

Visuelle und kinästhetische Informationen bei der Lösung von motorischen Arbeitsgedächtnisaufgaben

Inauguraldissertation

zur Erlangung des Akademischen Grades
eines Dr. phil.,

vorgelegt dem
Fachbereich 02 – Sozialwissenschaften, Medien und Sport
der Johannes Gutenberg-Universität
Mainz

von

Dipl.-Psych. Diana Henz
aus Wiesbaden

Mainz, 2009

Tag des Prüfungskolloquiums: 14. Juli 2009

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Theoretischer Hintergrund	4
2.1 Ergebnisse aus dem Bereich der Arbeitsgedächtnisforschung zum Bereich Motorik – gibt es ein motorisches Arbeitsgedächtnis?	4
2.2 Kritische Betrachtung der theoretischen Annahmen zu einem motorischen Subsystem im Arbeitsgedächtnis und Bezugnahme zu anderen Forschungsgebieten	6
2.3 Methodische Probleme bisheriger Studien aus dem Bereich der Arbeitsgedächtnisforschung.....	10
2.4 Zielsetzung und Hypothesen	13
2.5 Experimentelles Paradigma	16
3 Die Rolle visueller und kinästhetischer Cues bei der Lösung von motorischen Arbeitsgedächtnisaufgaben	18
3.1 Experiment 1.....	18
3.1.1 Experiment 1: Methode	20
3.1.2 Ergebnisse	31
3.1.3 Diskussion.....	41
3.2 Experiment 2: Strategieeffekte I – Ermittlung der Reaktionszeiten der Trackingaufgaben ohne zusätzliche Gedächtnisaufgabe	46
3.2.1 Methode	46
3.2.2 Ergebnisse und Diskussion.....	49
3.3 Experiment 3: Strategieeffekte II – der Einfluss der zeitlichen Abfolge von visuellen und kinästhetischen Cues	51
3.3.1 Methode	51
3.3.2 Ergebnisse und Diskussion.....	55
4 Der Beitrag von visuellen und kinästhetischen Cues zu einer redundanten Codierung von Bewegungen.....	59

4.1	Experiment 4: Sind kinästhetische Informationen bei der Lösung von motorischen Arbeitsgedächtnisaufgaben erforderlich?	59
4.1.1	Methode	60
4.1.2	Ergebnisse	65
4.1.3	Diskussion.....	77
4.2	Experiment 5: Redundante Codierung von Bewegungen und die Rolle visueller Cues	83
4.2.1	Methode	83
4.2.2	Ergebnisse	88
4.2.3	Diskussion.....	93
4.3	Experiment 6: Die Rolle visueller und kinästhetischer Cues bei der Reproduktion der Bewegungsgeschwindigkeit	96
4.3.1	Methode	97
4.3.2	Ergebnisse	101
4.3.3	Diskussion.....	109
5	Ausblick: Experiment 7 – Konstruktion und Rekonstruktion von Bewegungen.....	113
5.1	Methode.....	114
5.2	Ergebnisse.....	119
5.2.1	Qualitative Analyse	119
5.2.2	Analyse der zeitbezogenen Maße.....	119
5.2.3	Explorative Stopps	121
5.3	Diskussion	125
6	Gesamtdiskussion	128
6.1	Die Spezifitätshypothese	129
6.2	Multimodalität und das Phänomen der Redundanz	131
6.3	Die Rolle der Strategie bei der Lösung motorischer Aufgaben	136
6.4	Speicherung, Strategie oder inneres Modell – Implikationen für die Forschung.....	144
7	Zusammenfassung	155
	Literaturverzeichnis	158
	Anhang	

1 Einleitung

Man stelle sich einen Schlagzeugspieler vor, der einen neuen Bewegungsablauf am Schlagzeug lernen möchte. Dazu wird eine Sequenz vom Lehrer gezeigt, wobei dies visuell und mit verbaler Anweisung geschieht. Diese gezeigte Sequenz wird vom Schüler wiederholt. Bereits nach einer kurzen Übungspause von ca. zehn Sekunden können komplexere Bewegungsmuster nicht mehr aktiv erinnert und ohne erneute Anweisung des Lehrers nicht mehr wiederholt werden. Auch nach dem Unterricht stellt sich dieses Problem, da beim Üben zu Hause der Bewegungsablauf bereits wieder vergessen wurde und mit großem Zeitaufwand die Bewegung aus dem Gedächtnis und unter Zuhilfenahme der Aufzeichnungen rekonstruiert werden muss. Die Rekonstruktionen aus dem Gedächtnis sind zudem meist nicht ganz exakt, wie sich dann oft in der nächsten Unterrichtsstunde herausstellt.

Eine interessante Frage ist, wie die Reproduktion der Bewegungssequenz funktioniert und welche kognitiven Prozesse erforderlich sind, um diese Aufgabe zu lösen. Bei Betrachtung dieses Beispiels, bei dem die Imitation einer vorgeführten Bewegung eine entscheidende Rolle spielt, wobei visuelles Feedback und verbale Anweisungen während der Bewegungsausführung zur Korrektur der Bewegungsabläufe integriert werden, könnte zunächst argumentiert werden, dass beim Erwerb von neuen motorischen Fertigkeiten Prozesse des Arbeitsgedächtnisses eine entscheidende Rolle spielen. Welchen hohen Stellenwert ein intaktes Arbeitsgedächtnis beim Imitieren von Bewegungen hat, zeigt sich in Studien an Apraxiepatienten, die teilweise nicht in der Lage sind, Pantomime zu imitieren, wobei dieses Defizit auf eine Beeinträchtigung des Arbeitsgedächtnisses zurückzugehen scheint (z. B. Bartolo, Cubelli, Della Sala & Drei, 2003; Logie & Della Sala, 2005; Logie, Engelkamp, Dehn & Rudkin, 2001; Toraldo, Reverberi & Rumiati, 2001). Das Arbeitsgedächtnis wird in diesem Fall als eine Art Arbeitsplattform betrachtet, auf der visueller Input mit motorischen und

eventuell auch verbalen Anweisungen verknüpft wird (Della Sala & Logie, 2002; Logie, 1996; Tessari, Bosanac & Rumiati, 2006). Aus anderen wissenschaftlichen Positionen heraus, etwa aus Sicht der Forschung zur motorischen Kontrolle, dürfte anhand dieses Beispiels argumentiert werden, dass nicht primär Gedächtnisprozesse, sondern Prozesse der motorischen Planung, Antizipation und Anpassung innerer Bewegungsmodelle für die beobachteten Phänomene verantwortlich sind (z. B. Bhushan & Shadmehr, 1999; Conditt, Gandolfo & Mussa-Ivaldi, 1997; Flanagan & Wing, 1997; Krakauer, Ghilardi & Ghez, 1999; Miall & Wolpert, 1996; Shadmehr & Mussa-Ivaldi, 1994; Wolpert & Ghahramani, 2000; Wolpert & Kawato, 1998). „The motor system computes well but remembers poorly“ (Rosenbaum & Dawson, 2004) – so nimmt zum Beispiel Mechsner (2004) an, dass Bewegungen nur auf Basis perzeptueller Informationen schnell jeweils neu geplant und generiert werden, da ein zusätzlicher Speicherprozess die Bewegungsausführung erheblich behindern und verlangsamen würde (siehe dazu Rosenbaum & Dawson, 2004). Eine zusätzliche Speicherung wäre gemäß dieser theoretischen Position gar nicht notwendig. Wiederum eine andere theoretische Position wäre die des motorischen Kurzzeitgedächtnisses (*motor short-term memory*), einer wissenschaftlichen Strömung, die sich in den 1960er Jahren in den USA entwickelte. Die *motor short-term memory* Literatur basiert in erster Linie auf dem Gedächtnismodell von Atkinson und Shiffrin (1986) und würde das eben beschriebene Beispiel als ein reines Kapazitätsproblem bei der kurzzeitigen Speicherung interpretieren (für einen Überblick siehe z. B. Adams, 1989).

Drei verschiedene wissenschaftliche Positionen, drei unterschiedliche Erklärungsansätze. Diese Unterschiede mögen zum einen an der theoretischen Orientierung und Tradition der jeweiligen wissenschaftlichen Position liegen, zum anderen an unterschiedlichen konzeptuellen und methodischen Ansätzen, die wiederum zu unterschiedlichen Interpretationen verhelfen. Ziel dieser Arbeit ist es, ausgehend vom Standpunkt der Arbeitsgedächtnisforschung, die bisherigen Forschungsergebnisse zum Thema Motorik unter Annahme eines Arbeitsgedächtnisses bei der kurzzeitigen Speicherung von Bewegungen

darzustellen. Diese sollen im weiteren Verlauf experimentell überprüft und um Ergebnisse aus dem Bereich der motorischen Kontrolle und der Forschung zum motorischen Kurzzeitgedächtnis ergänzt, diskutiert und auf eine Synthese hin überprüft werden.

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 Ergebnisse aus dem Bereich der Arbeitsgedächtnisforschung zum Bereich Motorik – gibt es ein motorisches Arbeitsgedächtnis?

Arbeitsgedächtnismodelle erfreuen sich auch außerhalb der Psychologie, vor allem in den Kognitions- und Neurowissenschaften, zunehmender Beliebtheit. In den letzten Jahren hat deshalb die Anzahl der empirischen Arbeiten zum Thema Arbeitsgedächtnis beträchtlich zugenommen. Als kleinsten gemeinsamen Nenner all dieser Ansätze kann man die Funktion des Arbeitsgedächtnisses nehmen, Information für andere kognitive Prozesse über einen bestimmten Zeitraum hinweg verfügbar zu halten (siehe z. B. Cowan, 1998). Dabei liegt die Betonung in Erweiterung zum Konzept des Kurzzeitgedächtnisses auf dem Aspekt des Bereithaltens der Information für andere Prozesse. Während vor allem verbales und visuelles Material untersucht wird, spielt die Verarbeitung motorischer Information im Kontext der Arbeitsgedächtnisforschung keine Rolle. Ein möglicher Grund ist, dass sich mit dem Arbeitsgedächtnismodell von Baddeley und Hitch (1974) eine Modellvorstellung etabliert hat, die vor allem auf visuelle und sprachliche Information fokussiert ist und dadurch die Untersuchung anderer Modalitäten wie z. B. kinästhetische und motorische Informationen weitgehend in den Hintergrund gedrängt hat. So wurde zunächst argumentiert, dass Bewegungen innerhalb des visuell-räumlichen Speichers verarbeitet werden, da Aufgaben, die Bewegungen erfordern, mit räumlich visueller Vorstellung interferieren. Hitch (1984) argumentiert, dass ein möglicher Grund für die Trennung von visueller und räumlicher Verarbeitung darin liegen könnte, dass Aufgaben, die visuell-räumliche Verarbeitung erfordern, meist Bewegungen beinhalten, z. B. Tracking (Baddeley & Liebermann, 1980) und Zeigen auf räumlich angeordnete Ziele wie etwa die Matrixaufgabe von Brooks (1967). Quinn und Ralston (1986) etwa konnten zeigen, dass räumlich gerichtete

Bewegungen, die während der Matrixaufgabe von Brooks (1967) ausgeführt wurden und inkompatibel mit der mental abzufahrenden Route waren, die Ausführung dieser Aufgabe in erheblichem Maß störten. Die Autoren werteten diesen Befund als Hinweis, dass Bewegungen eine Rolle bei der Codierung von räumlicher Information spielen. Ebenso fanden Farmer, Berman und Fletcher (1986), dass sequentielles Tapping mit räumlicher Vorstellung interferiert. Dieser Effekt konnte auch in anderen Studien demonstriert werden (Logie & Marchetti, 1991; Pearson, Logie & Gilhooly, 1999; Smyth, Pearson & Pendleton, 1988; Smyth & Pendleton, 1989). Baddeley (1986) vermutet, dass am Rehearsalprozess von räumlich-visueller Information implizite motorische Prozesse beteiligt sind. Die Hypothese, dass motorische Prozesse an der räumlichen Codierung beteiligt sind, wurde allerdings nur in wenigen Studien explizit getestet.

Die bisherigen Studien zum Thema Motorik mit Orientierung am Arbeitsgedächtnismodell von Baddeley und Hitch (1974) versuchen, die Existenz eines separaten motorischen Speichers, der eigens für Bewegungen zuständig ist, zu belegen. So haben Smyth und Pendleton (1989, 1990; Smyth, Pearson & Pendleton, 1988; siehe auch Willingham, 1998) die Frage nach einem originär motorischen Speicher im Arbeitsgedächtnis untersucht. In einer Reihe von Experimenten kommen diese Autoren zu dem Schluss, dass es tatsächlich ein motorisches Hilfssystem im Arbeitsgedächtnis gibt, das unabhängig vom visuell-räumlichen und vom phonologischen Subsystem ist und eine wichtige Aufgabe bei der Kontrolle einer Bewegungsausführung, etwa bei der Imitation von Bewegungen, inne hat. Ausgehend von diesem erweiterten Arbeitsgedächtnismodell mit seinen drei Subsystemen (verbal, visuell, motorisch) konnten diese Ergebnisse auch in neueren Studien repliziert werden (Rumiati & Tessari, 2002; Tessari & Rumiati, 2002). Aufgrund der Ergebnisse differenzieren die genannten Autoren Bewegungen in Bewegungskonfigurationen (z. B. Handgesten, pantomimisch darstellbare Handlungen) und räumliche gerichtete Bewegungen (z. B. die Corsi Block Aufgabe). Das motorische Subsystem ist in dieser Modellvorstellung für Bewegungsmuster zuständig, die vor allem die Stellung der Gelenke

zueinander beinhalten, der visuell-räumliche Speicher dagegen für die räumlich gerichteten Bewegungen, da für diese Art der Bewegung vor allem visuell-räumliche Verarbeitung erforderlich ist. In einer weiteren von Baddeley (1998) zurecht als fragwürdig hinsichtlich der experimentellen Umsetzung und Argumentation bezeichneten Studie aus dem Bereich der angewandten Psychologie, zeigten Woodin und Heil (1996) anhand von Ruderbewegungen, die während der Darbietung der Handlungsspanne bzw. der Matrixaufgabe ausgeführt wurden, eine Dissoziation von räumlich gerichteten Bewegungen und Bewegungskonfigurationen. Räumlich gerichtete Anteile der Ruderbewegung wurden dabei durch die visuell-räumliche Matrixaufgabe gestört, nicht aber durch die Handlungsspanne, während Bewegungskonfigurationen durch die Handlungsspanne, nicht aber durch räumlich gerichtete Bewegungen beeinträchtigt wurden.

Indirekte Hinweise auf ein separates Hilfssystem für Bewegungen ergeben sich auch aus Studien, in denen gezeigt werden konnte, dass die postulierten Subsysteme des Arbeitsgedächtnisses (verbal, visuell und motorisch) von Alterseffekten in unterschiedlichem Ausmaß betroffen sind (Dimeck, Roy & Hall, 1996, 1998; Dolman, Roy, Dimeck & Hall, 2000).

2.2 Kritische Betrachtung der theoretischen Annahmen zu einem motorischen Subsystem im Arbeitsgedächtnis und Bezugnahme zu anderen Forschungsgebieten

Anhand der dargestellten Ergebnisse aus dem Bereich der Arbeitsgedächtnisforschung zum Bereich der Motorik lassen sich sowohl theoretisch-konzeptuelle als auch methodische Kritikpunkte an den Studien von Smyth und Pendleton (1989, 1990; Smyth, Pearson & Pendleton, 1988) sowie weiterer Autoren (Dimeck, Roy & Hall, 1996, 1998; Dolman, Roy, Dimeck & Hall, 2000; Rumiati & Tessari, 2002; Tessari & Rumiati, 2002; Woodin & Heil, 1996) aufzeigen, welche nun dargestellt werden. Folgende Aspekte sind kritisch:

(1.) Zunächst wäre einfach und naivpsychologisch zu argumentieren, dass Bewegungen, die wir im Alltag ausführen, in den meisten Fällen neben einer motorischen Komponente einen großen visuellen Anteil

haben. Dieser hat eine entscheidende Funktion bei der Bewegungskontrolle, da Bewegungen meist unter visueller Kontrolle ausgeführt werden.

(2.) Aus Sicht der Forschung zur motorischen Kontrolle bringt die Einteilung in Bewegungskonfigurationen und räumlich gerichtete Bewegungen das Problem der Definition des Oberbegriffs der Motorik mit sich. Motorische Information setzt sich aus kinästhetischen, propriozeptiven, taktilen und weiteren anderen Komponenten zusammen. Sowohl bei räumlich gerichteten Bewegungen als auch bei Bewegungsmustern sind kinästhetische und propriozeptive Hinweisreize, die bei einer Bewegungsausführung entstehen, vorhanden und bei der Bewegungssteuerung involviert. Bei räumlich gerichteten Bewegungen entstehen einerseits durch die Bewegungsausführung kinästhetische Informationen, andererseits sind propriozeptive Informationen über die Ausgangsposition der Hand maßgeblich bei der erfolgreichen Steuerung der Bewegung (Ghez et al., 1995, Nougier et al., 1996). Man könnte umgekehrt in Bezug die Verarbeitung von Bewegungsmustern innerhalb des motorischen Speichers argumentieren, dass bei der Ausführung von Bewegungsmustern und -konfigurationen die visuelle Steuerung, d. h. das visuelle Feedback, für eine sichere Bewegungsausführung wichtig ist, ebenso wie bei räumlich gerichteten Bewegungen (z. B. Saunders & Knill, 2003, 2005). Auch aus neurophysiologischer Sicht ist eine funktionale Trennung von visuellen und motorischen Informationen bei der Bewegungskontrolle nicht haltbar. Es ist bekannt, dass der dorsale „*action*“ Strang, der von frühen visuellen Arealen zum inferotemporalen Cortex projiziert, bei visuell geführten Bewegungen beteiligt ist (Schneider, 1969; Ungerleider & Mishkin, 1982). Sowohl Verhaltensexperimente (Easton et al., 1997; Reales et al., 1999) als auch bildgebende Studien (Amedi et al., 2001; Fiehler et al., 2008) zeigen, dass das visuelle und haptische System dasselbe physiologische Substrat zur Bewegungskontrolle nutzt. In dieser Weise wird beispielsweise der visuelle dorsale Strang bei haptischer Exploration aktiviert, auch wenn kein visuelles Feedback vorhanden ist. Die oben beschriebene Einteilung in räumlich gerichtete Bewegungen und Bewegungsmuster, die

unterschiedlicher Verarbeitung der Speicher des Arbeitsgedächtnismodells von Baddeley und Hitch (1974) zugrunde liegen, ist also zum einen wegen der zu vereinfachenden Definition des Konzepts der Motorik, zum anderen aufgrund der Unvereinbarkeit mit neurophysiologischen Erkenntnissen nicht haltbar.

(3.) Zum anderen berücksichtigt die Zuschreibung von visueller bzw. motorischer Verarbeitung zu den Bewegungsklassen von Bewegungskonfigurationen bzw. räumlich gerichteten Bewegungen nicht neuere Forschungsergebnisse, die eine Interaktion motorischer Information mit anderen Gedächtnisinhalten belegen (siehe etwa den Vorteil beim Speichern von Objekten, wenn diese in eine Handlung eingebettet werden bei Engelkamp & Zimmer, 1984, 1989, 1994; Engelkamp, Zimmer, Mohr & Sellen, 1994; in neuerer Zeit u. a. auch Kerzel, 2001, zu Interferenzeffekten zwischen motorischer und visueller Information). Diese Ergebnisse aus dem Bereich der Gedächtnisforschung zeigen deutlich, dass Gedächtnisinhalte Hinweisreize aus unterschiedlichen Modalitäten heranziehen können. Man kann argumentieren, dass die redundante Speicherung, d. h. auch wenn eine Modalität nicht zwingend zur Lösung einer Aufgabe erforderlich ist, zu einer robusteren Gedächtnisspur führt.

(4.) Ferner sprechen Ergebnisse aus dem Bereich der motorischen Kontrolle, die das Phänomen der Redundanz von visuellen und motorischen Hinweisreizen untersuchen, gegen eine strikte Einteilung in „visuelle“ und „motorische“ Verarbeitung von Bewegungen. Beliebtes experimentelles Paradigma in diesem Zusammenhang ist die Untersuchung der relativen Anteile von visuellen, kinästhetischen und propriozeptiven Information bei ein-, zwei- oder dreidimensionalen, räumlich gerichteten Bewegungen. Stehen visuelle und propriozeptive Hinweisreize bei der Aufgabenlösung zur Verfügung, so werden diese herangezogen, auch wenn sie nicht notwendig bei der Aufgabenlösung sind. Diese Redundanz konnte sowohl auf behavioraler (Rosenbaum & Chaiken, 2001; Rosenbaum, Meulenbroeck & Vaughan, 1999) als auch neuropsychologischer Seite gezeigt werden (Desmurget et al., 1995; Rossetti et al., 1995; van Beers et al., 1996). Diese Ergebnisse der

motorischen Kontrolle sind bisher nicht in der Arbeitsgedächtnisforschung zum Bereich der Motorik berücksichtigt worden.

(5.) Das Postulat, dass räumlich gerichtete Bewegungen vornehmlich einer räumlichen Verarbeitung unterliegen, kann ferner mit Ergebnissen aus dem Bereich der motorischen Kurzzeitgedächtnisforschung nicht vereinbart werden, wobei auch hier das Konzept der Redundanz eine Rolle spielt. Die Gedächtnisrepräsentation einer memorierten Bewegung wird als ein Aggregat von einzelnen Komponenten (so genannte Cues), die für eine Bewegung entscheidend sind, angesehen. Vor allem die bei der linearen Positionierungsaufgabe zurückzulegende Distanz und der Bewegungsendpunkt liegen im Mittelpunkt der Untersuchungen (Diewert, 1975; Frekany, 1978; Laabs, 1973; Marteniuk, 1973; Marteniuk & Roy, 1972). Die Argumentation ist hier, dass die Bewegungsdistanz in einem kinästhetischen Code gespeichert wird, die Anfangs- und Endpunkte der Bewegung dagegen in einem visuellen Code (Diewert, 1975; Laabs, 1973). Die Vorstellung eines motorischen Kurzzeitgedächtnisses, die auf dem Gedächtnismodell von Atkinson und Shiffrin (1968) basiert, wird vor allem in den angewandten Wissenschaften bis heute oft herangezogen. Dabei findet jedoch keine Orientierung an neueren Entwicklungen der psychologischen Grundlagenforschung und keine Integration mit neuen Ergebnissen aus den benachbarten Gebieten der Arbeitsgedächtnisforschung und motorischen Kontrolle statt. Die Lösung motorischer Kurzzeitgedächtnisaufgaben wird also nur unter dem Aspekt der Speicherung betrachtet, nicht aber hinsichtlich der Integration von Gedächtnisrepräsentation mit motorischer Planung und Kontrolle.

(6.) Da sich die bisherigen Studien zum motorischen Arbeitsgedächtnis am Arbeitsgedächtnismodell von Baddeley und Hitch (1974) orientieren, das ein Strukturmodell darstellt, nicht aber die Bedingungen und Prozesse bei Arbeitsgedächtnisvorgängen berücksichtigt, wird der Beitrag von anderen Variablen bei der Aufgabenlösung, wie z. B. der Einfluss der Aufgabenspezifität (Allport, 1980; Barnard, 1985; Just & Carpenter, 1992; Schneider & Detweiler, 1988), Effekte aktiver Strategiewahl (Cokely, Kelley & Gilchrist, 2006; McNamara & Scott, 2001; Turley-Ames & Whitfield, 2003), sowie aktive Rekonstruktionsprozesse (Cowan et al.,

1998; Hulme et al., 1999), wie sie in neueren Arbeitsgedächtnismodellen postuliert werden, nicht diskutiert. Darüber hinaus wird auch aus dem Bereich der motorischen Kontrolle der Beitrag der Aufgabenspezifität und daraus resultierende Strategieeffekte bei der Aufgabenlösung nicht berücksichtigt (Boulinguez & Rouhana, 2008; Sarlegna & Sainburg, 2007), etwa bei der Gewichtung und Integration von visueller und propriozeptiver Information (Bagesteiro, Sarlegna & Sainburg, 2006; Sober & Sabes, 2003, 2005; van Beers et al., 1999, 2002a, b).

Zusammenfassend ergeben sich Kritikpunkte theoretischer Art am Postulat eines motorischen Subsystems innerhalb des Arbeitsgedächtnisses von Smyth und Pendleton (1989, 1990; Smyth, Pearson & Pendleton, 1988) sowie weiterer Autoren (Dimeck, Roy & Hall, 1996, 1998; Dolman, Roy, Dimeck & Hall, 2000; Rumiati & Tessari, 2002; Tessari & Rumiati, 2002; Woodin & Heil, 1996). Diese betreffen die generelle Annahme dieser Autoren, dass Bewegungen ohne Beitrag von visuellen Komponenten verarbeitet werden, sowie die aus Sicht der Forschung zur motorischen Kontrolle und der Neurophysiologie fragwürdige Unterteilung in Bewegungskonfigurationen und räumlich gerichtete Bewegungen. Ferner wurden Erkenntnisse aus der Forschung zur motorischen Kontrolle und der Literatur zum motorischen Kurzzeitgedächtnis nicht berücksichtigt, die eine Interaktion von visuellen und propriozeptiven Hinweisreizen, auch bei räumlich gerichteten Bewegungen belegen. Außerdem wurde von den oben genannten Autoren, die in jüngster Zeit versuchten, ein motorisches Subsystem innerhalb des Arbeitsgedächtnisses zu belegen, neuere Entwicklungen aus der Arbeitsgedächtnisforschung zu prozessorientierten Aspekten, die über das Modell von Baddeley und Hitch (1974) hinausgehen, nicht in die Argumentation einbezogen.

2.3 Methodische Probleme bisheriger Studien aus dem Bereich der Arbeitsgedächtnisforschung

Neben den oben aufgeführten theoretisch-konzeptuellen Kritik- und Diskussionspunkten gibt es eine Reihe von methodischen Problemen,

welche die Schlussfolgerungen aus den bisherigen Studien zum motorischen Arbeitsgedächtnis (Rumiati & Tessari, 2002; Smyth, Pearson & Pendleton, 1988; Smyth & Pendleton, 1989, 1990; Tessari & Rumiati, 2002) als nicht gerechtfertigt erscheinen lassen.

(1.) Generell muss an den bisherigen Studien kritisiert werden, dass die Aufgaben insgesamt zu komplex sind und sich in ihrer Aufgabenschwierigkeit kaum kontrollieren lassen, d. h. die gefundenen Interferenzeffekte könnten auch aufgrund unterschiedlicher Aufgabenschwierigkeit zustande gekommen sein.

(2.) Ferner haben die Autoren Bewegungen gewählt, die sich auf Grund ihrer Komplexität (z. B. Nachahmen von Zähneputzen) schwer im Detail untersuchen lassen und bei denen nur eine generelle Bewertung im Sinne ‚korrekt reproduziert – nicht korrekt reproduziert‘ möglich ist. Eine detaillierte Analyse der Interaktionen verschiedener Klassen von Informationen (visuell, räumlich, kinästhetisch) etwa auch bei korrekt reproduzierten Bewegungen, wie sie zum Beispiel Kerzel (2001) berichtet, ist damit nicht möglich.

(3.) Das Stimulusmaterial sowie die Untersuchungsmethodik erlaubt keine Untersuchung strategischer Anteile bei der Aufgabenbewältigung, sondern beschränkt sich auf die Erfassung qualitativer Daten, d. h. die Anzahl der richtig wiedergegebenen Bewegungen. Mit diesem Vorgehen wird hier nur das Resultat von Gedächtnisprozessen erfasst, nicht aber Mechanismen, die bei der Aufgabenlösung eine Rolle spielen. Für die Interpretation der Ergebnisse ist dies jedoch ein zentraler Punkt. Denkbar wäre nämlich, dass bei den Resultaten von zwei unterschiedlichen Gedächtnisspannen, etwa einer motorischen und einer visuellen, bei gleicher Anzahl reproduzierter Items unterschiedliche Verarbeitungsmechanismen zum Tragen kommen.

(4.) Als zentraler Mangel kann die Verwendung eines Paradigmas zur Untersuchung des motorischen Arbeitsgedächtnisses angesehen werden, bei dem originär motorische Informationen während der Encodierphase den Versuchspersonen gar nicht zur Verfügung stehen. Bei dem so genannten Paradigma der Handlungsspanne werden während der Encodierphase den Probanden Serien von pantomimisch dargestellten

Handlungen lediglich visuell dargeboten. Diese sollen im Anschluss von den Versuchspersonen aktiv reproduziert werden. Kinästhetische und propriozeptive Informationen stehen also während der Lernphase nicht zur Verfügung. Bei diesem Vorgehen handelt es sich um eine Bewegungsimitation, bei der möglicherweise visuelle Informationen mit motorischen Befehlen verknüpft werden, nicht aber um die eigentliche Reproduktion von selbst ausgeführten Bewegungen. Insofern ist der Schluss auf einen separaten motorischen Speicher aufgrund dieser Vorgehensweise fragwürdig, da während der Lernphase keine Bewegungen ausgeführt werden. Vielmehr sind Prozesse bildlicher Vorstellung bei dieser Art von experimenteller Aufgabe für die beobachtbaren Resultate verantwortlich (siehe Annett, 1995; Johnson, 1982), nicht aber originär motorische Prozesse.

2.4 Zielsetzung und Hypothesen

Angesichts der einerseits mangelnden theoretischen Integration mit Befunden aus neueren Entwicklungen innerhalb der Arbeitsgedächtnisforschung aber auch aus benachbarten Disziplinen der motorischen Kontrolle und Neuropsychologie, andererseits wegen der methodischen Mängel der bisherigen Studien besteht Bedarf, die Rolle motorischer Informationen innerhalb des Arbeitsgedächtnisses anhand eines geeigneten experimentellen Paradigmas zu untersuchen. Ziel dieser Arbeit ist es also, die bisherigen Befunde der Studien zum motorischen Arbeitsgedächtnis mit Orientierung am Gedächtnismodell von Baddeley und Hitch (1974) zu überprüfen und gegebenenfalls um weitere aktuelle Aspekte aus der Arbeitsgedächtnisforschung und Forschung zur motorischen Kontrolle zu erweitern. Um dabei ein adäquates methodisches Vorgehen zu gewährleisten, soll ein neuer experimenteller Ansatz gewählt werden, mit dem die oben diskutierten methodischen Probleme umgangen werden können.

Aus der Diskussion der bisherigen Forschungsergebnisse lassen sich folgende globale Hypothesen ableiten:

(1.) *Spezifitätsthese*: Es gibt ein spezifisch motorisches Speicherformat bei der kurzzeitigen Speicherung von Bewegungen, sowohl bei räumlich gerichteten Bewegungen als auch bei Bewegungsmustern. Das bedeutet, dass Bewegungen nicht in einem rein visuellen bzw. räumlichen Format gespeichert werden.

(2.) *Multimodalitätsthese*: Information im Kontext motorischer Zielhandlungen (etwa Bewegungen) wird in verschiedene Teilaspekte zerlegt und in Codes unterschiedlicher Modalitäten im Arbeitsgedächtnis gespeichert.

(3.) *Redundanzthese*: Die in unterschiedlichen Codes gespeicherte Information von Bewegungen ist zumindest zum Teil redundant. Das heißt, dass einzelne Aspekte einer Bewegung (etwa die Geschwindigkeit) in unterschiedlichen Modalitäten kodiert und aus unterschiedlichen Speichern rekonstruiert werden können. Ein möglicher Grund für solch

eine multimodale Speicherung ist, dass das motorische System auf verschiedene Information zur Generierung einer Bewegung zurückgreifen kann, womit sowohl eine hohe Flexibilität als auch eine hohe Fehlertoleranz auf Grund der redundanten Speicherung der relevanten Information erreicht wird (siehe Rosenbaum & Chaiken, 2001; Rosenbaum, Meulenbroeck & Vaughan, 1999).

(4.) *Strategiethese*: Beim Zustandekommen der beobachtbaren Gedächtnisleistung spielen prozessbezogene Aspekte wie z. B. automatische bzw. aktive Strategiewahl, Kompensation und Rekonstruktion bei der Aufgabenlösung eine entscheidende Rolle und tragen zum beobachtbaren Resultat der Gedächtnisleistung bei.

Diese Hypothesen sollen anhand mehrerer Experimente überprüft werden, wobei die oben genannten globalen Hypothesen zu folgenden Fragestellungen und Hypothesen führen:

1. In den Experimenten 1 bis 3 soll zunächst die Rolle motorischer Information bei Arbeitsgedächtnisprozessen untersucht werden. Gemäß der Argumentation von Smyth und Pendleton (Smyth, Pearson & Pendleton, 1988; Smyth & Pendleton, 1989, 1990) sowie Rumiati und Tessari (Rumiati & Tessari, 2002; Tessari & Rumiati, 2002) erfordern räumlich gerichtete Bewegungen vor allem räumliche Verarbeitung, werden also vor allem im visuell-räumlichen Subsystem verarbeitet. Dabei wurde jedoch nicht berücksichtigt, dass zur Ausführung von räumlich gerichteten Bewegungen kinästhetische und propriozeptive Informationen eine ganz entscheidende Rolle spielen (z. B. Adamovich et al., 2001). Im Sinne einer Spezifitäts- bzw. Multimodalitäts-These wird erwartet, dass räumlich gerichtete Bewegungen nicht rein visuell-räumlich verarbeitet werden, sondern, dass auch kinästhetische und propriozeptive Anteile eine entscheidende Rolle spielen.

2. Sind kinästhetische Informationen bei der Lösung von motorischen Arbeitsgedächtnisaufgaben erforderlich? Im Paradigma der Handlungsspanne stehen den Versuchspersonen während der Lernphase keine kinästhetischen Informationen zur Verfügung. In Experiment 4 soll daher

die Lernphase variiert werden, wobei die Bewegung entweder selbst ausgeführt (kinästhetisch-visuelle Lernphase) oder nur beobachtet wird (visuelle Lernphase). Die Hypothese ist, dass die Art der Lernphase Einfluss auf die Leistung in der Gedächtnisaufgabe hat. Dabei wird im Sinne einer Redundanzthese vermutet, dass kinästhetische Information herangezogen wird, falls diese zur Verfügung steht. Darüber hinaus soll das Encodieren von visueller und kinästhetischer Information Vorteile gegenüber der Encodierung ohne visuelle Informationen bieten.

3. In einem weiteren Schritt interessiert in Experiment 5, ob das Prinzip der Redundanz oder das Strategieprinzip vom kognitiven System bei der Aufgabenlösung umgangen werden kann, wenn eines oder beide Prinzipien bei der Aufgabenlösung nachteilig sind. Im Sinne der Redundanzthese würde visuelle Information berücksichtigt, auch wenn sie aufgabenirrelevant und störend bei der Aufgabenlösung ist. Da visuelles Feedback bei räumlich gerichteten Bewegungen immer genutzt wird, falls es zur Verfügung steht (z. B. Saunders & Knill, 2003, 2005), dürften im Sinne der Strategiethese visuelle Informationen ebenfalls auch genutzt werden, wenn dies der Aufgabenbewältigung abträglich ist. Daher besteht die Erwartung, dass im Sinne einer top-down Verarbeitung, d. h. einer aktiven Steuerung der Strategiewahl, Probleme dieser Art umgangen werden können.

4. In Experiment 6 wird der Einfluss von sowohl visuell als auch visuell-motorisch vermittelter Bewegungsgeschwindigkeit auf die Gedächtnisleistung, insbesondere auf die Reproduktion der Bewegungsgeschwindigkeit untersucht. Da bei Kerzel (2001) eine Interaktion von beobachteter mit tatsächlich ausgeführter Geschwindigkeit aufgezeigt werden konnte, ist eine interessante Frage, wie sich die beobachtete bzw. selbst ausgeführte Bewegungsgeschwindigkeit auf die Bewegungsreproduktion auswirkt. Im Sinne der Redundanzthese wird erwartet, dass visuell-motorisch vermittelte Geschwindigkeitsparameter während der Zusatzaufgabe einen störenden Einfluss auf die Reproduktion der Bewegungsgeschwindigkeit haben, visuelle Geschwindigkeitsinformationen sollten dagegen einen geringeren Störeinfluss haben.

5. In Experiment 7 werden im Sinne der Strategiethese mögliche Konstruktions- und Rekonstruktionsprozesse beim Bewegungsabruf untersucht. Man kann vermuten, dass beim Bewegungsabruf einer vorgegebenen Bewegung vor allem Rekonstruktionsprozesse eine entscheidende Rolle spielen. Im Gegenzug ist eine interessante Frage, ob bei frei wählbaren Bewegungsaufgaben ein vergleichbarer Prozess der Konstruktion in der Phase der Kriteriumsbeurteilung induziert werden kann, welcher sich in einem ähnlichen Muster von zeitbezogenen Maßen äußern sollte.

6. Neben einer Erfassung der Fehlerrate in den Experimenten 1 bis 7 soll vor allem Wert auf die Auswertung von zeitbezogenen Maßen gelegt werden, die Aufschluss über prozessorientierte Aspekte bei der Aufgabenlösung geben können. Im Sinne der Strategiethese wird erwartet, dass Effekte der Strategiewahl einen ganz besonderen Anteil bei der Aufgabenlösung ausmachen, wobei sich in Abhängigkeit von der Aufgabenmodalität unterschiedliche Verarbeitungsmechanismen erkennen lassen. Dabei sollen sich modalitätsspezifisch die motorischen Aufgaben von den visuellen Aufgaben unterscheiden. Ferner wird erwartet, dass bei gleichen beobachtbaren Gedächtnisleistungen unterschiedliche modalitäts-spezifische Unterschiede bei der Bearbeitung in den zeitlichen Maßen sichtbar werden.

2.5 Experimentelles Paradigma

Mit einem Interferenzparadigma wurde die Rolle motorischer Information bei der kurzzeitigen Speicherung von Bewegungen untersucht. Dieses experimentelle Paradigma (siehe Berti, 2001) bietet die Möglichkeit, mittels unterschiedlicher Zusatzaufgaben während eines Behaltensintervalls in einer motorischen Kurzzeitgedächtnisaufgabe über Interferenzeffekte zwischen der Primär- und den Zusatzaufgaben Aussagen über das Speicherformat motorischer Information im Arbeitsgedächtnis zu treffen (zur Logik von Interferenzaufgaben siehe u. a. Deutsch, 1970; Pechmann & Mohr, 1992). In diesem S1-S2 Paradigma (siehe Abbildung 1) besteht die Aufgabe der Versuchspersonen darin, erst eine Bewegung mit der rechten Hand

auszuführen (Lernphase), sich diese neun Sekunden lang zu merken (Behaltensintervall) und dann möglichst genau zu wiederholen (Abrufphase). Die zu merkende Bewegung wird mit vier nacheinander erscheinenden Punkten auf dem Bildschirm präsentiert (Präsentationsphase), die in der vorgegebenen Reihenfolge mittels Mausbewegung in einer kontinuierlichen Bewegung verbunden werden sollen. Dabei werden die Positionen der Punkte auf dem Bildschirm per Zufall bestimmt, wobei der Abstand zwischen den Punkten konstant gehalten wird. Während des Behaltensintervalls können nun verschiedene Zusatzaufgaben eingebettet werden, um zu testen, ob die Bearbeitung einer bestimmten Information (etwa visuell oder motorisch) einen Effekt auf die Leistung in der motorischen Gedächtnisaufgabe hat oder ob die entsprechenden Modalitäten unabhängig voneinander sind.

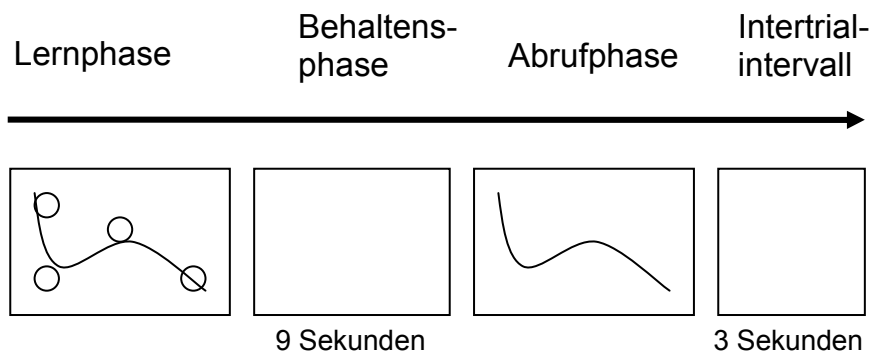


Abbildung 1: Ablauf im motorischen S1-S2 Paradigma nach Berti (2001).

In Anlehnung an bisherige Paradigmen der motorischen Kurzzeitspeicherung bzw. der motorischen Kontrolle wurden als Aufgabenmaterial zweidimensionale Bewegungen mit mehreren Richtungsänderungen gewählt. Dieses Aufgabenmaterial hat folgende Merkmale und Vorteile:

1. Sowohl visuelle als auch motorische, insbesondere kinästhetische und propriozeptive Informationen stehen im Gegensatz zum Paradigma der Handlungsspanne während der Lernphase zur Verfügung. Somit ist gewährleistet, dass auch tatsächlich die Eigenschaften von motorischen Informationen untersucht werden.

-
2. Durch die Wahl von zweidimensionalen Bewegungen, die jedoch mehrere Richtungsänderungen haben, wird ein Stimulusmaterial generiert, das sich hinsichtlich seiner Komplexität und damit einhergehenden Schwierigkeit leicht kontrollieren lässt, was bei den Aufgaben der Handlungsspanne von Smyth und Pendleton sowie weiterer Autoren (Rumiati & Tessari, 2002; Smyth, Pearson & Pendleton, 1988; Smyth & Pendleton, 1989, 1990; Tessari & Rumiati, 2002) nicht der Fall war. Im Gegensatz zu unilinearen Positionierungsaufgaben aus dem Bereich der motorischen Kurzzeitgedächtnisforschung, die zum Teil sehr einfach sind, findet in diesem Ansatz eine bewusste Annäherung an Bewegungen des Alltags statt, welche wesentlich komplexer sind als eindimensionale Zeigebewegungen.
 3. Eine detaillierte Analyse der Interaktionen verschiedener Klassen von Informationen (visuell, räumlich, kinästhetisch) ist nun durch die Wahl von zweidimensionalen Bewegungen möglich. Durch die Messung nicht nur der qualitativen Maße (d. h. korrekt bzw. nicht korrekt reproduziert), sondern auch zeitbezogener Maße können sowohl strukturelle als auch prozessbezogene Aussagen getroffen werden.
 4. Präzise Messung: Durch Ausführung von zweidimensionalen Bewegungen am PC besteht gegenüber den Aufgaben aus den 1960er bis 90er Jahren ein großer Vorteil durch automatisierte und präzise Erfassung der Bewegungskordinaten, aber auch anderer Parameter, die bisher nicht erfasst worden sind wie z. B. Bewegungsdauer, Stopps während der Bewegungsausführung und Latenzen beim Bewegungsabruf.
 5. Das zeitliche Verhalten bei der Bewegungsreproduktion wurde zwar unter dem Aspekt der motorischen Kontrolle untersucht, bisher aber nicht im Bereich der Gedächtnisforschung. So interessieren in dieser Arbeit vor allem prozessorientierte Aspekte bei der Aufgabenlösung, die sich in den zeitlichen Maßen widerspiegeln sollen. Dazu wird die Latenz des Bewegungsonset in Lern- und Abrufphase aufgezeichnet, die Aufschluss über das Abrufverhalten bei der motorischen Gedächtnisaufgabe gibt. Man kann annehmen, dass eine größere Latenz ein Anzeichen für Schwierigkeiten bei der Wiedergabe des Gedächtnismaterials ist. Ferner werden Stopps im Bewegungsfluss

erfasst, die ebenfalls Hinweise auf das Abrufverhalten geben. So sollten vermehrte bzw. längere Stopps in experimentellen Bedingungen mit hoher kognitiver Auslastung zu finden sein, weniger Stopps dagegen bei leicht zu bewältigenden Aufgaben. Schließlich wird die Bewegungsdauer erfasst, die Rückschlüsse auf die Aufgabenbewältigung gibt. Die Vermutung besteht, dass die Bewegungsdauer bei kognitiver Beanspruchung kürzer wird, wie dies bereits bei Henz und Berti (2006) gezeigt werden konnte.

6. Durch die bewusste Wahl von aktiven im Gegensatz zu passiven Bewegungen ist eine Orientierung an alltäglichen Bewegungen ebenfalls gewährleistet. Ferner ist strategisches Verhalten bei der Aufgabenbewältigung durch aktive Bewegungen experimentell deutlicher zu zeigen, da dieses eine elaboriertere Repräsentation durch Integration von motorischen Befehlen, kinästhetischen Reafferenzen und kutan-haptischem Input erfordert (siehe Paillard und Brouchon, 1968).

7. Durch die Wahl von Bewegungen mit mehreren Bewegungsabschnitten kann eine kognitive Auslastung erzeugt werden und somit Fragestellungen auf der Makroebene untersucht werden. Im Gegensatz dazu wurden bei den bisherigen unidimensionalen Zeigebewegungen Bewegungen eher auf der Mikroebene untersucht, d. h. die Präzision bei der Bewegungsausführung war entscheidender als eine generell korrekte Bewegungsausführung, da im Allgemeinen keine Kapazitätsauslastung bei eindimensionalen Bewegungen zu erwarten ist. Auch hier wieder sei das Argument des Alltagsbezugs angeführt: zur erfolgreichen Alltagsbewältigung reicht es oft aus, eine Bewegung richtig, nicht aber zwangsläufig präzise auszuführen. Präzision spielt meist bei sehr spezialisierten Bewegungen eine Rolle wie z. B. in der Musik oder im Leistungssport.

3 Die Rolle visueller und kinästhetischer Cues bei der Lösung von motorischen Arbeitsgedächtnisaufgaben

3.1 Experiment 1

Untersuchungsgegenstand in Experiment 1 ist die Rolle motorischer Information bei Arbeitsgedächtnisprozessen. Dazu wurde im oben beschriebenen Interferenzparadigma getestet, ob es spezifische Interferenzeffekte durch Zusatzaufgaben (phonologisch, visuell, visuell-motorisch, motorisch) in der motorischen Kurzzeitgedächtnisaufgabe gibt und unter welchen Bedingungen die Aufgabe noch lösbar ist bzw. die Leistung in der Aufgabe gänzlich zusammenbricht. In einem vorhergehenden Experiment unter Verwendung des beschriebenen Interferenzparadigmas zeigte sich, dass während des Behaltensintervalls zu bearbeitende Zusatzaufgaben (phonologisch, visuell, motorisch) unterschiedliche Aspekte der Bewegung beeinflussten (Berti, 2001). So war die Anzahl korrekt reproduzierter Bewegungen durch die motorische und die phonologische Zusatzaufgabe signifikant verringert, während die Bewegungsgeschwindigkeit korrekt reproduzierter Bewegungen von der visuellen und die Bewegungsgröße vor allem von der motorischen Zusatzaufgabe beeinflusst wurde. Der Autor argumentierte, dass aufgrund der Störwirkung der motorischen Aufgabe auf ein motorisches Speicherformat geschlossen werden kann. Die störende Wirkung der phonologischen Aufgabe wurde durch Verbalisationsstrategien erklärt, wobei Effekte der Aufgabenschwierigkeit nicht ausgeschlossen werden konnten. In einer daran anschließenden Studie (Henz & Berti, 2006) wurde deshalb die Aufgabenschwierigkeit kontrolliert und die bisherigen Aufgaben, die während des Behaltensintervalls zu bearbeiten waren, durch homogenere Aufgaben, bei denen zudem der Anteil von visuellen und motorischen Komponenten variiert werden konnte, ersetzt. In dieser

Studie zeigte sich, dass die Gedächtnisleistung für Bewegungen durch eine Zusatzaufgabe mit vorwiegend motorischen, nicht aber durch Aufgaben mit vorwiegend visuellen Anforderungen beeinträchtigt wurde. Die Autoren vermuteten daher, dass originär motorische Informationen eine Rolle bei der Speicherung von Bewegungen spielen und Bewegungen nicht in einem rein visuellen Format gespeichert werden.

In Experiment 1 sollen die Ergebnisse von Henz und Berti (2006) repliziert und zudem der Einfluss von einer phonologischen Zusatzaufgabe geklärt werden. Neben der Erfassung eines qualitativen Maßes der Fehlerrate (korrekt vs. nicht korrekt reproduziert) soll vor allem Wert auf die Erfassung von zeitbezogenen Maßen (Bewegungsdauer, Latenzen beim Bewegungsabruf, Reaktionszeiten, Stopps im Bewegungsfluss) gelegt werden, die Aufschluss über Prozesse bei der Aufgabenlösung geben. Wie bereits bei Henz und Berti (2006) sollten während des Behaltensintervalls Trackingaufgaben bearbeitet werden, die das Ausführen von Bewegungen bzw. Beobachten von Objekten, die sich über den gesamten Bildschirm erstrecken, erfordern. Vier Aufgabenmodalitäten (phonologisch, visuell, motorisch, kombiniert visuell-motorisch) wurden getestet sowie eine Kontrollbedingung ohne Zusatzaufgabe. Die Hypothese ist, dass die motorische sowie die visuell-motorische Zusatzaufgabe die Gedächtnisleistung am meisten beeinträchtigt. Dies sollte sich in einer erhöhten Fehlerrate in diesen beiden Bedingungen, sowie in gegenüber den verbleibenden Bedingungen veränderten zeitbezogenen Maßen äußern, wobei sich dies vor allem in einer erhöhten Latenz des Bewegungsonset in der Abrufphase der motorischen und visuell-motorischen Aufgabe, in verlängerten Reaktionszeiten der Zusatzaufgaben sowie in einer geringeren Bewegungsdauer zeigen sollte. Ferner sollten aufgrund der erwarteten kognitiven Auslastung in diesen beiden Bedingungen insgesamt mehr und längere explorative Stopps zu finden sein als in den verbleibenden Bedingungen.

In zwei Anschlussexperimenten (Experiment 2 und 3) wird im Sinne der unter 2.4 diskutierten Strategiethese geprüft, ob das Argument der strategischen Herangehensweise des kognitiven Systems bei

Gedächtnislastung gestärkt werden kann. Dazu findet in Experiment 2 eine separate Testung der Störaufgaben, d. h. ohne Bearbeitung der Gedächtnisaufgabe, statt. Da keine Gedächtnislastung vorliegt, kann man erwarten, dass sich bei separater Testung keine Strategieeffekte beobachten lassen. Es sollte sich daher in Experiment 2 ein anderes Muster der Reaktionszeiten zeigen als in Experiment 1, wobei erwartet wird, dass sich die Reaktionszeiten der Trackingaufgaben nicht voneinander unterscheiden.

In Experiment 3 wird untersucht, ob die Reihenfolge von visuellen und motorischen Aufgaben während des Behaltensintervalls einen Einfluss auf die strategische Herangehensweise des kognitiven Systems bei der Aufgabenlösung hat, d. h. ob sich Effekte bei der Bearbeitung zeigen, wenn die Aufgabenmodalitäten in unterschiedlicher Reihenfolge präsentiert werden. Dazu wurde die visuell-motorische Aufgabe variiert, indem in den Experimentalbedingungen die visuelle und die motorische Trackingaufgabe während des Behaltensintervalls nacheinander zu bearbeiten waren, wobei in der ersten Bedingung zuerst die visuelle, dann die motorische, in der zweiten Bedingung dagegen zuerst die motorische, dann die visuelle Aufgabe bearbeitet wurde. Die Hypothese ist in Experiment 3, dass sich, bedingt durch die unterschiedliche Reihenfolge von visuellen und motorischen Anforderungen, Unterschiede in der strategischen Herangehensweise zeigen lassen. Diese sollten sich nicht in den qualitativen, jedoch anhand der zeitbezogenen Maße (Reaktionszeiten, Bewegungsdauer, Latenzen des Bewegungsonset, explorative Stopps) aufzeigen lassen.

3.1.1 Experiment 1: Methode

Stichprobe An Experiment 1 nahmen vierzehn Versuchspersonen (Vpn) teil, darunter waren zwölf Studierende des Psychologischen Instituts der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. Sechs Vpn waren männlich, acht weiblich. Die Altersspanne der Vpn reichte von 19 bis 29 Jahren, das Durchschnittsalter lag bei 22.5 Jahren. Alle Vpn waren rechtshändig, normalsichtig bzw. korrigiert normalsichtig und ohne neurologische

Beeinträchtigung. Keine der Vpn kannte den Hintergrund dieses Experiments.

Versuchsapparatur Die Stimuli wurden von einem Elsa Gladiac 511/MX Grafikadapter generiert und mit einer Auflösung von 640 x 320 Pixel auf einem 17" Monitor (Iiyama Vision Master S702GT) mit einer Wiederholungsrate von 60 Hz dargeboten. Die Bewegungen und die Interferenzaufgaben wurden mit Hilfe einer optischen Maus (Samsung OMGB30B) für Rechtshänder ausgeführt. Zur Versuchssteuerung und Datenerfassung wurde ein Personal Computer (Pentium AMD K6-2, 400 MHz) eingesetzt. Die rechte Hand der Probanden war durch eine 25 x 60 cm große Sichtblende aus Pappe verdeckt, die in einer Höhe von 15 cm auf der Tischplatte angebracht war. Die Sichtblende war so befestigt, dass die Probanden bei der Bewegungsausführung nicht behindert wurden.

Stimuli und Aufgaben Der experimentelle Aufbau dieses Experiments basiert auf dem von Berti (2001) entwickelten methodischen Ansatz zur Untersuchung von Arbeitsgedächtnisphänomenen bei motorischen Kurzzeitspeicheraufgaben. Dieses experimentelle Design ist in Abbildung 2 dargestellt.

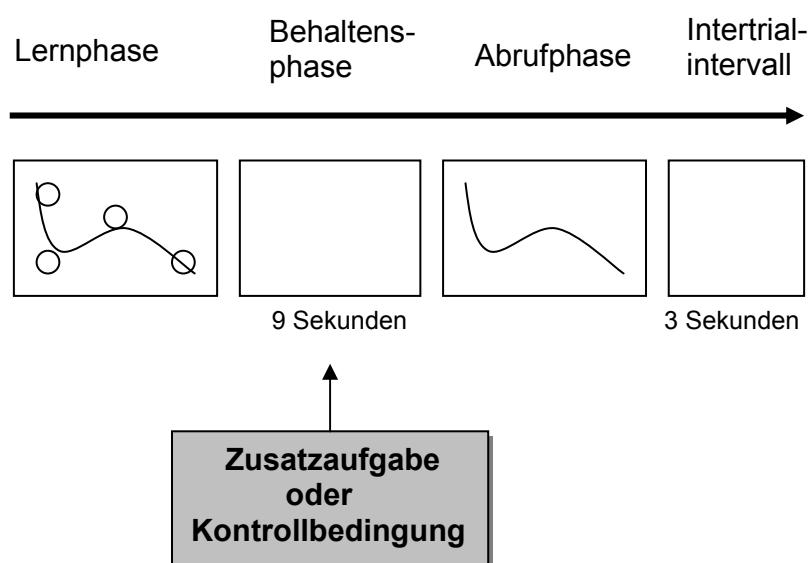


Abbildung 2: Methodischer Ansatz in Experiment 1.

Auf dem Monitor wurden nacheinander, im Abstand von 200 ms, vier schwarze Kreise mit einem Durchmesser von 1.4 cm auf einem weißen Hintergrund eingeblendet, wobei die Richtung der eingeblendeten Kreise zufallsgeneriert und die Euklidische Distanz mit 5.5 cm konstant gehalten wurde. Alle vier Kreise wurden 200 ms nach Erscheinen des vierten Kreises ausgeblendet. Aufgabe der Probanden war es, die durch die vier eingeblendeten Kreise angedeutete Bewegung mit der PC-Maus nachzuzeichnen, wobei die linke Maustaste während der Bewegungsausführung kontinuierlich gedrückt und erst am Endpunkt der Bewegung losgelassen wurde. Während der Bewegungsausführung wurde visuelles Feedback gegeben, d. h. der Cursor war in Form eines schwarzen Punktes mit einem Durchmesser von 0.5 cm auf dem Bildschirm zu sehen. Die so ausgeführte Bewegung war während eines Behaltensintervalls von neun Sekunden zu merken. Während des Behaltensintervalls wurde, entsprechend der vier Trackingbedingungen, jeweils eine sorgfältig zu bearbeitende Trackingaufgabe dargeboten. Nach dem Behaltensintervall erschien in der Mitte des Monitors ein Punkt, der den Probanden signalisierte, die zuvor ausgeführte Bewegung nun zu wiederholen. Dabei wurde kein visuelles Feedback gegeben, d. h. der Cursor wurde während der Bewegungsausführung nicht eingeblendet, stattdessen war der schwarze Punkt in der Mitte des Bildschirms bis zum Ende der Bewegungsausführung zu sehen.

Die Trackingaufgaben sind in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Charakterisierendes Merkmal der Trackingaufgaben ist, dass sie Bewegungen über den gesamten Bildschirm erfordern. Dabei handelt es sich sowohl um Bewegungen, die beobachtet werden als auch um Bewegungen, die von der Versuchsperson ausgeführt werden. Die Vpn hatten die Aufgabe, Trackingobjekte, d. h. Objekte, die sich horizontal über den Bildschirm bewegten, visuell oder mit einem Cursor zu verfolgen und mit einem Tastendruck schnellstmöglich zu reagieren, sobald ein Kreis erschien. Dabei wurden vier Typen von Trackingaufgaben getestet: phonologisches Tracking, visuelles Tracking, visuell-motorisches Tracking und motorisches Tracking. In allen Trackingbedingungen mit Ausnahme des phonologischen Trackings lief das Trackingobjekt mit einer

Geschwindigkeit von 8.0 cm/s bis zum rechten Bildschirmrand, wobei die y-Koordinaten konstant gehalten wurden, d. h. das Trackingobjekt machte eine exakt waagerechte Bewegung.

Beim visuellen Tracking lief vor einem weißen Hintergrund ein roter Punkt (1.4 cm Durchmesser) horizontal, von links nach rechts, über den Bildschirm. Aufgabe war es, genau dann mit einem Klicken der linken Maustaste zu reagieren, sobald ein Kreis (Durchmesser 2.0 cm) auf der Bewegungslinie des Trackingobjekts erschien. Der rote Punkt lief auch nach Erscheinen des Kreises bis zum rechten Bildschirmrand weiter. Beim visuell-motorischen Tracking lief als Trackingobjekt ein roter Punkt mit einem Durchmesser von 1.4 cm ebenfalls horizontal (von links nach rechts) über den Bildschirm. Aufgabe war es, dieses Trackingobjekt möglichst deckungsgleich mit dem Cursor zu verfolgen. Sobald ein Kreis (Durchmesser 2.0 cm) auf der Bewegungslinie des Trackingobjekts erschien, musste mit einem Tastendruck reagiert werden. Beim motorischen Tracking lief ebenfalls ein roter Punkt horizontal über den Bildschirm, dieser musste mit dem Cursor verfolgt werden. Nachdem 2.0 cm der Bahn des Trackingobjekts zurückgelegt wurden, verschwand sowohl der rote Punkt als auch der Cursor und die Bewegung musste in der angegebenen Geschwindigkeit fortgesetzt werden, wobei die Daten der Mausbewegung aufgezeichnet wurden. Sobald ein Kreis (Durchmesser 2.0 cm) auf der Bewegungslinie des Trackingobjekts erschien, sollten die Probanden schnellstmöglich mit einem Tastendruck reagieren. Bei allen Aufgaben mussten die Vpn also zwei Aufgaben koordinieren.

Beim phonologischen Tracking wurden auf dem Bildschirm von links nach rechts laufend einsilbige, dreibuchstabige Wörter (z. B. „rot“) präsentiert, wobei diese für jeweils 350 ms eingeblendet wurden. Der zeitliche Abstand zwischen den Darbietungen der Wörter, d. h. der Zeitraum, in dem das Wort nicht eingeblendet wurde, war zufallsgeneriert und variierte von 300 bis 800 ms. Aufgabe der Probanden war es, die Darbietungen dieser Wörter mitzuzählen und mit einem Tastendruck zu reagieren, sobald das siebte Wort erschien.

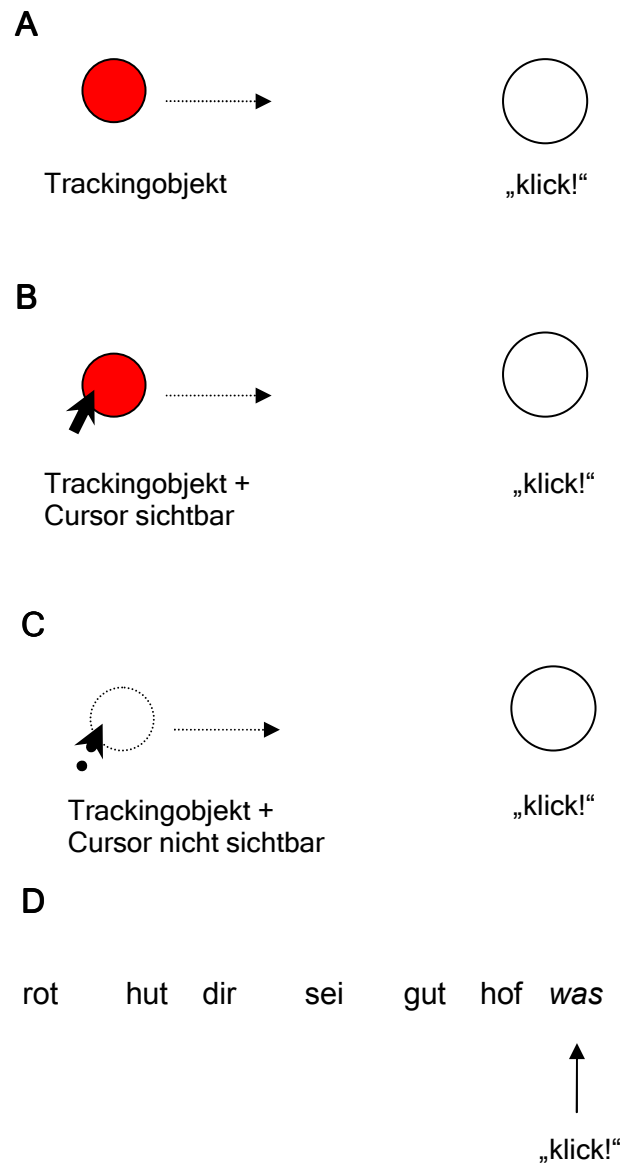


Abbildung 3: Trackingaufgaben, die während des Behaltensintervalls in Experiment 1 zu bearbeiten waren. **A** Visuelle Aufgabe: Das Trackingobjekt bewegt sich über den Bildschirm. Sobald ein Kreis erscheint, wird mit Tastendruck reagiert. **B** Visuell-motorische Aufgabe: Trackingobjekt wird mit Cursor verfolgt. Sobald ein Kreis erscheint, wird mit Tastendruck reagiert. **C** Motorische Aufgabe: nach kurzer Geschwindigkeitsvorgabe wird unsichtbarer Cursor so lange bewegt, bis ein Kreis erscheint. **D** Phonologische Aufgabe: Wörter werden wiederholt präsentiert. Sobald das siebte Wort erscheint, wird mit Tastendruck reagiert.

Design Als unabhängige Variable wurde in diesem Experiment die Modalität der Aufgabe, die während des Behaltensintervalls zu bearbeiten war (phonologisch, visuell, visuell-motorisch, motorisch, keine Aufgabe), in einem Messwiederholungsdesign getestet, d. h. jede Versuchsperson durchlief alle fünf experimentellen Bedingungen zu jeweils 25 Trials, wobei die Bedingungen geblockt dargeboten wurden. Die Reihenfolge der Bedingungen war zwischen den Vpn randomisiert. Die abhängige Variable war die Gedächtnisleistung bei der motorischen Kurzzeitspeicherung bzw. die Beeinträchtigung selbiger durch die Bearbeitung von irrelevanten Aufgaben während des Behaltensintervalls (siehe Datenanalysen).

Experimentelle Prozedur Die Vpn wurden vor Start des Experiments zu demographischen Angaben, zu ihrem momentanen Befinden und zur Vertrautheit mit der Mausbedienung befragt. Die Händigkeit wurde mittels des Edinburgh Inventory (Oldfield, 1971) ermittelt (siehe Anhang A). Die Probanden wurden in einem abgedunkelten Raum in einer Entfernung von ca. 70 cm vom Monitor auf einem bequemen Stuhl platziert. Die Sichtblende wurde vor den Probanden auf dem Tisch angebracht, so dass sowohl die Bewegungsausführung als auch die Sicht auf den Monitor nicht behindert wurde. Die Gedächtnisaufgabe wurde durch eine schriftliche Instruktion erläutert (siehe Anhang B). Die Vpn wurden dabei instruiert, in der Lern- und Abrufphase eine fließende Bewegung mit der PC-Maus zu produzieren, d. h. die präsentierten Punkte nicht mit ruckhaften Bewegungen zu verbinden. Ferner wurde betont, die Bewegung in der Abrufphase zudem möglichst genau hinsichtlich der Bewegungsrichtung, Ausdehnung der Bewegung und Bewegungsgeschwindigkeit der Kriteriumsbevewegung zu reproduzieren. Nach Durchlesen der Aufgabeninstruktion wurde die Gedächtnisaufgabe separat, d. h. zunächst ohne Interferenzaufgaben, in einem Trainingsblock (10 Trials) geübt. Der Beginn jedes Trials wurde 200 ms vor Erscheinen des ersten Stimulus durch einen Startton (600 Hz) signalisiert. Nach einem Behaltensintervall von neun Sekunden wurde der Beginn des Bewegungsabrufs ebenfalls durch ein akustisches Warnsignal (400 Hz) angekündigt. Zwischen den

Trials wurde ein Intertrialintervall von drei Sekunden angesetzt. Vor jedem Experimentalblock wurden die Probanden in schriftlicher Form neu instruiert. Dabei wurden die Vpn darauf hingewiesen, die Zusatzaufgaben möglichst präzise auszuführen und auf die Stimuli schnellstmöglich zu reagieren, da diese aufgezeichnet würden. Die Gedächtnisaufgabe wurde in Kombination mit der jeweiligen Aufgabe im Behaltensintervall in einem Trainingsblock (10 Trials) geübt. In der phonologischen, visuellen, visuell-motorischen und motorischen Bedingung wurde zusätzlich zu diesem Trainingsblock die jeweilige Aufgabe zuvor in einem separaten Trainingsblock (10 Trials) geübt. Nach Beendigung des Experiments fand eine Nachbefragung der Vpn statt, bei der die subjektive Schwierigkeit der fünf experimentellen Bedingungen angegeben sowie nach Schwierigkeiten bei der Aufgabenbearbeitung und nach Lösungsstrategien gefragt wurde.

Datenaufzeichnung Folgende Daten wurden automatisiert aufgezeichnet:

1. x- und y-Koordinaten der zu Beginn jedes Trials eingeblendeten Kreise;
2. x- und y-Koordinaten der mittels der PC-Maus ausgeführten Bewegungen mit einer Aufzeichnungsrate von 40 Hz;
3. Bewegungsdauer von allen ausgeführten Bewegungen in Lern- und Abrufphase (in ms), d. h. der Zeitpunkt, zu dem die Maustaste gedrückt wurde, um die Bewegung zu starten bis zum Loslassen der Maustaste, welches das Ende der Bewegung signalisierte;
4. Dauer vom Erscheinen des imperativen Stimulus bis zum Bewegungsonset in Lern- und Abrufphase (in ms);
5. Reaktionszeiten (in ms) der phonologischen, visuellen, visuell-motorischen und motorischen Trackingaufgabe, d. h. die Dauer vom Erscheinen des Stimulus bis zur Reaktion mit der Maustaste;
6. Koordinaten des Trackingobjekts, d. h. des Objekts auf dem Bildschirm, das mit dem Cursor verfolgt wurde, in der visuell-motorischen und motorischen Trackingaufgabe;

7. Bewegungskoodinaten des Cursors, mit dem die Vpn das Trackingobjekt verfolgten, in der visuell-motorischen und motorischen Trackingaufgabe;

Datenanalysen Zunächst wurde als Kontrollvariable die Trackinggüte, d. h. die prozentuale Genauigkeit, mit der die Vpn das Trackingobjekt mit dem Cursor verfolgten, für jeden Trial errechnet. Die Trackinggüte berechnet sich aus der Differenz zwischen der Position des Cursors und des Trackingobjekts. Trials, in denen eine geringere prozentuale Genauigkeit als 85 % der Bildschirmhorizontalen erreicht wurde, wurden von der Analyse ausgeschlossen, da hier davon auszugehen ist, dass die vorgegebene Trackinggeschwindigkeit nicht eingehalten, d. h. die Aufgabe nicht instruktionsgemäß ausgeführt wurde. Ferner wurde als weitere Kontrollvariable die Reaktionszeit in den während des Behaltensintervalls zu bearbeitenden Aufgaben herangezogen. Trials, in denen die Reaktionszeit größer als 800 ms war, wurden von der weiteren Datenanalyse ausgeschlossen. Trials, die mindestens eines dieser beiden Kriterien nicht erfüllten, wurden von der weiteren Datenanalyse der Gedächtnisleistung ausgeschlossen.

Die Gedächtnisleistung in der motorischen Arbeitsgedächtnisaufgabe wurde sowohl unter qualitativen, nämlich über die Anzahl falsch reproduzierter Bewegungen, als auch unter prozessbezogenen, d. h. die Art der Aufgabenbearbeitung betreffenden Aspekten, die insbesondere das zeitliche Verhalten der Vpn erfassen, gemessen. Diese werden im Folgenden dargestellt:

1. *Qualitative Analyse*: Die Bewegungsdaten wurden in einem ersten Schritt einer qualitativen Analyse unterzogen, d. h. zwei unabhängige Beurteiler (Rater) entschieden, ob die reproduzierte Bewegung mit der Kriteriumsbeziehung hinsichtlich der Richtungen sowie der Anzahl der Bewegungselemente übereinstimmte. Die Bewegungsdauer sowie die Ausdehnung der Bewegung gingen nicht in die Bewertung ein. Zur Beurteilung wurden die Bewegungskoodinaten auf dem Bildschirm graphisch dargestellt. Die Rater verglichen die Bewegungen jeweils

paarweise (Kriteriumsbeziehung und reproduzierte Beziehung) und klassifizierten diese als korrekt oder inkorrekt wiedergegebene Bewegung. Trials, in denen die Bewegung aufgrund von technischen Problemen bei der Mausbedienung abbrach, wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Als qualitatives Maß erwies sich die Fehlerrate als sinnvoll, da die Anzahl korrekt wiedergegebener Bewegungen keinen Rückschluss auf tatsächlich falsch wiedergegebene Bewegungen oder durch rein technische Schwierigkeiten bedingte Bewegungsabbrüche zulässt. In einem weiteren Schritt wurde die Beurteilerübereinstimmung zwischen erstem und zweitem Rater ermittelt, wobei als Maß für die Beurteilerübereinstimmung Cronbachs α errechnet wurde. Da die Interrater-Reliabilität der Bewertung durch den ersten und zweiten Rater wie bereits in der vorhergehenden Studie (Henz & Berti, 2006) hoch war ($\alpha = 0.87$), ging in die weitere Auswertung nur die Einschätzung des ersten Raters ein. Die ermittelte Anzahl der falsch wiedergegebenen Bewegungen wurde für jede Bedingung über alle Vpn gemittelt. Im Anschluss wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung für den Faktor Aufgabenmodalität (phonologisch, visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung ohne Aufgabe) sowie post-hoc Tests nach Bonferroni zum Vergleich der Mittelwerte gerechnet. Für alle statistischen Tests wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$ gesetzt.

2. *Zeitbezogene Maße*: In einem zweiten Schritt wurden die Maße der Bewegungsdauer, die Latenz des Bewegungsonset, für die Reaktionszeiten der Aufgaben, die während des Behaltensintervalls zu bearbeiten waren, sowie für die explorativen Stopps (Zeitkriterium, Anzahl pro Trial, Anzahl langer bzw. kurzer Stopps, Dauer pro Stopp) ausgewertet.

Die Bewegungszeiten der Bewegungen in Lern- und Abrufphase wurden bei allen Vpn für jede Bedingung über alle Trials gemittelt. Für die gemittelten Bewegungszeiten wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für die Faktoren Aufgabenmodalität (phonologisch, visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) und Phase

(Lernphase, Abrufphase) sowie post-hoc Tests nach Bonferroni zum Vergleich der Mittelwerte gerechnet.

Die Latenz des Bewegungsonset bezeichnet die Zeitdauer, die vom Erscheinen des imperativen Stimulus, der zur Bewegungsausführung auffordert, bis zum tatsächlichen Bewegungsbeginn benötigt wird. Diese Latenz wurde für jeweils die Lern- und Abrufphase bei allen Vpn für jede Bedingung über alle Trials gemittelt. Im Anschluss wurde für die gemittelte Latenz eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für die Faktoren Aufgabenmodalität (phonologisch, visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) und Phase (Lernphase, Abrufphase) sowie post-hoc Tests nach Bonferroni zum Vergleich der Mittelwerte durchgeführt.

Für die gemittelten Reaktionszeiten wurde eine zweifaktorielle ANOVA für die Faktoren Aufgabenmodalität (phonologisch, visuell, visuell-motorisch, motorisch) und Phase (Lern- und Abrufphase) sowie post-hoc Tests nach Bonferroni zum Vergleich der Mittelwerte durchgeführt. Für alle statistischen Tests wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$ gesetzt.

3. *Explorative Stopps*: Stopps, die während der Bewegungsausführung auftraten, wurden erfasst, indem die Bewegungskordinaten jedes Datenpunktes mit dem jeweils darauf folgenden verglichen wurden. Waren die Koordinaten über eine Zeitdauer von mehr als 150 ms identisch, wurde dieser Bewegungsabschnitt als Stopp markiert. Diese so ermittelten Stopps wurden zunächst separat für Lern- und Abrufphase für alle Vpn für jede Bedingung über alle Trials gemittelt. Auf diese Weise wurde für jede Versuchsperson für jede Bedingung und Phase ein individuell angepasstes Zeitkriterium gewählt, oberhalb dessen alle Stopps als explorative Stopps in die weitere Analyse miteinbezogen wurden. Mit diesem Vorgehen der individuellen Kriterienanpassung wurden intra- und interindividuelle Unterschiede im Bewegungsverhalten berücksichtigt. Zunächst wurde die mittlere Dauer aller Stopps oberhalb dieses Kriteriums ermittelt, wobei diese separat für Lern- und Abrufphase für alle Vpn für jede Bedingung über alle Trials gemittelt wurde. In einem weiteren Schritt wurde die Anzahl der Trials, in denen tatsächlich ein Stopp oberhalb des Zeitkriteriums zu finden ist, sowie die mittlere Anzahl explorativer Stopps

pro Bedingung (phonologisch, visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) und Phase (Lern- und Abrufphase) ermittelt. Die mittlere Anzahl explorativer Stopps pro Trial errechnet sich aus der Anzahl aller Stopps oberhalb des Zeitkriteriums geteilt durch die Anzahl der Trials, in denen tatsächlich ein Stopp zu finden ist. Diese wurde ebenfalls separat für Lern- und Abrufphase für alle Vpn für jede Bedingung über alle Trials gemittelt. In einem dritten Schritt fand eine Unterteilung in kurze und lange Stopps statt, wobei kurze Stopps eine Zeitdauer kürzer als 1000 ms, jedoch oberhalb der Kriteriengrenze, lange Stopps dagegen Stopps mit einer Zeitdauer von mehr als 1000 ms einschließen. Kurze und lange Stopps wurden separat für Lern- und Abrufphase für alle Vpn für jede Bedingung über alle Trials gemittelt. Im Anschluss wurden für die gemittelte Anzahl der Trials mit Stopps, die gemittelte Anzahl der Stopps pro Trial, sowie für die gemittelte Anzahl kurzer bzw. langer Stopps jeweils zweifaktorielle Varianzanalysen für die Faktoren Aufgabenmodalität (phonologisch, visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) und Phase (Lern- und Abrufphase) sowie post-hoc Tests nach Bonferroni zum Vergleich der Mittelwerte gerechnet. Für alle statistischen Tests wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$ gesetzt.

3.1.2 Ergebnisse

3.1.2.1 Kontrollvariablen

Bei 98,3 % aller Trials wurde die Aufgabe während des Behaltensintervalls instruktionsgemäß ausgeführt, d. h. die Reaktionszeiten überstiegen nicht das festgelegte Maß von 800 ms bzw. die Trackinggüte von 85 % wurde nicht unterschritten.

3.1.2.2 Qualitative Analyse

Die Ergebnisse der qualitativen Analyse sind in Abbildung 4 dargestellt. Man kann beobachten, dass sich die visuell-motorische Aufgabe von den restlichen Bedingungen sowie von der Kontrollbedingung unterscheidet, d. h. die Vpn machen in dieser Bedingung mehr Fehler bei der Bewegungsreproduktion. Die phonologische, visuelle sowie motorische Bedingung unterscheidet sich dabei nicht von der Kontrollbedingung.

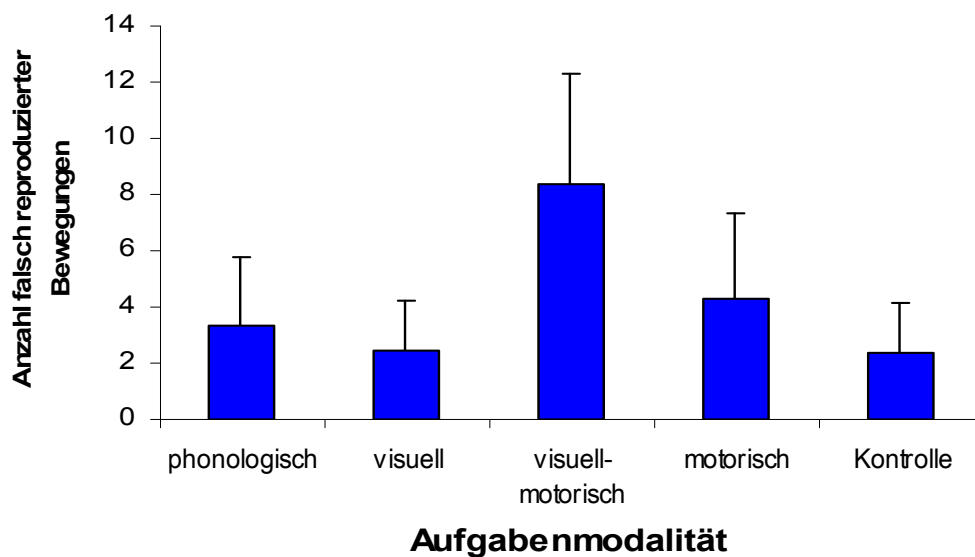


Abbildung 4: Mittlere Fehlerrate in Abhängigkeit von der Aufgabenmodalität.

Die ANOVA zeigt einen signifikanten Effekt der Aufgabenmodalität auf, $F(4, 52) = 23.51, p < .001$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen, dass sich die visuell-motorische Aufgabe signifikant von allen anderen

Aufgaben, nämlich der phonologischen Aufgabe ($p = .001$), der visuellen ($p < .001$), der motorischen ($p = .001$) und der Kontrollbedingung ($p < .001$) unterscheidet. Die phonologische ($p > .05$), visuelle ($p > .05$) und motorische ($p > .05$) Bedingung unterscheidet sich dagegen nicht von der Kontrollbedingung. Ferner unterscheiden sich die motorische und visuelle ($p > .05$), die motorische und phonologische ($p > .05$) sowie die visuelle und phonologische Bedingung ($p > .05$) nicht voneinander.

3.1.2.3 Zeitbezogene Maße

Bewegungsdauer Die Ergebnisse der Analyse der Bewegungsdauer sind in Abbildung 5 dargestellt. Auffällig ist, dass die Bewegungsdauer in der Abrufphase gegenüber der Lernphase über alle Bedingungen überschätzt wird. Außerdem ist die Bewegungsdauer in der visuell-motorischen sowie in der phonologischen Bedingung insgesamt kürzer als in der Kontrollbedingung, in der keine Aufgabe während des Behaltensintervalls zu bearbeiten ist. Die ANOVA zeigt einen signifikanten Haupteffekt der Aufgabenmodalität, $F(4, 52) = 4.01$, $p < .01$, und der Phase, $F(1, 13) = 5.52$, $p < .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Phase wird nicht signifikant, $F(4, 52) = 1.39$, $p > .05$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen, dass sich die visuell-motorische Bedingung signifikant von der Kontrollbedingung hinsichtlich der Bewegungsdauer unterscheidet ($p < .01$). Ebenfalls unterscheidet sich die phonologische Bedingung von der Kontrollbedingung ($p < .05$). Alle verbleibenden Bedingungen unterscheiden sich nicht signifikant voneinander hinsichtlich der Bewegungsdauer.

Zusätzlich wurden zwei separate einfaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung für den Faktor Aufgabenmodalität (phonologisch, visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) jeweils getrennt für die Lern- und Abrufphase durchgeführt. Die ANOVA nur für die Lernphase zeigt einen hochsignifikanten Effekt auf, $F(4, 52) = 5.19$, $p = .001$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen, dass sich die visuell-motorische Bedingung signifikant von der Kontrollbedingung ($p < .01$) unterscheidet. Bei einem Vergleich der restlichen Bedingungen finden sich keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Bewegungsdauer. Die

ANOVA nur für die Abrufphase zeigt ebenfalls einen signifikanten Effekt auf, $F(4, 52) = 2.69, p < .05$. Post-hoc Tests nach Bonferroni belegen, dass sich die visuell-motorische Bedingung von der Kontrollbedingung ($p = .05$) unterscheidet. Bei einem Vergleich der restlichen Bedingungen hinsichtlich der Bewegungsdauer finden sich keine signifikanten Unterschiede.

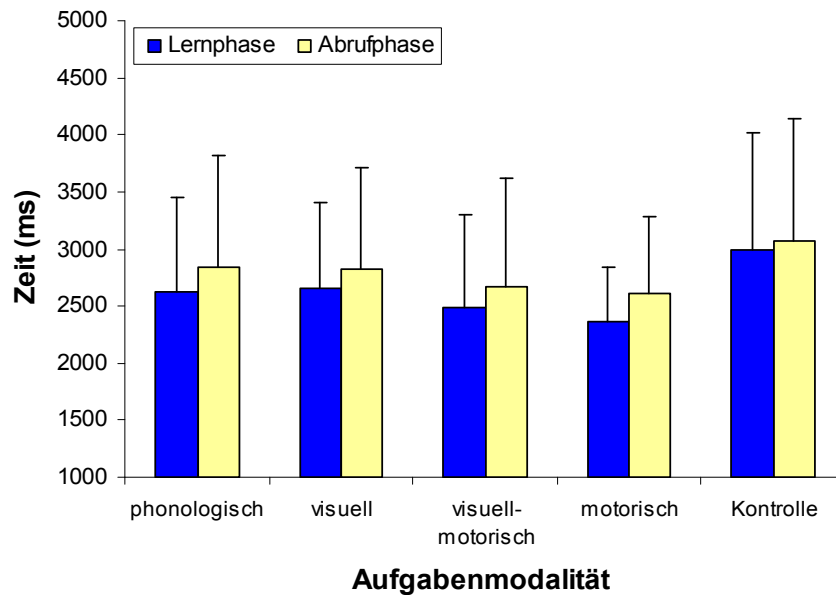


Abbildung 5: Mittlere Bewegungsdauer in Abhängigkeit von der Aufgabenmodalität, dargestellt für Lern- und Abrufphase.

Latenz des Bewegungsonset Die mittleren Latenzen des Bewegungsonset in Lern- und Abrufphase sind in Abbildung 6 dargestellt. Wie auch schon in der qualitativen Analyse zeigt sich hier, dass sich die visuell-motorische Bedingung von den restlichen Bedingungen unterscheidet. Die Latenz des Bewegungsonset ist in dieser Bedingung gegenüber den anderen Bedingungen deutlich erhöht. Dies zeigt sich vor allem in der Situation des Bewegungsabrufs. Auch in der Lernphase lässt sich diese Tendenz erkennen, jedoch in der umgekehrten Richtung, wobei die Latenz in der visuell-motorischen Bedingung gegenüber der visuellen und Kontrollbedingung geringer ist. Die ANOVA zeigt einen signifikanten Haupteffekt der Aufgabenmodalität, $F(4, 52) = 6.44, p < .001$, sowie der Phase, $F(1, 13) = 36.17, p < .001$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Phase ist hochsignifikant, $F(4, 52) = 20.65, p < .001$. Post-hoc Tests

nach Bonferroni zeigen, dass sich die visuell-motorische Bedingung signifikant von der phonologischen ($p < .01$), der visuellen ($p < .05$) und der motorischen Aufgabe ($p < .01$), unterscheidet. Alle verbleibenden Bedingungen unterscheiden sich nicht signifikant voneinander hinsichtlich der Latenz des Bewegungsonset. Zusätzlich wurden zwei separate einfaktorische Varianzanalysen mit Messwiederholung für den Faktor Aufgabenmodalität (phonologisch, visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) jeweils getrennt für die Lern- und Abrufphase durchgeführt. Die ANOVA nur für die Lernphase zeigt einen signifikanten Haupteffekt auf, $F(4, 52) = 5.49, p = .001$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen, dass sich die visuell-motorische Bedingung signifikant von der visuellen ($p = .01$) und der Kontrollbedingung ($p < .01$) unterscheidet. Die ANOVA nur für die Abrufphase zeigt ebenfalls einen signifikanten Effekt der Aufgabenmodalität, $F(4, 52) = 13.68, p < .001$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen, dass sich die visuell-motorische Bedingung signifikant von allen anderen Bedingungen unterscheidet, nämlich von der phonologischen ($p = .001$), von der visuellen ($p = .001$), von der motorischen ($p < .001$) und von der Kontrollbedingung ($p < .01$). Bei einem Vergleich der restlichen Bedingungen finden sich hinsichtlich der Latenz des Bewegungsonset keine signifikanten Unterschiede.

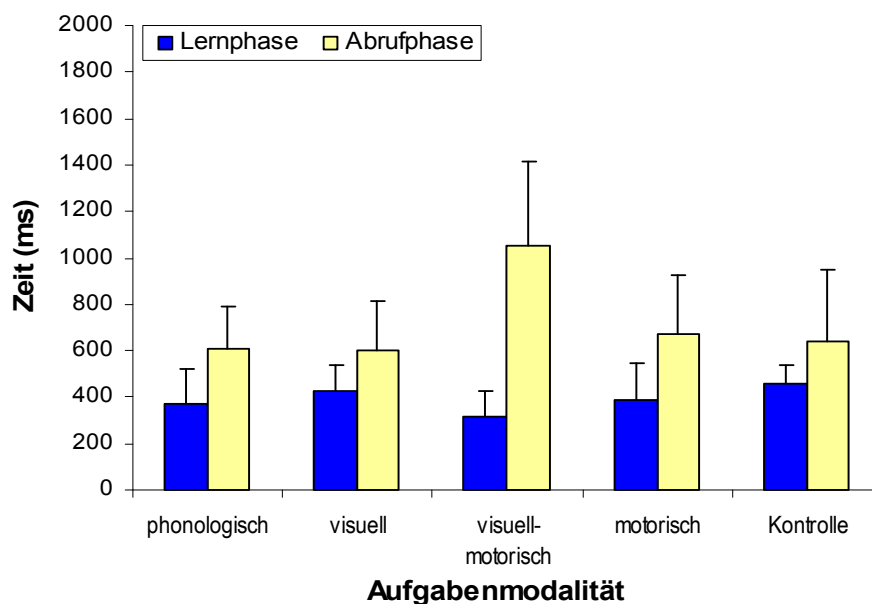


Abbildung 6: Mittlere Latenz des Bewegungsonset in Abhängigkeit von der Aufgabenmodalität, dargestellt für Lern- und Abrufphase.

Reaktionszeiten Die mittleren Reaktionszeiten der während des Behaltensintervalls zu bearbeitenden Trackingaufgaben sind in Abbildung 7 dargestellt. Wie bereits in der qualitativen Analyse und der Analyse des Bewegungsonset unterscheidet sich die visuell-motorische Bedingung von den anderen Bedingungen: hier kommt es zu deutlich kürzeren Reaktionszeiten gegenüber den anderen Bedingungen. Die ANOVA zeigt einen signifikanten Effekt der Aufgabenmodalität auf, $F(3, 11) = 17.94$, $p < .001$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen, dass sich die visuell-motorische Bedingung signifikant von allen anderen Bedingungen hinsichtlich der Reaktionszeiten unterscheidet, nämlich der phonologischen ($p < .05$), der visuellen ($p < .001$) und der motorischen Bedingung ($p = .001$). Ferner unterscheidet sich die visuelle von der motorischen Bedingung signifikant ($p = .01$). Bei einem Vergleich der restlichen Bedingungen finden sich keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Reaktionszeiten.

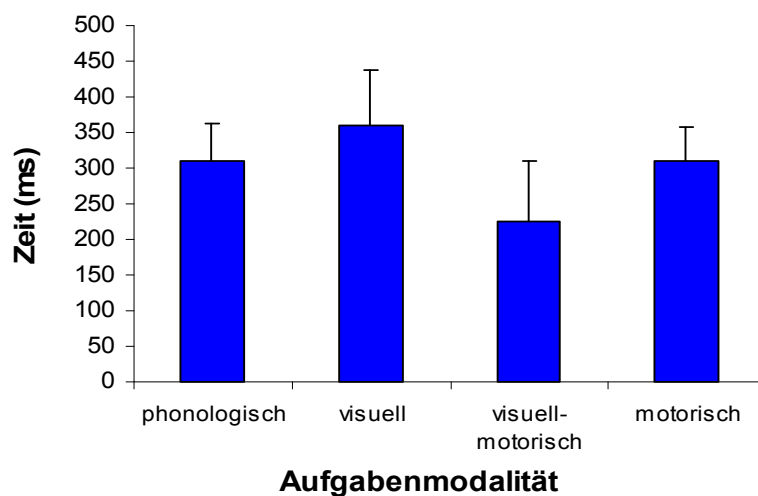


Abbildung 7: Mittlere Reaktionszeiten in Abhängigkeit von der Aufgabenmodalität.

3.1.2.4 Explorative Stopps

Stoppdauer In Abbildung 8 ist die durchschnittliche Dauer eines einzelnen Stopps pro Bedingung und Phase dargestellt. Über alle Aufgabenmodalitäten hinweg sind die Stopps in der Lernphase kürzer als in der Abrufphase, wobei sich hier die einzelnen Aufgabenmodalitäten

hinsichtlich der Stoppdauer nicht voneinander unterscheiden. Die ANOVA zeigt einen hochsignifikanten Haupteffekt des Faktors Phase, $F(1, 13) = 22.57$, $p < .001$, nicht aber des Faktors Aufgabenmodalität, $F(4, 52) = .90$, $p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Phase ist nicht signifikant, $F(4, 52) = .16$, $p > .05$. Zusätzlich wurden zwei separate einfaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung für den Faktor Aufgabenmodalität (phonologisch, visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) jeweils getrennt für die Lern- und Abrufphase durchgeführt. Die ANOVA nur für die Lernphase zeigt keinen Haupteffekt der Aufgabenmodalität auf, $F(4, 52) = .53$, $p > .05$, ebenso nicht die ANOVA für die Abrufphase, $F(4, 52) = .76$, $p > .05$.

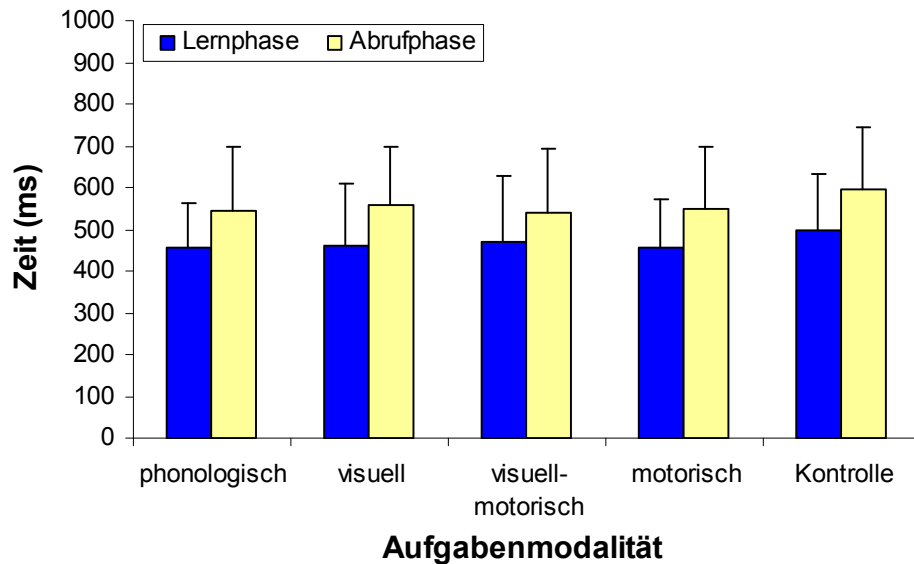


Abbildung 8: Mittlere Dauer eines explorativen Stopps in Abhängigkeit von der Aufgabenmodalität, dargestellt für Lern- und Abrufphase.

Anzahl Trials mit Stopps In Abbildung 9 ist die Anzahl der Trials mit explorativen Stopps pro Trial dargestellt. Die ANOVA zeigt weder einen Effekt des Faktors Aufgabenmodalität, $F(4, 52) = 2.23$, $p > .05$ noch des Faktors Phase, $F(1, 13) = 2.58$, $p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Phase wird nicht signifikant, $F(4, 52) = 1.36$, $p > .05$. Zusätzlich wurden zwei separate einfaktorielle Varianzanalysen mit

Messwiederholung für den Faktor Aufgabenmodalität (phonologisch, visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) jeweils getrennt für die Lern- und Abrufphase durchgeführt. Die ANOVA nur für die Lernphase zeigt keinen signifikanten Effekt der Aufgabenmodalität auf, $F(4, 52) = .96$, $p > .05$, dagegen zeigt sich in der Abrufphase ein signifikanter Effekt, $F(4, 52) = 3.19$, $p < .05$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen, dass sich die visuell-motorische Bedingung signifikant von der visuellen Bedingung ($p < .05$) unterscheidet. Alle weiteren Vergleiche sind hinsichtlich der Anzahl der Trials mit explorativen Stopps pro Trial nicht signifikant.

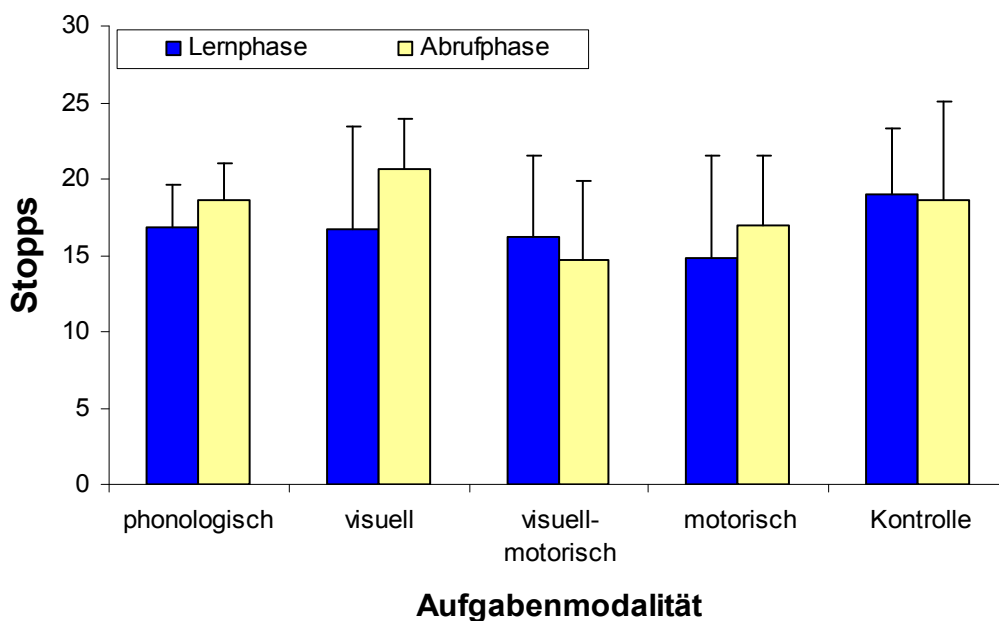


Abbildung 9: Mittlere Anzahl Trials mit Stopps in Abhängigkeit von der Aufgabenmodalität, dargestellt für Lern- und Abrufphase.

Anzahl explorativer Stopps In Abbildung 10 ist die Anzahl explorativer Stopps pro Trial dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass in der Kontrollbedingung die Anzahl explorativer Stopps größer ist als in den verbleibenden Bedingungen. Ferner lässt sich hinsichtlich der langen Stopps beobachten, dass diese in der Abrufphase der Kontrollbedingungen vermehrt auftreten, die kurzen Stopps dagegen treten in vergleichbarer Häufigkeit über alle Aufgabenmodalitäten sowie

unabhängig von Lern- und Abrufphase auf. Die ANOVA zeigt einen signifikanten Effekt der Aufgabenmodalität, $F(4, 52) = 2.91, p < .05$, nicht aber der Phase, $F(1, 13) = .33, p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Phase ist nicht signifikant, $F(4, 52) = .97, p > .05$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen, dass sich die visuell-motorische Bedingung signifikant von der visuellen Bedingung ($p < .05$), die motorische von der visuellen Bedingung ($p < .05$) und die Kontrollbedingung von der phonologischen Bedingung ($p < .05$) unterscheidet. Zusätzlich wurden zwei separate einfaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung für den Faktor Aufgabenmodalität (phonologisch, visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) jeweils getrennt für die Lern- und Abrufphase durchgeführt. Die ANOVA nur für die Lernphase zeigt keinen Effekt auf, $F(4, 52) = 1.86, p > .05$. Für die Abrufphase findet sich dagegen ein signifikanter Haupteffekt, $F(4, 52) = 2.65, p < .05$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen, dass sich die visuell-motorische Bedingung signifikant von der visuellen Bedingung ($p < .05$), die visuelle Bedingung von der motorischen ($p < .05$) und von der phonologischen Bedingung ($p < .05$) unterscheidet.

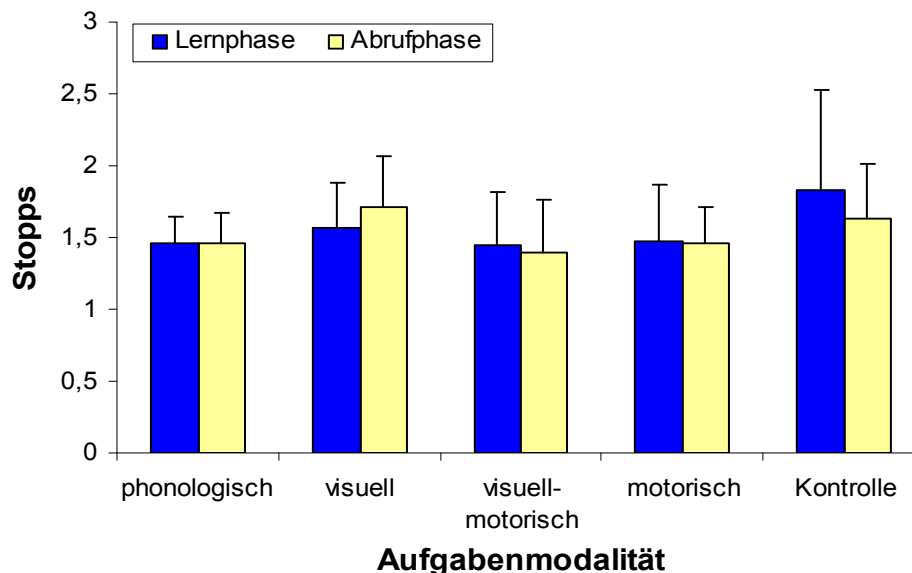


Abbildung 10: Mittlere Anzahl explorativer Stopps pro Trial in Abhängigkeit von der Aufgabenmodalität, dargestellt für Lern- und Abrufphase.

In Abbildung 11 ist die Anzahl langer Stopps pro Trial dargestellt. Für die Analyse der langen Stopps zeigt die ANOVA einen signifikanten Haupteffekt des Faktors Aufgabenmodalität, $F(4, 52) = 2.60, p < .05$, nicht aber für den Faktor Phase, $F(1, 13) = 1.45, p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Phase wird nicht signifikant, $F(4, 52) = 1.15, p > .05$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen, dass sich die Kontrollbedingung signifikant von der motorischen Bedingung ($p < .05$) und der phonologischen Bedingung ($p < .05$) unterscheidet. Zusätzlich wurden zwei separate einfaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung für den Faktor Aufgabenmodalität (phonologisch, visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) jeweils getrennt für die Lern- und Abrufphase durchgeführt. Die ANOVA nur für die Lernphase zeigt keinen Effekt auf, $F(4, 52) = 1.12, p > .05$. Die ANOVA nur für die Abrufphase zeigt dagegen einen signifikanten Effekt auf, $F(4, 52) = 3.00, p < .05$. Post-hoc Tests nach Bonferroni belegen, dass sich die Kontrollbedingung signifikant von der motorischen Bedingung ($p < .05$) sowie die motorische Bedingung von der visuell-motorischen Bedingung ($p < .05$) unterscheidet.

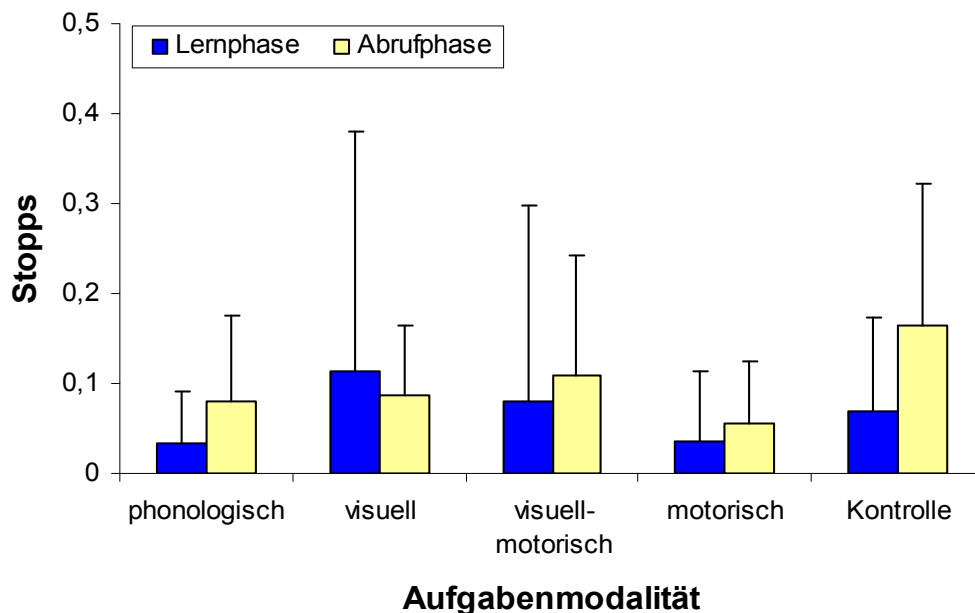


Abbildung 11: Mittlere Anzahl langer Stopps pro Trial in Abhängigkeit von der Aufgabenmodalität, dargestellt für die Lern- und Abrufphase.

Bei der statistischen Analyse der kurzen Stopps zeigen sich weder Effekte der Aufgabenmodalität, $F(4, 52) = 1.72, p > .05$, noch der Phase, $F(1, 13) = .22, p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Phase wird nicht signifikant $F(4, 52) = 1.76, p > .05$. Zusätzlich wurden zwei separate einfaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung für den Faktor Aufgabenmodalität (phonologisch, visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) jeweils getrennt für die Lern- und Abrufphase durchgeführt. Die ANOVA nur für die Lernphase zeigt keinen Effekt für die Aufgabenmodalität auf, $F(4, 52) = 1.68, p > .05$, ebenfalls findet sich für die Abrufphase kein Effekt, $F(4, 52) = 1.86, p > .05$.

3.1.3 Diskussion

Sowohl die qualitativen als auch die zeitbezogenen Daten zeigen, dass die visuell-motorische Aufgabe, nicht aber die rein motorische Aufgabe gegenüber den anderen Aufgaben einen störenden Einfluss auf die Gedächtnisleistung hat. Zum einen zeigt sich dies in einer erhöhten Fehlerrate, d. h. die Versuchspersonen reproduzierten mehr Bewegungen falsch (z. B. spiegelverkehrte Bewegungen, die Anzahl der Richtungsänderungen stimmte mit denen in der Kriteriumsbevewegung nicht überein) im Gegensatz zu den restlichen Bedingungen (phonologisch, visuell, motorisch), die sich hinsichtlich der Fehlerrate nicht von der Kontrollbedingung unterscheiden. Dieser Befund spiegelt sich auch in den zeitbezogenen Maßen wieder. In der Abrufphase findet sich in der visuell-motorischen Bedingung eine deutlich erhöhte Latenz des Bewegungsonset gegenüber den restlichen Bedingungen, d. h. die Versuchspersonen benötigten mehr Zeit vom Erscheinen des Stimulus, der den Beginn Bewegungsabruf signalisierte bis zum tatsächlichen Beginn der Bewegung mit der PC-Maus. In den anderen Bedingungen unterscheidet sich diese Latenz nicht signifikant von der Kontrollbedingung. Da die Latenz in der Abrufphase als Maß für die kognitive Auslastung im Abrufprozess werden kann, würde die deutlich längere Latenz in der visuell-motorischen Bedingung während des Abrufprozesses für Schwierigkeiten beim Abruf des Gedächtnisinhalts sprechen.

Anhand dieser Ergebnisse lässt sich wie bereits bei Henz und Berti (2006) deutlich zeigen, dass räumlich gerichtete Bewegungen, der Hypothese der Multimodalität entsprechend, nicht einer rein visuell-räumlichen Verarbeitung unterliegen, da die visuelle Aufgabe keinerlei Einfluss hat. Entgegen der Hypothese hat die rein motorische Aufgabe keinen störenden Einfluss. Daher liegt die Vermutung nahe, dass bei räumlich gerichteten Bewegungen sowohl visuell-räumliche als auch motorische Hinweisreize herangezogen werden. Die Prozesse bei der motorischen Kurzzeitspeicherung sind also komplexer als bei Smyth und Pendleton (Smyth, Pearson & Pendleton, 1988; Smyth & Pendleton, 1989,

1990) sowie Rumiati und Tessari (Rumiati & Tessari, 2002; Tessari & Rumiati, 2002) angenommen. Die von diesen Autoren vorgenommene Unterteilung in räumlich gerichtete Bewegungen und Bewegungskonfigurationen, die jeweils die Verarbeitung in unterschiedlichen, voneinander unabhängigen Speichern erfordern, ist demnach, zumindest in Bezug auf räumlich gerichtete Bewegungen, nicht haltbar. Ob das Postulat eines separaten motorischen Speichers zu halten ist, der für die Verarbeitung von Bewegungskonfigurationen verantwortlich ist, wird in Experiment 4 getestet werden.

Ein möglicher Grund, dass sowohl visuelle als auch kinästhetische Cues bei der Aufgabenlösung herangezogen werden, könnte darin liegen, dass die Aufgabenstruktur die Wahl von bestimmten Verarbeitungsstrategien fördert. Der Aspekt der Strategie scheint dabei eine wichtige Rolle bei der Aufgabenbewältigung zu spielen. In der Lernphase der visuell-motorischen Aufgabe findet sich, im Gegensatz zur Abrufphase, in der die Latenz des Bewegungsonset deutlich erhöht war, eine verringerte Latenz gegenüber den verbleibenden Bedingungen. Dieses Muster spiegelt sich auch bei der Analyse der Reaktionszeiten der Aufgaben, die während des Behaltensintervalls zu bearbeiten waren. In der Bedingung der visuell-motorischen Aufgabe ist die Reaktionszeit geringer als in den verbleibenden Bedingungen, welche sich nicht signifikant voneinander unterscheiden. Ebenfalls zeigt sich bei der Analyse der Bewegungsdauer, dass sich die visuell-motorische Bedingung sowohl in Lern- und Abrufphase von der Kontrollbedingung im Gegensatz zu den anderen Bedingungen abhebt, wobei hier die Bewegungsdauer insgesamt kürzer ist als in der Kontrollbedingung.

Zusammenfassend findet sich also eine Verkürzung in den Maßen der Latenz in der Lernbedingung, Reaktionszeit und Bewegungsdauer in Lern- und Abrufphase. Man könnte argumentieren, dass Mechanismen der Kompensation bzw. der Optimierung der Arbeitsabläufe greifen, um die kapazitätsintensiven Anforderung der visuell-motorischen Aufgabe zu bewältigen, wobei Priorität auf der reinen Aufgabenbewältigung liegt, d. h. dass die Aufgabe überhaupt gelöst werden kann, nicht aber auf der Art der Ausführung, d. h. dass das „wie“ im Vordergrund steht. Das kognitive

System versucht anscheinend, durch eine schnellere Ausführung des gesamten Aufgabenablaufs (schnelleres Encodieren in der Lernphase, insgesamt kürzere Bewegungszeiten als in den anderen Bedingungen, schnellere Ausführung der sekundären Aufgabe, weniger Stopps im Bewegungsfluss) Schwierigkeiten bei der Aufgabenbewältigung zu überwinden. In diesem Sinne könnte die beobachtbare Fehlerrate als Resultat nicht erfolgreicher bzw. nicht mehr zu bewältigender Kompensation bei Kapazitätsauslastung des Arbeitsgedächtnisses erklärt werden. Dies kann am Beispiel der Bedingung mit visueller Zusatzaufgabe gezeigt werden. Hier finden sich bei gleicher Fehlerrate wie in den Bedingungen mit phonologischer und motorischer Aufgabe längere Reaktionszeiten sowie eine höhere Anzahl von Stopps als in den beiden anderen Bedingungen. Ein weiterer Hinweis auf Optimierungsmechanismen bei der Bewegungsausführung bei zunehmender Kapazitätsauslastung könnte mit dem Vorhandensein langer Stopps, d. h. mit mehr als 1000 ms, vor allem in der Kontrollbedingung, erbracht werden. Möglicherweise wird in der Kontrollbedingung, da hier keine zusätzliche Aufgabe ausgeführt wird und daher mehr Kapazität frei ist, vermehrt auf aktive Rekonstruktionsprozesse zurückgegriffen.

Die beobachtbare Überschätzung der Bewegungsdauer in der Abrufphase gegenüber der Lernphase über alle Bedingungen hinweg wurde bereits bei Henz und Berti (2006) beobachtet. Diese modalitätsunabhängige, ca. 200 ms betragende Differenz zwischen Lern- und Abrufphase, wurde als Resultat eines Optimierungsmechanismus der Arbeitsabläufe interpretiert. Die Autoren argumentierten, dass durch den Wegfall des visuellen Feedbacks bei der Bewegungsausführung während der Abrufphase auf eine propriozeptive Bewegungsrepräsentation zurückgegriffen werden muss, die ungenauer als die bimodale visuell-motorische Repräsentation ist. Die Bewegungsausführung aufgrund dieser unimodalen Repräsentation wird aufgrund von Kompensationsprozessen demnach zeitaufwendiger (siehe Desmurget et al., 1995; Rossetti et al., 1995; van Beers et al., 1996). In Experiment 1 wurde überprüft, ob noch weitere Erklärungsmöglichkeiten für die beobachtbare Differenz in der

Bewegungsdauer in Frage kommen. Möglicherweise resultiert sie aus einem aktiven Rekonstruktionsprozess beim Bewegungsabruf. Dazu wurden explorative Stopps, d. h. ein- oder mehrmaliges Innehalten der Versuchspersonen bei der Bewegungsausführung, erfasst. Die Versuchspersonen starteten oftmals eine Bewegung, um dann im weiteren Verlauf, insbesondere an Stellen, an denen eine Richtungsänderung stattfindet, kurz zu überlegen, in welche Richtung die Kriteriumsbeziehung verlief. Bei diesen Stopps findet möglicherweise ein kurzes Update statt (siehe Desmurget & Grafton, 2000), die eher einer Rekonstruktion als einem tatsächlichen Abruf dient, da die Richtungsänderung in vielen Fällen in die falsche Richtung stattfindet. Die Dauer dieser explorativen Stopps ist auch über alle Bedingungen hinweg gleich, wobei die Abrufphase jeweils ca. 100 ms kürzer ist als die dazugehörige Lernphase. Die Überschätzung der Bewegungsdauer in der Abrufphase kann also nur teilweise die Überschätzung der Bewegungsdauer erklären. Daher ist zu vermuten, dass zum einen Rekonstruktionsprozesse, zum anderen Optimierungsmechanismen bei der Aufgabenlösung aufgrund des wegfallenden visuellen Feedbacks beim Bewegungsabruf einen höheren Zeitaufwand erfordern.

Zum Schluss sei noch auf die Rolle von verbalen Anforderungen bei der Lösung von motorischen Kurzzeitgedächtnisaufgaben eingegangen. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass verbale Anforderungen als solche die Gedächtnisleistung für Bewegungen nicht zu beeinträchtigen scheinen, da sich diese Bedingung im Gegensatz zur visuell-motorischen Bedingung nicht von der Kontrollbedingung sowie von der visuellen und der motorischen Bedingung unterscheidet, wie es die qualitativen Daten sowie die Daten der Reaktionszeiten und der Latenz des Bewegungsonset in Lern- und Abrufphase zeigen. Denkbar wäre, dass in Kombination mit visuellen und motorischen Anforderungen jedoch eine ähnliche Beeinträchtigung wie bei der visuell-motorischen Aufgabe auftreten könnte. Die Rolle verbaler Cues soll jedoch in dieser Arbeit nicht näher thematisiert werden.

Zusammenfassend sprechen die in diesem Experiment gefundenen Ergebnisse dafür, dass bei der kurzzeitigen Speicherung von räumlich

gerichteten Bewegungen sowohl visuelle als auch kinästhetische Cues herangezogen werden. Neben diesen modalitätsspezifischen, möglicherweise strukturellen Eigenschaften, spielen prozessbezogene Aspekte, namentlich strategische Komponenten, bei der Aufgabenlösung eine Rolle. Insbesondere seien hier Optimierungsmechanismen bei der Bewegungsausführung sowie aktive Rekonstruktionsprozesse genannt, die einen wichtigen Anteil bei der Aufgabenlösung ausmachen.

3.2 Experiment 2: Strategieeffekte I – Ermittlung der Reaktionszeiten der Trackingaufgaben ohne zusätzliche Gedächtnisaufgabe

3.2.1 Methode

Stichprobe An Experiment 2 nahmen neun Versuchspersonen (Vpn) teil, darunter waren fünf Studierende des Psychologischen Instituts der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. Fünf Vpn waren männlich, vier weiblich. Die Altersspanne der Vpn reichte von 19 bis 32 Jahren, das Durchschnittsalter lag bei 24.1 Jahren. Alle Vpn waren rechtshändig, normalsichtig bzw. korrigiert normalsichtig und ohne neurologische Beeinträchtigung. Keine der Vpn kannte den Hintergrund dieses Experiments.

Apparatur, experimentelle Aufgabe und Prozedur

Versuchsapparatur, Ablauf und Vorgehensweise waren mit einigen Ausnahmen die gleiche wie in Experiment 1. In diesem Experiment wurden die gleichen Trackingaufgaben (phonologisch, visuell, visuell-motorisch, motorisch) separat dargeboten, also ohne die Gedächtnisaufgabe. Bei der experimentellen Prozedur wurden die Vpn zunächst schriftlich instruiert, wobei hervorgehoben wurde, dass die jeweilige Trackingaufgabe präzise ausgeführt und auf die Stimuli schnellstmöglich reagiert werden soll. Vor jedem Experimentalblock wurde ein Trainingsblock mit 10 Trials durchgeführt, um die Vpn mit der Aufgabe und mit der Mausbedienung vertraut zu machen. Die Vpn wurden vor jedem Block schriftlich über die Bedienung der Aufgabe instruiert. Der Beginn jedes Trials wurde 200 ms vor Erscheinen der Stimuli durch einen Startton (600 Hz) signalisiert. Auf dieses Signal hin erschienen die zu bearbeitenden Stimuli. Nachdem die Vpn mit einem Tastendruck auf die Stimuli reagiert hatten, wurden diese nach 0.5 s ausgeblendet. Es folgte ein Intertrialintervall (ITI) mit einer Dauer von 3 s. Nach Beendigung des Experiments fand eine Nachbefragung der Vpn statt, bei der die subjektive

Schwierigkeit der experimentellen Bedingungen (phonologisch, visuell, visuell-motorisch, motorisch) bewertet, sowie nach Schwierigkeiten bei der Aufgabenbearbeitung und nach Lösungsstrategien gefragt wurde.

Design In diesem Experiment wurde wieder ein Messwiederholungsdesign mit dem Faktor Aufgabe (phonologisch, visuell, visuell-motorisch, motorisch) realisiert. Jede Versuchsperson durchlief alle vier experimentellen Bedingungen zu jeweils 20 Trials, wobei die Bedingungen geblockt dargeboten wurden. Die Reihenfolge der Bedingungen war zwischen den Vpn randomisiert. Die abhängige Variable in diesem Experiment war die Reaktionszeit, d. h. die benötigte Zeit vom Erscheinen des zu beantwortenden Stimulus (ein Kreis bzw. in der phonologischen Bedingung ein Wort) bis zur Reaktion auf diesen Stimulus mit einem Tastendruck.

Datenaufzeichnung Aufgezeichnet wurde die Reaktionszeit in Millisekunden, d. h. die benötigte Zeit vom Erscheinen eines imperativen Stimulus bis zur Reaktion mit einem Tastendruck auf diesen Stimulus. Als Maß zur Kontrolle der instruktionsgemäßen Ausführung der Aufgaben wurde bei den Trackingaufgaben die Trackinggüte der visuell-motorischen und motorischen Aufgabe aufgezeichnet, d. h. die Differenz zwischen der Position des Trackingobjekts und der Position des von der Versuchsperson mit der Hand geführten Cursors.

Datenanalysen Als Kontrollvariablen bei der visuell-motorischen und motorischen Trackingaufgabe wurde die Trackinggüte, d. h. die prozentuale Genauigkeit, mit der das Trackingobjekt mit dem Cursor verfolgt wurde, sowie die Reaktionszeit für jeden Trial erfasst. Die Trackinggüte berechnet sich aus der Differenz zwischen der Position des Cursors und des Trackingobjekts. Trials, in denen eine geringere prozentuale Genauigkeit als 85 % der Bildschirmhorizontalen erreicht wurde, wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen, da hier davon auszugehen ist, dass die vorgegebene Trackinggeschwindigkeit nicht eingehalten, d. h. die Aufgabe nicht instruktionsgemäß ausgeführt wurde.

Die Reaktionszeit wurde für jede Versuchsperson für jede Bedingung über alle ausgewerteten Trials gemittelt. Im Anschluss wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung mit dem Faktor Aufgabenmodalität (phonologisch, visuell, visuell-motorisch, motorisch) sowie post-hoc Tests nach Bonferroni durchgeführt. Für alle statistischen Tests wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$ gesetzt.

3.2.2 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse des zweiten Experiments sind in Tabelle 1 dargestellt. Für einen besseren Vergleich wurden die Reaktionszeiten aus Experiment 1 ebenfalls angeführt. 0.92 % aller Trials der Trackingaufgaben waren außerhalb des 85 %-Bereichs und wurden daher von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Die mittleren Reaktionszeiten in Experiment 2 unterscheiden sich nicht voneinander, $F(3, 6) = 1.62, p > .05$.

Tab. 1: Mittelwerte und Standardabweichungen der Reaktionszeiten (ms) in Abhängigkeit vom der Aufgabenmodalität für Experiment 2 und Experiment 1 zum Vergleich.

Aufgabenmodalität	Experiment 2		Experiment 1	
	M	SD	M	SD
phonologisch	310.12	39.12	311.00	51.51
visuell	287.89	35.79	361.14	76.82
visuell-motorisch	321.29	51.38	225.91	85.32
motorisch	302.39	57.72	310.03	47.48

Bei einem Vergleich der Reaktionszeiten aus Experiment 1 und 2 fällt auf, dass sich in Experiment 2 keine Unterschiede hinsichtlich der Aufgabenmodalitäten finden, während dies bei den Werten aus Experiment 1 der Fall ist. Eine weitere, sehr wichtige Beobachtung ist, dass in Experiment 1 die Reaktionszeiten der visuellen Trackingaufgabe deutlich höher sind, während umgekehrt bei der visuell-motorischen Aufgabe in Experiment 1 die Reaktionszeiten deutlich geringer sind als in Experiment 2. Diese Unterschiede lassen sich beobachten, obwohl in beiden Experimenten die Versuchspersonen instruiert wurden,

schnellstmöglich mit einem Tastendruck zu reagieren. Daher lässt sich argumentieren, dass die in Experiment 1 beobachteten modalitätsspezifischen Unterschiede in den Reaktionszeiten tatsächlich als Hinweis auf unterschiedliche Strategien bei der jeweiligen Aufgabenlösung interpretiert werden können. Handelt es sich wie in Experiment 1 um eine Aufgabe, wie beispielsweise bei der visuell-motorische Aufgabe in Kombination mit der Gedächtnisaufgabe, die sehr viel Kapazität beansprucht, wird die Zusatzaufgabe in möglichst kurzer Zeit abgearbeitet, um das eigentliche Aufgabenziel, d. h. in diesem Falle die korrekte Bewegungsausführung, zu gewährleisten. Umgekehrt besteht bei Experiment 2 die Hauptaufgabe darin, nur die Zusatzaufgabe zu bewältigen. Die vorhandene Kapazität kann also voll und ganz zur Aufgabenbewältigung genutzt werden und es zeigen sich keine modalitätsspezifischen Unterschiede, da es nicht zu einer Interferenz mit vorhandenem Gedächtnismaterial kommt. Je nach Aufgabenanforderung wird also der zeitliche Aufwand zur Durchführung der Aufgabe den Kapazitätsbegrenzungen bei der Aufgabenbewältigung angepasst. Das Argument der Strategie der Optimierung der Arbeitsabläufe bei zunehmender kognitiver Auslastung kann also gestärkt werden.

3.3 Experiment 3: Strategieeffekte II – der Einfluss der zeitlichen Abfolge von visuellen und kinästhetischen Cues

3.3.1 Methode

Stichprobe An Experiment 3 nahmen als Versuchspersonen (Vpn) zehn Studierende des Psychologischen Instituts der Johannes Gutenberg-Universität Mainz teil. Zwei Vpn waren männlich, acht weiblich. Die Altersspanne der Vpn reichte von 20 bis 29 Jahren, das Durchschnittsalter lag bei 24.7 Jahren. Alle Vpn waren rechtshändig, normalsichtig bzw. korrigiert normalsichtig und ohne neurologische Beeinträchtigung. Keine der Vpn kannte den Hintergrund dieses Experiments.

Apparatur, experimentelle Aufgabe und Prozedur

Die Versuchsanordnung war die gleiche wie in den vorhergehenden Experimenten. Der experimentelle Aufbau wurde aus Experiment 1 übernommen und unter Beibehaltung der Abfolge (Lernphase – Behaltensphase – Abrufphase) hinsichtlich der Zusatzaufgaben modifiziert. Das experimentelle Design ist in Abbildung 12 dargestellt. Während der Behaltensphase waren jeweils visuelle und motorische Trackingaufgaben in unterschiedlicher Reihenfolge zu bearbeiten. Die Trackingaufgaben sind in Abbildung 13 schematisch dargestellt. Während des Behaltensintervalls wurden visuelle und motorische Trackingaufgaben separat und nacheinander, d. h. zuerst die visuelle, dann die motorische Aufgabe (bzw. in umgekehrter Reihenfolge) bearbeitet. Zur besseren Unterscheidung für die Vpn war bei der visuellen Trackingaufgabe das Trackingobjekt blau, bei der motorischen Aufgabe rot. Das Trackingobjekt lief in allen Trackingaufgaben mit einer Geschwindigkeit von 12.5 cm/s über den Bildschirm. Zu Beginn des Behaltensintervalls wurden Trackingobjekt und Cursor auf der linken Bildschirmseite eingeblendet. Nach einer Sekunde setzte sich das Trackingobjekt in Richtung des rechten Bildschirmrandes in Bewegung. Nachdem das Trackingobjekt den rechten Bildschirmrand erreicht hatte, wurde auf der linken Bildschirmseite

ein neues Trackingobjekt eingeblendet. Nach einer Sekunde setzte sich dieses in Bewegung wie das vorhergehende Trackingobjekt. Nachdem dieses den rechten Bildschirmrand erreicht hatte, wurde die Abrufphase durch einen Signalton (600 Hz) angekündigt.

Die experimentelle Prozedur war die gleiche wie in Experiment 1 mit der Modifikation, dass zwei Experimentalblöcke sowie deren dazugehörige Trainingsblöcke zu bearbeiten waren.

Design Als unabhängige Variable wurde in diesem Experiment die Reihenfolge der Modalitäten der Trackingaufgaben, die während des Behaltensintervalls zu bearbeiten waren (visuell und motorisch, motorisch und visuell) in einem Messwiederholungsdesign getestet, d. h. jede Versuchsperson durchlief beide experimentellen Bedingungen zu jeweils 22 Trials, wobei die Bedingungen geblockt dargeboten wurden. Die Reihenfolge der Bedingungen war zwischen den Vpn randomisiert. Die abhängige Variable war die Gedächtnisleistung bei der motorischen Kurzzeitspeicherung bzw. die Beeinträchtigung selbiger durch die Bearbeitung von irrelevanten Aufgaben während des Behaltensintervalls.

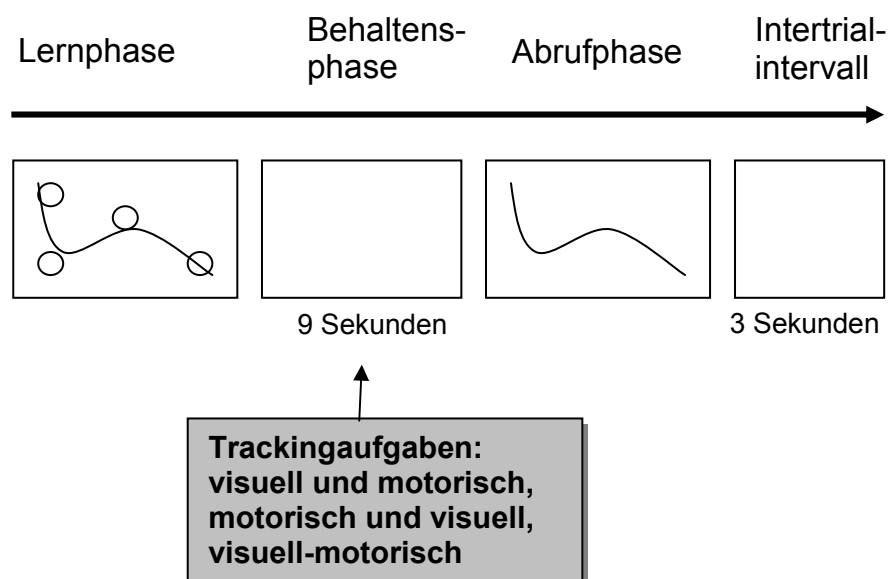


Abbildung 12: Experimentelles Paradigma in Experiment 3.

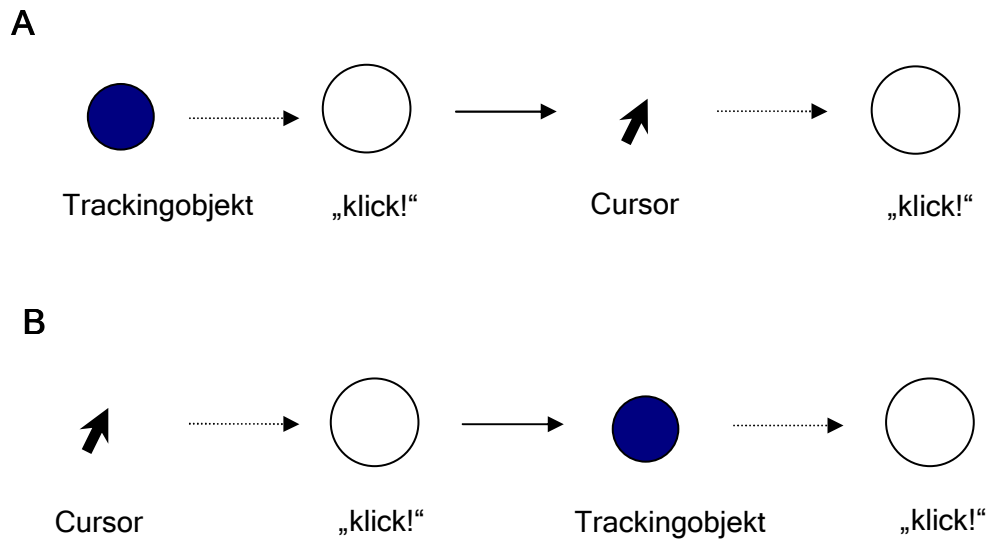


Abbildung 13: Trackingaufgaben, die während des Behaltensintervalls in Experiment 3 zu bearbeiten waren. **A** Erst visuelle, dann motorische Aufgabe. **B** Erst motorische, dann visuelle Aufgabe.

Datenaufzeichnung

Folgende Daten wurden automatisiert aufgezeichnet:

1. x- und y-Koordinaten der zu Beginn jedes Trials eingeblendeten Kreise zur Demonstration der Bewegung;
2. x- und y-Koordinaten der mittels der PC-Maus ausgeführten Bewegungen mit einer Aufzeichnungsrate von 40 Hz;
3. Bewegungsdauer von allen ausgeführten Bewegungen in Lern- und Abrufphase (in ms), d. h. der Zeitpunkt, zu dem die Maustaste gedrückt wurde, um die Bewegung zu starten bis zum Loslassen der Maustaste, welches das Ende der Bewegung signalisiert;
4. Dauer vom Erscheinen des imperativen Stimulus bis zum Bewegungsonset in Lern- und Abrufphase (in ms);
5. Reaktionszeiten (in ms) der visuellen und motorischen Trackingaufgaben, d. h. die Dauer vom Erscheinen des Stimulus bis zur Reaktion mit der Maustaste;

6. Koordinaten des Trackingobjekts, d. h. des Objekts auf dem Bildschirm, das mit dem Cursor verfolgt wurde, in der motorischen Trackingaufgabe;
7. Trackingkoordinaten des Cursors in der motorischen Trackingaufgabe;

Datenanalysen Die Bewegungsdaten wurden in einem ersten Schritt einer qualitativen Analyse unterzogen, d. h. ein Rater beurteilte, ob die reproduzierte Bewegung mit der Kriteriumsbeziehung hinsichtlich der Richtungen sowie der Anzahl der Bewegungselemente übereinstimmte. Die Prozedur der qualitativen Analyse war die gleiche wie im vorhergehenden Experiment. Im Anschluss wurde ein zweiseitiger *t*-Test für gepaarte Stichproben zum Vergleich der Mittelwerte der beiden Bedingungen der Aufgabenfolge (visuell zuerst, motorisch zuerst) durchgeführt. In einem zweiten Schritt wurde die Analyse der zeitbezogenen Maße für die Bewegungsdauer, für die Latenz des Bewegungsonset, für die Reaktionszeiten der Aufgaben, die während des Behaltensintervalls zu bearbeiten waren, sowie für die explorativen Stopps (Anzahl pro Trial, Dauer pro Stopp) durchgeführt. Die Auswertungsprozedur für diese quantitativen Maße war die gleiche wie im vorhergehenden Experiment. Für die Reaktionszeiten wurde ein zweiseitiger *t*-Test für gepaarte Stichproben zum Vergleich der Mittelwerte der beiden Bedingungen der Aufgabenfolge (visuell zuerst, motorisch zuerst) bzw. für die gemittelten Bewegungszeiten, Latenzen zum Bewegungsonset, sowie alle Maße der explorativen Stopps wurden zweifaktorielle Varianzanalysen für den Faktor Aufgabenfolge (visuell zuerst, motorisch zuerst) und Phase (Lernphase, Abrufphase) und post-hoc Tests nach Bonferroni zum Vergleich der Mittelwerte durchgeführt. Für alle statistischen Tests wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$ gesetzt.

3.3.2 Ergebnisse und Diskussion

In der qualitativen Analyse lassen sich keine Unterschiede hinsichtlich der Fehlerrate bei einem Vergleich der beiden experimentellen Bedingungen nachweisen. Ein zweiseitiger t -Test für gepaarte Stichproben belegt, dass sich die beiden Bedingungen nicht voneinander unterscheiden, $t(9) = .73$, $p > .05$.

In der Analyse der zeitbezogenen Maße zeigt sich hinsichtlich der Bewegungsdauer, dass die Bewegungsdauer in der Abrufphase über beide Bedingungen länger ist als in der Lernphase. Die ANOVA zeigt einen signifikanten Haupteffekt des Faktors Phase, $F(1, 9) = 6.17$, $p < .05$, nicht aber der Aufgabenfolge, $F(1, 9) = .31$, $p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenfolge und Phase wird nicht signifikant, $F(1, 9) = 2.58$, $p > .05$.

Hinsichtlich der Latenz des Bewegungsonset lässt sich beobachten, dass diese in der Abrufphase jeweils größer ist als in der Lernphase (siehe Abbildung 14). Die ANOVA zeigt einen signifikanten Haupteffekt des Faktors Phase, $F(1, 9) = 31.68$, $p < .001$, nicht aber der Aufgabenfolge, $F(1, 9) = .17$, $p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenfolge und Phase wird nicht signifikant, $F(1, 9) = 3.44$, $p > .05$.

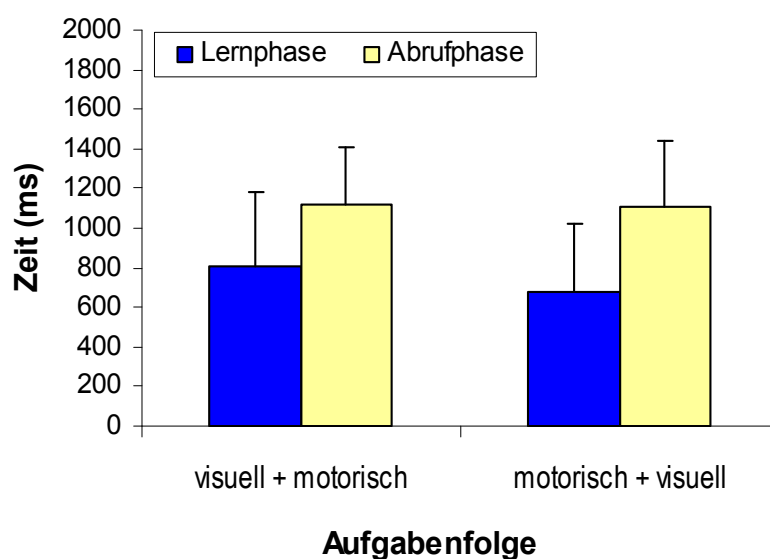


Abbildung 14: Mittlere Latenz des Bewegungsonset in Abhängigkeit von der Aufgabenfolge, dargestellt für Lern- und Abrufphase.

Hinsichtlich der Reaktionszeiten kann man beobachten, dass diese in der Bedingung, in der zuerst die motorische, dann die visuelle Aufgabe bearbeitet wurde, geringer sind (siehe Abbildung 15). Die ANOVA zeigt einen signifikanten Effekt des Faktors Aufgabenfolge, $F(1, 9) = 8.47$, $p < .05$, aber keinen Effekt des Faktors Phase, $F(1, 9) = 3.34$, $p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenfolge und Phase wird nicht signifikant, $F(1, 9) = 1.61$, $p > .05$.

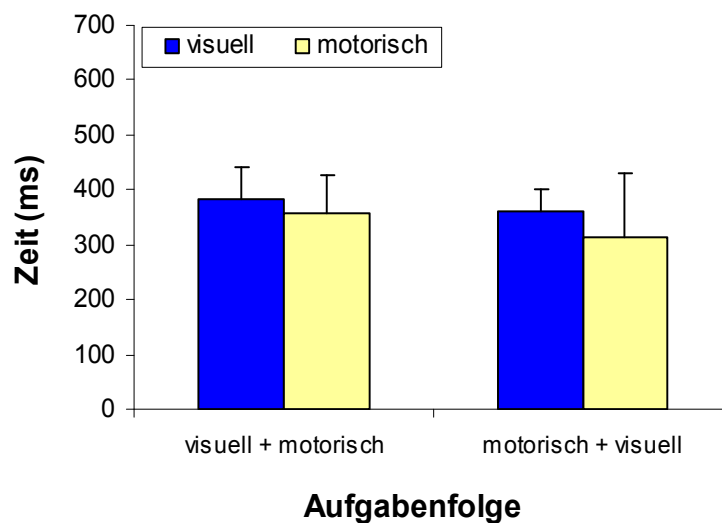


Abbildung 15: *Mittlere Reaktionszeiten in Abhängigkeit von der Aufgabenfolge.*

Bei Betrachtung der Aufgabenfolge sowie der Phase sind keine Unterschiede hinsichtlich der Dauer eines Stopps festzustellen. Die zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für die Faktoren Aufgabenfolge (visuell zuerst, motorisch zuerst) und Phase (Lernphase, Abrufphase) zeigt weder einen Effekt der Aufgabenfolge, $F(1, 9) = .15$, $p > .05$, noch der Phase, $F(1, 9) = 1.39$, $p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Phase ist nicht signifikant, $F(1, 9) = .17$, $p > .05$. Ebenfalls zeigen sich keine Unterschiede, sowohl hinsichtlich der Anzahl explorativer Stopps als auch der langen und kurzen Stopps. Zur Analyse der Anzahl der Stopps wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für die Faktoren Aufgabenfolge (visuell zuerst, motorisch zuerst) und Phase (Lernphase, Abrufphase) durchgeführt, diese

zeigt weder Effekte der Aufgabenfolge, $F(1, 9) = .89, p > .05$, noch der Phase, $F(1, 9) = 1.03, p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenfolge und Phase wird nicht signifikant, $F(1, 9) = 1.51, p > .05$. Für die Analyse der langen Stopps wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für die Faktoren Aufgabenfolge (visuell zuerst, motorisch zuerst) und Phase (Lernphase, Abrufphase) durchgeführt, diese zeigt weder Effekte der Aufgabenfolge, $F(1, 9) = .03, p > .05$, noch der Phase, $F(1, 9) = 1.11, p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenfolge und Phase wird nicht signifikant, $F(1, 9) = 2.89, p > .05$. Zur Analyse der kurzen Stopps wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für die Faktoren Folge (visuell zuerst, motorisch zuerst) und Phase (Lernphase, Abrufphase) durchgeführt, diese zeigt keine Effekte der Aufgabenfolge, $F(1, 9) = .79, p > .05$, und der Phase, $F(1, 9) = 1.10, p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenfolge und Phase wird nicht signifikant, $F(1, 9) = 2.09, p > .05$.

Wie bereits in den vorhergehenden Experimenten ist eine Überschätzung der Bewegungsdauer sowie eine vergrößerte Latenz des Bewegungsonset in der Abrufphase gegenüber der Lernphase in beiden Bedingungen zu beobachten. Hinsichtlich der explorativen Stopps zeigen sich in diesem Experiment keine Unterschiede der beiden experimentellen Bedingungen. Zwar findet sich hinsichtlich der Fehlerraten kein Unterschied, die Reaktionszeiten lassen jedoch darauf schließen, dass strategische Effekte bei der Aufgabenbewältigung eine Rolle spielen, wobei die Reaktionszeiten in der Bedingung mit zuerst motorischer, dann visueller Trackingaufgabe insgesamt kürzer sind. Die sowohl in der visuellen als auch in der motorischen Trackingaufgabe kürzeren Reaktionszeiten sprechen für einen Mechanismus der zeitlichen Optimierung der Arbeitsabläufe, der bei dieser Aufgabenfolge ausgeprägter zu sein scheint, was zunächst darauf hindeutet, dass diese Aufgabe schwieriger zu bewältigen war. Möglicherweise ist die Bearbeitung zuerst einer motorischen, dann einer visuellen Aufgabe innerhalb des Behaltensintervalls anspruchsvoller als in umgekehrter Reihenfolge, weil es aufgrund der Aufgabenstruktur zu einer Gewichtung von visuellen und motorischen Informationen kommt, die den

Anforderungen der Zielaufgabe entspricht (Bagesteiro, Sarlegna & Sainburg, 2006; Boulinguez & Rouhana, 2008; Sarlegna & Sainburg, 2007; Sober & Sabes, 2005). Da die Versuchspersonen in der Abrufphase kein visuelles Feedback während der Bewegungsausführung erhalten, sondern auf kinästhetische und propriozeptive Hinweisreize bei der Bewegungskontrolle zurückgreifen müssen, findet möglicherweise eine Gewichtung zugunsten der motorischen Cues während der Lern- und Behaltensphase statt. In der Bedingung, in der zuerst die motorische Aufgabe im Behaltensintervall zu bearbeiten ist, wird daher eine Etablierung der inneren Bewegungsrepräsentation mit stärkerer Gewichtung der motorischen Cues schwieriger, so dass es zu Kompensationsmechanismen kommt. Verantwortlich dafür könnten kapazitätsaufwendige Transformationen zwischen visuellen und propriozeptiven Referenzsystemen sein (Adamovich et al., 1998; Sober & Sabes, 2003; Soechting & Flanders, 1989; van Beers et al., 2002a).

Abschließend erwähnt sei an dieser Stelle, dass die Schwierigkeit in beiden Experimentalbedingungen von den Versuchspersonen als sehr hoch eingestuft wurde. Dennoch ist es bemerkenswert, dass die Aufgabe mit einer relativ geringen Fehlerrate bewältigt werden konnte, was die große Flexibilität des kognitiven Systems auch bei der Bewältigung von Aufgaben dieser Art belegt.

4 Der Beitrag von visuellen und kinästhetischen Cues zu einer redundanten Codierung von Bewegungen

4.1 Experiment 4: Sind kinästhetische Informationen bei der Lösung von motorischen Arbeitsgedächtnisaufgaben erforderlich?

In Experiment 4 wird untersucht, ob kinästhetische Information in der Lernphase zur erfolgreichen Aufgabenlösung erforderlich ist. Dazu wurde die Lernphase des Experimentes variiert, indem die Probanden in einer Bedingung die Bewegung selbst ausführten (kinästhetisch-visuelle Lernphase), während sie die Bewegung in der zweiten Bedingung nur beobachten (visuelle Lernphase). Um zu testen, in welcher der beiden Bedingungen tatsächlich originär motorische Information im Arbeitsgedächtnis gespeichert wird, wurde im Behaltensintervall wieder eine visuelle, eine motorische sowie eine visuell-motorische Zusatzaufgabe realisiert. Die Hypothese ist, dass in den rein visuellen Lernphasen die Bewegungsreproduktion sehr ungenau und anfällig für störende Einflüsse durch Zusatzaufgaben, vor allem durch die visuelle und visuell-motorische Aufgabe, wird. Dies sollte sich in einer insgesamt höheren Fehlerrate in den Bedingungen mit rein visueller Lernphase, insbesondere in der visuellen und visuell-motorischen Bedingung, zeigen. Ferner sollte dieses Muster durch die zeitbezogenen Maße bestätigt werden, wobei in den Bedingungen mit rein visueller Lernphase insgesamt höhere Latenzen zum Bewegungsonset als Ausdruck von Schwierigkeiten beim Abruf, in Kombination mit gegenüber den Bedingungen mit kinästhetischer Information während der Lernphase verringerten Reaktionszeiten als Hinweis auf Optimierungsprozesse bei Kapazitätsauslastung zu finden sein werden. Die Anzahl und Dauer der

explorativen Stopps sollte ebenfalls als Anzeichen für Unsicherheit beim Abruf in den Bedingungen mit visueller Lernphase erhöht sein.

4.1.1 Methode

Stichprobe An Experiment 4 nahmen dreizehn Versuchspersonen (Vpn) teil, alle waren Studierende des Psychologischen Instituts der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. Sechs Vpn waren männlich, sieben weiblich. Die Altersspanne der Vpn reichte von 20 bis 35 Jahren, das Durchschnittsalter lag bei 26.2 Jahren. Alle Vpn waren rechtshändig, normalsichtig bzw. korrigiert normalsichtig und ohne neurologische Beeinträchtigung. Keine der Vpn kannte den Hintergrund dieses Experiments.

Apparatur, experimentelle Aufgabe und Prozedur

Die Versuchsapparatur war die gleiche wie in den vorhergehenden Experimenten, ebenfalls die Gedächtnisaufgabe mit folgender Modifikation, dass die Lernphase unter Beibehaltung der Phasenabfolge (Lernphase, Behaltensintervall, Abrufphase) variiert wurde (siehe Abbildung 16). Während die Vpn wie bisher in der Lernphase die durch vier Kreise angedeutete Bewegung selbst ausführten, wurde ebenfalls der Fall getestet, dass die Vpn die Bewegung lediglich beobachteten. Es gab also zwei verschiedene Lernphasen: mit eigener Bewegungsausführung (kinästhetisch-visuelle Lernphase) und ohne Bewegungsausführung (visuelle Lernphase) durch die Vpn während der Lernphase. In den Bedingungen ohne Bewegungsausführung in der Lernphase beobachteten die Vpn einen schwarzen Cursor (Durchmesser 0.5 cm), der entlang der durch die Kreise angedeuteten Bewegungslinie verlief. Die Dauer der Bewegung wurde auf 3.0 s für alle Bewegungen festgelegt, wobei zur Feststellung dieses Wertes die Bewegungsdauer in der Lernphase in den vorhergehenden Experimenten gemittelt und gerundet wurde. Die ausgeführte bzw. beobachtete Bewegung war während eines Intervalls von neun Sekunden zu behalten. Während des Behaltensintervalls sollten

Trackingaufgaben bearbeitet werden bzw. in den Kontrollbedingungen wurde nur ein leerer Bildschirm gezeigt. Nach dem Behaltensintervall erschien in der Mitte des Monitors ein Punkt, der den Probanden signalisierte, die zuvor ausgeführte Bewegung zu wiederholen. Dabei wurde kein visuelles Feedback gegeben, d. h. der Cursor wurde während der Bewegungsausführung nicht eingeblendet, stattdessen war der schwarze Punkt in der Mitte des Bildschirms bis zum Ende der Bewegungsausführung zu sehen. Als Trackingaufgaben wurden die gleichen wie die bereits in Experiment 1 verwendeten Trackingaufgaben (visuell, visuell-motorisch, motorisch) mit Ausnahme der phonologischen Aufgabe getestet. Die experimentelle Prozedur war ebenfalls die gleiche wie in den vorhergehenden Experimenten mit der Modifikation, dass die acht Experimentalblöcke (kinästhetisch-visuelle und visuelle Lernphase: jeweils visuelles, visuell-motorisches, motorisches Tracking und Kontrollbedingung ohne Aufgabe) sowie die dazugehörigen Trainingblöcke aufgeteilt auf zwei Sitzungen von den Vpn in randomisierter Reihenfolge bearbeitet wurden.

Datenaufzeichnung

Folgende Daten wurden automatisiert aufgezeichnet:

1. x- und y-Koordinaten der zu Beginn jedes Trials eingeblendeten Kreise;
2. x- und y-Koordinaten der mittels der PC-Maus ausgeführten Bewegungen mit einer Aufzeichnungsrate von 40 Hz;
3. Bewegungsdauer von allen ausgeführten Bewegungen in Lern- und Abrufphase (in ms), d. h. der Zeitpunkt, zu dem die Maustaste gedrückt wurde, um die Bewegung zu starten bis zum Loslassen der Maustaste, welches das Ende der Bewegung signalisiert;
4. Dauer vom Erscheinen des imperativen Stimulus bis zum Bewegungsonset in Lern- und Abrufphase (in ms) in den kinästhetisch-visuellen Lernbedingungen sowie Dauer zum Bewegungsonset in der Abrufphase in allen Durchgängen mit visueller Lernbedingung;

-
5. Reaktionszeiten (in ms) der visuellen, visuell-motorischen und motorischen Trackingaufgaben, d. h. Dauer von Erscheinen des Stimulus bis zur Reaktion mit der Maustaste;
 6. Koordinaten des Trackingobjekts, d. h. des Objekts auf dem Bildschirm, das mit dem Cursor verfolgt wurde, in den visuell-motorischen und motorischen Trackingaufgaben;
 7. Trackingkoordinaten des Cursors in den visuell-motorischen und motorischen Trackingaufgaben;

Design Zwei unabhängige Variablen wurden in diesem Experiment in einem Messwiederholungsdesign getestet, nämlich die Modalität der Trackingaufgabe, die während des Behaltensintervalls zu bearbeiten war (visuell, visuell-motorisch, motorisch, keine Aufgabe) sowie die Art der Lernphase (visuelle und kinästhetisch-visuelle Lernphase), d. h. jede Versuchsperson durchlief alle acht experimentellen Bedingungen zu jeweils 22 Trials, wobei die Bedingungen geblockt dargeboten wurden. Die Reihenfolge der Bedingungen war zwischen den Vpn randomisiert. Die abhängige Variable war die Gedächtnisleistung bei der motorischen Kurzzeitspeicherung bzw. die Beeinträchtigung selbiger durch die Bearbeitung von irrelevanten Aufgaben während des Behaltensintervalls.

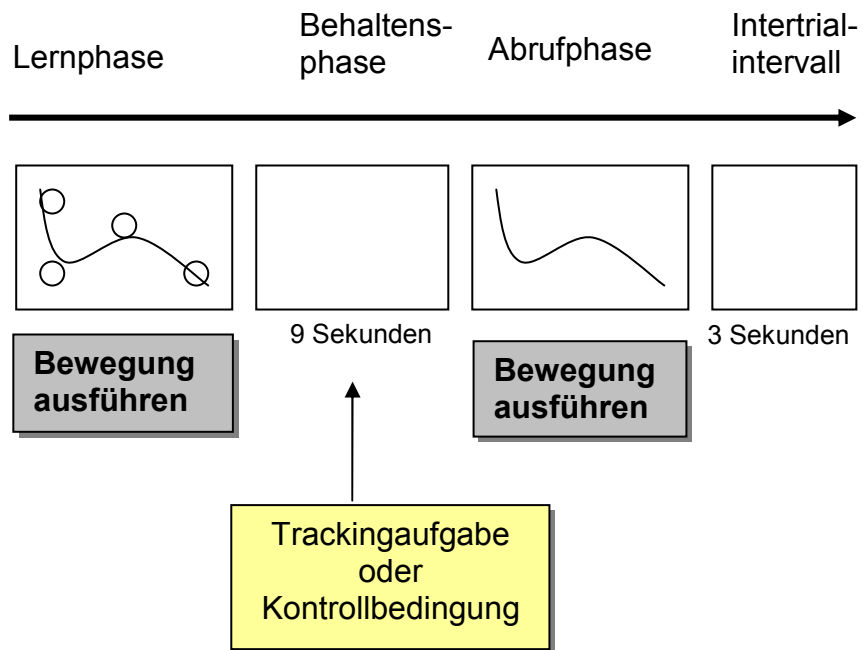
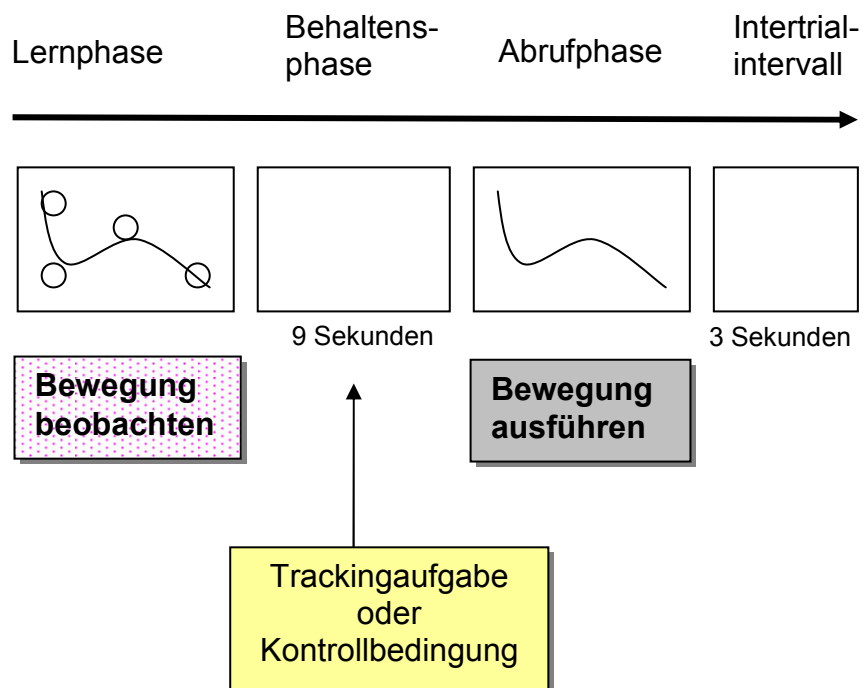
A**B**

Abbildung 16: Versuchsdesign von Experiment 4. **A** Kinästhetisch-visuelle Lernphase: die Bewegung wird sowohl in Lern- als auch Abrufphase ausgeführt. **B** Visuelle Lernphase: die Bewegung wird in der Lernphase nur beobachtet, in der Abrufphase ausgeführt.

Datenanalysen Die Bewegungsdaten der Gedächtnisaufgabe wurden in einem ersten Schritt einer qualitativen Analyse unterzogen. Die Prozedur der qualitativen Analyse war die gleiche wie in den vorhergehenden Experimenten. Im Anschluss wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung für die Faktoren Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) und Art der Lernphase (kinästhetisch-visuell, visuell) sowie post-hoc Tests nach Bonferroni zum Vergleich der Mittelwerte durchgeführt. Für alle statistischen Tests wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$ gesetzt.

In einem zweiten Schritt wurde die Analyse der zeitbezogenen Maße für die Bewegungsdauer, für die Latenz des Bewegungsonset, für die Reaktionszeiten der Aufgaben, die während des Behaltensintervalls zu bearbeiten waren, sowie für die explorativen Stopps (Anzahl Stopps pro Trial, Anzahl langer bzw. kurzer Stopps, mittlere Dauer pro Stopp) durchgeführt. Die Auswertungsprozedur für diese quantitativen Maße war die gleiche wie in den vorhergehenden Experimenten. Für die Reaktionszeiten wurde eine zweifaktorielle ANOVA für die Faktoren Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch, motorisch) und Art der Lernphase (kinästhetisch-visuell, visuell) bzw. für die gemittelten Bewegungszeiten, Latenzen zum Bewegungsonset, sowie alle Maße der explorativen Stopps wurden jeweils zweifaktorielle Varianzanalysen für die Faktoren Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) und Art der Lernphase (kinästhetisch-visuell, visuell) sowie post-hoc Tests nach Bonferroni zum Vergleich der Mittelwerte durchgeführt, wobei nur die Abrufphasen miteinander verglichen wurden, da in den Bedingungen mit rein visueller Lernphase die Kriteriumsbeziehung bereits festgelegt war. Die Lernphase der Bedingungen mit kinästhetisch-visueller Lernphase wurde jeweils mit einer separaten einfaktoriellen ANOVA für den Faktor Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) sowie post-hoc Tests nach Bonferroni untersucht. Für alle statistischen Tests wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$ gesetzt.

4.1.2 Ergebnisse

4.1.2.1 Qualitative Analyse

In Abbildung 17 sind die mittleren Fehlerraten für die verschiedenen Aufgabenmodalitäten (visuell, visuell-motorisch, motorisch, keine Aufgabe) sowie für die beiden Lernphasen (visuell und kinästhetisch-visuell) dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Aufgabenbearbeitung in der rein visuellen und kinästhetisch-visuellen Lernphase einen vergleichbaren Schwierigkeitsgrad hat, da sich die visuelle von der kinästhetisch-visuellen Kontrollbedingung nicht unterscheidet. Wie bereits in Experiment 1 zeigt sich, dass die visuell-motorischen Bedingungen in beiden Lernphasen einen störenden Einfluss auf die Gedächtnisleistung hinsichtlich der Fehlerrate haben, wobei in der kinästhetisch-visuellen Lernphase dieser Effekt ausgeprägter ist als in der rein visuellen Lernphase. Während sich die motorischen Bedingungen von der Kontrollbedingung unterscheiden, findet sich kein Unterschied von visuellen Bedingungen und Kontrollbedingungen. Bei einer genaueren Einzelbetrachtung der Aufgabenmodalitäten jeweils nur für die visuelle bzw. kinästhetisch-visuelle Lernphase, ergibt sich ein differenzierteres Bild, wobei sich die motorische Bedingung in der rein visuellen Lernphase von der visuellen Bedingung unterscheidet, in der kinästhetisch-visuellen Lernphase wird ein Unterschied von motorischer und visueller Bedingung nicht sichtbar. Die ANOVA zeigt einen hochsignifikanten Haupteffekt für den Faktor Aufgabenmodalität, $F(3, 36) = 23.43$, $p < .001$, und für den Faktor Lernphase, $F(1, 12) = 21.37$, $p = .001$, mit einer hochsignifikanten Interaktion von Aufgabenmodalität und Lernphase, $F(3, 36) = 6.63$, $p = .001$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen, dass sich die visuell-motorischen Bedingungen signifikant von den visuellen ($p = .001$) und von den Kontrollbedingungen ($p < .001$) unterscheiden, nicht aber von den motorischen Bedingungen ($p > .05$). Die motorischen Bedingungen unterscheiden sich von den Kontrollbedingungen ($p < .001$), nicht aber von den visuellen Bedingungen ($p > .05$). Ferner findet sich kein Unterschied von visuellen Bedingungen und Kontrollbedingungen ($p > .05$). Ein zweiseitiger t -Test für gepaarte Stichproben für einen Vergleich der

Mittelwerte der beiden Kontrollbedingungen belegt zudem, dass sich die visuelle von der kinästhetisch-visuellen Kontrollbedingung nicht unterscheidet, $t(12) = .46, p > .05$.

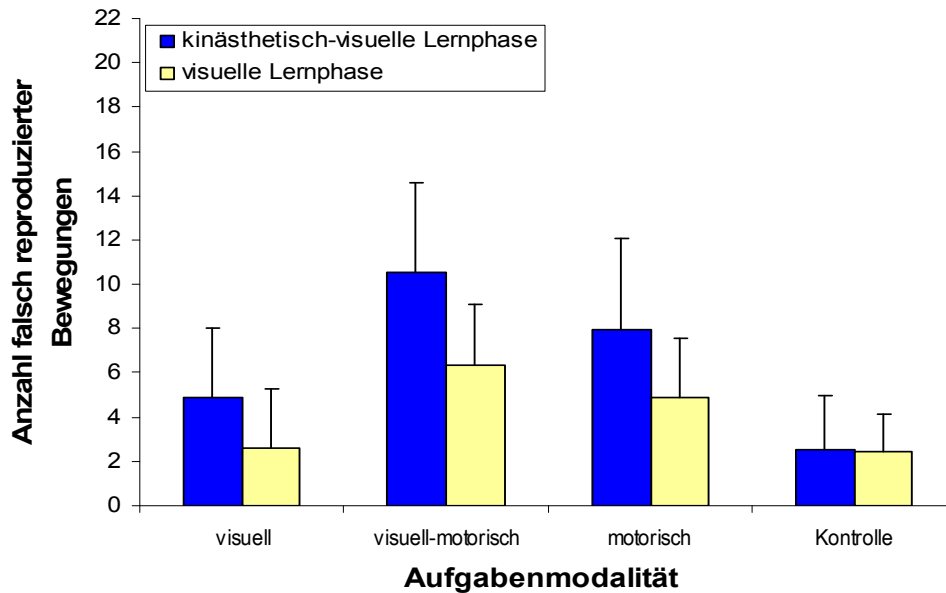


Abbildung 17: Mittlere Fehlerrate in Abhängigkeit von der Aufgabenmodalität und der Art der Lernphase.

Ferner wurden zwei separate einfaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung für den Faktor Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch, motorisch, keine Aufgabe) sowie post-hoc Tests nach Bonferroni jeweils nur für die kinästhetisch-visuelle bzw. visuelle Lernphase durchgeführt. Die ANOVA nur für die kinästhetisch-visuelle Lernphase zeigt einen signifikanten Effekt auf, $F(3, 36) = 23.78, p < .001$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen hier, dass sich die visuell-motorische Bedingung signifikant von der visuellen Bedingung ($p < .01$) und von der Kontrollbedingung ($p < .001$) unterscheidet, nicht aber von der motorischen Aufgabe ($p > .05$). Die motorische Bedingung unterscheidet sich von der Kontrollbedingung ($p < .001$), nicht aber von der visuellen Bedingung ($p > .05$). Es findet sich kein Unterschied von visueller Bedingung und Kontrollbedingung ($p > .05$) hinsichtlich der Fehlerrate. Die ANOVA nur für die visuelle Lernphase zeigt ebenfalls einen signifikanten Haupteffekt auf, $F(3, 36) = 11.48, p < .001$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen hier, dass sich die visuell-motorische Bedingung

signifikant von der visuellen Bedingung ($p < .01$) und von der Kontrollbedingung ($p < .01$) unterscheidet, nicht aber von der motorischen Aufgabe ($p > .05$). Die motorische Bedingung unterscheidet sich von der Kontrollbedingung ($p < .01$) und von der visuellen Bedingung ($p < .05$). Ferner findet sich kein Unterschied von visueller Bedingung und Kontrollbedingung ($p > .05$) hinsichtlich der Fehlerrate.

4.1.2.2 Analyse der zeitbezogenen Maße

Bewegungsdauer In Abbildung 18 ist die durchschnittliche Bewegungsdauer in Lern- und Abrufphase für jeweils die kinästhetisch-visuellen und visuellen Lernphasen in Abhängigkeit von der jeweiligen Aufgabenmodalität dargestellt. Zunächst wurden die beiden Lernphasen (visuell, kinästhetisch-visuell) miteinander verglichen.

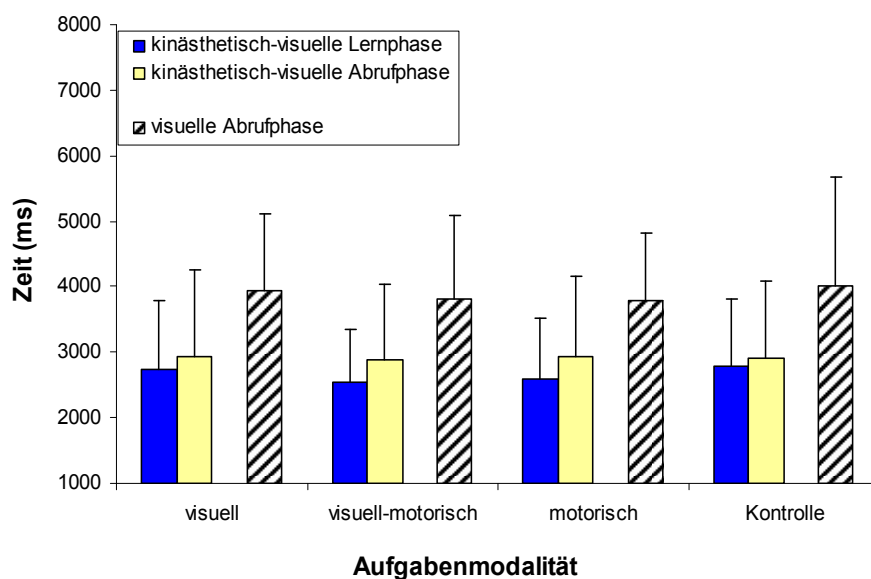


Abbildung 18: Mittlere Bewegungsdauer in Abhängigkeit von der Aufgabenmodalität, dargestellt für die kinästhetisch-visuelle Lern- und Abrufphase sowie für die visuelle Abrufphase.

Die ANOVA zeigt einen hochsignifikanten Haupteffekt für den Faktor Lernphase auf, $F(1, 12) = 19.40$, $p = .001$, während für den Faktor Aufgabenmodalität der Effekt nicht signifikant ist, $F(3, 36) = .24$, $p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Lernphase ist nicht signifikant,

$F(3, 36) = .37, p > .05$. Bei dem Vergleich der Bedingungen nur mit kinästhetisch-visueller Lernphase zeigt sich ein signifikanter Effekt der Phase, $F(1, 12) = 7.35, p < .05$, während für den Faktor Aufgabenmodalität kein Effekt zu beobachten ist, $F(3, 36) = .29, p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Lernphase ist hochsignifikant, $F(3, 36) = 4.44, p < .01$.

Ferner wurden zwei separate Varianzanalysen mit Messwiederholung für den Faktor Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) für die Lern- und Abrufphase der Bedingungen mit kinästhetisch-visueller Lernphase durchgeführt sowie für die Abrufphase der Bedingungen mit rein visueller Lernphase. Es zeigen sich keine Effekte der Aufgabenmodalität, weder in der Lernphase, $F(3, 36) = .92, p > .05$, noch in der Abrufphase, $F(3, 36) = .06, p > .05$, ebenfalls nicht für die Abrufphase der Bedingungen mit rein visueller Lernphase, $F(1, 12) = .49, p > .05$.

Latenz des Bewegungsonset In Abbildung 19 ist die mittlere Latenz des Bewegungsonset in Abhängigkeit von der Art der Lernphase und Aufgabenmodalität dargestellt. Vor allem in der visuell-motorischen Bedingung ist für die Lernphasen mit und ohne kinästhetischer Information die Latenz größer. Zunächst wurde ein Vergleich der beiden Lernphasen (visuell, kinästhetisch-visuell) vorgenommen. Die ANOVA zeigt einen hochsignifikanten Haupteffekt des Faktors Aufgabenmodalität, $F(3, 36) = 16.36, p < .001$, nicht aber für die Art der Lernphase, $F(1, 12) = .50, p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Lernphase wird nicht signifikant, $F(3, 36) = 1.86, p > .05$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen, dass sich die visuell-motorischen Bedingungen signifikant von den visuellen ($p < .01$), von den motorischen ($p < .05$), und von den Kontrollbedingungen ($p < .01$) unterscheiden. Die motorischen Bedingungen unterscheiden sich von den Kontrollbedingungen ($p < .05$), nicht aber von den visuellen Bedingungen ($p > .05$). Es findet sich kein Unterschied von visuellen Bedingungen und Kontrollbedingungen ($p > .05$). Ferner wurde eine separate zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für die Faktoren Aufgabenmodalität (visuell, visuell-

motorisch, motorisch, keine Aufgabe) und Phase (visuell, kinästhetisch-visuell) nur für die Bedingungen mit kinästhetisch-visueller Lernphase durchgeführt, diese zeigt einen hochsignifikanten Haupteffekt für den Faktor Aufgabenmodalität auf, $F(3, 36) = 7.77$, $p < .001$, ebenso für den Faktor Phase, $F(1, 12) = 19.59$, $p = .001$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Lernphase ist ebenfalls hochsignifikant, $F(3, 36) = 13.10$, $p < .001$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen, dass sich die visuell-motorische Bedingung signifikant von der visuellen Bedingung ($p < .05$) und von der Kontrollbedingung ($p < .05$), nicht aber von der motorischen Bedingung ($p > .05$) unterscheidet. Alle weiteren Vergleiche sind hinsichtlich der Latenz des Bewegungsonset nicht signifikant.

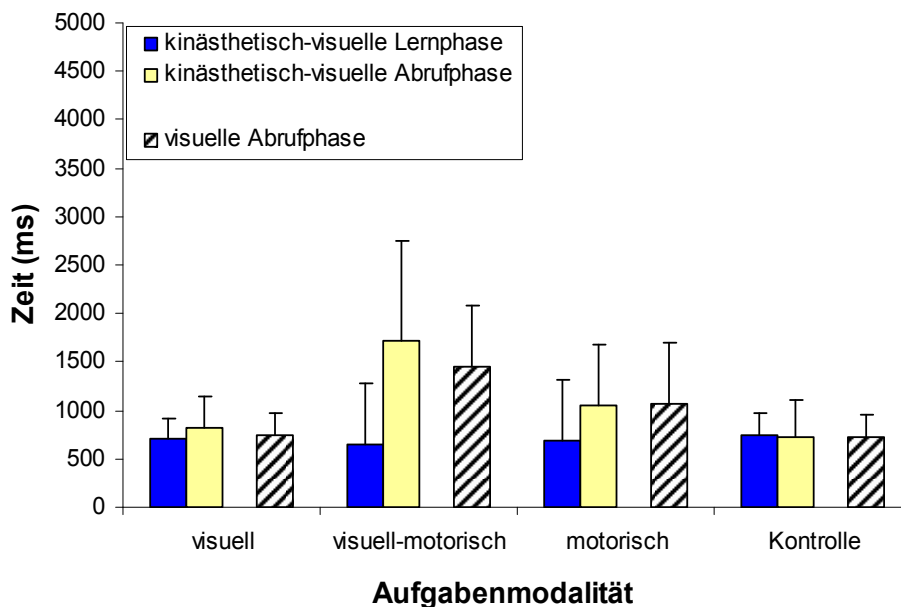


Abbildung 19: Mittlere Latenz des Bewegungsonset in Lern- und Abrufphase in Abhängigkeit von der Aufgabenmodalität, dargestellt für die kinästhetisch-visuelle Lern- und Abrufphase sowie für die visuelle Abrufphase.

Zusätzlich wurde für die Bedingungen mit kinästhetisch-visueller Lernphase für die Lern- und Abrufphase sowie für den Abruf bei rein visueller Lernphase jeweils eine einfaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für den Faktor Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) gerechnet. Die ANOVA nur für

die Lernphase der Bedingungen mit kinästhetisch-visueller Lernphase zeigt keinen Haupteffekt auf, $F(3, 36) = 1.06$, $p > .05$. Für die Abrufphase findet sich dagegen ein hochsignifikanter Effekt, $F(3, 36) = 10.74$, $p < .001$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen hier, dass sich die visuell-motorische Bedingung signifikant von der visuellen Bedingung ($p < .05$) und von der Kontrollbedingung ($p < .01$), nicht aber von der motorischen Bedingung ($p > .05$) unterscheidet. Die visuelle Bedingung unterscheidet sich nicht von der Kontrollbedingung ($p > .05$) und von der motorischen Bedingung ($p > .05$). Ferner findet sich kein Unterschied von motorischer Bedingung und Kontrollbedingung ($p > .05$) hinsichtlich der Latenz des Bewegungsonset. Für den Abruf der Bedingungen mit rein visueller Lernphase zeigt sich ein hochsignifikanter Haupteffekt auf, $F(3, 36) = 15.92$, $p < .001$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen, dass sich die visuell-motorische Bedingung signifikant von der visuellen Bedingung ($p = .001$), von der motorischen ($p = .05$) und von der Kontrollbedingung ($p = .001$) unterscheidet.

Reaktionszeiten In Abbildung 20 sind die mittleren Reaktionszeiten der Trackingaufgaben (visuell, visuell-motorisch, motorisch) für die visuelle und kinästhetisch-visuelle Lernphase dargestellt. Hinsichtlich der beiden Arten der Lernphasen ist kein Unterschied in den Reaktionszeiten beobachtbar. Dagegen findet sich ein deutlicher Effekt der Aufgabenmodalität: in der visuell-motorischen Bedingung ist bei beiden Lernphasen die Reaktionszeit gegenüber den anderen Bedingungen deutlich verringert, wobei in den visuellen Bedingungen die Reaktionszeiten länger sind als in den motorischen Bedingungen.

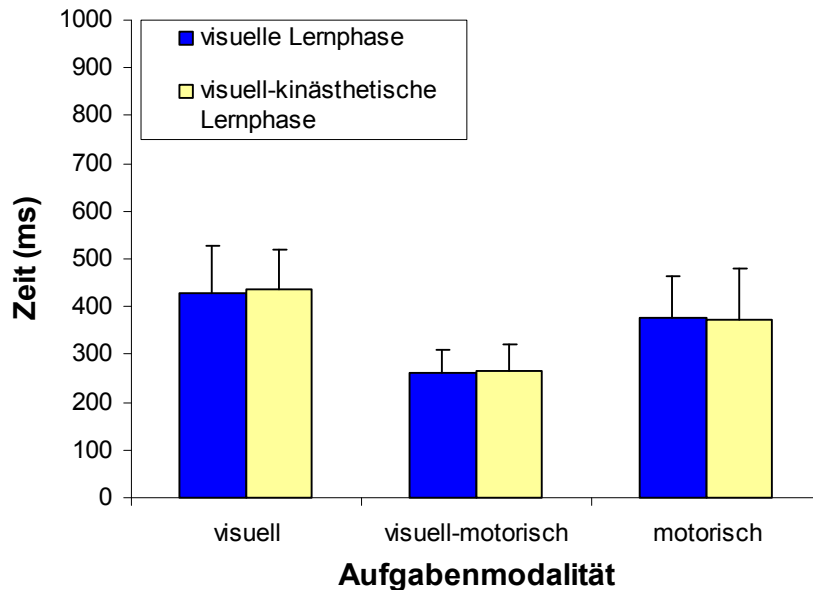


Abbildung 20: Mittlere Reaktionszeiten in Abhängigkeit von der Aufgabenmodalität und der Art der Lernphase.

Die ANOVA zeigt einen hochsignifikanten Haupteffekt der Aufgabenmodalität, $F(2, 24) = 54.32, p < .001$, nicht aber der Lernphase, $F(1, 12) = .001, p > .05$. Ebenfalls ist die Interaktion von Aufgabenmodalität und Lernphase nicht signifikant, $F(2, 24) = .08, p > .05$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen, dass sich die visuell-motorischen Bedingungen signifikant von den anderen Bedingungen hinsichtlich der Reaktionszeiten unterscheiden, nämlich von den visuellen ($p < .001$) und von den motorischen Bedingungen ($p < .01$). Ferner unterscheidet sich die visuelle von der motorischen Bedingung ($p < .001$).

4.1.2.3 Explorative Stopps

Dauer eines Stopps In Abbildung 21 ist die durchschnittliche Dauer der Stopps pro Bedingung und Phase dargestellt. In den Bedingungen mit rein visueller Lernphase ist die Stoppdauer länger als in den Bedingungen mit kinästhetisch visueller Lernphase. Ferner ist zu beobachten, dass bei einem Vergleich der Bedingungen mit kinästhetisch-visueller Lernphase die Stopps in der Abrufphase länger sind als in der Lernphase.

Die zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für die Faktoren Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch, motorisch,

Kontrollbedingung) und Art der Lernphase (visuell, kinästhetisch-visuell) zeigt einen signifikanten Haupteffekt der Lernphase, $F(1, 11) = 17.02$, $p < .05$. Ein Effekt der Aufgabenmodalität bleibt aus, $F(3, 33) = .21$, $p > .05$, ebenfalls ist die Interaktion von Aufgabenmodalität und Lernphase nicht signifikant, $F(3, 33) = .96$, $p > .05$.

Zusätzlich wurden jeweils getrennt für die visuelle und kinästhetisch-visuelle Lernphase Effekte der Aufgabenmodalität untersucht. Eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für die Faktoren Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) und Phase (Lernphase, Abrufphase) nur für die Bedingungen mit kinästhetisch-visueller Lernphase zeigt einen hochsignifikanten Effekt der Phase, $F(1, 11) = 8.96$, $p = .01$, nicht aber der Aufgabenmodalität, $F(3, 33) = 20$, $p > .05$. Ebenfalls wird die Interaktion von Aufgabenmodalität und Lernphase nicht signifikant, $F(3, 33) = 1.21$, $p > .05$. Zusätzlich wurde für die Bedingungen mit kinästhetisch-visueller Lernphase für die Lern- und Abrufphase sowie für den Abruf bei rein visueller Lernphase jeweils eine einfaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für den Faktor Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) durchgeführt. Die ANOVA nur für die Lernphase bei kinästhetisch-visueller Lernphase zeigt keinen Effekt der Aufgabenmodalität, $F(3, 33) = .52$, $p > .05$, ebenfalls findet sich kein Effekt für die Abrufphase, $F(3, 33) = .50$, $p > .05$. Ferner findet sich kein Effekt für den Abruf bei rein visueller Lernbedingung für den Faktor Aufgabenmodalität, $F(3, 33) = .50$, $p > .05$.

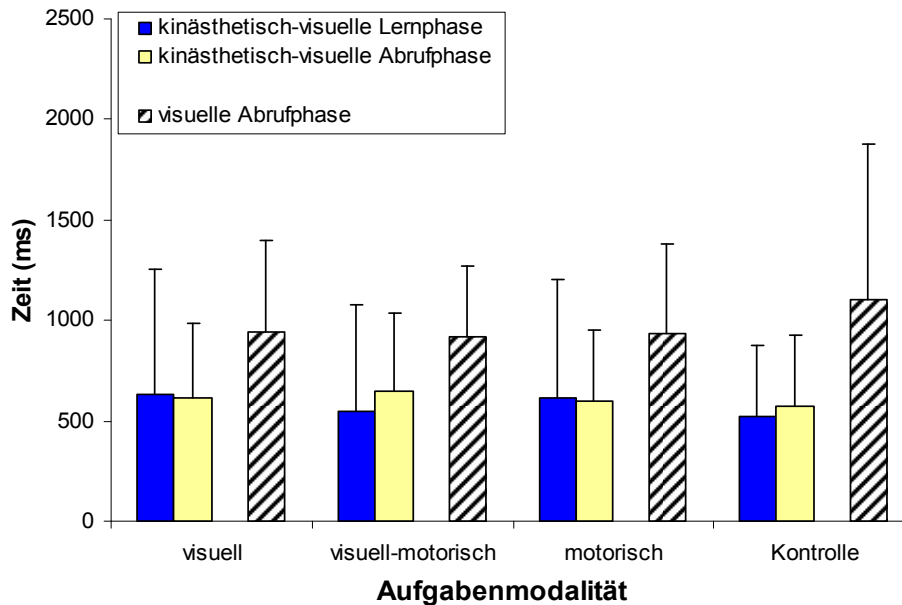


Abbildung 21: Mittlere Dauer eines explorativen Stopps in Abhängigkeit von der Aufgabenmodalität, dargestellt für die kinästhetisch-visuelle Lern- und Abrufphase sowie für die visuelle Abrufphase.

Anzahl explorativer Stopps In Abbildung 22 ist die Anzahl explorativer Stopps pro Trial dargestellt. Die zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für die Faktoren Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) und Art der Lernphase (visuell, kinästhetisch-visuell) zeigt keinen signifikanten Haupteffekt der Lernphase, $F(1, 11) = .15, p > .05$. Ein Effekt der Aufgabenmodalität ist jedoch signifikant, $F(3, 33) = 3.95, p < .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Lernphase ist nicht signifikant, $F(3, 33) = .46, p > .05$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen, dass sich die visuelle Bedingung von der Kontrollbedingung unterscheidet ($p < .05$). Zusätzlich wurden jeweils getrennt für die visuelle und kinästhetisch-visuelle Lernphase Effekte der Aufgabenmodalität untersucht. Eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für die Faktoren Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) und Phase (Lernphase, Abrufphase) nur für die Bedingungen mit kinästhetisch-visueller Lernphase zeigt keine signifikanten Effekte, weder der Phase, $F(1, 11) = 1.40, p > .05$, noch der Aufgabenmodalität, $F(3, 33) = 2.28, p > .05$. Ebenfalls wird

die Interaktion von Aufgabenmodalität und Lernphase nicht signifikant, $F(3, 33) = 1.20$, $p > .05$. Zusätzlich wurde für die Bedingungen mit kinästhetisch-visueller Lernphase für die Lern- und Abrufphase sowie für den Abruf bei rein visueller Lernphase jeweils eine einfaktorische ANOVA mit Messwiederholung für den Faktor Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) durchgeführt. Die ANOVA nur für die Lernphase bei kinästhetisch-visueller Lernphase zeigt einen signifikanten Effekt der Aufgabenmodalität, $F(3, 33) = 2.87$, $p < .05$, nicht aber für die Abrufphase, $F(3, 33) = .62$, $p > .05$. Die ANOVA nur für den Abruf mit rein visueller Lernphase zeigt ebenfalls keinen Effekt auf, $F(3, 33) = .98$, $p > .05$.

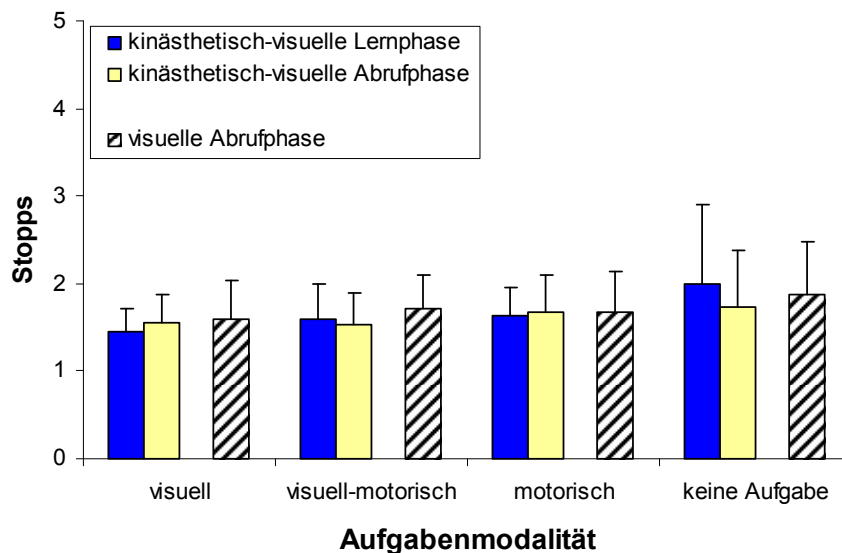


Abbildung 22: Mittlere Anzahl explorativer Stopps pro Trial in Abhängigkeit von der Aufgabenmodalität, dargestellt für die kinästhetisch-visuelle Lern- und Abrufphase sowie für die visuelle Abrufphase.

Anzahl langer Stopps In Abbildung 23 ist die Anzahl langer Stopps pro Trial dargestellt. Die zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für die Faktoren Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) und Art der Lernphase (visuell, kinästhetisch-visuell) zeigt einen signifikanten Haupteffekt der Lernphase, $F(1, 11) = 9.73$, $p = .01$, nicht aber der Aufgabenmodalität, $F(3, 33) = .17$, $p > .05$, ebenfalls ist die Interaktion von Aufgabenmodalität und Lernphase nicht signifikant,

$F(3, 33) = .12, p > .05$. Zusätzlich wurden jeweils getrennt für die visuelle und kinästhetisch-visuelle Lernphase Effekte der Aufgabenmodalität untersucht. Eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für die Faktoren Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) und Phase (Lernphase, Abrufphase) für die kinästhetisch-visuelle Lernphase zeigt einen signifikanten Effekt der Phase, $F(1, 11) = 5.45, p < .05$, nicht aber der Aufgabenmodalität, $F(3, 33) = .06, p > .05$. Ebenfalls ist die Interaktion von Aufgabenmodalität und Lernphase nicht signifikant, $F(3, 33) = .86, p > .05$. Zusätzlich wurde für die Bedingungen mit kinästhetisch-visueller Lernphase für die Lern- und Abrufphase sowie für den Abruf bei rein visueller Lernphase jeweils eine einfaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für den Faktor Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) durchgeführt. Die ANOVA nur für die Lernphase bei kinästhetisch-visueller Lernphase zeigt keinen Effekt der Aufgabenmodalität, $F(3, 33) = .59, p > .05$, ebenfalls zeigt sich für die Abrufphase kein Effekt der Aufgabenmodalität, $F(3, 33) = .27, p > .05$. Die ANOVA nur für den Abruf bei rein visueller Lernphase zeigt ebenfalls keinen Effekt, $F(3, 33) = .10, p > .05$.

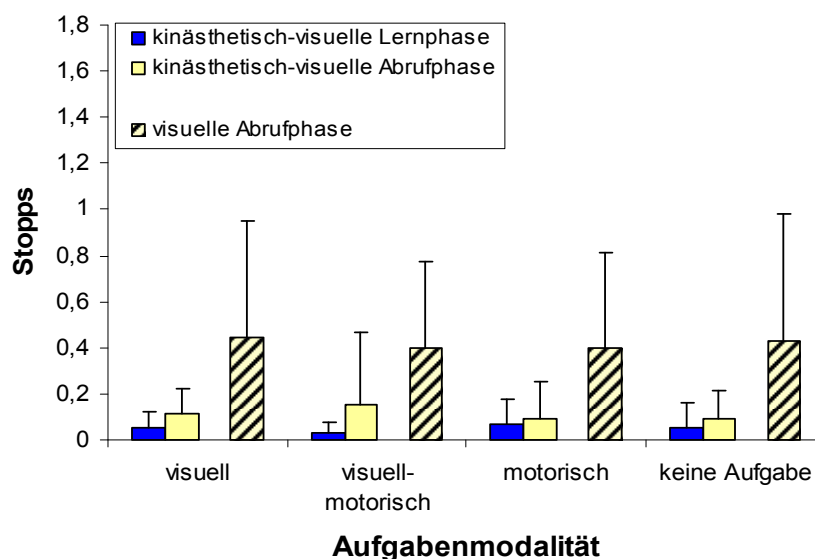


Abbildung 23: Mittlere Anzahl langer Stops pro Trial in Abhängigkeit von der Aufgabenmodalität, dargestellt für die kinästhetisch-visuelle Lern- und Abrufphase sowie für die visuelle Abrufphase.

Anzahl kurzer Stopps Zunächst wurden die Abrufphasen der beiden Lernbedingungen (visuell, kinästhetisch-visuell) verglichen. Die ANOVA zeigt weder einen signifikanten Haupteffekt der Lernphase, $F(1, 11) = 2.92, p > .05$, noch einen Effekt der Aufgabenmodalität, $F(3, 33) = 3.47, p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Lernphase wird nicht signifikant, $F(3, 33) = 1.08, p > .05$. Zusätzlich wurden jeweils getrennt für die visuelle und kinästhetisch-visuelle Lernphase Effekte der Aufgabenmodalität untersucht. Eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für die Faktoren Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch, motorisch, Kontrollbedingung) und Phase (Lernphase, Abrufphase) nur für die Bedingungen mit kinästhetisch-visueller Lernphase zeigt keine signifikanten Effekte, weder der Phase, $F(1, 11) = .85, p > .05$, noch der Aufgabenmodalität, $F(3, 33) = 1.65, p > .05$. Ebenfalls ist die Interaktion von Aufgabenmodalität und Lernphase nicht signifikant, $F(3, 33) = .68, p > .05$. Zusätzlich wurde für die Bedingungen mit kinästhetisch-visueller Lernphase für die Lern- und Abrufphase sowie für den Abruf bei rein visueller Lernphase jeweils eine einfaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für den Faktor Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch, motorisch, keine Aufgabe) durchgeführt. Die ANOVA nur für die Lernphase zeigt keinen Effekt, $F(3, 33) = 2.65, p > .05$, ebenfalls zeigt sich für die Abrufphase kein Effekt der Aufgabenmodalität, $F(3, 33) = 1.28, p > .05$. Die ANOVA nur für den Abruf für die Bedingungen mit rein visueller Lernphase zeigt ebenso keinen Effekt auf, $F(3, 33) = .67, p > .05$.

4.1.3 Diskussion

Bevor der Einfluss kinästhetischer Information während der Lernphase diskutiert wird, soll zuerst auf die Ergebnisse der Bedingungen mit kinästhetisch-visueller Lernphase eingegangen werden. In diesem Experiment wurde die gleiche experimentelle Aufgabe wie bereits in Experiment 1 verwendet, d. h. zu der motorischen Gedächtnisaufgabe wurden die gleichen Zusatzaufgaben bearbeitet (visuell, visuell-motorisch, motorisch). Die Ergebnisse aus Experiment 1 konnten in diesem Experiment repliziert werden. Wie bereits dort findet sich auch in diesem Experiment eine deutlich erhöhte Fehlerrate in der visuell-motorischen Aufgabe. Hinsichtlich der zeitbezogenen Maße ist ebenfalls eine erhöhte Latenz des Bewegungsonset in der Abrufphase, sowie eine verringerte Reaktionszeit in der visuell-motorischen Aufgabe zu beobachten. Ferner zeigt sich über alle Bedingungen hinweg das gleiche Muster der Überschätzung der Bewegungsdauer in der Abrufphase gegenüber der Lernphase. Außerdem findet sich in der Kontrollbedingung wieder eine höhere Anzahl von Stopps im Bewegungsfluss als in den Bedingungen mit Zusatzaufgabe.

Neben der Replikation der Ergebnisse aus Experiment 1 lassen sich Unterschiede zwischen den beiden Lernphasen (mit kinästhetischer und visueller bzw. mit rein visueller Information) beobachten. Dies zeigt sich anhand der Maße der Fehlerrate, der Bewegungsdauer sowie der Stoppdauer, welche im Folgenden diskutiert werden.

In den Bedingungen mit kinästhetisch-visueller Lernphase ist über alle Bedingungen mit Zusatzaufgabe während des Behaltensintervalls insgesamt eine höhere Fehlerrate zu verzeichnen als in den Bedingungen mit rein visueller Lernphase. Die visuell-motorische Aufgabe wirkt sich in beiden Lernbedingungen störend auf die Gedächtnisleistung aus, wobei diese Aufgabe bei kinästhetisch-visueller Lernphase mehr Fehler als die motorische, in der visuellen Lernphase jedoch genauso viele Fehler wie die motorische bewirkt. In der Kontrollbedingung ohne Zusatzaufgabe ist die Fehlerrate dagegen bei beiden Lernphasen gleich, was dafür spricht, dass die beobachteten Effekte nicht auf eine unterschiedliche

Schwierigkeit der reinen Gedächtnisaufgabe hinsichtlich der beiden Lernphasen visuell bzw. kinästhetisch-visuell zurückzuführen sind. Der Unterschied in der Fehlerrate ist also auf die Bearbeitung einer zusätzlichen Aufgabe zurückzuführen.

Die deutlich erhöhte Fehlerrate über alle experimentellen Bedingungen mit Zusatzaufgabe bei denen kinästhetische Information während der Lernphase zur Verfügung stand, gibt Anlass, die eingangs formulierten Hypothesen zu diskutieren. Zum einen wurde die Hypothese bestätigt, dass motorische Information, wenn sie während der Encodierphase vorhanden ist, berücksichtigt wird. Dieses Ergebnis lässt sich mit Aussagen der Forschung zur motorischen Kontrolle stützen, da eine Hinzunahme propriozeptiver Information im Sinne einer redundanten Bewegungsrepräsentation bei räumlich gerichteten Bewegungen gezeigt werden konnte (z. B. Rosenbaum & Chaiken, 2001; Rosenbaum, Meulenbroeck & Vaughan, 1999).

Ferner ist der Unterschied der beiden Lernphasen ein deutliches Indiz dafür, dass die Schlussfolgerungen auf ein motorisches Subsystem innerhalb des Arbeitsgedächtnisses unter Verwendung des Paradigmas der Handlungsspanne, in der Weise, wie es Smyth und weitere Autoren postulieren (Rumiati & Tessari, 2002; Smyth, Pearson & Pendleton, 1988; Smyth & Pendleton, 1989, 1990; Tessari & Rumiati, 2002) zu hinterfragen sind. Diese Autoren verwenden ein experimentelles Paradigma, bei dem den Versuchspersonen während der Lernphase keine originär motorischen Informationen zur Verfügung standen. Basierend auf diesem methodischen Ansatz ist es daher unzulässig, explizit einen motorischen Speicher anzunehmen mit der Argumentation, dass in diesem Speicher vor allem Bewegungen verarbeitet werden, die propriozeptive Informationen enthalten, wie es bei Bewegungskonfigurationen der Fall ist. Möglicherweise würde bei vorhandener kinästhetischer Information während der Lernphase ein anderes Ergebnis zustande kommen, etwa dass im Sinne einer redundanten Speicherung eine motorische Zweitaufgabe nicht zu einem Zusammenbruch der Gedächtnisleistung führt.

Ferner zeigt sich in diesem Experiment, dass die Argumentation von Smyth et al. (Smyth & Pendleton, 1989, 1990) zur Erklärung der unterschiedlichen Störwirkung von motorischen Zweitaufgaben bei räumlich gerichteten Bewegungen und Bewegungskonfigurationen nicht haltbar ist. Die Autoren argumentieren, dass räumlich gerichtete Bewegungen, da sie vor allem räumliche Verarbeitung erfordern, im visuell-räumlichen Subsystem verarbeitet werden und somit keine Ressourcen des motorischen Subsystems beanspruchen. Im vorliegenden Experiment konnte gezeigt werden, dass, sogar wenn keinerlei motorische Information bei räumlich gerichteten Bewegungen während der Lernphase vorhanden ist, die visuell-motorische Aufgabe die Gedächtnisleistung beeinträchtigt, die visuelle Aufgabe dagegen nicht. Räumlich gerichtete Bewegungen werden also nicht rein visuell verarbeitet, selbst wenn während der Encodierphase nur visuelle Informationen vorhanden sind. Möglicherweise sind es Prozesse der Generierung von motorischen Befehlen und deren Integration mit Informationen aus anderen Modalitäten, die hierbei eine Rolle spielen (Della Sala & Logie, 2002; Logie, 1996).

Während die Hypothese, dass kinästhetische Information bei der Lösung von motorischen Arbeitsgedächtnisaufgaben hinzugezogen wird, falls sie vorhanden ist, eindeutig bestätigt werden konnte, ist die Hypothese über die Folgen bzw. den Sinn dieser redundanten Verarbeitung eingehender zu diskutieren. Die Erwartung war, dass die redundante Speicherung zu einer verbesserten Leistung beim Abruf führt. Anhand der Fehlerrate lässt sich zeigen, dass dies anscheinend nicht der Fall ist: kinästhetische Information während der Lernphase ist zur Aufgabenlösung gar nicht erforderlich, da in den Bedingungen, in denen keine kinästhetische Information zur Verfügung stand, die Aufgabe trotzdem gut gelöst wurde. Darüber hinaus ist die Fehlerrate in den Bedingungen mit rein visueller Lernphase sogar über alle Bedingungen mit Zusatzaufgabe geringer. Dieses Ergebnis impliziert zunächst, dass kinästhetische Information während der Lernphase sogar hinderlich bei der Aufgabenbewältigung ist, zumindest hinsichtlich der Fehlerrate. Werden dagegen zeitliche Parameter der Aufgabenlösung beachtet, zeigt

sich, dass die Bewegungsgeschwindigkeit bei einer Lernphase ohne kinästhetische Information extrem überschätzt wird. Wie sind diese beiden Gegensätze, nämlich zum einen die sich nachteilig auf die Fehlerrate auswirkende kinästhetisch-visuelle Lernphase, welche aber zu einer genaueren Reproduktion der Geschwindigkeit beiträgt, zu erklären? Dazu wird zunächst die Überschätzung der Bewegungsdauer diskutiert, wobei hier mehrere Erklärungsansätze möglich sind.

(1) Kinästhetische Information dient der Stabilisierung der internen Bewegungsrepräsentation, wie auch die Forschung zur motorischen Kontrolle belegt. Zeitliche Charakteristika einer Bewegung werden nicht nur visuell, sondern vor allem über kinästhetische und propriozeptive Informationen vermittelt (siehe McCloskey, 1973, 1978). Kinästhetische, propriozeptive und kutan vermittelte Geschwindigkeitsinformationen, die aus einer zuvor ausgeführten Bewegung resultieren, sind in den Bedingungen mit visueller Lernphase nicht vorhanden und es kommt zu Unsicherheiten beim Bewegungsabruf hinsichtlich der Bewegungsgeschwindigkeit, da die Bewegung basierend auf visuellen Geschwindigkeitsinformationen ausgeführt wird. Wie in der Forschung zur motorischen Kontrolle gezeigt werden konnte, sind solche unimodalen Repräsentationen unsicherer als bimodale Repräsentationen (Desmurget et al., 1995; Rossetti et al., 1995; van Beers et al., 1996). Möglicherweise ist die Bewegungskorrektur aufgrund der unimodalen visuellen Bewegungsrepräsentation unsicher und daher aufgrund von anfallenden Kompensationsmechanismen zeitaufwendiger.

(2) Neben der redundanten Verarbeitung, die der Stabilisierung der internen Bewegungsrepräsentation dient, spielen möglicherweise aktive Verarbeitungsmechanismen eine Rolle. Dafür sprechen längere Stopps beim Abruf in den Bedingungen mit rein visueller Lernphase gegenüber den Bedingungen mit kinästhetisch-visueller Lernphase sowie das Vorhandensein des Vierfachen an langen Stopps (länger als 1000 ms). Da lange Stopps mit aktiven Rekonstruktionsprozessen assoziiert werden, könnten diese zu der beobachteten Überschätzung der Bewegungsdauer beitragen, allerdings nur zu einem Teil, da die durchschnittliche Differenz der Stoppdauer bei einem Vergleich der beiden Lernphasen (visuell,

kinästhetisch-visuell) bei ca. 400 ms liegt, die Differenz der Bewegungsdauer liegt dagegen bei ca. 1000 ms.

Zusammenfassend scheinen also zu der Überschätzung der Bewegungsdauer in den Bedingungen mit rein visueller Lernphase sowohl Unsicherheiten über die Bewegungsgeschwindigkeit aufgrund von mangelnder kinästhetischer Information in der Lernphase, Kompensationsmechanismen als auch aktive Rekonstruktionsprozesse beizutragen. Die interne Bewegungsrepräsentation scheint also durch originär motorische Information stabilisiert zu werden, wobei diese vor allem das „wie“ vermittelt, nämlich die Art und Weise der Ausführung der Bewegung wie etwa die Geschwindigkeit, während visuelle Information vor allem das „was“ vermittelt, d. h. das Ziel der Aufgabe, nämlich die hinsichtlich des äußeren Erscheinungsbildes korrekte Bewegungsausführung. Nun lässt sich aber entgegen den Vorteilen einer redundanten Verarbeitung eine höhere Fehlerrate bei der Lernbedingung mit kinästhetischer und visueller Information feststellen. Die Integration kinästhetischer Information in der Lernphase erfordert größeren Aufwand, daher zeigen sich mehr Fehler beim Abruf in den Bedingungen mit kinästhetisch-visueller Lernphase. Trotz dieser nachteiligen Wirkung wird kinästhetische Information herangezogen.

Diese zunächst widersprüchlichen Ergebnisse deuten darauf hin, dass das kognitive System immer kinästhetische Information heranzieht, wenn diese vorhanden ist (siehe auch Rosenbaum, 2001; Sarlegna & Sainburg, 2007), um eine größere Stabilität und Fehlertoleranz bei der Ausführung von zuvor gelernten Bewegungen zu gewährleisten. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass es sich hierbei um einen automatischen Mechanismus handelt, wobei sich die Versuchspersonen gegen diese Art der Strategiewahl nicht wehren können. Es kommt also zu einem Konflikt zwischen zwei automatisch ablaufenden Strategien, nämlich der Strategie der redundanten Verarbeitung einerseits und der Anpassung an die Kapazitätsbegrenzungen andererseits.

Die kinästhetischen Cues dienen der Stabilisierung der internen Repräsentation der gelernten Bewegung. Sie müssen zu den visuellen Cues hinzu codiert werden und bilden mit diesen zusammen eine

insgesamt größere Informationseinheit, die kurzfristig anfälliger für externe Störungen ist. Auf lange Sicht gesehen ist diese Strategie der Hinzunahme zusätzlicher Informationen zwar sinnvoll, da die Bewegungsausführung insgesamt sicherer ist, was sich am Beispiel der Geschwindigkeit zeigen lässt. In der künstlichen Laborsituation, ist dieser Mechanismus jedoch unterlegen, da in den Bedingungen mit visueller Lernphase als Resultat eine geringere Fehlerrate zu beobachten ist. Unter kognitiver Auslastung ist die visuelle Strategie erfolgreicher, da aufgrund fehlender kinästhetischer Information der Gedächtnisinhalt weniger umfangreich und daher unanfälliger für Störungen ist. Beim Rekonstruktionsprozess verbleibt mehr Kapazität für einen aktiven und durchdachten Abrufprozess der beobachteten Bewegung, was sich anhand der langen Stopps zeigen lässt.

Die Redundanz scheint auf lange Sicht gesehen eine sehr günstige Strategie zu sein, da sie Priorität vor der Anpassung an Kapazitätsbegrenzungen hat. Aus evolutionärer Sichtweise könnte argumentiert werden, dass in der Entwicklung des Menschen keine Notwendigkeit bestanden hat, unter kognitiver Auslastung Bewegungen zu lernen. Priorität hat neben einer korrekten Bewegungsausführung vor allem die Stabilität der internen Bewegungsrepräsentation, mit der Fehler minimiert oder unter Belastung kompensiert werden können. Die adäquate Ausführung einer Bewegung ist vor allem dann gewährleistet, wenn Cues aus mehreren Modalitäten integriert werden. Dies konnte auf neurophysiologischer Seite gezeigt werden (Rossetti et al., 1995; van Beers et al., 1996).

Zusammenfassend kann man feststellen, dass kinästhetische Information zwar nicht zur Lösung von motorischen Arbeitsgedächtnisaufgaben erforderlich ist, diese jedoch der Stabilisierung der internen Bewegungsrepräsentation dient. In diesem Experiment konnte gezeigt werden, dass originär motorische Information während der Lernphase die Geschwindigkeit der Bewegungsausführung vermittelt. Kinästhetische Information wird verwendet, falls sie zur Verfügung steht, wobei es sich bei dieser sensorischen Integration um einen automatischen Prozess handelt, der nicht einer top-down Kontrolle unterliegt.

4.2 Experiment 5: Redundante Codierung von Bewegungen und die Rolle visueller Cues

Wie in Experiment 4 gezeigt werden konnte, wird kinästhetische Information während der Bewegungsausführung herangezogen, auch wenn dies, zumindest kurzfristig gesehen, Nachteile mit sich bringt. Das Hinzunehmen von Information scheint also nicht aktiv, d. h. im Sinne einer top-down Verarbeitung kontrollierbar zu sein, sondern weitgehend automatischen Mechanismen zu unterliegen. In diesem Experiment soll geprüft werden, ob sich dieser Effekt der redundanten Verarbeitung auch für visuelle Information einstellt, etwa wenn aufgabenirrelevante visuelle Stimuli dargeboten werden. Dazu wird während der Zusatzaufgabe visuelles Feedback über die eigene Handlungskonsequenz dargeboten, d. h. die Versuchspersonen sehen bei der Bewegungsausführung das Nachbild der eigenen Bewegung. In Experiment 5 wurden zwei visuell-motorische Aufgaben realisiert, die während des Behaltensintervalls zu bearbeiten waren, wobei entweder (1) das Nachbild des Cursors während der Bewegungsausführung zu sehen war oder (2) der Cursor zwar während der Bewegung sichtbar war, jedoch kein Nachbild hinterließ. Sollten aufgabenirrelevante visuelle Stimuli bei der Aufgabenlösung herangezogen werden, so dürfte in der Bedingung mit visuellem Feedback eine größere Störwirkung zu beobachten sein als in der Bedingung ohne Feedback. Dies sollte sich in einer höheren Fehlerrate, sowie in den zeitbezogenen Maßen in einer größeren Latenz des Bewegungsonset in der Abrufphase in Kombination mit einer geringeren Latenz in der Lernphase zeigen. Ferner sollte die Reaktionszeit in der Bedingung mit irrelevantem visuellem Feedback länger sein. Hinsichtlich der explorativen Stopps sollte sich in dieser Bedingung wegen der kognitiven Auslastung eine geringere Anzahl an Stopps feststellen lassen.

4.2.1 Methode

Stichprobe An Experiment 5 nahmen 16 Vpn teil, darunter waren vierzehn Studierende des Psychologischen Instituts der Johannes

Gutenberg-Universität Mainz. Vier Vpn waren männlich, zwölf weiblich. Die Altersspanne der Vpn reichte von 19 bis 27 Jahren, das Durchschnittsalter lag bei 21.1 Jahren. Alle Versuchspersonen waren rechtshändig, normalsichtig bzw. korrigiert normalsichtig und ohne neurologische Beeinträchtigung. Keine der Versuchspersonen kannte den Hintergrund dieses Experiments.

Versuchsapparatur, experimentelle Aufgabe, Prozedur

Die Versuchsapparatur war die gleiche wie in Experiment 1. Das in diesem Experiment verwendete experimentelle Design ist in Abbildung 24 dargestellt, welches aus Experiment 1 übernommen wurde (siehe oben). Unter Beibehaltung der bisherigen Abfolge (Lernphase, Behaltensphase, Abrufphase) waren während der Behaltensphase visuell-motorische Zusatzaufgaben unter Modifikation des visuellen Feedbacks zu bearbeiten, wobei es zwei unterschiedliche Aufgaben gab. Die beiden Zusatzaufgaben sind in Abbildung 25 schematisch dargestellt. Es handelt sich bei beiden Aufgaben um visuell-motorische Aufgaben, d. h. Aufgaben mit visuellen und motorischen Anforderungen. Die Versuchspersonen sollten während des Behaltensintervalls in einem Kreis (Durchmesser von 2.0 cm) mit dem Cursor (Durchmesser 0.5 cm) beliebig malen, wobei die Kreislinie nicht überschritten werden durfte. Das visuelle Feedback über die Bewegungsausführung, d. h. das visuelle Nachbild der Cursorspur wurde dabei variiert. In der Bedingung mit visuellem Nachbild war die Spur des Cursors während des Ausmalens zu sehen, während in der Bedingung ohne visuelles Feedback der Cursor zwar zu sehen war, dieser jedoch keine Spur hinterließ. Die Probanden sollten solange im Kreis mit dem Cursor malen, bis ein weiterer Kreis in schwarzer Farbe erschien (Durchmesser 2.0 cm) erschien, auf den schnellstmöglich mit einem Tastendruck auf die linke Maustaste reagiert werden sollte.

Die experimentelle Prozedur war die gleiche wie in Experiment 1 mit der Modifikation, dass in diesem Experiment zwei Experimentalblöcke (Feedback, kein Feedback) mit den jeweils dazugehörigen Trainingsblöcken zu jeweils 10 Trials zu bearbeiten waren.

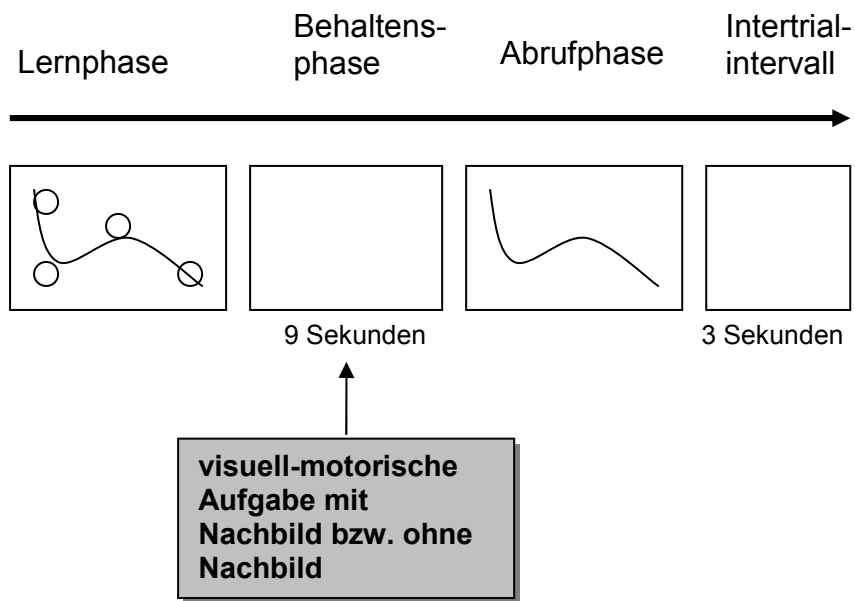


Abbildung 24: Versuchsdesign des fünften Experiments.

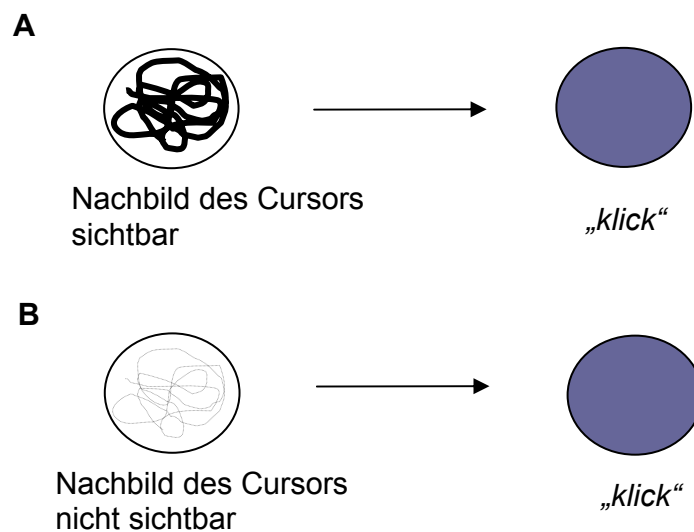


Abbildung 25: Aufgaben, die in Experiment 5 während des Behaltensintervalls zu bearbeiten waren. Die Versuchspersonen sollten in einem Kreis mit dem Cursor malen und bei Erscheinen eines weiteren Kreises mit Tastendruck reagieren. Das Nachbild des Cursors war während der Bewegungsausführung innerhalb des Kreises entweder sichtbar (A) oder unsichtbar (B).

Design Als unabhängige Variable wurde in diesem Experiment das Vorhandensein eines visuellen Nachbildes (Nachbild der Cursorspur bzw. kein Nachbild der Cursorspur) in der Aufgabe, die während des Behaltensintervalls zu bearbeiten war, getestet. In einem Messwiederholungsdesign wurden beide experimentellen Bedingungen zu jeweils 25 Trials getestet, wobei die Bedingungen geblockt dargeboten wurden. Die Reihenfolge der Bedingungen war zwischen den Vpn randomisiert. Die abhängige Variable war die Gedächtnisleistung bei der motorischen Kurzzeitspeicherung bzw. die Beeinträchtigung selbiger durch die Bearbeitung von irrelevanten Aufgaben während des Behaltensintervalls.

Datenaufzeichnung

Folgende Daten wurden automatisiert aufgezeichnet:

1. x- und y-Koordinaten der zu Beginn jedes Trials eingeblendeten Kreise;
2. x- und y-Koordinaten der mittels der PC-Maus ausgeführten Bewegungen mit einer Aufzeichnungsrate von 40 Hz;
3. Bewegungsdauer von allen ausgeführten Bewegungen in Lern- und Abrufphase (in ms), d. h. der Zeitpunkt, zu dem die Maustaste gedrückt wurde, um die Bewegung zu starten bis zum Loslassen der Maustaste, welches das Ende der Bewegung signalisiert;
4. Dauer vom Erscheinen des imperativen Stimulus bis zum Bewegungsonset in Lern- und Abrufphase (in ms);
5. Reaktionszeiten (in ms) der beiden visuell-motorischen Aufgaben, d. h. Dauer von Erscheinen des Stimulus bis zur Reaktion mit der Maustaste;
6. Bewegungskoordinaten des Cursors bei beiden visuell-motorischen Aufgaben;

Datenanalysen Als Kontrollvariable wurde die Quantität des Trackings für jeden Trial erfasst, d. h. Trials, in denen der Cursor weniger als 400 Pixel bewegt wurde, wurden von der Analyse ausgeschlossen, da hier davon auszugehen ist, dass die Aufgabe nicht instruktionsgemäß ausgeführt wurde. Ferner wurde als weitere Kontrollvariable die Reaktionszeit in den während des Behaltensintervalls zu bearbeitenden

Aufgaben herangezogen. Trials, in denen die Reaktionszeit größer als 800 ms war, wurden von der weiteren Datenanalyse ausgeschlossen. Die Trials, die mindestens eines dieser beiden Kriterien nicht erfüllten, wurden von der weiteren Datenanalyse ausgeschlossen.

Die Bewegungsdaten wurden in einem ersten Schritt einer qualitativen Analyse unterzogen. Die Prozedur der qualitativen Analyse war die gleiche wie in den vorhergehenden Experimenten. Es wurde im Anschluss ein zweiseitiger t -Test zum Vergleich der Mittelwerte der beiden Feedbackbedingungen (Nachbild, kein Nachbild) durchgeführt.

In einem zweiten Schritt wurde die Analyse zeitbezogener Maße für die Bewegungsdauer, für die Latenz des Bewegungsonset, für die Reaktionszeiten der Aufgaben, die während des Behaltensintervalls zu bearbeiten waren, sowie für die explorativen Stopps (mittlere Dauer pro Stopp, Anzahl Stopps pro Trial, Anzahl kurzer bzw. langer Stopps) durchgeführt. Die Auswertungsprozedur für diese zeitbezogenen Maße war die gleiche wie in den vorhergehenden Experimenten. Für die Reaktionszeiten wurde ein zweiseitiger t -Test zum Vergleich der Mittelwerte der beiden Feedbackbedingungen (Nachbild, kein Nachbild) bzw. für die gemittelten Bewegungszeiten, Latenzen zum Bewegungsonset, sowie alle Maße der explorativen Stopps wurden jeweils zweifaktorielle Varianzanalysen für die Faktoren visuelles Feedback (Nachbild, kein Nachbild) und Art der Lernphase (kinästhetisch-visuell, visuell) durchgeführt. Für alle statistischen Tests wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$ gesetzt.

4.2.2 Ergebnisse

4.2.2.1 Kontrollvariablen

Bei 98,1 % aller Trials wurde die Aufgabe während des Behaltensintervalls instruktionsgemäß ausgeführt, d. h. die Reaktionszeiten überstiegen nicht das festgelegte Maß von 800 ms bzw. die festgelegte Trackinglänge von mindestens 400 Pixel wurde nicht unterschritten.

4.2.2.2 Qualitative Auswertung

Die Ergebnisse der qualitativen Auswertung sind Abbildung 26 dargestellt. Es wird deutlich, dass das visuelle Nachbild einen Einfluss auf die Gedächtnisleistung hat, wobei die Anzahl der nicht korrekt reproduzierten Bewegungen in der Bedingung mit visuellem Feedback, d. h. sichtbarer Cursorspur während des Malens, gegenüber der Bedingung ohne Nachbild erhöht ist. Ein zweiseitiger t -Test für gepaarte Stichproben belegt, dass sich die beiden Bedingungen des visuellen Feedbacks hinsichtlich der Fehlerrate unterscheiden, $t(15) = 2.21$, $p < .05$.

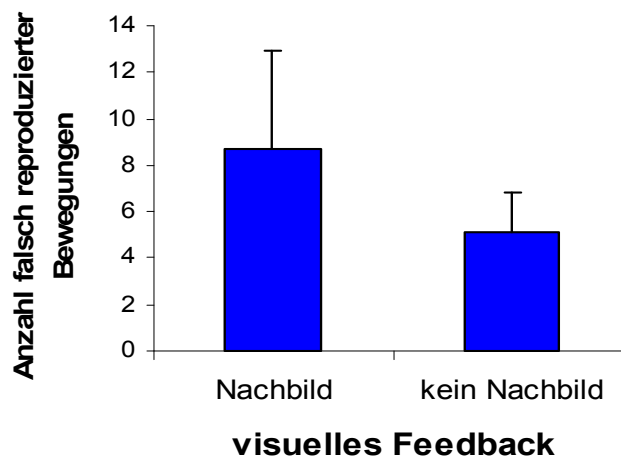


Abbildung 26: Mittlere Fehlerrate in Abhängigkeit von der Art des visuellen Feedbacks.

4.2.2.3 Zeitbezogene Maße

Bewegungsdauer In Abbildung 27 sind die Ergebnisse der Analyse der Bewegungsdauer in der Lern- und Abrufphase für die beiden

Feedbackbedingungen Nachbild bzw. kein Nachbild dargestellt. Eine zweifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung für die Faktoren Feedback (ohne Nachbild, mit Nachbild) und Phase (Lernphase, Abrufphase) zeigt keinen signifikanten Haupteffekt des Faktors Feedback auf, $F(1, 15) = .01, p > .05$, jedoch einen hochsignifikanter Haupteffekt der Phase, $F(1, 15) = 23.05, p < .001$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Phase ist nicht signifikant, $F(1, 15) = .80, p > .05$.

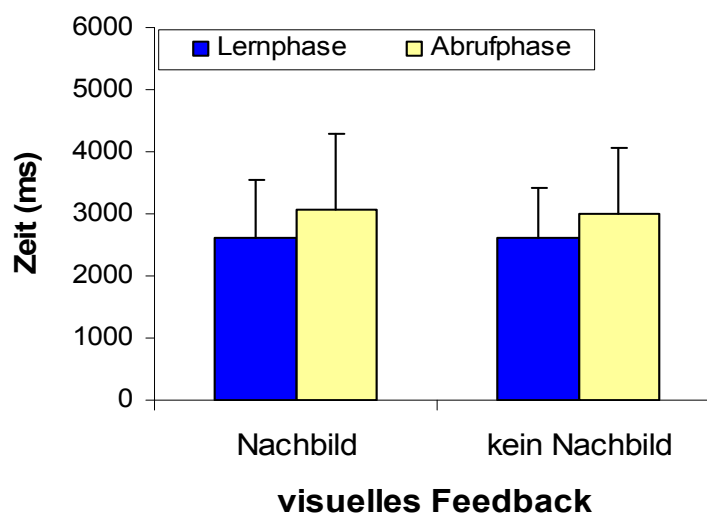


Abbildung 27: Mittlere Bewegungsdauer in Abhängigkeit vom visuellen Feedback, dargestellt für Lern- und Abrufphase.

Latenz des Bewegungsonset Die Dauer des Bewegungsonset in Lern- und Abrufphase ist in Abbildung 28 dargestellt. Man kann einen Unterschied zwischen den beiden Feedbackbedingungen beobachten, wobei die Latenz bei einem Vergleich der Abrufphasen in der Bedingung mit Nachbild deutlich gegenüber der Bedingung ohne Nachbild erhöht ist. Hinsichtlich der Lernphase unterscheiden sich die beiden experimentellen Bedingungen nicht. Eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für die Faktoren visuelles Feedback (Nachbild, kein Nachbild) und Phase (Lernphase, Abrufphase) zeigt einen signifikanten Haupteffekt des visuellen Feedbacks, $F(1, 15) = 4.86, p < .05$, sowie einen hochsignifikanten Effekt der Phase, $F(1, 15) = 43.67, p < .001$. Die

Interaktion von Aufgabenmodalität und Phase ist hochsignifikant $F(1, 15) = 17.12, p = .001$.

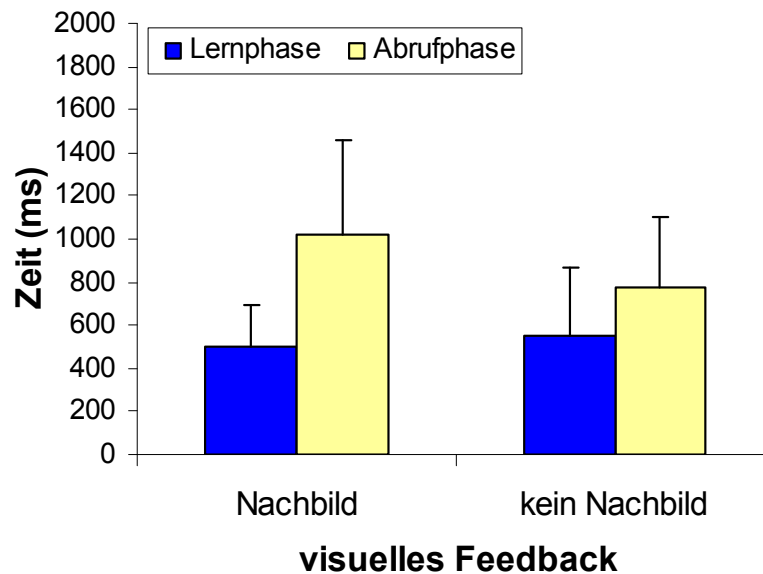


Abbildung 28: Latenz des Bewegungsonset in Abhängigkeit vom visuellen Feedback, dargestellt für Lern- und Abrufphase.

Reaktionszeiten Zwischen den beiden Feedbackbedingungen ist kein Unterschied zu beobachten. Ein zweiseitiger t -Test für gepaarte Stichproben zeigt, dass sich die beiden Bedingungen hinsichtlich der Reaktionszeiten nicht unterscheiden, $t(15) = 1.29, p > .05$.

4.2.2.4 Explorative Stopps

Dauer eines Stopps In Abbildung 29 ist die durchschnittliche Dauer eines einzelnen Stopps pro Bedingung und Phase dargestellt. Über beide Feedbackbedingungen hinweg haben die Stopps in der Abrufphase eine längere Dauer als in der Lernphase. Eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für die Faktoren Feedback (Nachbild, kein Nachbild) und Phase (Lernphase, Abrufphase) zeigt einen hochsignifikanten Haupteffekt der Phase, $F(1, 15) = 34.26, p < .0001$. Ein Effekt des Faktors Feedback bleibt aus, $F(1, 15) = .03, p > .05$, ebenso ist die Interaktion von Feedback und Phase nicht signifikant, $F(1, 15) = .65, p > .05$.

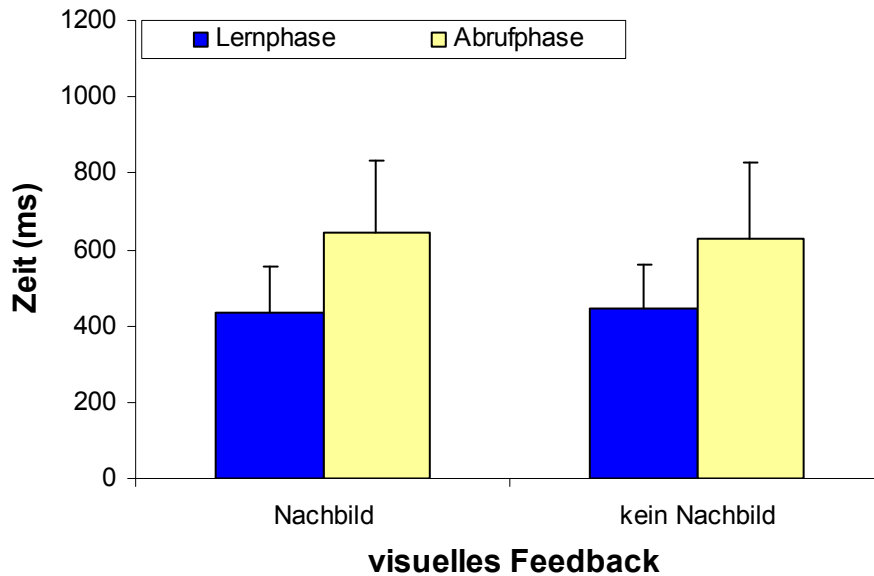


Abbildung 29: *Mittlere Dauer explorativer Stopps in Abhängigkeit vom visuellen Feedback, dargestellt für Lern- und Abrufphase.*

Anzahl explorativer Stopps pro Trial Hinsichtlich der Anzahl explorativer Stopps finden sich keine Unterschiede in den Feedbackbedingungen sowohl in Lern- als auch Abrufphase. Dagegen zeigt die Verteilung langer Stopps, dass diese in der Abrufphase über beide Feedbackbedingungen häufiger auftreten als in der Lernphase, die kurzen Stopps dagegen treten in beiden Feedbackbedingungen häufiger in der Lernphase auf (siehe Abbildung 30 A und B). Zur Analyse der Gesamtanzahl explorativer Stopps pro Trial wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für die Faktoren Feedback (Nachbild, kein Nachbild) und Phase (Lernphase, Abrufphase) durchgeführt. Diese zeigt weder einen Effekt der Phase, $F(1, 15) = .33, p > .05$, noch des Faktors Feedback, $F(1, 15) = .48, p > .05$. Ebenso ist die Interaktion von Feedback und Phase nicht signifikant, $F(1, 15) = .11, p > .05$.

Zur Analyse der langen Stopps wurde ebenfalls eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für die Faktoren Feedback (Nachbild, kein Nachbild) und Phase (Lernphase, Abrufphase) durchgeführt. Diese zeigt einen Effekt der Phase, $F(1, 15) = 8.69, p = .01$, nicht aber des Faktors Feedback, $F(1, 15) = 1.78, p > .05$. Die Interaktion von Feedback und Phase wird nicht signifikant, $F(1, 15) = 1.67, p > .05$.

Zur Analyse der kurzen Stopps wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für die Faktoren Feedback (Nachbild, kein Nachbild) und Phase (Lernphase, Abrufphase) durchgeführt, diese zeigt einen Effekt der Phase auf, $F(1, 15) = 4.58, p < .05$, nicht aber des Faktors Feedback, $F(1, 15) = .50, p > .05$. Ebenso ist die Interaktion von Feedback und Phase nicht signifikant, $F(1, 15) = .79, p > .05$.

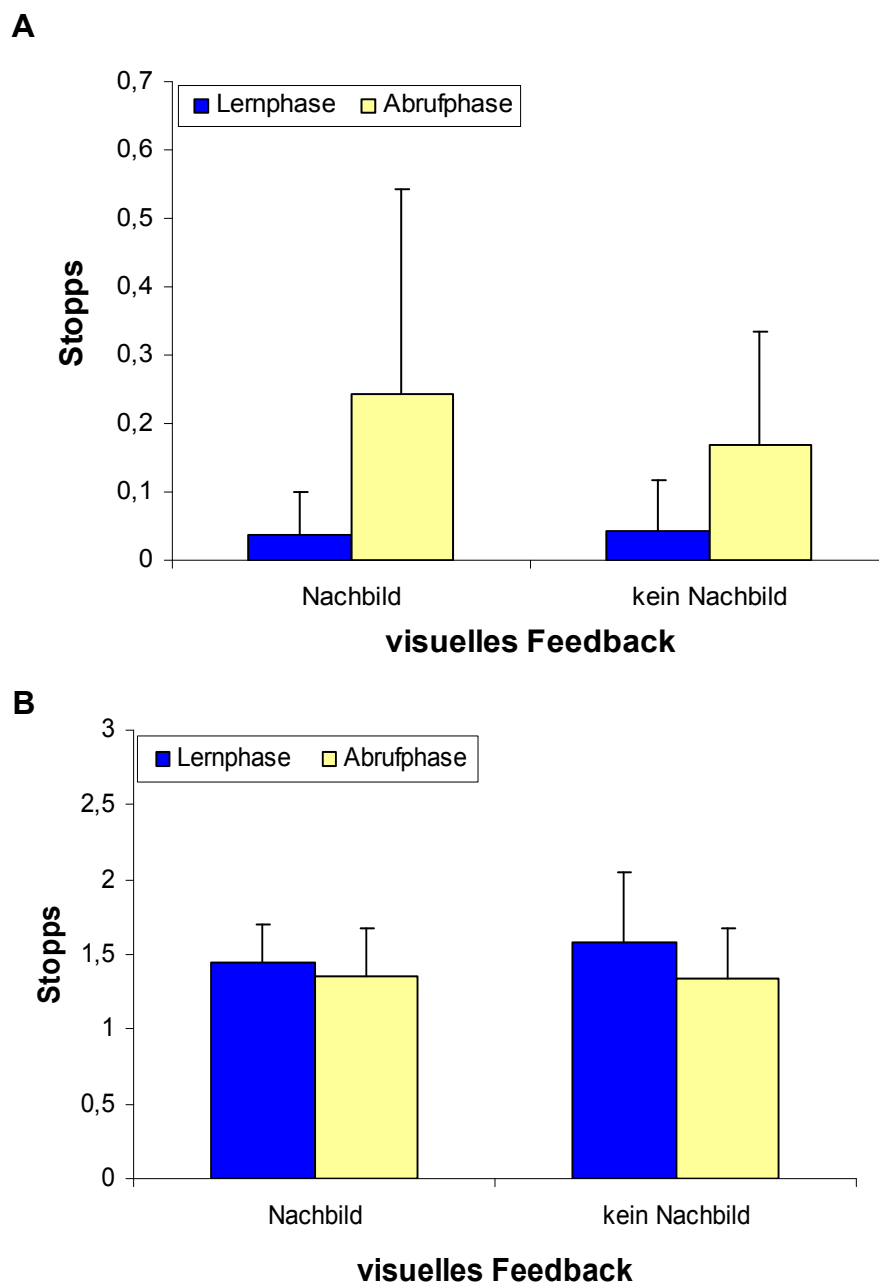


Abbildung 30: Mittlere Anzahl langer (A) und kurzer (B) explorativer Stopps pro Trial in Abhängigkeit vom visuellen Feedback, dargestellt für Lern- und Abrufphase.

4.2.3 Diskussion

Sowohl die qualitativen als auch die zeitbezogenen Maße zeigen Unterschiede zwischen den beiden Feedbackbedingungen, wobei die Bedingung mit irrelevantem visuellem Feedback während der Behaltensphase insgesamt mehr Schwierigkeiten bei der Aufgabenlösung bereitet. Dies zeigt sich anhand einer höheren Fehlerrate bei der Bewegungsreproduktion in der Feedbackbedingung. Ferner findet sich eine Interaktion der Latenz des Bewegungsonset: in der Feedbackbedingung ist sie gegenüber der No-Feedbackbedingung in der Abrufphase höher, in der Lernphase dagegen geringer. Wie bereits in Experiment 1 wird hier der Mechanismus der kontinuierlichen Verschiebung der Latenz des Bewegungsonset sichtbar, d. h. mit steigender Auslastung verschiebt sich das Verhältnis der zeitlichen Anteile der Latenz des Bewegungsonset in Lern- und Abrufphase scherenartig, mit größter Differenz bei Aufgaben, die mehr Kapazität beanspruchen.

In den vorhergehenden Experimenten 1 bis 4 wurde der Beitrag von automatisch ablaufenden Strategien des kognitiven Systems bei der Aufgabenlösung bereits diskutiert, wobei sich deutliche Hinweise auf die Bevorzugung von redundanter Codierung gezeigt haben. Dieses Prinzip der Redundanz scheint auch angewendet zu werden, wenn eine Hinzunahme von zusätzlichen Informationen bei der Aufgabenlösung erschwerend wirkt. In Experiment 4 konnte dies für kinästhetische und propriozeptive Informationen gezeigt werden. In Experiment 5 scheint sich dies auch für die visuellen Informationen zu bestätigen: irrelevante visuelle Information während der Zusatzaufgabe wirkt sich störend aus. Es scheint, dass die beobachteten Aufgabenlösungsstrategien automatisch vom kognitiven System angewendet werden, da die Strategie der redundanten Verarbeitung mit erheblichen Nachteilen verbunden ist. Diese Ergebnisse können mit Befunden aus der Forschung zur motorischen Kontrolle bestätigt werden. Menschen verwenden visuelles Feedback bei Zeigebewegungen, falls dieses vorhanden ist (Rosenbaum & Chaiken, 2001; Saunders & Knill, 2003, 2005). Auch hier dient das visuelle

Feedback der Stabilisierung der internen Bewegungsrepräsentation (Desmurget et al., 1995; Rossetti et al., 1995; van Beers et al., 1996).

Die meisten Versuchspersonen berichteten, dass während der Bearbeitung der Zusatzaufgabe mit visuellem Feedback die gelernte Bewegung ab einem gewissen Punkt „plötzlich weg war“, d. h. bei Abrufbeginn war der gesamte Bewegungsablauf vollständig vergessen. Ein möglicher Beitrag zur erhöhten Fehlerrate in der Bedingung mit Feedback könnte ein Konflikt bei der Strategiewahl sein, der bei Bearbeitung der Zusatzaufgabe entsteht. Die Aufgabenstruktur der motorischen Gedächtnisaufgabe regt das kognitive System möglicherweise zu einer bestimmten Strategiewahl an, bei der kinästhetische und visuelle Cues gewichtet werden, um Fehler, die durch Transformationen von visuellen zu propriozeptiven Referenzsystemen zustande kommen können, zu minimieren (Adamovich et al., 1998; Sober & Sabes, 2003; Soechting & Flanders, 1989; van Beers et al., 2002a, b). Ferner ist die Gewichtung von propriozeptiven und visuellen Cues abhängig von den Aufgabenerfordernissen, insbesondere der Modalität der Zielaufgabe (Bagesteiro, Sarlegna & Sainburg, 2006; Boulinguez & Rouhana, 2008; Sarlegna & Sainburg, 2007; Sober & Sabes, 2005). Werden nun während der Zusatzaufgabe aufgabenirrelevante Stimuli der visuellen Modalität präsentiert und diese aufgrund automatisierter Strategiewahl bei der Aufgabenlösung berücksichtigt, kommt es zu einer Störung der ursprünglich ausgewählten Lösungsstrategie (*strategy disruption*, siehe dazu Basden & Basden, 1995). Denkbar ist auch, dass Transformationen zwischen visuellen und propriozeptiven Koordinaten erforderlich werden, um einen gemeinsamen Referenzrahmen zur Ausführung der Aufgabe zu finden (Andersen & Buneo, 2002; Beurze, van Pelt & Medendorp, 2006; Buneo et al., 2002; Flanders et al., 1992), wobei dieses Vorgehen kapazitätsbeanspruchend ist. Dies würde erklären, warum in Experiment 3 die Bearbeitung von visuellen und motorischen Zusatzaufgaben während des Behaltensintervalls unproblematischer war. Zum einen wurden visuelle und motorische Cues in den Zusatzaufgaben weitgehend unabhängig voneinander abgearbeitet, zum anderen war der Strategiewechsel eindeutig über den Aufgabenwechsel definiert, so dass

dieser geplant war und somit dieser Erfordernis mit geeigneten Kompensationsmechanismen begegnet werden konnte.

Wie in den vorhergehenden Experimenten findet sich in Experiment 5 wieder eine Überschätzung der Bewegungsdauer in der Abrufphase über beide experimentellen Bedingungen hinweg. Ebenfalls ist die Latenz des Bewegungsonset in der Abrufphase jeweils größer als in der Lernphase, ebenso die mittlere Stoppdauer. Lange Stopps finden sich vor allem in der Abrufphase, kurze Stopps dagegen in der Lernphase. Diese Ergebnisse sprechen wie bereits in den vorhergehenden Experimenten für Rekonstruktionsprozesse bzw. Kompensationsmechanismen durch das wegfallende visuelle Feedback beim Abruf.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass visuelle Cues, die nicht der Aufgabenlösung dienen, bei der kurzzeitigen Speicherung von Bewegungen hinzugezogen werden, auch wenn sich dies nachteilig auf die Leistung auswirkt. Mögliche Erklärungen können die automatisierte Strategiewahl bei einer redundanten Verarbeitung sein, wobei hier vor allem kapazitätsbeanspruchende Transformationen zwischen visuellen und propriozeptiven bzw. kinästhetischen Koordinaten aufgrund der wechselnden Aufgabenstruktur als Auslöser für den Leistungseinbruch diskutiert wurden.

4.3 Experiment 6: Die Rolle visueller und kinästhetischer Cues bei der Reproduktion der Bewegungsgeschwindigkeit

In den bisherigen Experimenten 1 bis 5 wurde die Bewegung des Trackingobjekts stets in der gleichen Geschwindigkeit dargeboten. Eine interessante Frage ist, ob die Geschwindigkeit des Trackingobjekts einen Einfluss auf die Gedächtnisleistung, insbesondere auf die Reproduktion der Bewegungsgeschwindigkeit, hat und ob visuelle, kinästhetische oder beide Cues in Kombination Einfluss auf die Geschwindigkeit der Bewegung beim Abruf haben. Kerzel (2001) konnte zeigen, dass das Ausführen von Bewegungen in langsamer bzw. schneller Geschwindigkeit einen Einfluss auf die Erinnerung von beobachteten Geschwindigkeiten hat. Ferner konnte in Experiment 4 gezeigt werden, dass Information über die Geschwindigkeit vor allem über propriozeptive, kinästhetische und kutane Informationen vermittelt wird. Daher wurde in diesem Experiment die Frage untersucht, inwieweit unterschiedliche Geschwindigkeiten von sowohl beobachteten als auch selbst ausgeführten Bewegungen Einfluss auf die Gedächtnisleistung haben. Dazu wurden Trackingaufgaben mit unterschiedlicher Geschwindigkeit des Trackingobjekts (8.0 cm/s, 12.5 cm/s) realisiert, die während des Behaltensintervalls zu bearbeiten waren. Ferner interessierte die Auswirkung tatsächlich ausgeführter Bewegungen im Gegensatz zu beobachteten Bewegungen während des Behaltensintervalls. Dazu wurden visuelle und visuell-motorische Trackingaufgaben getestet. Insgesamt waren also vier Bedingungen im Behaltensintervall zu bearbeiten: visuelles Tracking in (1) langsamer (8.0 cm/s) und (2) schneller Geschwindigkeit (12.5 cm/s) und visuell-motorisches in (3) langsamer (8.0 cm/s) und (4) schneller Geschwindigkeit (12.5 cm/s). Die Hypothese ist, dass die Fehlerrate wie auch in den bisherigen Experimenten in den visuellen Bedingungen insgesamt geringer ist als in den visuell-motorischen Bedingungen, wobei die Geschwindigkeitsreproduktion beim Abruf durch die Trackingaufgaben beeinflusst wird. So sollte bei langsamer Geschwindigkeit die

Geschwindigkeit in der Bewegungsreproduktion ebenfalls geringer ausfallen, bei hoher Geschwindigkeit dagegen schneller werden. Ebenfalls sollte das Beobachten einer schnellen Bewegung des Trackingobjekts die Geschwindigkeitsreproduktion beeinträchtigen, jedoch nicht so stark, wie wenn die Bewegung selbst ausgeführt wird. Hinsichtlich der zeitbezogenen Maße wird erwartet, dass aufgrund der größeren Kapazitätsbeanspruchung in beiden Geschwindigkeitsstufen der visuell-motorischen Aufgabe eine größere Latenz des Bewegungsonset in der Abrufphase einerseits, andererseits verringerte Reaktionszeiten und eine geringere Anzahl explorativer Stopps beobachtet werden kann.

4.3.1 Methode

Stichprobe An Experiment 6 nahmen fünfzehn Vpn teil, alle Studierende des Psychologischen Instituts der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. Drei Vpn waren männlich, zwölf weiblich. Die Altersspanne der Vpn reichte von 19 bis 27 Jahren, das Durchschnittsalter lag bei 25.1 Jahren. Alle Vpn waren rechtshändig, normalsichtig bzw. korrigiert normalsichtig und ohne neurologische Beeinträchtigung. Keine der Vpn kannte den Hintergrund dieses Experiments.

Apparatur, experimentelle Aufgabe, Prozedur

Die Versuchsassparatur war die gleiche wie in den vorhergehenden Experimenten. Die experimentelle Aufgabe gleicht ebenfalls der der vorhergehenden Experimente 1 bis 5, wobei unter Beibehaltung der bisherigen Form (Lernphase, Behaltensintervall, Abrufphase) eine Modifikation vorgenommen wurde, nämlich dass während des Behaltensintervalls vier verschiedene Trackingaufgaben zu bearbeiten waren, wobei diese hinsichtlich der Aufgabenmodalität und Geschwindigkeit des Trackingobjekts variiert wurden (siehe Abbildung 31). Während des Behaltensintervalls wurden jeweils visuelle und visuell-motorische Trackingaufgaben dargeboten. Die Trackingaufgaben sind die gleichen wie in den Experimenten 1 bis 4, wobei das Trackingobjekt entweder mit einer Geschwindigkeit von 8.0 cm/s oder 12.5 cm/s in jeder

Aufgabenmodalität über den Bildschirm lief (siehe Abbildung 32). Der experimentelle Ablauf war der gleiche wie in den vorhergehenden Experimenten mit der Ausnahme, dass vier Experimentalblöcke mit den jeweils dazugehörigen Trainingsblöcken zum Einüben der Trackingaufgaben zu bearbeiten waren.

Design Als unabhängige Variable wurde in diesem Experiment die Modalität der Aufgabe, die während des Behaltensintervalls zu bearbeiten war (visuell, visuell-motorisch) und die Geschwindigkeit des Trackingobjekts (8.0 und 12.5 cm/s) in einem Messwiederholungsdesign getestet, d. h. jede Versuchsperson durchlief alle vier experimentellen Bedingungen mit jeweils 20 Trials, wobei die Bedingungen geblockt dargeboten wurden. Die Reihenfolge der Bedingungen war zwischen den Vpn randomisiert. Die abhängige Variable war die Gedächtnisleistung bei der motorischen Kurzzeitspeicherung bzw. die Beeinträchtigung selbiger durch die Bearbeitung von irrelevanten Aufgaben während des Behaltensintervalls.

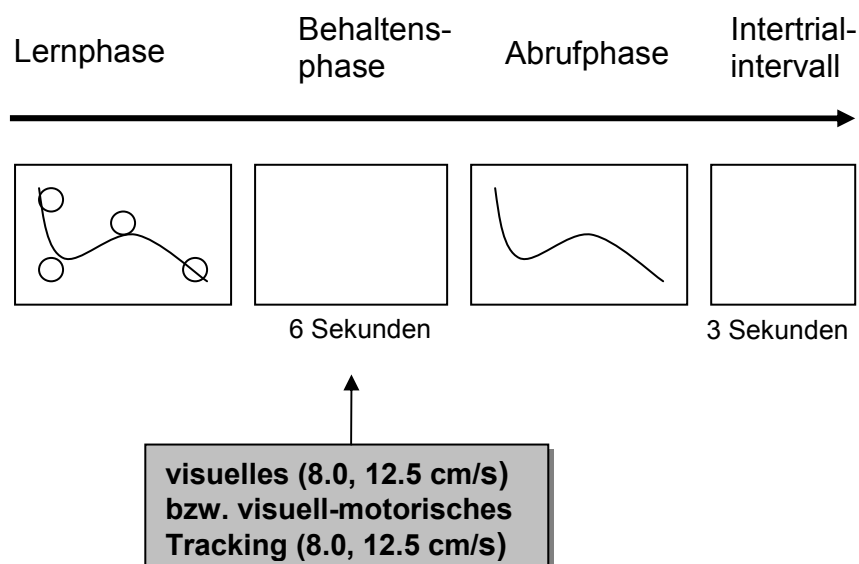


Abbildung 31: Versuchsdesign von Experiment 6.

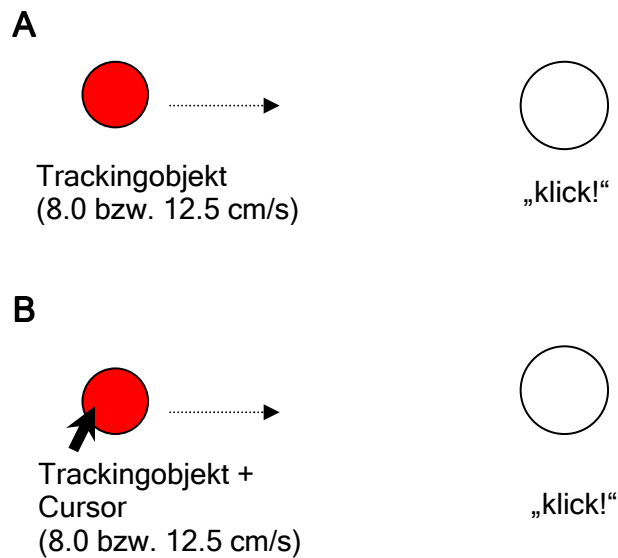


Abbildung 32: Trackingaufgaben, die während des Behaltensintervalls in Experiment 6 zu bearbeiten waren. **A** Visuelle Aufgabe: Das Trackingobjekt bewegt mit 8.0 bzw. 12.5 cm/s sich über den Bildschirm. Sobald ein Kreis erscheint, wird mit Tastendruck reagiert. **B** Visuell-motorische Aufgabe: Trackingobjekt bewegt sich mit 8.0 bzw. 12.5 cm/s und wird mit Cursor verfolgt. Sobald Kreis erscheint, wird mit Tastendruck reagiert.

Datenaufzeichnung

Folgende Daten wurden automatisiert aufgezeichnet:

1. x- und y-Koordinaten der zu Beginn jedes Trials eingeblendeten Kreise;
2. x- und y-Koordinaten der mittels der PC-Maus ausgeführten Bewegungen mit einer Aufzeichnungsrate von 40 Hz;
3. Bewegungsdauer von allen ausgeführten Bewegungen in Lern- und Abrufphase (in ms);
4. Dauer zum Bewegungsonset in Lern- und Abrufphase (in ms);
5. Reaktionszeiten (in ms) den visuellen und visuell-motorischen Trackingaufgaben, d. h. die Dauer von Erscheinen des Stimulus bis zur Reaktion mit der Maustaste;
6. Koordinaten des Cursors in den visuellen und visuell-motorischen Trackingaufgaben;

7. Koordinaten des Trackingobjekts, d. h. des Objekts auf dem Bildschirm, das mit dem Cursor verfolgt wurde, in der visuell-motorischen Trackingaufgabe;

Datenanalysen Die Bewegungsdaten wurden in einem ersten Schritt einer qualitativen Analyse unterzogen. Die Prozedur der qualitativen Analyse war die gleiche wie in den vorhergehenden Experimenten 1 bis 5. Im Anschluss wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung für den Faktor Trackinggeschwindigkeit (8.0 cm/s, 12.5 cm/s) und Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch) sowie post-hoc Tests nach Bonferroni zum Vergleich der Mittelwerte durchgeführt. Für alle statistischen Tests wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$ gesetzt. In einem zweiten Schritt wurde die Analyse der zeitbezogenen Maße für die Bewegungsdauer, für die Latenz des Bewegungsonset, für die Reaktionszeiten der Aufgaben, die während des Behaltensintervalls zu bearbeiten waren, sowie für die explorativen Stopps (Dauer der Stopps, Anzahl Stopps pro Trial, Anzahl langer bzw. kurzer Stopps) durchgeführt. Die Auswertungsprozedur für diese zeitbezogenen Maße war die gleiche wie in den vorhergehenden Experimenten 1 bis 5. Für die Reaktionszeiten wurde eine zweifaktorielle ANOVA für die Faktoren Trackinggeschwindigkeit (8.0 cm/s, 12.5 cm/s) und Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch) bzw. für die gemittelten Bewegungszeiten, Latenzen zum Bewegungsonset, sowie alle Maße der explorativen Stopps wurden jeweils dreifaktorielle Varianzanalysen für die Faktoren Trackinggeschwindigkeit (8.0 cm/s, 12.5 cm/s), Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch) und Phase (Lernphase, Abrufphase) sowie post-hoc Tests nach Bonferroni zum Vergleich der Mittelwerte durchgeführt. Für alle statistischen Tests wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$ gesetzt.

4.3.2 Ergebnisse

4.3.2.1 Qualitative Analyse

In Abbildung 33 ist die mittlere Fehlerrate für die beiden Aufgabenmodalitäten (visuell, visuell-motorisch) sowie für die Trackinggeschwindigkeiten (8.0 cm/s, 12.5 cm/s) dargestellt. Die visuell-motorische Aufgabe hat im Gegensatz zur visuellen Aufgabe einen störenden Einfluss auf die Gedächtnisleistung, was sich in einer erhöhten Fehlerrate zeigt. Hinsichtlich der Geschwindigkeit des Trackingobjekts lässt sich anhand der qualitativen Analyse, d. h. anhand der Fehlerraten kein Unterschied zwischen beiden Geschwindigkeiten aufzeigen. Die ANOVA zeigt einen hochsignifikanten Haupteffekt des Faktors Aufgabenmodalität, $F(1, 14) = 21.88$, $p < .001$, nicht aber der Trackinggeschwindigkeit, $F(1, 14) = 2.66$, $p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Trackinggeschwindigkeit wird nicht signifikant, $F(1, 14) = 1.81$, $p > .05$.

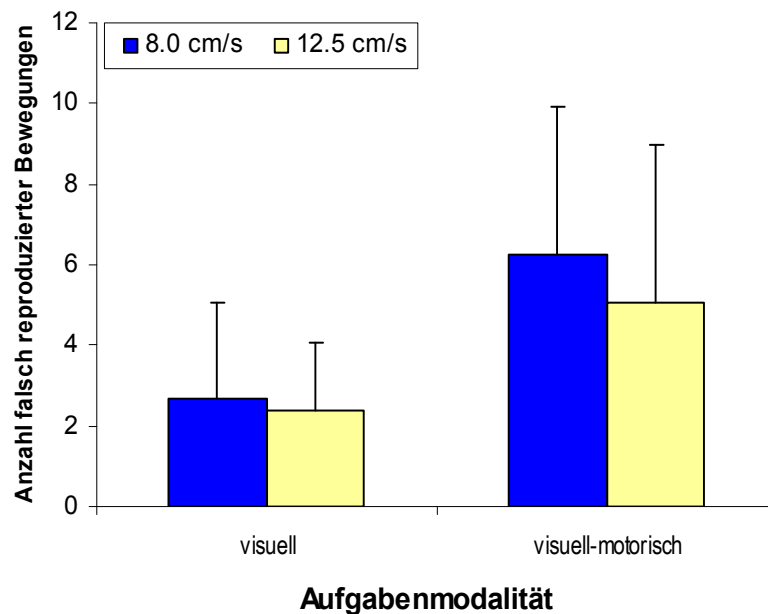


Abbildung 33: Mittlere Fehlerrate in Abhängigkeit von der Aufgabenmodalität und der Trackinggeschwindigkeit.

4.3.2.2 Analyse der zeitbezogenen Maße

Bewegungsdauer In Abbildung 34 ist die durchschnittliche Bewegungsdauer in Lern- und Abrufphase in Abhängigkeit von der jeweiligen Aufgabenmodalität und Trackinggeschwindigkeit dargestellt. Wie bereits in den vorhergehenden Experimenten ist eine systematische Überschätzung der Bewegungsdauer in der Abrufphase über alle Aufgabenmodalitäten hinweg beobachtbar. Ferner findet sich eine Interaktion von Aufgabenmodalität und Geschwindigkeit, die sich am deutlichsten darin zeigt, dass die visuell-motorische Bedingung mit langsamer Trackinggeschwindigkeit (8.0 cm/s) im Gegensatz zur visuell-motorischen Bedingung mit schneller Trackinggeschwindigkeit (12.5 cm/s) in Lern- und Abrufphase länger ist. Die ANOVA zeigt einen hochsignifikanten Haupteffekt des Faktors Phase, $F(1, 14) = 10.91$, $p < .01$, nicht aber der Aufgabenmodalität, $F(1, 14) = 2.05$, $p > .05$, und der Trackinggeschwindigkeit, $F(1, 14) = .35$, $p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Trackinggeschwindigkeit ist signifikant, $F(1, 14) = 5.04$, $p < .05$. Die Interaktionen von Aufgabenmodalität und Phase, $F(1, 14) = .44$, $p > .05$, sowie von Geschwindigkeit und Phase, $F(1, 14) = 2.66$, $p > .05$, sind nicht signifikant. Ebenfalls findet sich keine signifikante Interaktion von Aufgabenmodalität, Geschwindigkeit und Phase, $F(1, 14) = .18$, $p > .05$.

Zusätzlich wurden zwei separate zweifaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung für die Faktoren Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch) und Trackinggeschwindigkeit (8.0 cm/s, 12.5 cm/s) jeweils für die Lern- und Abrufphase durchgeführt. Die ANOVA für die Lernphase zeigt keine Effekte, weder des Faktors Aufgabenmodalität, $F(1, 14) = 1.72$, $p > .05$, noch der Trackinggeschwindigkeit, $F(1, 14) = 1.17$, $p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Trackinggeschwindigkeit ist signifikant, $F(1, 14) = 5.61$, $p < .05$. Die ANOVA nur für die Abrufphase zeigt ebenfalls keine Effekte des Faktors Aufgabenmodalität, $F(1, 14) = 2.20$, $p > .05$, und der Trackinggeschwindigkeit, $F(1, 14) = .15$, $p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Trackinggeschwindigkeit wird nicht signifikant, $F(1, 14) = 3.97$, $p > .05$.

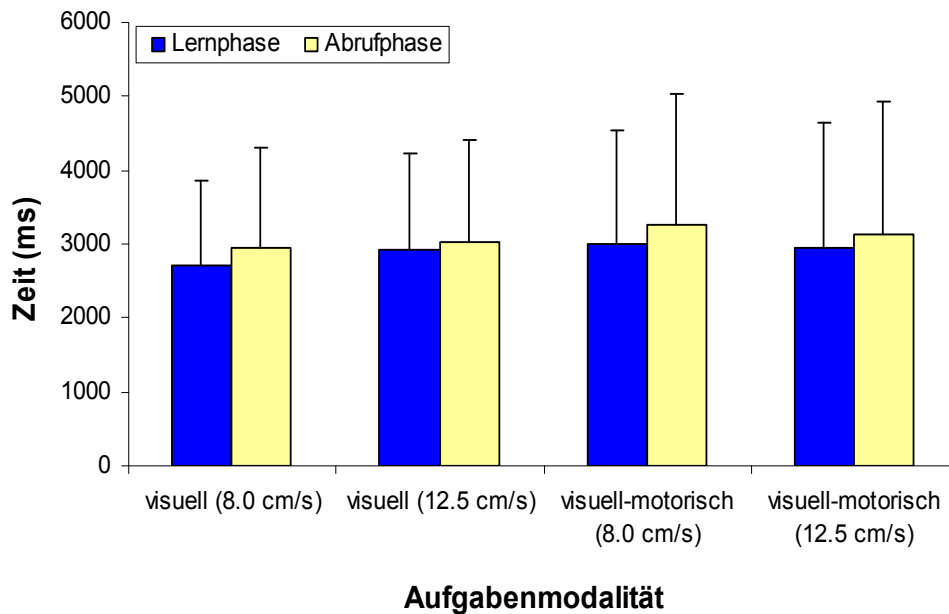


Abbildung 34: Mittlere Bewegungsdauer in Abhängigkeit von Aufgabenmodalität, Trackinggeschwindigkeit, dargestellt für Lern- und Abrufphase.

Latenz des Bewegungsonset In Abbildung 35 ist die mittlere Latenz des Bewegungsonset in Lern- und Abrufphase in Abhängigkeit von der Aufgabenmodalität und Geschwindigkeit des Trackingobjekts dargestellt. Es zeigen sich Unterschiede sowohl hinsichtlich der Aufgabenmodalität (visuell und visuell-motorisch) als auch der Geschwindigkeit des Trackingobjekts und der Phase. Ferner lassen sich Interaktionen von Aufgabe und Geschwindigkeit, von Aufgabenmodalität und Phase sowie von Geschwindigkeit und Phase finden. Es zeigt sich, dass vor allem in der visuell-motorischen Bedingung mit langsamer (8.0 cm/s) Geschwindigkeit des Trackingobjekts die Latenz in der Abrufphase vergrößert ist. Die ANOVA zeigt einen hochsignifikanten Haupteffekt des Faktors Aufgabenmodalität, $F(1, 14) = 15.30$, $p < .01$, und der Trackinggeschwindigkeit, $F(1, 14) = 5.54$, $p < .05$, sowie der Phase, $F(1, 14) = 18.38$, $p = .001$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Trackinggeschwindigkeit ist signifikant, $F(1, 14) = 6.29$, $p < .05$. Die Interaktionen von Aufgabenmodalität und Phase, $F(1, 14) = 9.00$, $p = .01$, sowie von Geschwindigkeit und Phase, $F(1, 14) = 31.83$, $p < .001$, sind

ebenfalls hochsignifikant. Die Interaktion zweiter Ordnung von Aufgabenmodalität, Geschwindigkeit und Phase ist nicht signifikant, $F(1, 14) = 3.43, p > .05$.

Zusätzlich wurden zwei separate zweifaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung für die Faktoren Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch) und Trackinggeschwindigkeit (8.0 cm/s, 12.5 cm/s) jeweils für die Lern- und Abrufphase durchgeführt. Die ANOVA für die Lernphase zeigt einen hochsignifikanten Haupteffekt des Faktors Trackinggeschwindigkeit, $F(1, 14) = 8.87, p = .01$, jedoch keinen Effekt der Aufgabenmodalität, $F(1, 14) = .68, p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Trackinggeschwindigkeit wird nicht signifikant, $F(1, 14) = 1.94, p > .05$. Die ANOVA für die Abrufphase zeigt einen hochsignifikanten Haupteffekt des Faktors Aufgabenmodalität, $F(1, 14) = 23.18, p < .001$, und des Faktors Geschwindigkeit, $F(1, 14) = 35.94, p < .001$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Trackinggeschwindigkeit ist ebenfalls signifikant, $F(1, 14) = 5.74, p < .05$.

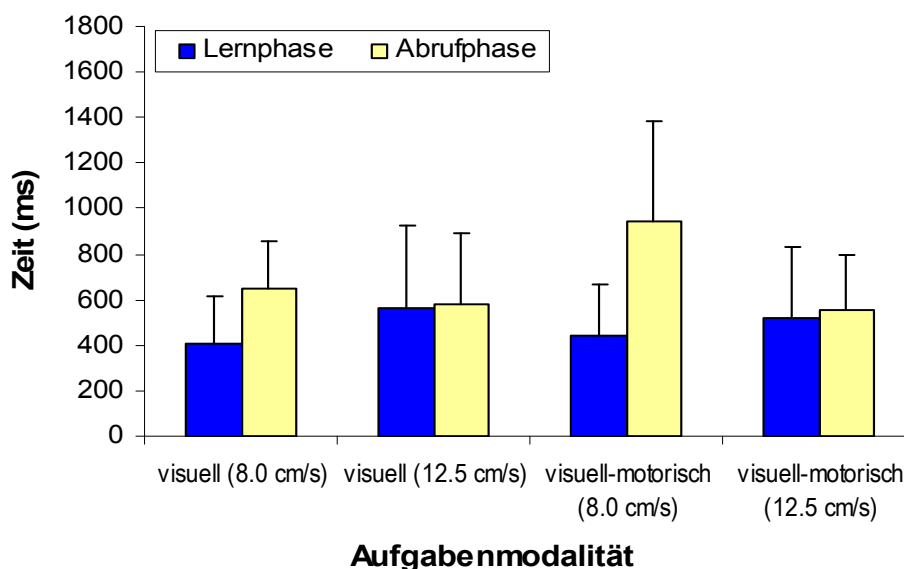


Abbildung 35: Mittlere Latenz des Bewegungsonset in Abhängigkeit von der Aufgabenmodalität und der Trackinggeschwindigkeit, dargestellt für Lern- und Abrufphase.

Reaktionszeiten In Abbildung 36 sind die mittleren Reaktionszeiten in den Trackingaufgaben (visuell, visuell-motorisch) dargestellt. Hinsichtlich

der Reaktionszeiten unterscheiden sich die beiden Aufgabenmodalitäten voneinander, wobei in den visuell-motorischen Bedingungen bei beiden Trackinggeschwindigkeiten die Reaktionszeiten geringer sind als in den visuellen Bedingungen. Ferner findet sich ein Unterschied zwischen den beiden Trackinggeschwindigkeiten, wobei die Reaktionszeiten in den Aufgaben mit hoher Trackinggeschwindigkeit geringer sind als in den Bedingungen mit langsamer Geschwindigkeit. Die ANOVA zeigt signifikante Effekte der Faktoren Aufgabenmodalität, $F(1, 14) = 29.18, p < .001$, und Geschwindigkeit, $F(1, 14) = 4.95, p < .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Trackinggeschwindigkeit ist nicht signifikant, $F(1, 14) = .86, p > .05$.

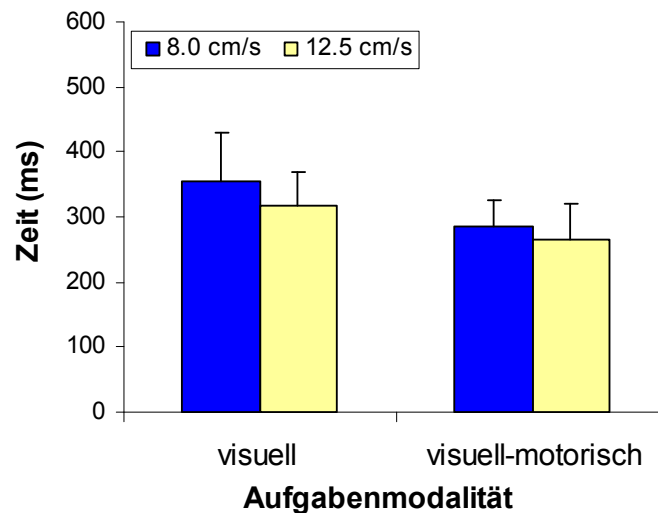


Abbildung 36: Mittlere Reaktionszeiten in Abhängigkeit von der Aufgabenmodalität und der Trackinggeschwindigkeit.

4.3.2.3 Explorative Stopps

Mittlere Stoppdauer In Abbildung 37 ist die durchschnittliche Dauer eines einzelnen Stopps pro Bedingung und Phase dargestellt. Anhand der Ergebnisse lässt sich beobachten, dass in der Abrufphase die Stopps über beide Aufgabenmodalitäten und Trackinggeschwindigkeiten länger sind als in der Lernphase. Die ANOVA zeigt einen hochsignifikanten Haupteffekt des Faktors Phase, $F(1, 14) = 14.36, p < .01$, nicht aber der Trackinggeschwindigkeit, $F(1, 14) = 1.85, p > .05$, und der

Aufgabenmodalität, $F(1, 14) = 2.38, p > .05$. Nicht signifikant werden die Interaktionen von Aufgabenmodalität und Trackinggeschwindigkeit, $F(1, 14) = 2.64, p > .05$, Aufgabenmodalität und Phase, $F(1, 14) = 3.10, p > .05$, Geschwindigkeit und Phase, $F(1, 14) = 2.41, p > .05$. Die Interaktion zweiter Ordnung von Aufgabenmodalität, Geschwindigkeit und Phase ist dagegen signifikant, $F(1, 14) = 5.66, p < .05$.

Zusätzlich wurden zwei separate zweifaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung für die Faktoren Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch) und Trackinggeschwindigkeit (8.0 cm/s, 12.5 cm/s) jeweils für die Lern- und Abrufphase durchgeführt. Die ANOVA für die Lernphase zeigt weder einen Effekt des Faktors Aufgabenmodalität, $F(1, 14) = .14, p > .05$, noch des Faktors Trackinggeschwindigkeit, $F(1, 14) = .04, p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Trackinggeschwindigkeit ist nicht signifikant, $F(1, 14) = .28, p > .05$. Die ANOVA für die Abrufphase zeigt ebenfalls weder einen Effekt des Faktors Aufgabenmodalität, $F(1, 14) = 4.16, p > .05$, noch der Geschwindigkeit, $F(1, 14) = 2.57, p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Trackinggeschwindigkeit wird nicht signifikant, $F(1, 14) = 4.07, p > .05$.

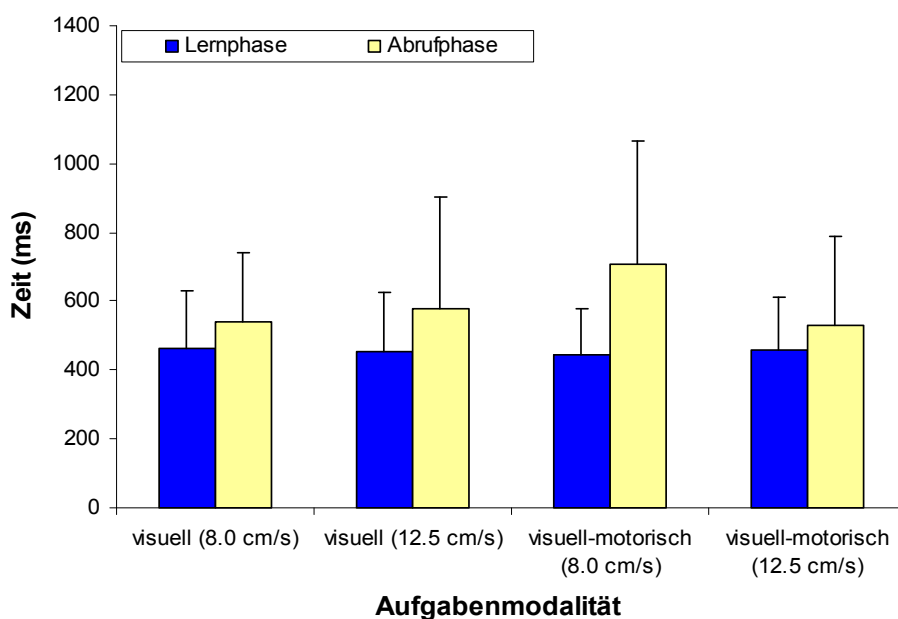


Abbildung 37: Mittlere Dauer eines explorativen Stopps in Abhängigkeit von der Aufgabenmodalität und Trackinggeschwindigkeit, dargestellt für Lern- und Abrufphase.

Anzahl explorativer Stopps Hinsichtlich der Anzahl explorativer Stopps finden sich keine Unterschiede über die beiden Aufgabenmodalitäten und Trackinggeschwindigkeiten. Die ANOVA zeigt weder einen Haupteffekt des Faktors Phase, $F(1, 14) = 1.36, p > .05$, noch des Faktors Trackinggeschwindigkeit, $F(1, 14) = .21, p > .05$, und der Aufgabenmodalität, $F(1, 14) = 3.09, p > .05$. Nicht signifikant sind die Interaktionen von Aufgabenmodalität und Trackinggeschwindigkeit, $F(1, 14) = .18, p > .05$, Aufgabenmodalität und Phase, $F(1, 14) = 1.81, p > .05$, Geschwindigkeit und Phase, $F(1, 14) = .18, p > .05$. Die Interaktion zweiter Ordnung von Aufgabenmodalität, Geschwindigkeit und Phase wird nicht signifikant, $F(1, 14) = 1.91, p > .05$. Zusätzlich wurden zwei zweifaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung für die Faktoren Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch) und Trackinggeschwindigkeit (8.0 cm/s, 12.5 cm/s) jeweils separat für die Lern- und Abrufphase durchgeführt. Die ANOVA für die Lernphase zeigt weder einen Effekt des Faktors Aufgabenmodalität, $F(1, 14) = 3.37, p > .05$, noch des Faktors Trackinggeschwindigkeit, $F(1, 14) = .40, p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Trackinggeschwindigkeit ist nicht signifikant, $F(1, 14) = .27, p > .05$. Die ANOVA zeigt ebenfalls keinen Effekt des Faktors Aufgabenmodalität, $F(1, 14) = .01, p > .05$, und des Faktors Geschwindigkeit, $F(1, 14) = .00, p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Trackinggeschwindigkeit wird nicht signifikant, $F(1, 14) = 1.04, p > .05$.

Bei der Analyse der langen Stopps zeigt die ANOVA weder einen Haupteffekt des Faktors Phase auf, $F(1, 14) = 3.88, p > .05$, noch des Faktors Trackinggeschwindigkeit, $F(1, 14) = .41, p > .05$, sowie der Aufgabenmodalität, $F(1, 14) = 1.98, p > .05$. Nicht signifikant sind die Interaktionen von Aufgabenmodalität und Trackinggeschwindigkeit, $F(1, 14) = 2.32, p > .05$, Aufgabenmodalität und Phase, $F(1, 14) = 1.53, p > .05$, Geschwindigkeit und Phase, $F(1, 14) = .22, p > .05$. Die Interaktion zweiter Ordnung von Aufgabenmodalität, Geschwindigkeit und Phase wird nicht signifikant, $F(1, 14) = 1.85, p > .05$. Ferner wurden zwei separate zweifaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung für die Faktoren Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch) und Tracking-

geschwindigkeit (8.0 cm/s, 12.5 cm/s) jeweils für die Lern- und Abrufphase durchgeführt. Die ANOVA für die Lernphase zeigt weder einen Effekt des Faktors Aufgabenmodalität, $F(1, 14) = .01, p > .05$, noch des Faktors Trackinggeschwindigkeit, $F(1, 14) = .11, p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Trackinggeschwindigkeit ist nicht signifikant, $F(1, 14) = .12, p > .05$. Die ANOVA nur für die Abrufphase zeigt keinen Effekt des Faktors Aufgabenmodalität, $F(1, 14) = 1.94, p > .05$, und des Faktors Geschwindigkeit, $F(1, 14) = .41, p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Trackinggeschwindigkeit wird nicht signifikant, $F(1, 14) = 2.35, p > .05$.

Bei der statistischen Analyse der kurzen Stopps zeigt die ANOVA weder einen Haupteffekt des Faktors Phase, $F(1, 14) = 3.25, p > .05$, noch des Faktors Trackinggeschwindigkeit, $F(1, 14) = .17, p > .05$, und der Aufgabenmodalität, $F(1, 14) = 1.74, p > .05$. Nicht signifikant sind die Interaktionen von Aufgabenmodalität und Trackinggeschwindigkeit, $F(1, 14) = .03, p > .05$, Aufgabenmodalität und Phase, $F(1, 14) = 2.07, p > .05$, sowie Geschwindigkeit und Phase, $F(1, 14) = .12, p > .05$. Die Interaktion zweiter Ordnung von Aufgabenmodalität, Geschwindigkeit und Phase wird ebenfalls nicht signifikant, $F(1, 14) = 1.24, p > .05$. Ferner wurden zwei separate zweifaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung für die Faktoren Aufgabenmodalität (visuell, visuell-motorisch) und Trackinggeschwindigkeit (8.0 cm/s, 12.5 cm/s) jeweils für die Lern- und Abrufphase durchgeführt. Die ANOVA für die Lernphase zeigt weder einen Effekt des Faktors Aufgabenmodalität, $F(1, 14) = 3.00, p > .05$, noch des Faktors Trackinggeschwindigkeit, $F(1, 14) = .25, p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Trackinggeschwindigkeit ist nicht signifikant, $F(1, 14) = .34, p > .05$. Die ANOVA nur für die Abrufphase zeigt ebenfalls keinen Effekt des Faktors Aufgabenmodalität, $F(1, 14) = .37, p > .05$, und des Faktors Geschwindigkeit, $F(1, 14) = .00, p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Trackinggeschwindigkeit ist nicht signifikant, $F(1, 14) = .45, p > .05$.

4.3.3 Diskussion

Wie bereits in den Experimenten 1 und 2 zeigt sich das gleiche Muster bei einem Vergleich der Aufgabenmodalitäten visuell und visuell-motorisch, wobei die visuell-motorischen Aufgaben im Vergleich zu den visuellen Aufgaben einen störenden Einfluss auf die Gedächtnisleistung haben, was sich an einer deutlich höheren Fehlerrate bei den visuell-motorischen Bedingungen beider Geschwindigkeiten zeigt. Ferner lässt sich wie in den bisherigen Experimenten auch eine kürzere Reaktionszeit bei den visuell-motorischen Aufgaben beobachten. Die systematische Überschätzung der Bewegungsdauer in der Abrufphase über alle Bedingungen gegenüber der Lernphase konnte ebenfalls repliziert werden.

Ein Unterschied hinsichtlich der Fehlerrate bei einem Vergleich der beiden Trackinggeschwindigkeiten findet sich nicht, jedoch zeigen sich in den zeitbezogenen Maßen Unterschiede, wobei der Parameter der Geschwindigkeit in Interaktion mit anderen Faktoren tritt. Reine Effekte, die allein auf die Geschwindigkeit des Trackingobjekts zurückzuführen sind, lassen sich nur anhand der Reaktionszeiten zeigen. Hier findet sich bei langsamer Geschwindigkeit eine höhere Reaktionszeit über beide Aufgabenmodalitäten. In den bisherigen Experimenten sind kürzere Reaktionszeiten als Maß für Mechanismen der Optimierung der Arbeitsabläufe aufgrund einer größeren Kapazitätsauslastung des Arbeitsgedächtnisses interpretiert worden. Diese Interpretation ist in diesem Experiment schwierig, da die Latenzen zum Bewegungsonset in der Abrufphase in den Bedingungen mit langsamer Geschwindigkeit deutlich höher sind als bei langsamen Trackinggeschwindigkeiten, wobei die Latenz in der visuell-motorischen Bedingung mit langsamer Geschwindigkeit in der Abrufphase größer, in der Lernphase geringer ist als in der korrespondierenden visuellen Bedingung. Dagegen gleichen sich die Latenzen in den Bedingungen mit hoher Geschwindigkeit an. Da eine erhöhte Latenz in den bisherigen Experimenten als sicherer Indikator für die Schwierigkeit des Abrufs galt, deuten die Ergebnisse darauf hin, dass der Abruf in den Bedingungen mit langsamer

Bewegungsgeschwindigkeit schwieriger ist als bei hoher Geschwindigkeit, wobei dies vor allem für die visuell-motorische Bedingung gilt. Ein weiterer Hinweis auf Schwierigkeiten beim Abruf findet sich bei einer näheren Betrachtung der Stopps, nämlich mit einer deutlich längeren Stoppdauer in der visuell-motorischen Bedingung mit langsamer Geschwindigkeit. Die längere Reaktionszeit kann daher nicht als Maß für die Schwierigkeit interpretiert werden, sondern möglicherweise als Anpassung an die Geschwindigkeit des Trackingobjekts, welche Auswirkung auf die Ausführung der Gesamtaufgabe hat. Eine langsamere Geschwindigkeit könnte beispielsweise die Strategie „*langsam*“ bzw. „*langsam = einfach*“ implizieren und zu entsprechendem Verhalten anregen. Dafür spricht, dass bei der Nachbefragung die Bedingungen mit hoher Geschwindigkeit schwieriger eingestuft wurden als die mit niedriger Geschwindigkeit, obwohl sich objektiv die größeren Schwierigkeiten beim Abruf in den Bedingungen mit geringer Geschwindigkeit zeigen. Ein Grund für die Schwierigkeiten beim Abruf in diesen Bedingungen könnte darin liegen, dass aufgrund der langsamen Bewegung des Trackingobjekts vermehrt automatische Mechanismen der Online-Kontrolle auftreten, die kapazitätsbeanspruchend sind und daher die Aufrechterhaltung und den Abruf der Bewegungsinformation erschweren. Bei schnellen Bewegungen dagegen findet keine kontinuierliche Kontrolle statt, sie wird stattdessen über die Berechnung des Endpunktes gesteuert (Adamovich et al., 1999).

Bei Betrachtung der Bewegungsdauer fällt auf, dass die Trackinggeschwindigkeit in Kombination mit der Aufgabenmodalität einen Einfluss auf die Bewegungsreproduktion hat. So ist die Bewegungsdauer in den visuellen Bedingungen bei niedriger Geschwindigkeit kürzer als bei hoher Geschwindigkeit. In den visuell-motorischen Bedingungen ist dagegen die Bedingung mit hoher Geschwindigkeit durch eine kürzere Bewegungsdauer gekennzeichnet als die Bedingung mit geringer Geschwindigkeit. Das letztere Ergebnis würde die Hypothese bestätigen, dass die Reproduktion der Bewegungsgeschwindigkeit durch eine selbst ausgeführte Bewegung beeinflusst wird, wobei dieser Einfluss in die gleiche Richtung wirkt, d. h. eine während des Behaltensintervalls schnell ausgeführte Bewegung bewirkt, dass die Bewegungsreproduktion

insgesamt schneller wird. So könnten auch die kürzeren Reaktionszeiten bei der visuell-motorischen Aufgabe mit hoher Trackinggeschwindigkeit eingeordnet werden. Hollins und Goble (1988) postulieren, dass die Kombination von Cues der Geschwindigkeit und der Lokalität zur Wahrnehmung der Länge einer aktiven Bewegung beiträgt und dass die Wahrnehmung der Länge der Bewegung durch die Bewegungsgeschwindigkeit beeinflusst wird. In gleicher Weise zeigten Wapner et al. (1967), dass die Geschwindigkeit von kinästhetischen Trackingaufgaben die Wahrnehmung der Länge der Bewegung beeinflusst. So wurden langsame Bewegungen hinsichtlich der Länge überschätzt, schnelle Bewegungen unterschätzt. Einen Zusammenhang ebenfalls von räumlichen Koordinaten und kinästhetischer Geschwindigkeitsinformation konnten Chieffi, Conson und Carlomagno (2004) demonstrieren.

Im Gegenzug ist eine interessante Frage, warum das Beobachten eines langsamen Trackingobjekts eine schnellere Bewegungsausführung bewirkt als die korrespondierende visuelle Bedingung mit schnellem Trackingobjekt. Eine mögliche Erklärung wäre, dass in den visuellen Bedingungen keine kinästhetische Information bei der Ausführung der Trackingaufgabe zur Schätzung der Geschwindigkeit des Trackingobjekts zur Verfügung steht. Die Antizipation der motorischen Reaktion auf Basis rein visueller Cues ist also gegenüber den visuellen-motorischen Bedingungen unsicherer. Anhand der Latenzen zum Bewegungsonset wird erkennbar, dass sowohl die visuelle als auch die visuell-motorische Bedingung mit geringer Geschwindigkeit Schwierigkeiten beim Abruf bereitet. Möglicherweise führt in der visuellen Bedingung mit langsamer Geschwindigkeit die Unsicherheit der Geschwindigkeitsschätzung allein auf Basis visueller Cues einerseits und die Abrufschwierigkeiten aufgrund der kapazitätsbeanspruchenden langsamen Trackingaufgabe andererseits zu einem Optimierungsmechanismus, der sich in einer geringeren Bewegungsdauer äußert. Es sind also möglicherweise zwei unterschiedliche Prozesse involviert, die zu der Interaktion von Geschwindigkeit und Aufgabenmodalität beitragen, nämlich zum einen die Beeinflussung der Geschwindigkeitsrepräsentation durch eine

Kombination von visuellen und kinästhetischen Cues in der visuell-motorischen Bedingung, zum anderen eine Kompensation aufgrund einer unsicheren Geschwindigkeitsrepräsentation in der visuellen Bedingung. Diese Vermutung sollte in einem weiteren Experiment explizit überprüft werden.

Hinsichtlich des Faktors Geschwindigkeit lässt sich zusammenfassend feststellen, dass er auf die resultierende Fehlerrate keinen Einfluss hat. Dagegen zeigt sich in den zeitbezogenen Maßen, dass die Geschwindigkeit, mit Ausnahme der Reaktionszeiten, stets in Interaktion mit der Aufgabenmodalität tritt, wie an der Bewegungsdauer, der Latenz des Bewegungsonset und der Stoppdauer gezeigt werden konnte. Dies deutet darauf hin, dass die Bewegungsgeschwindigkeit sowohl über visuelle als auch kinästhetische Cues in Kombination vermittelt wird, was mit Ergebnissen aus der Forschung zur motorischen Kontrolle bestätigt werden kann (Chieffi & Allport, 1997; Chieffi et al. 1999; Chieffi, Conson & Carlomagno, 2004; Hollins & Goble, 1988; Rizzolatti et al., 1997).

5 Ausblick: Experiment 7 – Konstruktion und Rekonstruktion von Bewegungen

Im Folgenden wird ein Experiment beschrieben, das einen Ausblick für weitere Möglichkeiten experimenteller Fragestellungen und Untersuchungen mit dem in den Experimenten 1 bis 6 erprobtem experimentellen Paradigma bietet. In den bisher dargestellten Experimenten dieser Arbeit wurden stets vorgegebene Bewegungen verwendet, d. h. die Probanden führten in der Lernphase die durch Punkte angedeuteten Bewegungen aus. Aufgrund der in allen Experimenten beobachteten Überschätzung der Bewegungsdauer in der Abrufphase gegenüber der Lernphase sowie der stets größeren Latenz des Bewegungsonset beim Bewegungsabruf wurden Mechanismen der Rekonstruktion des Gedächtnisinhaltes diskutiert, die den größeren Zeitaufwand erklären könnten. Im Gegenzug interessiert die Frage, ob bei frei wählbaren Bewegungsaufgaben ein vergleichbarer Prozess der Konstruktion in der Phase der Kriteriumsbeziehung induziert werden kann. Beim Prozess der Bewegungskonstruktion stehen Prozesse der motorischen Planung im Vordergrund, wobei während der Bewegungsausführung entstehendes Feedback aus kinästhetischen Reafferenzen und kutanem Input mit motorischen Befehlen integriert wird (Paillard & Brouchon, 1968). Werden Bewegungen aktiv ausgeführt, ist zudem eine elaboriertere Bewegungsrepräsentation erforderlich als bei vorgegebenen Bewegungen.

Die Idee der Konstruktion bei einer motorischen Gedächtnisaufgabe wurde in diesem Experiment umgesetzt, indem die Versuchspersonen in der Lernphase Bewegungen selbst ausdenken, ausführen und nach einem kurzen Behaltensintervall wiedergeben sollten. Zudem ist eine interessante Frage, ab welchem Umfang der selbstgewählten Bewegungen ein deutlicher Leistungseinbruch bei der Gedächtnisleistung zu beobachten ist. In diesem Experiment wird darauf Wert gelegt, zunächst nur die Gedächtnisprozesse, die sich aufgrund zunehmender

Menge und Komplexität des zu memorierenden Materials ergeben, zu ermitteln. Deshalb wurde auf Zusatzaufgaben verzichtet, d. h. während des Behaltensintervalls waren keine zusätzlichen Aufgaben zu lösen. Die Komplexität der Kriteriumsbeziehung wurde in der Schwierigkeit variiert, indem die Anzahl der Bewegungselemente zunahm. Die Hypothese ist, dass mit zunehmender Anzahl der Bewegungselemente die Fehlerrate, die Bewegungsdauer und die Anzahl der explorativen Stopps zunehmen. Ferner sollte im Sinne der in diesem Experiment zu überprüfenden These der Bewegungskonstruktion in den zeitbezogenen Maßen ein umgekehrtes Muster bei einem Vergleich von Lern- und Abrufphase als in den bisherigen Experimenten 1 bis 6 zu beobachten sein. Daher besteht die Erwartung, dass die Bewegungsdauer und die Latenz des Bewegungsonset in der Lernphase als Ausdruck von Prozessen der Bewegungskonstruktion- und Planung größer als in der Abrufphase ist unabhängig von der Komplexität der Bewegungen. Auch sollte daher in der Lernphase eine größere Anzahl und Dauer von explorativen Stopps zu beobachten sein.

5.1 Methode

Stichprobe An Experiment 7 nahmen zehn Vpn teil, darunter waren acht Studierende des Psychologischen Instituts der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. Zwei Vpn waren männlich, acht weiblich. Die Altersspanne der Vpn reichte von 19 bis 27 Jahren, das Durchschnittsalter lag bei 21.2 Jahren. Alle Vpn waren rechtshändig, normalsichtig bzw. korrigiert normalsichtig und ohne neurologische Beeinträchtigung. Keine der Vpn kannte den Hintergrund dieses Experiments.

Apparatur, experimentelle Aufgabe Die Versuchsanordnung war die gleiche wie in den vorhergehenden Experimenten. Der experimentelle Aufbau dieses Experiments basiert auf dem von Berti (2001) entwickelten methodischen Ansatz zur Untersuchung von Arbeitsgedächtnisphänomenen bei motorischen Kurzzeitspeicheraufgaben. Das

für dieses Experiment abgewandelte experimentelle Design ist in Abbildung 38 dargestellt. Aufgabe der Probanden war es, selbst ausgewählte lineare Bewegungen mit der PC-Maus zu zeichnen, wobei die linke Maustaste während der Bewegungsausführung kontinuierlich gedrückt und erst am Endpunkt der Bewegung losgelassen wurde. Während der Bewegungsausführung wurde kein visuelles Feedback gegeben, d. h. der Cursor war nicht zu sehen. Die so ausgeführte Bewegung war über ein Behaltensintervall von neun Sekunden zu behalten. Nach dem Behaltensintervall erschien in der Mitte des Monitors ein Punkt, der den Probanden signalisierte, die zuvor ausgeführte Bewegung zu wiederholen. Dabei wurde ebenfalls kein visuelles Feedback gegeben, d. h. der Cursor wurde während der Bewegungsausführung nicht eingeblendet, stattdessen war der schwarze Punkt in der Mitte des Bildschirms bis zum Ende der Bewegungsausführung zu sehen. Die Probanden wurden gebeten, ein- bis fünfteilige Bewegungen auszuführen, wobei die einzelnen Bewegungselemente linear sein sollten. Die Bewegungen wurden in einem Stück durchgeführt, d. h. zwischen den einzelnen Bewegungselementen wurde mit der PC-Maus nicht abgesetzt. In Abbildung 39 sind zur Veranschaulichung einige Beispiele für ein- bis fünfteilige Bewegungen dargestellt.

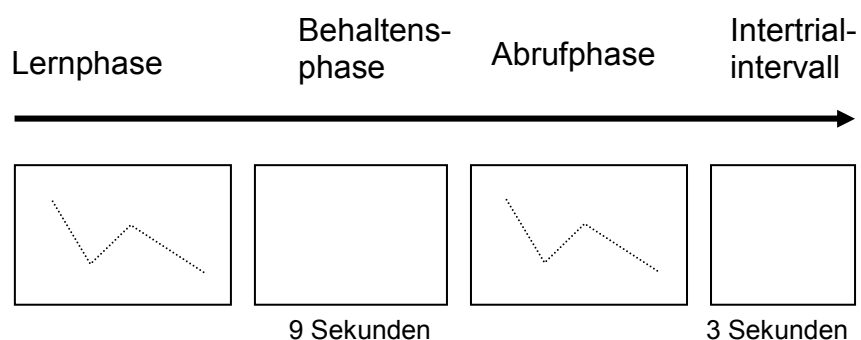


Abbildung 38: Versuchsdesign von Experiment 7.

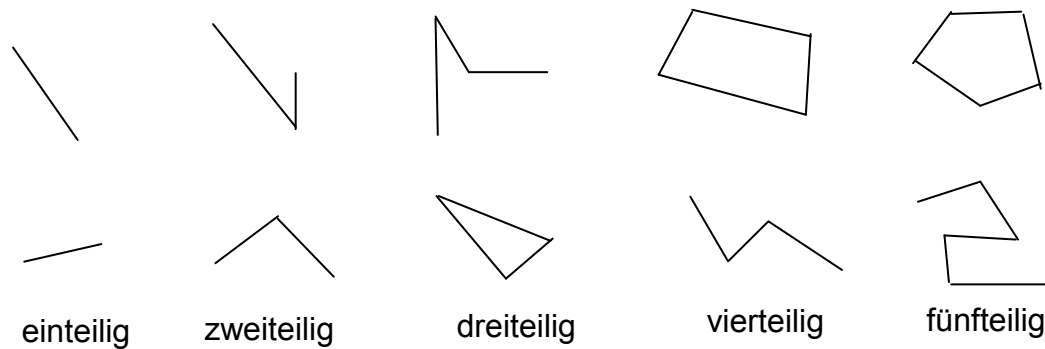


Abbildung 39: Beispiele für ein- bis fünfteilige Bewegungen.

Design Als unabhängige Variable wurde in diesem Experiment die Anzahl der Bewegungselemente (ein-, zwei-, drei-, vier-, fünfteilig) in einem Messwiederholungsdesign getestet, d. h. jede Versuchsperson durchlief alle fünf experimentellen Bedingungen zu jeweils 10 Trials, wobei die Bedingungen geblockt dargeboten wurden. Die Reihenfolge der Bedingungen war zwischen den Vpn randomisiert. Die abhängige Variable war die Gedächtnisleistung bei der motorischen Kurzzeitspeicherung.

Experimentelle Prozedur Die Gedächtnisaufgabe wurde durch eine schriftliche Instruktion erläutert, wobei sich die Vpn je nach Anzahl der Bewegungselemente vor jedem Trial eine neue Bewegung ausdenken, in der Lernphase ausführen und diese hinsichtlich der Form und Bewegungsgeschwindigkeit in der Abrufphase exakt reproduzieren sollten (siehe Anhang C). Die Gedächtnisaufgabe wurde in einem Trainingsblock (10 Trials) geübt. Der Beginn jedes Trials wurde durch die schriftliche Aufforderung, eine neue Bewegung auszudenken auf dem Monitor angezeigt. Nachdem die Vpn eine Taste betätigten, um mit dem Experiment fortzufahren, wurde der Cursor eingeblendet, der signalisierte, mit der Bewegung zu beginnen. Die Bewegung wurde ausgeführt, wobei der Cursor stets an derselben Stelle in der Mitte des Bildschirms eingeblendet wurde, um den Probanden keine visuelle Rückmeldung über den Bewegungsverlauf zu geben. Nach Loslassen der Maustaste wurde der Cursor ausgeblendet. Nach einem Behaltensintervall von neun

Sekunden wurde der Beginn des Bewegungsabrufs durch ein akustisches Warnsignal (400 Hz) angekündigt. Wieder erschien in der Mitte des Bildschirms der Cursor und wurde bis zum Loslassen der Maustaste an derselben Stelle präsentiert. Zwischen den Trials wurde die schriftliche Aufforderung, eine neue Bewegung auszudenken eingeblendet. Vor jedem Experimentalblock wurden die Probanden in schriftlicher Form neu instruiert. Die Gedächtnisaufgabe wurde dann in einem Trainingsblock (5 Trials) vor Beginn des jeweiligen Experimentalblocks geübt.

Datenaufzeichnung

Folgende Daten wurden automatisiert aufgezeichnet:

1. x- und y-Koordinaten der mittels der PC-Maus ausgeführten Bewegungen mit einer Aufzeichnungsrate von 40 Hz;
2. Bewegungsdauer von allen ausgeführten Bewegungen in Lern- und Abrufphase (in ms), d. h. der Zeitpunkt, zu dem die Maustaste gedrückt wurde, um die Bewegung zu starten bis zum Loslassen der Maustaste, welches das Ende der Bewegung signalisiert;
3. Dauer zum Bewegungsonset in Lern- und Abrufphase (in ms);

Datenanalysen Die Bewegungsdaten wurden in einem ersten Schritt einer qualitativen Analyse unterzogen. Die Prozedur der qualitativen Analyse war die gleiche wie in den vorhergehenden Experimenten. Es wurde im Anschluss eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung für den Faktor Anzahl der Bewegungselemente (ein-, zwei-, drei-, vier-, fünfteilig) für die gemittelten Fehlerraten sowie post-hoc Tests nach Bonferroni zum Vergleich der Mittelwerte durchgeführt. In einem zweiten Schritt wurde die Analyse der zeitbezogenen Maße für die Bewegungsdauer, für die Latenz des Bewegungsonset sowie für die explorativen Stopps (Anzahl pro Trial, Anzahl langer bzw. kurzer Stopps, Dauer pro Stopp) durchgeführt. Die Auswertungsprozedur für diese zeitbezogenen Maße war die gleiche wie in den vorhergehenden Experimenten. Für die gemittelten Bewegungszeiten, Latenzen zum Bewegungsonset, sowie alle gemittelten Maße der explorativen Stopps wurde jeweils eine zweifaktorielle Varianzanalyse für den Faktor Anzahl

der Bewegungselemente (ein-, zwei-, drei-, vier-, fünfteilig) und den Faktor Phase (Lernphase, Abrufphase) sowie post-hoc Tests nach Bonferroni zum Vergleich der Mittelwerte durchgeführt. Für alle statistischen Tests wurde ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$ gesetzt.

5.2 Ergebnisse

5.2.1 Qualitative Analyse

Die Ergebnisse der qualitativen Analyse sind in Abbildung 40 dargestellt. Ein gradueller Anstieg der Fehlerrate zeigt sich ab den Bewegungen mit fünf Bewegungselementen, d. h. erst ab einer Anzahl von fünf Bewegungselementen ist eine tatsächliche Fehlerrate zu beobachten, während bei den ein- bis vierteiligen Bewegungen die Fehlerrate sehr gering ist. Die ANOVA zeigt hier einen hochsignifikanten Haupteffekt auf, $F(4, 36) = 12.79, p < .001$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen, dass sich die Bedingung mit fünfteiligen Bewegungen von allen anderen Bedingungen, nämlich der Bedingung mit vierteiligen ($p < .001$), dreiteiligen ($p < .01$), zweiteiligen ($p < .001$) und einteiligen Bewegungen ($p < .001$) unterscheidet. Alle weiteren Vergleiche sind hinsichtlich der Fehlerrate nicht signifikant.

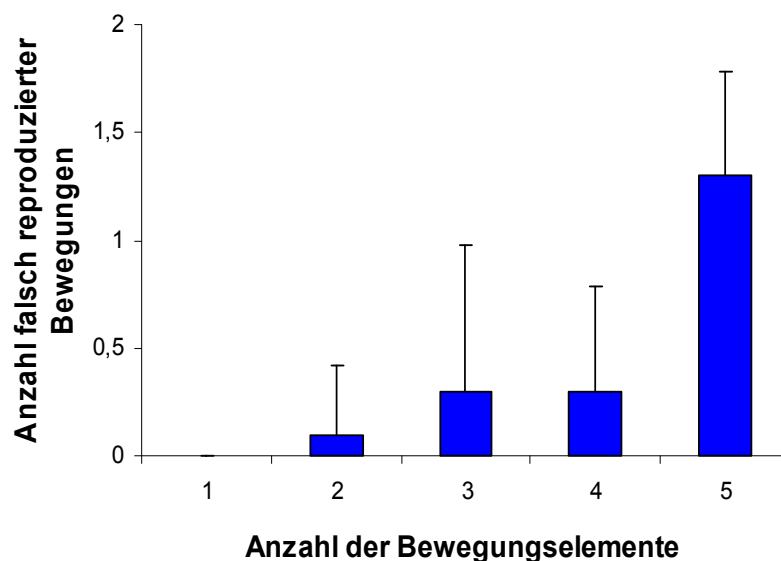


Abbildung 40: Mittlere Fehlerrate in Abhängigkeit von der Anzahl der Bewegungselemente.

5.2.2 Analyse der zeitbezogenen Maße

Bewegungsdauer In Abbildung 41 ist die mittlere Bewegungsdauer für alle experimentellen Bedingungen in Lern- und Abrufphase dargestellt. Es

zeigt sich ein aufgrund steigender Anzahl der Bewegungselemente erwartungsgemäßer Anstieg der Bewegungsdauer in Lern- und Abrufphase mit steigender Anzahl der Bewegungselemente. Entgegen den Befunden aus den bisherigen Experimenten, die vorgegebene Bewegungen nutzen, findet sich in diesem Experiment in der Lernphase aller experimentellen Bedingungen eine längere Bewegungsdauer als in der Abrufphase. Die ANOVA zeigt hochsignifikante Haupteffekte für die Anzahl der Bewegungselemente, $F(4, 36) = 53.85$, $p < .001$, und die Phase, $F(1, 9) = 31.04$, $p < .001$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Phase ist ebenfalls hochsignifikant, $F(4, 36) = 18.22$, $p < .001$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen, dass sich alle Bedingungen der Anzahl der Bewegungselemente hinsichtlich der Bewegungsdauer unterscheiden, wobei diese Unterschiede alle hochsignifikant ($p < .01$) sind. Einzige Ausnahme bildet ein Vergleich der zwei- und dreiteiligen Bewegungen, hier findet sich kein Unterschied ($p > .05$).

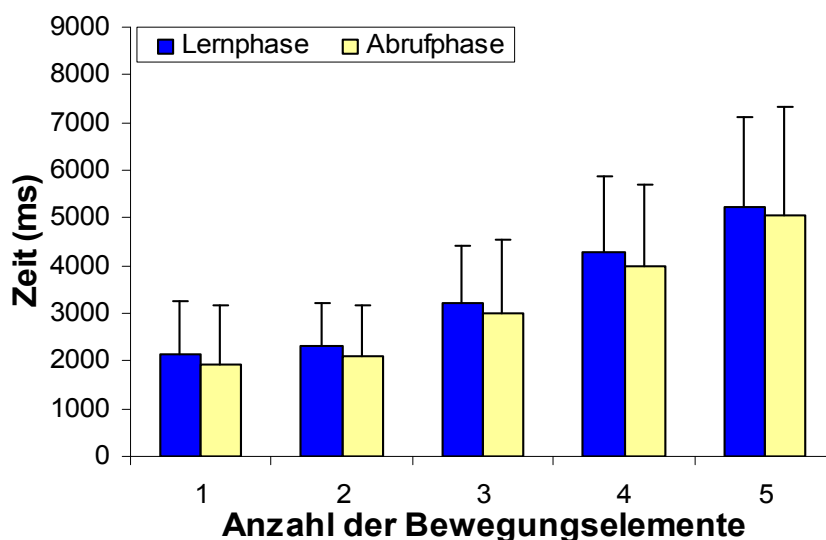


Abbildung 41: Mittlere Bewegungsdauer in Abhängigkeit von der Anzahl der Bewegungselemente, dargestellt für Lern- und Abrufphase.

Latenz des Bewegungsonset In Abbildung 42 ist die mittlere Dauer zum Bewegungsonset dargestellt. In allen Bedingungen ist die Latenz des Bewegungsonset in der Lernphase deutlich länger ist als in der Abrufphase, während es bei einem Vergleich der Anzahl der

Bewegungselemente keine Unterschiede gibt. Die ANOVA zeigt einen signifikanten Haupteffekt der Phase, $F(1, 9) = 8.96$, $p < .05$, nicht aber der Anzahl der Bewegungselemente, $F(4, 36) = 1.89$, $p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Phase wird nicht signifikant, $F(4, 36) = 1.40$, $p > .05$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen, dass sich nur die vierteiligen von den einteiligen Bewegungen hinsichtlich der Latenz des Bewegungsonset unterscheiden, $p < .05$. Ferner wurden zusätzlich zwei separate einfaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung für den Faktor Bewegungselemente (ein-, zwei-, drei-, vier- und fünfteilig) jeweils für die Lern- bzw. Abrufphase durchgeführt. Die ANOVA nur für die Lernphase zeigt keinen signifikanten Haupteffekt der Anzahl der Bewegungselemente auf, $F(4, 36) = 1.69$, $p > .05$, ebenfalls nicht die ANOVA für die Abrufphase, $F(4, 36) = 1.21$, $p > .05$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen, dass sich zweiteilige von fünfteiligen Bewegungen unterscheiden ($p < .05$).

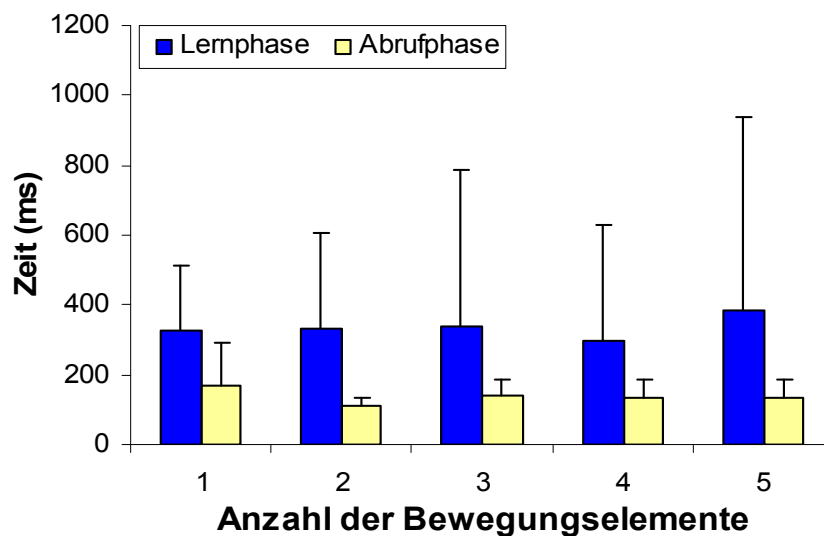


Abbildung 42: Mittlere Latenz vom Erscheinen des imperativen Stimulus bis zum Bewegungsonset in Abhängigkeit von der Anzahl der Bewegungselemente, dargestellt für Lern- und Abrufphase.

5.2.3 Explorative Stopps

Dauer eines Stopps Bei Betrachtung der Anzahl der Bewegungselemente sowie der Phase finden sich keine Unterschiede hinsichtlich der Dauer eines Stopps. Die ANOVA zeigt weder Effekte der

Anzahl der Bewegungselemente auf, $F(4, 36) = 1.27, p > .05$, noch der Phase, $F(1, 9) = .06, p > .05$. Die Interaktion von Aufgabenmodalität und Phase ist nicht signifikant, $F(4, 36) = .40, p > .05$. Ferner wurden zwei separate einfaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung für den Faktor Bewegungselemente (ein-, zwei-, drei-, vier- und fünfteilig) nur für die Lern- bzw. Abrufphase durchgeführt. Die ANOVA nur für die Lernphase zeigt keinen signifikanten Haupteffekt der Anzahl der Bewegungselemente, $F(4, 36) = .79, p > .05$, ebenso findet sich kein Effekt der Anzahl der Bewegungselemente in der Abrufphase, $F(4, 36) = 1.51, p > .05$.

Anzahl Stopps pro Trial In Abbildung 43 ist die Anzahl explorativer Stopps pro Trial dargestellt. Mit zunehmender Anzahl der Bewegungselemente steigt die Anzahl der Stopps, wobei dies vor allem für die jeweilige Abrufphase gilt. Die Anzahl kurzer Stopps steigt mit der Anzahl der Bewegungselemente, die Anzahl langer Stopps dagegen bleibt über alle experimentellen Bedingungen hinweg gleich. Die für die gemittelte Anzahl der Stopps durchgeführte ANOVA zeigt einen signifikanten Haupteffekt der Anzahl der Bewegungselemente auf, $F(4, 36) = 2.93, p < .05$. Ein Effekt der Phase bleibt aus, $F(1, 9) = .29, p > .05$. Die Interaktion von Bewegungselemente und Phase ist nicht signifikant, $F(4, 36) = .37, p > .05$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen, dass sich die Bedingung mit fünfteiligen Bewegungen von der Bedingung mit zweiteiligen Bewegungen ($p < .05$) unterscheidet. Ferner findet sich ein Unterschied zwischen vier- und zweiteiligen Bewegungen ($p = .001$). Alle anderen Vergleiche sind hinsichtlich der Anzahl explorativer Stopps pro Trial nicht signifikant. Zusätzlich wurden zwei separate einfaktorielle Varianzanalysen jeweils nur für die Lern- bzw. Abrufphase für den Faktor Anzahl der Bewegungselemente (ein-, zwei-, drei-, vier- und fünfteilig) durchgeführt. Die ANOVA nur für die Lernphase zeigt keinen Effekt der Bewegungselemente auf, $F(4, 36) = 1.89, p > .05$, dagegen zeigt sich ein Effekt in der Abrufphase, $F(4, 36) = 2.73, p < .05$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen hier, dass sich die Bedingung mit vierteiligen Bewegungen von der Bedingung mit zweiteiligen Bewegungen ($p < .05$)

unterscheidet. Alle anderen Vergleiche sind hinsichtlich der Anzahl explorativer Stopps pro Trial nicht signifikant.

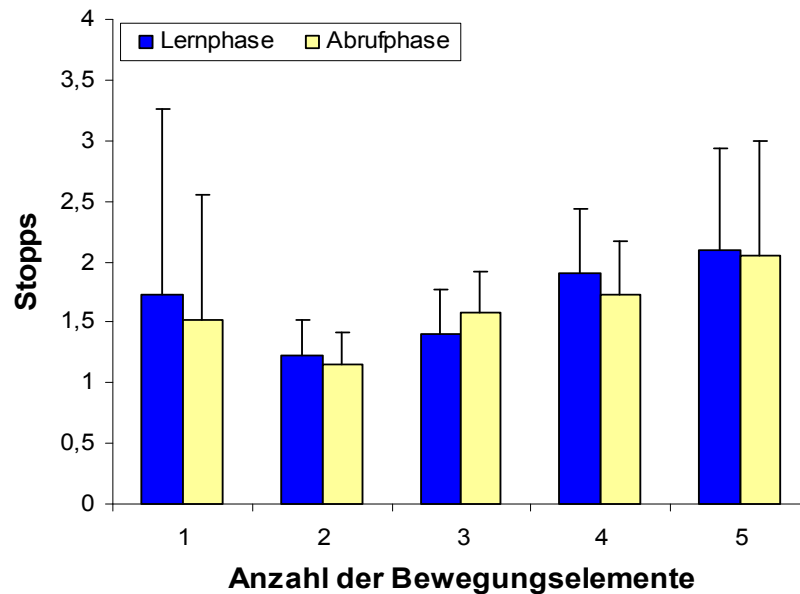


Abbildung 43: Mittlere Anzahl explorativer Stopps pro Trial in Abhängigkeit von der Anzahl der Bewegungselemente, dargestellt für Lern- und Abrufphase.

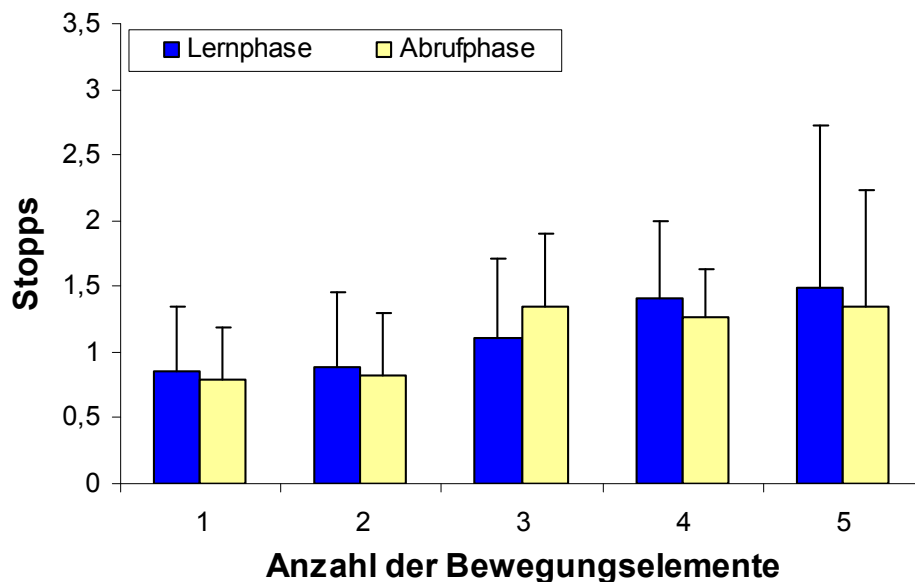


Abbildung 44: Mittlere Anzahl kurzer explorativer Stopps pro Trial in Abhängigkeit von der Anzahl der Bewegungselemente, dargestellt für Lern- und Abrufphase.

Die zur Analyse der langen Stopps durchgeführte ANOVA zeigt weder einen Effekt der Anzahl der Bewegungselemente, $F(4, 36) = 1.27$, $p > .05$, noch der Phase, $F(1, 9) = .05$, $p > .05$. Die Interaktion von Bewegungselemente und Phase ist nicht signifikant, $F(4, 36) = .17$, $p > .05$. Zusätzlich wurden zwei separate einfaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung jeweils nur für die Lern- bzw. Abrufphase für den Faktor Anzahl der Bewegungselemente (ein-, zwei-, drei-, vier- und fünfteilig) durchgeführt. Die ANOVA nur für die Lernphase zeigt keinen Effekt der Bewegungselemente auf, $F(4, 36) = .80$, $p > .05$, für die Abrufphase ergibt sich das gleiche Bild, $F(4, 36) = 2.16$, $p > .05$.

Die zur Analyse der kurzen Stopps durchgeführte ANOVA (siehe Abbildung 44) zeigt einen hochsignifikanten Haupteffekt der Anzahl der Bewegungselemente auf, $F(4, 36) = 4.34$, $p < .01$, nicht aber der Phase, $F(1, 9) = .07$, $p > .05$. Die Interaktion von Bewegungselemente und Phase ist nicht signifikant, $F(4, 36) = .31$, $p > .05$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen, dass sich die Bedingung mit vierteiligen Bewegungen von der Bedingung mit zweiteiligen Bewegungen ($p < .05$) unterscheidet. Alle weiteren Vergleiche sind hinsichtlich der Anzahl kurzer Stopps pro Trial nicht signifikant. Zusätzlich wurden zwei separate einfaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung jeweils nur für die Lern- bzw. Abrufphase für den Faktor Anzahl der Bewegungselemente (ein-, zwei-, drei-, vier- und fünfteilig) durchgeführt. Die ANOVA nur für die Lernphase zeigt keinen Haupteffekt auf, $F(4, 36) = 1.76$, $p > .05$. Für die Abrufphase kann dagegen ein signifikanter Effekt der Anzahl der Bewegungselemente gezeigt werden, $F(4, 36) = 3.15$, $p < .05$. Post-hoc Tests nach Bonferroni zeigen hier, dass sich die Bedingung mit dreiteiligen Bewegungen von der Bedingung mit einteiligen Bewegungen ($p < .05$) unterscheidet. Alle anderen Vergleiche sind hinsichtlich der Anzahl kurzer explorativer Stopps nicht signifikant.

5.3 Diskussion

In Experiment 7 sind im Gegensatz zu den vorhergehenden Experimenten von den Probanden ausgewählte Bewegungen getestet worden. Die Erwartung war, dass zum Rekonstruktionsprozess bei vorgegebenen Bewegungen in der Abrufphase als Äquivalent Konstruktionsprozesse bei selbstgewählten Bewegungen in der Lernphase aufgezeigt werden können. Die in diesem Experiment gefundenen Ergebnisse können – unter dem Vorbehalt, dass keine Zusatzaufgaben getestet wurden – als Hinweise auf solche Konstruktionsprozesse gewertet werden. In der Lernphase findet sich über alle Bedingungen hinweg eine größere Bewegungsdauer als in der Abrufphase, wobei die Differenz bei ca. 200 ms liegt. Dieses Ergebnis steht im Gegensatz zu den Ergebnissen der bisherigen Experimente, in denen die Abrufphase stets länger war als die Lernphase. Auch hinsichtlich der Latenz des Bewegungsonset findet sich ein vergleichbares Muster. Während in den bisherigen Experimenten eine größere Latenz bei schwierigen Aufgaben nur in der Abrufphase zu beobachten war, ist in diesem Experiment eine größere Latenz stets in der Lernphase auszumachen, wobei diese Latenz unabhängig von der Anzahl der Bewegungselemente ist. Die Latenz des Bewegungsonset in der Abrufphase ist also erstmalig in dieser Arbeit deutlich geringer als in der Lernphase. Diese Ergebnisse geben Anlass zur Vermutung, dass aufgrund der selbstgewählten Bewegungen zeitaufwendige Konstruktionsprozesse bei der Bewegungsplanung involviert sind, während der Rekonstruktionsprozess in der Abrufphase nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Die Ergebnisse sprechen dafür, dass die explorativen Stopps möglicherweise nicht als Indikator eines Konstruktionsprozesses zu interpretieren sind. Mit steigender Anzahl der Bewegungselemente nimmt die Anzahl der Stopps, vor allem der kurzen Stopps in der Abrufphase zu, nicht aber in der Lernphase. Die Stopps, insbesondere die kurzen Stopps sind daher möglicherweise Ausdruck eines so genannten *central nervous noise*, d. h. bei mentaler Belastung des zentralen Nervensystems sind

mehr Kontrollprozesse notwendig und es kommt zu einer erhöhten Muskelspannung. Dass sich Kapazitätsauslastungen des Arbeitsgedächtnisses auf das motorische System auswirken, konnte bereits gezeigt werden (Andersson, Yardley & Luxon, 1998; Shumway-Cook et al., 1997; Shumway-Cook & Woolacott, 2000). Bei einer Beanspruchung des Arbeitsgedächtnisses ist die motorische Kontrolle der Körperhaltung involviert, wobei sich dies unabhängig von der Aufgabenmodalität in einer höheren Frequenz mit geringerer Amplitude der Haltungskorrekturen zeigt (Dault, Frank & Allard, 2001). So könnte erklärt werden, warum die Dauer eines Stopps über alle Bedingungen in Lern- und Abrufphase gleich bleibt. Die Kontrolle wird also nicht über die Stoppdauer, sondern über die Frequenz der Stopps moduliert. Ferner scheinen aktive Mechanismen der Konstruktion in der Lernphase bzw. Rekonstruktion in der Abrufphase nur eine untergeordnete Rolle zu spielen, da die Anzahl langer Stopps in Lern- und Abrufphase über alle Bedingungen hinweg gleich bleibt. Denkbar ist, dass der aktive Planungsprozess aufgrund der Aufgabenstruktur beim Bewegungsonset bereits abgeschlossen ist, d. h. die willentliche Auswahl der Bewegung ist bereits vor Bewegungsbeginn vollendet. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass es sich um vornehmlich automatisch ablaufende Mechanismen handelt, die bei der Bewegungsausführung in der Lernphase eine Rolle spielen.

Die Fehlerraten sind im Gegensatz zu den bisherigen Experimenten, insbesondere bei einem Vergleich mit den Kontrollbedingungen ohne Aufgabe, auch bei den fünfteiligen Bewegungen, sehr gering. Die Vermutung besteht, dass es sich hier um den *preselection effect* handelt, d. h. selbst ausgewählte Bewegungen werden genauer reproduziert als Bewegungen, die vorher festgelegt wurden (Roy, 1977, 1978; Roy & Diewert, 1978; Stelmach et al., 1975, 1976; Walsh et al., 1979), wie es in den vorhergehenden Experimenten der Fall war. Es kommt ferner zu einem graduellen Anstieg der Fehlerrate, d. h. erst ab einer Anzahl von fünf Bewegungselementen kommt es zu einem nennenswerten Anstieg der Fehlerrate, während bei geringerer Anzahl die Fehlerrate gegen null geht.

Zusammenfassend geben die in diesem Experiment gefundenen Ergebnisse Anlass zur Vermutung, dass in diesem Experiment ein Konstruktionsprozess mittels einer aktiven Bewegungswahl durch die Versuchspersonen erfolgreich induziert werden konnte. Er bildet möglicherweise das Gegenstück zum Rekonstruktionsprozess, der in den vorhergehenden Experimenten 1 bis 6 in der Abrufphase zu beobachten war. Im Gegensatz dazu spielt in Experiment 7 der Rekonstruktionsprozess in der Abrufphase, wie er bei den vorhergehenden Experimenten relevant war, da es sich stets um vorgegebene Bewegungen handelte, eine untergeordnete Rolle, so dass hier geringere Latenzen zum Bewegungsonset und eine über alle Schwierigkeitsgrade geringere Bewegungsdauer als in der Lernphase beobachtet werden konnten. Ferner zeigt sich gegenüber den vorhergehenden Experimenten eine vergleichbar geringe Fehlerrate bei einem Vergleich mit den Kontrollbedingungen ohne Aufgabe, die durch den *preselection effect* bei frei wählbaren Aufgaben erklärt werden kann.

6 Gesamtdiskussion

Ziel dieser Arbeit ist es, die Rolle motorischer Information im Kontext motorischer Arbeitsgedächtnisleistungen zu untersuchen. Dazu wurden, ausgehend von Ergebnissen bisheriger Studien zum motorischen Arbeitsgedächtnis, die bisherigen Postulate überprüft und um Konzepte aus der motorischen Kontrolle ergänzt und erweitert. Aufgrund der methodischen Probleme bisheriger Studien wurde ein neuer experimenteller Ansatz gewählt, in dem selbst ausgeführte zweidimensionale kleinräumige Bewegungen untersucht wurden. Dabei hatten die Versuchspersonen die Aufgabe, am PC per Maus eine kurze Bewegung auszuführen und nach einem Behaltensintervall wiederzugeben. Im Behaltensintervall mussten zusätzlich Aufgaben unterschiedlicher Modalitäten (verbal, visuell, visuell-motorisch, motorisch) bearbeitet werden, die Aufschluss über das Speicherformat von Bewegungen geben. Da sowohl qualitative (Fehlerrate) als auch zeitbezogene Daten (Bewegungsdauer, Latenz des Bewegungsonset, Reaktionszeiten, explorative Stopps) aufgezeichnet wurden, ist es möglich, Aussagen über resultatorientierte und prozessbezogene Aspekte bei der Verarbeitung im Arbeitsgedächtnis zu treffen. Im Folgenden sollen zunächst die eingangs formulierten globalen Hypothesen der Spezifität, Multimodalität, Redundanz und Strategie diskutiert werden. Bei der Diskussion dieser Hypothesen wird zunächst von der Annahme ausgegangen, dass es sich bei den beobachteten Ergebnissen um Prozesse der kurzzeitigen Speicherung von Bewegungen handelt. In einem weiteren Schritt wird Bezug zu den benachbarten Gebieten der Forschung zur motorischen Kontrolle, der Neuropsychologie, der Forschung zum motorischen Kurzzeitgedächtnis sowie zu neueren Konzepten aus der Arbeitsgedächtnisforschung genommen.

6.1 Die Spezifitätshypothese

Basierend auf den Ergebnissen der bisherigen Studien zur Frage eines motorischen Arbeitsgedächtnisses von Smyth et al. (Smyth, Pearson & Pendleton, 1988; Smyth & Pendleton, 1989, 1990) und Rumiati und Tessari (Rumiati & Tessari, 2002; Tessari & Rumiati, 2002) sowie auf der Grundlage der Erkenntnisse aus der Forschung zur motorischen Kontrolle wurde in einem ersten Schritt eine Spezifitätshypothese formuliert, die aussagt, dass es ein spezifisch motorisches Speicherformat bei der kurzzeitigen Speicherung von Bewegungen gibt, sowohl bei räumlich gerichteten Bewegungen als auch bei Bewegungsmustern. Das bedeutet, dass Bewegungen nicht in einem visuellen bzw. räumlichen Format gespeichert werden. Diese These konnte teilweise bestätigt werden. Bewegungen werden nicht rein visuell codiert, sondern kinästhetische und propriozeptive Informationen werden dabei berücksichtigt. Dies zeigt sich in den Experimenten 1, 4 und 5 anhand der Fehlerrate. Die visuell-motorische Aufgabe, die sowohl visuelle als auch motorische Komponenten hat, stört die Gedächtnisleistung am meisten. Die rein verbalen, visuellen und motorischen Aufgaben dagegen haben keinen Einfluss. Bei Überprüfung dieser Spezifitätshypothese zeigt sich, dass die von Smyth et al. (Smyth, Pearson & Pendleton, 1988; Smyth & Pendleton, 1989, 1990) sowie Rumiati und Tessari (Rumiati & Tessari, 2002; Tessari & Rumiati, 2002) vorgenommene Einteilung in räumlich gerichtete Bewegungen und Bewegungskonfigurationen und deren Zuordnung zu den verschiedenen Speichern (visuell-räumlich, motorisch) nicht haltbar ist. Da in dieser Arbeit laut Definition der eben genannten Autoren Bewegungen untersucht wurden, die auf räumliche Ziele ausgerichtet werden, hätte die rein visuelle Zusatzaufgabe die Gedächtnisleistung bei der Bewegungsreproduktion am meisten stören müssen, da räumlich gerichtete Bewegungen nach Meinung dieser Autoren im visuell-räumlichen Speicher verarbeitet werden. Dies war jedoch in keinem der hier durchgeführten Experimente der Fall. Räumlich gerichtete Bewegungen scheinen nicht einmal dann, wenn in der Lernphase nur visuelle Information zur Verfügung steht (siehe Experiment 4), in einem rein visuellen Format verarbeitet zu werden. Die Einteilung laut Smyth et

al. (Smyth, Pearson & Pendleton, 1988; Smyth & Pendleton, 1989, 1990) in Bewegungskonfigurationen und räumlich gerichtete Bewegungen ist zudem post hoc vorgenommen worden, da unterschiedliche Effekte der motorischen Zweitaufgaben zunächst nicht anders erklärt werden konnten. Der Charakter einer Hilferklärung für die beobachteten Phänomene lässt sich auch am Beispiel des Experiments von Woodin und Heil (1996) zeigen. In dieser von der experimentellen Umsetzung her fragwürdigen Studie sollten Ruderer während der Darbietung einer Handlungsspanne bzw. der Matrixaufgabe von Brooks (1967), die das visuell-räumliche Gedächtnis beansprucht, Ruderbewegungen ausführen. Die Ergebnisse zeigten, dass das Timing der konfiguralen Elemente durch das gleichzeitige Encodieren einer Handlungsspanne beeinträchtigt, dagegen das Timing der räumlich gerichteten Bewegungselemente durch das Bearbeiten der Matrixaufgabe gestört wurde. Woodin und Heil (1996) schlossen anhand der beobachteten selektiven Interferenz, dass beide Bewegungskomponenten separat, d. h. vom visuell-räumlichen bzw. vom motorischen Subsystem, kontrolliert werden und daher unterschiedliche Anforderungen an das Arbeitsgedächtnis stellen. Eine in dieser Art vereinfachende Erklärung ist aus neurophysiologischer Sicht nicht haltbar, da zur Planung, Ausführung und Kontrolle jeglicher Art von Bewegungen das visuelle und propriozeptive System, welche jeweils komplementäre Informationen enthalten, auf das gleiche physiologische Substrat zurückgreift (z. B. Fiehler et al., 2008). Es kommt beispielsweise zu einer Aktivierung des visuellen dorsalen Strangs bei explorativen Handbewegungen, wenn kein visuelles Feedback gegeben wird (Binkofski et al., 1999; Stoeckel et al., 2003). Die massive Störwirkung der visuell-motorischen Zusatzaufgabe, im Gegensatz zu den rein visuellen oder motorischen Aufgaben in den vorliegenden Experimenten, könnte aus neurophysiologischer Sicht erklärt werden, nämlich dass bei der visuellen und kinästhetischen Bewegungskontrolle das gleiche physiologische System involviert ist.

Zusammenfassend sprechen diese Argumente sowie die in dieser Arbeit gefundenen Ergebnisse dafür, dass räumlich gerichtete Bewegungen, wie sie in diesem Experiment untersucht wurden, nicht in

einem rein visuellen Format verarbeitet werden, selbst wenn während der Encodierphase nur visuelle Informationen zur Verfügung stehen. Im Sinne einer Spezifitätsthese kann also festgestellt werden, dass Bewegungen zumindest teilweise in einem vom visuell-räumlichen Format abweichenden Code gespeichert werden. Ferner zeigt sich, dass die von Smyth und Pendleton vorgenommene Einteilung in räumlich gerichtete Bewegungen und Bewegungskonfigurationen nicht haltbar ist (Smyth & Pendleton, 1989, 1990).

6.2 Multimodalität und das Phänomen der Redundanz

Die Ergebnisse der durchgeführten Experimente sprechen dafür, dass räumlich gerichtete Bewegungen nicht rein visuell-räumlich gespeichert werden. Die in den Experimenten 1, 4 und 5 gefundenen Ergebnisse sprechen ebenfalls dafür, dass die untersuchten räumlich gerichteten Bewegungen nicht in einem rein motorischen Format gespeichert werden. Die visuell-motorische Aufgabe beeinträchtigte die Gedächtnisleistung, die rein motorische Aufgabe dagegen nicht, obwohl die Versuchspersonen in den Nachbefragungen bei der motorischen Bedingung in den meisten Fällen die höchste Schwierigkeitseinstufung angaben. Die fehlende Störwirkung auf die Gedächtnisleistung bei der motorischen gegenüber der visuell-motorischen Zusatzaufgabe spricht dafür, dass Bewegungen nicht in einem rein kinästhetischen bzw. propriozeptiven Format, sondern sowohl visuell als auch originär motorisch, verarbeitet werden. Dieses multimodale Format von Bewegungen, das sich hier beobachten lässt, zeigt deutlich, dass das Konzept eines separaten motorischen Speichers von Smyth et al. (Smyth, Pearson & Pendleton, 1988; Smyth & Pendleton, 1989, 1990) sowie Rumiati und Tessari (Rumiati & Tessari, 2002; Tessari & Rumiati, 2002) nicht haltbar ist. Der Schluss auf ein motorisches Subsystem, das für die Verarbeitung von ganz speziellen Bewegungsformen zuständig ist (nach Meinung dieser Autoren sind dies nur Bewegungskonfigurationen), ist nicht nur wegen der eingangs diskutierten methodischen Mängel des Paradigmas der Handlungsspanne, sondern vor allem aus theoretischer Sicht nicht sinnvoll. Aus

neurophysiologischer Sicht ist die Annahme eines separaten motorischen Speichers, dem eine funktionale Trennung von visuellen und motorischen Informationen bei der Bewegungskontrolle zugrunde liegen würde, nicht haltbar. Es ist bekannt, dass der dorsale „*action*“ Strang, der von frühen visuellen Arealen zum inferotemporalen Cortex projiziert, bei visuell geführten Bewegungen beteiligt ist (Schneider, 1969, Ungerleider & Mishkin, 1982). Sowohl Verhaltensexperimente (Easton et al., 1997; Reales et al., 1999) als auch bildgebende Studien (Amedi et al., 2001; Fiehler et al., 2008) zeigen, dass das visuelle und haptische System dasselbe physiologische Substrat zur Bewegungskontrolle nutzt. Es sei an dieser Stelle ferner die Sichtweise der Forschung zur motorischen Kontrolle angeführt, die besagt, dass Bewegungen in unterschiedlichen Modalitäten (visuell, kinästhetisch, propriozeptiv) verarbeitet werden können, wenn Informationen aus mehreren sensorischen Kanälen vorhanden sind (z. B. Rosenbaum & Chaiken, 2001; Rosenbaum, Meulenbroeck & Vaughan, 1999). Daher ist anzunehmen, dass sowohl Bewegungskonfigurationen als auch räumlich gerichtete Bewegungen die Verarbeitung von sowohl visueller als auch originär motorischer Information erfordern. Diese Aussage lässt sich durch die Beobachtung stützen, dass in Experiment 5 die Erinnerung von räumlich gerichteten Bewegungen durch Ausführen von Bewegungskonfigurationen während des Behaltensintervalls gestört wird. Entgegen der Meinung von Smyth et al. (Smyth, Pearson & Pendleton, 1988; Smyth & Pendleton, 1989, 1990) sowie Rumiati und Tessari (Rumiati & Tessari, 2002; Tessari & Rumiati, 2002) beanspruchen räumlich gerichtete Bewegungen und Bewegungskonfigurationen also dieselben kognitiven Ressourcen.

Die *motor short-term memory* Literatur nimmt ebenfalls zum Thema der Multimodalität Stellung. Es wird dabei eine multimodale Codierung von Bewegungen angenommen, wobei vornehmlich visuelle und kinästhetische Hinweisreize bei der kurzzeitigen Speicherung beteiligt sind. Diese so genannten visuellen und kinästhetischen Cues korrespondieren mit bestimmten Parametern von Bewegungen wie etwa der Distanz und dem Endpunkt einer Bewegung. Diewert (1975) beispielsweise postuliert, dass Informationen über die Position in einer

integrierten visuell-kinästhetischen Repräsentation gespeichert werden. Auch in der *closed loop* Theorie von Adams (1971) und in der Schematheorie von Schmidt (1975) spielt dieses Modell der Repräsentation von multiplen Bewegungscues bei der Speicherung von Bewegungen eine Rolle. Demnach ist ein einzelner Bewegungscue nicht in der Lage, Interferenz zu erzeugen, jedoch mehrere dieser Cues in Kombination (Hagmann & Williams, 1977). Dem Endpunkt einer Bewegung bei linearen Bewegungsaufgaben werden dabei visuell-räumliche Eigenschaften zugeschrieben, da er Aufmerksamkeit bei der Aufgabenbearbeitung erfordert. Die zurückzulegende Distanz erfordert jedoch eher kinästhetische Verarbeitung, aber keine Aufmerksamkeit (Laabs, 1973; Stelmach & Kelso 1975). Diese Annahmen stehen in Einklang mit den in dieser Arbeit gefundenen Ergebnissen. Die visuell-motorische Aufgabe, nicht jedoch die rein visuelle oder rein motorische Aufgabe verursacht einen Leistungseinbruch bei der Bewegungsreproduktion. Demnach ist also die Kombination von visuellen und kinästhetischen Cues entscheidend für die beobachteten Störeffekte.

Zusammenfassend sprechen die in dieser Arbeit gefundenen Ergebnisse dafür, dass sowohl visuelle als auch propriozeptive Informationen zur Verarbeitung und Speicherung von Bewegungen beitragen. Dieses multimodale Format steht im Gegensatz zu der Annahme eines separaten motorischen Speichers. Weitere Argumente gegen ein separates motorisches Subsystem ergeben sich aus Erkenntnissen der Neuropsychologie und der Forschung zur motorischen Kontrolle.

Mit dem Konzept der Multimodalität ist auch das Konzept der Redundanz eng verbunden. Als redundante Verarbeitung wird die Hinzunahme von Informationen aus anderen sensorischen Kanälen bezeichnet, auch wenn diese zusätzliche Information gar nicht zur reinen Aufgabenbewältigung notwendig wäre. Die These der Redundanz konnte am besten mit den Experimenten 4 bis 6 bestätigt werden. Hier zeigte sich, dass wenn kinästhetische Information neben visuellen Cues in der Lernphase vorhanden sind, diese kinästhetischen Cues herangezogen werden, auch wenn sich dies nachteilig auf das Resultat auswirkte.

Redundanz für visuelle Cues konnte in Experiment 5 demonstriert werden, da irrelevante visuelle Information berücksichtigt wurde, obwohl sich dies wiederum negativ auf die Leistung auswirkte. Die in Experiment 4 und 6 gefundenen Ergebnisse sprechen dafür, dass die redundante Codierung von visuellen und kinästhetischen Cues unter anderem bei der Bildung und Stabilisierung der Repräsentation der Bewegungsgeschwindigkeit eine wesentliche Rolle spielt. In Experiment 4 zeigte sich, dass ohne kinästhetische Information während der Lernphase die Reproduktion der Bewegungsgeschwindigkeit sehr ungenau ist. Ferner konnte in Experiment 6 beobachtet werden, dass erst die Kombination von kinästhetischen und visuellen Signalen zu einer Beeinflussung der Geschwindigkeitsrepräsentation führt. Hollins und Goble (1988) postulieren, dass die Kombination von Cues der Geschwindigkeit und der Lokalität zur Wahrnehmung der Länge einer aktiven Bewegung beiträgt und dass die Wahrnehmung der Länge der Bewegung durch die Bewegungsgeschwindigkeit beeinflusst wird. In gleicher Weise konnte gezeigt werden, dass die Geschwindigkeit von kinästhetischen Trackingaufgaben die Wahrnehmung der Länge der Bewegung (Wapner et al., 1967) sowie die Lokalisierung des Endpunktes einer Bewegung (Chieffi, Conson & Carlomagno, 2004) beeinflusst. Die redundante Codierung dient also der Stabilisierung der internen Bewegungsrepräsentation, wobei unter anderem die Geschwindigkeit der Bewegung über die Kombination von visuellen und kinästhetischen Signalen vermittelt wird.

In der Gedächtnisliteratur finden sich Hinweise auf Redundanz durch eine multimodale Codierung in Studien zum Gedächtnis für Handlungen, die durch Probanden ausgeführt werden (*subject-performed tasks*, SPTs). In diesen Studien zeigt sich der so genannte Effekt des *enactment*, der sich darin äußert, dass Probanden mehr Handlungsphrasen erinnern, wenn sie diese selbst ausführen, als wenn diese nur visuell oder verbal präsentiert werden. Dieser Effekt ist sehr robust und konnte in einer Vielzahl von Studien demonstriert werden (Cohen, 1989; Engelkamp, 1997, 1998; Zimmer, Cohen, Gynn, Engelkamp, Kormi-Nouri & Foley, 2001). Eine mögliche, und auch augenscheinliche Erklärung ist, dass

zusätzliche sensorische und motorische Informationen die Gedächtnisspur durch das Ausführen der Handlungen anreichern und somit robuster gegen das Vergessen machen.

In Analogie zum *enactment effect* lässt sich das Phänomen der Redundanz im Bereich der motorischen Kontrolle beobachten. So konnte zum Beispiel bei zwei- und dreidimensionalen räumlich gerichteten Bewegungen gezeigt werden, dass sowohl extrinsische als auch intrinsische Koordinaten bzw. visuell-räumliche und körperbezogene Informationen verwendet werden, auch wenn nur eine von beiden Informationsarten zur Bewältigung der Aufgabe ausreicht (z. B. Rosenbaum & Chaiken, 2001; Sober & Sabes, 2003). Dabei werden visuelle und propriozeptive Informationen gewichtet, so dass es zu einer Fehlerminimierung kommt, wenn Koordinatentransformationen von visuellen zu propriozeptiven Bezugsrahmen stattfinden (Ernst & Banks, 2002; Sober & Sabes, 2005). Auch im Bereich der Neuropsychologie lassen sich Hinweise auf eine Bevorzugung einer redundanten Repräsentation finden. Hier konnte gezeigt werden, dass durch visuelle Kontrolle von Bewegungen der Hand eine visuell-propriozeptive multimodale Repräsentation generiert wird, die genauer ist als jede der unimodalen visuellen bzw. propriozeptiven Repräsentationen für sich alleine (Desmurget et al., 1995; Rossetti et al., 1995; van Beers et al., 1996). Dieses Argument spricht dafür, dass die in dieser Arbeit gefundene redundante Verarbeitung von Bewegungen einer langfristigen Stabilisierung der internen Bewegungsrepräsentation dient, auch wenn dies unter kognitiver Auslastung zu nachteiligen Effekten führt. Das Erreichen einer redundanten Verarbeitung scheint zudem automatisch vom zentralen Nervensystem gesteuert zu werden. Dabei werden Informationen aus unterschiedlichen Modalitäten integriert, obwohl dieser Prozess kapazitätsaufwendig ist und im Falle der Gedächtnisaufgabe, die in dieser Arbeit gestellt wurde, nachteilig auf das Resultat wirkt. Die Versuchspersonen konnten sich anscheinend nicht gegen den Automatismus der Redundanz durch Verwendung eines aktiven top-down Kontrollprozesses wehren. An dieser Stelle wird deutlich, dass das Phänomen der Redundanz eng mit strategischen Aspekten des kognitiven

Systems verknüpft ist, daher wird die Diskussion der Redundanz im nächsten Abschnitt vertieft.

Zunächst lässt sich zusammenfassend feststellen, dass Bewegungen in einem multimodalen Format verarbeitet werden, wobei das Prinzip der Redundanz eine entscheidende Rolle spielt. Diese zusätzliche Verwendung von zur Aufgabenlösung nicht zwingend notwendiger Information scheint der Stabilisierung der internen Bewegungsrepräsentation zu dienen. Ferner scheint die redundante Verarbeitung weitgehend unbewusst abzulaufen.

6.3 Die Rolle der Strategie bei der Lösung motorischer Aufgaben

Bei der bisherigen Diskussion wurde nur das Resultat der Bewegungsreproduktion, nämlich die beobachtbare Fehlerrate berücksichtigt. Im Folgenden sollen die zeitbezogenen Maße hinzugenommen werden, da diese Aufschluss über prozessbezogene Aspekte bei der Verarbeitung im Arbeitsgedächtnis geben. In bisherigen Experimenten zur Frage der Rolle motorischer Information bei Arbeitsgedächtnisprozessen konnten zeitbezogene Maße aufgrund der experimentellen Methode zum einen nicht erfasst werden, zum anderen war dies auch nicht intendiert.

In den Experimenten 1 bis 6 zeigt sich in der visuell-motorischen Bedingung, die gegenüber den anderen Bedingungen eine erhebliche Störwirkung auf die Gedächtnisleistung hat, dass in der Abrufphase die Latenz des Bewegungsonset deutlich erhöht ist. Ferner wird diese erhöhte Latenz in der Abrufphase stets von einer gegenüber den anderen Bedingungen verringerten Latenz in der Lernphase sowie kürzeren Reaktionszeiten begleitet. Das Muster der vergrößerten Latenz in der Abrufphase in Begleitung einer verringerten Latenz in der Lernphase scheint immer dann aufzutreten, wenn es Schwierigkeiten bei der Aufgabenlösung gibt. Je schwieriger die Aufgabe zu bewältigen ist, desto mehr klafft der zeitliche Unterschied von der Dauer des Bewegungsonset von Lern- zu Abrufphase ähnlich einer Schere auseinander. Hierbei handelt es sich um ein sehr stabiles Muster, das über die Experimente 1 bis 6 hinweg beobachtet werden konnte. Ein ebenfalls wiederkehrendes

Muster ist das der verringerten Reaktionszeiten der Zusatzaufgaben, sobald die Aufgabenlösung kapazitätsbeanspruchend ist. Da die Reaktionszeiten in Experiment 2 separat, d. h. ohne Gedächtnisaufgabe, getestet wurden und sich dort keine modalitätsabhängigen Unterschiede fanden, können neben den Latenzen des Bewegungsonset auch die Reaktionszeiten als zeitliches Maß interpretiert werden, das Aufschluss über strategische Aspekte gibt. Je schwieriger die Aufrechterhaltung der Bewegungsinformation aus der motorischen Gedächtnisaufgabe ist, desto kürzer werden die Reaktionszeiten der Zusatzaufgabe. Auch im Maß der Bewegungsdauer spiegelt sich das Muster der zeitlichen Verkürzung, wenn die zu lösende Aufgabe kapazitätsbeanspruchend ist. In den visuell-motorischen Bedingungen bzw. in weiteren experimentellen Bedingungen, in denen die Aufgabenlösung vergleichsweise schwieriger ist, findet sich eine insgesamt kürzere Bewegungsdauer sowohl in der Lern- als auch Abrufphase. Dieses beobachtete Ergebnismuster spricht dafür, dass Mechanismen der Optimierung der Arbeitsabläufe greifen, um die kapazitätsintensiven Anforderung der visuell-motorischen Aufgabe zu bewältigen, wobei oberste Priorität auf der reinen Aufgabenbewältigung, d. h. dass die Aufgabe überhaupt gelöst werden kann, liegt. Erst an zweiter Stelle scheint die Art der Ausführung, d. h. das „wie“ zu stehen. Das kognitive System versucht anscheinend, durch eine schnellere Ausführung des gesamten Aufgabenablaufs (schnelleres Encodieren in der Lernphase, schnelleren Ausführung der sekundären Aufgabe) Schwierigkeiten bei der Aufgabenbewältigung zu überwinden. In diesem Sinne könnte die beobachtbare Fehlerrate als Resultat nicht erfolgreicher bzw. nicht mehr zu bewältigender Kompensation bei Kapazitätsbelastung des kognitiven Systems interpretiert werden. Es sind also die Prozesse, die während der Aufgabenbewältigung ablaufen, maßgeblich beteiligt, die zum beobachtbaren Resultat der Fehlerrate bei der Bewegungsreproduktion beitragen.

Zusammenfassend lässt sich anhand der zeitbezogenen Maße der Latenzen des Bewegungsonset, der Reaktionszeiten sowie der Bewegungsdauer eine aufgabenspezifische Strategie der Optimierung der Abläufe bei kapazitätsbeanspruchenden Aufgaben zeigen. Dieser

Optimierungsmechanismus scheint außerdem weitgehend automatisch abzulaufen, da die Versuchspersonen sich nicht an eine schnellere Aufgabenausführung in der visuell-motorischen Bedingung bzw. bei Aufgaben, in denen sie viele Fehler machten, erinnern konnten.

Aufgabenunspezifische, modalitätsübergreifende Strategiemuster bei der Aufgabenlösung lassen sich anhand der Bewegungsdauer finden. Hier zeigt sich über die Experimente 1 bis 6 hinweg ein ebenfalls sehr stabiles Muster der Überschätzung der Bewegungsdauer in der Abrufphase gegenüber der Lernphase, welches bereits bei Henz und Berti (2006) gefunden wurde. Diese modalitätsunabhängige, ca. 200 ms betragende Differenz zwischen Lern- und Abrufphase, wurde als Resultat eines zeitlichen Optimierungsmechanismus interpretiert. Man kann argumentieren, dass durch den Wegfall des visuellen Feedbacks bei der Bewegungsreproduktion auf eine propriozeptive Bewegungsrepräsentation zurückgegriffen werden muss, die ungenauer als die bimodale visuell-motorische Repräsentation ist (siehe Desmurget et al., 1995; Rossetti et al., 1995; van Beers et al., 1996). Möglicherweise wird die Bewegungsausführung aufgrund von Kompensationsmechanismen, die durch diese ungenaue unimodale Repräsentation erforderlich werden, zeitaufwendiger. In den vorliegenden Experimenten wurde überprüft, ob noch andere Erklärungsmöglichkeiten für die beobachtbare Differenz in der Bewegungsdauer in Frage kommen. Möglicherweise resultiert sie aus einem aktiven Rekonstruktionsprozess beim Bewegungsabruf. Dazu wurden explorative Stopps, d. h. ein- oder mehrmaliges Innehalten der Versuchspersonen bei der Bewegungsausführung, erfasst. Die Versuchspersonen starteten oftmals eine Bewegung, um dann im weiteren Verlauf, insbesondere an Stellen, an denen eine Richtungsänderung stattfindet, kurz zu überlegen, in welche Richtung die Kriteriumsbeziehung verlief. Bei diesen Stopps finden möglicherweise kurze Updates statt (siehe Desmurget & Grafton, 2000), die eher einer Rekonstruktion als einem tatsächlichen Abruf dienen, da die Richtungsänderung in vielen Fällen in die falsche Richtung stattfindet. Die Dauer dieser explorativen Stopps ist auch über alle Bedingungen hinweg gleich, wobei die Abrufphase jeweils ca. 100 ms länger ist als die dazugehörige Lernphase.

Die längeren Stopps in der Abrufphase können also nur teilweise die Überschätzung der Bewegungsdauer erklären, so dass Prozesse der motorischen Planung und der Rekonstruktion ebenfalls in Betracht kommen. Die Ergebnisse aus Experiment 7 liefern einen Hinweis darauf, dass die motorische Planung und Bewegungskonstruktion bzw. Bewegungsrekonstruktion zeitaufwendig ist und nicht nur zu einer Überschätzung der Bewegungsdauer, sondern auch zu einer größeren Latenz des Bewegungsonset führt. Unter Modifikation der Aufgabenstellung, bei der eine Induktion von aktiven motorischen Planungsprozessen durch die Ausführung von selbstgewählten freien Bewegungen in der Lernphase vorgenommen wurde, zeigte sich entgegen der bisherigen Experimente eine längere Bewegungsdauer diesmal in der Lernphase gegenüber der Abrufphase, wobei die Differenz bei ca. 200 ms liegt. Die Gesetzmäßigkeiten der Experimente 1 bis 6 scheinen in Experiment 7 umgekehrt worden zu sein. Diese Feststellung und die folgenden Vergleiche sind jedoch unter dem Vorbehalt zu betrachten, dass in Experiment 7 keine Zusatzaufgaben während des Behaltensintervalls zu bearbeiten waren. Während in Experiment 1 bis 6 die Bewegungsdauer in der Abrufphase länger war als in der Lernphase, ist sie in Experiment 7 in der Lernphase länger als in der Abrufphase. Bemerkenswert ist, dass die mittlere Differenz der Bewegungsdauer in den Experimenten 1 bis 6 den gleichen Betrag hat wie die Differenz in Experiment 7. Auch hinsichtlich der Latenz des Bewegungsonset findet sich ein vergleichbares Muster. Während in den bisherigen Experimenten die Latenz des Bewegungsonset in der Abrufphase größer war als in der Lernphase, ist in Experiment 7 eine größere Latenz stets in der Lernphase auszumachen, wobei diese Latenz unabhängig von der Anzahl der Bewegungselemente ist. Ein ähnliches Muster findet sich bei Betrachtung der explorativen Stopps. Während in den Experimenten 1 bis 6 die Stoppdauer in der Abrufphase länger war als in der Lernphase, findet sich in Experiment 7 kein Unterschied von Lern- zu Abrufphase. Die Ergebnisse aus Experiment 7 sprechen dafür, dass bei der Bewegungsplanung zeitaufwendige Konstruktions- bzw. Rekonstruktionsprozesse involviert sind, die maßgeblich zur jeweiligen Überschätzung von Lern- bzw.

Abrufphase beitragen. Angenommene Kompensationsmechanismen durch wegfallendes visuelles Feedback beim Bewegungsabruf, wie sie bei Henz und Berti (2006) diskutiert wurden, tragen anscheinend nicht zur Überschätzung der Bewegungsdauer bei vorgegebenen Bewegungen in der Abrufphase bei.

Bei der Aufgabenbewältigung lassen sich aufgabenspezifische und generelle Strategien ausmachen. Zu den aufgabenspezifischen Strategien zählt die oben diskutierte Strategie der zeitlichen Optimierung der Abläufe bei kapazitätsbeanspruchenden Aufgaben. Die aufgabenunspezifischen, sondern eher generellen Strategien umfassen Konstruktions- und Rekonstruktionsmechanismen beim Bewegungsabruf bzw. bei der Bewegungsplanung. Auch das Prinzip der Redundanz kann zu den generellen Mechanismen des kognitiven Systems gezählt werden. Diese Strategien scheinen weitgehend unbewusst abzulaufen. Dafür spricht, dass die Versuchspersonen hinsichtlich der Bewegungsdauer, der Latenzen des Bewegungsonset sowie der Reaktionszeiten keine Aussagen über derartige Mechanismen treffen können. Auf experimenteller Seite sprechen die Ergebnisse aus Experiment 4 und 5 dafür, dass automatisierte Prozesse des zentralen Nervensystems beteiligt sind. In Experiment 4 wurde das Phänomen der redundanten Codierung von kinästhetischer und visueller Bewegungsinformation beobachtet, obwohl diese Strategie mit erheblichen Kosten verbunden war. Durch Anwendung der Redundanz wurde eine mangelnde Anpassung an die Kapazitätsbegrenzung in Kauf genommen, was zu einer erhöhten Fehlerrate bei der Bewegungsreproduktion führte. In Experiment 5 konnte das gleiche Phänomen für visuelle Informationen demonstriert werden. So wurde irrelevantes visuelles Feedback bei der Bewegungsausführung berücksichtigt, welches die Gedächtnisleistung beeinträchtigte. Die Versuchspersonen konnten sich anscheinend nicht gegen die Hinzunahme von unnötiger Information im Sinne einer top-down Kontrolle wehren. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass das zentrale Nervensystem bei der Kontrolle von Bewegungen alle Informationen berücksichtigt, die vorhanden sind und der Bewegungskontrolle dienen könnten, auch wenn manche Informationen nicht nützlich oder sogar

qualitätsmindernd sind. Man kann argumentieren, dass diese zusätzliche Codierung der langfristigen Stabilisierung der internen Bewegungsrepräsentation dient (siehe auch Desmurget et al., 1995; Rossetti et al., 1995; van Beers et al., 1996), auch wenn auf kurze Sicht, wie in der künstlich geschaffenen kognitiven Auslastungssituation im Labor, Nachteile in Kauf genommen werden. Diese automatisch ablaufende redundante Verarbeitung scheint ein relativ starres Prinzip zu sein, das bei konfligierenden Umweltgegebenheiten zumindest beim Erwerb von Bewegungsabläufen nicht den Aufgabenanforderungen angepasst werden kann. So kann die erhöhte Fehlerrate in Experiment 4 in der Bedingung mit visueller und kinästhetischer Information während der Lernphase erklärt werden. Über 22 Trials hinweg, die im Block dargeboten wurden, fand bei den Versuchspersonen kein Lernprozess statt, d. h. die Versuchspersonen konnten bei zusätzlicher kinästhetischer Information die Aufgabenanforderung nicht mit einer geeigneten Strategie, etwa der Unterdrückung der kinästhetischen Information, in den Griff bekommen. Das kognitive System kann möglicherweise die Strategie der Redundanz gegenüber der erforderlichen Anpassung an die Kapazitätsbegrenzungen nicht automatisch zurückfahren. Die Vermutung liegt nahe, dass die zwei konfligierenden Strategien also infolge des starren Prinzips der Redundanz nicht miteinander abgestimmt werden konnten.

Zu den automatisch ablaufenden Strategien zählt auch die Gewichtung von visueller und propriozeptiver Information, die bei einer redundanten Codierung erforderlich wird. In welcher Weise diese Cues gewichtet werden, wird kontrovers diskutiert. Es gibt den statistischen Ansatz der Minimum-Varianz-Modelle (z. B. Welch et al., 1979; Ernst & Banks, 2002), aber auch Modelle, welche die Erfordernisse der Aufgabe betonen (Aglioti et al., 1995; Goodale & Milner, 1992; Haffenden et al., 2001; Milner & Goodale, 1993; Sober & Sabes, 2003). Die Ergebnisse scheinen momentan dafür zu sprechen, dass die Erfordernisse der Zielaufgabe maßgeblich sind. Wird die Zielaufgabe in einem vorwiegend propriozeptiven Referenzsystem auszuführen sein, so werden propriozeptive Cues stärker gewichtet, hat die Zielaufgabe dagegen vor

allem visuelle Anforderungen, werden visuelle Cues stärker betont (Sober & Sabes, 2005). Dies hat den Vorteil, dass es zu geringen Kosten bei Transformationen von visuellen zu propriozeptiven Koordinaten bzw. umgekehrt kommt und auf diese Weise Fehler vermieden werden (Sarlegna & Sainburg, 2007). Durch diese Anpassung wird eine hohe Flexibilität und Fehlertoleranz erreicht, wobei neben Anpassung an die Aufgabenerfordernisse auch individuelle Differenzen eine große Rolle spielen (Boulinguez & Rouhana, 2008). All diesen Modellen ist gemeinsam, dass die ihnen zugrunde liegende Gewichtung automatisch abläuft und an die Aufgabenerfordernisse angepasst wird.

Die in dieser Arbeit gefundenen Ergebnisse deuten an, dass bei einer Aufgabe, die zwei konkurrierende automatische Strategien erfordert, nicht im Sinne einer top-down Kontrolle eine Anpassung der Gewichtung von visuellen und motorischen Cues vorgenommen werden kann, es sei denn, der Strategiewechsel ist durch die Aufgabenstruktur vorher festgelegt. Dies konnte in Experiment 3 gezeigt werden. Im Behaltensintervall waren nacheinander, in unterschiedlicher Reihenfolge, eine visuelle und motorische Aufgabe zu bearbeiten. Obwohl diese Aufgabe sehr komplex war, konnte die motorische Gedächtnisaufgabe von den Versuchspersonen mit einer geringen Fehlerrate gelöst werden, vermutlich, da durch eine klare Abgrenzung der Zusatzaufgaben ein Strategiewechsel bereits aktiv bei Aufgabenbeginn einkalkuliert werden konnte. In Experiment 5 dagegen kann die Hinzunahme von irrelevantem visuellem Feedback während der Zusatzaufgabe als unangekündigter, bzw. fließender Strategiewechsel interpretiert werden. Bis zu einem gewissen Grad ist eine Integration des visuellen Feedbacks noch möglich. Ist die Kapazität jedoch ausgelastet, wäre ein Strategiewechsel notwendig, dieser kann jedoch, da er nicht klar abgegrenzt ist, vollzogen werden und oben beschriebene Fehler treten auf.

In der Einleitung wurde der Beitrag aktiver Strategieanwendung bei der Aufgabenlösung postuliert, dieser scheint jedoch bei Bewältigung der in dieser Arbeit gestellten Aufgabe nur eine untergeordnete Rolle zu spielen, während ausschließlich automatische Strategien zu beobachten sind. Die Versuchspersonen berichteten zwar über aktive Strategien bei

der Aufrechterhaltung und beim Abruf der Bewegungsinformation. So wurden vor allem Methoden der Verbalisierung („links oben, diagonal nach rechts“) und der Visualisierung (Vorstellung von Bildern) genannt. Diese variieren aber nicht systematisch mit den beobachteten Ergebnissen. Strategien des Codierens oder Memorierens werden zwar angewendet, wirken sich aber nicht auf die automatisch ablaufenden Prozesse des kognitiven Systems aus. Hinsichtlich der Rolle aktiver Kognitionen bleibt festzuhalten, dass aufgrund der von den Versuchspersonen getroffenen Einschätzungen hinsichtlich der Aufgabenschwierigkeit als auch der Lösungsstrategien, in den meisten Fällen keine Angaben gemacht werden konnten bzw. die Angaben entgegen der Richtung der jeweiligen Ergebnisse liefen. So wurde in den meisten Fällen die motorische Bedingung als schwerste Aufgabe deklariert, obwohl die visuell-motorische Aufgabe die größten Leistungseinbrüche herbeiführte. Ebenso konnten über zeitbezogene Maße keinerlei Angaben gemacht werden. Aktive Strategien der Aufgabenbewältigung scheinen also nur eine untergeordnete Rolle zu spielen und im Gegensatz zu den automatisch ablaufenden Mechanismen keinen Beitrag zum beobachtbaren Resultat der Bewegungsreproduktion beizutragen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Bewegungen nicht in einem rein visuellen Format gespeichert werden, sondern kinästhetische und propriozeptive Informationen in einem multimodalen, redundanten Speicherformat integriert werden. Zudem lassen sich automatisch ablaufende Strategien des kognitiven Systems bei der Aufgabenlösung beobachten. Dabei konnten aufgabenspezifische, d. h. an die Kapazitätsanforderungen einer Aufgabe angepasste Strategien, wie z. B. die der Optimierung der Arbeitsabläufe, aber auch generelle Strategien wie etwa die Redundanz sowie Konstruktions- und Rekonstruktionsmechanismen bei der Bewegungsplanung beobachtet werden. Aktive Strategien scheinen im Gegensatz zu den automatisch ablaufenden Mechanismen bei der Aufgabenlösung nur eine untergeordnete Rolle zu spielen.

6.4 Speicherung, Strategie oder inneres Modell – Implikationen für die Forschung

Anhand der oben geführten Diskussion lässt sich feststellen, dass die Existenz eines separaten motorischen Speichers, wie er von Smyth et al. (Smyth, Pearson & Pendleton, 1988; Smyth & Pendleton, 1989, 1990) sowie Rumiati und Tessari (Rumiati & Tessari, 2002; Tessari & Rumiati, 2002) postuliert wurde, zu stark vereinfachend ist. Zudem konnte in einer Reihe von Studien gezeigt werden, dass nicht nur Körperbewegungen Interferenz bei der kurzzeitigen Speicherung von räumlich gerichteten Bewegungen erzeugen, sondern in gleicher Weise die Planung einer Bewegung bzw. Imageryprozesse die Gedächtnisleistung beeinträchtigen können (Johnson, 1982). Ebenso wirken sich Augenbewegungen, insbesondere reflexive Sakkaden (Honda, 1984; Lawrence, Myerson, Oonk & Abrams, 2001; Pearson & Sahraie, 2003), sowie die alleinige Verlagerung der räumlichen Aufmerksamkeit ohne zusätzliche Augen- oder Körperbewegungen (Smyth, 1996; Smyth & Scholey, 1994) störend auf die Gedächtnisspanne für Bewegungen aus. Dadurch wird deutlich, dass bei der Speicherung von Bewegungen eine ganze Reihe von kognitiven Prozessen beteiligt sind, etwa okulomotorische Kontrollprozesse, Imageryprozesse oder Strategien des Codierens und Memorierens (Helstrup, 2001, 2005). Diese genannten kognitiven Prozesse erfordern Kapazität nicht nur rein motorischer, sondern auch visueller und verbaler Verarbeitung. Das verdeutlicht, dass bei der Speicherung und Verarbeitung von Bewegungen viele weitere, bisher nicht beachtete Faktoren, eine Rolle spielen.

Die vereinfachte Sichtweise eines rein motorischen Speichers resultiert sicherlich aus der Art der Modellvorstellung des Arbeitsgedächtnisses von Baddeley und Hitch (1974), auf dem die bisherigen Untersuchungen zum so genannten motorischen Arbeitsgedächtnis basieren. Dieses Strukturmodell mit seiner klaren Trennung in modalitätsspezifische Subsysteme verleitet dazu, ein weiteres separates Subsystem für die Motorik anzunehmen. Ferner berücksichtigt es aufgrund seines statischen Charakters nicht prozessorientierte Aspekte bei der Lösung von Arbeitsgedächtnisaufgaben. So konnte beispielsweise

gezeigt werden, dass Probanden unterschiedliche Strategien bei der gleichen Aufgabe anwenden (Barrett et al., 2004; Schunn, Lovett & Reder, 2001) und diese Strategien bei der Aufgabenlösung einen ganz entscheidenden Beitrag zu individuellen Differenzen in der Kapazität beitragen (Cokely, Kelley & Gilchrist, 2006; McNamara & Scott, 2001; Turley-Ames & Whitfield, 2003).

Da in dieser Arbeit gezeigt werden konnte, dass prozessbezogene Aspekte wie etwa automatisch ablaufende als auch aktive Strategien eine entscheidende Rolle spielen, stellt sich die Frage, ob das Modell von Baddeley und Hitch (1974) aufgrund seiner einfachen Struktur geeignet ist, Prozesse bei der motorischen Kurzzeitspeicherung zu erklären und in die Modellvorstellungen zu integrieren. Aufgrund der gefundenen Ergebnisse lässt sich diese Frage eindeutig verneinen. Motorik lässt sich aufgrund ihrer Komplexität nicht in ein einfaches Strukturmodell einpassen. Vielmehr müssen die Erkenntnisse aus der Forschung zur motorischen Kontrolle und der Neuropsychologie berücksichtigt und mit neueren Entwicklungen der Arbeitsgedächtnisforschung verknüpft werden. Zudem stellt sich die Frage, inwieweit der Aspekt der Speicherung von motorischen Informationen relevant ist oder ob dieser gar nicht notwendig ist, sondern nur Prozesse der Bewegungsplanung und -kontrolle auf Basis des aktuellen perzeptuellen Inputs entscheidend sind. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Aspekt der Strategie maßgeblich zum beobachtbaren Resultat der Fehlerrate beiträgt, die Ergebnisse möglicherweise allein durch Prozesse der Bewegungsplanung und Bewegungskontrolle erklärbar sind, nicht aber durch Gedächtnisprozesse. Mechsner (2004) vertritt die Annahme, dass Bewegungen nach den aktuellen Zielen auf Basis perzeptueller Informationen schnell jeweils neu geplant und generiert werden. Nach Ansicht Mechsners ermöglicht diese ökonomische Repräsentation eine besonders hohe Flexibilität und Anpassung an veränderte Umgebungen. Eine Zwischenspeicherung würde zu einer erheblichen Verlangsamung des motorischen Systems führen und wäre somit überflüssig. Zu einem ähnlichen Schluss kommen auch Rosenbaum und Dawson (2004): „The motor system computes well but remembers poorly.“ Motorische Kontrolle benötigt nach dieser

Auffassung kein Gedächtnis, sondern agiert allein auf Basis des aktuellen, perzeptuellen Inputs. Da die beobachtbaren Fehlerraten in unseren Experimenten als Resultat von nicht erfolgreichen Kompensationsprozessen bzw. fehlgeschlagener Strategieanpassung an die Aufgabenerfordernisse interpretiert werden können, sprechen die Ergebnisse für das perzeptuell-kognitive Modell (Mechsner, 2004; Rosenbaum & Dawson, 2004). Prozesse der Speicherung tragen nicht zur Verarbeitung von Bewegungen bei, sondern werden entsprechend des perzeptuellen Inputs und der Aufgabenerfordernisse flexibel geplant und generiert. Es besteht also kein Bedarf für ein motorisches Arbeitsgedächtnis. Werden Bewegungen also allein auf Basis einer aktuellen perzeptuellen Bewegungsrepräsentation ausgeführt?

Der Begriff der Bewegungsrepräsentation und das damit verbundene theoretische Konzept des inneren Modells spielt im Bereich der motorischen Kontrolle eine entscheidende Rolle (Jordan, 1995; Kawato, Furukawa & Suzuki, 1987). In diesem theoretischen Rahmen werden vorwärtsgerichtete Modelle und inverse Modelle postuliert. Vorwärtsgerichtete Modelle sagen den nächsten Schritt in der Kausalkette von motorischen Befehlen und deren Handlungsergebnissen vorher, während inverse Modelle motorische Befehle bewerten, die ein bestimmtes Handlungsergebnis bereits herbeigeführt haben. Die Annahme ist, dass vorwärtsgerichteten Modellen eine Schlüsselfunktion bei der Bewältigung von Problemen, die sich dem motorischen Kontrollsystem stellen, zukommt. Unter Zuhilfenahme eines vorwärtsgerichteten Modells wird es möglich, Handlungsergebnisse vorherzusagen, bevor sensorisches Feedback verfügbar ist (Ito, 1984; Miall, Weir, Wolpert & Stein, 1993). Durch Nutzung der Efferenzkopie wird ferner die Reafferenz, d. h. die sensorischen Effekte der Bewegung, antizipiert (Robinson, Gordon & Gordon, 1986). Außerdem kann ein vorwärtsgerichtetes Modell dazu dienen, mittels des sensorischen Systems wahrgenommene Diskrepanzen zwischen erwünschten und tatsächlichen Handlungsergebnissen in korrespondierende motorische Befehle zu übersetzen, was für motorisches Lernen von entscheidender Bedeutung ist (Jordan & Rumelhart, 1992). In diesem Sinne sind

vorwärtsgerichtete Modelle auch bei der mentalen Übung motorischer Abläufe insofern entscheidend, als dass sensorische Ergebnisse einer Bewegung vorhergesagt werden, ohne dass diese tatsächlich ausgeführt wird (Sutton & Barto, 1981). Die Verarbeitungsprozesse, die sich während des Behaltensintervalls unserer motorischen Arbeitsgedächtnisaufgabe abspielen, könnten also auch durch innere Modelle erklärt werden, wobei vor allem die Antizipation durch vorwärtsgerichtete Modelle bedeutend ist. Hierbei handelt es sich möglicherweise nicht um einen Prozess der Aufrechterhaltung der Bewegungsinformation, sondern um Antizipation der auszuführenden Bewegung, die in einen Bewegungsplan umgesetzt werden muss. Wichtiger Aspekt dabei ist die Anpassung des Bewegungsplans an die Erfordernisse der Zielaufgabe. Dazu muss der Ist- und Sollzustand definiert werden sowie Prozesse, die erforderlich sind, um die Differenz von Ist- und Sollzustand zu überwinden. Im Fall der in dieser Arbeit untersuchten Bewegungsaufgabe müsste dazu zunächst die Ausgangsposition der Hand bestimmt werden sowie die zu erreichenden Eckpunkte der Bewegung. Zur Bestimmung dieser Positionen können Informationen aus mehreren sensorischen Kanälen herangezogen werden. Werden Armbewegungen ohne visuelles Feedback ausgeführt, gibt es für das zentrale Nervensystem mehrere Möglichkeiten, die momentane Position des Arms und des Zielpunktes einzuschätzen. Zum einen können sensorische, in diesem Fall vor allem propriozeptive Informationen herangezogen werden. Zum anderen stehen dem ZNS Informationen über motorische Befehle, die in den Arm geleitet werden (Efferenzkopie), zur Verfügung. Möglicherweise werden auch beide Informationsquellen gemeinsam genutzt und in einem vorwärtsgerichteten inneren Modell integriert. Behaviorale und neurophysiologische Studien bestätigen die Annahme, dass das Gehirn insbesondere Armbewegungen mit solchen hochadaptiven inneren Modellen kontrolliert (Bhushan & Shadmehr, 1999; Conditt, Gandolfo & Mussa-Ivaldi, 1997; Flanagan & Wing, 1997; Johansson & Cole, 1992; Jordan & Rumelhart, 1992; Kawato, Furukawa & Suzuki, 1987; Krakauer, Ghilardi & Ghez, 1999; Miall & Wolpert, 1996; Shadmehr & Mussa-Ivaldi, 1994; Wolpert & Ghahramani, 2000; Wolpert, Ghahramani & Jordan, 1995; Wolpert & Kawato, 1998).

Zur Überwindung der Differenz von Ist- und Sollzustand ist die Bestimmung des Referenzrahmens entscheidend. Verhaltensexperimente und neuro-physiologische Studien zeigen, dass etwa zur räumlichen Lokalisierung verschiedene Referenzrahmen genutzt werden können (Meegan & Tipper, 1998; Milner & Goodale, 1995). Dabei werden zwei Klassen von Referenzsystemen unterschieden, nämlich egozentrische und allozentrische Rahmen. Egozentrische Referenzsysteme verwenden körperbezogene Koordinaten, die propriozeptiv, kinästhetisch und taktil ermittelt werden, während bei einem allozentrischen Rahmen visuell-räumlich Koordinaten verwendet werden, die sich auf die Umwelt beziehen. Stehen bei einer räumlich gerichteten Bewegung zur Ermittlung der Ausgangsposition der Hand nur propriozeptive Informationen zur Verfügung, die Zielaufgabe hat dagegen visuellen Charakter, handelt es sich um zwei unterschiedliche Referenzsysteme des Ist- und Sollzustandes. Um die Differenz zu überwinden, muss also ein gemeinsamer Referenzrahmen gefunden werden, (Andersen & Buneo, 2002; Beurze, van Pelt & Medendorp, 2006; Buneo et al., 2002; Flanders et al., 1992), da eine sensorimotorische Transformation von propriozeptiven zu visuellen Koordinaten zu aufwendig ist und eher Fehler verursachen kann. Bei der Integration von visuellen und propriozeptiven Cues kommt es also zu einer Gewichtung, wobei die Minimierung von Transformationsfehlern oberste Priorität hat (z. B. van Beers et al., 2002a, b) und sich daher nach den Aufgabenerfordernissen richtet (Sober & Sabes, 2003, 2005).

Die in dieser Arbeit gefundenen Ergebnisse lassen sich also ohne weiteres durch kapazitätsaufwendige sensorimotorische Koordinatentransformationen erklären, zu denen das kognitive System in der künstlich geschaffenen Laborsituation gezwungen wird. Der Schwerpunkt liegt also keineswegs auf dem Aspekt der Speicherung, sondern auf der Etablierung einer internen Bewegungsrepräsentation, die je nach Gegebenheiten der Umwelt und Aufgaben schnell und flexibel angepasst werden muss. An dieser Stelle wird deutlich, dass beim motorischen System die Prinzipien der enormen Flexibilität, der Vermeidung von Fehlern durch unnötige Arbeitsprozesse und der Beachtung aller Umweltgegebenheiten an

oberster Stelle stehen. Dies verwundert nicht, da diese Prinzipien unabdingbare Voraussetzungen für eine adäquate Lebensbewältigung sind. In der praktischen Anwendung wird etwa die sensomotorische Transformation vor allem dann erforderlich, wenn bereits gelernte Bewegungsabläufe an veränderte Umweltbedingungen angepasst werden müssen, etwa an ein verändertes Kraftfeld (dynamische Transformation) und Änderungen in geometrischen Variablen (kinematische Transformation). Aus evolutionärer Sicht ergibt sich ein zwingend notwendiger Bedarf nach einem absolut sicheren und zuverlässigen motorischen System, um das Überleben zu sichern. Vor allem in Experiment 4 wird deutlich, dass die automatisiert ablaufende Strategie der redundanten Codierung zwar auf kurze Sicht das kognitive System fehleranfälliger macht, auf lange Sicht jedoch sinnvoll zu sein scheint. Ebenso zeigt sich in Experiment 5, dass irrelevantes visuelles Feedback über die Bewegungskontrolle berücksichtigt wird, auch wenn dies zu einer Leistungsbeeinträchtigung führt. Diese Ergebnisse sprechen dafür, dass das motorische System darauf abzielt, durch eine redundante Codierung eine möglichst sichere Bewegungsrepräsentation aufzubauen, die schnell und flexibel an äußere Gegebenheiten angepasst werden kann, wie dies etwa in Flucht- oder Kampfsituationen überlebenswichtig wäre. Die experimentelle Situation, die im Rahmen dieser Arbeit geschaffen wurde, entspricht nicht den Anforderungen, die an das kognitive System des Menschen im Laufe der Evolution gestellt wurden, da sicherlich in der Evolutionsgeschichte des Menschen keine zwingende Notwendigkeit bestand, Bewegungen in sehr kurzer Zeit bzw. unter kognitiver Auslastung wie in den durchgeführten Experimenten zu erlernen. Unter dieser Annahme ist die Starrheit des Prinzips der Redundanz und die Resistenz gegen eine top-down Kontrolle trotz des nachteiligen Resultats erklärbar. Die Notwendigkeit einer multimodalen Bewegungsrepräsentation könnte ferner der Sicherung des Überlebens bei kurzfristigen neurologischen Ausfällen oder anderen neurologischen Erkrankungen dienen, die im Verlauf des Lebens auftreten können. So konnte gezeigt werden, dass Parkinsonpatienten ohne visuelles Feedback keine akkuraten Bewegungen zu externen Zielen machen können (Flash

et al., 1992; Marsden, 1989), da sie Probleme haben, propriozeptive Informationen über die Arm- und Handposition zu nutzen (Demirci et al., 1997; Klockgether et al., 1995). Ist jedoch visuelles Feedback vorhanden, kann aufgrund der visuellen Bewegungsrepräsentation die Bewegung ohne propriozeptive Information trotzdem noch ausgeführt werden. Die neurologischen Defizite können also aufgrund einer multimodalen Bewegungsrepräsentation kompensiert werden.

Multimodale Bewegungsrepräsentationen lassen sich nicht nur anhand von behavioralen Studien (Desmurget et al., 1995; Rossetti et al., 1995; van Beers et al., 1996), sondern auch aus neurophysiologischer Sicht mit der Existenz multimodaler Hirnareale belegen. Hirnareale, in denen Informationen von verschiedenen sensorischen Modalitäten konvergieren, könnten an derartigen Prozessen beteiligt sein. Solche Hirnareale sind z. B. der ventrale prämotorische Cortex und das mediale intraparietale Areal. Ein weiteres multimodales Areal ist das ventrale intraparietale Areal (VIP), das im posterioren Parietalcortex des Gehirns von Primaten lokalisiert ist. Es ist Teil des dorsalen Pfades der visuellen Informationsverarbeitung, der eine besondere Rolle für die Analyse visueller Raum- und Bewegungsinformationen spielt. Das VIP erhält Input aus unterschiedlichen sensorischen Modalitäten, z. B. aus der somatosensorischen, visuellen, auditiven and vestibulären Modalität (z. B. Lewis & van Essen, 2000). Es konnte gezeigt werden, dass die Neuronen des VIP räumlich angeordnete visuelle und taktile rezeptive Felder bilden, d. h. die Neuronen des VIP sind sensitiv sowohl für visuelle als auch für taktile Bewegung des jeweiligen rezeptiven Feldes (Duhamel, Colby & Goldberg, 1991, 1998).

Die Prinzipien der Multimodalität und Redundanz sind also nicht nur in Verhaltensexperimenten zu beobachten, sondern haben ein physiologisches Substrat, das den Aufbau einer sicheren und flexiblen Bewegungsrepräsentation ermöglicht. Aus der Argumentation der evolutionären Notwendigkeit einer vorrangig genauen und fehlertoleranten internen Repräsentation heraus wird ersichtlich, dass eine zusätzliche Speicherung bei der Bewegungsplanung und -kontrolle das motorische System erheblich fehleranfälliger und langsamer machen würde. Insofern

sprechen die Ergebnisse dieser Arbeit für das perzeptuell-kognitive Modell, wie es etwa Mechsner (2004) postuliert. Bewegungen werden entsprechend der Anforderungen der Zielaufgabe jeweils neu geplant und nicht auf Basis einer Gesamtrepräsentation der Bewegung ausgeführt, wie aus der Sichtweise des Arbeitsgedächtnismodells heraus, insbesondere unter der Annahme eines separaten motorischen Speichers, argumentiert werden könnte. Müsste zuerst ein Suchprozess stattfinden, um die erforderliche Bewegung zu finden, wäre dies zu zeitaufwendig, um im Ernstfall schnell genug mit der richtigen motorischen Reaktion zu antworten (siehe Abbildung 45).

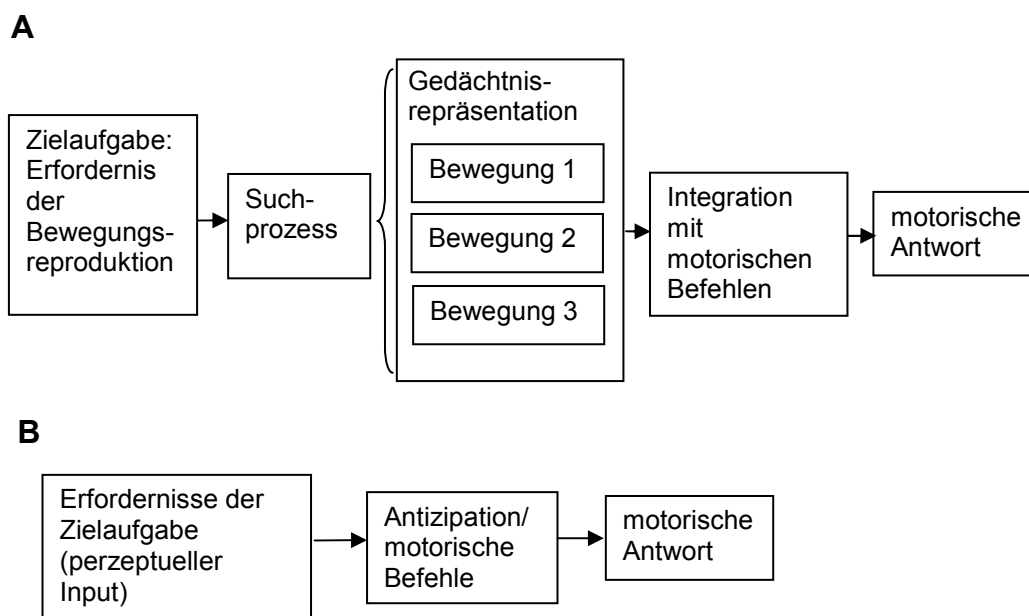


Abbildung 45: **A** Modellvorstellung eines motorischen Arbeitsgedächtnisses. Als Zielaufgabe ist die Reproduktion einer Bewegung erforderlich. Dazu wird ein Suchprozess gestartet, wobei nach der Gedächtnisrepräsentation der erforderlichen Bewegung gesucht wird und diese im Anschluss mit motorischen Befehlen integriert wird. **B** Perzeptuell-kognitives Modell der motorischen Kontrolle. Die Erfordernisse der Zielaufgabe als perzeptueller Input führen zur Auswahl motorischer Befehle, welche in einer motorischen Antwort resultieren. Durch diesen direkten perzeptuell-kognitiven Weg wird eine hohe Flexibilität und Schnelligkeit des motorischen Systems gewährleistet.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Annahmen bisheriger Studien zur Frage eines motorischen Subsystems innerhalb des Arbeitsgedächtnisses aufgrund methodischer Mängel aber auch aus theoretischen Überlegungen heraus nicht haltbar sind. Dies konnte mit den in dieser Arbeit durchgeführten Experimenten bestätigt werden. Die Annahme eines separaten motorischen Speichers ist demnach zu verwerfen. Ferner erweist sich die von Smyth und Pendleton (1989, 1990) sowie weiterer Autoren (Dimeck, Roy & Hall, 1996, 1998; Dolman, Roy, Dimeck & Hall, 2000; Rumiati & Tessari, 2002; Tessari & Rumiati, 2002; Woodin & Heil, 1996) vorgenommene Einteilung in räumlich gerichtete Bewegungen und Bewegungskonfigurationen als hinfällig. Bei der kurzzeitigen Speicherung von Bewegungen sind sowohl visuelle als auch originär motorische (kinästhetisch, propriozeptiv) Bewegungscues beteiligt, zumindest im Falle der in dieser Arbeit untersuchten räumlich gerichteten zweidimensionalen Bewegungen. Anhand der zeitlichen Maße zeigt sich, dass Strategieeffekte einen erheblichen Beitrag zum beobachtbaren Resultat, nämlich der Fehlerrate, beitragen. Dabei spielen vor allem automatisch ablaufende strategische Prozesse eine entscheidende Rolle. Genannt seien hier die zeitliche Optimierung der Arbeitsabläufe bei Auslastung der kognitiven Ressourcen, Konstruktions- und Rekonstruktionsprozesse bei der Bewegungsplanung, die Redundanz, d. h. die Hinzunahme von zusätzlicher Information, falls sie vorhanden ist, auch wenn sich dies nachteilig auf die Leistung auswirkt, sowie die Gewichtung von propriozeptiven und visuellen Cues je nach Aufgabenanforderung. Top-down Kontrollprozesse scheinen diese automatischen Prozesse nicht beeinflussen zu können. Die in dieser Arbeit gefundenen Ergebnisse regen dazu an, bisherige strukturelle Arbeitsgedächtnismodelle, wie etwa das klassische Modell von Baddeley und Hitch (1974) um prozessorientierte Aspekte zu ergänzen, da prozessbezogene Aspekte, d. h. die Art und Weise, wie mit Inhalten des Arbeitsgedächtnisses umgegangen wird, eine entscheidende Rolle bei der Aufgabenlösung spielen (siehe dazu Postle, 2006). Die Ergebnisse werfen ferner die Frage auf, ob es sich bei den untersuchten Prozessen tatsächlich um Arbeitsgedächtnisprozesse der kurzzeitigen Speicherung

handelt, oder ob die beobachteten Phänomene allein durch motorische Planung und Kontrolle zu erklären sind. Der bisherige Diskussionsstand spricht dafür, dass die beobachteten Phänomene allein durch motorische Planungs- und Kontrollprozesse erklärt werden können, eine zusätzliche Speicherung ist demnach nicht notwendig, um die Aufgaben zu bewältigen. Dazu wurden Beiträge von Modellen sensomotorischer Adaptation aus der Literatur zur motorischen Kontrolle sowie evolutionäre und neurophysiologische Aspekte diskutiert.

Die in dieser Arbeit gefundenen Ergebnisse haben wichtige Implikationen für die Praxis. Im Bereich der Sportpsychologie betrifft dies z. B. die Optimierung von Lernprozessen beim Erwerb von motorischen Fertigkeiten. So könnten im Bereich des Leistungssports durch eine angemessene Trainingsgestaltung Unfälle durch Überlastung des kognitiven Systems während des Lernprozesses vermieden werden, wobei neue Bewegungsabläufe in sehr kleinen Portionen und schrittweise eingeübt werden müssten. Die Ergebnisse dieser Arbeit sprechen dafür, dass Überforderung durch eine zu schnelle Steigerung der Schwierigkeit zu ungenauen und fehlerhaften Bewegungen und im schlimmsten Fall zu gefährlichen Verletzungen führt. Das gleiche gilt natürlich auch für andere Bereiche, in denen komplexe Bewegungsabläufe eingeübt werden, wie z. B. in der Musik. Weiterhin wäre denkbar, das in dieser Arbeit getestete experimentelle Paradigma in dieser oder veränderter Form für diagnostische Verwendungen einzusetzen, beispielsweise im Bereich der Neuropsychologie oder im eignungsdiagnostischen Kontext.

Auch wenn die in dieser Arbeit gefundenen Ergebnisse darauf hindeuten, dass keine Notwendigkeit eines motorischen Arbeitsgedächtnisses besteht, müsste diese Aussage dennoch zur Absicherung empirisch überprüft werden, da die Dauer des Behaltensintervalls im experimentellen Paradigma von Berti (2001) bisher nicht systematisch variiert wurde. Denkbar wäre, dass bei einer systematischen Verlängerung des Intervalls Zerfallsprozesse zu beobachten sind. Eine weitere interessante Frage ist, ob das zeitliche Zusammentreffen von visuellen und motorischen Bewegungscues entscheidend für die beobachteten Interferenzeffekte ist, oder ob andere

Faktoren dazu beitragen. Zwar wurde in Experiment 3 die visuelle und motorische Aufgabe separat und in unterschiedlicher Abfolge getestet, jedoch ohne Kontrollgruppe, bei der die visuelle und motorische Aufgabe zeitgleich dargeboten wird. Ferner stellt sich die Frage, da in Experiment 7 während des Behaltensintervalls keine Zusatzaufgaben zu bearbeiten waren, ob bei selbstgewählten Bewegungen vergleichbare Effekte von Zusatzaufgaben beobachtet werden können, die sich bei vorgegebenen Bewegungen zeigen. Neben diesen Einzelfragestellungen ergibt sich aus den Ergebnissen dieser Arbeit die Notwendigkeit, Erkenntnisse aus Arbeitsgedächtnisforschung, Forschung zur motorischen Kontrolle, Neuropsychologie und Sportpsychologie hinsichtlich der Motorik in Zukunft zu integrieren und stets in diesem interdisziplinären Rahmen zu betrachten.

7 Zusammenfassung

Eine wichtige Grundlage kognitiver Prozesse ist die Fähigkeit, Informationen über einen gewissen Zeitraum hinweg verfügbar zu halten, um diese zur Steuerung zielgerichteten Verhaltens zu nutzen. Beispielsweise kann man bei der Kontrolle und Ausführung von Bewegungen versuchen, anhand gespeicherter Ziele eine motorische Handlung zu wiederholen. Dies ist etwa dann hilfreich, wenn man im sportlichen Training eine Bewegung möglichst oft und genau wiederholen möchte, um diese dadurch zu lernen und später stabil abrufen zu können (z. B. einen genauen Zielwurf beim Dart - Spiel). Offen ist allerdings, auf Basis welcher Informationen motorische Handlungen wiederholt werden bzw. wie Bewegungen im Kurzzeitgedächtnis gespeichert werden, um sie genau reproduzieren zu können. In bisherigen Studien aus dem Bereich der Arbeitsgedächtnisforschung zum Bereich der Motorik findet sich das Postulat eines separaten motorischen Speichers, der eigens für die Verarbeitung von Bewegungskonfigurationen zuständig ist, während räumlich gerichtete Bewegungen visueller Verarbeitung unterliegen. Sowohl aus theoretischer Sicht, genannt seien hier Erkenntnisse aus der Forschung zur motorischen Kontrolle und der Neuropsychologie, als auch aufgrund methodischer Mängel dieser Studien sind diese Schlussfolgerungen jedoch nicht haltbar. Ziel dieser Arbeit ist es, die Rolle motorischer Information im Kontext des Arbeitsgedächtnisses anhand eines dafür geeigneten experimentellen Paradigmas zu untersuchen. Dazu wurde ein Interferenzparadigma gewählt, bei dem selbst ausgeführte zweidimensionale kleinräumige Bewegungen untersucht wurden. Dabei hatten die Versuchspersonen die Aufgabe, am PC per Maus eine kurze Bewegung auszuführen und nach einem Behaltensintervall wiederzugeben. Im Behaltensintervall mussten zusätzlich Aufgaben unterschiedlicher Modalitäten (verbal, visuell, visuell-motorisch, motorisch) bearbeitet werden, die Aufschluss über das Speicherformat von Bewegungen geben. Da sowohl qualitative (Fehlerraten) als auch

zeitbezogene Daten (Bewegungsdauer, Latenz zum Bewegungsonset, Reaktionszeiten, explorative Stopps) aufgezeichnet wurden, ist es in dieser Arbeit möglich, Aussagen über resultat- und prozessbezogene Aspekte bei der Verarbeitung von Bewegungen im Arbeitsgedächtnis zu treffen.

Anhand der in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse aus sieben Experimenten lässt sich deutlich zeigen, dass die Annahmen bisheriger Studien zur Frage eines motorischen Subsystems innerhalb des Arbeitsgedächtnisses sowohl aus theoretischer als auch methodischer Sicht nicht haltbar sind. Das Postulat eines separaten motorischen Speichers ist demnach zu verwerfen. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass zur Lösung einer motorischen Arbeitsgedächtnisaufgabe sowohl visuelle als auch kinästhetische Hinweisreize (so genannte Cues) berücksichtigt werden. Dies Cues werden in einem redundanten Format gespeichert, d. h. auch Informationen, die nicht zwingend zur Lösung der Aufgabe notwendig sind, werden vom kognitiven System herangezogen. Diese redundante Speicherung dient der Stabilisierung der internen Bewegungsrepräsentation, die unter anderem auch Informationen über Geschwindigkeitsparameter enthält. Die Bewegungsgeschwindigkeit scheint über visuelle und kinästhetische Cues vermittelt zu werden, wobei jedoch kinästhetische Cues zu einer genaueren Bewegungsrepräsentation beitragen.

In allen Experimenten zeigt sich, dass Strategieeffekte bei der Aufgabenlösung eine entscheidende Rolle spielen. Dabei konnten aufgabenspezifische, d. h. an die Kapazitätsanforderungen einer Aufgabe angepasste Strategien, wie z. B. die Optimierung der Arbeitsabläufe, aber auch generelle Strategien wie etwa die Redundanz sowie Konstruktions- und Rekonstruktionsmechanismen bei der Bewegungsplanung beobachtet werden. Top-down Kontrollprozesse scheinen diese automatischen Prozesse nicht beeinflussen zu können. Ferner zeigt sich, dass aktive Strategien wie etwa Verbalisationsstrategien bei der Encodierung im Gegensatz zu den automatisch ablaufenden Mechanismen bei der Aufgabenlösung nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die Ergebnisse werfen die Frage auf, ob es sich bei den untersuchten Prozessen

tatsächlich um Arbeitsgedächtnisprozesse der kurzzeitigen Speicherung handelt, oder ob die beobachteten Phänomene allein durch motorische Planung und Kontrolle zu erklären sind. Der bisherige Diskussionsstand spricht dafür, dass die beobachteten Phänomene allein durch motorische Planungs- und Kontrollprozesse erklärt werden können, eine zusätzliche Speicherung ist demnach nicht notwendig, um die Aufgaben zu bewältigen, vielmehr eher hinderlich, wenn es darum geht, gelernte Bewegungsabläufe schnell und flexibel an veränderte Umweltgegebenheiten anzupassen. Dazu wurden Beiträge von Modellen sensomotorischer Adaptation aus der Literatur zur motorischen Kontrolle sowie evolutionäre und neurophysiologische Aspekte diskutiert. Die bisher gefundenen Ergebnisse regen ferner dazu an, bisherige strukturelle Arbeitsgedächtnismodelle, wie etwa das klassische Modell von Baddeley und Hitch (1974) um prozessorientierte Aspekte zu ergänzen, da prozessbezogene Aspekte, d. h. die Art und Weise, wie mit Inhalten des Arbeitsgedächtnisses umgegangen wird, eine entscheidende Rolle bei der Aufgabenlösung spielen: wird eine Aufgabe schwer bzw. unmöglich lösbar, versucht das kognitive System, durch Optimierung der Abläufe die Aufgabenbewältigung zu sichern. Die in dieser Arbeit gefundenen Ergebnisse haben ferner wichtige Implikationen für die Praxis, etwa im Bereich der Sportpsychologie und im diagnostischen Kontext.

Literaturverzeichnis

- Adamovich, S. V., Berkinblit, M. B., Fookson, O., & Poizner, H. (1998). Pointing in 3D space to remembered targets. I. Kinesthetic versus visual target presentation. *Journal of Neurophysiology*, 79, 2833-2846.
- Adamovich, S.V., Berkinblit, M. B., Fookson, O., & Poizner, H. (1999). Pointing in 3D space to remembered targets. II. Effects of movement speed toward kinesthetically defined targets. *Experimental Brain Research*, 125, 200-210.
- Adamovich, S. V., Berkinblit, M. B., Hennig, W., & Poizner, H. (2001). The interaction of visual and proprioceptive inputs in pointing to actual and remembered targets in Parkinson's disease. *Neuroscience*, 104, 1027-1041.
- Adams, J. A. (1971). A closed loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3, 111-149.
- Adams, J. A. (1989). Historical review and appraisal of research on the learning, retention, and transfer of human motor skills. *Psychological Bulletin*, 101, 41-74.
- Aglioti, S., Desouza, J. F. X., & Goodale, M. A. (1995). Size-contrast illusions deceive the eye but not the hand. *Current Biology*, 5, 679-685.

-
- Allport, D. (1980). Patterns and actions: Cognitive mechanisms are context specific. In G. Claxton (Hrsg.), *Cognitive psychology: new directions* (S. 26-64). London: Rutledge and Kegan Paul.
- Amedi, A., Malach, R., Hendler, T., Peled, S., & Zohary, E. (2001). Visuo-haptic object-related activation in the ventral visual pathway. *Nature Neuroscience*, 4, 324-330.
- Andersen, R. A., & Buneo, C. A. (2002). Intentional maps in posterior parietal cortex. *Annual Review of Neuroscience*, 25, 189-220.
- Andersson, G., Yardley, L., & Luxon, L. (1998). A dual-task study of interference between mental activity and control of balance. *American Journal of Otology*, 19, 632-637.
- Annett, J. (1995). Motor imagery – perception or action? *Neuropsychologia*, 33, 1395-1417.
- Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: a proposed system and its control process. In K. W. Spence (Hrsg.), *The psychology of learning and motivation: advances in research and theory* (Bd. 2, S. 89-195). New York: Academic Press.
- Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. Oxford: Oxford University Press.
- Baddeley, A. D. (1998). Recent developments in working memory. *Current Opinion in Neurobiology*, 8, 234-238.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (1974). Working memory. In G. H. Bower (Hrsg.), *The psychology of learning and motivation* (Bd. 13, S. 47-89). New York: Academic Press.

-
- Baddeley, A. D., & Liebermann, K. (1980). Spatial working memory. In R. Nickerson (Hrsg.), *Attention and performance*, (Bd. 8, S. 521-539). Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum.
- Bagesteiro, L. B., Sarlegna, F., & Sainburg, R. L. (2006). Differential influence of vision and proprioception on control of movement distance. *Experimental Brain Research*, *171*, 358-370.
- Barnard, P. (1985). Interacting cognitive subsystems: A psycholinguistic approach to short-term memory. In A. Ellis (Hrsg.), *Progress in the psychology of language* (Bd. 2, S. 197-258). London: Lawrence Erlbaum.
- Barrett, L. F., Tugade, M. M., & Engle, R. W. (2004). Individual differences in working memory capacity and dual-process theories of mind. *Psychological Bulletin*, *130*, 553-573.
- Bartolo, A., Cubelli, R., Della Sala, S., & Drei, S. (2003). Pantomimes are special gestures which rely on working memory. *Brain and Cognition*, *53*, 483-494.
- Basden, D. R., & Basden, B. H. (1995). Some tests of the strategy disruption interpretation of part-list cuing inhibition. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *21*, 1656-1669.
- Bays, M., Flanagan, J. R., & Wolpert, D. M. (2005). Interference between velocity-dependent and position-dependent force-fields indicates that tasks depending on different kinematic parameters compete for motor working memory. *Experimental Brain Research*, *163*, 400-405.
- Berti, S. (2001). Bewegung und Arbeitsgedächtnis – ein methodischer Ansatz. In J. R. Nitsch, & H. Allmer (Hrsg.), *Denken – Sprechen –*

-
- Bewegen. Bericht der 32. Jahrestagung für Sportpsychologie 1.-3. Juni 2000 in Köln* (S. 164-167). Köln: BSP-Verlag.
- Beurze, S. M., van Pelt, S., & Medendorp, W. P. (2006). *Journal of Neurophysiology*, 96, 352-362.
- Bhushan, N., & Shadmehr, R. (1999). Computational nature of human adaptive control during learning of reaching movements in force fields. *Biological Cybernetics*, 81, 39-60.
- Binkofski, F., Buccino, G., Posse, S., Seitz, R. J., Rizzolatti, G., & Freund, H. J. (1999). A fronto-parietal circuit for object manipulation in man: evidence from an fMRI-study. *European Journal of Neuroscience*, 26, 821-829.
- Boulinguez, P., & Rouhana, J. (2008). Flexibility and individual differences in visuo-proprioceptive integration: evidence from the analysis of a morphokinetic control task. *Experimental Brain Research*, 185, 137-149.
- Brashers-Krug, T., Shadmehr, R., & Bizzi, E. (1996). Consolidation in human motor memory. *Nature*, 382, 252-255.
- Brooks, L. (1967). The suppression of visualisation by reading. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 19, 289-299.
- Buneo, C. A., Jarvis, M. R., Batista, A. P., & Andersen, R. A. (2002). Direct visuomotor transformations for reaching. *Nature*, 416, 632-636.
- Chieffi S., & Allport D. A. (1997) Independent coding of target distance and direction in visuo-spatial working memory. *Psychological Research*, 60, 244-250.

-
- Chieffi, S., Allport, D. A., & Woodin, M. (1999). Hand-centred coding of target location in visuo-spatial working memory. *Neuropsychologia*, *37*, 495-502.
- Chieffi, S., Conson, M., & Carlomagno, S. (2004). Movement velocity effects on kinaesthetic localisation of spatial positions. *Experimental Brain Research*, *158*, 421-426.
- Cohen, R. L. (1989). Memory for action events: The power of enactment. *Educational Psychological Review*, *1*, 57-80.
- Cokely, E. T., Kelley, C. M., & Gilchrist, A. L. (2006). Sources of individual differences in working memory: Contributions of strategy to capacity. *Psychonomic Bulletin and Review*, *13*, 991-997.
- Conditt, M. A., Gandolfo, F., & Mussa-Ivaldi, F. A. (1997). The motor system does not learn the dynamics of the arm by rote memorization of past experiences. *Journal of Neurophysiology*, *78*, 554-560.
- Cowan, N. (1993). Activation, attention, and short-term memory. *Memory and Cognition*, *21*, 162-167.
- Cowan, N. (1998). Visual and auditory working memory capacity. *Trends in Cognitive Sciences*, *2*, 77-78.
- Cowan, N., Wood, N. L., Wood, P. K., Keller, T. A., Nugent, L. D., & Keller, C. V. (1998). Two separate verbal processing rates contributing to short-term memory span. *Journal of Experimental Psychology: General*, *127*, 141-160.
- Cunningham, H. A., & Welch, R. B. (1994). Multiple concurrent visual-motor mappings: Implications for models of adaptation. *Journal of*

-
- Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20, 987-999.
- Dault, M. C., Frank, J. S., & Allard, F. (2001). Influence of a visuo-spatial, verbal and central executive working memory task on postural control. *Gait and Posture*, 14, 110-116.
- Della Sala, S., & Logie, R. H. (2002). Neuropsychological impairments of visual and spatial working memory. In A. D. Baddeley, B. Wilson, & M. Kopelman (Hrsg.), *Handbook of memory disorders* (S. 271-292). Chichester: Wiley & Sons.
- Demirci, M., Grill, S., McShane, L., & Hallett, M. (1997). A mismatch between kinaesthetic and visual perception in Parkinson's disease. *Annals of Neurology*, 41, 781-788.
- Desmurget, M., & Grafton, S. (2000). Forward modelling allows feedback control for fast reaching movements. *Trends in Cognitive Science*, 4, 423-431.
- Desmurget, M., Prablanc, C., Rossetti, Y., Arzi, M., Paulignan, Y., Urquizar, C., & Mignot, J. C. (1995). Postural and synergetic control for 3-dimensional movements of reaching and grasping. *Journal of Neurophysiology*, 74, 905-910.
- Deutsch, D. (1970). Tones and numbers. Specificity of interference in short-term memory. *Science*, 168, 1604-1605.
- Diewert, G. L. (1975). Retention and coding in motor short-term retention of simple motor responses: similarity of prior and succeeding responses. *Journal of Motor Behavior*, 7, 183-190.
- Dimeck, P. T., Roy, E. A., & Hall, C. R. (1996). Age differences in gestural imitation. *Brain and Cognition*, 26, 347-350.

-
- Dimeck, P. T., Roy, E. A., & Hall, C. R. (1998). Aging and working memory in gesture imitation. *Brain and Cognition*, 37, 124-126.
- Dolman, R., Roy, E. A., Dimeck, P. T., & Hall, C. R. (2000). Age, gesture span, and dissociations among component subsystems of working memory. *Brain and Cognition*, 43, 164-168.
- Duhamel, J. R., Colby, C. L., & Goldberg, M. E. (1991). Congruent representations of visual and somatosensory space in single neurons of monkey ventral intraparietal cortex (area VIP). In J. Paillard (Hrsg.), *Brain and Space*. Oxford: Oxford University Press.
- Duhamel, J. R., Colby, C. L., & Goldberg, M. E. (1998). Ventral intraparietal area of the macaque: congruent visual and somatic response properties. *Journal of Neurophysiology*, 79, 126-136.
- Easton, R. D., Srinivas, K., & Greene, A. J. (1997). Do vision and haptics share common representations? Implicit and explicit memory within and between modalities. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 23, 153-163.
- Engelkamp, J. (1997). *Das Erinnern eigener Handlungen*. Göttingen: Hogrefe.
- Engelkamp, J. (1998). *Memory for actions*. Hove, UK: Psychology Press.
- Engelkamp, J., & Zimmer, H. D. (1984). Motor programme information as a separable memory unit. *Psychological Research*, 46, 283-299.
- Engelkamp, J., & Zimmer, H. D. (1989). Memory for action events: a new field of research. *Psychological Research*, 51, 153-157.
- Engelkamp, J., & Zimmer, H. D. (1994). Motor similarity in subject-performed tasks. *Psychological Research*, 57, 47-53.

-
- Engelkamp, J., Zimmer, H. D., Mohr, G., & Sellen, O. (1994). Memory of self-performed tasks: self-performing during recognition. *Memory & Cognition*, *22*, 34-39.
- Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, *415*, 429-433.
- Farmer, E. W., Berman, J. V., & Fletcher, Y. L. (1986). Evidence for a visuo-spatial scratch pad in working memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *38A*, 657-688.
- Fiehler, K., Burke, M., Engel, A., Bien, S., & Rösler, F. (2008). Kinesthetic working memory and action control within the dorsal stream. *Cerebral Cortex*, *18*, 243-253.
- Flanagan, J. R., & Wing, A. M. (1997). The role of internal models in motion planning and control: Evidence from grip force adjustments during movements of hand-held loads. *Journal of Neuroscience*, *17*, 1519-1528.
- Flanders, M., Tillery, S. I. H., & Soechting, J. F. (1992). Early stages in a sensorimotor transformation. *Behavioral Brain Science*, *15*, 309-362.
- Flash, T., Inzelberg, R., Schechtman, E., & Korczyn, A. D. (1992). Kinematic analysis of upper limb trajectories in Parkinson's disease. *Experimental Neurology*, *118*, 215-226.
- Frekany, G. A. (1978). Retention characteristics of location and distance cues in motor short-term memory. *Research Quarterly*, *49*, 293-300.
- Ghez, C., Gordon, J., & Ghilardi M. F. (1995). Impairments of reaching movements in patients without proprioception. II. Effects of visual information on accuracy. *Journal of Neurophysiology*, *73*, 361-372.

-
- Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, *15*, 20-25.
- Gordon, J., Ghilardi, M. F., & Ghez, C. (1994). Accuracy of planar reaching movements: I. Independence of direction and extent variability. *Experimental Brain Research*, *99*, 97-111.
- Haffenden, A. M., Schiff, K. C., Goodale, M. A. (2001). The dissociation between perception and action in the Ebbinghaus illusion: Nonillusory effects of pictorial cues on grasp. *Current Biology*, *11*, 177-181.
- Hagmann, J. D., & Williams, E. (1977). Use of distance and location in short-term motor memory. *Perceptual and Motor Skills*, *44*, 867-873.
- Helstrup, T. (1987). One, two, or three memories? A problem-solving approach to memory for performed acts. *Acta Psychologica*, *66*, 37-68.
- Helstrup, T. (2001). Concurrent and retroactive interference effects in memory of movement patterns. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *54A*, 547-560.
- Helstrup, T. (2005). In search of a motor element in memory for enacted events. *European Journal of Cognitive Psychology*, *17*, 389-403.
- Henz, D., & Berti, S. (2006). Interferenzeffekte beim kurzzeitigen Speichern kleinräumiger Bewegungen. Poster präsentiert auf der 48. Tagung experimentell arbeitender Psychologen (TeaP), 26.-29. März 2006, Mainz.
- Hitch, G. J. (1984). Working Memory. *Psychological Medicine*, *14*, 265-271.

-
- Hollins, M., & Goble, A.K. (1988). Perception of length of voluntary movements. *Somatosensory Research*, 5, 335-348.
- Honda, H. (1984). Functional between-hand differences and outflow eye position information. *Quarterly Journal of Experiment Psychology*, 36A, 75-88.
- Hulme, C., Newton, P., Cowan, N., Stuart, G., & Brown, G. (1999). Think before you speak: Pauses, memory search, and trace reintegration processes in verbal memory span. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 25, 447-463.
- Imanaka, K., & Abernethy, B. (1992). Cognitive strategies and short-term memory for movement distance and location. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 45A, 669-700.
- Ito, M. (1984). *The cerebellum and neural control*. New York: Raven.
- Johansson, R. S., & Cole, K. J. (1992). Sensory-motor coordination during grasping and manipulative actions. *Current Opinions in Neurobiology*, 2, 815-823.
- Johnson, P. (1982). The functional equivalence of imagery and movement. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 34A, 349-365.
- Jordan, M. I. (1995). Motor Skills. In H. Heuer, & S. Keele (Hrsg.), *Handbook of Perception and Action*. New York: Academic Press.
- Jordan, M. I., & Rumelhart, D. E. (1992). Forward models: Supervised learning with a distal teacher. *Cognitive Science*, 16, 307-354.
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1992). A capacity theory of comprehension: Individual differences in working memory. *Psychological Review*, 99, 122-149.

-
- Kawato, M., Furukawa, K., & Suzuki, R. (1987). A hierarchical neural network model for the control and learning of voluntary movements. *Biological Cybernetics*, *56*, 1-17.
- Kerzel, D. (2001). Visual short-term memory is influenced by haptic perception. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *27*(4), 1101-1109.
- Klockgether, T., Borutta, M., Rapp, H., Spieker, S., & Dichgans, J. (1995). A defect of kinaesthesia in Parkinson's disease. *Movement disorders*, *10*, 460-465.
- Krakauer, J. W., Ghilardi, M. F., & Ghez, C. (1999). Independent learning of internal models for kinematic and dynamic control of reaching. *Nature Neuroscience*, *2*, 1026-1031.
- Laabs, G. J. (1973). Retention characteristics of different reproduction cues in motor short-term memory. *Journal of Experimental Psychology*, *100*, 168-177.
- Lateiner, J. E., & Sainburg, R. L. (2003). Differential contributions of vision and proprioception to movement accuracy. *Experimental Brain Research*, *151*, 446-454.
- Lawrence, B. M., Myerson, J., Oonk, H. M., & Abrams, R. A. (2001). The effects of eye and limb movements on working memory. *Memory*, *9*, 433-444.
- Lewis, J. W., & Van Essen, D. C. (2000). Corticocortical connections of visual, sensorimotor, and multimodal processing areas in the parietal lobe of the macaque monkey. *Journal of Comparative Neurology*, *428*, 112-137.

-
- Logie, R. H. (1996). The seven ages of working memory. In J. T. E. Richardson, R. Engle, L. Hasher, R. H. Logie, E. R. Stoltzfus, & R. T. Zacks (Hrsg.), *Working memory and human cognition* (S. 31-65). New York: Oxford University Press.
- Logie, R. H., & Della Sala, S. (2005). Disorders of visuo-spatial working memory. In A. Miyake, & P. Shah (Hrsg.), *The Cambridge handbook of visuospatial thinking* (S. 81-121). New York: Cambridge University Press.
- Logie, R. H., Engelkamp, J., Dehn, D., & Rudkin, S. (2001). Actions, mental actions, and working memory. In M. Denis, R. H. Logie, C. Cornoldi, M. DeVega, & M. J. Engelkamp (Hrsg.), *Imagery, language and visuo-spatial thinking* (S. 161-184). Hove: Psychology Press.
- Logie, R. H., & Marchetti, C. (1991). Visuo-spatial working memory: Visual, spatial, or central executive? In R. H. Logie, & M. Denis (Hrsg.), *Mental images in human cognition* (S. 105-115). Amsterdam: North Holland Press.
- Marsden, C. D. (1989). Slowness of movement in Parkinson's disease. *Movement disorders, 4*, 25-37.
- Marteniuk, R. G. (1973). Retention characteristics of motor short-term memory cues. *Journal of Motor Behavior, 5*, 249-259.
- Marteniuk, R. G., & Roy, E. A. (1972). The codability of kinaesthetic location and distance information. *Acta Psychologica, 36*, 471-479.
- McCloskey, D. I. (1973) Differences between the sense of movement and position shown by the effects of loading and vibration of muscles in man. *Brain Research, 61*, 119-131.

-
- McCloskey, D. I. (1978). Kinesthetic sensibility. *Physiological Review*, 58, 763-820.
- McNamara, D. S., & Scott, J. L. (2001). Working memory capacity and strategy use. *Memory and Cognition*, 29, 10-17.
- Mechsner, F. (2004). A psychological approach to human voluntary movements. *Journal of Motor Behavior*, 36, 355-370.
- Meegan, D. V., & Tipper, S. P. (1998). Reaching into cluttered visual environments: Spatial and temporal influences of distracting objects. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 51A, 225-249.
- Meltzoff, A. N., & Moore, M. K. (1977). Imitation of facial and manual gestures by human neonates. *Science*, 198, 75-78.
- Miall, R. C., Weir, D., Wolpert, J., & Stein, J. (1993). Is the cerebellum a Smith Predictor? *Journal of Motor Behavior*, 25, 203-216.
- Miall, R. C., & Wolpert, D. M. (1996). Forward models for physiological motor control. *Neural Networks*, 9, 1265-1279.
- Milner, B. (1971). Interhemispheric differences in the location of psychological processes in man. *British Medical Bulletin*, 27, 272-277.
- Milner, A. D., & Goodale, M. A. (1993). Visual pathways to perception and action. *Progress in Brain Research*, 95, 317-377.
- Nougier, V., Bard, C., Fleury, M., Teasdale, N., Cole, J., Forget, R., Paillard, J., & Lamarre, Y. (1996). Control of single joint movements in deafferented patients: evidence for amplitude coding rather than position control. *Experimental Brain Research*, 109, 473-482.
- Oldfield, R. C. (1971). Assessment and analysis of handedness – Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-98.

-
- Paillard, J., & Brouchon, M. (1968). Active and passive movement in the calibration of position sense. In S. J. Freedman (Hrsg.), *The neuropsychology of spatially oriented behavior* (S. 35-55). Dorsey Press, Howewood.
- Patrick, J. (1971). The effect of interpolated motor activities in short-term motor memory. *Journal of Motor Behavior*, 3, 39-48.
- Pearson, D. G., Logie, R. H., & Gilhooly, K. (1999). Verbal representations and spatial manipulation during mental synthesis. *European Journal of Cognitive Psychology*, 11, 295-314.
- Pearson, D. G., & Sahraie, A. (2003). Oculomotor control and the maintenance of spatially and temporally distributed events in visuo-spatial working memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 56A, 1089-1111.
- Pechmann, T., & Mohr, G. (1992). Interference in memory for tonal pitch: Implications for a working-memory model. *Memory & Cognition*, 20, 314-320.
- Posner, M. I. (1967). Characteristics of visual and kinaesthetic memory codes. *Journal of Experimental Psychology*, 75, 103-107.
- Posner, M. I., & Konick, A. F. (1966). On the role of interference in short-term retention. *Journal of Experimental Psychology*, 72, 221-231.
- Postle, B. R. (2006). Working memory as an emergent property of the mind and brain. *Neuroscience*, 139, 23-38.
- Quinn, J. G., & Ralston, G. E. (1986). Movement and attention in visual working memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 38A, 689-704.

-
- Reales, J. M., & Ballesteros, S. (1999). Implicit and explicit memory for visual and haptic objects: cross-modal priming depends on structural descriptions. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 25, 644-663.
- Rizzolatti G., Fadiga L., Fogassi L., & Gallese, V. (1997) The space around us. *Science*, 277, 190-191.
- Robinson, D. A., Gordon, J. L., & Gordon, S. E. (1986). A model of the smooth pursuit eye movement system. *Biological Cybernetics*, 55, 43-57.
- Rosenbaum, D. A., & Chaiken, S. R. (2001). Frames of reference in perceptual-motor learning: Evidence from a blind manual positioning task. *Psychological Research*, 65, 119-127.
- Rosenbaum, D. A., & Dawson, A. M. (2004). The motor system computes well but remembers poorly. *Journal of Motor Behavior*, 36, 390-392.
- Rosenbaum, D. A., Meulenbroeck, R. J., & Vaughan, J. (1999). Remembered positions: stored locations or stored postures? *Experimental Brain Research*, 124, 503-512.
- Rossetti, Y., Desmurget, M., & Prablanc, C. (1995). Vectorial coding of movement: vision, proprioception or both? *Journal of Neurophysiology*, 74, 457-463.
- Roy, E. A. (1977). Spatial cues in memory for movement. *Journal of Motor Behavior*, 9, 151-156.
- Roy, E. A. (1978). Role of preselection in memory for movement extent. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning*, 4, 397-405.
- Roy, E. A., & Diewert, G. L. (1978). The coding of movement extent information. *Journal of Human Movement Studies*, 4, 94-101.

-
- Rumiati, R. I., & Tessari, A. (2002). Imitation of novel and well-known actions: The role of short-term memory. *Experimental Brain Research, 142*, 425-433.
- Sarlegna, F. R., & Sainburg, R. L. (2007). The effect of target modality on visual and proprioceptive contributions to the control of movement distance. *Experimental Brain Research, 176*, 267-280.
- Saunders, J. A., & Knill, D. C. (2003). Humans use continuous visual feedback from the hand to control fast reaching movements. *Experimental Brain Research, 152*, 341-352.
- Saunders, J. A., & Knill, D. C. (2005). Humans use continuous visual feedback from the hand to control both the direction and distance of pointing movements. *Experimental Brain Research, 162*, 458-473.
- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review, 82*, 225-260.
- Schmidt, R. A., & Stelmach, G. E. (1968). Postural set as a factor in short-term motor memory. *Psychonomic Science, 13*, 223-224.
- Schneider, G. E. (1969). Two visual systems. *Science, 163*, 895-902.
- Schneider, W., & Detweiler, M. A. (1988). A connectionist/control architecture for working memory. In G. H. Bower (Hrsg.), *The psychology of learning and motivation* (S. 53-119). San Diego, CA: Academic Press.
- Schunn, C. D., Lovett, M. C., & Reder, L. M. (2001). Awareness and working memory in strategy adaptivity. *Memory and Cognition, 29*, 254-266.

-
- Shadmehr, R., & Brashers-Krug, T. (1997). Functional stages in the formation of human long-term motor memory. *Journal of Neuroscience*, *17*, 409-419.
- Shadmehr, R., & Mussa-Ivaldi, F. A. (1994). Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. *Journal of Neuroscience*, *14*, 3208-3224.
- Shumway-Cook, A., Woolacott, M., Kerns, A., & Baldwin, M. (1997). The effects of two types of WM tasks on postural stability in older adults with and without a history of falls. *Journal of Gerontology A*, *52*, 232-240.
- Shumway-Cook, A., & Woolacott, M. (2000). Attentional demands and postural control: the effect of sensory context. *Journal of Gerontology A*, *55*, 10-16.
- Smyth, M. M. (1996). Interference with rehearsal in spatial working memory in the absence of eye movements. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *49A*, 940-949.
- Smyth, M. M., Pearson, N. A., & Pendleton, L. R. (1988). Movement and working memory. Patterns and positions in space. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *40A*, 497-514.
- Smyth, M. M., & Pendleton, L. R. (1989). Working memory for movements. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *41A*, 235-250.
- Smyth, M. M., & Pendleton, L. R. (1990). Space and movement in working memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *42A*, 291-304.
- Smyth, M. M., & Scholey, K. A. (1994). Interference in spatial immediate memory. *Memory and Cognition*, *22*, 1-13.

-
- Sober, S. J., & Sabes, P. N. (2003). Multisensory integration during motor planning. *Journal of Neuroscience*, *23*, 6982-6992.
- Sober, S. J., & Sabes, P. N. (2005). Flexible strategies for sensory integration during motor planning. *Nature Neuroscience*, *8*, 490-497.
- Soechting, J. F., & Flanders, M. (1989a). Sensorimotor representations for pointing to targets in three-dimensional space. *Journal of Neurophysiology*, *62*, 582-594.
- Soechting, J. F., & Flanders, M. (1989b). Errors in pointing are due to approximations in sensorimotor transformations. *Journal of Neurophysiology*, *62*, 595-608.
- Stelmach, G. E., Kelso, J. A., & Dorrance McCullagh, P. (1976). Preselection and response biasing in short-term motor memory. *Memory and Cognition*, *4*, 62-66.
- Stelmach, G. E., Kelso, J. A., & Wallace, S. A. (1975). Preselection in short-term motor memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning*, *1*, 745-755.
- Stoeckel, M. C., Weder, B., Binkofski, F., Buccino, G., Shah, N. J., & Seitz, R. J. (2003). A fronto-parietal circuit for tactile object discrimination: an event-related fMRI study. *Neuroimage*, *19*, 1103-1114.
- Sutton, R. S., & Barto, A. G. (1981). Toward a modern theory of adaptive networks: expectation and prediction. *Psychological Review*, *88*, 135-170.
- Tessari, A., Bosanac, D., & Rumiati, R. I. (2006). Effect of learning on imitation of new actions: implications for a memory model. *Experimental Brain Research*, *173*, 507-513.

-
- Tessari, A., & Rumiati, R. I. (2002). Motor distal component and pragmatic representation of objects. *Cognitive Brain Research, 14*, 218-227.
- Tipper, S. P., Lortie, C., & Baylis, G. C. (1992). Selective reaching: evidence for action-centred attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 18*, 891-905.
- Toraldo, A., Reverberi, C., & Rumiati, R. I. (2001). Critical dimensions affecting imitation performance of patients with ideomotor apraxia. *Cortex, 37*, 737-740.
- Turley-Ames, K., & Whitfield, M. M. (2003). Strategy training and working memory task performance. *Journal of Memory and Language, 49*, 446-468.
- Ungerleider, L. G., & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In D.J. Ingle, R. J. W. Mansfield, & M. S. Goodale (Hrsg.), *The analysis of visual behavior*. Cambridge, MA: MIT Press.
- van Beers, R. J., Baraduc, P., & Wolpert, D. M. (2002a). Role of uncertainty in sensorimotor control. *Philosophical Transactions of the Royal Society: Biology and Science, 357*, 1137-1145.
- van Beers, R. J., Sittig, A. C., & van der Gon, J. J. (1996). How humans combine simultaneous proprioceptive and visual information. *Experimental Brain Research, 111*, 253-261.
- van Beers, R.J., Wolpert, D.M., & Haggard, P. (2002b). When feeling is more important than seeing in sensorimotor adaptation. *Current Biology, 12*, 834-837.
- Walsh, W. D., & Russell, D. G. (1980). Memory for preselected slow movements: Evidence for integration of location and distance. *Journal of Human Movement Studies, 6*, 95-105.

-
- Walsh, W. D., Russell, D. G., Imanaka, K., & James, B. (1979). Memory for constrained and preselected movement location and distance: Effects of starting position and length. *Journal of Motor Behavior*, *11*, 201-214.
- Wapner, S.J., Weinberg, J., Glick, J.A., & Rand, G. (1967). Effect of speed of movement on tactual-kinesthetic perception of extent. *American Journal of Psychology*, *80*, 608-613.
- Welch, R. B., Bridgeman, B., Anand, S., & Brownman, K. E. (1993). Alternating prism exposure causes dual adaptation and generalization to a novel displacement. *Perceptual Psychophysiology*, *54*, 195-471.
- Willingham, D. B. (1998). A neuropsychological theory of motor skill learning. *Psychological Review*, *105*, 558-584.
- Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *Nature Neuroscience*, *3*, 1212-1217.
- Wolpert, D. M., Ghahramani, Z., & Jordan, M. I. (1995). An internal model for sensorimotor integration. *Science*, *269*, 1880-1882.
- Wolpert, D. M., & Kawato, M. (1998). Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural Networks*, *11*, 1317-1329.
- Wolpert, D. M., Miall, R. C., & Kawato, M. (1998). Internal models in the cerebellum. *Trends in Cognitive Science*, *2*, 338-347.
- Woodin, M. E., & Heil, J. (1996). Skilled motor performance and working memory in rowers: body patterns and spatial positions. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *49A*, 357-378.

Zimmer, H. D., Cohen, R. L., Gynn, M. J., Engelkamp, J. Kormi-Nouri, R.,
& Foley, M. A. (2001). *Memory for action*. New York: Oxford
University Press.

Anhang A
Protokollbögen

Protokoll: Versuchspersonendaten

Name:	Datum:		
Vp-Code:	Zeit:		
Geschlecht: m/w	Alter:	Beruf:	
Brille/Kontaktl.: ja / nein	Händigkeit: rechts/links		
neurologische Beeinträchtigung: ja / nein			
<u>Oldfield:</u>	<u>RH</u>	<u>teilw. LH</u>	<u>LH</u>
Händigkeit der Eltern/Geschwister	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Schreiben / Zeichnen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Schneiden	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Zähne putzen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Werfen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Löffel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Behälter öffnen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Händigkeit umgelernt?	ja / nein		
wann			
<u>Mausbedienung</u>			
Seit wie vielen Jahren mit Mausbedienung vertraut?			
.....			
Wie oft wird mit Maus gearbeitet?			
.....			
<u>Anmerkungen/Besonderheiten:</u>			
VL:			

Verlaufsprotokoll

Vp-Code:	Datum: Zeit:
<u>allgemeine Fragen: Tag vor dem Experiment</u>	
<u>Allgemeines Wohlbefinden:</u>	gut mäßig schlecht
<u>Schlaf der letzten Nacht:</u>	gut mäßig schlecht
<u>Wie ist Deine Konzentration?</u>	gut mäßig schlecht
<u>Letzte Aktivität heute?</u>	
Zeitdauer:	
Experiment:	insgesamt:
Bemerkungen:	
Nach dem Experiment folgende Fragen:	

Gab es Schwierigkeiten bei der Aufgabe?
wenn ja, welche?

Welche Lösungsstrategie wurde verwendet (Konzentration etc.)?

Ist sonst noch etwas aufgefallen?

Bitte schätze die **Schwierigkeit** der Aufgaben ein:
(1 = sehr leicht; 5 = neutral; 10 = sehr schwierig)

EXPERIMENTELLE BEDINGUNGEN

Objekt beobachten

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Objekt mit Cursor (sichtbar)
verfolgen

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Objekt mit Cursor (unsichtbar)
verfolgen

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Wörter zählen

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Anhang B
Instruktionen zu den Experimenten 1 bis 6

Instruktion Gedächtnisaufgabe

Gedächtnisexperiment

Universität Mainz

Herzlich Willkommen bei unserem Experiment und vielen Dank im Voraus für Deine Teilnahme!

Bevor wir mit dem Experiment beginnen, wollen wir Dir auf diesem Zettel den Ablauf und die Aufgabe des Experiments erklären. Solltest Du außerdem noch Fragen haben, kannst Du diese jederzeit stellen!

Bevor das Experiment beginnt, erheben wir einige Daten, die wir zur Dokumentation der Ergebnisse brauchen. Es handelt sich dabei vor allem um Daten zum aktuellen Befinden.

Alle Daten, die wir erheben, auch die Daten aus dem Experiment, werden nur zu rein wissenschaftlichen Zwecken erhoben und verwertet. Die Daten werden anonymisiert weiterverarbeitet, d. h. niemand, der Zugang zu den Ergebnissen dieser Studie hat, kann Rückschlüsse auf einzelne Teilnehmer der Studie ziehen. Daten, die zur Sicherheit oder zur Weiterverarbeitung gespeichert werden, werden ebenfalls nur anonymisiert gespeichert.

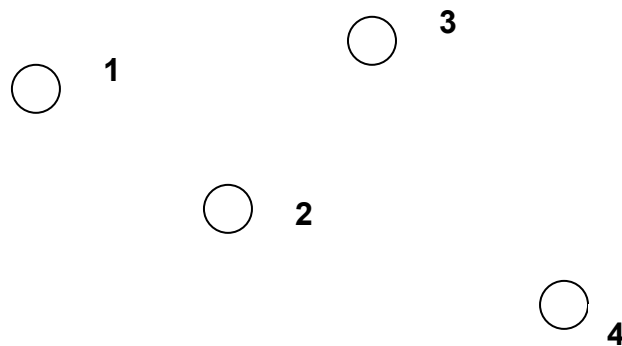
Wichtig: Du kannst das Experiment jederzeit ohne Angabe von Gründen abbrechen! Sollte es nötig sein, das Experiment abzubrechen, dann hat das natürlich keinerlei negative Folgen.

Viel Spaß bei unserem Experiment!

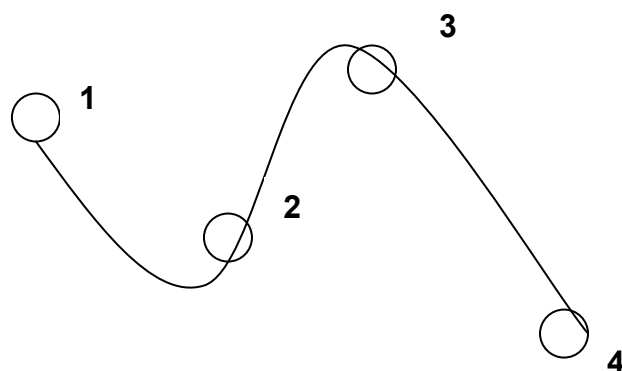
Gedächtnisexperiment

Universität Mainz

In diesem Experiment geht es darum, sich kleine Handbewegungen einzuprägen und diese nach einem gewissen Zeitraum wiederzugeben. Hierzu erscheinen auf dem Bildschirm nacheinander vier Kreise:

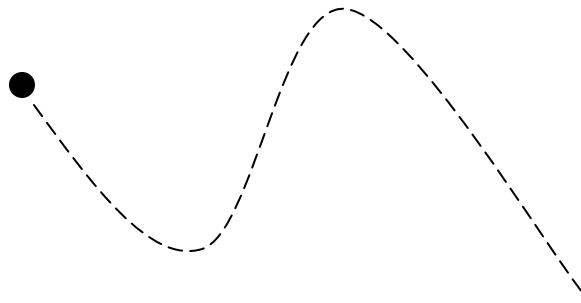


Diese Kreise werden nach kurzer Zeit ausgeblendet. Deine Aufgabe ist es nun, mit der PC-Maus die Punkte in der angegebenen Reihenfolge nachzufahren. Drücke dazu die linke Maustaste und halte diese unbedingt während der gesamten Bewegung gedrückt:



Nachdem die Bewegung am vierten Punkt angelangt ist, die linke Maustaste loslassen!

Nach einer Zeit von 6 Sekunden erscheint dann ein Punkt in der Mitte des Bildschirms. Nun soll die zuvor ausgeführte Bewegung mit der PC-Maus wiederholt werden:



Wichtig:

1. Bitte versuche eine **gleichmäßige** und ruhige Bewegung auszuführen und nicht die Punkte quasi mit abgehackten Strichen zu verbinden!
2. Die Bewegung soll möglichst präzise wiederholt werden: sowohl die **Bewegungsfiguren** als auch die **Geschwindigkeit Deiner Bewegung** wird aufgezeichnet und bewertet!

Du hast vor Beginn des eigentlichen Experiments die Möglichkeit, die Aufgabe zunächst einmal in einem Übungsblock auszuprobieren!

Es folgen insgesamt mehrere Experimentalblöcke. Während der 9 Sekunden, zwischen Punkte mit der PC-Maus nachfahren und Wiederholen der Bewegung, werden Aufgaben dargeboten, die Du möglichst schnell und präzise bearbeiten sollst.

Diese Zwischenaufgaben kannst Du vor jedem Experimentalblock zunächst einzeln üben.

Instruktionen zu den Trackingaufgaben in Experiment 1 bis 4 und 6

1. Instruktion phonologisches Tracking

Über den Bildschirm laufen von links nach rechts Wörter:

rot – hof – gut – gelb – maus

Bitte mit der linken Maustaste schnellstmöglich einmal klicken, sobald das siebte Wort erscheint.

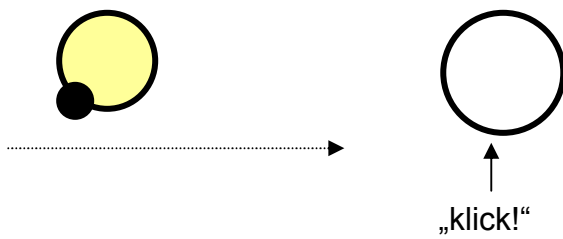
rot – hof – gut – gelb – maus – hut – bild – tat – mann



„klick!“

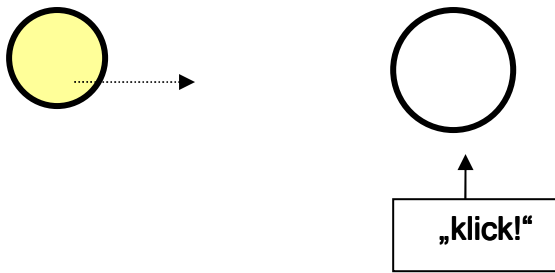
2. Instruktion visuell-motorisches Tracking

Über den Bildschirm läuft von links nach rechts ein roter Punkt. Diesen Punkt mit dem Cursor (schwarzer Punkt) möglichst deckungsgleich verfolgen. Mit linker Maustaste einmal klicken, sobald ein Kreis erscheint! Bitte schnellstmöglich reagieren!



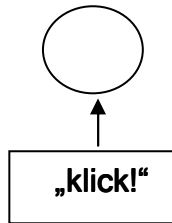
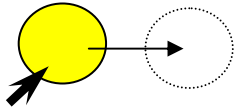
3. Instruktion visuelles Tracking

Über den Bildschirm läuft von links nach rechts ein roter Punkt. Bitte mit linker Maustaste einmal klicken, sobald ein Kreis erscheint! Bitte schnellstmöglich reagieren!



4. Instruktion motorisches Tracking

Ein roter Punkt läuft von links nach rechts über den Bildschirm. Punkt mit Cursor (schwarzer Punkt) verfolgen. Der rote Punkt verschwindet nach kurzer Zeit, ebenso der Cursor. Bewegung mit der Maus trotzdem in der gleichen Geschwindigkeit fortsetzen, Daten der Mausbewegung werden aufgezeichnet. Wurde die Maus bis zu einem bestimmten Ort bewegt, erscheint ein Kreis. Bitte schnellstmöglich mit der linken Maustaste auf Kreis reagieren!

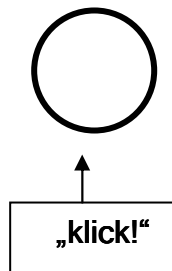


Experiment 5: Instruktion visuell-motorische Zusatzaufgabe mit visuellem Feedback

Auf der linken Bildschirmseite befindet sich ein Kreis. In diesem mit dem Cursor herum malen und darauf achten, die Kreislinie nicht zu berühren, dabei keine Taste drücken.

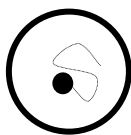


Nach wenigen Sekunden erscheint auf der rechten Seite ein Kreis. Bitte mit linker Maustaste einmal klicken, sobald Kreis erscheint → schnellstmöglich reagieren!

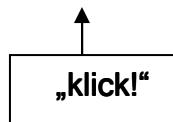
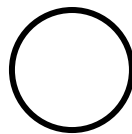


Experiment 5: Instruktion visuell-motorische Zusatzaufgabe ohne visuelles Feedback

Auf der linken Bildschirmseite befindet sich ein Kreis. In diesem mit dem Cursor herum malen und darauf achten, die Kreislinie nicht zu berühren, dabei keine Taste drücken.



Nach wenigen Sekunden erscheint auf der rechten Seite ein Kreis. Bitte mit linker Maustaste einmal klicken, sobald Kreis erscheint, schnellstmöglich reagieren!



Anhang C
Instruktion zu Experiment 7

Gedächtnisexperiment

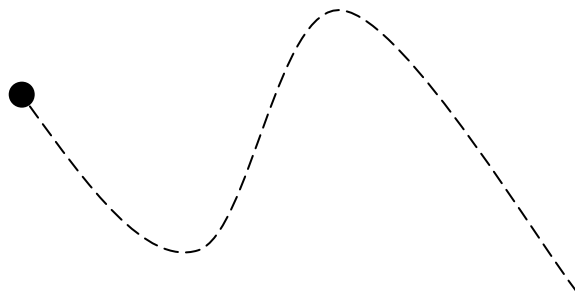
Universität Mainz

In diesem Experiment geht es darum, sich kleine Handbewegungen einzuprägen und diese nach einem gewissen Zeitraum wiederzugeben. Die Bewegungen, die ausgeführt werden, suchst Du Dir selbst aus, d.h. Du bestimmst die Länge, die Richtung und das Bewegungstempo.

Die Bewegungen werden mit der PC Maus ausgeführt. Drücke dazu die linke Maustaste und halte diese unbedingt während der gesamten Bewegung gedrückt. Wenn die Bewegung beendet ist, bitte die linke Maustaste loslassen!

Es folgt eine kurze Pause, in der Du Dir die eben ausgeführte Bewegung merken sollst.

Nach einer Zeit von 9 Sekunden erscheint dann ein Punkt in der Mitte des Bildschirms. Nun soll die zuvor ausgeführte Bewegung mit der PC-Maus wiederholt werden:

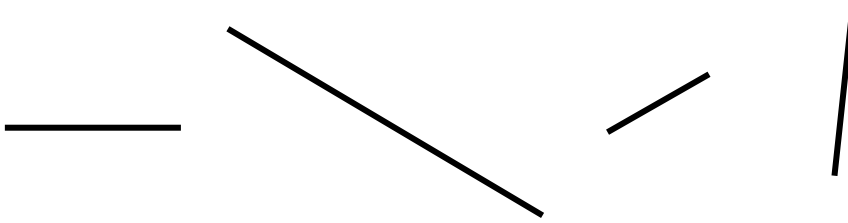


Du hast vor Beginn des eigentlichen Experiments die Möglichkeit, die Aufgabe zunächst einmal in einem Übungsblock auszuprobieren!

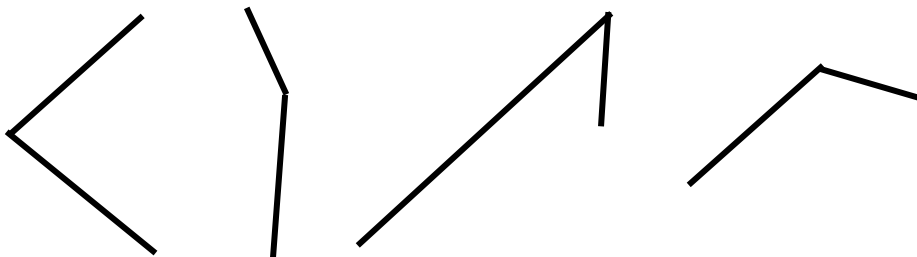
Es folgen insgesamt fünf Experimentalblöcke, in denen verschiedene Arten von Bewegungen ausgeführt werden sollen.

1. Einteilige lineare Bewegungen:

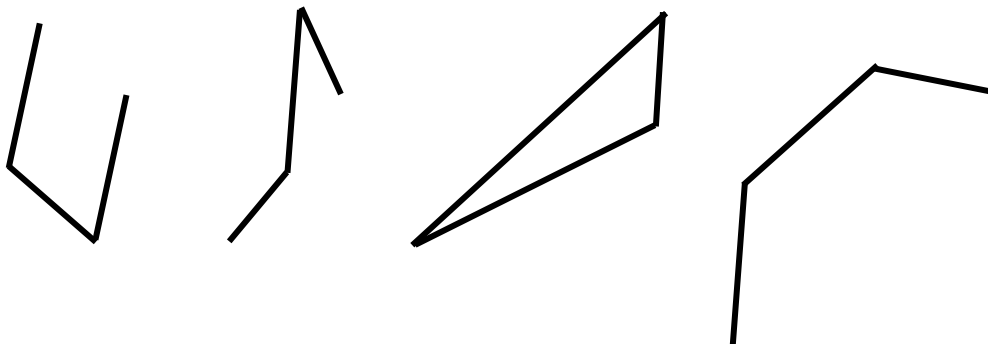
Eine gerade Linie, hier einige Beispiele...

**2. Zweiteilige lineare Bewegungen:**

Die Bewegung besteht aus zwei Elementen, hier einige Beispiele...

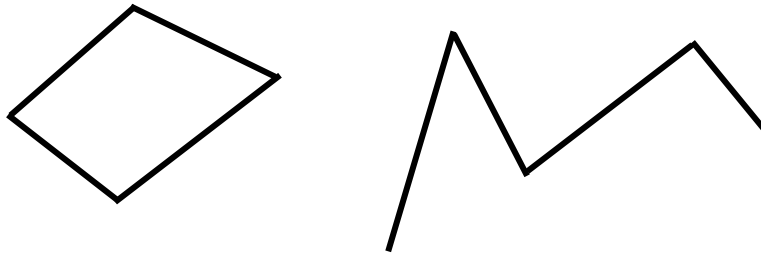
**3. Dreiteilige lineare Bewegungen:**

Die Bewegung besteht aus drei Elementen, hier einige Beispiele...



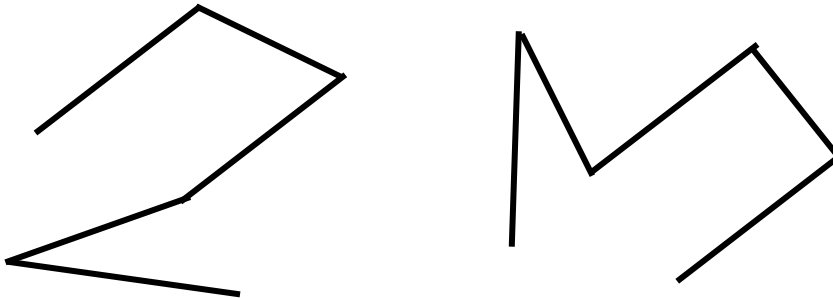
4. Vierteilige lineare Bewegungen

Die Bewegung besteht aus vier Elementen, hier einige Beispiele...



5. Fünfteilige lineare Bewegungen

Die Bewegung besteht aus fünf Elementen, hier einige Beispiele...



Zusammenfassung

Eine wichtige Grundlage kognitiver Prozesse ist die Fähigkeit, Informationen über einen gewissen Zeitraum hinweg verfügbar zu halten, um diese zur Steuerung zielgerichteten Verhaltens zu nutzen. Eine interessante Frage ist, auf Basis welcher Informationen motorische Handlungen wiederholt werden bzw. wie Bewegungen im Kurzzeitgedächtnis gespeichert werden, um sie genau reproduzieren zu können. Diese Frage wurde in sieben Experimenten anhand eines Interferenzparadigmas untersucht, bei dem die Versuchspersonen am PC per Maus eine kurze Bewegung ausführten und nach einem Behaltensintervall wiedergaben. Im Behaltensintervall mussten zusätzlich Aufgaben unterschiedlicher Modalitäten bearbeitet werden, die Aufschluss über das Speicherformat von Bewegungen geben. Anhand einer qualitativen und quantitativen Datenauswertung konnten Aussagen über resultat- und prozessbezogene Aspekte bei motorischen Arbeitsgedächtnisaufgaben getroffen werden. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass bei der Lösung einer motorischen Arbeitsgedächtnisaufgabe sowohl visuelle als auch kinästhetische Hinweisreize (so genannte Cues) berücksichtigt werden. Diese Cues werden in einem redundanten Format gespeichert, d. h. auch Informationen, die nicht zwingend zur Lösung der Aufgabe notwendig sind, werden vom kognitiven System herangezogen. Diese redundante Speicherung dient der Stabilisierung der internen Bewegungsrepräsentation, die unter anderem auch Informationen über Geschwindigkeitsparameter enthält. Es zeigt sich, dass automatisch ablaufende kognitive Mechanismen bei der Aufgabenlösung eine entscheidende Rolle spielen. Dabei konnten aufgabenspezifische Strategien, wie etwa die Optimierung der Arbeitsabläufe, aber auch generelle Mechanismen, nämlich Redundanz sowie Konstruktions- und Rekonstruktionsmechanismen bei der Bewegungsplanung, beobachtet werden. Die Ergebnisse werfen die Frage auf, ob es sich bei den untersuchten Prozessen tatsächlich um Arbeitsgedächtnisprozesse der kurzzeitigen Speicherung handelt, oder ob die beobachteten Phänomene allein durch motorische Planung und Kontrolle zu erklären sind. Die bisher gefundenen Ergebnisse regen ferner dazu an, bisherige strukturelle Arbeitsgedächtnismodelle, wie etwa das klassische Modell von Baddeley und Hitch (1974), um prozessorientierte Aspekte zu erweitern.