffect: specifying the properties of a procedural memory system." Learn Mem **6**(1): 47-53.
- Fernandez-Ruiz, J., C. Hall-Haro, et al. (2000). "Learning motor synergies makes use of information on muscular load." Learn Mem **7**(4): 193-8.
- Fink, G. R., J. C. Marshall, et al. (1999). "The neural consequences of conflict between intention and the senses." Brain **122 (Pt 3)**: 497-512.
- Foulkes, A. J. and R. C. Miall (2000). "Adaptation to visual feedback delays in a human manual tracking task." Exp Brain Res **131**(1): 101-10.
- Graziano, M. S. (1999). "Where is my arm? The relative role of vision and proprioception in the neuronal representation of limb position." Proc Natl Acad Sci U S A **96**(18): 10418-21.
- Graziano, M. S., D. F. Cooke, et al. (2000). "Coding the location of the arm by sight." Science **290**(5497): 1782-6.
- Graziano, M. S., C. S. Taylor, et al. (2002). "Complex movements evoked by microstimulation of precentral cortex." Neuron **34**(5): 841-51.
- Haarmeier, T., F. Bunjes, et al. (2001). "Optimizing visual motion perception during eye movements." Neuron **32**(3): 527-35.
- Haggard, P. L., Guy; Miall, R.Chris; Stein, John F. (1997). "Local learning of inverse kinematics in human reaching movement." Human Movement Science(16): 133-147.

- Held, R. (1965). "Plasticity in sensory-motor systems." Sci Am **213**(5): 84-94.
- Held, R. (1978). Space and Motion Perception. Berlin, Springer-Verlag.
- Helmholtz, H. (1867). § 29. Die Richtung des Sehens. Handbuch der Physiologischen Optik. G. Karsten. Leipzig, Leopold Voss. **IX. Band**.
- Hoffmann, G. S. (2000). Adaptation von Handbewegungen bei Menschen mit und ohne visuelle Rückmeldung. Institut für Zoologie (Abteilung Neurobiologie). Mainz, Johannes Gutenberg Universität: 36.
- Ingram, H. A., P. van Donkelaar, et al. (2000). "The role of proprioception and attention in a visuomotor adaptation task." Exp Brain Res **132**(1): 114-26.
- Itti, L. and C. Koch (2001). "Computational modelling of visual attention." Nat Rev Neurosci **2**(3): 194-203.
- Kappers, A. M. (1999). "Large systematic deviations in the haptic perception of parallelity." Perception **28**(8): 1001-12.
- Kappers, A. M. and J. J. Koenderink (1999). "Haptic perception of spatial relations." Perception **28**(6): 781-95.
- Kappers, A. M. (2002). "Haptic perception of parallelity in the midsagittal plane." Acta Psychol (Amst) **109**(1): 25-40.
- Kitazawa, S., T. Kimura, et al. (1997). "Prism adaptation of reaching movements: specificity for the velocity of reaching." J Neurosci **17**(4): 1481-92.
- Lacquaniti, F. and R. Caminiti (1998). "Visuo-motor transformations for arm reaching." Eur J Neurosci **10**(1): 195-203.
- Langenberg, U., H. Hefter, et al. (1998). "Sinusoidal forearm tracking with delayed visual feedback. I. Dependence of the tracking error on the relative delay." Exp Brain Res **118**(2): 161-70.
- Lavrysen, A., W. F. Helsen, et al. (2003). "The control of sequential aiming movements: the influence of practice and manual asymmetries on the one-target advantage." Cortex **39**(2): 307-25.
- Loeb, G. E. (1987). Motor Control. Encyclopedia of Neuroscience. G. Adelman. Boston, Basel, Stuttgart, Birkhäuser. **Volume II**.
- Mayston, M. J., L. M. Harrison, et al. (1999). "A neurophysiological study of mirror movements in adults and children." Ann Neurol **45**(5): 583-94.
- Miall, R. C., G. Z. Reckess, et al. (2001). "The cerebellum coordinates eye and hand tracking movements." Nat Neurosci **4**(6): 638-44.

- Morasso, P. G. (2000). Motor Control Models: learning and performance. International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. N. J. B. Smelser, Paul B., Pergamon Press.
- Morton, S. M., C. E. Lang, et al. (2001). "Inter- and intra-limb generalization of adaptation during catching." Exp Brain Res **141**(4): 438-45.
- Netz, J., T. Lammers, et al. (1997). "Reorganization of motor output in the non-affected hemisphere after stroke." Brain **120 (Pt 9)**: 1579-86.
- Pinera, P. T., D.; Wrede, P. (2002/2003). Visuomotorische Adaptation. Mainz, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Institut für Zoologie, Abteilung III - Neurobiologie.
- Ramachandran, V. S. and D. Rogers-Ramachandran (1996). "Synaesthesia in phantom limbs induced with mirrors." Proc R Soc Lond B Biol Sci **263**(1369): 377-86.
- Ramachandran, V. S. and W. Hirstein (1998). "The perception of phantom limbs. The D. O. Hebb lecture." Brain **121 (Pt 9)**: 1603-30.
- Rameil, S. R., G. (2001/2002). Das Reafferenzprinzip beim visuo-motorischen Lernen. Mainz, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Institut für Zoologie, Abteilung III - Neurobiologie.
- Redding, G. M. and B. Wallace (2000). "Prism exposure aftereffects and direct effects for different movement and feedback times." J Mot Behav **32**(1): 83-99.
- Rizzolatti, G., L. Fogassi, et al. (2001). "Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action." Nat Rev Neurosci **2**(9): 661-70.
- Rode, G., Y. Rossetti, et al. (2001). "Prism adaptation improves representational neglect." Neuropsychologia **39**(11): 1250-4.
- Rodriguez, E., N. George, et al. (1999). "Perception's shadow: long-distance synchronization of human brain activity." Nature **397**(6718): 430-3.
- Rossetti, Y., G. Rode, et al. (1998). "Prism adaptation to a rightward optical deviation rehabilitates left hemispatial neglect." Nature **395**(6698): 166-9.
- Sabes, P. N., M. I. Jordan, et al. (1998). "The role of inertial sensitivity in motor planning." J Neurosci **18**(15): 5948-57.
- Sabes, P. N. (2000). "The planning and control of reaching movements." Curr Opin Neurobiol **10**(6): 740-6.
- Sainburg, R. L. and D. Kalakanis (2000). "Differences in control of limb dynamics during dominant and nondominant arm reaching." J Neurophysiol **83**(5): 2661-75.
- Sainburg, R. L., J. E. Lateiner, et al. (2003). "Effects of altering initial position on movement direction and extent." J Neurophysiol **89**(1): 401-15.

- Scheidt, R. A. and W. Z. Rymer (2000). "Control strategies for the transition from multijoint to single-joint arm movements studied using a simple mechanical constraint." J Neurophysiol **83**(1): 1-12.
- Scherwat, A. H., P. (2001/2002). Visuo-motorisches Lernen: Visuelle Rückmeldung von der inaktiven Hand. Mainz, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Institut für Zoologie, Abteilung III - Neurobiologie.
- Schulze, K., E. Luders, et al. (2002). "Intermanual transfer in a simple motor task." Cortex **38**(5): 805-15.
- Sekiyama, K., S. Miyauchi, et al. (2000). "Body image as a visuomotor transformation device revealed in adaptation to reversed vision." Nature **407**(6802): 374-7.
- Smith, K. U. S., William M. (1962). Perception and Motion - An Analysis of Space-Structured Behavior. Philadelphia, London, W.B. Saunders Company.
- Sperry, R. W. (1950). "Neural basis of the spontaneous optokinetic response produced by visual inversion." J Comp Physiol Psychol **43**(6): 482-9.
- van Beers, R. J., A. C. Sittig, et al. (1999). "Integration of proprioceptive and visual position-information: An experimentally supported model." J Neurophysiol **81**(3): 1355-64.
- Volkman, J., A. Schnitzler, et al. (1998). "Handedness and asymmetry of hand representation in human motor cortex." J Neurophysiol **79**(4): 2149-54.
- von Campenhausen, C. (1993). Die Sinne des Menschen - Einführung in die Psychophysik der Wahrnehmung. Stuttgart, New York, Georg Thieme Verlag.
- von Holst, E. M., Horst (1950). Das Reafferenzprinzip. Zur Verhaltensphysiologie bei Tieren und Menschen - Gesammelte Abhandlungen. E. von Holst. München, R. Piper & Co. Verlag. **Band I**.
- Watanabe, T., J. E. Nanez, et al. (2001). "Perceptual learning without perception." Nature **413**(6858): 844-8.
- Welch, R. B. and R. W. Rhoades (1969). "The manipulation of informational feedback and its effects upon prism adaptation." Can J Psychol **23**(6): 415-28.
- Welch, R. B. (1974). "Speculations on a model of prism adaptation." Perception **3**(4): 451-60.
- Welch, R. B. (1986). Adaptation of Space Perception. Handbook of Perception and Human Performance - Sensory Processes and Perception. K. R. K. Boff, L.; Thomas, J.P. New York, John Wiley and Sons. **Volume I**.
- Wexler, M., F. Panerai, et al. (2001). "Self-motion and the perception of stationary objects." Nature **409**(6816): 85-8.

Literaturverzeichnis

Whitaker, D. and P. V. McGraw (2000). "Long-term visual experience recalibrates human orientation perception." Nat Neurosci **3**(1): 13.

Wolpert, D. M. and R. C. Miall (1996). "Forward Models for Physiological Motor Control." Neural Netw **9**(8): 1265-1279.

Anhang

Anhang

Daten zur zeitlichen Verzögerung des visuellen Feedbacks

zeitl. Verzögerung: 0,000 sec

Trefferfolge/Versuchsperson	VP A	VP B	VP D	VP E	VP F	VP G	VP C	VP J	VP L	VP M	VP N	VP O	VP K	VP P	VP Q	VP H
Adaptationsphase	1,09	1,35	-1,07	-0,21	0,60	-0,58	-2,04	-1,00	0,45	-1,48	-0,18	2,18	0,67	2,12	1,82	-1,58
	-2,91	-5,95	-5,86	-5,61	-5,58	-9,13	-3,65	-5,76	-1,70	-6,79	-7,58	-4,18	-3,12	1,18	-0,42	-2,39
	-4,91	-8,52	-7,37	-8,67	-8,40	-7,62	-4,34	-8,76	-2,48	-9,42	-10,48	-8,58	-4,91	-6,15	-2,21	-7,58
	-7,64	-7,46	-8,92	-8,18	-10,68	-8,80	-4,86	-7,24	-2,64	-8,39	-8,03	-8,85	-3,21	-9,06	-7,91	-9,76
	-8,88	-8,65	-7,34	-6,82	-6,49	-8,80	-6,22	-7,48	-2,91	-9,36	-7,52	-7,58	-2,30	-9,64	-6,76	-8,91
	-7,61	-8,22	-9,86	-9,12	-7,43	-8,95	-5,01	-8,30	-4,06	-9,39	-5,33	-8,70	-7,18	-8,82	-7,39	-10,15
	-10,03	-8,86	-7,86	-8,94	-8,19	-8,71	-6,37	-8,21	-5,64	-9,52	-6,48	-8,70	-14,15	-8,36	-7,45	-8,94
	-8,79	-9,28	-8,28	-8,21	-9,62	-9,65	-7,77	-8,97	-6,70	-9,88	-8,36	-10,03	-10,06	-7,76	-9,21	-10,30
	-8,21	-8,28	-8,07	-10,06	-7,83	-8,86	-7,49	-9,52	-6,64	-8,48	-8,55	-8,73	-10,67	-9,24	-6,12	-7,21
	-9,76	-8,58	-8,49	-8,67	-8,80	-9,83	-7,55	-7,64	-8,06	-9,79	-6,30	-7,76	-11,15	-9,91	-7,97	-9,70
	-9,76	-9,58	-9,01	-8,21	-9,01	-8,62	-8,22	-8,30	-9,12	-8,85	-8,52	-9,09	-5,70	-9,82	-7,73	-8,21
	-8,94	-7,83	-7,86	-9,85	-9,31	-8,01	-9,55	-9,12	-7,09	-9,15	-6,21	-8,45	-10,79	-9,64	6,36	-9,70
	-8,97	-9,52	-9,92	-10,27	-7,55	-8,34	-7,19	-7,61	-7,76	-8,97	-8,33	-7,15	-8,52	-8,76	-7,09	-9,94
	-8,15	-6,86	-9,58	-10,42	-11,19	-8,80	-7,13	-8,12	-6,82	-9,27	-7,85	-7,52	-7,73	-10,48	-6,67	-8,12
	-8,91	-8,16	-6,95	-10,27	-8,98	-9,80	-5,77	-8,18	-7,82	-7,97	-7,61	-8,55	-8,21	-8,27	-6,67	-9,33
	-8,82	-8,71	-9,52	-6,15	-7,80	-9,28	-7,40	-8,73	-8,03	-9,30	-8,52	-8,94	-8,00	-9,18	-9,30	-9,88
	-8,18	-7,74	-6,74	-7,58	-9,55	-7,49	-7,74	-9,52	-9,45	-9,27	-10,09	-8,18	-9,42	-8,36	-8,00	-8,55
	-9,18	-8,58	-9,31	-7,70	-9,52	-7,55	-9,86	-9,55	-8,94	-9,48	-6,76	-7,30	-9,70	-12,48	-7,00	-7,00
	-9,33	-8,80	-9,04	-10,00	-8,77	-8,22	-9,04	-7,97	-8,45	-8,48	-9,55	-10,79	-9,94	-8,33	-8,73	-8,70
	-7,67	-8,62	-6,68	-9,45	-9,34	-8,13	-9,37	-10,06	-8,73	-8,85	-7,70	-5,00	-8,76	-10,88	-5,85	-8,12

zeitl. Verzögerung: 0,000 sec

Trefferfolge/Versuchsperson	VP A	VP B	VP D	VP E	VP F	VP G	VP C	VP J	VP L	VP M	VP N	VP O	VP K	VP P	VP Q	VP H
Folgeeffektphase	-8,00	0,32	-9,10	-10,45	-1,92	-2,49	-0,92	-2,09	-3,91	-10,88	-4,36	-6,55	-5,85	2,09	-4,48	1,03
	-6,91	-0,01	-9,10	-11,48	-1,89	-3,55	-0,83	0,21	-3,09	-11,61	-3,00	0,97	-6,88	2,55	-4,88	0,00
	-7,12	1,96	-7,62	-11,12	-2,86	-3,22	-1,01	-1,09	-3,58	-10,97	-2,42	0,91	-4,12	4,06	0,33	0,18
	-6,00	1,20	-8,92	-11,76	-2,10	-2,80	-1,58	-0,27	-2,27	-11,03	-2,70	0,67	-5,76	1,42	-2,52	1,58
	-5,52	0,78	-6,58	-9,09	-2,58	-2,95	-2,43	-1,61	-2,97	-10,82	-3,48	-1,27	-6,09	1,30	-2,42	2,45
	-7,00	-0,25	-7,37	-10,24	-3,13	-3,95	-0,86	-0,85	-1,12	-10,36	-2,82	1,55	-5,58	1,79	1,03	1,61
	-7,30	-0,71	-7,25	-8,88	-2,13	-2,65	-1,46	-0,94	-1,82	-11,30	-1,33	0,64	-5,70	1,61	-0,73	2,61
	-7,09	0,81	-7,40	-10,00	-2,28	-2,77	-0,55	-1,82	-1,12	-11,09	-1,12	2,42	-4,45	3,36	-0,64	1,88
	-9,24	0,35	-8,01	-9,33	-1,25	-2,95	-0,92	-2,52	-2,76	-11,24	-1,21	0,85	-3,94	2,30	-1,18	1,06
	-8,21	0,81	-7,46	-10,27	-1,55	-3,37	-1,07	-1,55	-4,03	-10,97	-1,30	3,36	-4,82	3,67	0,06	1,88
	-7,85	0,63	-8,16	-9,58	-1,52	-2,80	-2,28	-2,24	-4,52	-10,91	-0,67	2,91	-4,91	2,94	-1,36	1,55
	-8,24	1,54	-7,43	-9,30	-1,83	-3,92	-1,34	0,06	-3,30	-11,39	0,00	3,61	-6,55	1,52	-0,85	2,39
	-6,79	0,32	-7,62	-10,45	-0,95	-2,74	-2,13	0,00	-1,85	-11,24	-0,94	3,30	-5,70	1,79	0,58	1,91
	-6,45	-0,01	-8,01	-11,36	-1,40	-1,77	-2,55	-0,67	-2,30	-11,52	-1,00	3,30	-5,06	2,85	0,82	1,45
	-6,27	1,17	-7,92	-10,36	-0,46	-1,52	-2,43	-1,61	-3,39	-11,52	-3,12	4,24	-4,88	1,45	-0,52	1,52
	-7,39	0,42	-7,25	-12,00	-1,68	-2,04	-2,58	-1,00	-3,97	-11,18	-1,79	2,79	-7,18	0,88	-0,39	1,21
	-8,36	0,90	-7,04	-11,97	-1,46	-0,86	-0,80	-0,70	-3,88	-11,33	-1,70	2,61	-6,30	2,58	1,18	0,12
	-8,91	0,69	-7,25	-11,36	-0,65	-0,43	-1,22	-0,39	-4,79	-12,09	-1,33	4,64	-5,09	1,39	-0,76	2,73
	-8,70	0,45	-6,31	-11,91	-1,74	-0,62	-1,13	-1,39	-5,15	-12,12	-2,61	3,61	-5,30	1,42	0,30	3,18
	-5,09	1,02	-6,07	-11,15	-1,55	-0,52	0,29	-2,03	-3,12	-11,97	-1,61	4,21	-5,79	2,42	0,36	2,97
	-5,45		-6,10	-10,27	-0,68		-0,34	-1,58	-2,18	-12,06	-1,58	4,06	-5,70	1,70	-0,58	1,73

zeitl. Verzögerung: 0,250 sec

Trefferfolge/Versuchsperson

Adaptationsphase

VP B	VP D	VP E	VP F	VP G	VP A	VP C	VP Q	VP J	VP K	VP H	VP I
0,14	0,75	-1,37	1,42	0,32	1,51	-0,52	-3,77	-0,95	0,23	1,57	-4,83
0,02	-4,74	-11,01	-5,46	-3,46	-6,74	-3,83	-7,65	-8,68	-8,58	-1,77	1,14
-6,04	-7,46	-6,43	-8,40	-10,68	-10,62	-7,55	-9,19	-10,10	-4,16	-6,04	-1,68
-10,13	-7,74	-8,89	-7,98	-6,92	-7,89	-9,71	-8,07	-8,46	-6,49	-10,43	-4,86
-9,46	-8,98	-10,58	-7,80	-8,58	-8,52	-8,55	-10,07	-9,46	-7,07	-11,65	-5,10
-8,40	-7,71	-7,04	-9,01	-8,68	-7,46	-9,98	-7,71	-9,40	-6,68	-8,37	1,02
-9,80	-7,86	-6,92	-8,37	-8,89	-9,86	-9,49	-7,95	-9,71	-9,65	-7,34	-1,71
-10,46	-8,40	-6,98	-8,43	-8,74	-9,43	-9,40	-8,95	-9,34	-3,16	-9,89	-2,74
-10,80	-9,37	-8,31	-8,77	-9,31	-8,22	-9,01	-8,55	-9,34	-7,22	-9,37	0,11
-10,49	-8,71	-8,16	-8,16	-6,58	-8,80	-7,58	-9,25	-8,52	-4,19	-7,04	-6,31
-8,89	-9,04	-6,43	-10,55	-8,37	-8,13	-9,31	-10,01	-9,22	-2,22	-10,43	-7,34
-9,13	-7,95	-6,28	-6,95	-7,65	-10,22	-10,49	-10,10	-8,01	-3,77	-9,25	-6,86
-7,98	-9,31	-6,77	-7,80	-8,65	-7,86	-9,16	-8,65	-8,68	0,66	-8,37	-11,62
-10,71	-7,71	-9,62	-8,46	-7,89	-9,22	-9,43	-8,83	-8,65	-8,28	-8,77	-7,83
-9,89	-8,77	-8,68	-9,34	-7,74	-8,28	-9,89	-9,83	-8,25	-6,34	-9,19	-8,25
-10,07	-7,98	-9,68	-6,98	-9,43	-8,43	-9,62	-9,16	-9,25	-5,52	-9,37	-9,22
-8,43	-9,28	-8,86	-7,98	-8,80	-8,37	-9,01	-9,83	-6,19	-8,25	-8,13	-9,34
-9,71	-8,49	-8,04	-7,68	-7,86	-7,04	-8,95	-8,62	-8,86	-6,34	-9,55	-9,95
-9,13	-9,19	-8,01	-8,07	-9,40	-7,46	-9,19	-9,07	-8,31	-6,34	-10,55	-8,68
-9,62	-8,46	-4,89	-8,31	-8,46	-10,98	-9,92	-9,65	-8,40	-10,28	-7,04	-7,74

zeitl. Verzögerung: 0,250 sec

Trefferfolge/Versuchsperson

Folgeeffektphase

VP B	VP D	VP E	VP F	VP G	VP A	VP C	VP Q	VP J	VP K	VP H	VP I
0,38	-6,89	-9,71	-1,83	-2,58	2,35	-0,34	-1,95	-7,74	-3,28	-0,34	-0,68
0,63	-8,16	-9,22	-1,98	-0,43	2,93	-0,16	-2,86	-7,40	-2,95	-0,13	1,32
1,60	-6,62	-10,10	-2,80	-1,98	2,51	-0,40	-1,65	-6,77	-2,49	2,14	0,99
0,05	-7,37	-7,65	-1,28	-0,34	2,02	-0,83	-1,34	-5,77	-2,01	2,35	0,66
1,35	-7,80	-8,10	-1,68	-0,95	2,54	-1,37	-1,22	-6,92	-0,25	2,20	2,48
0,66	-9,07	-9,77	-2,40	-1,74	1,72	-1,19	-1,31	-7,16	-1,71	1,60	1,26
0,81	-7,46	-8,65	-2,43	-2,86	1,35	-0,83	-2,04	-7,19	-2,49	0,42	2,60
0,66	-7,92	-7,68	-2,95	-1,37	2,78	-0,98	-0,80	-6,40	-3,10	0,72	1,90
-0,34	-8,92	-8,77	-3,16	-2,07	2,45	-1,74	-0,01	-7,43	-1,40	1,20	0,60
0,54	-8,62	-5,01	-1,22	-1,98	2,48	-0,89	-1,43	-6,95	-2,46	0,23	1,60
0,66	-9,16	-7,74	-2,34	-1,55	2,87	0,32	0,14	-7,68	-0,04	2,84	2,96
0,63	-9,37	-7,28	-3,07	-1,68	-4,83	-0,13	-0,74	-7,83	-0,65	1,63	-0,52
1,57	-9,62	-7,62	-2,49	-1,19	2,81	-0,28	-2,71	-8,16	0,84	1,35	-0,71
1,32	-8,58	-6,25	-1,40	-1,40	3,08	-0,10	-1,40	-6,13	0,11	1,78	1,14
1,14	-8,98	-6,49	-2,22	-0,71	1,84	-0,10	-0,98	-5,86	-0,37	1,14	2,26
1,51	-9,07	-6,86	-2,40	-3,19	1,96	0,23	-1,62	-7,01	2,99	-0,04	0,99
1,08	-8,86	-6,46	-1,98	-1,92	1,08	0,32	-1,95	-5,71	0,75	0,69	2,23
0,99	-9,74	-6,25	-0,55	-3,65	1,23	0,05	-1,62	-5,95	1,93	0,93	1,17
0,57	-9,62	-6,71	-1,92		2,35	0,05	-2,31	-6,40	1,54	0,87	-5,71
1,99	-8,80	-6,68	-2,28		2,17	0,51	-0,65	-5,77	1,11	0,63	2,75
	-8,01	-7,13	-1,95		2,20	0,66	0,26	-6,62	2,99	-0,28	2,11

zeitl. Verzögerung: 0,625 sec

Trefferfolge/Versuchsperson

Adaptationsphase

VP B	VP D	VP E	VP F	VP G	VP A	VP D	VP K	VP J	VP I	VP H
1,35	2,26	-2,68	-2,46	1,05	-1,46	0,48	-2,22	0,32	-4,13	-3,04
-5,16	-4,68	-7,68	-1,19	-2,98	-6,65	-0,16	-10,34	-7,92	1,93	-8,25
-8,98	-9,74	-7,89	-7,13	-7,52	-6,98	-1,46	-2,10	-8,89	-4,49	-9,22
-8,46	-7,31	-9,74	-9,95	-8,74	-8,37	-2,25	-5,34	-6,37	-7,52	-7,89
-8,89	-8,22	-8,68	-7,83	-7,37	-7,95	-3,31	-7,65	-8,37	-5,80	-8,19
-7,34	-9,46	-8,16	-8,74	-7,58	-8,22	-2,13	-9,19	-8,55	-8,37	-8,68
-9,16	-9,34	-8,86	-8,31	-8,40	-8,71	-3,68	-9,19	-8,31	-7,37	-8,01
-9,19	-9,95	-9,65	-8,80	-7,25	-7,25	-6,25	-7,28	-8,46	-9,46	-7,46
-7,77	-8,95	-9,43	-6,92	-9,68	-9,31	-7,74	-10,28	-8,13	-5,98	-9,34
-9,83	-8,28	-10,07	-8,65	-8,13	-8,01	-7,25	-6,55	-10,07	-8,43	-8,34
-9,01	-8,98	-7,37	-9,37	-7,04	-9,31	-5,46	-7,19	-8,86	-8,25	-8,04
-8,92	-8,68	-8,34	-7,13	-5,89	-8,65	-6,16	-4,01	-7,13	-8,40	-8,07
-8,86	-8,22	-8,65	-8,92	-7,04	-8,01	-5,68	-8,98	-9,74	-9,31	-7,58
-10,22	-9,43	-9,31	-8,34	-5,86	-9,52	-7,46	-8,43	-9,92	-6,04	-8,71
-9,37	-7,65	-6,62	-8,40	-8,22	-7,95	-8,31	-5,49	-7,65	-7,01	-9,52
-8,46	-9,25	-8,58	-7,74	-7,04	-7,37	-7,31	-9,37	-6,68	-8,43	-9,25
-9,83	-7,98	-8,68	-8,31	-9,52	-6,65	-8,40	-7,46	-8,98	-9,25	-8,83
-8,92	-10,22	-8,49	-8,92	-9,04	-9,62	-9,31	-10,34	-8,68	-9,25	-9,55
-9,13	-9,95	-8,46	-9,19	-7,52	-9,65	-8,71	-8,62	-8,77	-8,31	-10,13
-10,01	-7,22	-7,83	-9,52	-8,89	-9,22	-7,55	-7,07	-9,01	-8,40	-7,52

zeitl. Verzögerung: 0,625
sec

Trefferfolge/Versuchsperson	VP B	VP D	VP E	VP F	VP G	VP A	VP D	VP K	VP J	VP I	VP H
Folgeeffektphase	0,96	-6,55	-6,52		-1,31	-0,19	-0,40	1,51	0,75	-5,19	-5,07
	0,38	-7,31	-7,89	-1,37	-0,92	-0,95	-0,19	0,23	0,26	-4,55	-4,28
	0,17	-6,98	-6,74	-3,07	0,87	-0,34	0,38	1,48	0,54	-5,46	-4,01
	-0,28	-6,71	-7,10	-2,68	2,35	-0,89	1,11	0,66	1,35	-5,74	-5,92
	1,69	-6,40	-7,46	-3,55	3,38	-0,40	0,20	0,35	-0,52	-5,80	-4,65
	0,29	-6,71	-5,10	-4,65	4,63	0,57	1,20	2,57	-0,22	-5,98	-5,71
	-0,22	-8,40	-6,80	-3,40	2,87	0,35	-1,40	2,51	0,45	-3,86	-4,95
	0,48	-7,10	-6,55	-2,52	2,35	0,38	0,48	2,69	-1,22	-4,04	-3,98
	0,35	-6,92	-6,71	-2,92	1,05	2,11	0,90	2,05	0,02	-4,49	-4,58
	1,51	-7,77	-6,10	-3,43	1,08	1,84	-0,40	2,05	0,93	-4,13	-4,31
	0,23	-7,98	-6,04	-3,07	3,23	0,78	-0,43	2,69	1,02	-4,55	-5,31
	1,11	0,38	-6,83	-2,98	1,90	1,32	0,35	1,66	0,54	-5,77	-4,04
	0,29	-8,68	-5,68	-3,83	0,90	1,17	0,72	2,05	-1,58	-3,89	-3,95
	0,99	-8,68	-5,07	-1,86	-0,80	1,14	1,29	1,35	-1,07	-4,43	-5,68
	0,72	-9,31	-5,01	-2,43	-0,25	1,20	1,23	2,78	0,29	-4,95	-5,28
	0,75	-7,95	-5,71	-2,10	0,02	0,93	0,84	1,78	-0,95	-4,89	-3,95
	0,57	-8,92	-4,98	-2,25	-0,25	1,51	0,78	3,08	0,60	-3,89	-4,04
	0,60	-8,86	-5,52	-2,62	-1,07	0,54	1,26	2,14	-0,89	-3,16	-5,83
	-0,28	-8,58	-5,37	-3,10	0,20	0,75	1,90	1,87	-0,92	-5,58	-4,86
	0,96	-8,13	-8,13	-2,92	0,05	1,20	1,14	1,26	-1,25	-3,16	-4,46
	0,60	-7,65	-7,89	-3,55	-0,10	1,08	1,26	0,84	-1,22		-5,43

zeitl. Verzögerung: 1,000 sec

Trefferfolge/Versuchsperson	VP B	VP D	VP E	VP F	VP G	VP A	VP C	VP O	VP P	VP J	VP K	VP I	VP H
Adaptationsphase	2,17	0,45	-1,52	-4,34	-0,01	2,96	-1,25	2,84	1,11	2,57	-3,58	0,11	1,14
	-5,58	-5,40	-2,01	-2,31	-2,68	1,69	-4,37	0,72	-5,80	-8,22	-9,28	-8,04	-7,19
	-9,04	-4,89	-7,37	-5,28	-6,34	-2,40	-4,92	-6,80	-4,30	-7,58	-5,22	-6,98	-14,04
	-10,25	-8,52	-10,04	-11,22	-8,46	-5,19	-7,49	-9,01	-1,80	-10,22	-8,55	-7,25	-8,04
	-9,22	-6,19	-9,55	-6,16	-9,25	-4,62	-7,13	-7,89	-5,13	-2,95	-10,95	-8,31	-9,04
	-8,62	-8,58	-10,40	-10,22	-10,19	-5,74	-10,16	-8,68	-7,86	-6,49	-7,65	-9,01	-9,68
	-9,65	-8,25	-8,52	-6,77	-9,68	-6,46	-8,98	-9,25	-9,98	-8,55	-7,04	-7,58	-9,40
	-8,49	-9,77	-11,62	-6,71	-7,58	-4,43	-8,98	-7,07	-5,31	-6,65	-8,80	-8,71	-8,89
	-8,68	-6,74	-11,49	-10,13	-6,71	-8,10	-8,62	-8,77	-5,65	-6,34	-9,49	-9,22	-7,65
	-9,22	-8,34	-8,37	-5,40	-9,28	-7,13	-5,01	-7,68	-7,25	-8,77	-8,65	-7,89	-10,37
	-8,83	-9,65	-9,98	-10,13	-9,13	-6,86	-6,52	-9,16	-2,43	-9,86	-7,16	-8,77	-8,49
	-9,07	-9,25	-9,89	-8,07	-8,52	-9,92	-7,13	-6,77	-7,40	-10,28	-5,37	-9,58	-7,55
	-8,95	-8,65	-9,22	-8,77	-8,55	-7,16	-8,10	-7,10	-5,46	-7,65	-9,04	-8,28	-7,55
	-8,98	-8,10	-10,49	-8,80	-8,74	-7,37	-8,10	-7,37	-5,95	-7,77	-7,43	-7,40	-9,43
	-8,71	-9,83	-10,46	-8,16	-8,68	-7,62	-6,01	-9,40	-2,71	-8,16	-11,43	-9,58	-9,58
	-8,31	-7,10	-10,10	-8,98	-8,68	-9,52	-8,01	-8,80	-9,37	-8,34	-7,83	-7,62	-9,58
	-9,46	-7,49	-7,95	-8,80	-8,28	-10,04	-9,55	-7,92	-3,28	-8,65	-6,43	-7,49	-8,89
	-9,01	-8,95	-8,37	-8,71	-6,71	-9,28	-7,55	-9,31	-7,28	-9,43	-6,62	-8,58	-8,52
	-8,65	-10,49	-10,62	-9,46	-9,07	-9,80	-7,34	-9,71	-10,37	-7,86	-9,62	-9,04	-8,86
	-8,34	-6,95	-11,43	-7,16	-7,62	-10,77	-8,19	-10,07	-8,28	-8,89	-5,80	-7,98	-9,04

zeitl. Verzögerung: 1,000 sec

Trefferfolge/Versuchsperson	VP B	VP D	VP E	VP F	VP G	VP A	VP C	VP O	VP P	VP J	VP K	VP I	VP H
Folgeeffektphase	1,20	-1,43	-6,49		0,17		2,05	0,42	1,20	-5,22	-4,86	0,99	0,84
	0,75	-1,52	-8,07	-3,07	0,29	-0,34	2,26	0,66	-0,34	1,29	-5,68	1,20	0,99
	-0,22	-2,07	-8,04	-3,04	-1,10	2,11	1,93	0,32	-1,58	1,90	-5,25	0,32	3,11
	0,45	-2,10	-10,13	-3,13	-2,07	1,26	1,96	3,23	-2,74	0,51	-3,95	2,48	2,08
	0,45	-2,49	-9,25	-2,68	-1,86	1,35	-5,55	4,48	-0,04	-0,37	-4,40	0,63	1,78
	0,75	-3,10	-8,19	-3,49	-0,34	-0,31	1,84	3,32	0,14	1,02	-5,77	1,08	2,96
	0,84	-3,52	-8,68	-3,25	-0,83	-0,43	0,96	2,48	0,69	-1,98	-5,04	0,29	2,54
	1,26	-1,49	-9,01	-2,80	-0,37	1,81	2,48	4,69	0,54	-0,52	-5,40	2,02	2,42
	-0,40	-1,28	-8,68	-4,16	0,02	0,20	1,84	3,87	0,02	0,20	-3,71	3,11	2,02
	1,54	-2,83	-10,31	-2,31	-0,83	1,35	1,51	3,78	0,48	-1,37	-2,62	2,45	2,23
	0,75	-2,22	-11,37	-3,25	0,66	2,20	2,87	4,05	-0,16	0,54	-3,77	0,42	1,78
	1,42	-2,37	-10,62	-3,62	0,02	2,54	1,93	3,48	1,23	0,11	-2,16	1,14	0,99
	0,20	-2,01	-10,22	-3,62	0,90	2,90	1,87	5,78	1,60	-0,68	-3,65	1,78	1,69
	-0,40	-2,98	-9,86	-3,22	0,84	2,51	1,81	-5,68	1,38	-1,40	-2,37	2,20	1,26
	-0,10	-3,55	-7,80	-3,92	0,14	1,54	2,45	4,84	1,42	0,23	-2,74	1,17	0,63
	0,99	-2,58	-7,52	-3,16	-0,49	1,66	1,96	5,02	0,17	-0,40	-3,37	1,78	2,05
	0,29	-2,65	-7,34	-2,83	-0,13	0,99	1,35	4,54	1,81	0,63	-2,68	2,14	0,57
	0,84	-2,52	-7,68	-1,77	0,11	0,69	1,54	4,11	2,96	0,96	-3,74	1,11	0,63
	1,20	-2,65	-6,28	-4,07	-0,55	1,48	2,29	5,11	2,11	0,66	-4,22	2,57	1,35
	0,66	-1,49	-6,74	-2,22	-0,22	1,51	-5,80	5,51	1,69	-0,46	-2,46	3,05	2,57
	0,20	-2,25	-6,65	-1,83	-1,22	3,08	1,96	6,08	0,93	-1,74	-4,16		

Daten zum intermanuellen Transfer (Projektion)

keine Verschiebung

Trefferfolge/Versuchsperson	VP A	VP B	VP C	VP D	VP E	VP F	VP G	VP H	VP I	VP J	VP K
Folgeeffekt rechte Hand	3,06	2,82	1,76	3,73	3,36	0,55	2,61	1,67	0,82	0,79	0,82
	3,18	3,21	1,97	2,52	3,67	1,00	2,61	1,45	2,21	1,27	0,45
	3,30	2,82	1,94	2,61	3,70	0,76	3,21	2,45	1,15	0,76	0,55
	3,12	2,67	1,70	3,91	2,58	1,15	3,15	1,45	1,52	0,67	-0,24
	2,79	1,94	2,12	2,24	1,88	0,18	3,91	1,45	0,88	1,06	0,73
	2,06	2,88	1,21	3,06	2,39	0,58	2,94	1,88	0,82	0,58	-0,24
	2,64	3,33	1,06	2,27	3,03	1,00	3,61	2,12	0,61	0,91	0,09
	1,21	2,27	0,91	2,09	3,15	0,55	3,21	1,94	1,15	0,97	0,61
	4,64	1,82	1,61	2,52	3,48	1,79	3,76	1,24	0,91	0,67	0,33
	1,67	2,18	1,33	1,21	3,58	0,97	4,52	1,55	1,15	1,30	2,45
	0,03	1,12	-0,21	1,88	3,82	1,06	4,03	1,15	1,12	1,48	1,70
	2,15	0,27	3,58	2,91	4,03	0,36	3,18	0,94	0,67	1,70	0,73
	3,03	1,24	3,36	2,52	3,82	1,15	3,52	1,39	1,27	1,27	0,55
	3,45	0,42	1,91	2,36	3,73	1,42	2,76	1,70	1,58	0,88	1,33
	4,09	0,58	2,30	3,48	3,82	1,18	4,58	1,15	2,03	1,21	0,42
	2,52	0,15	1,79	2,55	2,45	1,36	3,48	1,15	1,06	1,27	0,58
	3,55	-0,24	2,30	2,61	4,73	1,61	4,33	1,88	1,52	0,91	0,33
	4,33	1,15	2,45	2,97	4,15	1,18	3,24	0,64	0,52	1,30	0,24
	4,55	1,61	1,94	1,67	3,52	1,48	3,82	0,64	1,30	1,03	0,09
	3,06	0,39	3,27	1,85	3,45	1,58	3,27	1,06	1,09	1,15	-0,12
	3,45	-0,36	3,52	2,76	2,97	1,39	4,12	1,36	0,48	-0,67	0,12

keine Verschiebung

Trefferfolge/Versuchsperson	VP A	VP B	VP C	VP D	VP E	VP F	VP G	VP H	VP I	VP J	VP K
Folgeeffekt linke Hand	-5,12	-0,30	-1,18	-0,94	-4,33	-3,36	-1,55	-0,70	-1,45	1,15	-1,85
	-3,67	-0,85	-1,70	-0,52	-3,27	-3,45	-1,58	-0,70	-3,48	-0,67	-1,79
	-4,27	0,79	-0,76	-0,79	-4,91	-3,45	-0,30	0,52	-1,48	-1,18	-1,42
	-4,55	0,18	-2,18	-4,24	-5,70	-2,97	-1,76	0,91	-1,94	-0,76	-0,85
	-3,73	-1,03	-2,94	-0,42	-5,64	-3,24	-1,58	-1,18	-4,45	-0,61	-0,94
	-4,06	-1,67	-2,55	-0,94	-4,94	-3,48	-1,27	-0,42	-4,00	-1,18	-1,06
	-1,94	-1,24	-2,52	-1,36	-7,00	-2,82	-1,27	-0,18	-2,55	-1,12	0,24
	-3,24	-0,39	-3,36	-1,33	-6,55	-1,67	-1,39	-0,21	-0,82	0,21	-0,21
	-3,30	-0,39	-2,82	-1,15	-7,85	-3,18	-2,48	-0,45	-2,52	-0,12	-0,55
	-2,42	0,73	-3,09	-1,06	-6,27	-2,03	-2,45	-0,06	-1,97	0,61	-0,03
	-2,27	1,48	-3,09	-1,27	-6,64	-1,91	-1,97	-0,09	-2,21	0,39	0,27
	-2,09	0,76	-3,24	-1,33	-6,24	-2,00	-2,70	0,12	-1,24	0,15	0,42
	-2,30	0,09	-3,48	-1,91	-6,48	-3,09	-2,06	0,64	-2,48	-1,30	0,21
	-3,00	1,58	-3,55	-1,30	-6,15	-1,82	-1,42	-1,18	-1,21	0,24	0,79
	-2,91	0,42	-3,55	-0,70	-6,39	-2,36	-3,03	-0,06	-0,39	0,03	0,06
	-1,91	1,61	-3,33	-0,58	-6,82	-3,06	-1,21	0,30	-0,73	-0,09	0,64
	-3,27	0,18	-2,55	-1,12	-8,09	-2,91	-1,70	-0,03	-0,67	0,39	0,94
	-2,06	-0,30	-1,24	-0,45	-7,21	-3,33	-2,09	0,73	-0,58	0,39	0,45
	-2,36	-0,30	-1,79	-0,36	-7,85	-1,94	-1,94	-0,70	-0,82	0,67	0,61
	-3,67	-0,33	-2,15	-0,73	-7,55	-2,30	-1,33	0,45	-1,45	-0,03	0,15
	-3,24	-1,33	-2,67	-0,82	-6,48	-2,24	-1,21	0,45	0,48	-0,64	-1,15

Verschiebung links
Adaptation rechts
Folgeeffekt rechts

	VP F	VP H	VP I	VPG	VP J	VP K	VP A	VP B	VP C	VP D	VP E
	0,45	-2,37	-4,95	-0,83	-1,28	-2,58	0,60	3,02	0,51	-0,31	2,90
	-1,13	-1,80	-5,19	-0,58	0,26	-0,49	2,02	2,78	1,51	-0,43	2,48
	-2,04	-3,55	-4,43	-0,43	-0,13	-1,71	1,02	2,99	1,35	-0,28	1,17
	-1,80	-0,80	-4,13	-0,65	0,42	-2,62	1,26	-3,98	0,32	-0,28	1,72
	-2,13	-3,01	-4,01	-0,52	0,35	-4,04	1,66	2,42	0,48	-0,10	1,20
	-1,58	-2,49	-3,22	-0,49	1,17	-3,10	2,51	0,99	2,54	-0,55	2,23
	-1,49	-2,25	-3,49	1,08	0,93	-1,37	1,84	2,69	1,75	0,57	1,29
	-1,31	-0,68	-3,16	1,66	1,54	-0,58	1,75	2,66	1,75	0,26	1,26
	-0,95	0,35	-3,01	0,14	0,75	-0,83	1,63	2,35	0,60	0,17	1,26
	-0,71	2,23	-2,46	0,35	1,87	1,29	2,14	-5,55	1,26	1,78	1,75
	-0,34	1,11	-1,55	-0,10	0,48	0,72	0,66	-5,62	0,17	0,38	1,54
	-0,28	2,57	-2,16	0,45	0,66	-0,37	0,78	-5,74	1,26	0,63	1,63
	0,17	-4,16	-2,10	1,78	0,48	-0,43	2,11	-5,52	0,51	0,96	2,11
	0,54	-4,52	-1,74	2,81	0,63	-0,31	2,72	-5,68	2,11	1,05	2,69
	-0,04	-1,68	-1,19	2,26	1,11	-2,31	-5,65	-5,77	2,96	1,23	1,42
	0,35	-4,34	-0,98	2,20	0,87	-3,49	2,60	2,75	2,69	0,69	2,02
	0,17	-4,07	-1,68	2,20	0,96	0,87	2,20	2,35	-4,37	0,32	1,84
	0,81	-5,34	-0,83	-5,37	1,11	0,20	-5,49	1,84	1,20	0,72	1,99
	-0,25	-3,28	-0,95	-5,49	1,11	-0,28	-5,74	3,02	2,08	1,42	2,90
	0,35	-3,65	-0,25	2,23	1,29	1,38	-5,37	-5,19	1,54	0,29	2,08
	0,60	-3,31	0,17	1,72	2,51	-1,71	2,60	-5,16	2,45	-0,65	1,51

Verschiebung links
Adaptation rechts
Folgeeffekt links

	VP F	VP H	VP I	VPG	VP J	VP K	VP A	VP B	VP C	VP D	VP E
	-2,5	-2,4	1,0	-1,5	0,9	0,2	-2,3	-3,7	-0,2	-3,7	-5,1
	-2,8	-1,8	0,0	-1,2	0,6	-2,1	-1,7	-2,5	2,4	-2,5	-4,7
	-3,1	-3,6	0,5	-0,7	-0,3	0,6	-2,0	-2,6	-1,3	-2,6	-5,0
	-2,9	-0,8	1,3	-2,1	-0,1	0,1	-1,6	-1,2	-1,2	-2,6	-4,6
	-2,6	-3,0	1,3	-1,9	1,1	0,5	-2,3	-2,1	-0,7	-2,2	-4,3
	-2,0	-2,5	0,5	-2,5	-1,9	0,3	-3,5	-2,3	-2,8	-2,1	-4,3
	-3,0	-2,3	1,8	-2,7	-2,4	0,3	-1,7	-1,9	-1,6	-1,8	-4,0
	-2,8	-0,7	1,7	-0,6	-0,3	3,1	-2,3	-1,2	-1,4	-1,9	-3,9
	-3,6	0,4	1,6	-1,2	-0,8	-0,5	-2,3	-0,5	-0,6	-2,0	-3,8
	-2,8	2,2	-0,2	-1,2	-2,5	-0,6	-0,9	-2,2	0,3	-1,1	-2,9
	-2,5	1,1	-1,1	-1,2	-0,1	1,5	-1,7	-1,7	0,9	-1,1	-3,7
	-2,7	2,6	2,5	-0,8	-1,8	-0,9	-1,1	-0,7	-1,2	-1,4	-3,2
	-1,7	-4,2	0,5	-2,2	-0,5	-0,9	-1,7	-1,7	-1,9	-1,4	-3,7
	-2,3	-4,5	-0,9	-1,3	-0,2	-0,8	-2,5	-1,6	-0,9	-2,6	-4,9
	-2,4	-1,7	-1,0	-1,2	-1,5	-0,8	-2,2	-0,8	-2,4	-2,5	-4,1
	-2,9	-4,3	-1,4	-2,3	-3,7	0,2	-2,7	-0,1	-1,7	-2,6	-3,7
	-2,8	-4,1	0,1	-2,6	-3,3	0,4	-0,4	-0,9	-1,6	-2,9	-4,8
	-2,3	-5,3	0,2	-3,2	-2,2	0,3	-1,4	-0,9	-2,6	-2,8	-4,2
	-2,8	-3,3	-0,6	-3,7	0,0	0,5	-1,6	-2,3	-2,0	-1,7	-4,4
	-2,9	-3,7	-0,5	-3,7	-2,4	0,6	-2,1	0,8	-2,3	-1,8	-4,3
	-2,9	-3,3		-9,1	-1,1	-0,7	-2,5	0,7	-1,7	-2,3	-4,1

Verschiebung links
Adaptation links
Folgeeffekt rechts

VP F	VP H	VP I	VPG	VP J	VP K	VP A	VP B	VP C	VP D	VP E
0,35	-4,62	-1,52	2,69	-1,46	-0,77	-1,89	-4,19	1,23	2,20	2,57
0,87	-4,07	-0,55	-5,58	-0,34	-0,62	-1,37	-4,25	0,51	1,38	3,11
1,23	-1,89	-0,58	-4,52	0,11	1,11	-1,62	-4,68	0,60	0,90	2,05
0,38	-2,40	0,05	-4,92	2,11	0,78	-0,80	-5,77	1,45	1,35	2,14
0,99	-3,31	0,45	-5,77	0,08	-1,34	-0,31	2,69	1,17	1,54	1,66
1,38	-3,31	0,08	2,99	0,29	0,17	-0,43	-5,83	0,45	1,81	1,72
1,84	-3,46	0,96	2,48	0,48	-0,19	-0,68	2,23	1,93	1,17	1,48
1,93	-2,52	2,17	2,45	1,54	0,90	-1,86	1,23	1,90	2,05	1,17
1,63	-3,37	2,05	1,87	2,32	1,48	-0,43	-5,28	1,23	2,54	1,26
0,72	-2,92	2,63	1,99	3,02	1,48	-0,46	-5,01	1,66	1,54	1,48
1,72	-3,49	1,11	-5,04	1,66	-4,52	-1,31	-5,19	1,20	1,42	1,35
1,78	-3,16	0,75	-5,31	2,45	-4,98	-1,25	-5,28	1,23	1,99	1,57
1,90	-5,10	1,87	-5,22	1,14	-4,74	-0,86	-4,98	1,63	1,87	2,54
1,17	-2,01	1,96	3,11	1,48	-4,74	-1,55	2,29	2,17	0,96	2,05
1,17	-2,71	1,66	-5,22	2,48	-5,68	-1,77	1,38	0,90	0,75	1,96
1,23	-3,80	1,38	3,14	2,45	-5,74	-2,65	1,57	0,99	1,14	2,08
1,45	-4,92	0,48	-5,22	1,54	1,93	-2,52	1,17	0,69	2,54	1,90
0,66	-3,65	1,14	-3,98	1,08	-5,80	-1,86	1,26	3,02	1,84	2,45
0,96	-4,58	1,17	-5,19	0,63	1,29	-1,62	2,38	2,81	1,69	2,93
0,96	-3,80	2,20	-4,07	1,66	-5,68	-1,52	2,57	-5,55	2,29	2,57
1,23	-4,25	1,75	-3,01	3,05	-5,55	-1,31	2,60	1,90	1,57	2,11

Verschiebung links
Adaptation links
Folgeeffekt links

VP F	VP H	VP I	VPG	VP J	VP K	VP A	VP B	VP C	VP D	VP E
-1,55	-7,65	-3,52	-5,58	-1,31	-8,80	-6,10	-4,25	-1,04	-1,71	-6,71
-1,28	-8,74	-4,68	-5,34	-1,13	-8,01	-5,37	-3,68	-3,55	-1,68	-7,58
-1,04	-10,49	-2,37	-5,16	-0,40	-7,22	-4,19	-2,19	-1,52	-1,34	-6,62
-2,25	-9,22	-2,46	-5,01	-1,31	-7,16	-4,62	-1,07	-3,62	-2,13	-7,13
-1,37	-7,80	-2,80	-5,68	-0,52	-5,43	-4,49	-1,49	-2,49	-2,07	-6,71
-1,58	-7,40	-1,52	-5,77	-3,58	-3,92	-2,95	-2,83	-3,43	-1,19	-4,89
-1,86	-7,40	-2,31	-4,89	-3,40	-1,46	-3,04	-2,74	-2,95	-1,31	-6,13
-1,43	-6,71	-2,65	-5,22	-3,25	-3,40	-3,52	-2,68	-4,37	-2,34	-6,83
-2,25	-8,40	-2,58	-5,07	-1,19	-3,62	-4,68	-3,68	-3,98	-1,55	-7,86
-1,04	-7,04	-2,49	-3,80	-4,80	-6,43	-4,13	-2,89	-3,31	-2,49	-7,01
-1,92	-5,55	-3,28	-5,19	-2,04	-5,10	-2,95	-0,68	-4,49	-1,71	-5,68
-1,37	-4,25	-3,52	-4,43	-2,19	-4,16	-3,62	-1,04	-2,68	-2,04	-6,37
-2,22	-5,40	-3,71	-5,28	-2,25	-3,43	-4,71	-0,37	-3,86	-1,77	-6,37
-1,71	-5,40	-3,52	-5,40	-2,98	-2,98	-2,95	-1,89	-4,58	-2,25	-5,37
-2,34	-5,74	-4,52	-5,25	-1,65	-3,01	-2,01	-0,19	-3,80	-2,04	-5,22
-2,01	-6,77	-3,46	-5,62	-2,19	-2,92	-3,37	-0,28	-5,71	-2,07	-6,83
-1,98	-6,86	-4,43	-5,04	-2,62	-2,22	-2,28	0,87	-5,43	-2,71	-7,52
-1,80	-6,16	-4,43	-5,65	-1,77	-3,62	-3,49	1,57	-4,37	-1,71	-6,62
-0,92	-4,28	-3,43	-4,40	-1,80	-1,95	-4,07	0,23	-3,62	-2,40	-5,65
-2,83	-4,40	-4,16	-4,83	-2,49	-1,71	-3,58	0,69	-2,62	-2,22	-5,65
-2,49	-6,01		-5,74	-0,68	-5,89	-3,55	0,23	-4,31	-2,37	-6,83

Verschiebung rechts
Adaptation rechts
Folgeeffekt rechts

VP F	VP H	VP I	VP J	VP K	VP A	VP B	VP C	VP D	VP E	VP G
3,07	0,68	3,07	0,34	3,22	7,34	2,01	3,71	1,31	3,16	4,31
2,46	0,98	4,25	1,31	4,13	8,25	2,01	3,65	1,46	3,01	3,19
2,58	0,71	4,13	0,95	2,80	7,98	2,01	3,34	1,58	3,25	4,16
2,55	1,34	4,28	1,46	2,37	8,07	2,04	2,95	2,13	3,28	4,46
2,68	0,55	4,07	3,22	2,19	8,37	1,07	2,28	1,19	3,37	4,34
2,95	-0,75	4,19	2,62	3,22	8,10	1,46	2,68	1,71	4,07	4,52
2,65	0,49	4,71	1,31	1,52	7,49	1,49	2,40	2,62	5,49	5,16
2,80	-0,81	4,37	2,58	2,01	7,86	1,37	2,25	2,19	4,62	5,37
2,58	-1,90	5,16	3,13	3,46	8,31	2,43	3,16	0,37	4,74	5,49
1,77	-0,60	5,04	2,52	3,43	8,71	2,49	3,07	0,01	5,19	5,16
1,55	1,07	6,77	2,86	4,22	8,37	2,10	2,68	0,37	6,31	5,16
2,13	1,16	5,37	3,83	3,04	7,74	1,98	2,71	0,01	6,25	4,74
0,62	-0,69	5,40	3,25	3,43	7,83	1,49	4,01	1,34	6,49	5,10
1,89	-0,05	6,40	2,43	3,40	8,25	3,07	2,74	1,98	5,77	4,98
2,74	-0,38	6,10	2,31	2,77	7,01	1,55	2,77	2,31	4,34	5,25
2,01	0,65	4,98	2,19	1,71	7,43	1,13	4,10	1,49	4,25	5,43
2,58	0,43	4,10	3,34	3,92	8,13	1,52	2,89	2,34	4,19	5,25
2,62	0,71	4,28	3,62	2,31	8,34	0,55	3,16	1,22	4,07	5,04
2,40	0,10	4,22	3,95	3,49	8,65	2,86	3,40	2,19	3,46	5,37
2,25	0,92	4,22	6,19	2,28	8,95	1,49	3,52	1,74	2,10	4,25
2,37	0,10	4,10	2,58	2,95	9,07	0,95	4,52	1,80	2,83	4,77

Verschiebung rechts	VP F	VP H	VP I	VP J	VP K	VP A	VP B	VP C	VP D	VP E	VP G
Adaptation rechts	-0,93	4,55	-0,72	-2,78	-1,05	-3,23	2,62	-1,57	-1,81	3,19	0,58
Folgeeffekt links	-1,17	3,83	-0,81	4,95	-0,54	-3,20	1,74	-2,48	-2,14	3,83	-0,29
	0,01	4,92	-0,75	4,80	-0,35	5,19	4,68	-2,51	-1,96	2,89	0,19
	-0,20	5,40	-1,17	4,49	0,55	-2,78	1,43	-2,84	-2,84	3,49	0,31
	0,37	5,16	-1,54	-3,54	0,58	-3,14	2,01	-2,93	-3,38	2,28	0,71
	-0,23	4,83	-0,84	-3,02	0,28	-2,02	1,74	4,77	-3,51	3,31	-0,26
	-0,26	5,04	-0,78	-3,20	-1,48	5,43	3,31	5,07	-2,35	3,40	0,43
	0,22	4,68	-0,63	-2,35	-1,05	5,16	2,58	4,49	-3,05	3,16	-0,14
	-0,20	-2,51	-0,87	-2,51	-0,87	5,22	3,92	4,58	-2,60	4,22	-0,32
	-0,63	-2,93	-1,23	-2,90	-0,72	-2,69	3,25	-3,29	-3,45	3,98	0,40
	-0,35	-2,35	-0,05	-2,11	-0,75	5,16	4,16	-3,35	3,83	3,28	0,62
	0,07	-0,78	-0,78	4,86	-1,54	4,92	4,16	-1,66	-2,45	5,04	0,65
	0,80	-1,45	-0,84	5,07	-1,75	5,10	3,89	-2,14	-2,99	3,83	-0,11
	-0,17	-2,99	-0,99	5,04	-2,84	4,49	4,95	-3,29	-1,87	4,68	-0,90
	0,07	-0,32	-2,05	-3,08	-2,38	5,37	5,16	5,31	-2,08	3,58	-1,84
	-0,57	-0,42	-0,35	-2,90	-2,96	4,68	3,86	3,89	-2,81	4,58	-0,23
	0,86	0,95	-1,17	3,77	-0,75	5,37	4,28	4,40	-2,51	4,65	0,55
	0,25	-0,26	-1,23	4,46	-1,02	5,16	4,77	4,77	-2,81	3,40	0,77
	0,77	-2,48	-1,17	3,49	-0,81	4,58	4,07	4,89	-3,08	3,22	0,98
	-0,38	-0,02	-1,11	-3,29	0,07	5,31	5,65	5,16	-2,63	4,31	1,16
	-0,72	1,40	-1,26	4,01	-1,69	4,86	4,16	4,49	-3,23	3,92	1,10

Verschiebung rechts	VP F	VP H	VP I	VP J	VP K	VP A	VP B	VP C	VP D	VP E	VP G
Adaptation links											
Folgeeffekt rechts	2,10	-0,72	0,98	0,13	3,10	5,92	4,13	2,28	1,74	2,71	3,92
	1,22	-0,69	2,19	0,43	1,58	7,16	5,43	2,01	2,34	4,16	4,25
	1,10	-0,20	1,62	0,04	2,22	6,07	4,10	3,16	1,25	3,28	4,37
	1,46	-0,32	2,58	0,25	3,19	5,86	3,68	3,46	1,25	3,28	4,68
	1,43	-0,20	2,07	1,40	2,37	6,58	3,10	2,49	2,13	3,89	3,92
	1,37	0,77	2,28	1,83	2,16	7,28	2,65	2,43	2,31	3,40	2,92
	0,80	1,07	2,46	0,95	3,07	7,52	3,19	2,19	1,28	5,43	1,77
	0,65	1,10	2,34	1,46	1,71	6,74	2,04	2,40	1,86	4,58	3,31
	1,98	1,07	3,25	0,19	1,77	7,01	2,68	2,28	1,92	4,92	3,40
	1,49	-1,29	2,52	0,74	0,80	7,71	3,25	2,46	2,34	4,89	3,80
	2,01	-0,11	3,49	1,25	3,74	6,62	2,92	2,07	1,04	4,92	3,40
	1,28	1,31	4,16	1,16	4,19	7,10	1,80	1,65	1,86	6,22	4,04
	1,68	2,28	3,40	1,49	2,58	8,37	1,13	1,86	1,71	5,74	4,19
	1,77	20,80	3,58	1,86	2,07	7,71	1,28	2,71	1,80	5,80	4,01
	1,89	0,92	3,31	1,71	1,28	7,80	0,55	1,43	3,13	5,62	3,46
	2,55	0,13	3,34	1,92	3,28	7,77	0,86	2,46	2,77	4,28	2,80
	1,74	1,89	3,19	3,07	4,07	9,04	0,80	1,58	2,40	5,49	3,43
	1,55	0,80	3,37	3,07	3,58	8,52	0,95	1,31	3,04	5,46	3,19
	2,52	-0,78	2,68	3,28	2,74	7,71	1,34	0,58	3,07	4,74	4,58
	1,86	0,49	2,74	3,86	3,34	9,95	1,86	1,25	2,34	4,37	3,13
	2,46	0,77	2,65	3,65	3,77	8,52	0,83	1,16	2,74	4,25	3,13

Verschiebung rechts
Adaptation links
Folgeeffekt links

	VP F	VP H	VP I	VP J	VP K	VP A	VP B	VP C	VP D	VP E	VP G
	1,10	-1,38	5,25	-2,42	-3,38	-2,75	-1,54	-2,60	-1,57	1,01	1,43
	0,92	0,34	5,22	-3,32	-1,90	-3,42	0,43	-1,23	-1,78	-0,11	2,68
	1,55	0,31	5,10	-2,72	-1,84	4,92	-1,38	2,46	-2,87	-1,42	2,65
	0,34	-0,32	4,92	-1,08	-1,32	5,43	-1,38	-0,96	-1,96	-2,08	1,04
	-0,02	-0,63	3,98	-3,29	-2,78	5,28	1,86	-1,20	-2,38	-1,81	1,28
	0,52	-1,26	6,04	-3,26	-1,20	3,46	0,13	-1,75	-2,42	-2,93	0,07
	1,40	-0,99	4,16	-3,17	-1,45	-1,75	0,19	-0,63	-1,02	-2,42	1,49
	0,77	0,80	4,07	-0,32	-1,81	-2,08	0,22	0,19	-0,87	5,16	2,19
	1,62	-0,69	3,92	-2,72	-1,81	-2,17	0,49	-0,08	-1,20	5,16	0,98
	2,04	-0,57	4,19	-2,02	-1,42	-1,84	-1,20	-0,60	-0,87	5,16	2,19
	1,43	-1,54	3,43	-1,87	-1,72	-3,35	0,01	-0,69	-1,29	-3,35	1,49
	0,68	0,62	4,55	5,04	-1,32	-2,45	2,13	-1,57	-0,48	-3,11	1,89
	0,31	0,37	5,40	-3,05	-0,78	-1,78	1,16	0,01	-1,48	5,10	0,98
	0,65	1,62	4,92	5,43	-2,72	-2,42	0,71	-1,32	-1,57	5,19	1,04
	0,13	1,16	4,40	-2,75	-2,14	5,07	2,19	0,68	-0,57	4,98	0,71
	0,95	0,01	2,19	-2,60	-1,54	4,34	2,04	0,28	-1,38	4,28	-0,35
	2,22	-1,20	1,98	-3,54	-0,42	3,65	3,40	-0,78	-1,81	3,77	1,62
	1,13	-0,48	3,16	4,55	-0,57	3,16	1,83	-1,32	-0,96	4,62	2,16
	1,83	-1,96	2,83	4,68	-3,11	5,34	3,55	-1,69	-1,54	2,98	1,31
	0,80	-1,29	3,22	-3,11	-1,63	4,58	2,98	-1,08	-1,60	3,58	0,58
	1,43	-2,14	3,13	4,01	-1,72	4,77	2,04	-2,02	-2,17	3,77	1,37