

Universität Bielefeld
Fakultät für Biologie

Experimentelle Untersuchungen und Simulation zum Körperschema des Menschen

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades des Doktors der
Naturwissenschaften an der Universität Bielefeld

eingereicht von Dong-Hak Kim

Bielefeld, 22. November 1999

genehmigt von der Fakultät für Biologie

Bielefeld, 10. Februar 2000

– Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier ∞ ISO 9706 –

Erstgutachter : Prof. Dr. Holk Cruse an der Fakultät für Biologie

Zweitgutachter: Prof. Dr. Odmar Neumann an der Fakultät für Psychologie

Tag der Abgabe: 22. November 1999

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Februar 2000

Diese Arbeit ist vom Graduiertenkolleg *Strukturbildungsprozesse*
an der Universität Bielefeld unterstützt

Hiermit versichere ich, daß ich die Dissertation selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Bielefeld, den 22. November 1999

Curriculum Vitae

Zeitraum	Bildungsgänge
Okt. 1967	geboren in Seoul, Süd-Korea
1974-1980	Jam-Won Grundschule
1980-1983	Seo-Cho Mittelschule
1983-1986	Sang-Moon Oberschule
1987-1991	Bachelor of Science, Fakultät für Zoologie Seoul National Universität
1991-1993	Master of Science, Fakultät für Molekularbiologie an derselben Universität
1993-1995	Militärdienst
1995-1996	Sprachkurs an der Universität Bielefeld
Okt. 1996	Zugelassen zur Promotion an der Fakultät für Biologie
1996-2000	Promotion bei Prof. Dr. Holk Cruse

Danksagung

Meine Dummheit ist immer noch nicht geheilt. Dennoch habe ich die Augen geschenkt bekommen, die mich ständig zu einer neuen Perspektive führen. Dafür danke ich meinem wissenschaftlichen Vater, Prof. Dr. Holk Cruse.

Alle, die am Basteln meines Doktorhuts aktiv teilgenommen haben, sind in meinem Herzen fest plaziert. Für diese warme Erinnerung bin ich ewig dankbar.

Nicht zu vergessen ist das Immer-bei-mir-sein meiner Frau, Tae-Eun, das ich sicher nicht verdient habe.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Einführung	5
2.1	Reaktionszeit (RT)	5
2.1.1	Stage Modell	5
2.1.2	Stimulus-Response Set bei CRT	6
2.2	S-R Kompatibilität (correspondence effect)	7
2.2.1	Modell für S-R Kompatibilität	8
2.2.2	Raumabhängiger Effekt in der SRT und der CRT	9
2.3	Räumliche Wahrnehmung	10
2.3.1	Neglekt	10
2.3.2	Aufmerksamkeit (Attention)	11
3	Material und Methode	14
3.1	Reizgebung und Körperstellungen	14
3.2	Registrierung der Reaktion	16
3.3	Apparatur	17
3.4	Steuerprogramm	17
3.5	Versuchspersonen	19
4	Bimanuelle Entscheidung bei Zielbewegungen	20
4.1	Methode	20
4.2	Resultate	22
4.3	RT für Entscheidung	27
5	SRT und CRT Aufgaben	33
5.1	SRT bei bekanntem bzw. unbekanntem Reizort	34
5.2	unterschiedliche Beinstellungen	35
5.3	parallele bzw. überkreuzte Hände	38
5.3.1	Methode	38

5.3.2	Ergebnisse	38
5.4	zusätzliche Stimulation (Cueing)	38
5.4.1	Methode	38
5.4.2	Ergebnisse	39
5.5	CRT Aufgabe bei Reizung an den Fingerspitzen	41
5.5.1	Methode	41
5.5.2	Ergebnisse	41
5.6	SRT Aufgabe mit Distraktor	42
5.6.1	Methode	42
5.6.2	Ergebnisse	42
6	CRT Aufgabe in einem Bein	44
6.1	Variation der Handstellungen	44
6.1.1	Methode	44
6.1.2	Ergebnisse	45
6.2	Variation der Beinstellungen	48
6.2.1	Methode	48
6.2.2	Ergebnisse	48
7	Messungen am Oberkörper	52
7.1	Reaktion bei Reizung einer Körperstelle	52
7.2	Reaktion bei der gleichzeitigen Reizung von 2 Körperstellen	52
7.3	Reaktion bei der gleichzeitigen Reizung von 3 Körperstellen	52
7.4	Resultate	52
8	Diskussion	55
9	Reizung der Fingerspitzen	61
9.1	Einleitung	61
9.2	Variation des transversalen Abstandes	61
9.3	Variation des Abstandes in frontaler Richtung	65
9.4	Variation der Lage bei konstantem Abstand	67
9.5	Diskussion	71
10	Simulation der CRT (SRC)	73
10.1	Überblick	73
10.2	Die Simulation des Informationsflusses	73
10.2.1	Stage-Modell zur taktilen Wahrnehmung	73
10.3	Realisierung des Informationsflusses	75
10.3.1	Algorithmus	75
10.3.2	Architektur zur Simulation	76

10.3.3	Einige technische Details	78
10.4	CRT bei zwei Handstellungen	80
10.4.1	Methode	80
10.4.2	Ergebnisse	81
10.5	Variation der Handstellung	83
10.5.1	Methode	83
10.5.2	Ergebnisse	83
10.6	Variation der Beinstellung	85
10.6.1	Methode	85
10.6.2	Ergebnisse	86
10.7	Variation der Lage der Finger im Raum	86
10.7.1	Methode	87
10.7.2	Ergebnisse	87
10.8	Zusammenfassung	88
11	Entscheidungsprozeß	90
11.1	Einleitung	90
11.2	Hinderniskodierung	90
11.2.1	Einbau eines Hindernisses bei Diffusion und Wave-Propagation	90
11.2.2	Hindernis als Zeit	93
11.3	Konstruktion des Modells	94
11.3.1	Bein als Hindernis	94
11.4	Variation der Hand- bzw. Beinstellung	96
11.4.1	Reiz- und Reaktionsorte	96
11.4.2	Ergebnisse (parallele und gekreuzte Hände bei p)	96
11.4.3	Ergebnisse (Variation der Handstellung bei paralleler Beinstellung)	96
11.4.4	Ergebnisse (Variation der Beinstellung)	99
11.5	Simulation der Entscheidungsverhalten	101
11.5.1	Methode	101
11.5.2	Ergebnisse	101
11.5.3	Approximation der RT	103
11.6	Dreidimensionale Repräsentation	105
11.6.1	Erweiterung zur dreidimensionalen Repräsentation	105
11.6.2	Ergebnisse	105
12	Erweiterung des MMC Modells	108
12.1	Repräsentation der Zwischenpunkten im MMC	108
12.2	Weitere Erweiterung des MMC-Netzes	111
12.2.1	PSOM	111
12.2.2	Training	112

12.2.3	Repräsentation der Winkelgrenzen	113
12.2.4	MMC und PSOM	114
13	Diskussion	116
14	Zusammenfassung	121

1 Einleitung

Für viele Probleme, die mit Hilfe moderner Technologie nicht oder nur mit großen Schwierigkeiten gelöst werden können, findet man in der Biologie einfache Lösungen, die gelegentlich sogar mit dem Attribut ‚intelligent‘ versehen werden. Insbesondere im Bereich der Informationsverarbeitung sind die im Lauf der langen Evolution an die Umwelt effektiv angepaßten biologischen Systeme den bisherigen technischen Lösungen in vielen Fällen weit überlegen. Das Ergebnis dieser Verarbeitung manifestiert sich im Verhalten des Organismus. Dieses steht deshalb zunächst im Zentrum des Interesses. Jedes Lebewesen ist dazu fähig, mit Hilfe seiner Sinnesorgane verschiedene Informationen über die Umwelt zu erfassen und sie integrierend zu verarbeiten. Wenn die Funktion der zugrunde liegenden neuronalen Struktur verstanden ist, können die dort gefundenen Prinzipien auch auf andere Bereiche wie etwa die Robotik angewendet werden.

In verschiedenen Bereichen konnten diese Erkenntnisse tatsächlich schon auf den Bau von Robotern übertragen werden. Die Entwicklung ist inzwischen soweit fortgeschritten, daß das Ziel, einen autonomen Roboter zu bauen, in Reichweite zu gelangen scheint. Ein technisches System heißt autonom, wenn es selbständig Entscheidungen treffen kann, die zur Ausführung der Aufgabe beitragen. Viele Wissenschaftler gehen davon aus, daß die Voraussetzung dafür, sich autonom entscheiden zu können, der Besitz eines internen Weltmodells ist. Selbst für die Kontrolle einfacher Verhaltensweise wie Laufen wurden interne Weltmodelle eingesetzt, was wegen der begrenzten Rechenzeit jedoch zur Folge hatte, daß wegen der „großen Bedenkzeit“ selbst eine einfache Bewegung nur sehr langsam durchgeführt werden kann (Krotkov et al., 1991; Krotkov et al., 1995). Andere Wissenschaftler gehen deshalb umgekehrt davon aus, daß autonome Systeme als rein sensorgetriebene Systeme gebaut werden können (Brooks, 1990; Steels, 1994). Damit ist gemeint, daß sie kein internes Weltmodell besitzen, mit dessen Hilfe sie „in Gedanken“ verschiedene Handlungsmöglichkeiten ausprobieren könnten, bevor sie sich für eine Handlung entscheiden. In der Tat konnte für viele Beispiele gezeigt werden, daß sensorgetriebene Systeme zu unerwartet komplexen Leistungen fähig sind (Maes et al., 1996). Dennoch kann man vermuten, daß die zusätzliche Verwendung von internen Weltmodellen etwa in schwierigen Situationen, d.h. in Situationen, in denen die sensorgetriebenen Systeme keine akzeptable Lösung finden, sehr wohl sinnvoll sein könnte. Allein schon der durch Selbstbeobachtung entstehende Eindruck, daß zumindest wir Menschen über ein solches inneres Weltbild verfügen, läßt

vermuten, daß diese Fähigkeit sich auf Grund eines evolutionären Vorteils entwickelt hat.

Wie könnte ein solches inneres Weltmodell aufgebaut sein? Da das interne Weltmodell ständig an die sich verändernde Umwelt angepaßt werden muß, sollte diesem Weltmodell eine Repräsentationsstruktur zugrunde liegen, die durch sensorische Informationen aus der Umwelt ständig aktualisiert wird. Dieses Weltmodell läßt sich zumindest formal in zwei Bereiche aufteilen, der Bereich, der den eigenen Körper betrifft, und der Bereich, der die außerhalb des Körpers liegenden Räume, also die Außenwelt, betrifft.

Hier interessiert in erster Linie der erste Bereich. Dieser Teil des Weltmodells soll im folgenden mit Körpermodell bezeichnet werden. In der Literatur findet man hierzu zwei Begriffe, nämlich *Körperschema* (*body scheme*) und *Körpergefühl* (*body image*), die nicht klar unterschieden werden bzw. von verschiedenen Autoren (Cumming, 1988; Gold et al., 1995; Joraschky, 1983; Lautenbacher et al., 1993) in verschiedener Weise verwendet werden. Ich will mich im folgenden an die z.B. von Metzinger (1993) verwendete Definition halten. Hiernach versteht man unter Körperschema das neuronale System, das die Grundlage des Körpermodells bildet. Melzack (1990, 1997) verwendet hierfür den Begriff „Neuromatrix“. Es sind also nicht nur die verschiedenen Körperteile physikalisch miteinander verbunden, sondern ihre Repräsentate könnten im Rahmen des Körperschemas auch auf neuronaler Ebene miteinander verknüpft sein. Das Körperschema, die Repräsentation des Körpers, ist ein System, in dem verschiedene Wahrnehmungsinformationen, die z.B. mit Hilfe des visuellen, des akustischen oder des Tastsinnes erhalten werden, zusammengefaßt werden. Der Sinn des Körperschemas könnte darin bestehen, daß es seinem Besitzer eine Anpassungsfähigkeit an die sich verändernde Umwelt inklusive des Körpers verleiht. Falls ein Körperteil, z.B. ein Arm, irgendwie in der Bewegung gehindert wird, könnte mit Hilfe des Körperschemas ein neues Verhalten gesucht werden, damit die fehlende Funktion des Körpers durch eine Funktionsveränderung z.B. des anderen Arms kompensiert werden kann. Man kann also vermuten, daß das Körperschema dazu beiträgt, daß sich alle Informationen, die die Geometrie des Körpers betreffen, in ein Konzept integrieren lassen, auf dessen Basis dann adäquate Verhaltensentscheidungen getroffen werden können.

Unter Körpergefühl versteht man das mentale Repräsentat, in dem sich das subjektive Erleben des Körpers ausdrückt. Ein wichtiger Teil der physischen Grundlage des Körpergefühls ist vermutlich im Körperschema zu suchen. Beide Begriffe sollten also eigentlich streng unterschieden werden. Man geht in der Praxis aber doch davon aus, daß der vom Körpergefühl vermittelte Eindruck eng an das Körperschema gekoppelt ist und verwendet beide Begriffe häufig synonym.

Nach Ansicht der Neuropsychologen ist das Körperschema ein dynamisches Modell des Körpers, dessen Repräsentation unbewußt stattfindet. Die Untersuchungen vieler neuropathologischer Patienten mit Gehirnschädigungen (Gold et al., 1995; Halligan et al., 1993a; Halligan and Marshall, 1995; Ramachandran, 1996) deuten darauf hin, daß das Selbstgefühl ein Phänomen ist, das durch das Körperschema im Gehirn produziert wird. Wer dieses Gefühl verliert, der verliert gleichzeitig die Kontrolle über den Körper (Bermudez et al., 1995; Cash and Pruzinsky, 1990).

Das gelegentlich auftretende Phänomen des Phantomgliedes ist ein deutlicher Hinweis auf die Existenz eines Körperschemas. Hierbei nehmen die Patienten den durch Amputation oder einen

Unfall verlorenen Körperteil wahr, obwohl er nicht mehr vorhanden ist und also auch keine sensorische Rückmeldungen mehr existieren (Alderson, 1994; Avenarius and Gerstenbrand, 1967; Bromage and Melzack, 1974; Spitzer et al., 1995). Eine Phantomempfindung kann auch durch visuelle Reize ausgelöst werden (Ramachandran et al., 1995; Ramachandran and Rogers-Ramachandran, 1996). In diesem Experiment wurden die Patienten, die einen Arm verloren haben, an einen Tisch gesetzt, auf dem ein Spiegel so angebracht war, daß der intakte Arm im Spiegel an der Stelle erschien, an der sich eigentlich der andere, nun aber amputierte Arm befinden sollte. Sobald nun der intakte Arm bewegt wurde, empfanden die Versuchspersonen (VP) deutlich den nicht vorhandenen Arm. Dieses Empfinden verschwand aber, falls die VPs die Augen geschlossen hielten. In anderen Experimenten konnte man eine Phantomempfindung beobachten, wenn nicht die Hand, sondern ein anderer Körperteil, z.B. das Gesicht gereizt wurde (Berlucchi and Aglioti, 1997; Halligan et al., 1993b). Dies wird so interpretiert, daß die somatosensorische Karte nach der Amputation im Lauf der Zeit reorganisiert wird, weil keine sensorische Rückmeldungen mehr einlaufen. Dies deutet, zusammen mit der Tatsache, daß Phantomempfindungen auch noch viele Jahre nach der Amputation auftreten, daraufhin, daß das Körperschema offenbar weitgehend unabhängig von somatosensorischen Einflüssen existieren kann.

Im Vergleich dazu zeigen Patienten mit Neglekt-Symptom eine Störungen im Körperschema. Sie können z.B. die linke Seite visuell oder taktil nicht wahrnehmen. Bei einem visuellen Neglekt wurde berichtet, daß das Symptom auf den peripersonalen Raum spezialisiert war (Halligan and Marshall, 1991a). Also scheint ein Baustein des Körperschemas beschädigt zu sein. Der Neglekt konnte in manchen Fällen jedoch durch eine aktive Bewegung des linken Arms kurzzeitig aufgehoben werden (Robertson and North, 1993).

Auch bei gesunden Menschen kann man Hinweise auf das Vorliegen eines Körperschemas finden (Reed and Farah, 1995). In diesen Experimenten wurden den VPs jeweils zwei Photos einer Person gezeigt und die VPs mußten entscheiden, ob sich die Körperstellung der Personen auf beiden Photos unterscheidet. Die Änderung betraf entweder die Arme oder die Beine. Die Photos zeigen die Person aus unterschiedlichen Perspektiven. In der Pause zwischen der Demonstration der beiden Photos mußte die VP Bewegungen mit entweder beiden Beinen oder beiden Armen durchführen. Die VPs machten weniger Fehler, wenn die Änderung im Bild die Extremität betraf, die von den VPs aktiv bewegt wurde.

Zwar existiert noch keine genaue Vorstellung, an welcher Stelle im ZNS das Körperschema bzw. die Grundlage für das Körpergefühl lokalisiert ist, doch können auf Grund von Läsionsexperimenten verschiedene Möglichkeiten ausgeschlossen werden. Abtrennung des Rückenmarks beeinträchtigt das Körpergefühl nicht. Dasselbe gilt für Läsion im Bereich des lange favorisierten somatosensorischen Cortex (Melzack, 1990). Obwohl eine Läsion des somatosensorischen Cortex das Phantomempfinden kurzzeit verschwinden läßt, kehrt es nach einiger Zeit wieder zurück.

Obwohl es keinen konkreten Vorschlag für die Lokalisierung dieses Systems gibt, existiert in Form eines künstlichen neuronalen Netzes doch ein Vorschlag für eine neuronale Realisierung eines einfachen Körpermodells. Dieses sogenannte MMC-Netz stellt ein holistisches System dar, das in der

Lage ist, z.B. einen mehrgelenkigen Manipulator zu repräsentieren (Steinkühler et al., 1995).

In der hier vorgestellten Arbeit soll versucht werden, mit einerseits experimentellen Methoden und andererseits der Verwendung eines auf dem MMC System aufbauenden Simulationsmodells Vorstellungen über das Körperschema des Menschen zu gewinnen. Die Experimente bestehen stets darin, daß die VP an verschiedenen Stellen des Körpers, die Beine, die Arme und Hände, taktil gereizt wird. Die VP reagiert auf diesen Reiz mit Bewegung der rechten oder der linken Hand. Diese Bewegung besteht entweder einfach im Loslassen eines zunächst gedrückten Schalters oder in der tatsächlichen Bewegung zur gereizten Körperstelle.

Im ersten Teil soll untersucht werden, ob und wie sich Änderungen der Körperposition auf das Körperschema auswirken. Hierbei wird davon ausgegangen, daß das Körperschema die Grundlage für die Kontrolle der Bewegung darstellt. Daher wird versucht, aus dem in verschiedenen Situationen zu beobachtenden Verhalten der VP auf Eigenschaften des Körperschemas zu schließen. In diesen Experimenten hat die VP die Aufgabe, verschiedene Stellen ihres Körpers, die taktil gereizt wurden, mit der rechten oder der linken Hand zu treffen. Hierbei soll untersucht werden, wie die Entscheidung über die hierbei verwendete Hand von der Variation der Körperstellung abhängt. In diesen Experimenten kann die VP also selbst entscheiden, welche von zwei möglichen Verhaltensweisen sie ausführen will. Außer den Entscheidungen als solche werden auch die Reaktionszeiten (RT) gemessen. Anschließend wird in verschiedenen Versuchsserien die Entscheidungsmöglichkeit der VP eingeschränkt. Auf diese Weise sollen Teilaspekte der dieser Zielbewegung zugrunde liegenden Mechanismen genauer untersucht werden. In diesen Experimenten werden ausschließlich RTs gemessen. In einfachsten Fall hat die VP keine Wahl, sondern soll stets mit einer bestimmten Hand reagieren. In anderen Experimenten ist durch den Reizort bestimmt, mit welcher Hand die VP zu reagieren hat.

Im zweiten Teil soll versucht werden, diese Resultate zu simulieren. Im einfachsten Fall wird ein ‚Stage‘-basiertes Modell aufgebaut, in dem die Informationsverarbeitung zwischen Wahrnehmung eines Reizes und Reaktion im wesentlichen seriell stattfindet. In einem anderen Modell wird versucht, die in experimentellen Untersuchungen gewonnenen Informationen, in einer Beschreibungsebene zu integrieren.

2 Theoretische Einführung

2.1 Reaktionszeit (RT)

Bevor Helmholtz (1850) zum ersten Mal beim Frosch die Geschwindigkeit der Nervenleitung maß, war man der Meinung, daß die Nerven die Information mit unmeßbar hoher Geschwindigkeit transportieren. Sein Befund löste eine große Zahl von Messungen aus, die auch am Menschen durchgeführt wurden. Hierbei äußerte Helmholtz bereits, daß sich die SRT (Simple Reaction Time; siehe unten Abschnitt 2.1.2) zwischen einem Reiz und der Reaktion als die Summe der Dauer an diesem Prozeß beteiligten Komponenten ergibt. Dies ist auch die Grundlage der CRT (Choice Reaction Time; siehe unten Abschnitt 2.1.2), die von Donders eingeführt wurde. Er ging davon aus, daß der CRT einzelne, voneinander trennbare *mentale* Prozesse zugrunde liegen und daß die Dauer der jeweiligen beteiligten Prozesse durch Vergleich mit der SRT berechnet werden kann (Donders, 1969). Dazu mußte man von der einfachen Reaktion von Helmholtz (SRT) ausgehen und sie schrittweise komplexer machen. Dieser Ansatz basiert nicht nur auf der Annahme, daß die Prozesse additiv sind, sondern auch darauf, daß durch das Hinzufügen neuer Prozesse die Dauer der anderen Prozesse nicht verändert wird (Sternberg, 1969). Beide Vermutungen werden auch als Additivitätsannahme (AFM: additive factor method) bezeichnet. Es wird dabei also angenommen, daß der der Reaktion zugrunde liegende Mechanismus in unabhängige, seriell angeordnete Operationen aufgeteilt werden kann (Stage Modell).

2.1.1 Stage Modell

Das Stage Modell kann weiter aufgeteilt werden. In einem Fall [discrete serial stage; (Sternberg, 1969)] geht man davon aus, daß ein zweiter Prozeß erst beginnt, nachdem der vorhergehende Prozeß abgeschlossen ist. Nach diesem Modell kann der Prozeß zwischen dem Reiz und der Reaktion im Prinzip an einem bestimmten Punkt unterbrochen werden, der den Zeitpunkt des Endes eines Prozesses und des Beginns des nächsten Prozesses markiert. Die RT wird als die Summe der Dauer der beiden Prozesse bestimmt. Gelegentlich wird zusätzlich angenommen, daß die Prozesse stochastisch unabhängig sind.

Im Unterschied zum ersten sogenannten ‚complete-output‘ Modell wird beim zweiten Modell

[partial output; (Coles et al., 1985; McClelland and Rumelhart, 1981; Miller, 1982; Miller, 1988)] angenommen, daß zwei Stages nicht separat, sondern teilweise überlappend konstruiert sein können. Dies heißt, daß die Verarbeitung in der zweiten Stufe, z.B. die Vorbereitung auf die Reaktion beginnen kann, bevor die Verarbeitung in der ersten Stufe abgeschlossen ist.

2.1.2 Stimulus-Response Set bei CRT

Im einfachsten Fall (SRT) kann man aber davon ausgehen, daß die Aufgabe in zwei Stufen aufzuteilen ist, nämlich in die Stufe für die Detektion des Reizes und die zweite für die Reaktion. Hierbei ist ein Reiz genau einer Reaktion zugeordnet (Goodrich et al., 1990).

Bei der CRT Aufgabe muß die VP eine aus mehreren möglichen Reaktionen auswählen. Hier geht man davon aus, daß die Aufgabe in die folgenden drei Stadien aufzuteilen ist (Frowein et al., 1981).

1. Wahrnehmung (stimulus encoding)
2. Antwortselektion (response selection)
3. Programmierung der Antwort (Motor adjustment)

Bei den CRT-Aufgaben ist bekannt, daß die RT umso größer ist, je größer die Zahl der Alternativen ist, aus denen die VP auswählen muß. Diese Korrelation zwischen der RT und der Zahl von Antwortsalternativen wird als das Hick-Hyman's Gesetz bezeichnet (Hick, 1952; Hyman, 1953; Merkel, 1885). Sollte beispielsweise die VP für die Ziffer ,1' die Taste ,1' und für die Ziffer ,2' die Taste ,2' usw. drücken, dann ist die RT kürzer, wenn die Aufgabe wenige solche Stimulus-Reaktionspaarungen enthält (z.B. kürzere RT bei 2 Paaren als bei 4 Paaren).

Dieser Befund kann sowohl mit Hilfe eines seriellen als auch eines parallelen Modells erklärt werden. Die serielle Interpretation (Hick, 1952) geht davon aus, daß bei der CRT-Aufgabe die RT durch die Größe eines binären Entscheidungsbaumes bestimmt wird. Dabei wird angenommen, daß jede Teil-Entscheidung eine konstante Dauer benötigt. Je größer also die Zahl der auszuwählenden Alternativen ist, desto größer wird wegen der längeren gesamten Suchzeit die RT.

In dem parallelen Modell wird die Entscheidung über die Reaktion als Konflikt zwischen mehreren Reaktionsvarianten (response codes) ausgetragen. Die langsame RT bei großen S-R Paaren (Stimulus-Reaktion Paaren) wird damit erklärt, daß der Wettbewerb zwischen vielen möglichen Alternativen länger dauert (Berlyne, 1957).

Beide Modelle stimmen insofern überein, als eine interne Repräsentation aller Alternativen angenommen wird. Sie unterscheiden sich jedoch darin, daß das serielle Modell eine statische Situation annimmt, in der jeder Teilprozeß eine konstante Dauer besitzt und alle Teilprozesse regel-basiert durchsucht werden müssen, um eine passende Antwort zu finden. Das parallele Modell beschreibt dagegen einen dynamischen Prozeß, in dem die Reaktions-Codes simultan aktiviert werden und miteinander konkurrieren, bis eines den Wettbewerb gewinnt (siehe Abb. 2.1).

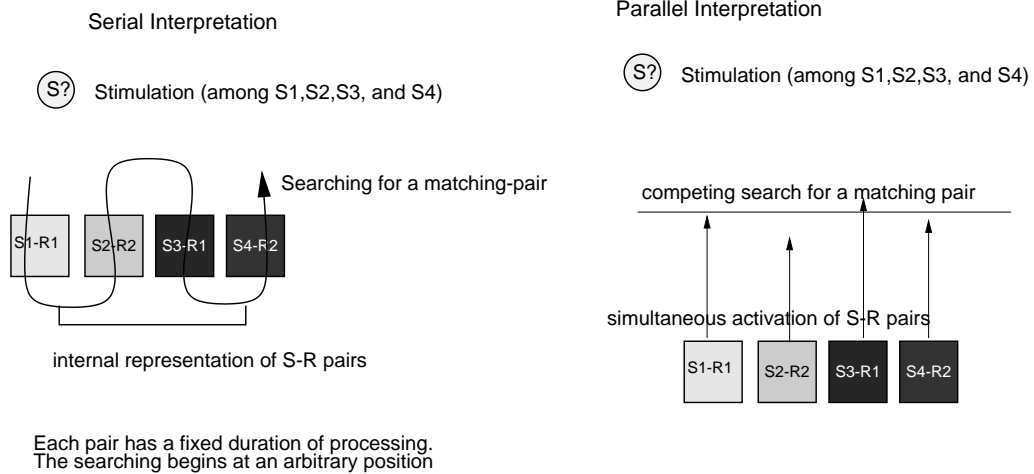
CRT (Choice Reaction Time) Modell

Abbildung 2.1: CRT Modell

2.2 S-R Kompatibilität (correspondence effect)

Beide, das parallele und das serielle Modell basieren auf einer internen Repräsentation. Dabei wird nicht weiter berücksichtigt, daß die Stimuli und die Reaktionen einen räumlichen Charakter haben können. Es gibt jedoch Hinweise darauf, daß die räumlichen Eigenschaften eines Reizes eine wichtige Rolle spielen können, auch wenn diese nicht für Aufgabe direkt relevant sind (Simon and Rudell, 1967; Simon, 1990). Soll zum Beispiel die VP nach einem verbalen Kommando eine von zwei Tasten, eine linke oder eine rechte Taste, drücken, dann sollte nicht wichtig sein, an welchem Ohr das Kommando gegeben wird, weil die Aufgabe nur darin besteht, die verbal benannte Taste zu drücken. Die Reaktion ist jedoch schneller, wenn der Inhalt des Kommandos (links oder rechts) und die Seite des Ohres, an dem das Kommando gegeben wird, übereinstimmen. Dieses Phänomen wird als Simon-Effekt bezeichnet. Simon nahm an, daß dieser Effekt auf der räumlichen Korrespondenz zwischen Reiz (S) und Reaktion (R) beruht. Der Simon-Effekt tritt auch auf, wenn zusätzlich ein für die Aufgabe nicht relevantes Signal gegeben wird [Accessory Effect (Heister et al., 1987)]. Soll in einem anderen Experiment die VP auf einen visuell in der Mitte eines Bildschirms angebotenen Reiz, z.B. das Wort „left“ oder „right“ mit der entsprechenden Taste antworten, wobei ein akustisches Signal zufällig am linken oder rechten Ohr gegeben wird, dann ruft die räumliche Lage dieses akustischen Signals auch hier einen Korrespondenzeffekt hervor (Simon et al., 1970).

Die räumliche Lage des Reizes zeigt einen noch stärkeren Effekt, wenn der Reiz für die Aufgabe relevant ist. Soll beispielsweise die VP mit der Taste antworten, die entweder auf derselben Seite wie der visuelle Reiz liegt oder, in einem anderen Experiment, auf der dem Reiz gegenüberliegenden Seite, dann ist die RT kürzer, wenn sich die Taste auf derselben Seite befindet (Annett and Sheridan, 1973; Brebner et al., 1972; Dutta and Proctor, 1992; Fitts and Seeger, 1953; Hawkins and Underhill, 1971). Diese Interaktion zwischen dem Reiz und der Reaktion wird allgemein mit S-R Kompatibi-

lität oder S-R Korrespondenz beschrieben. Auch im Simon bzw. Accessory Effekt drückt sich das Phänomen der S-R Kompatibilität aus.

2.2.1 Modell für S-R Kompatibilität

Um diesen räumlichen Einfluß auf die RT zu erklären, hat Simon das sogenannte ‚Buffer Model‘ aufgestellt (Hasbroucq and Guiard, 1991; Simon, 1990). Das Modell beschreibt, daß bei einer Aufgabe für jede mögliche Reaktion ein ‚response buffer‘ eingerichtet wird, der eine Liste der jeweiligen S-R Paare enthält. In einer Selektionsaufgabe wird diese Liste ohne eine feste Regel in zufälliger Reihenfolge abgearbeitet. Diese Annahme unterscheidet sich nicht von dem oben erwähnten seriellen Modell für die CRT, außer daß hier auch die räumliche Lage eines Reizes im Buffer kodiert wird. Falls aber ein irrelevantes räumliches Hinweissignal bzw. Merkmal vorhanden ist, z.B. ein akustisches Signal oder der Ort (links oder rechts) des Reizes, wie dies beim Simon Effekt der Fall ist, wird die Suche mit einem Buffer begonnen, der in Bezug auf dieses Merkmal ähnlich ist. Bei dieser Suchstrategie müßte die Standardabweichung der RT größer sein, wenn kein Hinweissignal gegeben wird.

Um dieses Buffer Modell experimentell zu bestätigen, hat Mewaldt (1980) versucht, die Größe des hypothetischen Buffers zu variieren, indem man für die beiden Hände unterschiedliche Zahlen an möglichen Reizen vorgibt. Sollte beispielsweise die VP für das in der Mitte des Bildschirms gezeigte Symbol ‚*‘ bzw. ‚+‘ die linke und für vier weiteren Symbole die rechte Taste drücken, wobei ein akustisches Signal an dem jeweiligen nicht-kompatiblen Ohr gegeben wurde (am rechten Ohr, falls die linke Taste gedrückt werden sollte und am linken Ohr, falls die rechte Taste gedrückt werden sollte), war die RT mit der linken Taste höher als mit der rechten Taste. Dies wurde so interpretiert, daß das akustische Signal den „falschen“ Buffer zuerst aktiviert und daß somit die Suchzeit beim rechten Signal länger als beim linken Signal ist, da die Größe des Buffers in beiden Fällen unterschiedlich ist. Allerdings wird der Buffer hier als statisch angenommen.

Der Simon-Effekt könnte aber auch mit Hilfe eines dynamischen Modells interpretiert werden. Dafür ist eine kleine Änderung des in Abb. 2.1 dargestellten CRT Modells nötig (siehe Abb. 2.2). Wird ein für die Aufgabe nicht relevantes Signal gegeben, dann werden alle diejenigen S-R Paare automatisch aktiviert, die mindestens ein Merkmal mit diesem Signal gemeinsam haben. Dieses führt zu einem Vorteil bei der Konkurrenz. Hommel beschreibt jedoch, daß diese automatische Aktivierung beim Simon-Effekt im Unterschied zur eigentlichen S-R Kompatibilität mit der Zeit abnehmen kann (Hommel, 1996a).

Um eine im Vergleich zur RT Messung bessere zeitliche Auflösung zu erhalten, können ERP (Event Related Potential) und LRP (Lateralised Readiness Potential) eingesetzt werden (Goodin and Aminoff, 1984; Ragot and Fiori, 1994; Renault et al., 1988; Valle-Inclan, 1996). Die Komponente P300 des ERPs, die mit einer Latenz von etwa 300-600 ms auftritt, variiert abhängig von der Reizqualität. Hingegen zeigt die LRP eine Korrelation mit der Planung einer willkürlichen Bewegung (Reaktion). Durch diese beiden Potentiale kann man also die zeitliche Verhältnisse zwischen dem Auftreten des Reizes und der Reaktion untersuchen. In derartigen psychophysiologischen Untersuchung ist vor kurzem experimentell gezeigt worden (Heil et al., 1998), daß bei einer Aufgabe, bei der eine men-

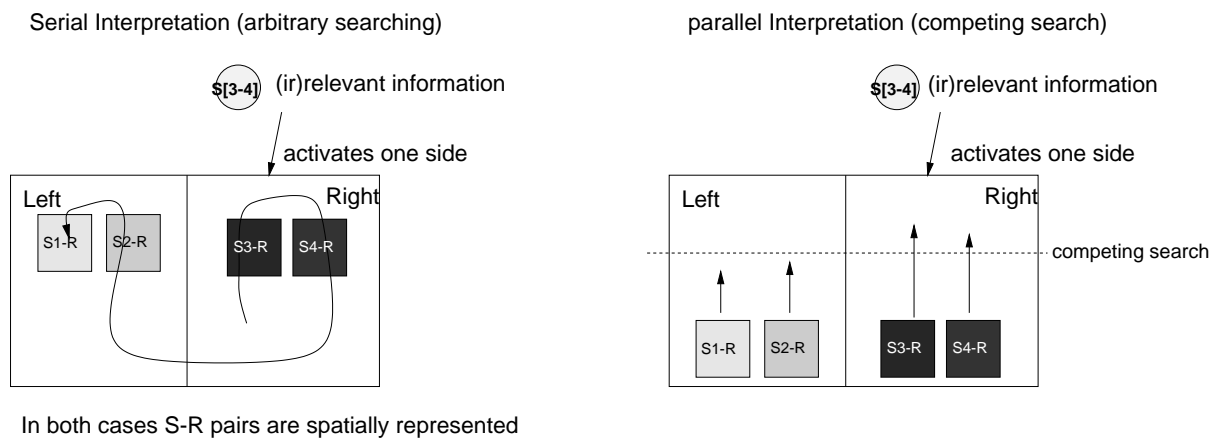
S-R compatibility (Simon Effect incl. accessory Effect)

Abbildung 2.2: S-R Kompatibilität

tale Rotation durchgeführt werden mußte, die Reaktion schon vorbereitet wird, bevor die mentale Rotation, also Reiz-Identifikation abgeschlossen war. Dies unterstützt das Stage Modell mit kontinuierlichem Informationsfluß zwischen Stages [partial output].

2.2.2 Raumabhängiger Effekt in der SRT und der CRT

Raumabhängige Effekte sind nicht nur bei CRT Aufgaben zu finden, sondern auch bei SRT Aufgaben. Wie schon erwähnt, ist bei der SRT Aufgabe die Antwort vorher bestimmt, während in der CRT-Aufgabe die Antwort vom Reiz abhängt. In Poffenbergers (1912) Paradigma, so seine Interpretation, ist eine SRT auf einem linkshändigen Stimulus schneller mit der linken als mit der rechten Hand und umgekehrt, weil in diesem Fall die Information nur innerhalb einer Hemisphäre verarbeitet werden muß. Diese Argumentation beruht also auf der anatomischen Nähe. Diese Hypothese scheint richtig zu sein, weil ein Überkreuzen der Hände keinen Einfluß auf die SRT ergibt (Anzola et al., 1977; Berlucchi et al., 1977; Rizzolatti et al., 1970).

Im Unterschied dazu liefert das Überkreuzen der Hände bei der CRT Aufgabe ein interessantes Ergebnis. In Experimenten von Proctor (1993) und Wallace (1971) zeigte sich, daß die Reaktion für einen visuellen Reiz schneller mit der Hand ist, die auf derselben Seite zum Reiz liegt, unabhängig davon, welche Hand verwendet wird. Also scheint hier nicht morphologische Nähe, sondern räumliche Lage der Hand eine wichtige Rolle zu spielen. Dieser Befund läßt daher vermuten, daß die SRT nicht unbedingt von der morphologischen Lage abhängt, wenn man annimmt, daß die CRT und SRT eine gemeinsame Ursache hat. Die Unabhängigkeit der SRT von der Lage im Raum könnte dann damit erklärt werden, daß bei der SRT-Bedingung die Verarbeitung schneller als die Zeit zur Generierung der beiden S-R Paare sein könnte, und daß somit keine S-R Kompatibilität auftreten könnte (Hommel, 1996b).

S-R Kompatibilität wird generell auf Prozesse zur Generierung von räumlichen S-R Paaren zurückgeführt (Dornier and Gilmour Reeve, 1996; Proctor and Reeve, 1990; Salinas and Abbott, 1995). Dieser Prozeß wird häufig kognitiv genannt, weil in solchen Experimenten je nach der Art, wie sich die VP den Raum vorstellt, ein unterschiedlicher Effekt gefunden werden kann.

Ein solcher Effekt wurde in dem Experiment von Baechtold (1997) untersucht. In diesem Experiment bekam die VP zwei verschiedene Aufgaben. In der ersten Aufgabe sollten sie sich ein Lineal vorstellen, das von 1 bis 11 skaliert ist. In der zweiten Aufgabe sollten sie sich eine Uhr vorstellen. In den beiden Bedingungen bestand die Aufgabe darin, bei einer jeweils auf der Mitte des Bildschirms erscheinenden Zahl zu entscheiden, ob die Zahl mental auf der linken oder rechten Seite liegt. Dies mußte dadurch angegeben werden, daß für die Reaktion jeweils entweder die linke oder die rechte Hand verwendet wurde. Die laterale Position (links oder rechts) von Zahlen z.B. zwischen 1 und 5 ist bei einer Uhr rechts, bei einem Lineal jedoch links. Wenn die Vorstellung einen Einfluß auf S-R Kompatibilität haben sollte, dann sollte sich in den beiden Fällen ein umgekehrtes Verhältnis zwischen der RT der linken und der rechten Hand ergeben. Bei der Lineal-Vorstellung wurden die Zahlen 1-5 mit der linken Hand und die Zahlen 7-11 mit der rechten Hand schneller beantwortet. Hingegen ergab die Uhr-Vorstellung, daß die Zahlen 7-11 mit der linken und die Zahlen 1-5 mit der rechten Hand schneller beantwortet wurden. Bei beiden Bedingungen stimmen die RTs also mit der Annahme der S-R Kompatibilität überein.

2.3 Räumliche Wahrnehmung

Im folgenden sollen zuerst neuropathologische Studien erwähnt werden, bei denen eine Störung der räumlichen Wahrnehmung auftritt. Im zweiten Teil wird der Begriff ‚Aufmerksamkeit‘ erklärt.

2.3.1 Neglekt

Mit dem Begriff Neglekt wird bei hirngeschädigten Patienten eine Verhaltensstörung bezeichnet, die vor allem durch das Nicht-Beachten von Reizen auf der kontraläsionalen Seite charakterisiert ist. Die Symptomatik wird zur Zeit als eine supramodale Störung verstanden, d.h. als eine Störung, deren Auswirkung sich im visuellen, taktilen, auditiven und motorischen Bereich manifestiert (Styles, 1997). Am besten bekannt ist ein visueller Neglekt, bei dem Patienten häufig mit Gegenständen auf der unbeachteten Seite kollidieren. Typische Verhaltensstörungen sind das Stoßen gegen Türrahmen mit der kontraläsionalen Schulter, halbseitiges Rasieren beim Blick in den Spiegel oder Nichtberührung des Halbseite des Tellers beim Essen. Patienten mit Neglekt zeigen ein verschobenes Gewicht bei visuellen oder taktilen Explorationen (Ladavas et al., 1994; Pellat et al., 1986).

Neglekt wird nach der Läsion des rechten inferior-parietalen Lappens hervorgerufen (Posner et al., 1984). Weil die Symptomatik im Verlauf der Krankheit gemildert wird, sind meisten berichtete Fälle im Schweregrad sehr unterschiedlich. Nach Karnath kann Neglekt in zwei Typen eingeteilt werden. Der eine ist ein raum-bezogener Neglekt, wobei die Patienten die linke Seite der Umwelt

ignorieren, und der andere ist ein objekt-bezogener Neglekt, dessen Symptomatik die Vernachlässigung der linken Seite des Objektes darstellt. Die linke bzw. rechte Seite scheint hier bei einigen Fällen auf Grund der Hauptachse des Objektes bestimmt zu werden (Driver and Spence, 1994). Es ist noch umstritten, ob diese Einteilung zwei unterschiedliche Ausprägung derselben Krankheit darstellt, oder ob sie auf verschiedene kognitive Prozesse zurückzuführen sind.

In der Literatur findet man drei verschiedene Modelle zu Neglektphänomen. Das erste ist die sogenannte Aufmerksamkeitshypothese (Kinsbourne, 1970). Hier wird angenommen, daß die Fokussierung der Aufmerksamkeit auf die rechte Seite gerichtet ist, oder daß der Mechanismus defekt ist, mit dessen Hilfe die Aufmerksamkeit verlagert werden kann. Diese Überlegung beruht auf der Untersuchung von Blickbewegungen bei Neglekt Patienten.

Die zweite Hypothese geht davon aus, daß die Krankheit auf eine Störung des Repräsentationssystems zurückzuführen ist (Rizzolatti and Berti, 1990). Dabei könnte dies eine Störung der mentalen Repräsentation sein. Dieses Modell könnte erklären, warum es Patienten gibt, bei denen sich der Neglekt auch auf Vorstellungen bezieht. Diese Repräsentationshypothese nimmt an, daß bei Patienten die horizontale Achse in eine, nämlich die rechte Richtung uniform komprimiert oder anisometrisch repräsentiert ist (Bisiach et al., 1996; Halligan and Marshall, 1991b). Sie kann deshalb nicht erklären, warum einige Patienten das Symptom nur im körpernahen bzw. -fernen Raum zeigen.

Hingegen beschreibt die Transformationshypothese das Neglektphänomen als Transformationsstörung (Karnath, 1998). Nach dieser Hypothese wird die wahrgenommene Information nicht in ein egozentrisches Koordinatensystem transformiert. Dieses Modell ließe den nur am körpernahen Raum auftretenden Neglekt erklären. Halligan und Marshall (1991) beschreiben einen Patienten, bei dem der Neglekt nur im körpernahen, also peripersonalen Raum, aber nicht im körperfernen, extrapersonalen Raum auftritt. Häufig werden auch die umgekehrten Fälle berichtet. Dies weist darauf hin, daß der Neglekt mit einem egozentrisch repräsentierten System zusammenhängen könnte. Anhand der Symptomatik beim Neglekt kann man also vermuten, daß der Raum mindestens in Bereichen wie links-rechts und fern-nah aufgeteilt verarbeitet wird.

Der Neglekt ist auch bei taktiler Wahrnehmung zu beobachten (Beschlin et al., 1996). Bei Patienten mit taktilem Neglekt wird ein taktiler Stimulus auf der linken Körperoberfläche ignoriert. Das Ignorieren der Information tritt auch beim taktilen Abtasten der Umgebung auf. Hierbei betrifft der Neglekt aber nicht die morphologische, sondern räumliche linke Seite. Auch wenn die linke Seite eines Tisches mit der rechten Hand abgetastet wird, wird diese Information häufig ignoriert. Dies setzt eine weitere Informationsverarbeitung voraus, da die linke Seite im Raum durch taktile und propriozeptive Informationen aus der rechten Körperseite berechnet werden muß.

2.3.2 Aufmerksamkeit (Attention)

Im folgenden sollen zwei unterschiedlichen Prozesse der Kontrolle von Aufmerksamkeit beschrieben werden. Stellen wir uns vor, wir gehen in einem Wald spazieren und plötzlich springt ein Reh aus dem Gebüsch. Auch wenn wir in Gedanken sind, zieht dieses Ereignis unsere ‚Aufmerksamkeit‘ an. Diesen Fall nennt man einen ‚bottom-up‘ Prozeß, da er vom Reiz ausgelöst wird. Diese Aktion kostet

uns keine Mühe und findet automatisch statt.

Falls aber das Reh ruhig hinter dem Gebüsch steht, müssen wir uns zuerst auf diesen Bereich konzentrieren, um endlich das Reh zu erkennen. Dies nennt man ‚top-down‘ Aufmerksamkeit. Dabei brauchen wir eine Intention bzw. Konzentration, um unsere Aufmerksamkeit auf eine Position zu lenken. Diese erhöhte Konzentration trägt dazu bei, daß auch schwierig zu erkennende Objekte wie etwa ein still stehendes Reh registriert werden. In der Literatur werden die beiden Prozesse mit den Begriffen exogen und endogen bezeichnet. Exogene Aufmerksamkeit bedeutet, daß der Prozeß automatisch von dem Objekt induziert wird, während endogene Aufmerksamkeit unsere Fähigkeit beschreibt, mit eigenem Willen beliebig die Umweltinformation zu selektieren.

Im folgenden wird kurz ein experimentelles Beispiel (Posner, 1980) für die beiden, nämlich exogene und endogene Aufmerksamkeiten beschrieben. Um diese zu untersuchen, hat Posner eine Cueing-Methode verwendet. Das Cueing Signal sollte die Information liefern, auf welcher Seite (links oder rechts) ein optischer Reiz auftritt. Mit Hilfe dieses Cueing Signals konnte die VP also ihre Aufmerksamkeit vor dem Auftreten des eigentlichen Reizes auf die entsprechende Stelle richten. Das Cueing erfolgte aber auf zwei unterschiedliche Weisen. Bei zentralem Cueing wurde die Information mit Hilfe von Symbolen gegeben, indem in der Mitte des Bildschirms ein nach rechts oder links zeigender Pfeil oder ein Kreuz (keine Richtungsinformation) erschien. Bei peripherem Cueing wurde die Information direkt gegeben, indem das Cueing Signal auf der Seite erschien, auf der der Reiz zu erwarten war.

In jedem einzelnen Experiment gab das Cueing Signal mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit entweder den richtigen oder den falschen Hinweis. Wie zu erwarten, verbesserte der richtige Cue die Performanz bei beiden Cueing-Methoden im Vergleich zu dem neutralen Cue (Kreuz). Falls der Hinweis häufiger eine falsche Information angab, verschwand der Cue-Effekt (schnelle Reaktion) beim zentralen Cue, aber interessanterweise nicht beim peripheren Cue. Dies bedeutet, daß die VP den peripheren Cue aus irgendeinem Grund nicht ignorieren konnte. Dieser Effekt wird als Inhibition of Return (IOR) bezeichnet (Pashler, 1997). Der periphere Cue bezieht sich auf die exogene Aufmerksamkeit und der zentrale Cue auf die endogene Aufmerksamkeit.

Die funktionelle Bedeutung der Aufmerksamkeit wird in der Psychologie darin gesehen, daß mit ihrer Hilfe das folgende Kapazität-Problem gelöst werden kann (Metapher des ‚bottle-neck‘). Wir sind ständig mit einer Unmenge von Informationen konfrontiert, wobei das Problem zu lösen ist, wichtige von unwichtigen Informationen zu unterscheiden. Wäre dies nicht möglich, wäre unser Gehirn mit unwichtigen Informationen überlastet. Vor kurzem gelang es, beim Affen Neuronen im präfrontalen Lappen zu finden, die nur von einer Aufgabe-relevanten Information aktiviert werden (Rainer et al., 1998). In diesem Experiment sollten die Affen eine Matching-Aufgabe durchführen. Hierbei erschienen 3 verschiedene Objekte zufällig verteilt in 3 definierten Positionen des Bildschirms (links, rechts und unten). Die Aufgabe bestand darin, die Position des markierten Objektes (Target) im ersten Bild zu merken und beim Zeigen des zweiten Bildes durch einen Schalter zu antworten, wenn in der markierten Position dasselbe Objekt zu finden ist. Die elektrophysiologischen Messungen ergaben, daß die Aktivierung abhängig von der Position des Targets ist, aber nicht

von der Position der anderen zwei irrelevanten Objekte beeinflusst wird.

Selektive Aufmerksamkeit kann man auch bei anderen Sinnesmodalitäten beobachten. Ein bekanntes Beispiel für die endogene Aufmerksamkeit im auditiven Bereich stellt der ‚Cocktail-party‘ Effekt dar. In einer Situation, in der viele Menschen gleichzeitig sprechen, z.B. einer Party, können wir gezielt eine bestimmte Stimme hervorheben. Die selektive Aufmerksamkeit findet man auch im visuellen Bereich. Wenn wir zwei übereinander gemalte Bilder betrachten, können wir beide Bilder mental voneinander trennen. Diese Fähigkeit ist allerdings manchmal durch die exogene Aufmerksamkeit gestört.

Experimente zur taktilen Aufmerksamkeit sind in der Literatur selten beschrieben. Lakatos und Shepard (1997) führten kürzlich ein Experiment durch, das dieses Problem behandelt. Die VP wurde gereizt, indem gleichzeitig vier zufällig selektierte Stellen von insgesamt 8 möglichen Körperstellen (4 an den Armen und 4 an den Beinen) mit einem Luftstrom stimuliert werden. Dabei saß die VP in paralleler Beinstellung auf einem Stuhl und hielt die Arme parallel nach vorne gestreckt. Zuvor wurde der VP verbal eine bestimmte Stelle genannt, die gereizt werden sollte. Auf diese Weise wurde also die Aufmerksamkeit der VP auf diese Stelle gerichtet. Nun sollte die VP mit einem Fuß-Pedal mitteilen, ob die genannte Stelle gereizt wurde. Es ergab sich, daß die gemessene RT mit der euklidischen Distanz zwischen dem verbal bezeichneten Ort und dem tatsächlichen Reizort korreliert sind. Dieses Ergebnis weist also darauf hin, daß die Aufmerksamkeit auf einen taktilen Reiz nicht morphologisch, sondern räumlich gesteuert wird. Dies weist darauf hin, daß die taktile Information mit der Propriozeption zur Rauminformation verarbeitet sein muß.

Die Integration der beiden Informationen wäre besonders schwierig, wenn sich z.B. ein Arm in Bewegung findet, da die propriozeptive Information ständig aktualisiert werden muß. Eine Arbeit von Dassonville (1995) befaßt sich mit einer solchen Situation. In seinem Experiment sollte sich die VP einen während der Armbewegung applizierten taktilen Reiz am Finger merken und nachher mitteilen, wo im Raum der Finger gereizt wurde. Dazu mußte die VP mit demselben Arm auf diese Position zeigen. Es stellte sich heraus, daß hierbei ein konstanter Fehler auftritt. Die gezeigte Position entsprach der Position, an der der Arm 90 ms nach Reizung gewesen war. Dies weist also ebenfalls auf die Integration der beiden Informationen hin.

3 Material und Methode

In den Experimenten werden die Versuchspersonen mit verschiedenen taktilen Stimuli gereizt. Die Reaktion wird entweder manuell über verschiedene Schalter oder verbal über ein Mikrophon aufgenommen. Zur Erzeugung der Stimuli und für die Registrierung der Reaktion und die Messung der Reaktionszeiten (RT) wurden eine computergesteuerte Apparatur und ein Steuerprogramm entwickelt.

3.1 Reizgebung und Körperstellungen

In den Experimenten werden verschiedene Körperstellen taktil gereizt. In den meisten Experimenten werden Reize an bis zu 8 verschiedenen Stellen der Beine gegeben (siehe Abb. 3.1). In anderen Fällen werden die zwei Spitzen des Zeigefingers gereizt.

Zur Reizung werden elektromagnetische Relais (Modell 211SA D006-M der Firma Fujitsu) verwendet. Das Relais hat die Dimension $0.9 \times 1.3 \times 0.8$ [cm³]. Die Reizung erfolgt dadurch, daß eine Metallplatte der Größe von 0.7×1 [cm²] um etwa 1 mm hin und her bewegt wird (Vorversuche, bei denen statt der Platte nur ein schmaler Stift senkrecht zur Hautoberfläche bewegt wurde, waren weniger erfolgreich). Das Relais wird mit Hilfe eines Klettverschlusses an der entsprechenden Stelle gehalten. In den Experimenten, in denen die Fingerspitzen gereizt werden, ist das Relais nicht am Finger, sondern auf einem Tisch fixiert. Der Finger berührt das Relais von oben.

Die Reizorte an den Beinen werden durch 3 Buchstaben gekennzeichnet (siehe Abb. 3.1). Der erste Buchstabe bezieht sich auf das Bein (l für linkes, r für rechtes Bein). Der zweite Buchstabe bezeichnet den Reizort am Ober- (O) oder Unterschenkel (U). Der dritte Buchstabe gibt an, ob der Reiz auf der Innenseite (i) oder der Außenseite (a) des Beines gegeben wird. Die Reizorte liegen etwa in der Mitte zwischen Hüfte und Knie (Oberschenkel) bzw. Knie und Fuß (Unterschenkel).

Da die Relais beim Schalten ein zwar schwaches, aber doch hörbares Geräusch erzeugen, ist es nicht völlig auszuschließen, daß die VP die Richtung des Geräusches wahrnimmt. Um diese Fehlerquelle auszuschalten, wird mit Ausnahme des Experimentes in Kap. 4 das vom Relais erzeugte Geräusch dadurch maskiert, daß der VP gleichzeitig mit dem taktilen Reiz über einen Kopfhörer auf beide Ohren ein vorher gespeichertes akustisches Maskierungssignal von 100 ms Dauer gegeben

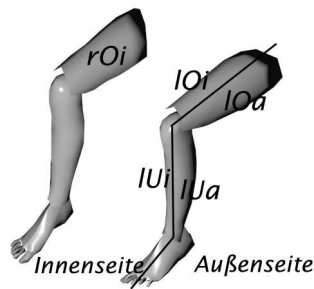


Abbildung 3.1: Reizorte

Jedes Bein enthält 4 Reizorte. Die Reizorte sind auf dem Ober- und Unterschenkel verteilt. Die Abkürzung ist so definiert, daß der erste Buchstabe links (l) oder rechts (r), der zweite den Ober- (O) oder Unterschenkel (U) und der letzte die Innen- (i) oder Außenseite (a) bezeichnet.

wird, das gerade so laut ist, daß das vom Relais erzeugte Geräusch nicht mehr gehört werden kann. Diese Maßnahme ist möglicherweise überflüssig, da sich in Kontrollversuchen gezeigt hat, daß das Geräusch der VP keine Orientierung ermöglicht. Dennoch wird bei den Reizungen (Kap. 5,6 und 9) die Maskierung stets eingesetzt, weil das Geräusch hier nicht vom Klettverschluß abgeschwächt wird, da hier die Relais offen auf dem Tisch liegen.

Die Experimente werden bei verschiedenen Arm- und Beinstellungen durchgeführt. Die verwendeten Beinstellungen sind in Abb. 3.2 dargestellt. Sie werden wie folgt bezeichnet.

p Die Beine werden parallel gestellt (Abb. 3.2 a).

xl,xr Die Beine werden übereinander geschlagen, wobei sich das rechte (r) oder linke (l) Bein über dem jeweils anderen befindet (Abb. 3.2 b).

kl,kr Der rechte (r) oder linke (l) Fuß wird auf das Knie des anderen Beines gelegt (Abb. 3.2 c).

Die Hände können in den folgenden Stellungen angeordnet sein.

hp Die beiden Hände befinden sich auf dem jeweils morphologisch ipsilateralen Oberschenkel, d.h. die rechte Hand auf dem rechten und die linke Hand auf dem linken Oberschenkel.

hr,hl Die beiden Hände befinden sich auf dem rechten (hr) oder linken (hl) Oberschenkel. Der Abstand zwischen den beiden Händen beträgt etwa 5 cm.

hx Die Hände werden so überkreuz gehalten, daß sich die Unterarme etwa in ihrer Mitte überkreuzen.

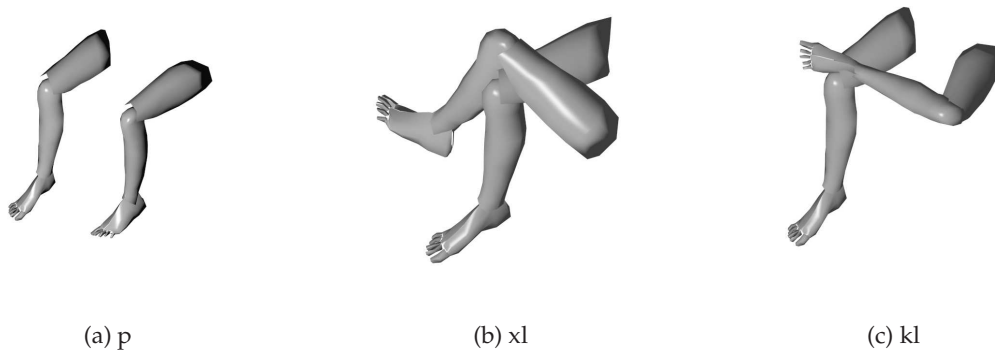


Abbildung 3.2: Beinstellungen

Hier sind nur 3 von insgesamt 5 Beinstellungen dargestellt. Das l oder r zeigt, welches Bein auf dem anderen Bein liegt. p bezeichnet parallele (a), x übergeschlagene Beine (b) und k eine Stellung, wobei ein Fuß auf dem Knie des anderen Beins liegt (c).

3.2 Registrierung der Reaktion

Abgesehen von einem Experiment (Kap. 9), bei dem eine verbale Antwort registriert wird, werden die Reaktionen in allen Experimenten durch Loslassen einer Taste gegeben. Dabei wird in jeder Hand ein stabförmiger Zylinder (Durchmesser 0.8 cm, Länge 9 cm) so gehalten, daß er von den zu einer Faust geschlossenen Fingern umfaßt wird. Um zu vermeiden, daß der Stift in der Hand rutscht, ist er mit einer Stoffschicht ummantelt. Am oberen Ende des Zylinders befindet sich ein Knopf-Schalter, der mit dem Daumen betätigt werden kann. Die beiden Hände werden je nach dem Experiment senkrecht auf den Oberschenkel oder liegend auf den Tisch gestellt. Der Schalter soll vor den Reizen immer gedrückt gehalten werden. Solange der Schalter nicht gedrückt wird, erfolgt kein neuer Reiz. Auf diese Weise kann die VP eine Pause einlegen, falls sie dies wünscht. Nach dem Reiz soll die VP so schnell wie möglich einen durch die jeweilige Aufgabe bestimmten Schalter loslassen. Mit Hilfe der in Kap. 3.3 beschriebenen Apparatur kann dann registriert werden, welche Hand reagiert und wie groß die Reaktionszeit ist.

Bei der verbalen Methode (Kap. 9) hält die VP keinen Schalter in der Hand, sondern antwortet so schnell wie möglich mit dem Wort ‚Ja‘. Die Antwort wird über ein Mikrofon, das am Kopfhörer befestigt ist, im Rechner aufgenommen. Die Aufnahmezeit ist 1 s, beginnend mit dem Zeitpunkt, zu dem das Reizsignal gegeben wird. Die verbale Antwort wird mit 8000 Hz (8 bit) aufgenommen. Die aufgenommenen Daten werden ausgewertet, indem die maximale Amplitude als Zeitpunkt für die Messung der RT verwendet wird (siehe Abb. 3.3), da sich in Vorversuchen ergeben hat, daß dieser Parameter besser reproduzierbare Werte ergibt als die Bestimmung des ersten Anstiegs des Signals.

In allen Experimenten soll die VP die Augen geschlossen halten, damit sie keine visuelle Information zur Aufgabe nutzen kann. Rumpf- und Kopfbewegungen sind verboten, um einen möglichen Einfluß propriozeptiver Signale auszuschließen. Vor jedem Experiment wird zunächst ein Test-Experiment durchgeführt, wobei nur eine begrenzte Zahl von Reizen (etwa 10 - 20) gegeben wird.

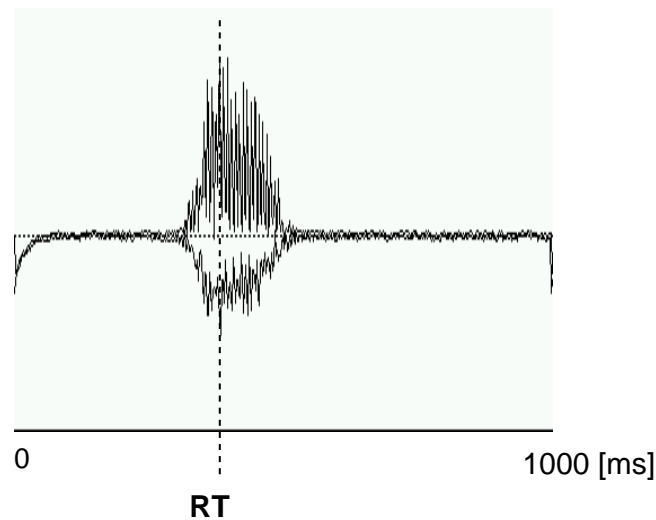


Abbildung 3.3: Aufnahme der verbalen Antwort

Die Abbildung stellt eine aufgenommene ‚Ja‘ Antwort dar. Die RT wird an der maximalen Amplitude (gestrichelte Linie) bestimmt.

Dadurch wird sicher gestellt, daß die VP die gegebene Aufgabe richtig versteht und ohne Fehler durchführen kann. Die VP soll sich dadurch auch an die Verwendung des Schalters gewöhnen.

Zur Auswertung wird der Kolmogorov-Smirnov Test verwendet, um sowohl die zentralen Werte wie Mittelwert und Median, als auch die Streuung in Betracht zu ziehen, da die beiden Faktoren bei der Analyse der Reaktionszeit eine wichtige Rolle spielen (Luce, 1986).

3.3 Apparatur

Die Apparatur besitzt maximal 8 Ausgänge zur Ansteuerung der Relais und zwei Eingänge zur Registrierung der Antworten. Die zwei Eingänge sind an einem Knopf-Schalter angeschlossen. Bei beiden Eingängen wird ständig abgefragt, ob der Schalter gedrückt oder losgelassen ist. Dieses Gerät wird über die parallele Schnittstelle eines IBM kompatiblen Rechners kontrolliert (siehe Abb. 3.4).

Eine Soundkarte (SB-16) wird zusätzlich am Rechner installiert. Die Karte ist sowohl für ein Maskierungssignal als auch für das Aufnehmen der verbalen Antwort verantwortlich.

3.4 Steuerprogramm

Das Programm ist in der Lage, die für die Reizgebung gewünschten Signale zu erzeugen und ständig den Schalter-Status abzufragen. Nachdem ein Signal abgesendet ist, wird ein programmierter Timer angeschaltet, der bis zur Änderung des Schalter-Zustandes läuft. Obwohl ein normaler PC über eine zeitliche Auflösung 1 ms verfügt, kann das zuverlässige Intervall nur mit einer Genauigkeit von etwa 5 ms angegeben werden. Daher wird ein neuer Timer verwendet, der die Genauigkeit von 0.1 ms erreicht. Da jedoch die Abfragefunktion als ‚bottle-neck‘ funktioniert, ist die zuverlässige Auflösung

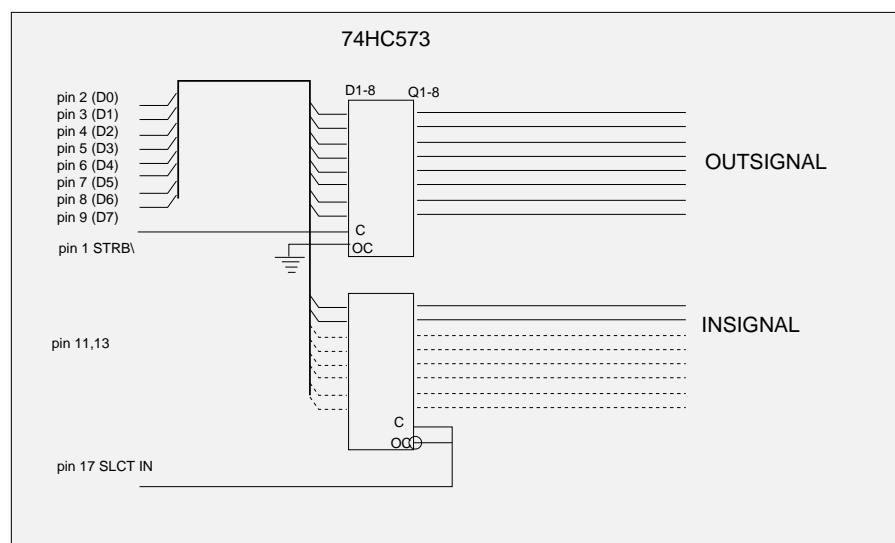
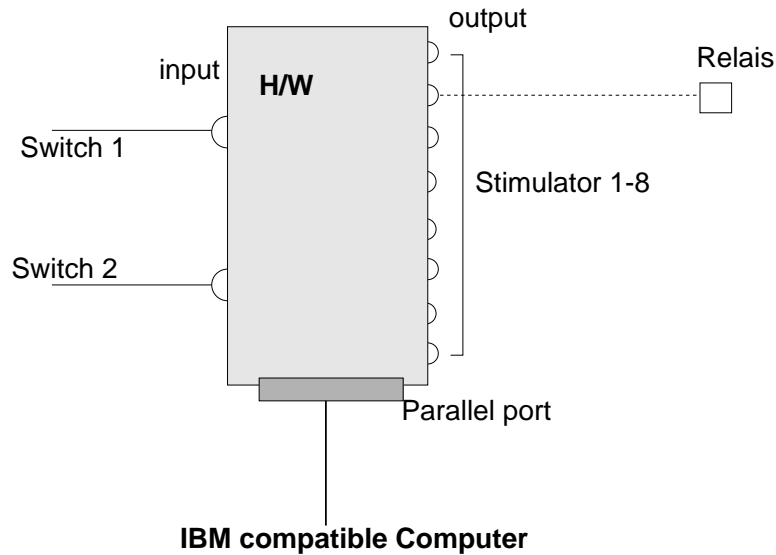


Abbildung 3.4: Apparatur

Das Gerät stellt zwei Eingänge (von den Schaltern) und 8 Ausgänge (zu den Relais) zur Verfügung. Das obere Bild zeigt schematisiert, wie dieses Gerät am Rechner angeschlossen ist. Das Relais funktioniert als mechanischer Reizgeber. Die Kommunikation über die parallele Schnittstelle ermöglicht einen schnellen und direkten Zugriff auf das Gerät, was in der seriellen Schnittstelle nicht der Fall ist. Am unteren Bild ist der Haupt-Schaltkreis dargestellt. Die Beschreibungen an der linken Seite bezeichnen die Pin-Belegung für die parallele Schnittstelle.

von 0.5 ms. Beim Senden des Reizsignals wird das zeitliche Intervall zwischen zwei Reizen, genauer zwischen der Antwort auf den ersten Reiz und dem nächsten Reiz auf $1 \text{ s} + \alpha$ eingestellt, wobei α durch einen Randomgenerator erzeugt wird, der Werte zwischen 200 ms und 1200 ms erzeugt. Falls nach 1.5 s noch keine Reaktion erfolgt ist, wird sofort der nächste Reiz gesendet. Das Reizsignal dauert 20 ms. In dieser Zeit bewegt sich das Relais einmal oder maximal zweimal hin und her.

3.5 Versuchspersonen

Alle Versuchspersonen sind rechtshändig. Ihr Alter liegt zwischen 22 - 35. Außer einem Gärtner sind alle StudentInnen an der Universität Bielefeld. Insgesamt sind 62 VPs (16 weibliche; 46 männliche) an Experimenten beteiligt. In den meisten Fällen nahm eine VP mehrfach an unterschiedlichen Experimenten teil. Dreißig VPs wurden für eine etwa 45 minütige Sitzung mit 10.- DM bezahlt. Alle anderen nahmen freiwillig an den Versuchen teil.

4 Bimanuelle Entscheidung bei Zielbewegungen: Untersuchung des Verhaltens und der RT

4.1 Methode

In diesem Experiment werden VPs dazu aufgefordert, diejenige Körperstelle, die mit Hilfe eines elektromechanischen Reizgebers stimuliert wird, mit einer der beiden Hände so schnell wie möglich zu treffen. Dabei wird registriert, ob die rechte oder die linke Hand verwendet wird. Mit Beginn der Bewegung soll die VP einen mit dem Daumen der jeweiligen Hand gedrückten Schalter loslassen. Auf diese Weise kann gleichzeitig die Reaktionszeit gemessen werden. Der Versuch wird in 5 Beinstellungen (p, xl, xr, kl, kr), kombiniert mit 3 Handstellungen (hp, hl, hr) durchgeführt. Insgesamt werden 9 Körperstellungen untersucht (siehe Abb. 4.1). Den VPs werden auf den Beinen insgesamt 8 Reizgeber montiert. In jedem Versuchsdurchgang wird jede Stelle 10 mal gereizt.

In der ersten Versuchsreihe wird die Bewegung der Hand tatsächlich durchgeführt. In der zweiten Versuchsreihe soll sich die VP die Bewegung nur vorstellen und mitteilen, welche Hand sie verwendet hätte, indem sie den in dieser Hand gehaltenen Schalter losläßt. Die Werte der vorgestellten Bewegungen streuen viel stärker als die der tatsächlichen Bewegungen. Daher sollen zunächst nur die ersteren betrachtet werden. An diesem Experiment haben 6 VPs (4 männliche und 2 weibliche) teilgenommen.

Als Maß für die Bevorzugung der rechten bzw. linken Hand wird die „Händigkeit“ auf die folgende Weise berechnet: $\text{Händigkeit} = 100 \times (N_r - N_l) / (N_r + N_l)$, wobei $N_{r,l}$ jeweils die Anzahl von Entscheidungen für die rechte (r) bzw. linke (l) Hand bezeichnen. Die Werte liegen also zwischen -100 und 100. Positive Werte bedeuten, daß die rechte, negative, daß die linke Hand bevorzugt wird. Die Ergebnisse sind in Abb. 4.1 dargestellt, wobei die Zahlenwerte an den jeweiligen Reizorten eingetragen sind. Die oben stehende Zahl gibt Händigkeit und die unten stehende die Trajektorienlänge an. Die Trajektorienlänge entspricht der Länge der von der Hand tatsächlich durchgeführten Bewegung im Raum. Sie wird mit einer Genauigkeit von etwa $\pm 5\%$ geschätzt.

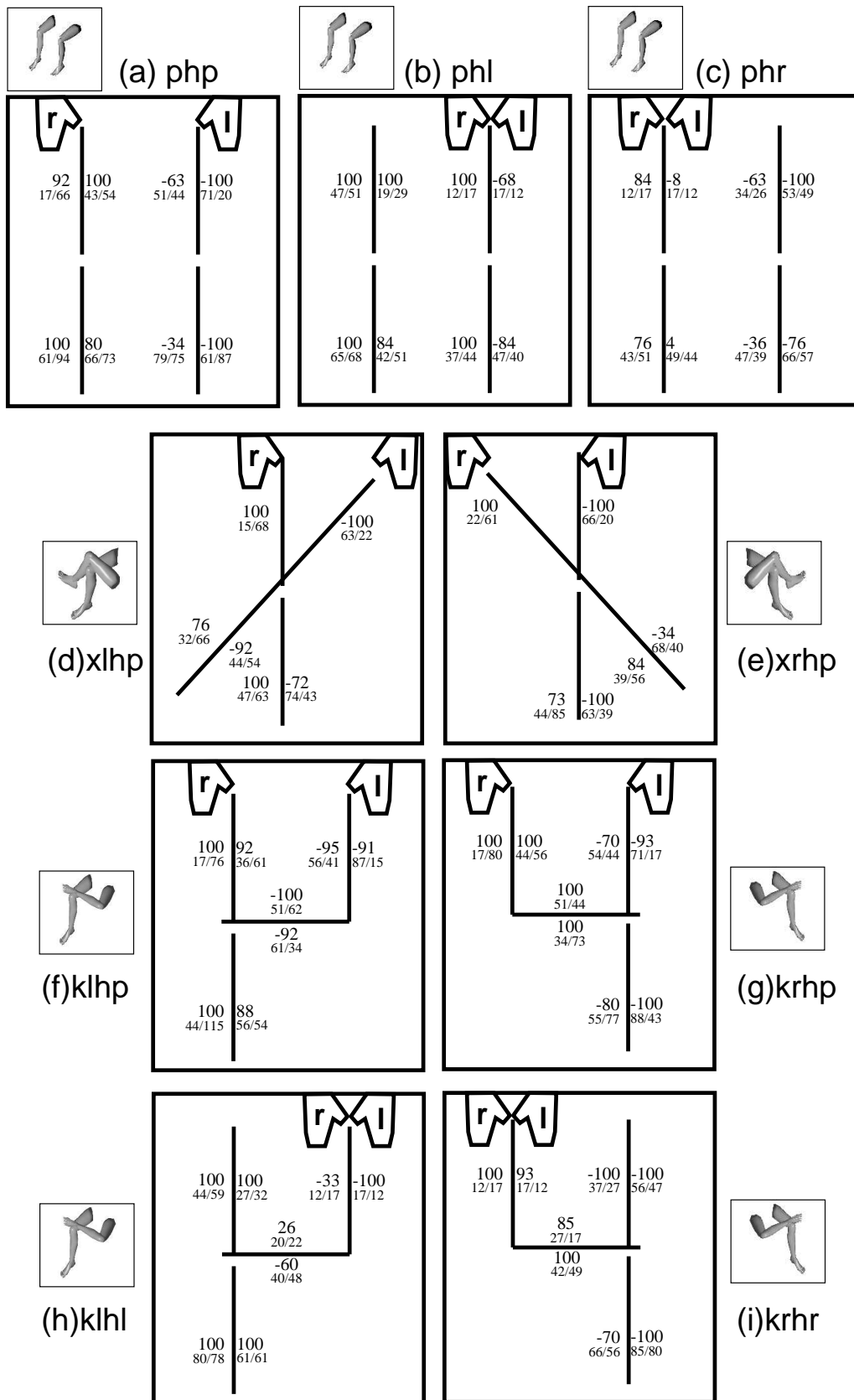


Abbildung 4.1: Händigkeit und Trajektorienlänge
 Obere Zahlen: Händigkeit, Untere Zahlen: Trajektorienlänge jeweils der rechten und linken Hand [cm]

Körperstellung	Händigkeit
php	9.9
phl+phr	19.5
xlhp+xrhp	2.9
klhp+krhp	3.5
klhl+krhr	15.1
Gesamtmittel	10.2

Tabelle 4.1: Verschiebung der Händigkeit

Um die Verschiebung der Händigkeit darzustellen, wurden zuerst die Werte der Händigkeiten in jeder Stellung addiert. Anschließend wurde jeweils die Summe zweier spiegelbildlicher Stellungen addiert und gemittelt.

4.2 Resultate

Die in Abb. 4.1 dargestellten Ergebnisse deuten an, daß die rechte Hand dominant verwendet wurde. Falls kein Dominanzeffekt existieren würde, sollte die Summe der Händigkeiten z.B in der parallelen Beinstellung, also php, wie auch in den spiegelsymmetrischen Stellungen (phl+phr, xlhp+xrhp, klhp+krhp und klhl+krhr) etwa Null betragen. Diese Summenwerte sind in Tab. 4.1 angegeben. Hier wird deutlich, wie stark die Händigkeit zur rechten Hand hin, also zu positiven Werten, verschoben ist. Die Verschiebung beträgt im Mittel etwa 10.2. Sie scheint bei den engen Handstellungen besonders groß zu sein (Tab. 4.1; phl+phr, klhl+krhr).

Um diesen Dominanzeffekt zunächst nicht weiter berücksichtigen zu müssen, wurde folgendermaßen vorgegangen. Die Händigkeit für die Stellung ‚php‘ wurde mit sich selbst gespiegelt und die Werte wurden gemittelt, während bei allen anderen Stellungen die Werte eines Paares gespiegelt und diese dann gemittelt wurden. Diese Ergebnisse sind in Abb. 4.2 dargestellt.

Betrachtung verschiedener Parameterkombinationen zur Interpretation der Ergebnisse

Im folgenden soll in einer vorläufigen Betrachtung versucht werden, in qualitativer Weise einige Parameter darauf hin zu untersuchen, ob sie in Frage kommen, diese Ergebnisse zu erklären. Dabei soll von der Bevorzugung der rechten Hand abgesehen werden. Deshalb sollen im folgenden nur die Werte der Abb. 4.2 betrachtet werden.

Eine naheliegende Vermutung besteht darin, daß der Abstand zwischen Hand und Reizort eine entscheidende Rolle spielt und diejenige Hand bevorzugt wird, die näher am Reizort liegt. Dabei erhebt sich die Frage, wie der Abstand definiert sein könnte. Zunächst kann man zwischen relativen und absoluten Maßen unterscheiden. Hierzu führe ich den relativen Distanzunterschied (ΔD^r) durch die Formel $(A_l - A_r) / \min(A_l, A_r)$ und den absoluten Distanzunterschied ($\Delta D^a = A_l - A_r$) ein, wobei A_l, A_r jeweils den Abstand von der linken und der rechten Hand zum jeweiligen Reizort bezeichnet. Hierfür werden vier verschiedene Distanzmaße betrachtet.

Zunächst ist denkbar, daß der euklidische Abstand (D_e), ohne Berücksichtigung der als Hinder-

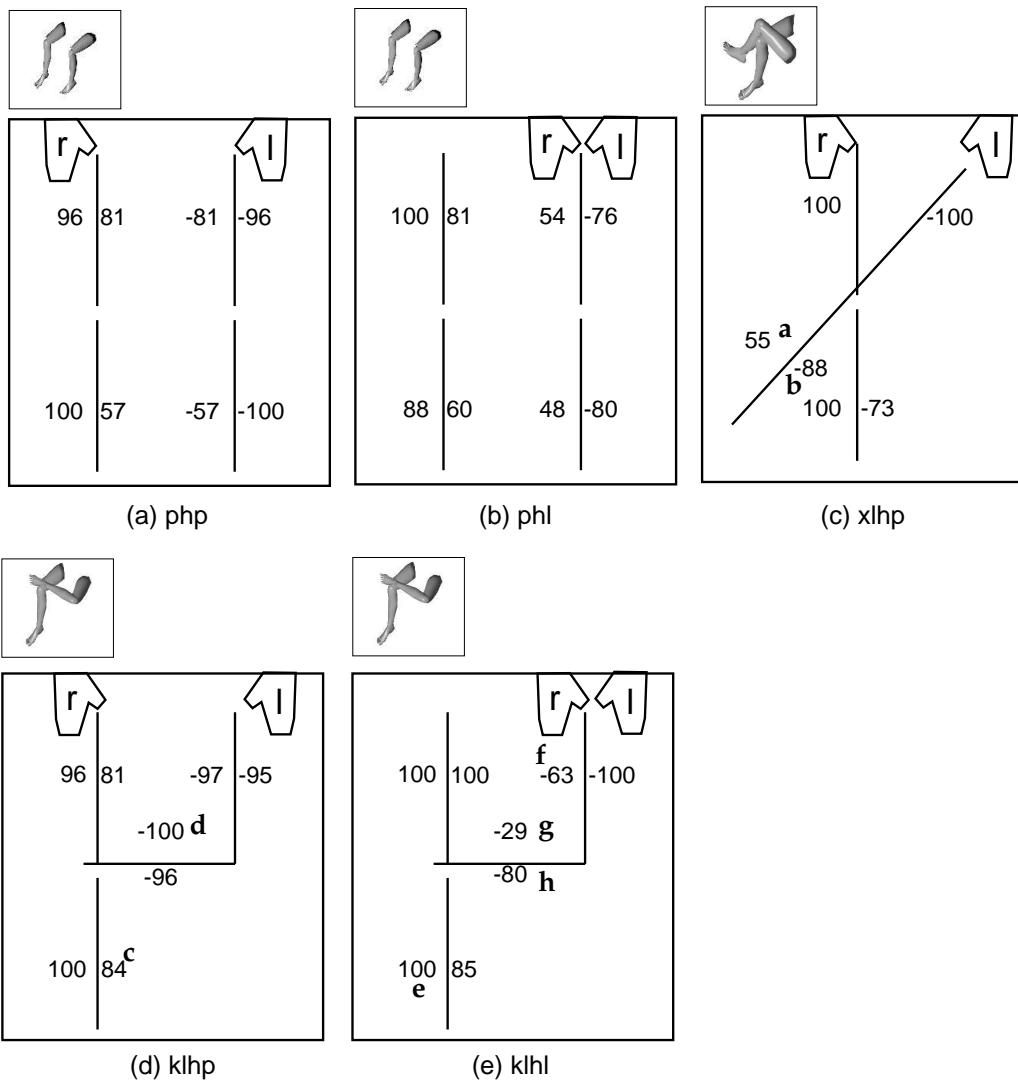


Abbildung 4.2: Schema mit den gemittelten Händigkeitswerten. Einige der für die Diskussion relevanten Werte sind mit Buchstaben a–h gekennzeichnet.

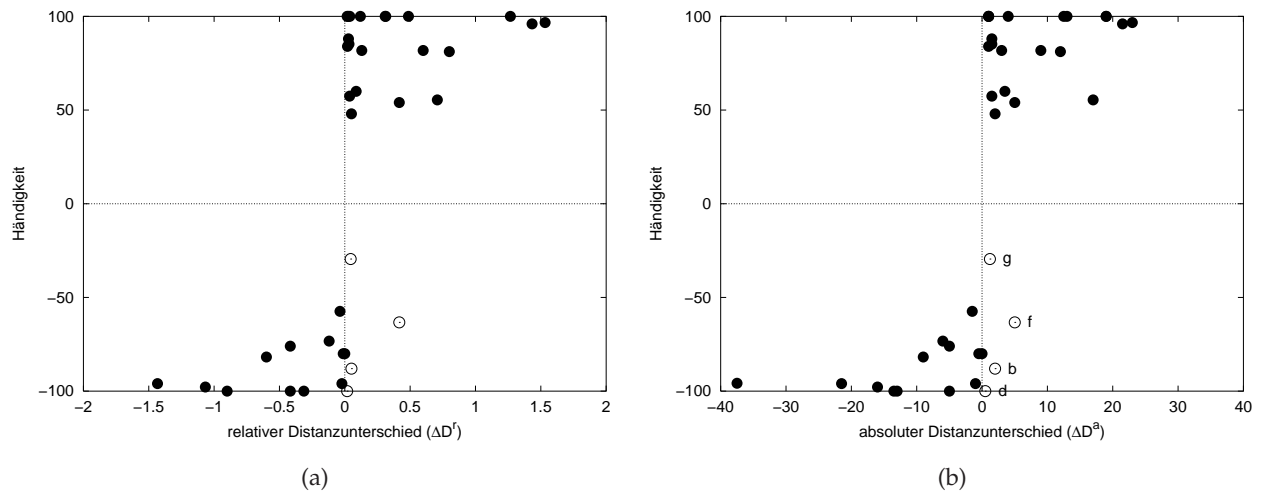


Abbildung 4.3: Händigkeit gegen relativen (a) und absoluten (b) Distanzunterschied. Als Distanzmaß wird der kürzeste Weg auf der Körperoberfläche (minimale Trajektorienlänge: D_b) verwendet. Die Buchstaben bezeichnen die in Abb. 4.2 markierten Stellen.

nisse wirkenden Beine, die entscheidende Rolle spielt. Dies ist aber sehr unwahrscheinlich, da es einzelne sehr nahe beieinander liegende Reizorte gibt (z.B. Abb. 4.2; siehe die bezeichneten Stellen a,b in ,xlhp' bzw. g,h in ,klhl'), die sich trotz fast identischen euklidischen Abstands in der Händigkeit sehr stark unterscheiden.

Als zweites wurde versucht, als Distanzmaß den kürzesten Abstand auf der Körperoberfläche von der Hand zum Ziel (D_b) zu verwenden. D_b ist der Extremfall von D_t (Trajektorienlänge), bei dem die Trajektorie immer die Körperoberfläche berührt. Die Ergebnisse sind in Abb. 4.3 dargestellt. Dieses Maß zeigt eine gewisse Korrelation, aber dessen Streuung ist recht groß [$r = 0.6859$ beim relativen Distanzunterschied, $r = 0.7503$ beim absoluten Distanzunterschied, Polynomregression dritter Ordnung]. Besonders deutlich sind die Abweichungen in den Stellungen ,x' (Beine übergeschlagen) und ,k' (Fuß auf Knie). Diese sind mit offenen Punkten und durch die Buchstaben b, d, f und g gekennzeichnet (Abb. 4.3), wie sie in Abb. 4.2 verwendet wurden. Im Idealfall sollten keine Datenpunkte in dem 2ten und 4ten Quadranten vorkommen. Die Stellungen ,x' und ,k', in denen die meisten abweichenden Werte vorkommen (offene Punkte in Abb. 4.3), lassen sich also schlecht mit diesem Maß erklären.

Als weitere Möglichkeit könnte man vermuten, daß die Länge der Trajektorie, die bei der Bewegung tatsächlich erzeugt wird, als ein Kriterium verwendet wird. Die Ergebnisse sind in Abb. 4.4 dargestellt. Dieses Maß bietet eine wesentliche Verbesserung der Korrelation [$r = 0.8314$ beim relativen Distanzunterschied, $r = 0.8842$ beim absoluten Distanzunterschied]. Die Abweichung in der Stellung ,x' (offener Punkt b in Abb. 4.3) ist hier nicht mehr vorhanden, aber die Probleme für die Stellung ,k' sind im Prinzip dieselben mit einer weiteren Abweichung, die als h bezeichnet ist. Dennoch zu sehen ist, daß die gesamten Abweichungen deutlich geringer geworden sind (Abb. 4.4). Zusammenfassend ist zu sagen, daß sowohl der relative Distanzunterschied als auch der absolute

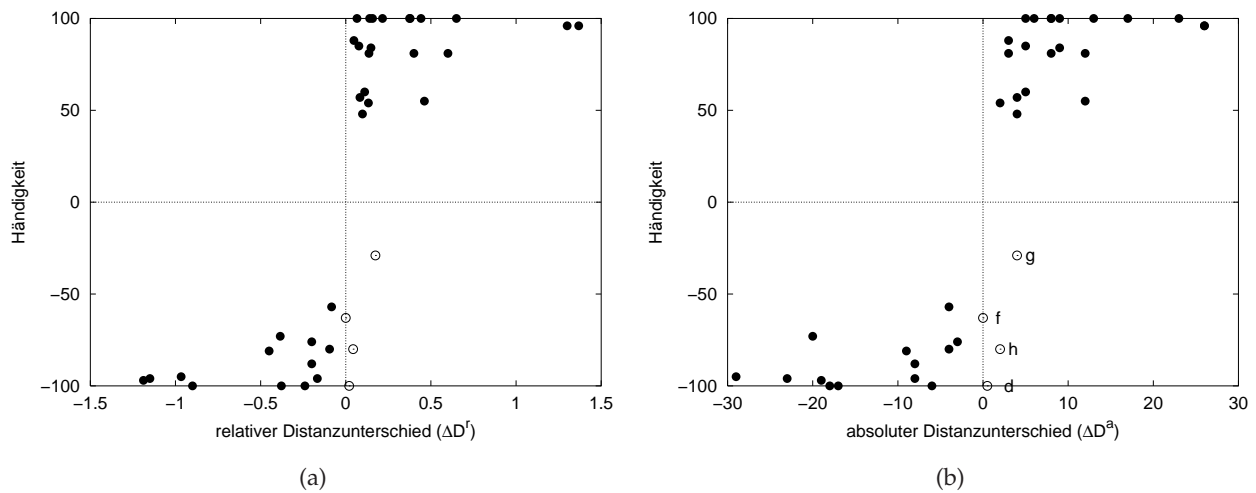


Abbildung 4.4: Händigkeit gegen relativen (a) und absoluten (b) Distanzunterschied. Als Distanzmaß wird die tatsächliche Trajektorie (D_t) verwendet.

Distanzunterschied mit verschiedenen Distanzmaßen die Händigkeit nur teilweise erklären kann. Im allgemeinen zeigt der absolute Distanzunterschied eine bessere Korrelation als der relative Distanzunterschied.

Einige der Schwierigkeiten treten in den Stellungen auf, bei denen beide Hände nahe beieinander gehalten werden. Hier könnte die eine Hand jeweils als Hindernis für die andere Hand betrachtet werden. Deshalb wurde versucht, in diesen Fällen den entsprechenden Distanzunterschied additiv um einen bestimmten Wert F_h (Hindernisfaktor) zu vergrößern. Die Wirkung eines willkürlich gewählten Wertes ($F_h = 5$ cm) ist in Abb. 4.5 (b) mit Pfeilen dargestellt.

Wie die Abb. 4.5 zeigt, wird die Beschreibung durch einen Hindernisfaktor in einigen Fällen besser (phl), in anderen (klhl; f, g, h) aber auch schlechter. Eine Wirkung dieses Hinderniseffekts kann also nicht ausgeschlossen werden, kann aber sicher nicht alle Abweichungen erklären.

Was könnte der Grund für die verbleibenden Abweichungen sein? Eine genaue Betrachtung der Ergebnisse (Abb. 4.2) legt die Vermutung nahe, daß es möglicherweise auch eine gewisse Bevorzugung der zum Reizort ipsilateralen Hand gibt. Um diesen Effekt zu untersuchen, wurde vom absoluten Distanzunterschied ΔD_t^a ein Wert $F_{ipsi} = 10$ für die jeweils ipsilaterale Distanz ($A_{l,r}$) subtrahiert.

Das Ergebnis ist in Abb. 4.6 gezeigt. Bei Abb 4.6 (a) wurde der ΔD_t^a mit Bevorzugung der ipsilateralen Seite, aber ohne Hinderniseffekt und in Abb. 4.6 (b) mit Hinderniseffekt berechnet. Die beiden in Abb. 4.6 (a) im linken oberen Quadrant liegenden Werte entsprechen den Reizorten IOi und IUi in Abb. 4.2 (b).

Als Alternative zu dem additiven Wert F_{ipsi} wurde ein multiplikativer Faktor (F_m) untersucht, indem die Distanz der Hand zu dem jeweiligen morphologisch ipsilateralen Bein um 5 % kürzer gewichtet wird (Abb.4.7). Größere oder kleinere Werte führten zu schlechteren Ergebnissen. Auch

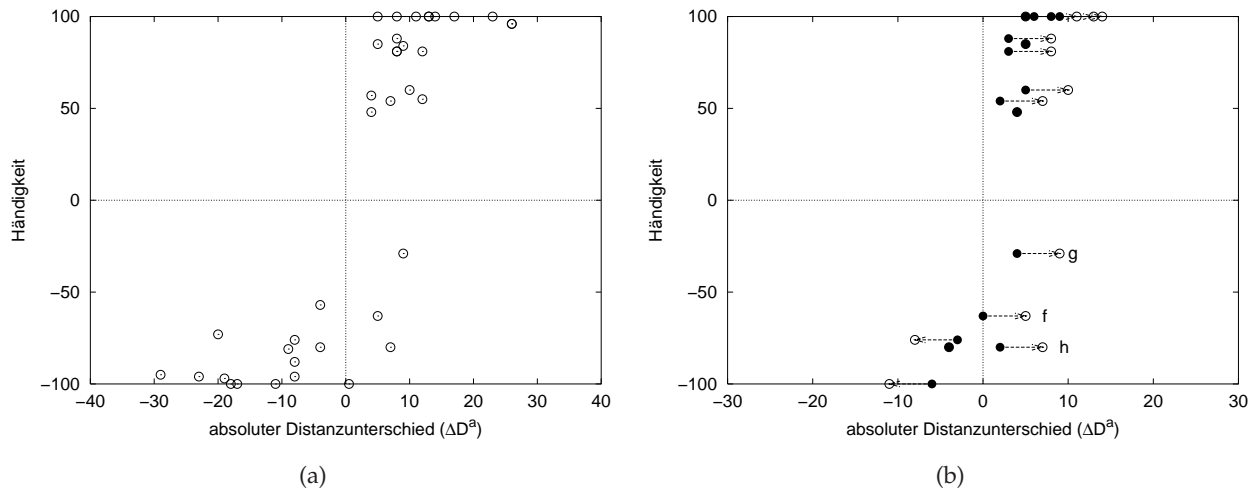


Abbildung 4.5: Händigkeit gegen absoluten Distanzunterschied. (a) Als Distanzmaß wird der Hindernisfaktor ($F_h + D_t$) verwendet. Zur Verdeutlichung sind in der rechten Abbildung (b) die Effekte des Hindernisfaktors dargestellt. Der Pfeil zeigt, welche Punkte in welche Richtung verschoben sind. Hierbei sind nur ‚phl‘ und ‚klhl‘ eingetragen, da der Hindernisfaktor nur die ‚hl‘ Stellung betrifft.

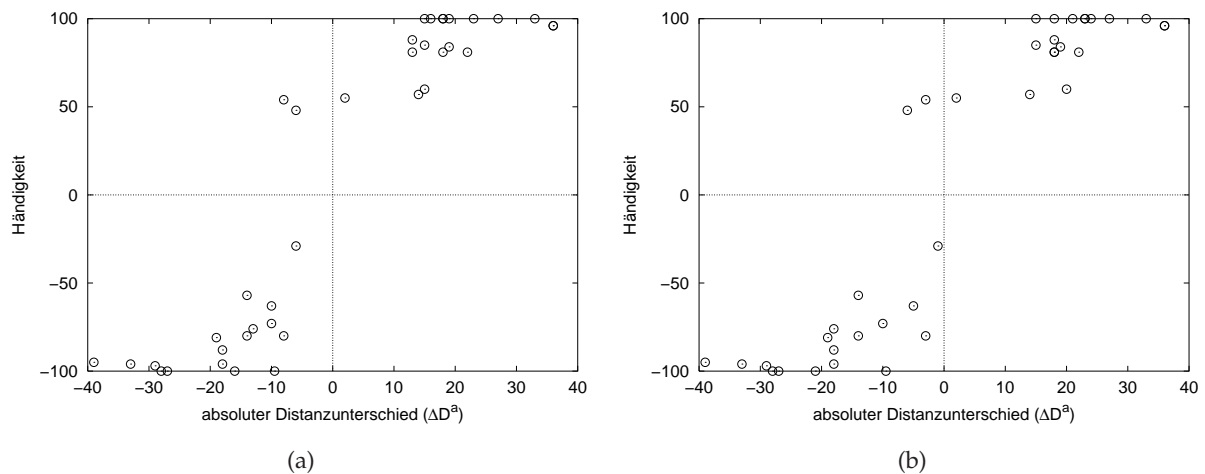


Abbildung 4.6: Händigkeit gegen absoluten Distanzunterschied
 Als Distanzmaß wird zusätzlich in a) F_{ipsi} und in b) die zwei Faktoren F_{ipsi} und F_h verwendet.

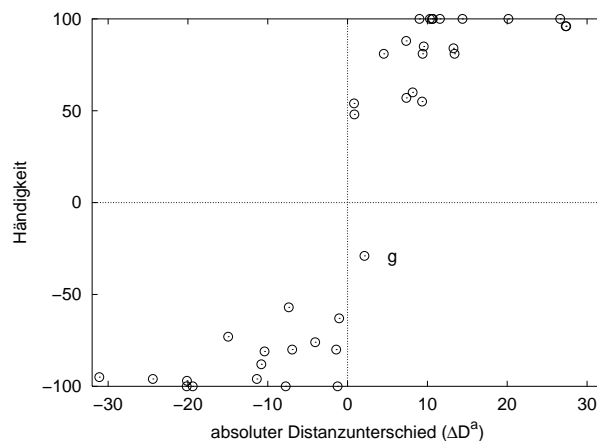


Abbildung 4.7: Händigkeit gegen absoluten Distanzunterschied

Als Distanzmaß ist der absolute Distanzunterschied mit dem multiplikativen Faktor (F_m) verwendet.

eine zusätzliche Berücksichtigung des Hinderniseffekts verbesserte die Darstellung nicht. Der mit ‚g‘ bezeichnete Wert ist IU_i in ‚klhl‘ (siehe Abb. 4.2).

Da die Darstellungen in Abb. 4.6 (a) und Abb. 4.7 qualitativ betrachtet eine recht gute Korrelation zeigen (Abb. 4.6 a, $r=0.9532$; Abb. 4.7, $r=0.9367$), liegt die Hypothese nahe, daß zwar die tatsächlich zurückzulegende Entfernung eine wichtige Rolle für die Entscheidung spielt, daß dabei aber eine gewisse Bevorzugung der zum Reizort ipsilateralen Hand überlagert wird.

4.3 RT für Entscheidung

Parallel zu den bisher beschriebenen Messungen der Händigkeit werden auch die Reaktionszeiten bestimmt. Hier werden wieder wie in Abb. 4.1 die Originalwerte betrachtet, also nicht wie in Abb. 4.2 die für die spiegelbildlichen Stellungen gemittelten Werte. Die Ergebnisse sind in Abb. 4.8 dargestellt. Hierbei entsprechen die oberen Werte der Händigkeit und die unteren der Reaktionszeit, jeweils getrennt für die Antworten mit der rechten (links) und linken (rechts) Hand. Die Werte für die RT sind als Mediane angegeben (Die entsprechenden Ergebnisse für die vorgestellten Bewegungen finden sich im Anhang, Seite 124). In Tab. 4.2 werden die Werte zusammen mit den jeweiligen Median-Abweichungen ($\tilde{D} = \text{Median}\{|x_i - \tilde{x}|\}$; Sachs, 1997) angegeben.

In den folgenden Abbildungen wird untersucht, ob es bei der RT ähnlich wie für die Händigkeit eine Beziehung zum relativen (Abb. 4.9) bzw. absoluten (Abb. 4.10) Distanzunterschied gibt. Für diesen Vergleich wird der in Abb. 4.7 dargestellte Abstand verwendet, da mit diesem Maß die Zahl der abweichenden Punkte am kleinsten ist. Hier sind jeweils die Werte für tatsächlich durchgeführte (Abb. 4.9 a, 4.10 a) und für nur vorgestellte Bewegungen (Abb. 4.9 b, 4.10 b) angegeben. Signifikante Zusammenhänge lassen sich nicht finden. Ebenso wenig kann eine Korrelation zwischen Händigkeit und RT gefunden werden (Abb. 4.11).

In Abb. 4.12 wird die RT gegen die Trajektorienlänge aufgetragen. Dafür werden die RTs zunächst, wie in Tab. 4.2 gezeigt, danach getrennt, welche Hand zur Reaktion verwendet wurde (RH:

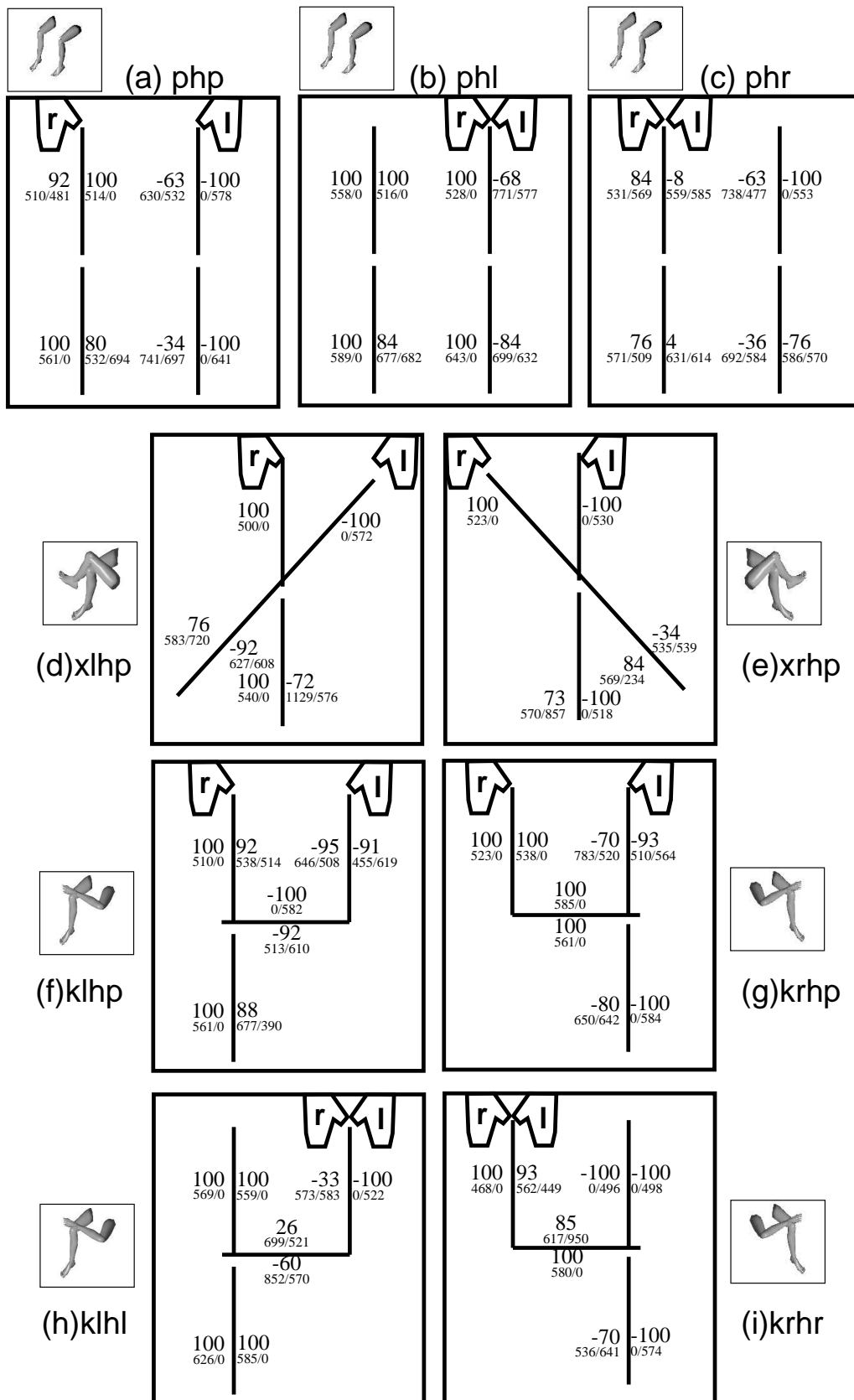


Abbildung 4.8: Händigkeit und Reaktionszeit

Obere Zahlen: Händigkeit, Untere Zahlen: RT jeweils der rechten und linken Hand [ms]. 0 bedeutet, daß kein Wert gemessen wurde.

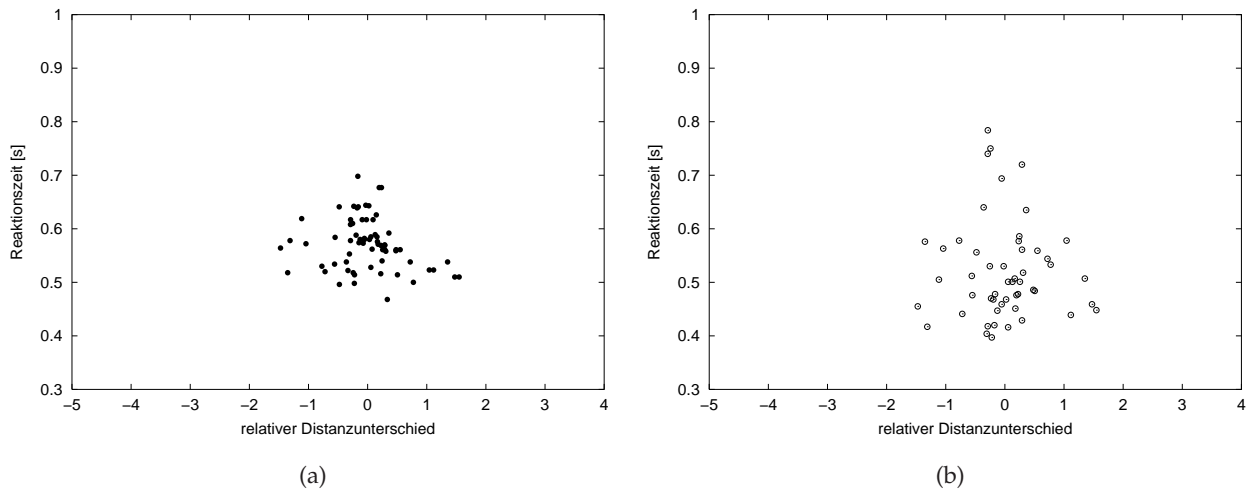


Abbildung 4.9: Zusammenhang zwischen relativem Distanzunterschied und Reaktionszeit. (a) tatsächliche und (b) vorgestellte Bewegungen.

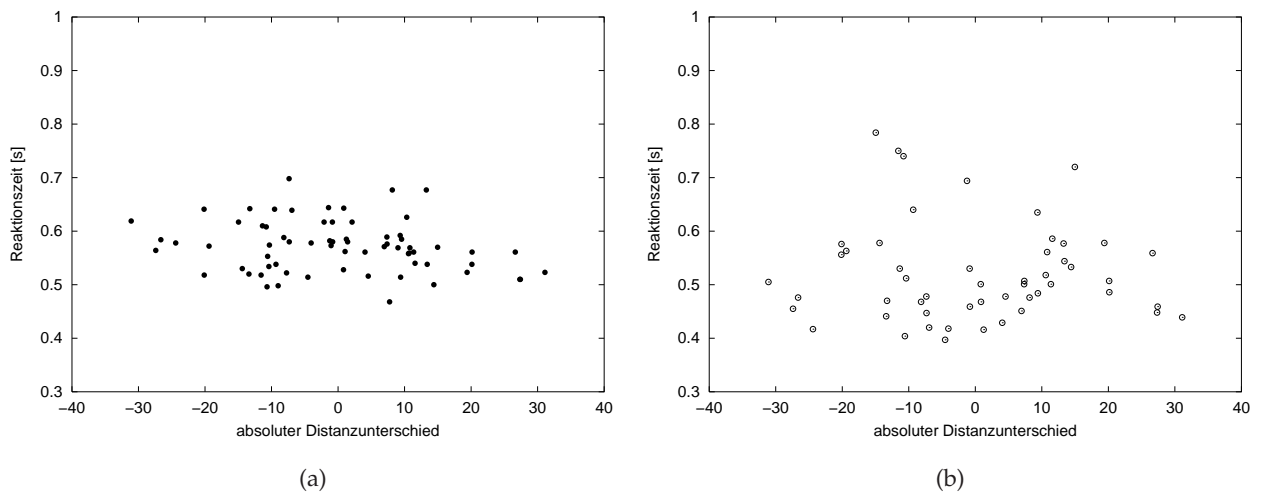


Abbildung 4.10: Zusammenhang zwischen absolutem Distanzunterschied und Reaktionszeit. (a) tatsächliche und (b) vorgestellte Bewegungen.

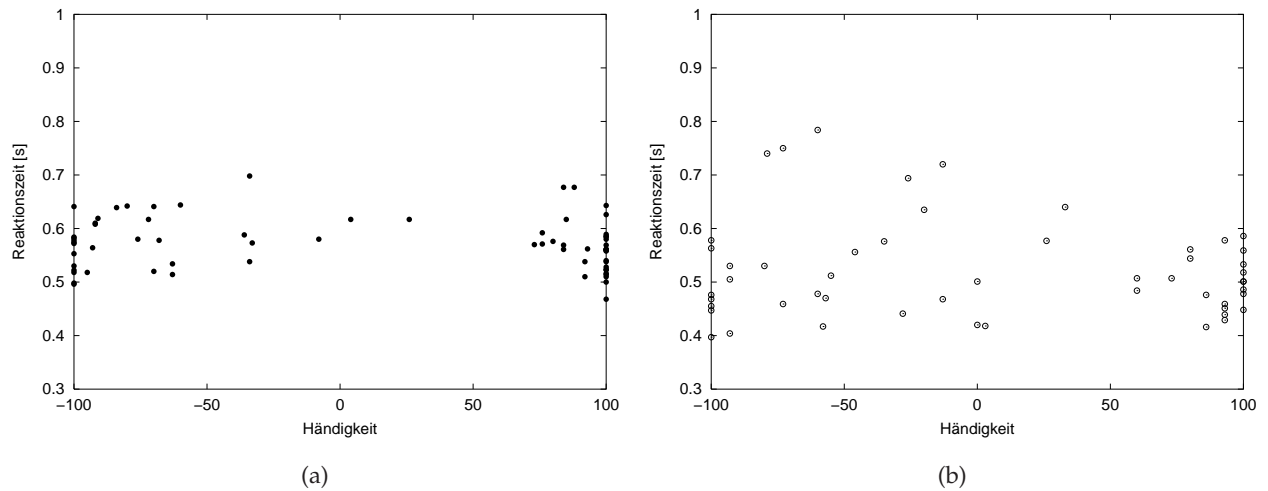


Abbildung 4.11: Zusammenhang zwischen Händigkeit und Reaktionszeit. (a) tatsächliche und (b) vorgestellte Bewegungen.

RT der rechten Hand, LH: RT der linken Hand). Falls die gesamte Zahl der Messungen kleiner als 6 sind, werden die Werte nicht verwendet. Der Vergleich zwischen der Trajektorienlänge und der RT ergibt bei tatsächlichen Bewegungen eine Korrelation von $r = 0.403$ ($n=88$, Regressionsgerade: $a_0 = 0.512$, $a_1 = 0.002$) und bei vorgestellten Bewegungen eine Korrelation von $r = 0.345$ ($n=78$, Regressionsgerade: $a_0 = 0.429$, $a_1 = 0.004$). Die Korrelation ist von $r = 0$ signifikant verschieden (Tatsächliche Bewegung: $p < 0.001$, Vorgestellte Bewegung: $p < 0.01$). Da hier eine Beziehung zwischen der Trajektorienlänge und der RT gefunden wird, ist es vorstellbar, daß die gemessene Händigkeit, wie beim Vergleich mit dem Distanzunterschied (Abb. 4.7), durch die Differenz der beiden RTs, die RT der linken und der rechten Hand, erklärt werden kann. In Abb. 4.13 wird daher untersucht, ob es einen Zusammenhang zwischen der Händigkeit und der Differenz der beiden RTs gibt, die bei Verwendung der linken bzw. rechten Hand für einen bestimmten Reizort erhalten wurden. Sollte sich hier eine positive Korrelation ergeben, so würde das bedeuten, daß die RT dann kürzer ist, wenn sich die VP für die „richtige“ Hand entschieden hat, also die linke Hand, wenn die Händigkeit für diese Situation negativ, die rechte Hand, wenn die Händigkeit für die Situation positiv ist. Dieser Vergleich zwischen der Händigkeit und der Differenz der beiden RTs ($\Delta RT = RT_l - RT_r$) ergibt eine lineare Korrelation von $r = 0.566$ ($n = 20$, Regressionsgerade: $a_0 = -0.028$, $a_1 = 0.002$). Die meisten Meßpunkte der Abb. 4.13 liegen in richtigen Quadranten. In der Abbildung werden die 3 deutlich abweichenden Punkte mit ihren Reizorten markiert.

Die Korrelation zwischen ΔRT und Händigkeit legt also die Vermutung nahe, daß über die den Reizort zu erreichende Hand aufgrund einer ‚mentalen‘ Konkurrenz entschieden wird, indem der zeitliche Vorteil während der Informationsverarbeitung zwischen den beiden Händen verglichen wird.

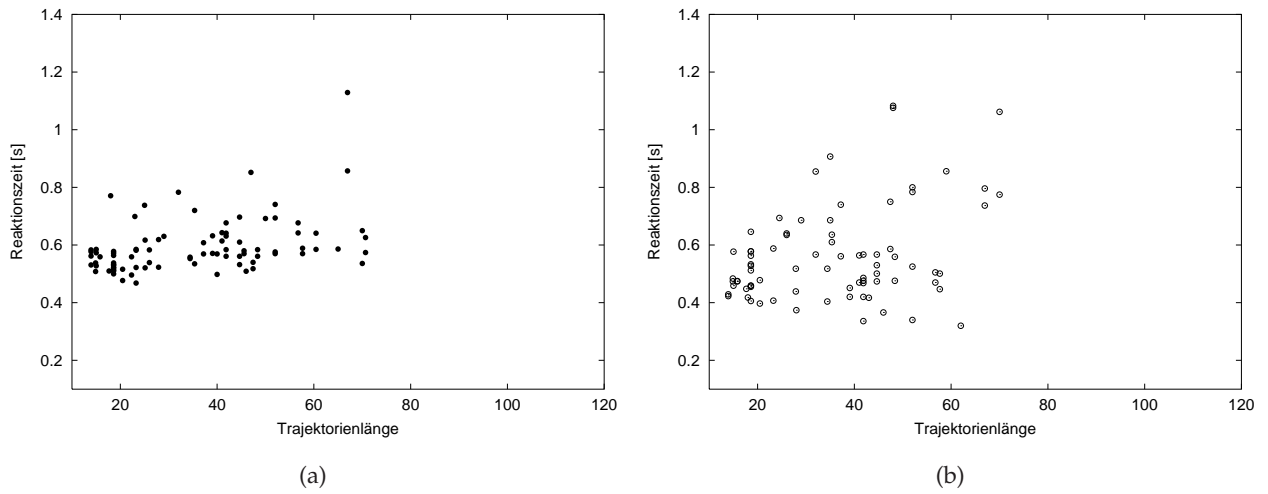


Abbildung 4.12: Zusammenhang zwischen absoluter Trajektorienlänge und Reaktionszeit. (a) tatsächliche und (b) vorgestellte Bewegungen.

Körperstellungen (siehe Fig. 4.8)		Reizort							
		rechtes Bein				linkes Bein			
		Oberschenkel		Unterschenkel		Oberschenkel		Unterschenkel	
		Außenseite	Innenseite	Außenseite	Innenseite	Innenseite	Außenseite	Innenseite	Außenseite
a	RH	510(80),57	514(64),60	561(55),60	532(53),54	630 (8),10	na	741(121),19	na
	LH	481(0)	na	na	694(32),6	532(65),49	578(110),58	697(112),40	641(89),57
b	RH	558(87),59	516(56),59	589(81),60	677(57),55	528(78),56	771(29),9	643(89),55	699(0)
	LH	na	na	na	682(123)	na	577(110),50	na	632(63),55
c	RH	531(89),55	559(19),27	571(53),52	631(66),31	738(107),10	na	692(103),19	586(0),7
	LH	569 (0)	585(110),32	509(0),7	614(91),28	477(49),49	553(66),57	584(84),40	570(38),52
d	RH	500(84),57	na	540(39),53	1129(154),8	na	na	583(51),52	627(0)
	LH	na	na	na	576(48),51	na	572(50),58	720(108),7	608(70),57
e	RH	523(49),60	na	569(62),55	535(37),19	na	na	570(41),52	na
	LH	na	na	234(0)	539(72),40	na	530(46),51	857(191),7	518(21),57
f	RH	510(77),55	538(56),57	561(65),59	677(61),56	646(0)	455(0)	na	513(0)
	LH	na	514(0)	na	390(0)	508(45),58	619(76),57	582(74),60	610(25),57
g	RH	523(26),60	538(24),56	561(66),59	585(62),59	783(264),8	510(0)	650(38),6	na
	LH	na	na	na	na	520(56),51	564(42),58	642(52),54	584(51),58
h	RH	569(106),60	559(55),60	626(104),58	585(52),59	573(21),19	na	699(213),38	852(184),12
	LH	na	na	na	na	583(155),39	522(64),59	521(120),22	570(74),48
i	RH	468(26),59	562(70),58	580(58),60	617(107),55	na	na	536(41),8	na
	LH	na	449(0)	na	950(323)	496(30),56	498(52),59	641(52),51	574(39),59

Tabelle 4.2: Reaktionszeit (Median), Median-Abweichung und Stichprobeumfang
Die Median-Abweichungen (in Klammern) sind durch $\tilde{D} = Median\{|x_i - \tilde{x}|\}$ für jede Körperstellung und Reizort berechnet. (siehe Abb. 4.8 a-i). RH: RT der rechten Hand, LH: RT der linken Hand. na: nicht verfügbar (Reizorte, in denen keine Messungswerte vorhanden sind). Nur die Stichprobeumfänge, die mindestens 6 betragen, sind eingetragen.

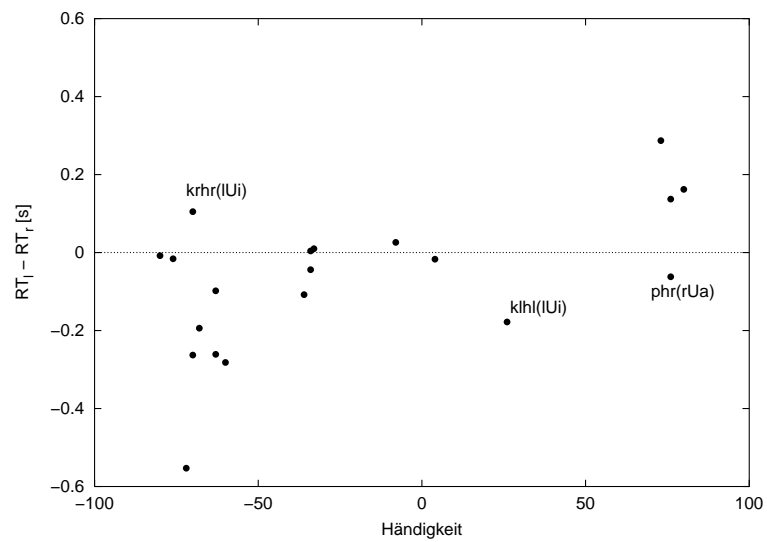


Abbildung 4.13: Händigkeit versus ΔRT ($RT_l - RT_r$)

RT_l und RT_r bedeuten die Reaktionszeit, die jeweils bei Reaktion der linken bzw. rechten Hand gemessen wurde. Bei Berechnung der ΔRT sind nur die Daten der Tab. 4.2, deren Stichprobenumfang mindestens 6 beträgt, berücksichtigt.

5 RT in SRT und CRT Aufgaben bei verschiedenen Reizorten und Körperstellungen.

In den im vorhergehenden Kapitel 4 durchgeführten Experimenten befand sich die VP in einer zwar einfachen, aber doch einer normalen Verhaltenssituation weitgehend entsprechenden Versuchsanordnung. Dies ist insofern sinnvoll, als letztlich die Reaktion in einer natürlichen Situation interessiert, hat aber den Nachteil, daß aufgrund der der VP verbleibenden Autonomie die Ergebnisse mit größeren Streuung behaftet und damit weniger gut reproduzierbar sind als dies in stärker eingeschränkten Situationen möglich ist. Um die dem beobachteten Verhalten zugrunde liegenden Mechanismus genauer untersuchen zu können, soll deshalb im folgenden die Wahlfreiheit der VP dadurch eingeschränkt werden, daß sie entweder gar keine Entscheidung treffen muß (die Reaktion wird immer mit derselben Hand durchgeführt), oder daß die Entscheidung durch den Ort der Reizung festgelegt ist (z.B. Reaktion auf Reizung am rechten Bein stets mit der rechten Hand). In all diesen Experimenten werden nur noch RTs gemessen. Die VPs müssen keine Handbewegungen durchführen.

Für die Experimente werden die folgenden Aufgaben definiert.

right (SRT) Die Aufgabe besteht darin, auf jeden Reiz stets mit dem Schalter der rechten Hand zu antworten.

ipsi (CRT) Die Aufgabe besteht darin, mit dem Schalter der zum Reizort morphologisch ipsilateralen Hand zu antworten, also z.B. bei Reiz am linken Bein oder am linken Finger mit der linken Hand.

contra (CRT) Die Aufgabe besteht darin, mit dem Schalter der zum Reizort morphologisch kontralateralen Hand zu antworten, also z.B. bei Reiz am linken Bein oder am linken Finger mit der rechten Hand.

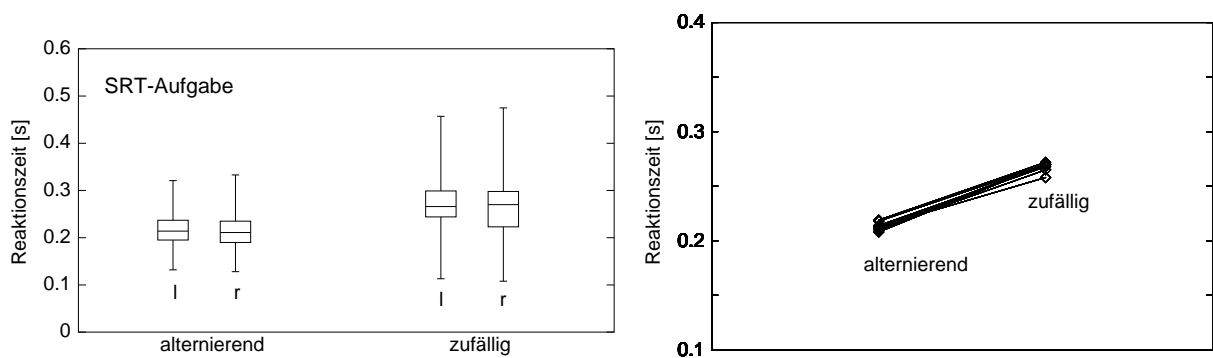
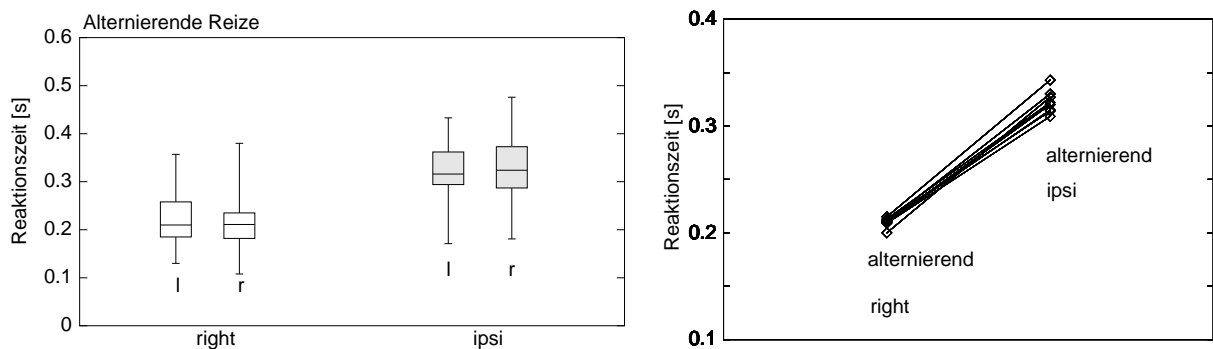


Abbildung 5.1: Alternierender oder unregelmäßiger Reiz

In der linken Abbildung sind die RTs getrennt nach dem Reizort (l: linkes Bein, r: rechtes Bein) dargestellt. In der rechten Abbildung sind die Medianwerte der VPs dargestellt. Die Werte von einer VP sind durch eine Linie verbunden. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Ordinaten

Abbildung 5.2: **right** und **ipsi** mit alternierenden Reizen

In der linken Abbildung sind die RTs getrennt nach dem Reizort (l: linkes Bein, r: rechtes Bein) dargestellt. In der rechten Abbildung sind die Medianwerte der VPs dargestellt. Die Werte von einer VP sind durch eine Linie verbunden. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Ordinaten

5.1 SRT bei bekanntem bzw. unbekanntem Reizort

In dieser SRT (Simple Reaction Time)-Aufgabe wird an der Außenseite entweder des linken oder des rechten Unterschenkels gereizt. In einem Fall („alternierend“) wird der Reiz streng alternierend links oder rechts gegeben. Im anderen Fall („zufällig“) wird der Reiz in unregelmäßiger Folge gegeben. Die VP soll stets mit dem Schalter der rechten Hand antworten (**right**). Das mit Hilfe des Zufallsgenerators erzeugte Zeitintervall zwischen den zwei Reizen liegt zwischen etwa 1 und 2 Sekunden.

In diesem Experiment soll untersucht werden, ob sich die RT unterscheidet, wenn der VP bei der SRT-Aufgabe bekannt ist, wo der Reiz zu erwarten ist (alternierend), im Vergleich zu der Situation, bei der zufällig eine von zwei möglichen Stellen gereizt wird (8 VPs).

Im ersten Experiment ergibt der alternierende Reiz (Median 212 ms) eine signifikant kürzere RT (diff. = 56 ms) als der unregelmäßige (268 ms) Reiz ($p < 0.001$, $D = 0.251$, $D_{0.001} = 0.109$). Die RT jeweils des linken und des rechten Reizortes zeigt keinen signifikanten Unterschied (Abb. 5.1, $p > 0.2$, $D = 0.031$, $D_{0.2} = 0.071$).

In einem zweiten Experiment wird der VP je ein Schalter in die rechte und die linke Hand gegeben. Die VP hat nun die Aufgabe, mit der rechten Hand zu antworten, wenn das rechte Bein, und mit der linken Hand, wenn das linke Bein gereizt wird (**ipsi**). Es handelt sich also um eine CRT-Aufgabe. Die Reihenfolge der Reize ist stets alternierend. Der Reizort ist der VP also bekannt.

An den beiden Experimenten sind jeweils dieselben 8 VPs beteiligt. Die beiden Reizorte werden immer jeweils 40 mal gereizt. Bei dem zweiten Experiment (Abb. 5.2) ergibt sich, daß die RT bei der Aufgabe **right** 211 ms und bei der Aufgabe **ipsi** 321 ms beträgt. Die beiden Werte zeigen einen signifikanten Unterschied (diff. \cong 110 ms, $p < 0.01$).

5.2 Reizung der Beine bei unterschiedlichen Beinstellungen sowie Reizung der Unterarme

In diesem Experiment soll die VP jeweils die Aufgaben **right**, **ipsi** und **contra** in verschiedenen Beinstellungen (p, xl, xr) durchführen. In einem zusätzlichen Experiment werden die SRT und beide CRT Aufgaben bei Reizung an den Unterarmen durchgeführt.

Bei der Reizung der Beine befindet sich die VP in der Grundstellung p bzw. xl oder xr (siehe Abb. 3.2). Dabei werden 4 Reizorte (lOa, lUa, rOa, rUa) jeweils 20 mal gereizt. Diese insgesamt 80 Reize werden so hergestellt, daß jede mögliche Kombination dreimal vorkommt ($3 \times 24 = 72$), und außerdem noch 8 weitere Reize gegeben werden. Die beiden Hände liegen auf einem Tisch. Der Abstand zwischen beiden Händen beträgt etwa Schulterbreite. Bei der Reizung der Arme befindet sich der Reizort am Unterarm und liegt etwa auf dem Mittelpunkt zwischen Handgelenk und Ellenbogen. Die in Abb. 5.3 und 5.4 dargestellten Experimente werden mit 6 VPs durchgeführt.

Bei der Aufgabe **right** (SRT) betragen die RT-Werte jeweils 178, 240, 235 und 248 ms in der Reihenfolge von an-den-Armen, p, xl und xr. Der kleinste Wert (178 ms) findet sich also bei Reizung auf den Armen (Abb. 5.3). Der Wert ist signifikant kleiner als bei ,p' ($p < 0.001$). Die Werte für die drei Beinstellungen (p, xl, xr) zeigen keinen signifikanten Unterschied. Die Werte sind jedoch bei Reizung an den Oberschenkeln tendenziell kürzer als an den Unterschenkeln (Abb. 5.4 a, $p > 0.1$).

Bei der Aufgabe **ipsi** sind sämtliche Medianwerte größer als bei der SRT Aufgaben (siehe Abb. 5.3, jeweils zweite Box-and-Whisker, Abb. 5.4 b). Die RTs der Aufgabe **ipsi** betragen jeweils 245, 357, 403 und 439 ms in der Reihenfolge von an-den-Armen, p, xl und xr. Die RT der Aufgabe **ipsi** bei Armen ist signifikant kürzer als bei ,p' ($p < 0.001$). Signifikante Unterschiede können auch zwischen p und xl bzw. xr gefunden werden (jeweils $p < 0.05$ und $p < 0.01$). Auch hier findet man die Unterschiede zwischen Reizorten (Oberschenkel, Unterschenkel). Sie sind allerdings nicht signifikant.

Bei der Aufgabe **contra** erhöhen sich die gesamten RT-Werte noch weiter. (Abb. 5.3, jeweils dritte Box-and-Whisker, Abb. 5.4 c). Die Werte betragen 309, 423, 485 und 463 ms in der Reihenfolge an-den-Armen, p, xl und xr. Die signifikanten Unterschiede zeigen sich hier auch zwischen an-den-Armen und p und zwischen p und xl bzw. xr (jeweils $p < 0.001$, $p < 0.01$ und $p < 0.05$).

In Abb 5.4 sind die Werte getrennt nach Reizorten dargestellt. Die Differenzen der Medianwerte zwischen Reizung am Ober- bzw. Unterschenkel betragen über alle Werte gemittelt 37 ms. Der

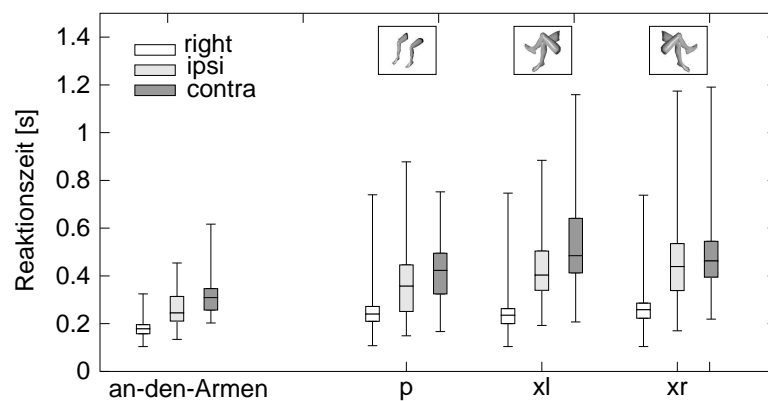


Abbildung 5.3: RT bei verschiedenen Beinstellungen und Armen SRT(right) und CRT (ipsi,contra) jeweils in der Reihenfolge von **right**, **ipsi** und **contra**

Abstand zwischen den beiden Reizorten beträgt etwa 50 cm. Vergleicht man die Medianwerte (über die beiden CRT Aufgaben gemittelt) für Reizung an den Oberschenkeln in Stellung p (393 ms) mit den Medianwerten für Reizung an den Oberschenkeln in der Stellung xl und xr (426 ms), so ergibt dies einen zwar signifikanten, aber kleinen Unterschied (33 ms). Führt man denselben Vergleich für den Unterschenkel durch, so ist diese Differenz deutlich größer (p: 390 ms, xl,xr : 482 ms, Diff. 92 ms). In allen Fällen kann kein signifikanter Unterschied zwischen Reizung der rechten und der linken Körperseite gefunden werden.

Mit 4 anderen VPs wurden ein Teil dieses Experiments (Abb. 5.5) wiederholt. Hierbei wird nur die Stellung xr untersucht und es werden nur die zwei CRT-Aufgaben, **ipsi** und **contra** durchgeführt, wobei jedoch in einem Fall auf der Außenseite und in einem anderen Fall auf der Innenseite des jeweiligen Unterschenkels gereizt wird. In allen Experimenten wird das linke und das rechte Bein jeweils 40 mal gereizt.

Die RT der Aufgabe **ipsi** beträgt bei Reizung der Außenseite 404 ms und bei Reizung der Innenseite 412 ms. Man findet keinen signifikanten Unterschied. Die RT der Aufgabe **contra** beträgt jeweils 487 ms und 488 ms. Hier ergibt sich ebenfalls kein signifikanter Unterschied.

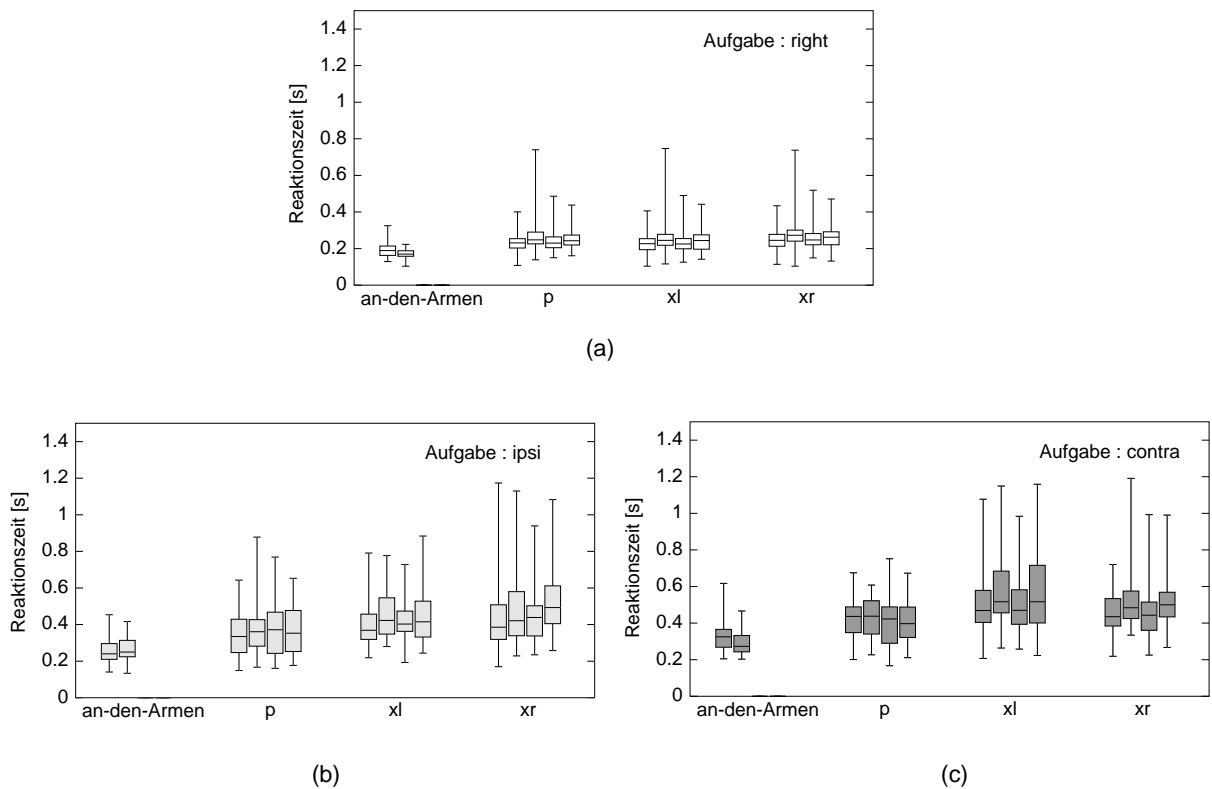


Abbildung 5.4: RT-Werte bei Reizung von 4 Orten auf den Beinen, aufgeschlüsselt nach Reizorten. a) **right**, b) **ipsi**, c) **contra**. Bei Beinen in der Reihenfolge von rOa, rUa, IOa und IUa, bei Armen in der Reihenfolge rechter und linker Arm.

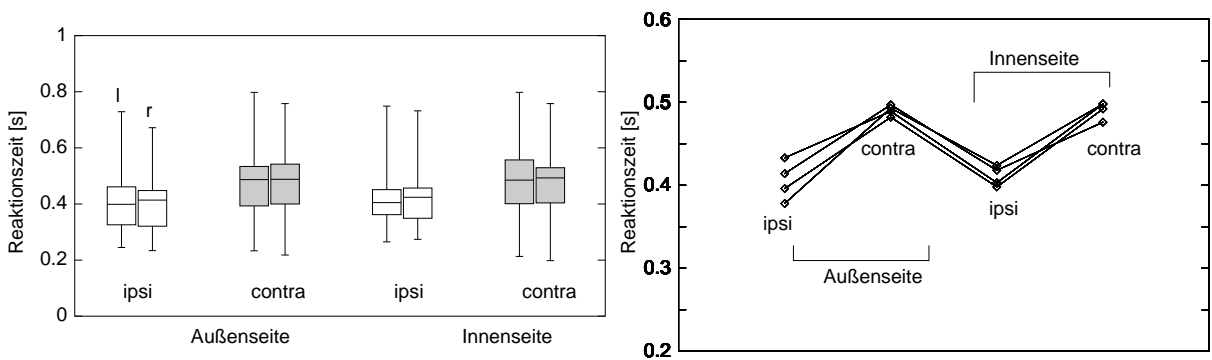


Abbildung 5.5: **ipsi** und **contra** bei xr (2 Reizorte)

In der Beinstellung xr werden die Aufgaben **ipsi** und **contra** durchgeführt. In dem ersten Experiment werden IUa, rUa (Ua: Außenseite des Unterschenkels) und in dem zweiten IUi und rUi (Ui: Innenseite des Unterschenkels) gereizt. In der rechten Abbildung sind die Medianwerte der VPs dargestellt. Die Werte von einer VP sind durch Linien verbunden. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Ordinaten.

5.3 Reizung der Beine bei paralleler Beinstellung, jedoch parallelen bzw. gekreuzten Armen

5.3.1 Methode

Die VP sitzt auf einem Stuhl und soll die Beinstellung ‚p‘ einnehmen. Die zwei Armstellungen sind folgendermaßen definiert.

hp Die Hände liegen parallel nebeneinander. Jede Hand liegt auf dem morphologisch ipsilateralen Oberschenkel (die linke Hand auf der linken Seite und vice versa).

hx Die Hände liegen überkreuzt. Jede Hand liegt auf dem morphologisch kontralateralen Oberschenkel (die linke Hand auf der rechten Seite und vice versa).

Unter den beschriebenen Bedingungen bekommt die VP die drei Aufgaben **right**, **ipsi** und **contra**. Bei überkreuzten Händen (hx) soll bei der Aufgabe **contra** also auf den Reizort reagiert werden, der geometrisch ipsilateral liegt. Die Reize werden in unregelmäßiger Weise auf den linken oder rechten Ober- bzw. Unterschenkel (Außenseite) verteilt. Für jedes Experiment werden 80 Reize gegeben (20 mal für den jeweiligen Reizort). An diesem Experiment sind 6 VPs beteiligt.

5.3.2 Ergebnisse

Bei der Aufgabe **right** beträgt der Medianwert der RTs bei paralleler Handstellung 259 ms und bei überkreuzten Händen 261 ms. Für die Aufgabe **ipsi** liegen die Medianwerte jeweils bei 385 ms und 465 ms und in der Aufgabe **contra** jeweils bei 466 ms und 435 ms.

Bei der Aufgabe **right** (siehe Abb. 5.6; die jeweilige erste Box-and-Whisker) ist kein Unterschied der RT zwischen den beiden Armstellungen festzustellen ($p > 0.2$, $D = 0.031$, $D_{0.2} = 0.071$). Im Falle der Aufgabe **ipsi** ist die RT durch das Überkreuzen der Arme signifikant gestiegen (siehe Abb. 5.6; die jeweilige zweite Box-and-Whisker; diff. 80 ms; $p < 0.001$, $D = 0.274$, $D_{0.001} = 0.129$). Bei der Aufgabe **contra** ist die RT durch das Überkreuzen der Arme abgesunken (siehe Abb. 5.6; die jeweilige letzte Box-and-Whisker; diff. $\cong 30$ ms; $p < 0.01$, $D = 0.114$, $D_{0.01} = 0.108$). Die RT der Aufgabe **contra** bei gekreuzten Armen (435 ms) ist aber höher als die der Aufgabe **ipsi** bei parallelen Armen ($p < 0.01$, $D = 0.121$).

5.4 Reizung der Beine bei paralleler Beinstellung, jedoch parallelen bzw. überkreuzten Armen sowie zusätzlicher Stimulation (Cueing) an den Armen

5.4.1 Methode

In diesem Experiment soll die VP wie in Abschnitt 5.3 die parallele Beinstellung (p) und eine von zwei Armstellungen, entweder hp oder hx einnehmen (siehe Abschnitt 5.3.1). Die VP soll die Aufga-

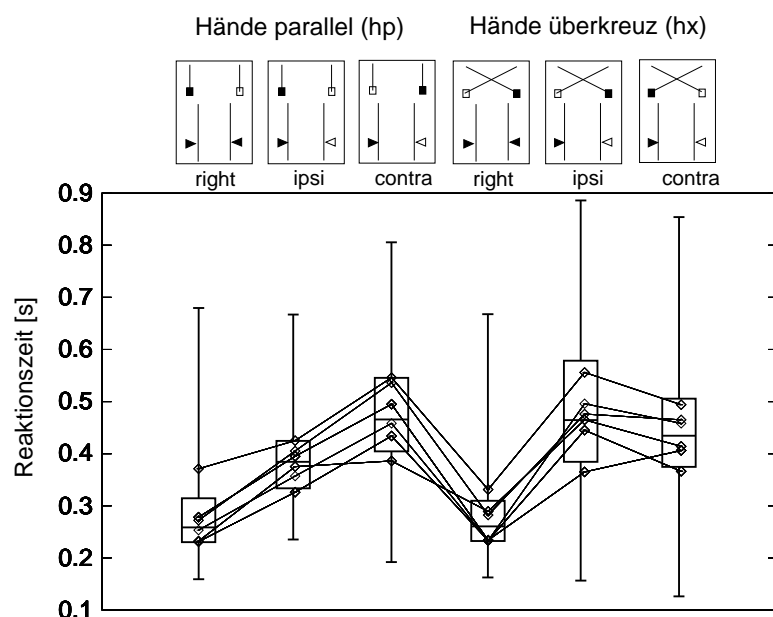


Abbildung 5.6: Reaktionszeit bei den zwei Armstellungen

hp: Hände parallel, hx: Hände überkreuz. In der Reihenfolge von **right**, **ipsi** und **contra**. Die Medianwerte von einer VP sind durch Linien verbunden. Das Schema oberhalb der Abbildung repräsentiert die experimentellen Situationen. Reizorte (S) sind durch Dreiecke und die Reaktionsorte (R) durch Quadrate gekennzeichnet. Die S-R Paare der Aufgaben sind durch die Farbe symbolisiert (weiß oder schwarz).

be **ipsi** bzw. **contra** durchführen. Im Unterschied zu Abschnitt 5.3 werden in diesem Experiment aber gleichzeitig mit einem Reiz am Bein zusätzliche Reize an beiden Handgelenken gegeben. Die VP soll jedoch nur auf den Reiz an den Beinen reagieren. 80 Reize werden in unregelmäßiger Weise auf den linken oder rechten Unterschenkel (Außenseite) gegeben (40 mal für den jeweiligen Unterschenkel). An diesem Experiment sind 10 VPs beteiligt.

5.4.2 Ergebnisse

Bei parallelen Armen betragen die RT-Werte ohne zusätzliche Stimulation 397 ms und 484 ms und mit zusätzlicher Stimulation 405 ms und 484 ms jeweils in der Reihenfolge **ipsi** und **contra** (Abb. 5.7). Entsprechend betragen die RT-Werte bei überkreuzten Armen ohne zusätzliche Stimulation 521 ms und 496 ms und mit zusätzlicher Stimulation 515 ms und 428 ms (Abb. 5.8).

Bei parallelen Händen zeigt die Aufgabe **ipsi** eine signifikant kürzere RT als die Aufgabe **contra** (siehe Abb. 5.7; diff. = 87 ms; $p < 0.01$). Dies stimmt qualitativ mit dem Ergebnis des entsprechenden, in Abb. 5.6 (hp) gezeigten Experimentes überein. Die zusätzliche Stimulation ergibt keinen signifikanten Unterschied (Vergleich der RT-Werte bei Aufgaben **ipsi** $p > 0.2$, Vergleich der RT-Werte bei Aufgaben **contra** $p > 0.1$).

Bei überkreuzten Händen zeigt die RT der Aufgabe **ipsi** ohne die zusätzliche Stimulation eine kleine, aber nicht signifikante Differenz zu den Werten der Aufgabe **contra** (siehe Abb. 5.8; linke Hälfte; diff. = 25 ms; $p > 0.15$, $D = 0.055$, $D_{0.15} = 0.057$). Dies stimmt qualitativ mit dem Ergeb-

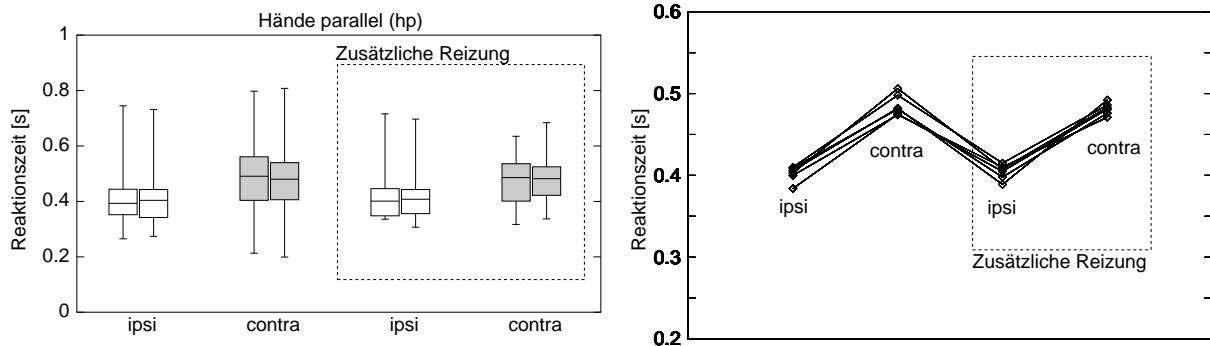


Abbildung 5.7: Reizung der Beine bei paralleler Beinstellung, parallelen Armen sowie zusätzlicher Stimulation an den Handgelenken

Das gestrichelte Kästchen bezeichnet die RTs mit der zusätzlichen Stimulation an den beiden Handgelenken. Die RTs sind paarweise nebeneinander (jeweils für die linke und rechte Hand) dargestellt. In der rechten Abbildung sind die Medianwerte der VPs dargestellt. Die Werte von einer VP sind durch Linien verbunden.

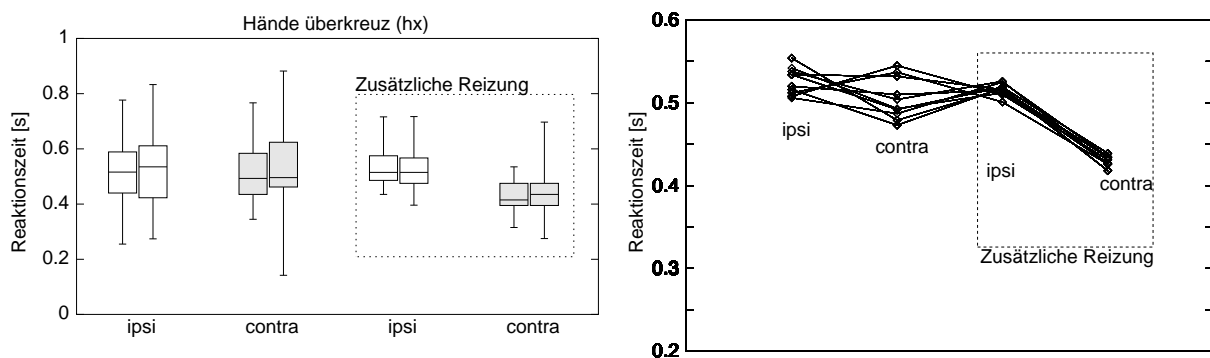


Abbildung 5.8: Reizung der Beine bei paralleler Beinstellung, überkreuzten Armen sowie zusätzlicher Stimulation an den Handgelenken

Das gestrichelte Kästchen bezeichnet die RTs mit der zusätzlichen Stimulation an den beiden Handgelenken. Die RTs sind paarweise nebeneinander (jeweils für die linke und rechte Hand) dargestellt. In der rechten Abbildung sind die Medianwerte der VPs dargestellt. Die Werte von einer VP sind durch Linien verbunden.

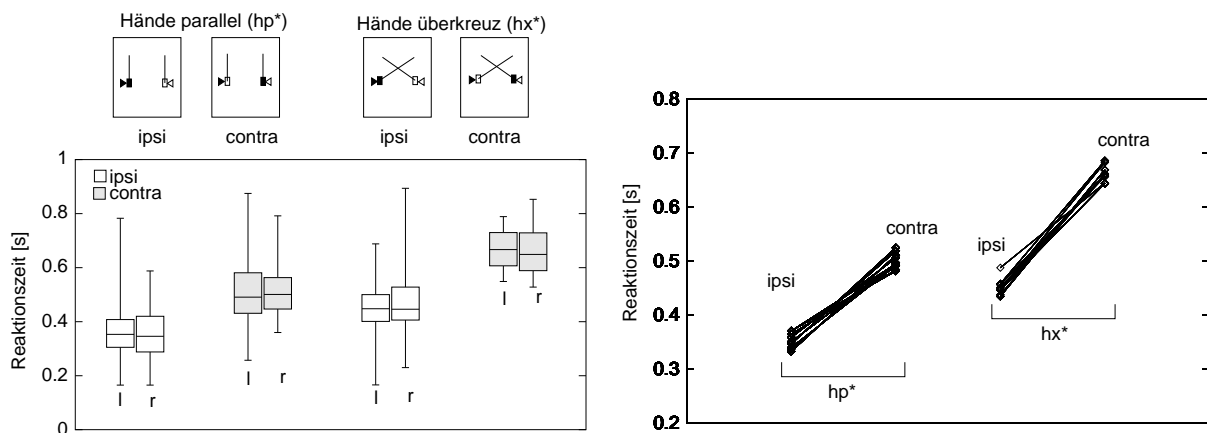


Abbildung 5.9: RT für die Aufgabe **ipsi** (hell) und **contra** (dunkel) bei der parallelen und der überkreuzten Armstellung

Die RTs sind paarweise nebeneinander jeweils für die linke (l) und rechte Hand (r) dargestellt. In der rechten Abbildung sind die Medianwerte der VPs dargestellt. Die Werte von einer VP sind durch eine Linie verbunden. Das Schema oberhalb der Abbildung repräsentiert die experimentellen Situationen. Reizorte (S) sind durch Dreiecke und die Reaktionsorte (R) durch Quadrate gekennzeichnet. Die S-R Paare der Aufgaben sind durch die Farbe symbolisiert (weiß oder schwarz).

nis des entsprechenden, in Abb. 5.6 (hx) gezeigten Experimentes überein. Falls jedoch die beiden Handgelenke zusätzlich mitgereizt werden, wird die Differenz größer (siehe Abb. 5.8; innerhalb des gestrichelten Kästchens; $\text{diff.} = 87 \text{ ms}$; $p < 0.001$, $D = 0.391$, $D_{0.001} = 0.097$). Auffällig ist noch, daß bei der zusätzlichen Stimulation die Streuung kleiner ist.

5.5 CRT Aufgabe bei Reizung an den Fingerspitzen

5.5.1 Methode

Die VP sitzt vor einem Tisch. Beide Hände liegen auf dem Tisch. Der Abstand zwischen beiden Zeigefingern beträgt 13 cm. Die Reizung erfolgt an den Fingerspitzen. In diesem Experiment liegen also Reiz- und Reaktionsort sehr nahe. Dabei werden die Arme einmal parallel (hp*) und einmal überkreuzt (hx*) gehalten. 80 Reize werden in unregelmäßiger Weise auf die linke oder rechte Zeigefingerspitze gegeben (40 mal für den jeweiligen Finger). Die VP soll die Aufgaben **ipsi** und **contra** durchführen. An diesem Experiment sind 10 VPs beteiligt.

5.5.2 Ergebnisse

Die RT-Werte betragen bei der parallelen Handstellung 350 ms und 501 ms und bei den gekreuzten Händen 447 ms und 660 ms jeweils in der Reihenfolge **ipsi** und **contra**.

Die höchste RT ist zu sehen, falls die Hände gekreuzt sind und die VPs die **contra**-Aufgabe durchführen (siehe Abb. 5.9; hx*). Bei der Aufgabe **ipsi** in hx* ist die RT etwa 50 ms kürzer als bei der Aufgabe **contra** in hp* ($p < 0.05$, $D = 0.075$, $D_{0.05} = 0.068$). In den beiden Konditionen (parallel und

überkreuz) ergibt die **contra**-Antwort immer die höhere RT als die jeweilige **ipsi**-Antwort ($p < 0.001$, $D = 0.132$, $D_{0.001} = 0.097$ in hp*; $p < 0.001$, $D = 0.231$ in hx*). Das Überkreuzen der Arme bewirkt hier also stets eine Erhöhung der RT.

5.6 SRT Aufgabe mit Distraktor

5.6.1 Methode

In diesem Experiment werden 4 Reizorte (lOa, lUa, rOa, rUa) in der Beinstellung ‚p‘ gereizt. In dieser Versuchsserie soll die VP aber nur eine Stelle, den linken Unterschenkel (lUa) beachten, wobei die VP diesmal nur einen Schalter in der rechten Hand hält, und die rechte Hand immer auf dem rechten Oberschenkel liegt. Die Aufgabe der VP besteht darin, nur zu antworten, wenn die zu beachtende Stelle gereizt wird. Die zu beachtende Stelle wird in unregelmäßiger Folge ohne oder zusammen mit einer der drei anderen Stellen gereizt. Jede dieser vier Reizsituationen kommt gleich oft vor. In 3 verschiedenen Versuchsserien wird der Distraktorreiz 0, 20 oder 40 ms zuvor gegeben. Diese zeitlichen Abstände konnten die VPs nicht wahrnehmen. Ausgewertet werden jeweils die RTs auf den Reiz bei lUa, wobei die Resultate für Reiz mit und ohne Distraktor getrennt dargestellt sind.

5.6.2 Ergebnisse

Die RT-Werte ohne Distraktor betragen jeweils 355, 323 und 326 ms in den jeweiligen Bedingungen „Vorlauf“ von 0, 20 und 40 ms. Zwischen diesen Werten kann kein signifikanter Unterschied gefunden werden. Jedoch ist die RT bei der Bedingung „Vorlauf von 0 ms“ etwa 30 ms höher als die anderen. Mit Distraktor ergeben die RT-Werte 338, 287 und 284 ms jeweils in derselben Reihenfolge. In Abb. 5.10 sind die Werte getrennt nach dem Ort des Distraktorreizes aufgetragen. Zwischen diesen Werten ergeben sich innerhalb einer Bedingung keine signifikanten Unterschiede. Vergleicht man die RT-Werte, die mit und ohne Distraktor erhalten wurden, so zeigt sich bei dem Vorlauf von 0 ms keine signifikante Änderung der RT. Hingegen zeigen sich bei einem Vorlauf von 20 und 40 ms signifikante Verkürzungen der RT (in den beiden $p < 0.05$) um etwa 35 – 40 ms.

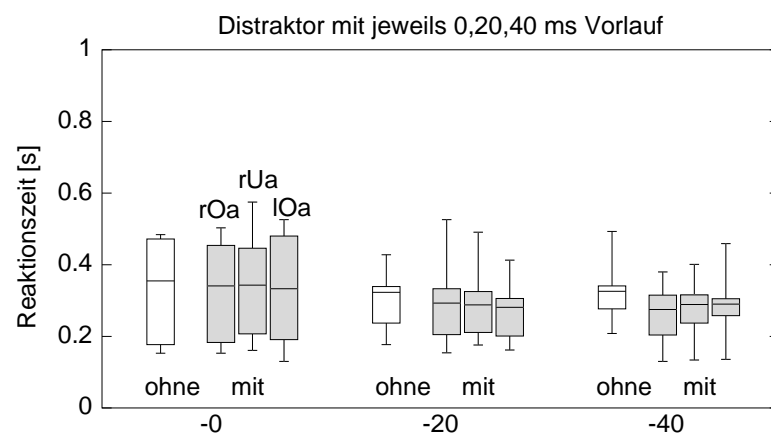


Abbildung 5.10: Die VP soll nur auf Reizung bei IUa Stelle (die Außenseite des linken Unterschenkels) reagieren. Die Messungen werden ohne (hell) oder mit einem Distraktor (dunkel) durchgeführt. Dieser wird 0, 20 oder 40 ms vor dem IUa Reiz gegeben.

6 CRT Aufgabe bei Reizung an der Innenseite und Außenseite eines Beines

Während sich die Aufgabe **ipsi** oder **contra** bisher auf die rechte und linke Körperhälfte bezog, bezieht sie sich in diesen Experimenten auf die rechte (Innenseite) bzw. linke Seite (Außenseite) eines, hier des linken, Beines.

6.1 Variation der Handstellungen

6.1.1 Methode

Die Reize werden am linken Unterschenkel und zwar entweder auf der Innenseite oder auf der Außenseite appliziert. Dabei soll die VP die folgenden Aufgaben ausführen.

ipsi Die Aufgabe besteht darin, auf den Außen-Reiz mit dem Schalter der linken Hand und auf den Innen-Reiz mit dem Schalter der rechten Hand zu antworten.

contra Die Aufgabe besteht darin, auf den Außen-Reiz mit dem rechten und auf den Innen-Reiz mit dem linken Schalter zu antworten.

In drei experimentellen Serien werden drei verschiedene Handstellungen verwendet (Abb. 6.1):

1. beide Hände liegen auf dem rechten Oberschenkel (hr)
2. die linke Hand liegt auf dem linken, die rechte auf dem rechten Oberschenkel (hp)
3. beide Hände liegen auf dem linken Oberschenkel (hl)

Diese drei Bedingungen werden für jede VP in verschiedener Reihenfolge untersucht. Die unterschiedliche Reihenfolge zeigte keinen signifikanten Einfluß auf die RTs. 80 Reize werden in unregelmäßiger Weise auf die Innen- oder Außenseite des linken Unterschenkels gegeben (40 mal für den jeweiligen Ort). An diesem Experiment sind 10 VPs beteiligt.

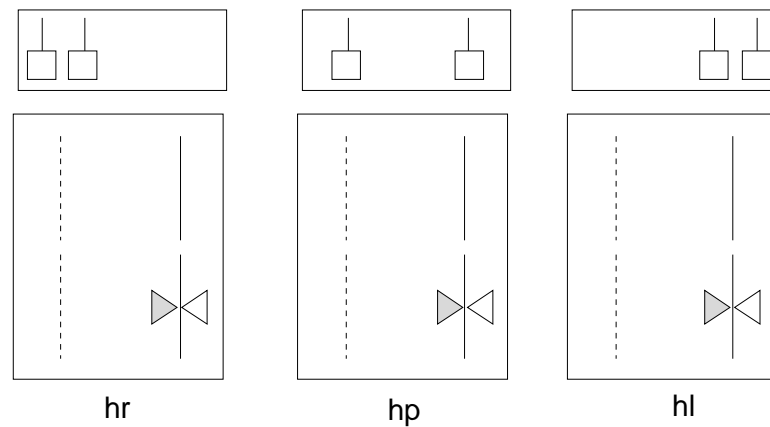


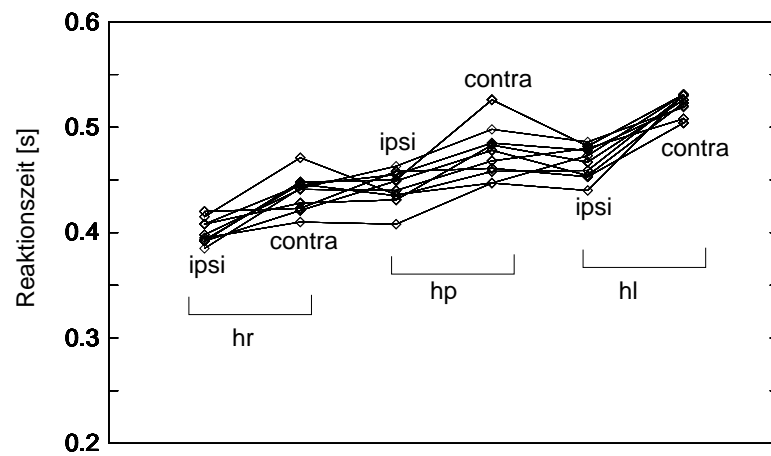
Abbildung 6.1: Handstellungen und Reizorte

Die drei Handstellungen sind im oberen Kästchen als Quadrat jeweils in der Reihenfolge von hr, hp und hl dargestellt. Die Dreiecke bezeichnen den Reiz an der Innenseite (dunkel) und der Außenseite (hell).

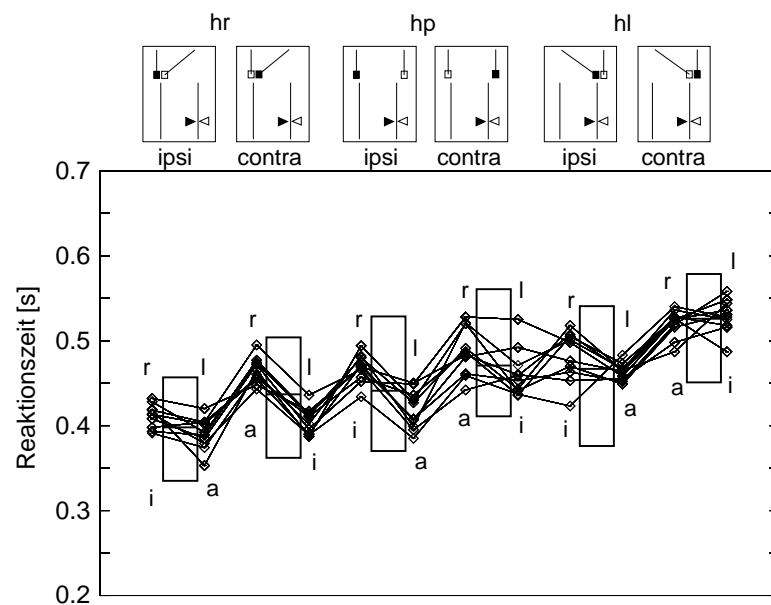
6.1.2 Ergebnisse

Die Medianwerte liegen bei der Aufgabe **ipsi** jeweils bei 397 ms, 440 ms und 466 ms und bei der Aufgabe **contra** jeweils bei 436 ms, 470 ms und 525 ms in der Reihenfolge von hr, hp und hl (Abb. 6.2 a).

Als genereller Befund ist zu erkennen, daß die RT in der Reihenfolge von hr, hp und hl ansteigt (siehe Abb.6.2 a; zwischen hr und hl $p < 0.01$, $D \cong 0.089$, $D_{0.01} = 0.081$). Eine ähnliche Tendenz ist auch bei den Daten aus dem Verhaltensexperiment des Kap. 4 (Abb. 6.3) zu erkennen (zwischen hr und hl $p < 0.01$, $D = 0.107$, $D_{0.01} = 0.105$). Die RT der Aufgabe **contra** ist tendenziell höher als die der Aufgabe **ipsi**, aber das Verhalten der RTs ist unterschiedlich je nach dem Ort der Reize. In Abb. 6.2 (b) sind die RTs nach dem Reaktionsort bzw. Reizort sortiert. Die Antwort auf Reizung der Außenseite (mit ‚a‘ gekennzeichnet) ist immer schneller, wenn die linke Hand reagiert (ohne Berücksichtigung der Handstellungen $p < 0.05$, $D \cong 0.102$, $D_{0.05} = 0.096$). Hingegen hängen die Antworten auf Reizung der Innenseite (mit ‚i‘ gekennzeichnet) von der jeweiligen Stellung ab. Falls die beiden Hände auf dem linken Oberschenkel liegen (hl), ist die RT der rechten Hand kürzer als die der linken Hand ($p < 0.05$, $D = 0.113$, $D_{0.05} = 0.096$).



(a)



(b)

Abbildung 6.2: Reizung am linken Unterschenkel mit unterschiedlichen Armstellungen
 a) Die RTs sind nach den Handstellungen (hr, hp und hl) und dem durchgeführten Aufgabentyp (**ipsi** oder **contra**) dargestellt. Die Medianwerte von einer VP sind durch Linien verbunden. b) Die RTs sind paarweise nach den Reaktionsorten (l: linke Hand, r: rechte Hand) bzw. nach den Reizorten (i: Innenseite, a: Außenseite des linken Beines) angeordnet. Zur besseren Darstellungen sind die ‚Whiskers‘ weggelassen. Das Schema oberhalb der Abbildung repräsentiert die experimentellen Situationen. Reizorte (S) sind durch Dreiecke und die Reaktionsorte (R) durch Quadrate gekennzeichnet. Die S-R Paare der Aufgaben sind durch die Farbe symbolisiert (weiß oder schwarz).

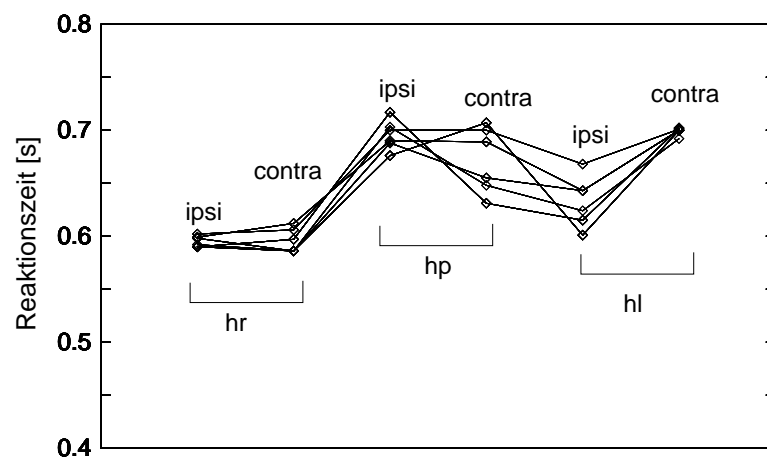


Abbildung 6.3: Einige RTs aus dem in Abb. 4.8 dargestellten Verhaltensexperiment des Kap. 4. Die Daten sind zum besseren Vergleich passend zu 6.2 (a) sortiert dargestellt. Die Werte von einer VP sind durch Linien verbunden.

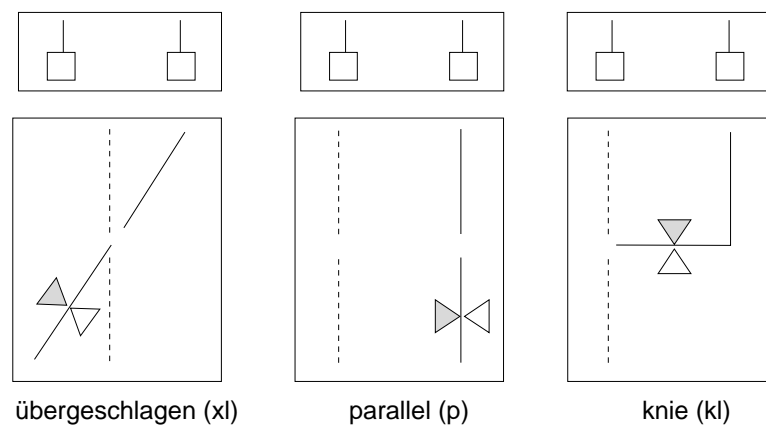


Abbildung 6.4: Beinstellungen und Reizorte

Die drei Beinstellungen sind im unteren Kästchen jeweils in der Reihenfolge xl, p und kl dargestellt. Die Dreiecke bezeichnen den Reiz an der Innenseite (dunkel) und der Außenseite (hell).

6.2 Variation der Beinstellungen

6.2.1 Methode

Die Reize werden wieder am linken Unterschenkel (innen oder außen) appliziert. Dabei soll die VP die Aufgaben **ipsi** und **contra** (siehe Abschnitt 6.1.1) ausführen.

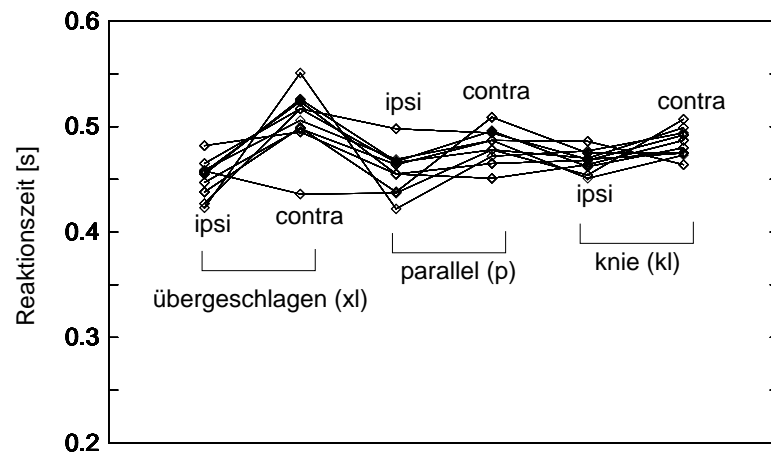
Wie in Abb. 6.4 gezeigt, werden nun 3 verschiedene Beinstellungen verwendet (p: parallel, xl: übergeschlagen, kl: knie). Die beiden Hände liegen immer auf dem jeweiligen morphologisch ipsilateralen Oberschenkel. Dies entspricht also der Position hp des vorhergehenden Experimentes. 80 Reize werden in unregelmäßiger Weise auf die Innen- oder Außenseite des linken Unterschenkels gegeben (40 mal für den jeweiligen Ort). An diesem Experiment sind 10 VPs beteiligt.

6.2.2 Ergebnisse

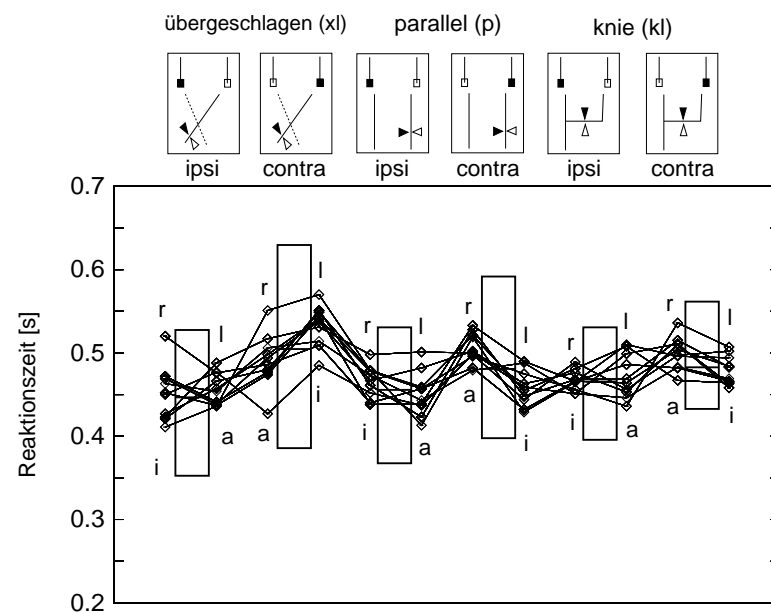
Bei der Aufgabe **ipsi** ergeben die RT-Werte 447 ms, 456 ms und 466 ms (kein signifikanter Unterschied, $p > 0.2$) und bei der Aufgabe **contra** 505 ms, 481 ms und 483 (kein signifikanter Unterschied, $p > 0.2$) jeweils in der Reihenfolge von xl, p und kl (Abb. 6.5 a).

Die Medianwerte der Aufgabe **contra** sind höher als für die Aufgabe **ipsi** (siehe Abb.6.5 a; $p < 0.05$, $D = 0.075$, $D_{0.05} = 0.068$), aber die RTs zeigen eine unterschiedliche Tendenz je nach dem Ort des Reizes. Die RT ist im allgemeinen kürzer, wenn mit der linken Hand auf die Reizung der Außenseite reagiert werden muß (siehe Abb.6.5 b; vergl. die mit ‚a‘ gekennzeichneten Stellen; $p < 0.01$, $D = 0.128$, $D_{0.01} = 0.115$). Die Reizung der Innenseite ergibt aber je nach der eingenommenen Beinstellung unterschiedliche RT-Werte. Falls die Beine übergeschlagen sind, ist die RT der rechten Hand signifikant kürzer als die RT der linken Hand ($p < 0.001$, $D = 0.205$, $D_{0.001} = 0.138$). Bei der Knie-Stellung (kl) ist der Unterschied zwischen der linken und der rechten Hand sehr gering ($p > 0.2$, $D = 0.073$, $D_{0.2} = 0.076$), aber die Reaktion mit der rechten Hand ist tendenziell schneller.

Die RT hängt also davon ab, ob an der Innen- oder der Außenseite gereizt wird. Die Außenseite



(a)

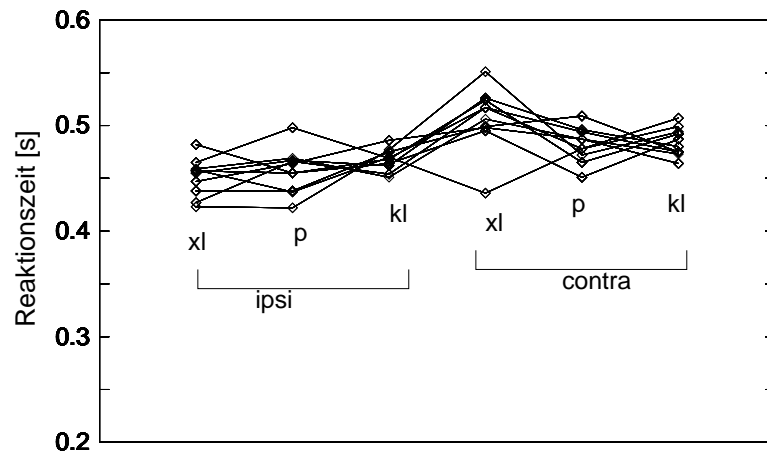


(b)

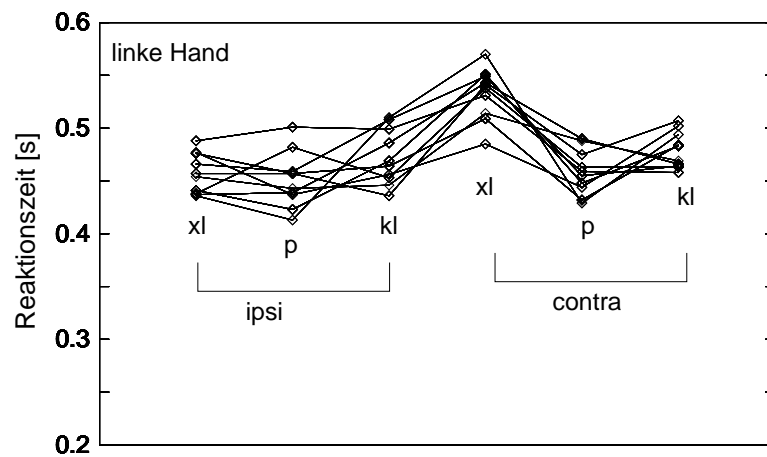
Abbildung 6.5: Reizung am linken Unterschenkel mit unterschiedlichen Beinstellungen
 Die Darstellungen sind analog zur Abb. 6.2. Hier wird aber nicht die Handstellung, sondern Beinstellung variiert. a) Medianwerte für die drei Beinstellungen (xl, p, kl). b) Die RTs sind paarweise nach den Reaktionsorten (l: linke Hand, r: rechte Hand) bzw. nach den Reizorten (i: Innenseite, a: Außenseite des linken Beines) sortiert. Zur besseren Darstellungen sind die ‚Whiskers‘ weggelassen. Das Schema oberhalb der Abbildung repräsentiert die experimentellen Situationen. Reizorte (S) sind durch Dreiecke und die Reaktionsorte (R) durch Quadrate gekennzeichnet. Die S-R Paare der Aufgaben sind durch die Farbe symbolisiert (weiß oder schwarz).

ist immer für die linke Hand ‚leichter‘. Hingegen reagiert die Innenseite auf die Körperstellung. Das heißt, wenn das linke Bein auf der anderen (rechte) Seite liegt (xl), ist die RT (Innenseite) der rechten Hand kürzer, während das Umgekehrte der Fall ist, wenn das linke Bein auf derselben (linke) Seite liegt (p). Bei der Beinstellung kl wird der Reizort nach rechts bewegt, bleibt aber immer noch auf der linken Seite. Entsprechend zeigt die RT zwischen der linken und rechten Hand nur eine kleine Änderung verglichen mit der Stellung p.

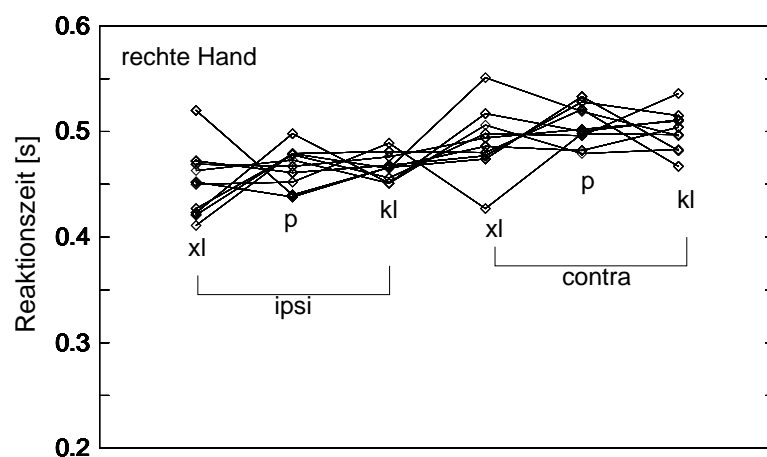
Bei derselben Aufgabe (**ipsi** oder **contra**) zeigen die RTs der rechten Hand keinen signifikanten Unterschied zwischen den Beinstellungen (Abb. 6.6 c). Hingegen ergeben die RTs der linken Hand bei der Aufgabe **contra** signifikante Unterschiede zwischen den Beinstellungen (Abb. 6.6 b, zwischen xl und p; $p < 0.001$, $D = 0.232$, $D_{0.001} = 0.138$, zwischen p und kl; $p < 0.01$, $D = 0.123$, $D_{0.01} = 0.115$, zwischen xl und kl; $p < 0.001$, $D = 0.168$).



(a)



(b)



(c)

Abbildung 6.6: Ergebnisse der Abb. 6.5 werden getrennt nach der Aufgabe **ipsi** und **contra** dargestellt. Die Medianwerte von einer VP sind durch Linien verbunden. a) RTs der beiden Hände. b) RTs der linken Hand. c) RTs der rechten Hand.

7 Messungen am Oberkörper

7.1 Reaktion bei Reizung einer Körperstelle

Bei diesen Versuchen sind dieselben VPs beteiligt, die an den Experimenten des Kap. 4 teilgenommen haben. Weil die Reaktionszeiten deutlich länger zu sein schienen als bei den oben beschriebenen Experimenten, wurde dieser Versuch an anderen Tagen noch zweimal wiederholt. Die Ergebnisse sind in Abb 7.1 zusammengefaßt.

7.2 Reaktion bei der gleichzeitigen Reizung von 2 Körperstellen

Dieselben VPs sind beteiligt. In dieser Serie werden aber zwei Stellen gleichzeitig gereizt, wobei die beiden Hände jeweils zu einem Punkt bewegt werden sollen. Jede Kombination wird fünfmal verwendet. Die Ergebnisse sind in Abb 7.2 schematisiert zusammengefaßt.

7.3 Reaktion bei der gleichzeitigen Reizung von 3 Körperstellen

In dieser Serie werden 3 Stellen gleichzeitig gereizt, von denen die VP zwei Punkte auswählen soll. An diesem Versuch sind 3 VPs beteiligt und jede Kombination wird zweimal verwendet.

7.4 Resultate

Beim Zielen mit einer Hand auf den Oberkörper (Abb 7.1) sind die Ergebnisse mit sehr großen Streuungen behaftet. Auch scheint es zwei Typen von Reaktionen zu geben (Bevorzugung der ipsilateralen bzw. kontralateralen Hand). Durch Abänderung der Versuchsanordnung – 2 oder 3 Reize werden zugleich gegeben und beide Hände sollen verwendet werden – ergeben sich wesentlich klarere Befunde. Bei 2 gereizten Stellen (Abb 7.2) wird stets die ipsilaterale und nicht kontralaterale Hand bevorzugt. Dies ist allerdings weitgehend geometrisch bedingt. Interessanter sind die Befunde, daß beim Vergleich oben/unten mit der ipsilateralen Hand stets die obere Stelle gewählt wird. Hier wäre geometrisch auch die Alternative denkbar. Bei drei Reizorten (Abb 7.3) wird ebenfalls die

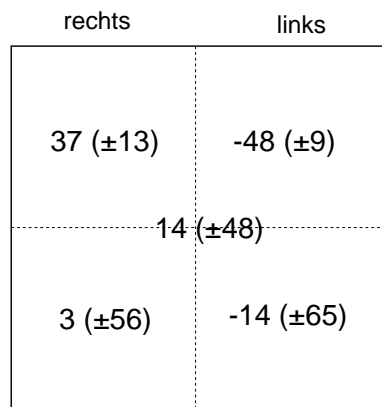


Abbildung 7.1: Händigkeit beim Oberkörper

Angegeben sind die Händigkeit und die Standardabweichung (in Klammern), die jeweils am Reizort eingetragen sind. Das Rechteck stellt schematisch den Blick auf den Oberkörper dar.

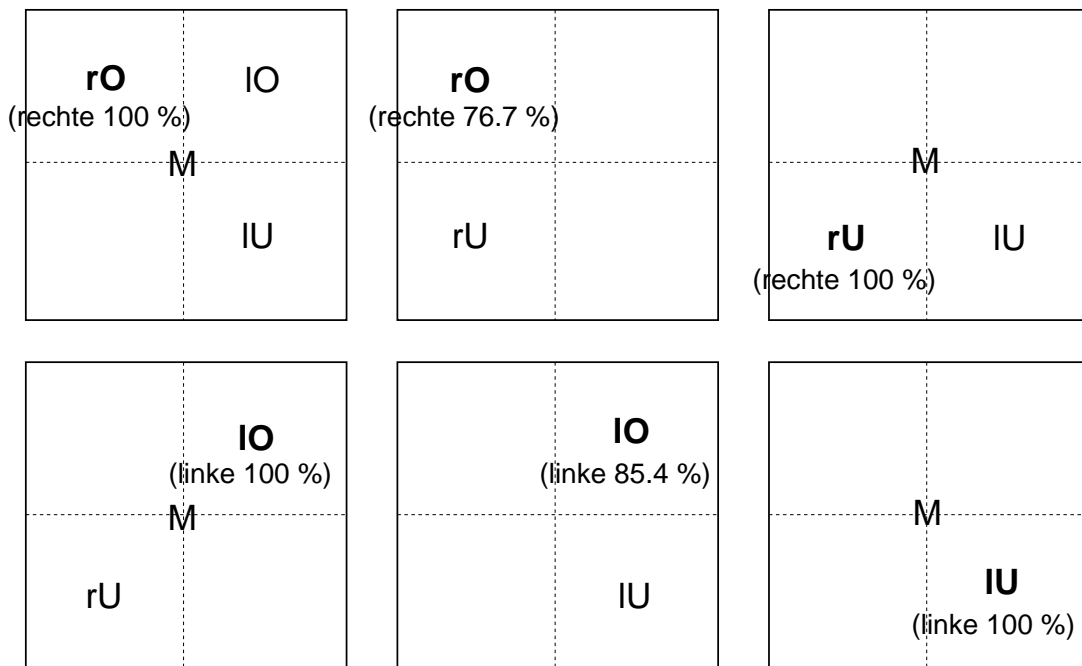


Abbildung 7.2: 2 Reize am Oberkörper (parallele Handstellung)

Die fett geschriebene Stelle wurde zusammen mit einer der anderen Stellen gereizt. In Klammern wird gezeigt, welche Hand (rechte oder linke) wie häufig [%] die fett geschriebene Stelle berührte.

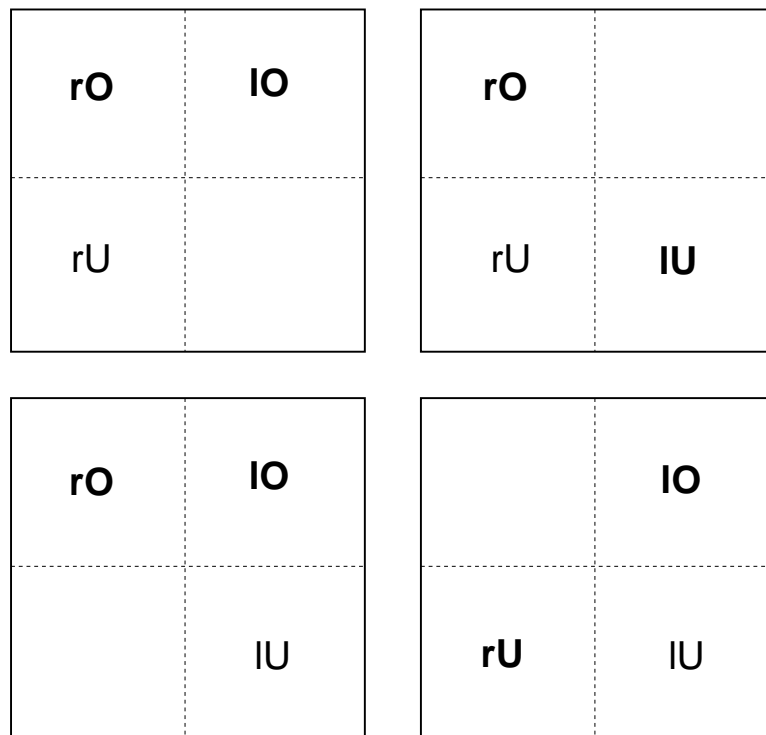


Abbildung 7.3: 3 Reize am Oberkörper (parallele Handstellung)
Die fett geschriebenen Stellen sind die zwei ausgewählten Stellen.

ipsilaterale gegenüber der kontralateralen Hand bevorzugt und die obere gegenüber der unteren. In der Tendenz stimmt das mit den Befunden der ersten Serie (Abb. 7.1) überein.

8 Diskussion

In Kap. 5 wurde mit Hilfe von RT Messungen untersucht, ob und inwieweit sich die Änderung der Körperstellung auf die mentale Verarbeitung bei der Zuordnung von Reiz- und Reaktionsorten auswirkt. In Vorversuchen wurde zunächst der Reaktionsort festgelegt (SRT Aufgabe). Wenn hierbei auch der Reizort vorher bekannt ist, erhält man kürzere RTs als wenn nicht bekannt ist, welcher von zwei möglichen Orten gereizt wird (Abb. 5.1, alternierend, 212 ms vs. zufällig, 268 ms). Eine Voraktivierung des motorischen Programms kann den Unterschied nicht erklären, da der Reaktionsort jeweils derselbe ist. Eine Voraktivierung ist deshalb in beiden Situationen, also auch bei zufälliger Auswahl der Reizorte, nicht möglich. Allerdings könnte eine der beiden folgenden Annahmen eine Erklärung bieten. Zum einen könnte beim ersten im Unterschied zum zweiten Experiment die Verbindung zwischen Reizort und Reaktionsort, also die S-R Paarung, bereits vor dem Erscheinen des Reizes aktiviert sein. Weiter unten wird allerdings begründet, daß diese Erklärung, zumindest für die CRT Aufgabe, eher unwahrscheinlich ist. Eine zweite Erklärung könnte darin bestehen, daß im ersten Fall, also bei bekanntem Reizort, die Aufmerksamkeit schon vor Reizbeginn auf den Reizort gerichtet werden kann, was eine schnellere Reaktion ermöglicht. Bei visuellen Reiz ist bekannt, daß die auf den Reiz gerichtete Aufmerksamkeit die Reaktion beschleunigt (Pashler, 1997; Hikosaka et al., 1996).

Wenn man zwar den Reizort festlegt, aber während des Experimentes gleichzeitig mit dem zu beachtenden Reiz auch Distraktorreize gibt, also Reize an anderer Körperstellen, die vorher aber als nicht zu beachten vorgegeben werden, so erhöht sich die RT dennoch deutlich (Abb. 5.10, 355 ms, 338 ms). Obwohl man im Prinzip erwarten könnte, daß die VP die Distraktoren ausblenden können sollte, macht das mögliche oder tatsächliche Auftreten von Distraktoren die Aufgabe schwieriger. Das Ausblenden von Distraktoren scheint also nicht oder nicht vollständig möglich zu sein. Dies ist biologisch durchaus sinnvoll, da in einer natürlichen Situation normalerweise nicht davon ausgegangen werden kann, daß bestimmte Reize nicht auftreten ("man muß stets mit allem rechnen"). Daher werden immer alle Reize bearbeitet, was die RT offenbar verlängert.

Erstaunlich ist, daß in den Experimenten der Abb. 5.2 (alternierend), bei denen sowohl der Reizort als auch der Reaktionsort im Prinzip vorher bekannt ist, dennoch die RT bei der Aufgabe **ipsi** im Vergleich zur SRT Aufgabe **right** deutlich (um 110 ms) erhöht wird. Dies liegt entweder daran,

daß die Verschiebung des Aufmerksamkeitsfokus mehr Zeit braucht als sie in diesem Experiment zur Verfügung steht. Dies kann aber zumindest nicht die ganze Erklärung sein, da der Unterschied wesentlich größer ist als im Experiment der Abb. 5.1. Man muß daher vermuten, daß die Erhöhung der RT in Abb. 5.2 darauf zurückzuführen ist, daß von dem einen S-R Paar auf das andere umgeschaltet werden muß. Wenn dies richtig ist, sollte die RT der Aufgabe **ipsi** auf den Wert der Aufgabe **right** absinken, wenn die Zeit zwischen zwei Reizen genügend groß ist.

In allen folgenden Versuchen wurde die SRT Aufgabe (**right**) in verschiedenen Situationen mit den CRT Aufgaben (**ipsi**, **contra**) verglichen. Bei der SRT Aufgabe liegt der Reaktionsort fest, bei den CRT Aufgaben hängt er von der Art (hier dem Ort) des Reizes ab. Hierbei muß also eine S-R Paarung hergestellt werden. Die grundlegenden Ergebnisse sind in Abb. 5.3 und 5.6 dargestellt. Sowohl bei Reizung am Arm (Abb. 5.3, links) als auch bei Reizung an den Beinen bei paralleler oder überkreuzter Beinstellung (Abb. 5.3, p, xl, xr; Abb. 5.6, hp) findet man eine Zunahme der RT in der Reihenfolge **right**, **ipsi** und **contra**. Im Experiment der Abb. 5.6 (hp) beträgt die RT bei der Aufgabe **right** 259 ms und bei der Aufgabe **ipsi** 385 ms. Der Unterschied von 126 ms entspricht etwa der in Abb. 5.2 beschriebenen Differenz von 110 ms. Man könnte daher als einfachste Erklärung für beide Resultate vermuten, daß diese Erhöhung der RT nur durch den Unterschied der SRT Aufgabe und der CRT Aufgabe bedingt ist, d.h., daß bei der SRT Aufgabe das S-R Paar schon vorher festliegt, während es bei der CRT Aufgabe erst nach Reizbeginn aktiviert wird. Der zweite Unterschied zwischen den beiden Experimenten, nämlich die Tatsache, daß im ersten Experiment (Abb. 5.2), im Unterschied zum zweiten Experiment (Abb. 5.6, hp), Reizort und Reaktionsort vorher bekannt waren, spielt danach keine wichtige Rolle. Dies würde also, für die CRT Aufgabe, der oben geäußerten Vermutung widersprechen, daß die Aktivierung eines S-R Paares bereits vor dem Beginn des Reizes möglich ist. Dies könnte daran liegen, daß nicht mehrere S-R Paare oder auch nur motorische Programme gleichzeitig aktiviert werden können. Hierfür könnte eine WTA (winner-takes-all)-ähnliche Schaltung verantwortlich sein.

Vergleicht man die beiden CRT Aufgaben **ipsi** und **contra**, so erhöht sich die RT noch weiter (Abb. 5.3 Reizung an-den-Armen, 64 ms; Abb. 5.3 p, 66 ms; Abb. 5.6 hp, 81 ms; Abb. 5.5, 83 ms bzw. 76 ms; Abb. 5.7, 87 ms bzw. 79 ms; Abb. 5.9, Reizung der Fingerspitzen, 151 ms). Die Bildung des S-R Paares dauert also in diesen Experimenten, bei denen Reizort und Reaktionsort auf verschiedenen Körperseiten liegen, länger. Das entspricht der in Kap. 2 beschriebenen Vorstellung zur S-R Kompatibilität, die bisher auf der Basis von Experimenten mit visuellen und akustischen Signalen aufgestellt wurde. Man kann sie aufgrund der hier beschriebenen Experimente nun auch auf taktile Signale erweitern. Die Details für S-R Kompatibilität, die sich mit visuellem bzw. akustischem Reiz befassen, findet man in (Eimer et al., 1995; Hommel, 1997; Kornblum et al., 1990).

Eine naheliegende Vermutung zur Erklärung dieses Befundes, die, wie in Kap. 2 erwähnt, schon von Poffenberger geäußert wurde, wäre die, daß es einfacher und damit schneller möglich ist, Reizort und Reaktionsort zu verbinden, wenn diese innerhalb einer Gehirnhemisphäre repräsentiert sind als wenn sie in verschiedenen Hemisphären liegen. Wiederholt man allerdings das Experiment mit überkreuzter Handstellung (Abb. 5.6, hx, Abb. 5.8, rechts), so wird jetzt für die **contra** Aufga-

be eine niedrigere RT benötigt als für die **ipsi** Aufgabe. Dies stimmt mit Ergebnissen von Wallace (1971,1972) und Tlauka (1998) überein, bei denen aber nur visuelle Reize verwendet wurden. Die morphologische Nähe innerhalb des Gehirns, etwa in Form der sensomotorischen Karten, kann also dieses Ergebnis nicht erklären. Vielmehr liegt es nahe, hier anzunehmen, daß die tatsächliche räumliche Nähe von Reiz- und Reaktionsort die entscheidende Rolle spielt. Hierfür reicht es nicht aus, den Reizort auf einer mentalen Karte abzubilden. Vielmehr muß bei der hierfür notwendigen Berechnung der Lage der Reizorte im Raum auch propriozeptive Information verwandt werden. Die Hypothese, daß ausschließlich die geometrische Nähe zwischen Reiz- und Reaktionsort entscheidend ist, könnte auch die genannten Befunde der **ipsi** und **contra** Aufgabe bei paralleler Beinstellung (Abb. 5.3, 5.5, 5.6 hp) beschreiben.

Die Tatsache, daß in Abb. 5.6 (hx) der RT-Wert der **contra** Aufgabe zwar, wie gesagt, kleiner ist als der Wert für die **ipsi** Aufgabe, er aber doch noch größer ist als der Wert der **ipsi** Aufgabe für die parallele Handstellung (Abb. 5.6 hp), zeigt jedoch, daß aufgrund der geometrischen Nähe alleine aber doch keine vollständige Erklärung aller Befunde möglich ist. Es ist hier zu vermuten, daß die Tatsache, daß die Arme überkreuz gehalten werden, die Aufgabe erschwert. Dies scheint auch für das Überkreuzen der Beine zu gelten. Bei den Stellungen xl und xr werden die Unterschenkel überkreuzt, während sich die Oberschenkel eher in derselben Lage wie bei der parallelen Beinstellung befinden. Vergleicht man die Stellung mit parallelen Beinen mit der bei überkreuzten Beinen, so unterscheiden sich die RT-Werte für Reizung an den Unterschenkeln deutlich (um 92 ms, Abb. 5.4 b, c). Führt man den entsprechenden Vergleich für die Reizung an den Oberschenkeln durch, so findet man zwar immer noch einen Unterschied. Dieser ist aber wesentlich kleiner (33 ms).

Die Vermutung, daß das Überkreuzen der Arme die RT erhöht, wird durch das in Abb. 5.9 dargestellte Ergebnis bestätigt. In diesem Experiment wird beim Überkreuzen der Arme der Reizort zusammen mit dem Reaktionsort bewegt. Aufgrund der Anlage dieses Versuches liegt also bei beiden **ipsi** Aufgaben stets geometrische Nähe vor, während bei beiden **contra** Aufgaben Reiz- und Reaktionsort stets weiter voneinander entfernt sind. Die RT-Werte sind im ersten Fall immer kleiner als im zweiten Fall (Differenz 151 ms bzw. 163 ms). Dieses Ergebnis spricht also zunächst wieder dafür, daß die RT vom geometrischen Abstand zwischen Reizort und Reaktionsort abhängt. Dieses Experiment liefert aber noch einen zweiten Hinweis. Die RT-Werte liegen für ‚parallele Hände‘ in beiden Fällen (**ipsi** und **contra**) niedriger als bei überkreuzten Händen (**ipsi** um 97 ms, **contra** um 159 ms). Dies deutet daraufhin, daß die Berechnung bei überkreuzten Händen längere Zeit in Anspruch nimmt. Die Aufgabe ist, mit anderen Worten, einfacher, wenn sich die Hände auf ihrer jeweiligen Körperseite befinden.

Wiederholt man das Experiment der Abb. 5.6 (hx), indem man gleichzeitig mit dem Stimulus am Bein beide Arme mechanisch reizt, wird die RT bei der Aufgabe **ipsi** nicht signifikant verkürzt. Bei der Aufgabe **contra** findet jedoch eine deutliche Verringerung statt. Während der Unterschied zwischen **ipsi** und **contra** 35 ms (Abb. 5.6, hx) und 25 ms (Abb. 5.8, ohne Zusatzreiz) beträgt, liegt er mit Zusatzreiz bei 87 ms (Abb. 5.8). Diese Verringerung entspricht damit dem Unterschied zwischen **ipsi** und **contra** bei parallelen Händen (Abb. 5.6, 81 ms, Abb. 5.7, 87 ms). Führt man diese

S-R Distanz	0 0	2 2	0 0	2 2	0 0	2 2	2 2	0 0
Lage der Hände	0 0	0 0	1 1	1 1	0 0	0 0	1 1	1 1
morphol.	0 0	1 1	0 0	1 1	0 0	1 1	0 0	1 1
Σ	0	6	2	8	0	6	6	4
RT (ms)	350	501	447	660	385	466	465	435

Tabelle 8.1: Hypothese von drei Parametern, die CRTs beeinflussen.

Die addierten Werte sind mit den in Abb. 5.9 und 5.6 dargestellten RT-Werten verglichen. Der linke Teil bezieht sich auf die Daten der Abb. 5.9 und der rechte Teil auf die Daten der Abb. 5.6. S-R Distanz ist als entweder 0 (nah) oder 2 (fern) angegeben. Die Lage der Hände (parallel oder gekreuzt) ist jeweils als 0 oder 1 angegeben. Die morphologische Beziehung zwischen S und R ist als entweder 0 (dieselbe Körperseite) oder 1 (unterschiedliche Körperseiten) angegeben. Die jeweiligen S-R Paare der Aufgaben sind durch die Farben (weiß oder schwarz) symbolisiert. Die Reizorte sind durch Dreiecke und die Reaktionsorte durch Quadrate gekennzeichnet.

zusätzliche Reizung bei der Stellung ‚parallele Hände‘ durch, so ergibt sich in keinem Fall, weder bei der Aufgabe **ipsi** noch bei der Aufgabe **contra**, eine signifikante Änderung (Abb. 5.7). Die Zusatzreizung scheint also das Berechnungsproblem, das auftritt, wenn die Hände überkreuzt sind, zu vereinfachen. Es ist aber auch vorstellbar, daß die Zusatzreizung zwar im Prinzip die Berechnung bei den beiden Stellungen, ‚parallele Hände‘ und ‚gekreuzte Hände‘ beschleunigt, aber die Berechnung bei der Stellung ‚parallele Hände‘ nicht weiter beschleunigt werden kann.

Berücksichtigt man nun die drei Parameter, die oben geschildert sind, d.h., die geometrische Nähe, die morphologische Beziehung und die Lage der Hände (parallel oder gekreuzt), so können die gemessenen RTs in einer einfachen additiven Weise beschrieben werden. Dies ist in Tab. 8.1 gezeigt. Wie in Tab. 8.1 zu sehen ist, ermöglicht die einfache Addition der drei Parameter eine qualitativ gute Approximation an die experimentellen Daten. Allerdings können die Experimenten der Zusatzreizung (Abb. 5.8) auf diese Weise nicht erklärt werden.

In den Experimenten des Kap. 6 wurden die Reizorte nicht nur nach linker und rechter Körperseite (linkes Bein, rechtes Bein in Abb. 5.6, linker Arm, rechter Arm in Abb. 5.9) eingeteilt, sondern es wurde eine Körperseite, in diesem Fall das linke Bein, wiederum in Innenseite und Außenseite unterteilt. Dies entspricht der Unterteilung, die auch in den Verhaltensexperimenten (Kap. 4) verwandt wurde. Der Reaktionsort war ähnlich wie in Abb. 5.6 wieder von der Lage des Reizes abhängig (**ipsi**, **contra**). **Ipsi** und **contra** beziehen sich hier aber auf Innen- und Außenseite eines Beines. In drei Experimenten wurde die Stellung der Hände variiert (Abb. 6.2, hl, hp, hr). Hierbei sind zwei Befunde zu beobachten. In genereller Übereinstimmung mit den früheren Resultaten war stets die RT für die Aufgabe **ipsi** kleiner als für die Aufgabe **contra**. Zunächst sehr unerwartet ist aber, daß beim Reizort am linken Bein die RTs kürzer waren, wenn beide Hände auf dem rechten Bein liegen, als bei der Lage hp (rechte Hand auf rechtem Bein, linke Hand auf linkem Bein), und diese wiederum kleiner als in der Position hl (beide Hände auf dem linken Bein). Zumindest für die Aufgaben **ipsi** scheint intuitiv

S-R Distanz	1.5 1.5	2 1	1.5 0	2 0.5	0 0	0.5 0.5
Lage der Hände	0 0.5	0 0.5	0 0	0 0	0.5 0	0.5 0
morphol.	1 0	1 0	1 0	1 0	1 0	1 0
$\Sigma (r, l)$	2.5 2	3 1.5	2.5 0	3 0.5	1.5 0	2 0.5
Σ	4.5	4.5	2.5	3.5	1.5	2.5
RT (ms)	397	436	440	470	466	525

Tabelle 8.2: Ähnlich wie in Tab. 8.1 sind die Ergebnisse der Abb. 6.2 mit den addierten Werten der drei Parameter verglichen. Für weitere Erläuterung siehe Tab. 8.1. Als S-R Distanz sind hier Schätzwerte verwendet, die an die Trajektorienlänge des Kap. 4 angelehnt sind.

in dem letzteren Fall die geometrische Zuordnung einfacher zu sein als für den zweiten, und diese wiederum einfacher als für den ersten Fall, also genau umgekehrt als es das Resultat zeigt. Auffällig ist dabei, daß sich ein qualitativ ganz ähnliches Resultat in einer ganz anderen Aufgabe (Kap. 4, siehe Abb. 6.3) ergab. Das Resultat der Abb. 6.2 zeigt zunächst, daß die Vorstellung der Aufteilung in rechte und linke Körperhälfte, mit deren Hilfe die Experimente des Kap. 5 gut interpretiert werden konnten, nicht auf die Unterteilung eines Beines in Innenseite und Außenseite übertragen werden kann. Es scheint vielmehr so zu sein, daß dann, wenn sich beide Hände räumlich in der linken Körperhälfte befinden, die Auftrennung in Innen und Außen besonders schwierig ist. Sie wird einfacher, wenn zumindest die rechte Hand aus diesem Bereich herausbewegt wird, und noch einfacher, wenn beide Hände außerhalb dieser Körperhälfte liegen. Ähnliche Situationen sind in der visuellen Modalität untersucht worden, wobei die beiden Hände auf derselben Seite relativ zur midsagittalen Ebene liegen. Hierbei wurde aber keine unterschiedlichen RTs zwischen unterschiedlichen Handpositionen gefunden (Nicoletti et al., 1982).

Wendet man nun dieselbe additive Methode der Tab. 8.1 auf diese Fälle an, so können die RTs für die Aufgabe **ipsi** und **contra** mit Ausnahme der Position *hr* erklärt werden (Tab. 8.2). Jedoch sind die schnellen Reaktionen bei der Position *hr* nicht erklärbar. Wie könnte dies erklärt werden? Die folgende Interpretation liegt nahe.

Bei der mentalen Repräsentation der jeweiligen Aufgabe müssen vier Orte, zwei Reizorte und zwei Reaktionsorte abgebildet werden. Außerdem müssen die die Aufgabe kennzeichnenden Verbindungen zwischen je einem Reizort und einem Reaktionsort repräsentiert sein. Dies ist für die drei Aufgaben **ipsi** in Abb. 8.1 in Form einer zweidimensionalen Karte dargestellt. Nun soll angenommen werden, daß außer diesen im Rahmen der jeweiligen Aufgabe von der VP gelernten Verbindungen auch zusätzliche, wenn auch schwächere, Verknüpfungen zwischen den „falschen“ Reiz-Reaktionspaaren hergestellt werden, dies aber nur innerhalb einer Halbseite (Abb. 8.1, punktierte Linien). Nimmt man schließlich an, daß die Entscheidung über die richtige Verbindung umso länger dauert, je mehr Verbindungen (richtige und falsche) vorliegen, so könnte das Resultat auf qualitativer Ebene verstanden werden. Zuordnungen aus unterschiedlichen Karten scheinen danach

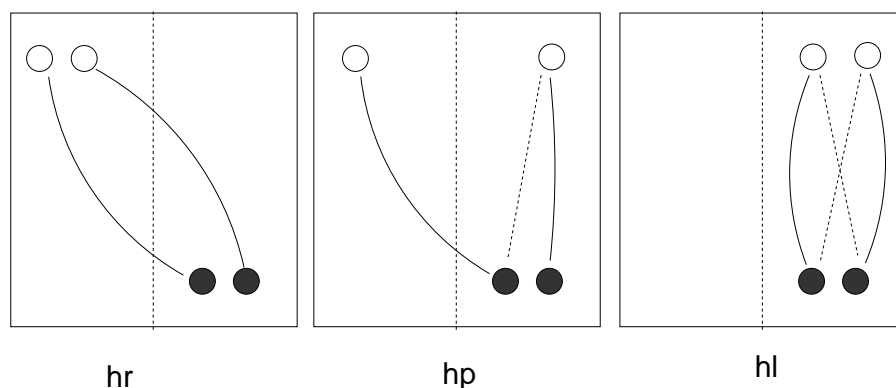


Abbildung 8.1: Modell für RT bei Variation der Handstellungen

S-R Distanz	0 1.5	0.5 2	1.5 0	2 0.5	0 1	1 0
Lage der Hände	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
morphol.	1 0	1 0	1 0	1 0	1 0	1 0
$\Sigma (r, l)$	1 1.5	1.5 2	2.5 0	3 0.5	1 1	2 0
Σ	2.5	3.5	2.5	3.5	2	2
RT (ms)	447	505	456	481	466	483

Tabelle 8.3: Ähnlich wie in Tab. 8.1 sind die Ergebnisse der Abb. 6.5 mit den addierten Werten der drei Parameter verglichen. Für weitere Erläuterung siehe Tab. 8.1. Als S-R Distanz sind hier Schätzwerte verwendet, die an die Trajektorienlänge des Kap. 4 angelehnt sind.

also einfacher zu sein als mehrere Zuordnungen innerhalb einer Karte.

Wie bei den früheren Experimenten kommt auch hier die Interpretation hinzu, daß das Legen von sich im Raum überkreuzenden Verbindungen (**contra**) schwieriger ist als das Legen von sich nicht überkreuzenden Verbindungen. Es ist noch auffällig, daß bei der Aufgabe **ipsi** die Außenseite, also linke Hand zu linkem Bein, immer etwas kürzere RT aufweist (Abb. 6.2 b). Dies spricht für die Bevorzugung der ipsilateralen Seite, die in Kap. 4 diskutiert wurde.

Im Experiment der Abb. 6.5 werden die Hände parallel gehalten und stattdessen die Beinstellungen variiert. Wieder ist generell die Aufgabe **contra** schwieriger als die Aufgabe **ipsi**. Der Unterschied ist allerdings bei xl (übergeschlagen) größer als bei p (parallel), und dieser wiederum größer als bei kl (Knie). Die schnellere Reaktion bei der Aufgabe **ipsi** im Vergleich zur Aufgabe **contra** kann hier auch mit der additiven Methode (Tab. 8.3) erklärt werden. Jedoch zeigen die beiden Aufgaben bei der Stellung kl keinen Unterschied in den addierten Werten.

9 Reizung der Fingerspitzen bei Variation der Lage der Finger im Raum

9.1 Einleitung

Sowohl im Bereich der motorischen Kontrolle bei Lebewesen als auch der Steuerung von Robotern wird ausgiebig diskutiert, ob eine Bewegung, z.B. die Greifbewegung einer Hand zu einem Ziel, in Gelenkkoordinaten geplant wird, die die Ausführung der Bewegung bestimmen, oder ob die Planung zunächst in Raumkoordinaten stattfindet und erst aus diesen die notwendigen Gelenkwinkel berechnet werden. Verschiedene Argumente sprechen für die letzte Annahme, weshalb die Verwendung von Raumkoordinaten für die Planung von Bewegung allgemein akzeptiert zu sein scheint. Im folgenden soll eine Situation untersucht werden, die ein verwandtes, aber vermutlich einfacheres Problem darstellt. Es soll nämlich gefragt werden, wie die Position eines Körperteils, die durch eine taktile Reizung definiert wird, repräsentiert wird. Auch hier wäre natürlich denkbar, daß diese Körperstelle in dreidimensionalen Raumkoordinaten dargestellt ist. Alternativ wäre es möglich, daß für diese Repräsentation eine bzw. mehrere der zweidimensionalen somatotopischen Karte des Kortex verwendet werden. Letzteres ist nicht auszuschließen, da sich z.B. beim Erlebnis von Phantomschmerzen offensichtlich die Architektur dieser Karte ausdrückt (Berlucchi and Aglioti, 1997).

9.2 Variation des transversalen Abstandes

Die VP sitzt vor einem Tisch. Beide Hände liegen auf dem Tisch, wobei die Hände verschiedene Positionen einnehmen (Abb. 9.1). Die beiden Fingerspitzen (Zeigefinger) der Versuchsperson (VP) werden auf je einen Reizgeber gesetzt, mit dessen Hilfe die Fingerspitzen taktil gereizt werden. In den ersten beiden Versuchsserien wird in jeder Hand je ein Schalter gehalten, mit dessen Hilfe die VP eine Antwort liefern soll.

In einem Vorversuch werden zunächst nur zwei Armstellungen verwendet, bei denen die Finger entweder 3 cm oder 44 cm voneinander entfernt sind. In beiden Fingerpositionen muß die VP die folgenden Aufgaben ausführen.

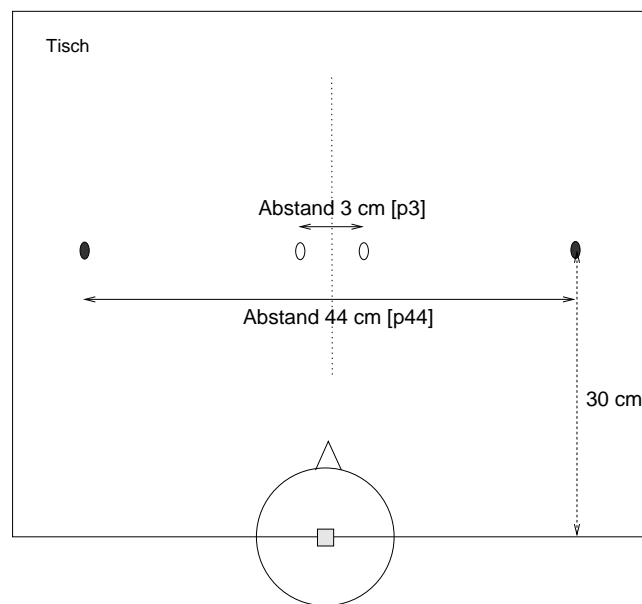


Abbildung 9.1: Versuchsaufbau

Blick von oben auf die Versuchsanordnung. Die Fingerpositionen sind als offene (Abstand 3 cm) bzw. geschlossene (Abstand 44 cm) Ellipsen dargestellt. In einem zweiten Experiment werden weitere Zwischenstellungen mit den Abständen 6, 10, 15 und 20 cm untersucht.

right Die Aufgabe besteht darin, auf jeden Reiz stets mit dem Schalter der rechten Hand zu antworten.

sel.right Die Aufgabe besteht darin, so schnell wie möglich selektiv auf den rechten Reiz mit dem Schalter der rechten Hand zu antworten. Ein Reiz am linken Finger soll nicht beantwortet werden.

ipsi Die Aufgabe besteht darin, mit dem Schalter der zum Reizort morphologisch ipsilateralen Hand zu antworten, also z.B. bei Reiz am linken Bein oder am linken Finger mit der linken Hand.

Die 70 Reize werden in unregelmäßiger Weise auf die linke oder rechte Zeigefingerspitze gegeben (35 mal für den jeweiligen Finger). An diesem Experiment sind 6 VPs beteiligt.

Für jeweils den großen (44 cm) und kleinen (3 cm) Abstand zeigen RT-Werte bei der Aufgabe **right** 200 und 190 ms, bei der Aufgabe **sel.right** jeweils 326 und 408 ms und bei der Aufgabe **ipsi** jeweils 306 und 389 ms.

Bei der ersten Aufgabe (siehe Abb. 9.2, **right**) ergibt sich, daß die RT unabhängig von den Armstellungen ist ($p > 0.2$; $D = 0.049$, $D_{0.2} = 0.069$). Die RT ist deutlich kürzer (diff. ≥ 150 ms, $p < 0.001$; $D = 0.746$, $D_{0.001} = 0.089$) im Vergleich zu den Aufgaben **sel.right** und **ipsi**, bei denen die VP den Ort des Reizes lokalisieren muß.

Unter der zweiten Bedingung, **sel.right** (Abb. 9.2, **sel.right**) ist die RT für den großen Abstand signifikant kürzer als die RT für den kleinen Abstand (diff. = 82 ms, $p < 0.001$; $D = 0.34$, $D_{0.001} =$

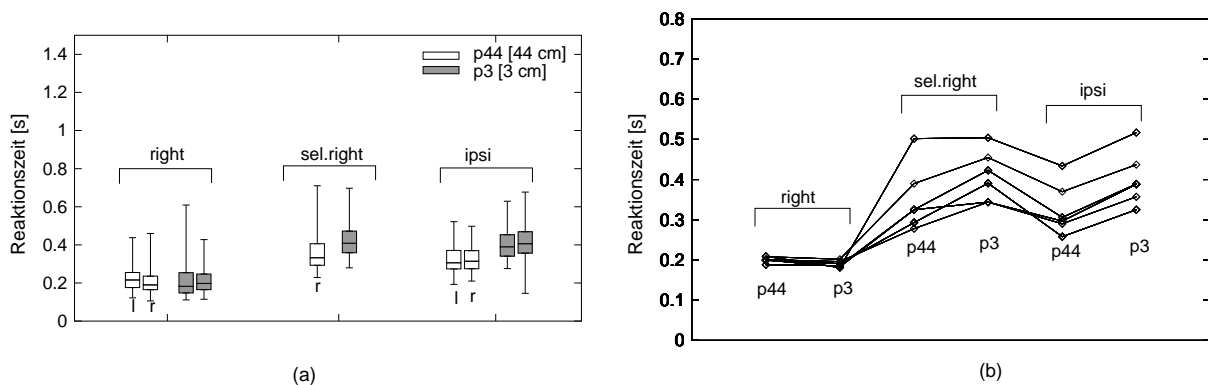


Abbildung 9.2: Reaktionszeit in zwei Fingerpositionen (3 cm : dunkel, 44 cm: hell)

a) Außer für die Aufgabe **sel.right** werden die RTs für den linken und den rechten Finger nebeneinander dargestellt. In der Aufgabe **sel.right** wird nur die RT bei Reizung des rechten Fingers gemessen. Zu beachten ist, daß sich hier ‚l‘ und ‚r‘ auf den Reizort, nicht auf den Reaktionsort bezieht. b) Die Medianwerte der VPs sind dargestellt. Die Werte von einer VP sind durch Linien verbunden.

0.190). Diese Tendenz findet sich auch bei der dritten Aufgabe (Abb. 9.2; **ipsi**, diff. = 83 ms, $p < 0.001$; $D = 0.403, D_{0.001} = 0.134$).

In einem zweiten Experiment wird eine feinere Auflösung der Abstände betrachtet. Die Fingerpositionen sind hierbei folgendermaßen definiert. Die Finger werden symmetrisch zu sagittaler Mittellinie positioniert. Die einzelnen Positionen werden durch den Buchstaben p und eine Zahl bezeichnet, die den Abstand (in cm) zwischen beiden Fingern angibt.

Um mögliche Artefakte zu vermeiden, die aus Ermüdung oder möglichen Lerneffekten entstehen könnten, wird für jede VP eine neue Reihenfolge der Versuchsserien verwendet. Weil der Reizgeber ein schwaches Geräusch erzeugt, wird der VP ein Kopfhörer aufgesetzt, an den gleichzeitig mit dem mechanischen Stimulus ein akustisches Maskierungssignal gesendet wird. Das Signal enthält eine modifizierte Frequenz des Geräusches, das vom Reizgeber erzeugt wird. Daher ist es nicht möglich, das Geräusch der Reizgeber zu hören.

Jede VP bekommt in einer Trainingsphase zunächst 20 –30 Reize, um sich sowohl an die gegebene Aufgabe als auch an Konditionen (akustische Signale, schnelle Reaktion usw.) zu gewöhnen. Im eigentlichen Experiment werden in jeder definierten Position 80 Reize in unregelmäßiger Weise auf die linke oder rechte Zeigefingerspitze gegeben (40 mal für den jeweiligen Finger). An diesem Experiment sind 25 VPs beteiligt.

In diesem Experiment werden in verschiedenen Versuchsserien zwei verschiedene Reaktionstypen ausgeführt. Im ersten Fall besteht die Aufgabe der VP wie beim Vorversuch darin, so schnell wie möglich mit dem Schalter der zum Reiz ipsilateralen Hand zu antworten. Dies entspricht also der Aufgabe **ipsi**.

Die Ergebnisse sind in Abb. 9.3 und Tab. 9.1 dargestellt. Die RT ist in den Positionen p6 und p10 im Vergleich zu p3 signifikant verkürzt ($p < 0.001$; $D = 0.276, D_{0.001} = 0.097$). In den Positionen p15 und p20 scheinen die RTs wieder zuzunehmen ($p < 0.001, D = 0.135; t\text{-Test}, p > 0.25$) und bei p44 wieder abzunehmen.

RT [ms] nach Gruppen von VPs	Position					
	p3	p6	p10	p15	p20	p44
I	403	347	326			
II	411	335				351
III			322	334		
IV				359	386	
V					383	347
gesamt	408	340	325	344	385	349

Tabelle 9.1: RT (manuell, Medianwerte) geordnet nach jeweiligen Gruppen. Jede Gruppe besteht aus 5 VPs

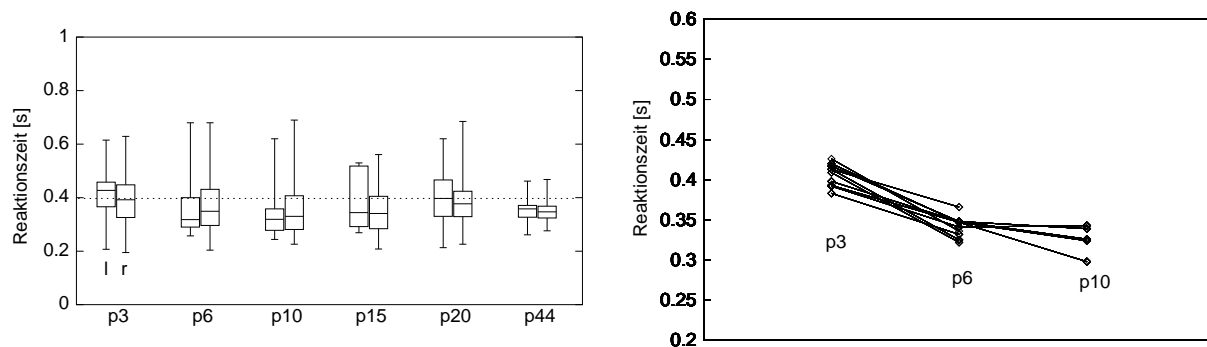


Abbildung 9.3: RT in Abhängigkeit vom transversalen Abstand (manuelle Reaktion) Die RTs der linken und rechten Hand sind paarweise (l, r) dargestellt. Rechts sind die Medianwerte der RTs getrennt nach einzelner VP dargestellt. Weil in diesem Experiment nicht jede VP bei allen Distanzen beteiligt war, sind in Abbildung nur die für die Diskussion wichtigen Positionen (p3,p6,p10) zu sehen (Daten der Versuchsgruppe I und II, Tab. 9.1).

Die RTs in p3 und p44 unterscheiden sich nicht signifikant von den Werten des ersten Experimentes (siehe Abb. 9.2). Die Streuung ist in der Position p44 wesentlich verringert.

In der zweiten Versuchsserie soll die VP die Reaktion nicht manuell, sondern verbal geben. Die Aufgabe der VPs besteht darin, selektiv auf den rechten Reiz verbal so schnell wie möglich mit ‚Ja‘ zu antworten. Dies entspricht also dem Experiment **sel.right** aus Abschnitt 9.2 mit dem Unterschied, daß hier keine manuelle, sondern eine verbale Reaktion gefordert wird.

Die Ergebnisse sind in Abb. 9.4 und Tab. 9.2 dargestellt. Die RTs aus den verbalen Reaktionen sind qualitativ nicht verschieden von denen der manuellen Reaktionen, aber die verbalen Reaktionen sind etwas (50 – 150 ms) schneller. Die RT fällt in p6 signifikant ab ($p < 0.001$; $D = 0.683$, $D_{0.001} = 0.138$). Auch hier ist ein schwacher Anstieg in p15 zu sehen ($p < 0.05$; $D = 0.1125$, $D_{0.05} = 0.096$). Die RT-Differenz zwischen p3 und p44 ist größer als bei der manuellen Reaktion (etwa 140:60 ms).

RT [ms] nach Gruppen von VPs	Position				
	p3	p6	p15	p20	p44
I	344	281			196
II	348	280	295		
III			287	231	
IV				221	198
gesamt	344	281	293	224	197

Tabelle 9.2: RT (verbal, Medianwerte) geordnet nach Gruppen von VPs. Jede Gruppe besteht aus 5 VPs.

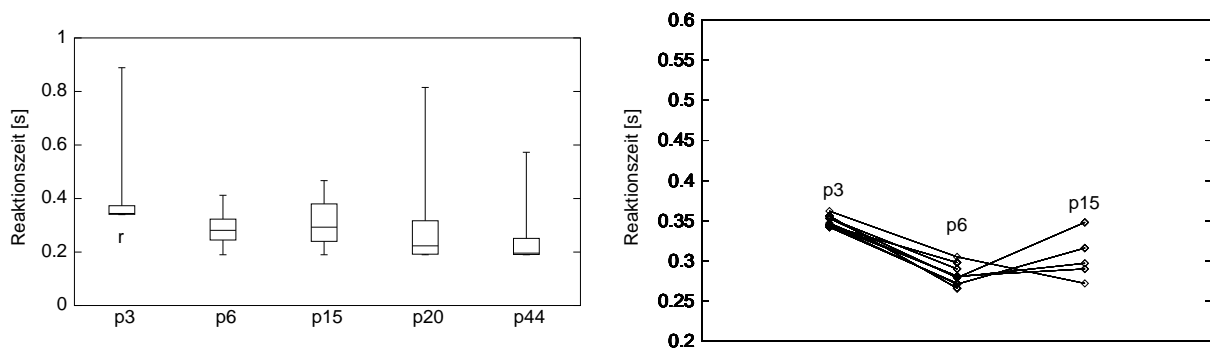


Abbildung 9.4: RT in Abhängigkeit vom transversalen Abstand (verbale Reaktion) Darstellung wie in Abb. 9.3.

9.3 Variation des Abstandes in frontaler Richtung

Die folgenden Experimente werden durchgeführt, um zu untersuchen, ob die gefundenen Effekte nur vom Abstand der Reizorte oder auch von deren relativer Lage abhängen. Hier werden wieder nur zwei Fingerpositionen untersucht. Die Finger liegen wieder auf dem Tisch, aber auf einer Linie, die senkrecht zur Körperquerachse, also in frontaler Richtung verläuft. Der Mittelpunkt der beiden Positionen ist 30 cm vom Körper entfernt. Jeweils eine Hand liegt also nahe am Körper, die andere auf derselben Sagittallinie, aber weiter entfernt. Der Abstand zwischen den Fingern beträgt entweder 3 cm oder 44 cm.

In den jeweiligen Positionen werden 80 Reize in unregelmäßiger Weise auf die linke oder rechte Zeigefingerspitze gegeben (40 mal für den jeweiligen Finger). Die Experimente werden wieder mit zwei Reaktionstypen, nämlich manueller und verbaler Reaktion durchgeführt.

Bei der manuellen Reaktion (4 VPs) besteht die Aufgabe darin, so schnell wie möglich mit dem Schalter der zum Reizort ipsilateralen Hand zu antworten. Die Medianwerte der RTs betragen beim Abstand 3 cm 324 ms und beim Abstand 44 cm 317 ms. Im Gegensatz zu den Ergebnissen bei transversalem Abstand zeigt sich hier kein Unterschied (Abb. 9.5; $p > 0,2$, $D = 0,044$, $D_{0,2} = 0,084$). Die beiden RTs für 3 cm und für 44 cm Abstand sind etwas höher als die Werte, die im Experiment mit transversalem Abstand von 44 cm (siehe Abb. 9.2; $\cong 306$ ms) erhalten werden.

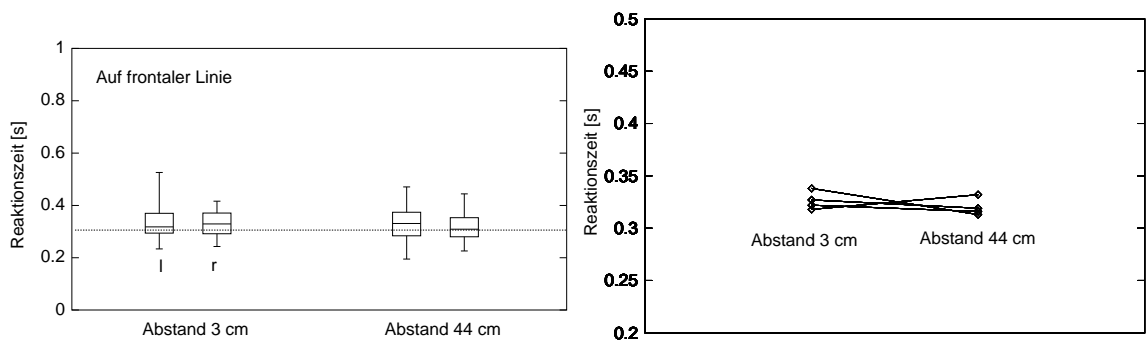


Abbildung 9.5: RT bei zwei unterschiedlichen Abständen in frontaler Richtung (manuelle Reaktion). Beide Finger liegen in der Sagittalebene mit 3 bzw. 44 cm Abstand. Die RTs der linken und rechten Hand sind nebeneinander dargestellt (l und r). Rechts sind die Medianwerte der RTs getrennt nach einzelnen VPs dargestellt.

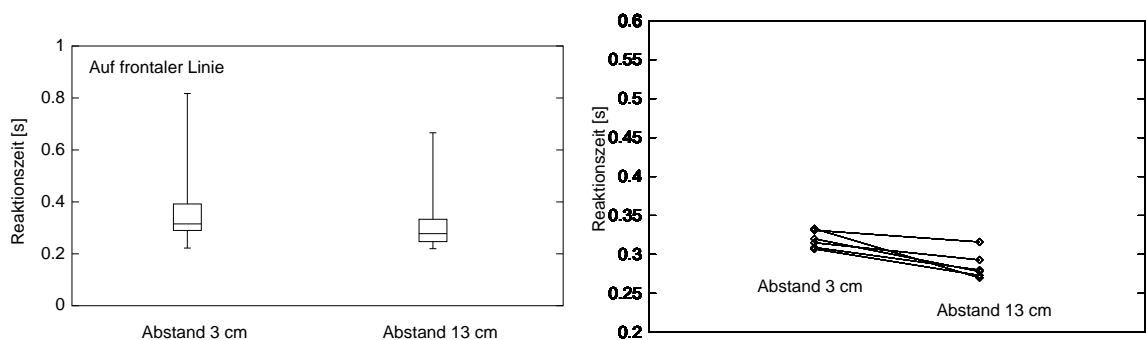


Abbildung 9.6: RT bei zwei unterschiedlichen Abständen in frontaler Richtung (verbale Reaktion). Beide Finger liegen in der Sagittalebene mit 3 bzw. 13 cm Abstand.

Mit 6 VPs wurde das Experiment mit verbaler Reaktion durchgeführt. Die Aufgabe besteht darin, selektiv auf den rechten Reiz verbal so schnell wie möglich mit ‚Ja‘ zu antworten. Bei dem Abstand 3 cm und 13 cm betragen die Medianwerte der RTs jeweils 315 und 280 ms. Beide Werte unterscheiden sich signifikant (siehe Abb. 9.6; $\text{diff.} \cong 35 \text{ ms}$; $p < 0,05$, $D = 0,129$, $D_{0,05} = 0,124$).

Der Vollständigkeit halber soll an dieser Stelle noch ein Vorversuch erwähnt werden, dessen Ergebnisse zwar in der Tendenz interessant sind, die aber in der Diskussion nicht betrachtet werden, da bei diesen Experimenten keine Maskierung vorgenommen wurde.

Reizung an den Fingerspitzen

In einem weiteren Experiment werden die beiden Zeigefingerspitzen auf je einen Reizgeber gesetzt. Die VP soll nur auf den Reiz an der rechten Fingerspitze achten, wobei sie einen Schalter in der rechten Hand hält. Die zu beachtende Stelle (die rechte Zeigefingerspitze) wird in unregelmäßiger Folge ohne oder mit einem Distraktor (60 ms Vorlauf) an der linken Zeigefingerspitze gereizt. Der Zeitabstand war für die VPs wahrzunehmen. Das Ergebnis ist in Abb. 9.7 dargestellt. Es ergibt sich qualitativ dasselbe Ergebnis wie in Abb. 9.2. Die Streuung ist aber wesentlich kleiner als in Abb. 9.2.

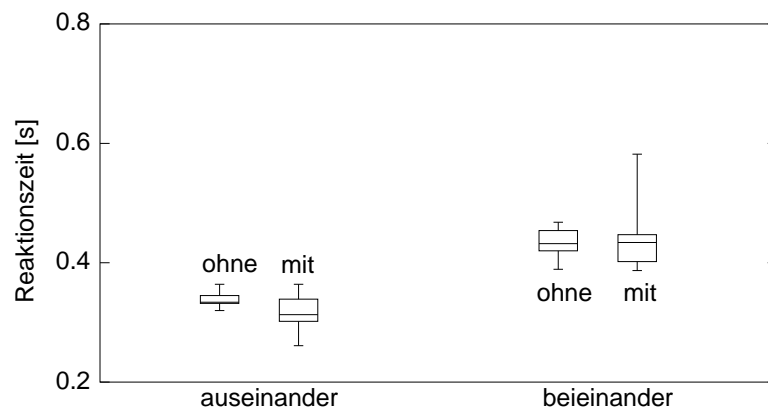


Abbildung 9.7: Reaktionszeit mit Aufmerksamkeit auf rechte Zeigefingerspitze. ohne oder mit einem Distraktor (60 ms Vorlauf am linken Zeigefinger)

9.4 Variation der Lage bei konstantem Abstand

In diesem Experiment wird die Entfernung zwischen den beiden Fingern konstant gehalten und nur die relative Lage der Finger variiert, indem die Fingerpositionen auf einem Kreis definiert werden.

Drei Positionen werden wie oben sowohl bei manueller als auch bei verbaler Reaktion untersucht. Dies sind die Positionen c1, c2 und c3 (Abb. 9.8). Hierbei befinden sich die beiden Hände stets in ihrer jeweiligen Raumhälfte. An diesem Experiment sind 10 VPs beteiligt. Für die manuelle Reaktion werden außerdem noch zwei weitere Positionen untersucht (c5, c6), bei denen die Hände in den gegenüberliegenden Raumhälften liegen. Dieses Experiment wird mit denselben VPs durchgeführt. Mit den anderen 5 VPs werden stattdessen die Positionen c4 und c7 untersucht. Hier befinden sich beide Finger in der sagittalen Mittellinie.

Bei der manuellen Reaktion besteht die Aufgabe darin, so schnell wie möglich mit dem Schalter der zum Reizort ipsilateralen Hand zu antworten. Die Werte bei der manuellen Reaktion sind in Tab. 9.3 dargestellt. Abgesehen von zwei frontalen Positionen (c4 und c7), ist die RT in c2 (Abb. 9.9.a) signifikant kürzer als die RT bei jeder anderen Position (in allen Fällen $p < 0.01$, $D \cong 0.09$, $D_{0.01} = 0.081$). Die RTs in den Positionen c3 und c5 sind tendenziell höher als die in den Positionen c6 und c1 ($p < 0.1$, $D = 0.065$, $D_{0.1} = 0.061$). Zwischen c3 und c5 findet man einen signifikanten Unterschied ($p < 0.05$, $D = 0.072$, $D_{0.05} = 0.068$). Bei den beiden Positionen c4 und c7 (Abb. 9.9 c), die auf der sagittalen Mittellinie liegen, betragen die Werte jeweils 331 und 337 ms. Die beiden RTs zeigen keinen signifikanten Unterschied zu der RT der Position c2.

Bei der verbalen Reaktion besteht die Aufgabe darin, selektiv auf den rechten Reiz verbal so schnell wie möglich mit ‚Ja‘ zu antworten. Die Median-Werte betragen jeweils 310 (c1), 300 (c2), 296 ms (c3). Hier kann kein signifikanter Unterschied zwischen c1, c2 und c3 (Abb. 9.10) gefunden werden ($p > 0.2$, $D \cong 0.059$, $D_{0.2} = 0.076$).

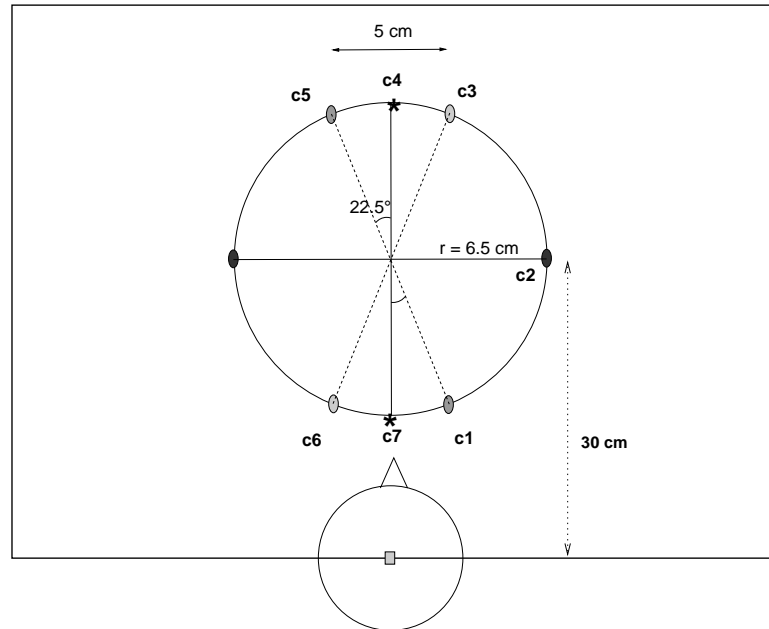


Abbildung 9.8: Variation der Lage bei konstantem Abstand

Die beiden Zeigefinger befinden sich auf einem Kreis. Die Bezeichnungen (c1 -c7) geben die Position des rechten Zeigefingers an, wobei die beiden Hände stets symmetrisch zum Zentrum des Kreises positioniert sind.

RT [ms] nach Gruppen von VPs	Position						
	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7
I	422	353	435		469		
II	429	349	423			421	
III					471	419	
I*+II*				331			337
gesamt	426	350	428	331	470	420	337

Tabelle 9.3: RT (manuell, Medianwerte) geordnet nach Gruppen von VPs. Jede Gruppe besteht aus 5 VPs. Die Gruppe I*+II* besteht aus 2 VPs der Gruppe I und 3 VPs der Gruppe II.

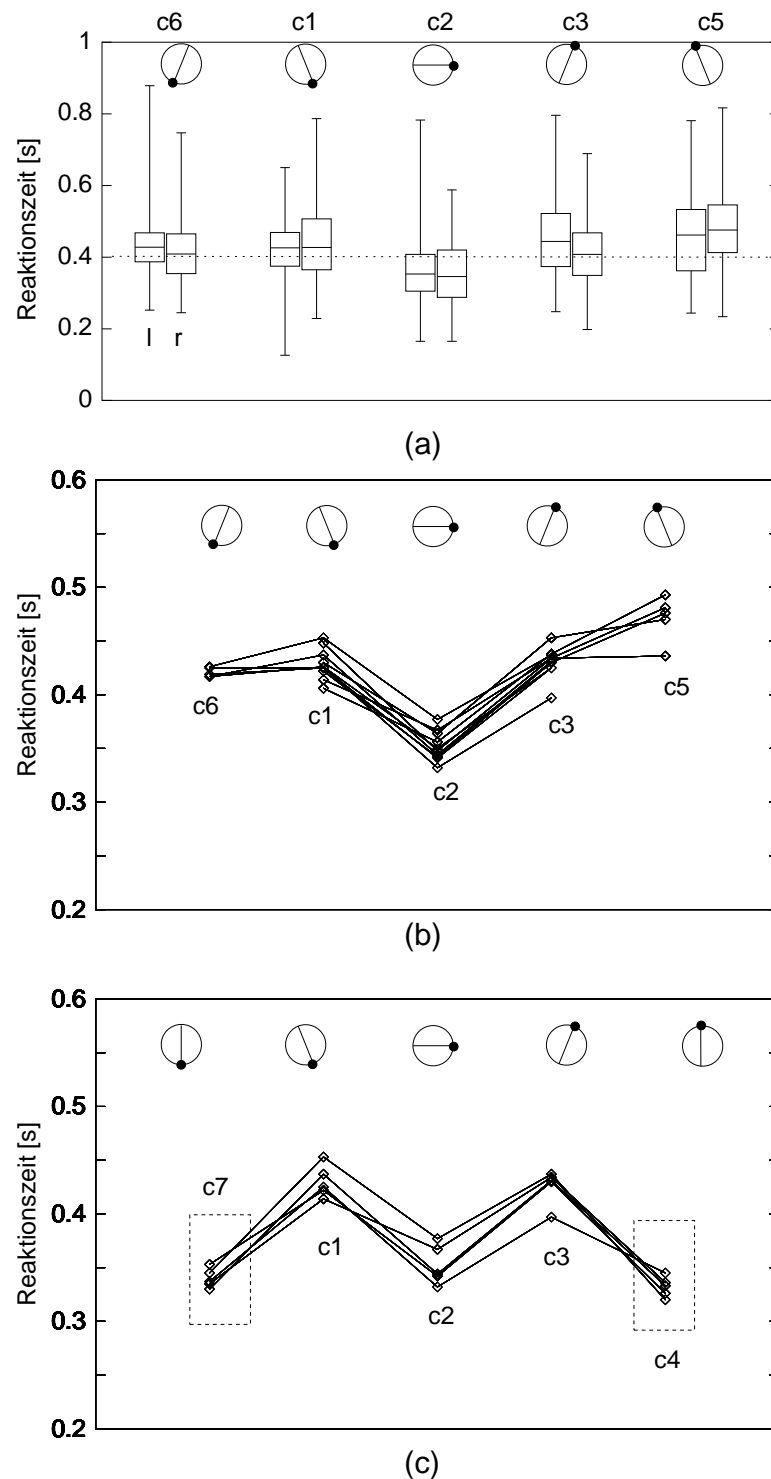


Abbildung 9.9: RT bei konstantem Abstand (manuelle Reaktion)

Der dunkle Punkt auf dem Kreis in jeder Abbildung stellt die Position des rechten Fingers dar. Die Abbildungen sind analog zur Abb. 9.3 dargestellt. a) gesammte Medianwerte der RTs. b) Medianwerte der RTs getrennt nach einzelner VP (Daten der Versuchsgruppe I und II, Tab. 9.3). c) Medianwerte der RTs getrennt nach einzelner VP (Daten der Versuchsgruppe I*+II*, Tab. 9.3).

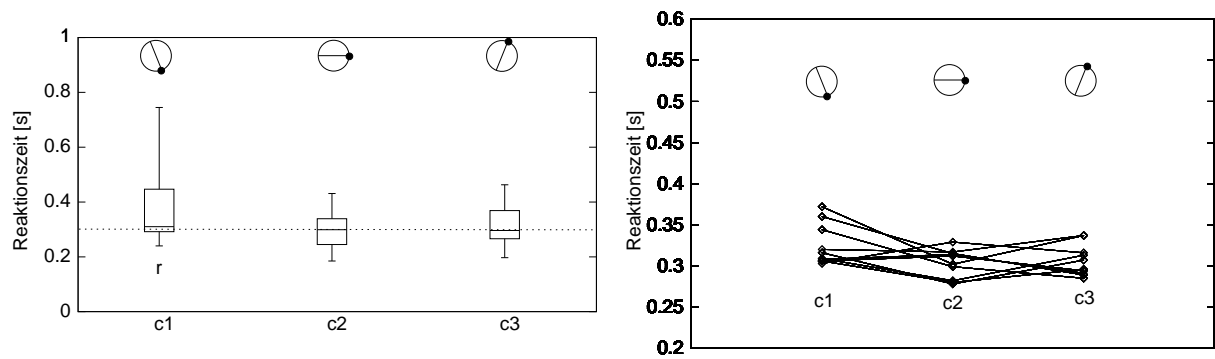


Abbildung 9.10: RT bei konstantem Abstand (verbale Reaktion)

Der dunkle Punkt auf dem Kreis in jeder Abbildung stellt die Position des rechten Fingers dar. Rechts sind die Medianwerte der RTs getrennt nach einzelner VP dargestellt.

9.5 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen bei der SRT Aufgabe (**right**) keine Abhängigkeit der RT vom Abstand der Finger. Bei den CRT Aufgaben **ipsi** und **sel.right** findet man jedoch eine größere RT, wenn die beiden Reizorte nahe beieinander liegen (Abb. 9.2). Die systematische Untersuchung zeigt, daß die Abnahme der Werte schon ab der Entfernung von 6 cm zu finden ist. Dies gilt sowohl für die Experimente mit manueller Reaktion (Abb. 9.3) als auch für die mit verbaler Reaktion (Abb. 9.4). Bei der verbalen Aufgabe liegen die RT-Werte generell um etwa 70 ms niedriger, obwohl diese Versuche eher der **sel.right** Prozedur entsprechen, die bei manueller Reaktion eine, wenn auch geringfügig (ca. 20 ms), höhere RT ergeben hat (Abb. 9.2). Das letztere Resultat könnte damit erklärt werden, daß bei der Aufgabe **sel.right** zusätzlich ein Mechanismus zur Hemmung der Reaktion auf den Reiz am linken Finger eingerichtet werden muß. Bei einem Fingerabstand von 20 cm scheint die RT im Falle der manuellen Reaktion wieder etwas höher zu liegen; bei der verbalen Reaktion ist hier die Streuung auffällig erhöht, was hier jedoch nicht weiter diskutiert werden soll. Variiert man den Abstand der Finger nicht entlang einer von rechts nach links, also transversal, sondern in der mittleren Sagittalebene von vorne nach hinten, also frontal verlaufenden Linie, so ergeben sich bei der verbalen Reaktion ebenfalls RT-Werte, die vom Abstand abhängen (Abb. 9.6). Bei manueller Reaktion findet man diesen Unterschied allerdings erstaunlicherweise nicht (Abb. 9.5). Außerdem liegen die Werte mit 324 ms und 317 ms im Bereich der Werte, die bei transversaler Linie für große Abstände gefunden wurden. Um diesen im ersten Moment widersprüchlich erscheinenden Befund näher zu untersuchen, wurde der Abstand zwischen beiden Fingern konstant gehalten, aber die Neigung der Verbindungslinie systematisch variiert. Bei verbaler Antwort konnte kein signifikanter Unterschied gefunden werden (Abb. 9.10), was mit den vorigen Befunden (Abb. 9.4, 9.6) übereinstimmt. Bei der manuellen Reaktion findet man zwar für transversale und frontale Lage der Verbindungslinien Übereinstimmung mit den oben erwähnten Versuchen, aber auch das unerwartete Resultat, daß schon eine geringe Abweichung von 22.5 Grad von der Sagittallinie (vergl. c1, c3, c5, c6 mit c4, c7) eine signifikante Erhöhung der RT-Werte ergibt (Abb. 9.9). Bei diesen vier Positionen entspricht der auf die transversale Achse projizierte Abstand jeweils einer Entfernung von 5 cm. Sie liegt damit zwischen den beiden Werten p3 und p6, für die in Abb. 9.3 ebenfalls hohe RT-Werte erhalten wurden. Es erscheint schwierig, diese Ergebnisse mit Hilfe eines einfachen Modells erklären zu können.

Eine Möglichkeit liegt darin, daß die beiden Richtungsinformationen x (transversal) und y (frontal) mit unterschiedlicher Geschwindigkeit verarbeitet werden, wobei die frontale Information schneller zu sein scheint. Geht man davon aus, daß beide Informationen eine begrenzte „Lebenszeit“ haben, z.B. wegen begrenzter Speicherkapazität, ist zu vermuten, daß auf die frontale Information nur von einer schnellen motorischen Verarbeitung zugegriffen werden kann. Wenn die motorische Verarbeitung langsamer ist, könnte die frontale Information nicht mehr verfügbar sein. Die verbale RT ist im allgemeinen um etwa 70 ms kürzer als die manuelle RT. Diese Differenz könnte dann dazu führen, daß nur bei der verbalen Methode der RT-Unterschied der frontalen Entfernung erhalten werden kann. Diese Annahme kann aber die schnellen manuellen Reaktionen bei der frontalen Lage

(Abb. 9.9 c; c4, c7) nicht erklären.

Eine andere einfache Hypothese ist die folgende. Die RT hängt nicht vom absoluten Abstand zwischen den Fingern ab, sondern von dem jeweiligen Abstand zur Mittellinie. Je näher die Finger an diese Mittellinie kommen, desto größer wird die RT. Dies ließe sich damit erklären, daß in diesem Raum eine begrenzte Auflösung besteht, so daß die Differenzierung nahe beieinander liegender Reizorte schwieriger ist. Dies gilt auch, wenn die Hände überkreuz gehalten werden, die Finger sich also sozusagen von der anderen Seite der Mittellinie nähern (Abb. 9.9, c5, c6). Liegen nun aber beide Finger direkt auf der Mittellinie, so ist mit diesem System, das nur den Transversalabstand berücksichtigt, keine Trennung mehr möglich. Die nun plötzlich wieder kleinen RT-Werte (Abb. 9.9, c4, c7) könnten vermuten lassen, daß hier ein ganz anderes System verwendet wird. Welche Art könnte dieses System sein? Wir wollen, bevor wir darauf zurückkommen, zunächst den Unterschied zwischen manueller und verbaler Reaktion diskutieren. Bei der verbalen Reaktion ergab sich keine Richtungsabhängigkeit: Geringe Entfernung der Finger führten zu großen RT-Werten, große Entfernung zu kleinen RT-Werten. Außerdem waren die RT-Werte insgesamt deutlich niedriger als bei der manuellen Reaktion. Dies deutet darauf hin, daß bei der verbalen Reaktion ein ganz anderes System eingesetzt wird, das dann möglicherweise auch nicht auf der rechts-links Trennung basiert, wie dies für das System, auf dem die manuelle Reaktion beruht, angenommen wurde. Man könnte hier spekulieren, daß diese beiden Systeme den in der Literatur gelegentlich mit *What* und *Where* System bezeichneten Einheiten entsprechen. Im *What* System (propositionales System) wird begriffliche, also verbal formulierte Information verarbeitet, während das *Where* System (prozedurales System) für Bewegung und Orientierung im Raum zuständig ist (Milner and Goodale, 1993). Durch die jeweils unterschiedliche Aufgabe (manuell; verbal) hat man möglicherweise bewirkt, daß die VPs bei der manuellen Aufgabe das *Where* System und bei der verbalen Aufgabe das *What* System verwenden. Liegen allerdings die Finger auf der sagittalen Mittellinie, so ist die manuelle Aufgabe mit dem *Where* System nicht lösbar. In diesem Fall schalten die VPs auf das verbale System um. Dies würde erklären, daß hier die Antworten entsprechend schneller sind.

Das folgende Beispiel deutet darauf hin, daß das *What* und *Where* System nicht nur getrennt verwendet werden kann, sondern auch daß beide auch zusammenarbeiten können. Ein ‚skin writing‘ Experiment, bei dem die Versuchsperson einen auf der Haut geschriebenen Buchstaben durch taktile bzw. haptische Wahrnehmung erraten sollte, zeigte, daß die Lösung für eine gegebene Aufgabe von der Körperstellung beeinflusst wird (Parsons and Shimojo, 1987). Sollte die VP beispielsweise erraten, ob ein auf der rechten Hand geschriebenes ‚L‘ normal oder spiegelverkehrt ist, eine Aufgabe, die dem *What* System zugeordnet wird, war die Antwort genauer, wenn der rechte Arm nach oben ausgestreckt war, als wenn der Arm nach vorne gehalten wurde, wobei in den beiden Fällen die Handfläche nach vorne zeigte. Die Körperstellung, von der angenommen wird, daß sie über das *Where* System verarbeitet wird, spielt also offenbar ebenfalls eine Rolle.

10 Simulation der CRT (SRC)

In diesem Kapitel wird ein Modell vorgestellt, das die aus experimentellen Studien erhaltenen RTs beschreiben kann. Zunächst wird ein kurzer Überblick darüber gegeben, welche Eigenschaften bei Modellierung berücksichtigt werden sollen. Danach wird dargestellt, wie diese Eigenschaften der RTs algorithmisch realisiert werden können. Die Ergebnisse werden dann mit den entsprechenden Resultaten verglichen, die aus biologischen Experimenten erhalten sind.

10.1 Überblick

Die experimentellen Ergebnisse wiesen darauf hin, daß die RT nicht nur von der räumlichen Beziehung zwischen Reiz und Reaktion, die allgemein als S-R Kompatibilität beschrieben wird, sondern auch von der Korrespondenz der räumlichen und morphologischen Lage beeinflusst wird.

Diese zwei Eigenschaften, nämlich die S-R Kompatibilität und die Korrespondenz zwischen der morphologischen und räumlichen Lage sind im folgenden diejenigen, auf die sich die Modellierung konzentriert.

10.2 Die Simulation des Informationsflusses

Ein mentaler Verarbeitungsprozeß kann als ein Informationsfluß über mehrere Stages betrachtet werden. Eine solche Aufteilung bietet eine logisch klare Trennung der beteiligten Faktoren, so daß die additive Eigenschaft zwischen den Faktoren gut veranschaulicht wird.

Im folgenden wird daher zunächst überlegt, wie die beobachtete Korrespondenz der räumlichen und morphologischen Lage mit Hilfe eines Stage-Modells beschrieben werden kann. Dabei wird versucht, die klassische S-R Kompatibilität so zu erweitern, daß die erwähnte Korrespondenz erklärt werden kann. Anschließend wird versucht, diese Überlegung algorithmisch zu modellieren.

10.2.1 Stage-Modell zur taktilen Wahrnehmung

Die S-R Kompatibilität (SRC) ist eine Theorie, die die CRT aufgrund der Interaktion zwischen dem Reiz und der Reaktion erklärt. In diesem Modell werden die räumlichen Beziehungen zwischen

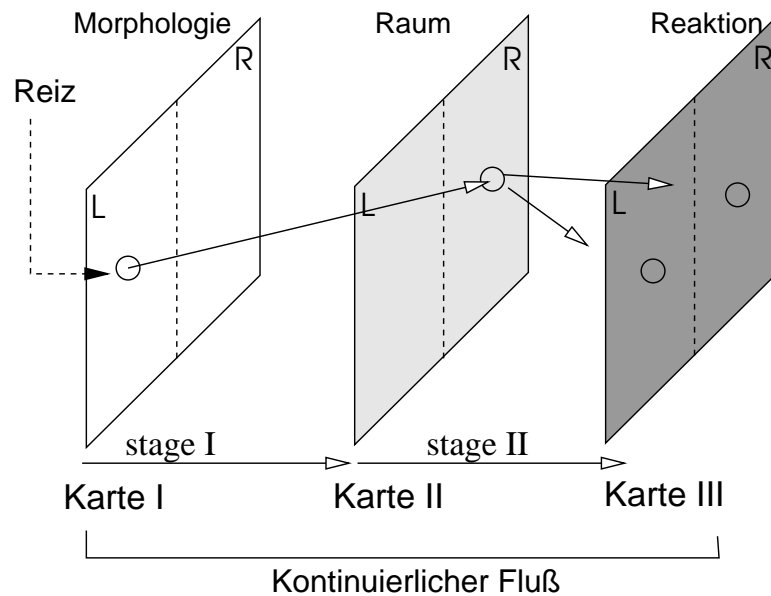


Abbildung 10.1: Repräsentation des Reizes und der Reaktionsvariante
 Ein Stage-Modell zur Reaktion auf taktilen Reiz. Jede Karte repräsentiert die Lage eines Reiz- bzw. Reaktionsortes. Der Informationsfluß zwischen Karten stellt das jeweilige Stage dar. Dieses Modell unterscheidet sich von S-R Kompatibilität dadurch, daß der Stimulus-Code in zwei Repräsentationen aufgeteilt wird. Eine räumliche Repräsentation (zweite) des taktilen Reizes soll in diesem Modell nach einer morphologischen Detektion entstehen. Dabei können die Verbindungen zwischen den beiden Repräsentationen entweder diskret oder kontinuierlich stattfinden.

Reiz und Reaktion in binärer Form, ob die beiden räumlich auf derselben oder auf verschiedenen Seiten liegen. Jedoch zeigen Studien an Neglekt- bzw. Pseudoneglektpatienten, daß bei der „line-bisection“ Aufgabe, bei der die VP eine visuell dargestellte Linie halbieren muß, ein umso größerer Fehler beobachtet wird, je länger die Linie ist (McCourt and Jewell, 1999; Tegner and Levander, 1991). Dies deutet darauf hin, daß eine genauere als nur binäre Repräsentation des Reizes vorliegt.

Wenn die VP einen taktilen Reiz erhält, ist die morphologische Position, z.B. auf der somatotopischen Karte unabhängig von der aktuellen Körperstellung. Hingegen hängt die räumliche Position von der Körperstellung ab, wobei der Reizort, wie bei den durchgeführten Experimenten, nicht mehr binär beschrieben werden kann. Nun liegt das Ziel darin, die beiden Eigenschaften, nämlich die räumliche Interaktion (SRC) und die Korrespondenz zu integrieren.

Die SRC soll hier als ein Stage betrachtet werden, das den identifizierten Reiz mit der entsprechenden motorischen Reaktion unter Berücksichtigung des Abstandes zwischen den entsprechenden Orten verknüpft. Um die beiden erwähnten Eigenschaften bei taktiler Reizung zu repräsentieren, sollte nun ein zweites Stage eingeführt werden. Das zusätzliche Stage ist verantwortlich für die Korrespondenz zwischen der morphologischen und räumlichen Lage. Da die räumliche Information eines taktilen Reizes einen weiteren Prozeß zu benötigen scheint, wobei die taktile und propriozeptive Information zusammen integriert werden müssen, soll hier angenommen werden, daß die morphologische Information vor der räumlichen Information verarbeitet wird.

Das Stage soll hier den Informationsfluß zwischen zwei mentalen Karten darstellen. Diese Struk-

tur wird in Abb. 10.1 dargestellt. Es ist angenommen, daß drei verschiedene Repräsentationen bzw. mentale Karten existieren. In der ersten Karte wird zunächst die morphologische Position, in der zweiten die räumliche Position eines Reizes und in der letzten Karte die räumliche Position des Reaktionsortes repräsentiert. Die linke oder rechte Körperseite wird dabei nicht getrennt, sondern innerhalb einer Karte repräsentiert.

Die Information (Code) auf der ersten Karte soll nun den zweiten Code aktivieren, wobei der auf derselbe Seite in den beiden Karten liegende Code wegen der Nähe den zeitlichen Vorteil hat. Da diese Repräsentation nicht binär erfolgt, sondern eine feinere Auflösung hat, wirkt sich auch eine kleine Änderung der Position innerhalb einer (linken oder rechten) Seite auf die Zeit aus. Der zweite Code wird jetzt zur dritten Karte weitergeleitet, in der z.B. die beiden Hände repräsentiert sind. Ähnlich wie zwischen der ersten und zweiten Karte werden auch hier die kompatiblen Codes (links-links oder rechts-rechts) früher aktiviert als ein inkompatibles Paar.

Der Informationsfluß zwischen der ersten und zweiten Karte stellt hier eine Transformation vom morphologischen Code zum räumlichen Code dar. Hingegen stellt der Informationsfluß zwischen der zweiten und dritten Karte die Entscheidungsphase für eine bestimmte Hand dar.

10.3 Realisierung des Informationsflusses

Um einen Informationsfluß zwischen Karten zu simulieren, wird hier der Diffusionsalgorithmus eingeführt. Der Diffusionsalgorithmus (Ritter, 1986; Steels, 1988), wie auch die sogenannte „Wave-Propagation“, wird häufig zur Simulation von Pfadplanungen eingesetzt. Hier soll aber der Diffusionsvorgang als Informationsfluß interpretiert werden, wobei eine bestimmte Position als Energiequelle verwendet wird und man in bestimmten anderen Zellen registriert, ob die Erregung eine gewisse Schwelle erreicht. Dann soll die bis dahin verbrauchte Zeit die entsprechende Reaktionszeit darstellen. Der Zufluß einer Energie kann als Reizung bzw. Signal aus einem vorhergehenden Stage verstanden werden. Weil die Diffusionszeit von der Distanz der zwei interessierenden Positionen abhängt, kann damit die oben erwähnte Interaktion zwischen verschiedenen Karten (Abb. 10.1) einfach simuliert werden.

10.3.1 Algorithmus

Hier soll die zweidimensionale Struktur beschrieben werden. Die Grundstruktur besteht aus $M \times N$ Zellen, wobei die Erregung jeder Zelle einen Energiezustand darstellt. Falls keine Energie in einer Zelle existiert, besitzt diese Zelle den Wert 0.

Die Diffusion erfolgt, indem jede Zelle zur Zeit t die gemittelten Werte von den Nachbarzellen (N_i) der Zeit $t - 1$ bekommt. Das heißt, $C(t) = \sum W_i \times N_i(t - 1)$ (Abb. 10.2), wobei W_i , das Nachbarschaftsgewicht hier immer $1/4$ besitzt. Die Anzahl und dementsprechend das Gewicht hängen von der Konstruktion des Feldes ab. Beispielsweise muß eine hexagonale Struktur, in der eine Zelle 6 Nachbarn besitzt, mit dem Gewicht von $1/6$ berechnet werden.

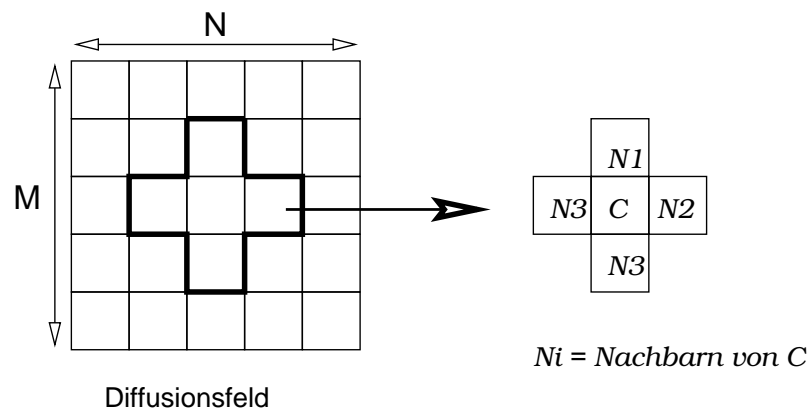


Abbildung 10.2: Diffusionsalgorithmus

Ein $M \times N$ Diffusionsfeld. Der markierte Abschnitt auf der rechten Seite soll die Nachbarschaft verdeutlichen. N_i bezieht sich auf die jeweilige Nachbarzelle und C auf die Zelle im Zentrum.

10.3.2 Architektur zur Simulation

Um die zwei Stages (Abb. 10.1) zu simulieren, werden zwei Diffusionsfelder definiert (Abb. 10.3). Die beiden Diffusionsfelder haben je 40×40 Zellen. Jedoch ist die Position für die Eingabe bzw. Ausgabe so beschränkt, daß für den Zufluß und das Ziel nur jede fünfte Zelle verwendet wird, weshalb die Position des Reizes bzw. Reaktionsortes eine 7 stufige Auflösung erhält (Abb. 10.3).

Im ersten Feld werden der morphologische Code (Zufluß) und der räumliche Code (Ziel) repräsentiert. Der Zufluß soll hier die taktile Reizung bedeuten. Erreicht diese Energie das vorgegebene Ziel, wird das zweite Feld aktiviert, falls die Energie am Ziel überschwellig ist. Die Schwelle ist willkürlich auf 0.01% der ursprünglich eingegebenen Energie gesetzt.

Beim zweiten Feld ist der Zufluß an derselben Position, die beim ersten Feld als Ziel definiert ist. Nun wird die eingegebene Energie in diesem Feld ebenfalls diffundiert, bis die Reaktionsorte aktiviert werden. Beim Übergang vom ersten zum zweiten Feld wird die Energie um den Faktor 100 verstärkt, um den Diffusionsverlust zu kompensieren.

Das zweite Feld simuliert im Prinzip die S-R Kompatibilität. Der Unterschied liegt aber darin, daß das zweite Feld die Energie vom ersten Feld bekommt, d.h. die direkte Verbindung zwischen dem Reiz und Reaktionsort nicht vorhanden ist.

Eine diskrete Verbindung der Felder könnte auch dadurch realisiert werden, daß das zweite Feld die überschwellige Energie aus dem ersten Feld nicht als analoges Signal, sondern nur als binäres Startsignal für die Auslösung der zweiten Diffusion verwendet.

Falls die Zahl der vertikalen Zellen größer gewählt wird, dann wird der Kompatibilität- bzw. Korrespondenz-Effekt kleiner, da der zurückzulegende Pfad länger und somit die Differenz zwischen der kompatiblen und inkompatiblen Situation geringer wird. Im Gegensatz dazu erhöht die Reduzierung der vertikalen Zellen den Effekt. Diese Eigenschaft könnte jedoch zur Simulation der Varianz verwendet werden. Falls jeder Zelle ein stochastisches Signal überlagert wird, dann ist die Varianz am Ziel umso größer, je länger die tatsächliche Diffusionsstrecke innerhalb des Feldes ist.

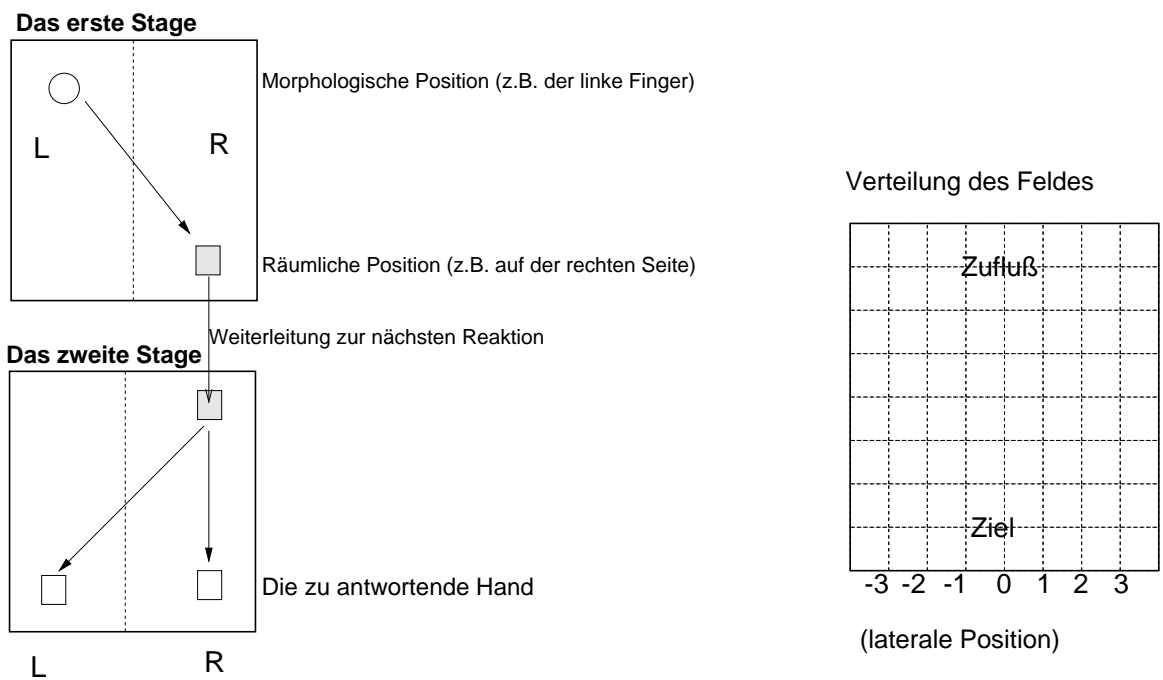


Abbildung 10.3: Architektur

Die zwei Stages werden mit je einem Diffusionsfeld simuliert. Auf der rechten Seite wird dargestellt, wo der Zufluß eintritt und wo das Ziel ist. Die mit ‚Zufluß‘ oder ‚Ziel‘ markierte Linie bezeichnet die Position, in der jeweils die Eingabe bzw. Ausgabe erfolgt. Dabei ist die Position lateral in 7 Stufen aufgeteilt, um die laterale Information (links oder rechts) des Reizes bzw. Reaktionsortes darzustellen.

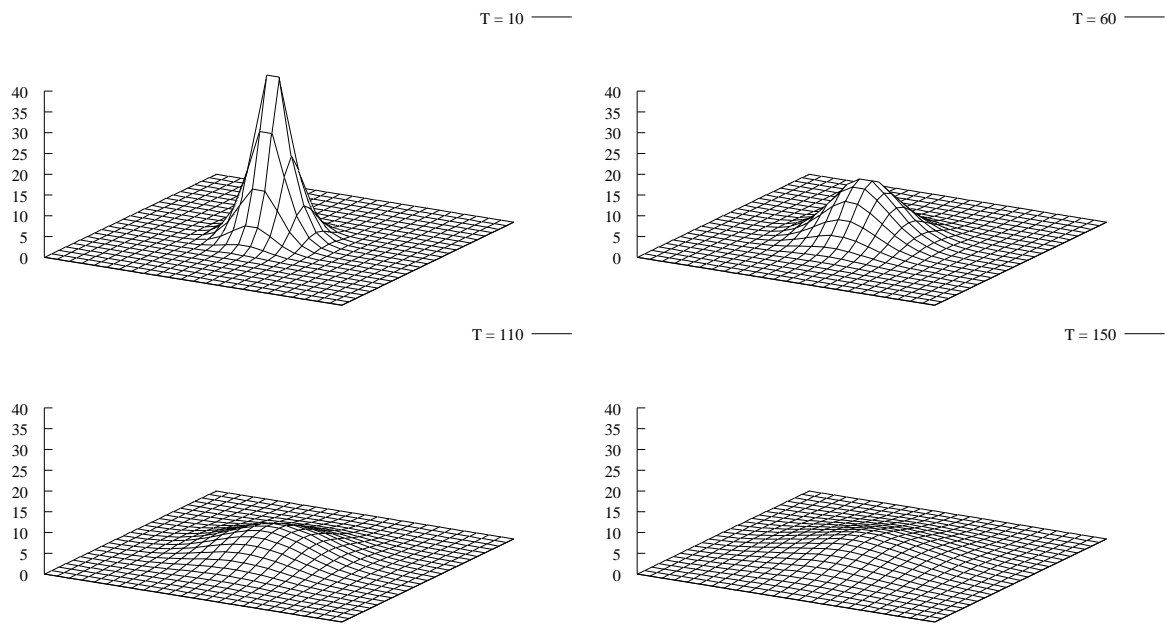


Abbildung 10.4: Abfallende Aktivierung

Die Aktivierung durch einen taktilen Reiz fällt mit der Zeit exponentiell ab (In der Reihenfolge oben links, rechts und unten links, rechts). Dieser Abfall stellt die Degradation des morphologischen Code dar. Nach 150 Iterationen ist die Aktivierung kaum zu erkennen. Die Auflösung ist hier zur besseren Darstellung 10fach erhöht.

10.3.3 Einige technische Details

Zufluß im ersten Feld Im Unterschied zu einem über Zeit konstanten Zufluß, was bei der Simulation von Pfadplanungen üblich ist, fällt der Zufluß hier mit der Zeit ab (Abb. 10.4). Dies repräsentiert eine Informationsdegradation.

Kompensation der Entfernung im ersten Feld Soll ein Zufluß auf einer Seite das Ziel auf der anderen Seite erreichen (die **contra** Bedingung), ist die dort ankommende Energie kleiner als beim Ziel auf derselben Seite (die **ipsi** Bedingung). Dies hat zur Folge, daß bei der kontinuierlichen Konstruktion das nächste Feld unterschiedliche Energie erhält. Um dies zu kompensieren, wird ein multiplikativer Faktor M eingeführt ($M = 1$ und $\sqrt{2}$ jeweils für die **ipsi** und **contra** Bedingungen).

In Abb. 10.5 ist nur das erste Feld dargestellt. Ohne solche Kompensation (Abb. 10.5 a) ist für die Schwelle nur ein begrenzter Bereich verwendbar. Hingegen erweitert die Kompensation den Bereich. Diese Kompensation sorgt hauptsächlich dafür, daß das nächste Feld eine gleichmäßig hohe Energie erhält.

Diffusion am Rand

Die Diffusion am Rand verhält sich nicht regulär im Vergleich zu der im zentralen Bereich. Dies ist ein allgemeines Problem, wenn Strömungsdynamik diskret simuliert wird. Da bei Diffusion der

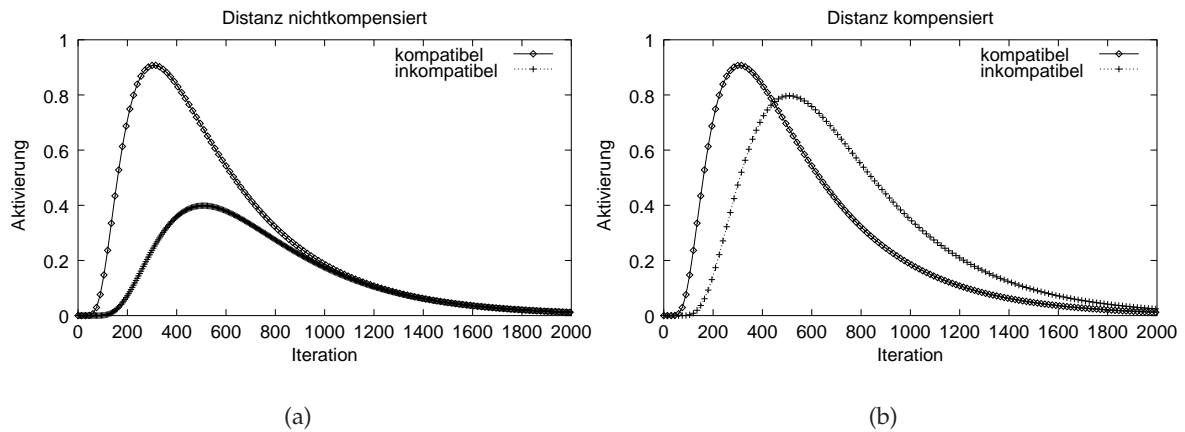


Abbildung 10.5: Die Diffusion im ersten Feld

Es sind die räumlich kompatiblen und inkompatiblen Fälle dargestellt. Die Diffusion ist nach 2000 Iterationen (Abszisse) abgeschlossen. Ordinate: Aktivierung am Reaktionsort. Der Vorteil des kompatiblen Paares ist an der früheren Aktivierung bzw. höheren Amplitude zu erkennen. Zur Bestimmung der RT soll eine an der Ordinate angelegte Schwelle überschritten werden. a) Ohne und b) mit Distanzkompensation .

Rand im Prinzip wie ein Hindernis wirkt, das keine Energie speichern kann, geht ein gewisser Anteil der Energie am Rand verloren (Abb. 10.6).

Dieses technische Problem könnte dadurch überwunden werden, daß ein Feld mit einer höheren Anzahl von Zellen verwendet wird, wobei nur der zentrale Bereich zur Simulation ausgenutzt wird, was aber höhere Rechenzeit kostet. Um dies zu vermeiden, soll hier eine andere Möglichkeit verwendet werden, indem an Rändern eine „Dämpfungswand“ eingebaut wird, die den Energieverlust verringert.

Hier werden die beiden Methoden kombiniert (Abb. 10.7). Das Feld wird in jeder Richtung um je 2 Zellen erweitert, so daß die Aktivierung nicht an den Rändern verloren geht. Diese beiden Randschichten wirken als Energiespeicher mit unterschiedlichen Kapazitäten.

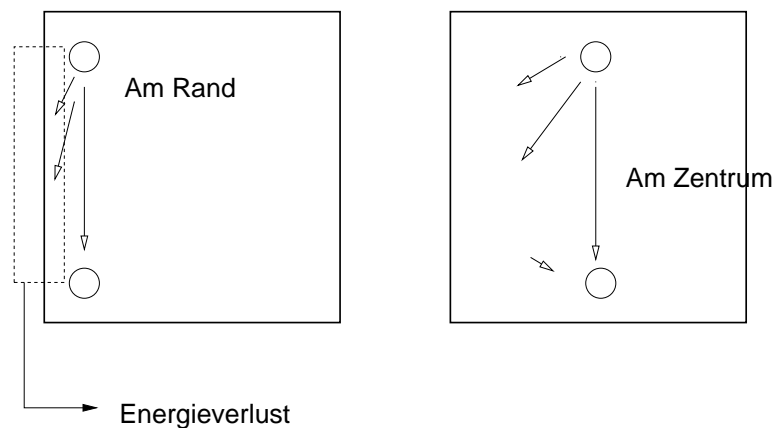


Abbildung 10.6: Energieverlust am Rand

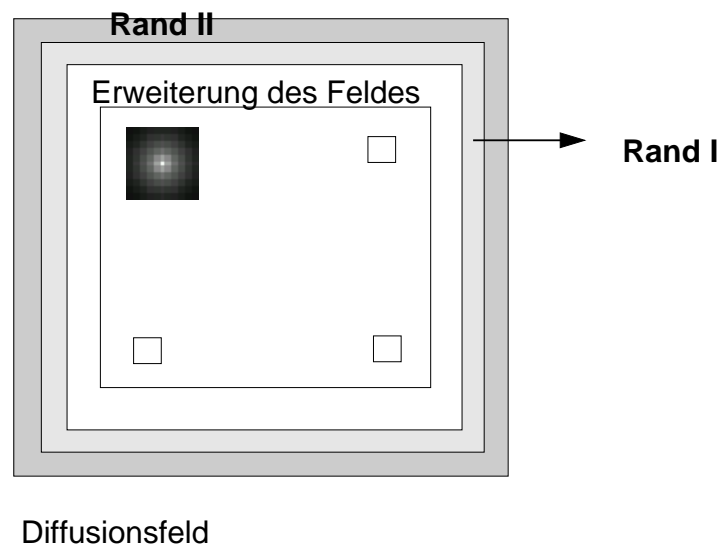


Abbildung 10.7: Diffusion am Rand

Das Diffusionsfeld wird mit zusätzlichen Mauern umgeschlossenen, die den Energieverlust am Rand bremsen. Die kleinen Kästchen bezeichnen die möglichen Positionen des Zuflusses und des Ziels. Der erste und zweite Rand (Rand I und II) dienen dazu, daß hier die Diffusion ‚weich‘ stattfindet.

Beim Rand I wird die Berechnung nach $C(t) = 0.2 \times C(t-1) + 0.8 \times \sum W_i \times N_i(t-1)$ und beim Rand II nach $C(t) = 0.6 \times C(t-1) + 0.4 \times \sum W_i \times N_i(t-1)$ durchgeführt. Dadurch wird der Fluß am Rand gedämpft. Dies spart etwa 30 % der Rechenzeit verglichen mit der Diffusion ohne solche Randschichten.

10.4 CRT bei zwei Handstellungen

Die experimentellen Resultate und die Einzelheiten sind in Abschnitt 5.3 (Abb. 5.6) und 5.5 (Abb. 5.9) dargestellt.

10.4.1 Methode

Hier wird nur die Reizung des linken Körperteils betrachtet. In Abb. 10.8 (a) ist die Reizung der Beine dargestellt. Da die Beine parallel gestellt sind, werden sowohl Morphologie als auch Raum auf die Position -3 plaziert. Der Unterschied zwischen den beiden Handstellungen (hp: parallele Hände, hx: gekreuzte Hände) liegt in der Position der jeweiligen Hand. In diesem Modell bezieht sich die Position der Hände immer auf die räumliche Lage, nicht die morphologische Lage.

In Abb. 10.8 (b) ist die Reizung der Finger dargestellt. Da der Reizort der linke Finger ist, wird der Zufluß immer auf die am weitesten links liegende Position (-3) plaziert (Abb. 10.8, Morphologie). Bei hp* (Abb. 10.8 b, links) sind die Hände nicht gekreuzt. Daher liegt der Reizort auch bei der Position -3 (Raum). Da die Reaktionsorte die beiden ungekreuzten Hände sind, liegen die beiden Hände jeweils bei der extremen Position (-3 für die linke Hand, 3 für die rechte Hand).

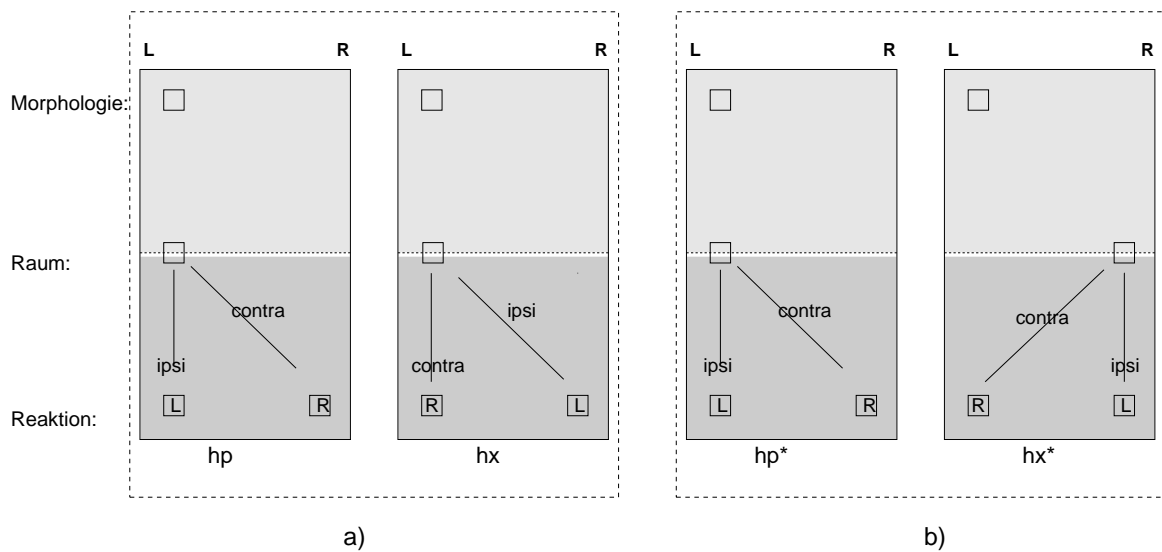


Abbildung 10.8: CRT bei zwei Handstellungen

Die Situationen entsprechen jeweils dem Experiment in Abschnitt 5.3 (Abb. 5.6) und dem Experiment in Abschnitt 5.5 (Abb. 5.9). Das oberste Kästchen repräsentiert die laterale Information auf einer morphologischen Karte, das Kästchen in der Mitte die Information auf einer räumlichen Karte und das unterste Kästchen die räumliche Position der linken (L) bzw. rechten (R) Hand.

a) Die Reizorte sind die parallel gestellten Beine. Die linke Darstellung stellt die hp (parallele Hände) Bedingung und die rechte Darstellung die hx (gekreuzte Hände) Bedingung dar. b) Die Reizorte sind die Zeigefinger. Die linke Darstellung repräsentiert die hp* Bedingung und die rechte Darstellung die hx* Bedingung.

Bei hx* (Abb. 10.8 b, rechts) liegen die Hände gekreuzt jeweils auf der anderen Seite ihres morphologischen Raumes. Daher liegt die räumliche Position (Raum) bei der rechten Position 3 und die beiden Hände tauschen die jeweiligen Positionen.

10.4.2 Ergebnisse

In Abb. 10.9 ist die kontinuierliche Verbindung zwischen zwei Stages angenommen. Da sich hier die Reizorte an den Beinen räumlich nicht ändern, sind die entsprechenden Ergebnisse identisch jeweils zwischen hp (**ipsi**) und hx (**contra**) und zwischen hp (**contra**) und hx (**ipsi**). Zieht man eine fiktive Schwellenlinie in der Höhe der Aktivierung 0.2, dann ergeben die RTs im ansteigenden Teil der Kurven das Verhältnis von hp (**ipsi**, 351 It., It.: Iterationen), hp (**contra**, 573 It.), hx (**ipsi**, 573 It.) und hx (**contra**, 351 It.). Dieses Verhältnis der RTs ist qualitativ ähnlich den Ergebnissen in Abb. 5.7 und 5.8, wobei die beiden Handgelenke zusätzlich gereizt wurden.

In Abb. 10.10 ist eine diskrete Verbindung (a) und eine kontinuierliche Verbindung (b) zwischen zwei Stages angenommen. Die beiden unterscheiden sich qualitativ kaum. Jedoch sind die Vorgänge im kontinuierlichen Fall etwas weiter über Zeit verteilt. Zieht man eine fiktive Schwellenlinie, z.B. in der Höhe der Aktivierung 0.2, dann ergeben bei der kontinuierlichen Verbindung die RTs im ansteigenden Teil der Kurven das Verhältnis , hp* (**ipsi**, 351 It.) < hx* (**ipsi**, 478 It.) < hp* (**contra**, 573 It.) < hx* (**contra**, 718 It.).

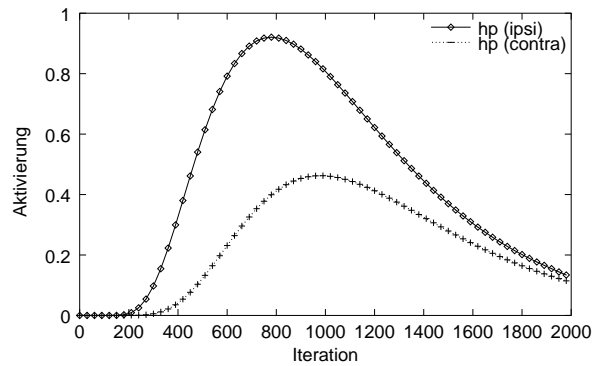


Abbildung 10.9: Resultate für die Abb. 10.8 a.

Simulation der CRT (**ipsi** und **contra**) bei parallelen bzw. gekreuzten Händen. Da hier nur die Reaktionsorte zwischen hp und hx vertauscht sind, sind die Reaktionszeiten identisch zwischen hp (**ipsi**) und hx (**contra**) und zwischen hp (**contra**) und hx (**ipsi**).

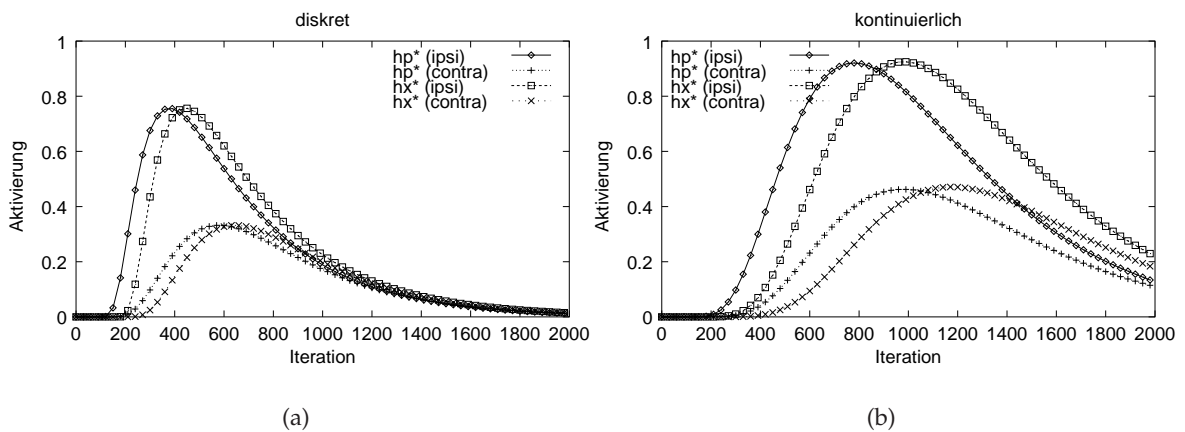


Abbildung 10.10: Vergleich der Simulationen bei diskretem und kontinuierlichem Übergang zwischen den beiden Diffusionsfeldern. Resultate für die Abb. 10.8 b. Simulation der CRT (**ipsi** und **contra**) bei Reizung der Fingerspitzen bei parallelen bzw. gekreuzten Händen. a) diskrete Stages b) kontinuierliche Stages

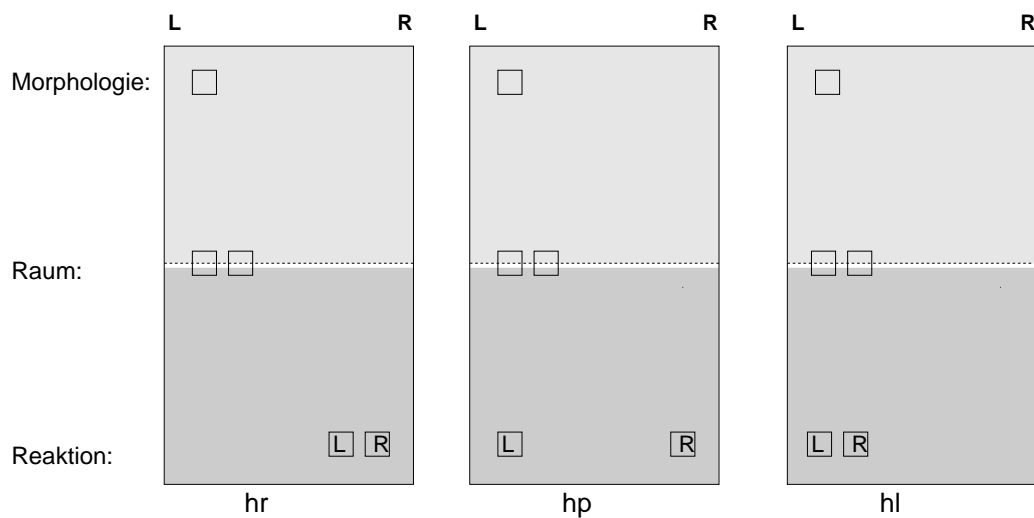


Abbildung 10.11: CRT bei 3 verschiedenen Handstellungen

Die Situation entspricht dem Experiment in Abschnitt 6.1 (Abb. 6.2). Von links nach rechts stellen die Abbildungen jeweils die Situation hr, hp und hl dar. Die Einzelheiten sind analog zur Abb. 10.8

10.5 Variation der Handstellung

Die experimentellen Resultate und die Einzelheiten sind in Abschnitt 6.1 (Abb. 6.2) dargestellt.

10.5.1 Methode

Hier werden die Innen- und Außenseite des linken Beins als Reizorte verwendet. Die morphologische Position ist konstant (-3), unabhängig davon, wo gereizt wird (Abb. 10.11, Morphologie). Die Reize sind im Raum bei allen Handstellungen (hr, hp und hl) bei -3 und -2 (jeweils in der Reihenfolge Außen- und Innenseite) positioniert. Die Hände (Abb. 10.11, Reaktion) sind bei hr auf 2 und 3, bei hp auf -3, 3 und bei hl auf -3 und -2 gestellt. Da zwei Reizorte vorliegen, wird die Simulation getrennt für jeden Ort durchgeführt.

10.5.2 Ergebnisse

Es stellt sich heraus, daß bei allen Bedingungen die linke Hand die schnellere Reaktion aufweist, mit einer Ausnahme von der Innenseite bei hl, bei der die rechte Hand die schnellere Antwort liefert (Abb. 10.12, Tab. 10.1). Wählt man eine Schwelle von 0.2, so erhält man die in Tab. 10.1 dargestellten Werte (Zahl der notwendigen Iterationsschritte). Klassifiziert nach dem kompatiblen (**ipsi**) bzw. inkompatiblen (**contra**) Fall, zeigen die drei Bedingungen das Verhältnis, $hr > hp > hl$. Vergleicht man die Iterationsschritte zwischen **ipsi** und **contra** Bedingungen, so zeigt sich, daß sich mit Ausnahme von hr für **ipsi** immer kürzere Dauer als für **contra** gebraucht ergeben.

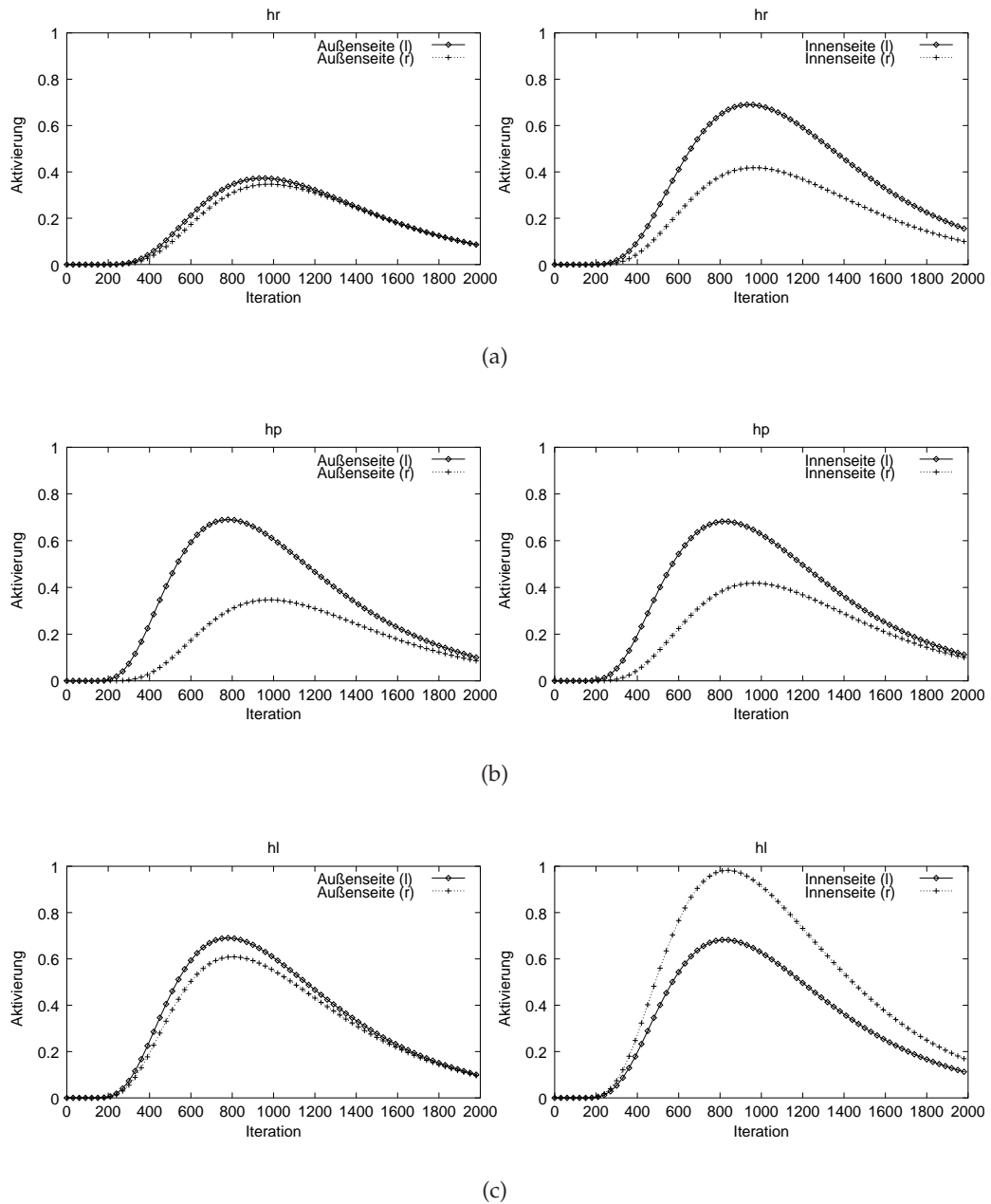


Abbildung 10.12: Variation der Handstellung

a) hr, b) hp und c) hl. Die Außenseite und Innenseite werden jeweils in der linken bzw. rechten Abbildung dargestellt, getrennt nach der Hand (l: die linke, r: die rechte Hand), mit der geantwortet werden soll.

	hr	hp	hl
ipsi	581.5	477	374
contra	553	518	403.5
Innenseite (l)	473	403	403
Innenseite (r)	576	576	370
Außenseite (l)	587	378	378
Außenseite (r)	633	633	404

Tabelle 10.1: Simulation der in Abb. 6.2 dargestellten Experimente

Der Iterationsschritt, bei dem die Schwelle (0.2) erreicht wird, ist für drei Bedingungen getrennt nach dem Reizort und der zur Antwort verwandten Hand dargestellt. Zusätzlich sind die kompatiblen (**ipsi**) und inkompatiblen (**contra**) Fälle zusammen gemittelt angegeben.

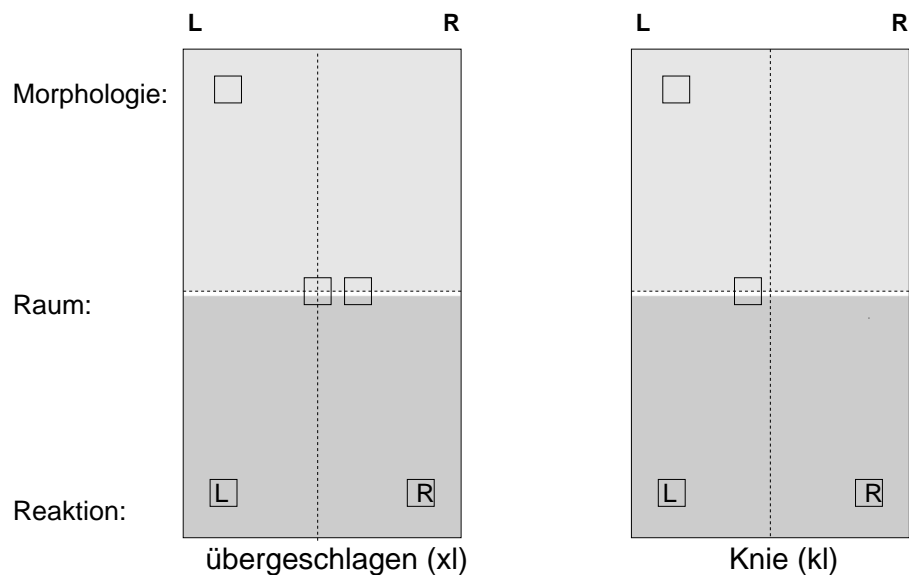


Abbildung 10.13: CRT bei 2 verschiedenen Beinstellungen

Die Situation entspricht dem Experiment in Abschnitt 6.2 (Abb. 6.5). Die linke und rechte Abbildung stellt jeweils die Situation xl und kl dar. Die Einzelheiten sind analog zur Abb. 10.8.

10.6 Variation der Beinstellung

Die experimentellen Resultate und die Einzelheiten sind in Abschnitt 6.2 (Abb. 6.5) dargestellt.

10.6.1 Methode

Wieder werden die Innen- und Außenseite des linken Beins als Reizorte verwendet. Die morphologische Position ist konstant (-3), unabhängig davon, wo gereizt wird (Abb. 10.13, Morphologie). Die räumliche Position des Reizes wird bei xl auf 0 und 1 gesetzt. Da bei kl die beiden Reizorte lateral fast bei der gleichen Position liegt, werden die beiden Orte auf -1 gesetzt. Die beiden Hände liegen jeweils bei -3 und 3. Die Simulation wird wie in Abschnitt 10.5 getrennt nach dem Reizort durchgeführt.

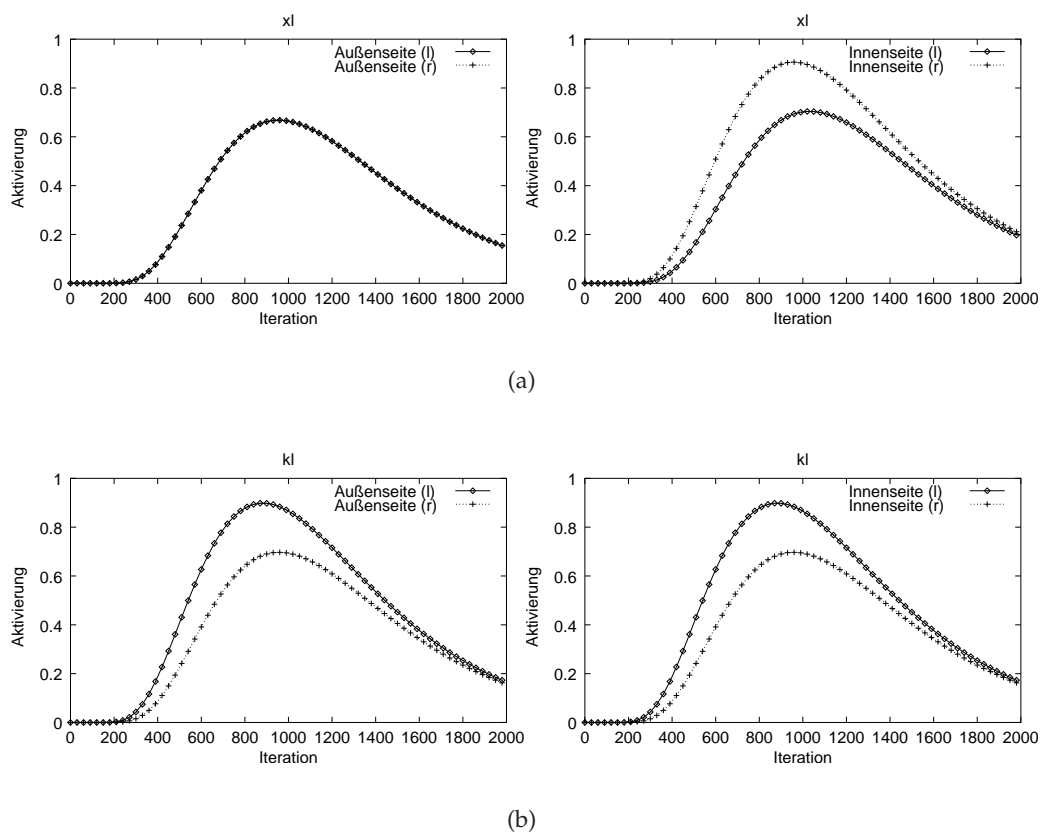


Abbildung 10.14: Variation der Beinstellung

a) xl und b) kl. Die Außenseite und Innenseite werden jeweils in der linken bzw. rechten Abbildung dargestellt, getrennt nach der zu antwortenden Hand (l: die linke, r: die rechte Hand).

10.6.2 Ergebnisse

Bei kl ist die Reaktion der linken Hand schneller als die der rechten Hand (Abb. 10.14 b). Hingegen ergibt sich bei xl, daß bei der Außenseite, wie zu erwarten kein Unterschied zwischen den beiden Händen vorhanden ist, da die räumliche Position des Reizes die gleiche Distanz zu den beiden Händen hat (Abb. 10.14 a). Für die Innenseite ist die rechte Hand aber schneller.

Die Iterationsschritte, die zum Erreichen der Schwelle (0.2) benötigt werden, sind in Tab. 10.2 dargestellt. Die größere Dauer für **contra** ist nur bei xl zu sehen.

10.7 Variation der Lage der Finger im Raum

Die experimentellen Resultate und die Einzelheiten sind in Abschnitt 9.2 (Abb. 9.2) dargestellt.

	xl	kl
ipsi	470	445.5
contra	510	445.5
Innenseite (l)	533	407
Innenseite (r)	453	484
Außenseite (l)	487	407
Außenseite (r)	487	484

Tabelle 10.2: Simulation der in Abb. 6.5 dargestellten Experimente.

Die Iterationsschritte, bei denen die Schwelle (0.2) erreicht wird, sind für zwei Bedingungen getrennt nach dem Reizort und der zur Antwort verwandten Hand angegeben. Zusätzlich sind die kompatiblen (**ipsi**) und inkompatiblen (**contra**) Fälle zusammen gemittelt eingetragen.

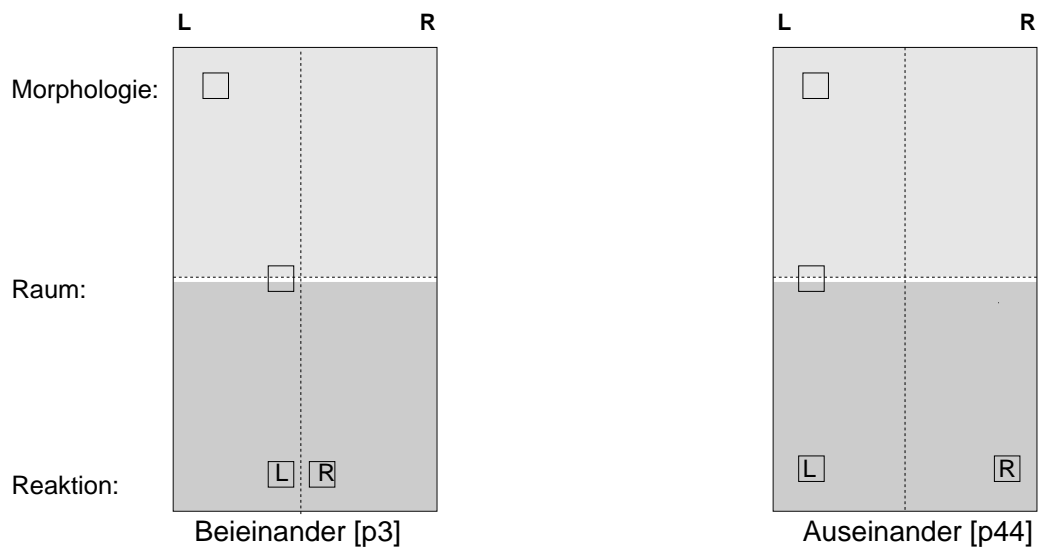


Abbildung 10.15: CRT bei 2 verschiedenen Lage der Finger im Raum

Die Situation entspricht dem Experiment in Abschnitt 9.2 (Abb. 9.2). Die linke und rechte Abbildung stellen jeweils die Situation p3 und p44 dar. Die Einzelheiten sind analog zur Abb. 10.8.

10.7.1 Methode

Hier wird nur der linke Finger betrachtet. Die morphologische Position ist auf -3 gesetzt (Abb. 10.15, Morphologie). Die räumliche Position des Reizes wird bei p3 auf -1 und bei p44 auf -3 gesetzt. Entsprechend werden die beiden Hände ohne Kreuzung jeweils auf -1, 1 und -3, 3 gesetzt.

10.7.2 Ergebnisse

In Abb. 10.16 (a) sind die beiden Situationen (p3, p44) an der Schwelle (0.2) kaum unterscheidbar (jeweils 399 It., 403 It.). Vergleicht man aber die Differenz zwischen der linken (kompatibel) und der rechten (inkompatibel) Hand, dann zeigt sich, daß die Differenz bei p44 (325 It.) schneller als bei p3 (457 It.) wächst.

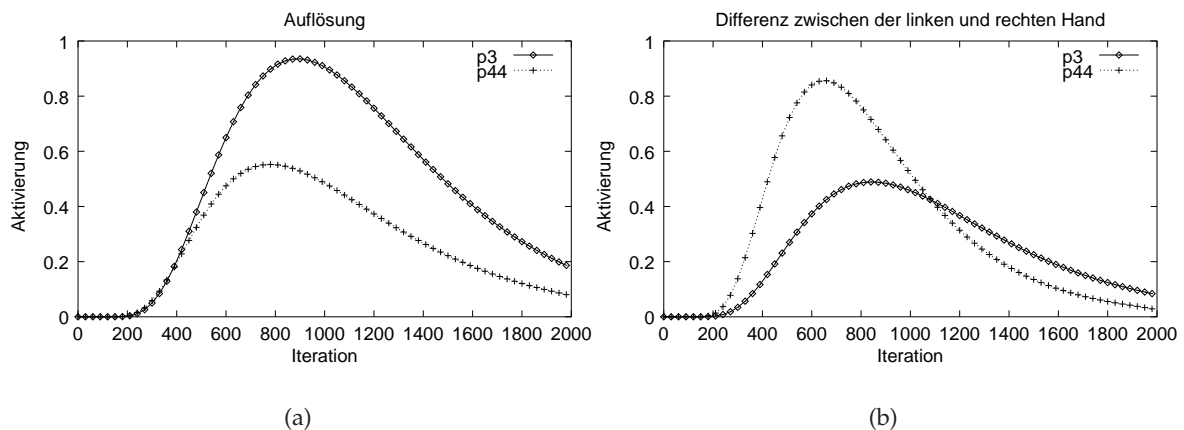


Abbildung 10.16: Variation der Lage der Finger im Raum

In a) wird die RT der jeweiligen Position (p3, p44: kompatibel) und in b) die Differenz zum inkompatiblen Fall dargestellt.

10.8 Zusammenfassung

Um die gemessene CRT zu simulieren, wird ein Diffusionsalgorithmus eingeführt. Dabei werden drei verschiedene Repräsentationsräume (die morphologische und die räumliche Karte für den Reiz und die räumliche Karte für die Reaktionsorte) angenommen. Die CRT ergibt sich dabei aus der Zeitdauer, die der Energiefluß benötigt, was mit zwei Diffusionsfeldern realisiert wird.

Die simulierten Werte der Abb. 10.10 approximieren die experimentellen Resultate (Abschnitt. 5.5, Abb. 5.9) sehr gut, wobei die **ipsi** und **contra** Bedingungen bei den gekreuzten bzw. ungekreuzten Händen untersucht wurden (kürzere Zeit bei **ipsi** unabhängig von der Handstellung, längere Zeit bei **contra** mit den nicht gekreuzten Händen als bei **ipsi** mit den gekreuzten Händen). Dieses relative Verhältnis kann unabhängig davon erhalten werden, ob das Modell diskret oder kontinuierlich konstruiert ist. Im Falle der Reizung an den Beinen (Abb. 10.9) zeigen die simulierten Werte jedoch einen qualitativen Unterschied zu den experimentellen Resultaten (Abschnitt. 5.3, Abb. 5.6). Die RTs der Experimente zeigen einen kleinen zeitlichen Unterschied zwischen der **ipsi** und **contra** Aufgabe bei den gekreuzten Händen (**ipsi** > **contra**). Dagegen zeigen die Resultate der Simulation einen großen Unterschied, der dem Experiment der Abb. 5.8 entspricht, in dem die beiden Handgelenke zusätzlich gereizt wurden. Dies liegt vermutlich daran, daß im Modell die morphologische Eigenschaft der Hände nicht berücksichtigt wird.

Bei der Simulation der Situation, bei der die zwei Seiten des linken Beines gereizt werden (Abschnitt. 6.1, 6.2; Abb. 6.2, 6.5), wird zwar die Hand mit kürzeren RTs mit Ausnahme der Außenseite bei xl (Abb. 10.14) sehr exakt beschrieben. Die RTs zeigen aber einige Unstimmigkeiten beim Vergleich mit den tatsächlichen Experimenten. Ein Problem ist, daß bei hr die **ipsi** Situation mehr Iterationsschritte als **contra** braucht. Ein zweites Problem besteht darin, daß bei hr allgemein mehr Iterationsschritte als bei hl benötigt werden (Tab. 10.1), während in den Experimenten (Abschnitt.

6.1; Abb. 6.2) das Umgekehrte der Fall ist.

Der in Kap. 9 dargestellte Effekt, daß die transversal beieinanderliegenden Reizorte längere CRT als die auseinanderliegenden Reizorte aufweisen, kann in Abb. 10.16 erklärt werden. Obwohl die Aktivierungsvorgänge in den beiden Situationen überlappend verlaufen, ergibt die Differenz der Aktivierungen zwischen den jeweiligen Händen, daß bei der räumlich fernen Lage der Finger die Differenz zeitlich früher anwächst. Die Differenz könnte als Konkurrenzzustand zwischen den alternativen Antworten betrachtet werden.

Die Ergebnisse, die in diesem Kapitel dargestellt sind, werden in Tab. 13.2 (Seite 119) mit Ergebnissen des anderen Modells verglichen.

11 Entscheidungsprozeß

11.1 Einleitung

Dieses Kapitel beschreibt ein weiteres Modell, das aber strukturell nicht Stage-basiert ist. Die Grundidee liegt darin, die drei verteilten Repräsentationsräume, die in Kap. 10 dargestellt sind, in einen Raum zu integrieren. Dabei liegt der Unterschied zum Modell des Kap. 10 darin, daß der Informationsfluß nicht unbedingt sequentiell vom Reiz ausgelöst wird, sondern er auch vom Reaktionsort aus beginnen kann.

In einer integrierten räumlichen Repräsentation könnte die Repräsentation des Körpers als ein Hindernis verstanden werden, und daß bei einer Bewegung, die dem Körper in bestimmter Weise zu nahe kommt, der Informationsfluß durch dieses Hindernis gebremst werden kann. Andererseits könnte dies als ungleichmäßige Topologie des Raumes realisiert werden, d.h. die Repräsentation des Körpers könnte den entsprechenden Teilbereich im Repräsentationsraum so verzerren, daß der betroffene Bereich räumlich ausgedehnt wird und sich somit der Informationsfluß über einen längeren Weg erstreckt.

Hier soll eine mögliche Erklärung für die Experimente gefunden werden, in denen die Beine gereizt werden, und die VP entscheiden muß, mit welcher Hand sie zum Reizort greift. (Kap. 4).

11.2 Hinderniskodierung

Zunächst sollen hier drei verschiedene Methoden beschrieben werden, die zur Repräsentation eines Hindernisses eingesetzt werden können. Da zur Simulation der RT aber das Distanz-Zeit Verhältnis eine wichtige Rolle spielt, werden zunächst alle Methoden betrachtet. Die letztendlich eingesetzte Methode wird in Abschnitt 11.2.2 beschrieben.

11.2.1 Einbau eines Hindernisses bei Diffusion und Wave-Propagation

Die Ausbreitung der Aktivierung soll hier wieder in Form eines Diffusionsfeldes simuliert werden. Blockiert im Diffusionsfeld ein Hindernis den Weg des Flusses, dann findet zwar die Energie einen neuen Weg um das Hindernis herum. Der Verlust der Energie kann jedoch sehr hoch sein (siehe Abb.

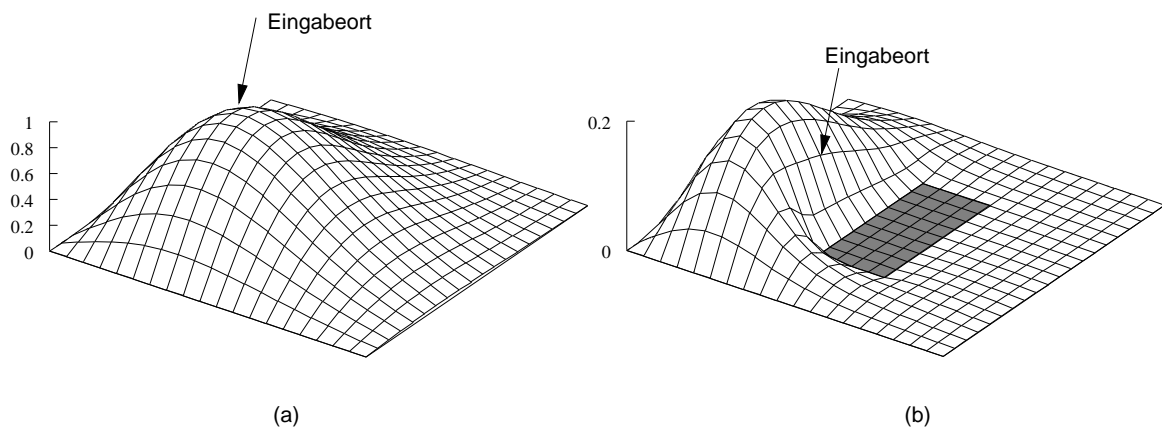


Abbildung 11.1: Hindernis im Diffusionsfeld

In a) wird die Diffusion ohne Hindernis und b) mit Hindernis dargestellt. Das dunkle Kästchen in der Mitte des Feldes in b) bezeichnet ein Hindernis. Die unterschiedliche Skalierung ist zu beachten.

11.1), da das Hindernis die Energie im Kontaktbereich komplett absorbiert. Obwohl der Energieverlust am Hindernis durch die Änderung der Gewichte unterdrückt werden kann, führt dies dazu, daß sich die Energie am Rand schneller als an anderen Bereichen ausbreitet, so daß dort das Zeit-Distanz Verhältnis von dem der anderen Bereiche unterscheidet.

Wie in Abb. 11.1 zu sehen ist, hat die Erregung ohne Hindernis alle Ecken des Feldes erreicht. Dies ist jedoch nicht der Fall, wenn das Hindernis verwendet wird. Außerdem ist die Energie insgesamt stark unterdrückt. Diese Eigenschaft macht den Einbau des Hindernisses in das Diffusionsfeld untauglich.

Eine andere Überlegung wäre, zwar die Dynamik einer Flüssigkeit zu verwenden, aber ein ‚weiches‘ Hindernis einzubauen, das die Energie nicht komplett absorbiert, sondern gedämpft weiterleitet. Die ‚Wave-Propagation‘ scheint zunächst dafür geeignet zu sein, da mit der Methode allgemeine Eigenschaften einer Flüssigkeit, wie Propagation, Reflektion und Refraktion gut realisiert werden können. Die Wave-Propagation (Hoeffler, 1985; Tietz, 1995) beschreibt eine Zelle mit vierdimensionalen Vektoren, die die unterschiedlichen Richtungen repräsentieren. Durch die Variation dieser 4 Komponenten kann man die erwähnten Eigenschaften simulieren. Die Refraktion ist hier von Interesse, da diese Eigenschaft zur Simulation eines weichen Hindernisses verwendet werden kann (Abb. 11.2).

Die Anwendung dieser Methode zeigt einen Effekt (Abb. 11.3 a, b), daß die Amplitude der Aktivierung durch das Hindernis gesunken wird. Die Differenz der Iterationen für einen kompatiblen und inkompatiblen Fall ändert sich nicht zwischen einer Simulation ohne Hindernis und mit Hindernis. Dies liegt daran, daß der Fluß im wesentlichen periodisch propagiert, und das Hindernis deshalb keine Verlängerung der Zeit bewirkt. Außerdem benötigt diese Methode wegen der 4 Richtungskomponenten längere Rechenzeit als die Diffusion.

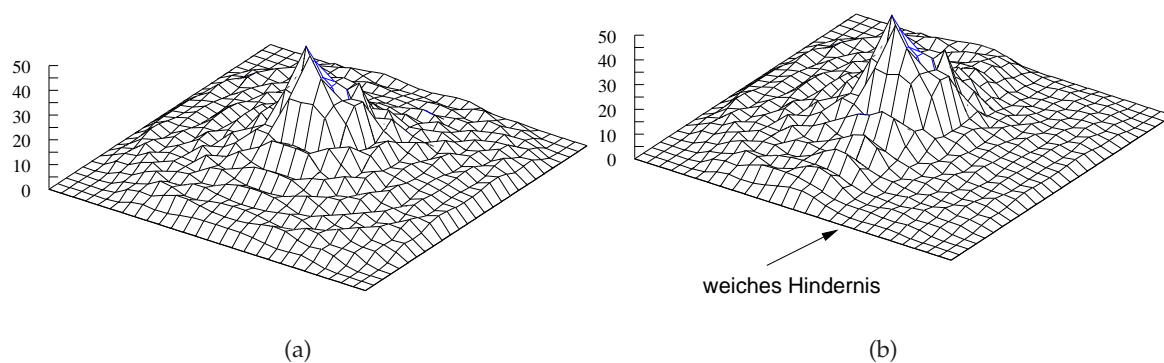


Abbildung 11.2: Weiches Hindernis durch Refraktion
 In a) ist eine normale Propagation, in b) die Refraktion dargestellt. Die Welle wird mit einer Periode von 16 Iterationen (80×80 Gitter) generiert.

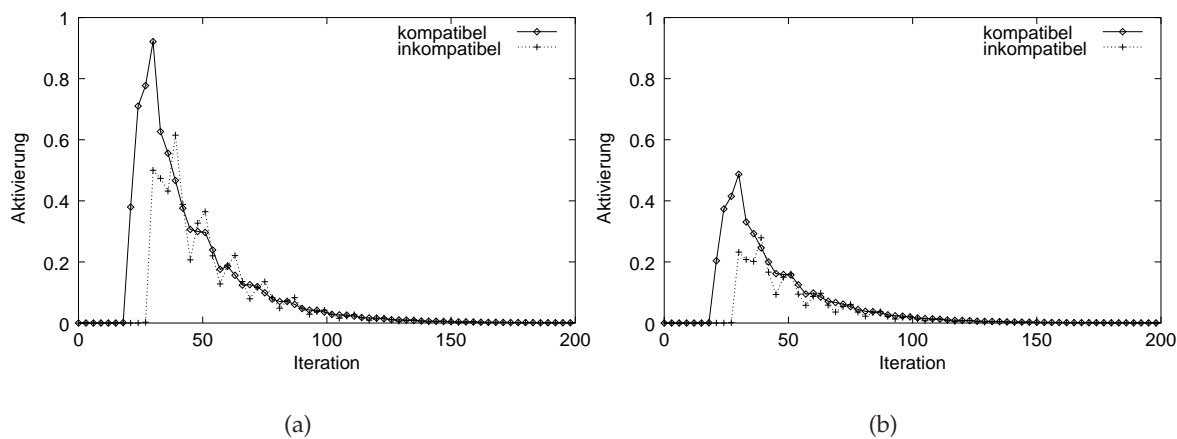


Abbildung 11.3: Wave-Propagation ohne vs. mit Hindernis
 Der kompatible bzw. inkompatible Fall wird in a) ohne und in b) mit Hindernis simuliert. Die Simulation wird mit dem 50×50 Gitter durchgeführt.

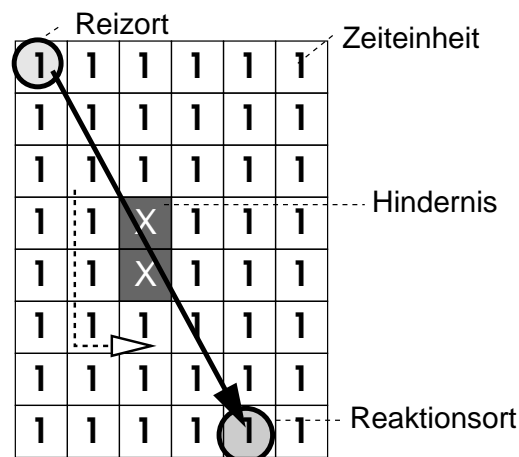


Abbildung 11.4: Darstellung des Reaktionsfeldes, bei dem jeder Zelle eine Zeit zugeordnet ist. Der dicke Pfeil bezeichnet einen Fluß, der entlang der kürzesten Verbindung verläuft. Jede Zelle entspricht einer bestimmten Zeiteinheit (hier 1). Das dunkle Kästchen in der Mitte repräsentiert ein Hindernis. Der Reizort und der Reaktionsort sind jeweils durch einen Kreis bezeichnet. Der gestrichelte Pfeil zeigt einen kürzesten Weg um das Hindernis herum.

11.2.2 Hindernis als Zeit

Im folgenden soll eine dritte Methode beschrieben werden, mit der ein Hindernis repräsentiert werden kann, das die zeitliche Verlängerung der Energieausbreitung ermöglicht.

Die Grundstruktur dieser Repräsentation bleibt hier wie in Kap. 10 zunächst zweidimensional, damit der S-R (Stimulus-Reaktion) Raum ungeändert verwendet werden kann. Der Energiefluß wird aber nicht mehr als Diffusion bzw. Wave-Propagation dargestellt, sondern als linearer Zeitablauf beschrieben. Je länger die Distanz zwischen dem Reizort und dem Reaktionsort ist, desto länger dauert der Ablauf.

Dies wird auf die folgende Weise erreicht. Tritt der Fluß in eine neue Zelle ein, verbringt er dort eine bestimmte Zeit (Abb. 11.4). Dabei enthält ein Hindernis einen höheren Wert, was zur Folge hat, daß ein Fluß durch das Hindernis längere Zeit zur Ausbreitung benötigt als wenn kein Hindernis vorhanden ist. Falls beispielsweise das Hindernis in Abb. 11.4 einen Wert von 2 enthält, dann ergibt sich, daß der Fluß durch das Hindernis (der dicke Pfeil) die gleiche Zeit verbraucht wie der Fluß, der das Hindernis entlang des unterbrochenen Pfeils umgeht. In einer kontinuierlichen Version könnte jede Zelle als zeitlicher Tiefpassfilter angesehen werden, wobei dessen Zeitkonstant größer ist, falls es sich um ein Hindernis handelt.

Da das Distanz-Zeit-Verhältnis hier linear angenommen ist, kann dieses Modell auch zur Berechnung der Trajektorienlänge verwendet werden, was später näher beschrieben werden soll. Interpretiert man nun den Inhalt der Zelle als eine bestimmte Skala, wobei ein Körperteil als Hindernis repräsentiert wird, dann kann auch wie in Abb. 11.5 dargestellt, die Länge einer dreidimensionalen Trajektorie um den Körper simuliert werden. Der Vorteil ist, daß die Distanz von der euklidischen Distanz gebildet werden kann.

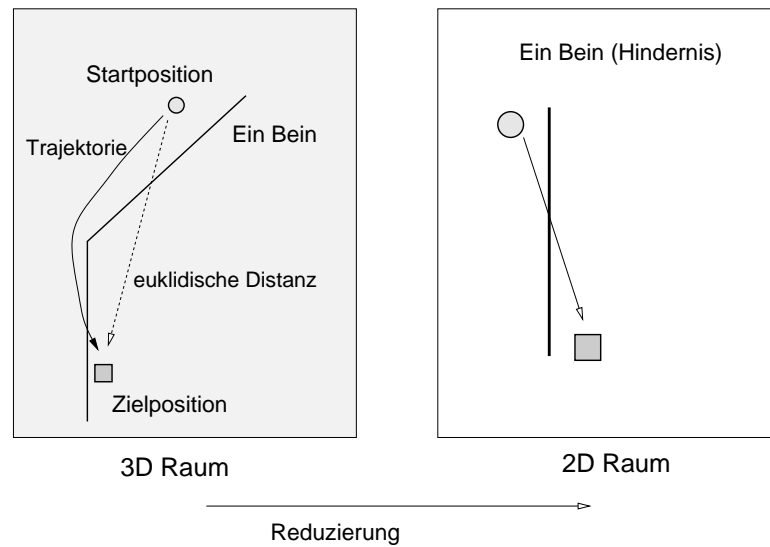


Abbildung 11.5: Beispiel des Modells in Abb. 11.4

Eine dreidimensionale Trajektorie, die eine Hand erzeugt, z.B. um eine Innenseite des Beines (Ziel) von der Außenseite des Beines (Start) zu erreichen, kann sowohl dreidimensional (linke Abbildung) als auch zweidimensional im reduzierten Raum (rechte Abbildung) simuliert werden, indem das Bein als Hindernis repräsentiert wird.

11.3 Konstruktion des Modells

11.3.1 Bein als Hindernis

Grundstruktur Die dreidimensionale Geometrie der Beine soll jetzt auf einer zweidimensionalen Karte abgebildet werden. Dies erfolgt dadurch, daß die Beine so auf die zweidimensionale Fläche projiziert werden, daß die laterale Information nicht verloren geht. Dabei ist hier anzunehmen, daß ein internes Körpermodell die notwendige räumliche Information des Körpers liefert. Als internes Modell kann algorithmisch das MMC-Netz verwendet werden, das in Kap. 12 näher beschrieben werden soll.

Die Zellen, die die Beine repräsentieren (Abb. 11.6), sollen den Wert von 12 enthalten. Die Beine werden zuerst als Linie mit der Zellbreite 1 repräsentiert. Dies wird dann zweifach diffundiert, so daß sich um das Hindernis herum ein exponentiell abfallender Bereich von zwei Zellen bildet. Diese Struktur bewirkt, daß auch ein nahe am Hindernis entlanglaufender Fluß abgebremst wird. Bewegt sich eine Hand nahe am Körper, dann wird diese Bewegung verlängert, jedoch nicht so stark wie bei einer Bewegung, die über den Körper hinweg durchgeführt wird.

Zwei laterale Repräsentationen

In Abb. 11.6 wurden die beiden Beine zwar in einer Karte dargestellt, im Modell sind sie aber in zwei getrennten Karten abgebildet. Jede der beiden Karten repräsentiert den ganzen Raum (links und rechts), bildet aber nur jeweils das als Hindernis wirkende Bein ab. Dabei soll angenommen werden,

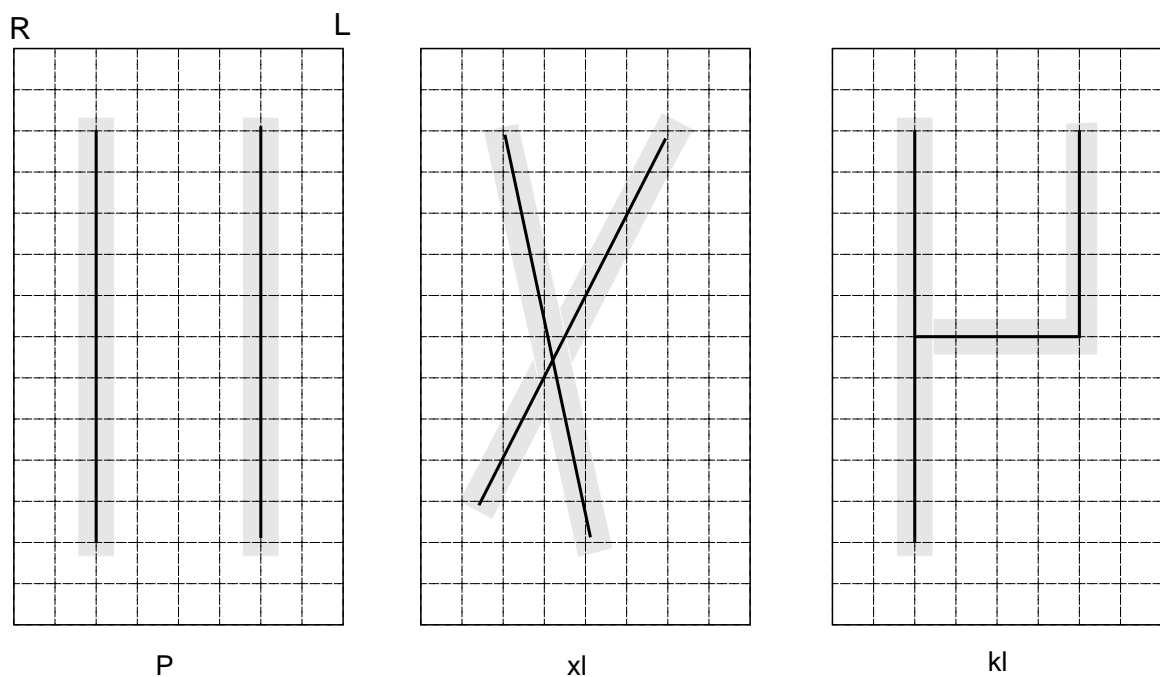


Abbildung 11.6: Repräsentation der Beine auf der zweidimensionalen Karte

Die drei Beinstellungen (p, xl und kl) sind auf der zweidimensionalen Karte von 70×40 Zellen (jedes Quadrat entspricht 5×5 Zellen) dargestellt. Nach unten wird die Richtung zum Fuß dargestellt. Die dicken Linien bezeichnen die Beine. Die Färbung um die Linien repräsentiert die Erweiterung des Beines im Sinne eines allmählich abfallenden Potentialfeldes. Die Zellen ohne Besetzung enthalten den Wert von 1. Die Zellen, die die Beine repräsentieren (dicke Linien), enthalten den Wert von 12.

daß nur das morphologisch kontralaterale Bein als Hindernis wirkt. Die linke Karte bildet also das rechte Bein als Hindernis und die rechte Karte das linke Bein als Hindernis ab.

Jede Karte wird zusätzlich in zwei Hälften lateral getrennt. Dabei besitzt die linke Hälfte der linken Karte geringere Werte (70%) als die rechte Hälfte und umgekehrt. Diese Eigenschaft dient dazu, daß die Verarbeitung im eigenen ‚Heimbereich‘ einen zeitlichen bzw. räumlichen Vorteil gewinnt.

11.4 Variation der Hand- bzw. Beinstellung

Hier sollte zuerst erwähnt werden, daß die Experimente, in denen die Finger als Reizorte verwendet wurden, nicht mit diesem Modell simuliert werden können. Der Grund ist, daß dieses Modell im wesentlichen zur Repräsentation des Körpers, besonders der Beine aufgestellt ist und die Distanz zwischen dem Reizort und dem Reaktionsort eine große Rolle spielt. Da bei Reizung der Finger die Distanz zwischen dem Reizort und dem Reaktionsort sehr klein ist, werden die Resultate von z.B. Abb. 5.9 im Vergleich zu dem ersten Modell (Kap. 10) nicht berücksichtigt. Die folgenden Ergebnisse beschreiben daher nur die Situation, in der die Beine als Reizorte verwendet werden.

11.4.1 Reiz- und Reaktionsorte

Mit diesem Modell sollen die experimentellen Situationen des Kap. 4–6 simuliert werden. Dafür werden die Reiz- bzw. Reaktionsorte wie in Abb. 11.7 definiert. In Abb. 11.7 ist das Beispiel der Beinstellung p dargestellt.

11.4.2 Ergebnisse (parallele und gekreuzte Hände bei p)

Hier wird nur das linke Bein betrachtet. Wie beim Experiment der Abb. 5.6 werden hier die Reizorte der Außenseite berücksichtigt. Die Resultate sind in Tab. 11.1 dargestellt. Es ergibt sich, daß zunächst in allen Fällen der Zeitkonsum beim Unterschenkel größer als beim Oberschenkel ist. Diese Tendenz stimmt mit dem Experiment der Abb. 5.4 überein. Zweitens ist der Zeitkonsum bei der **ipsi** Aufgabe kleiner als bei der **contra** Aufgabe, falls die beiden Hände nicht gekreuzt sind. Bei Kreuzung der Hände ist dieses Verhältnis umgekehrt. Vergleicht man die jeweils kleineren Zeitdauern (hp , **ipsi**; hx , **contra**), dann ergibt sich das Verhältnis hp (**ipsi**) $<$ hx (**contra**). Diese Ergebnisse entsprechen qualitativ den experimentellen Resultaten (Abb. 5.6). Jedoch ist bei den gekreuzten Händen der Unterschied zwischen **ipsi** und **contra** größer als der im Experiment (Abb. 5.6).

11.4.3 Ergebnisse (Variation der Handstellung bei paralleler Beinstellung)

In Tab. 11.2 sind die verbrauchten Zeiten angegeben. Bei Reizung der Außenseite ergibt die linke Hand in allen Bedingungen kürzere Zeit als die rechte Hand. Diese Tendenz ist im allgemeinen auch bei Reizung der Innenseite zu finden. Ausnahmsweise ist bei der Handstellung hl die Zeit der rechten Hand kürzer. Es ergibt bei **ipsi** das zeitliche Verhältnis, $hr > hp > hl$, aber bei **contra** ist der Unterschied nicht eindeutig. Dies widerspricht den experimentellen Ergebnissen.

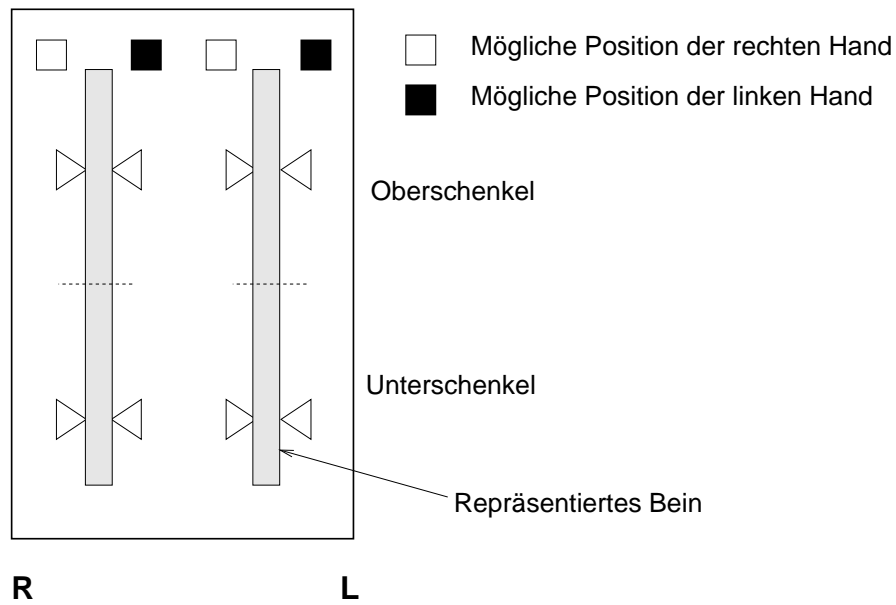


Abbildung 11.7: Die Position des Reizes und der Hände

Die obere Hälfte jedes Beines repräsentiert den Oberschenkel, die untere den Unterschenkel. Die durch Dreieck gekennzeichnete Positionen in der Mitte des Ober- bzw. Unterschenkels werden als Reizorte verwendet. Die Hände werden entweder auf eine Seite (hl: die beiden Hände links, hr: die beiden Hände rechts) oder auf die jeweiligen morphologisch ipsilateralen Seiten gestellt (hp). Ihre Position (Quadrat) ist stets horizontal 4 Zellen vom Bein und vertikal 2 Zellen vom Ende des Beines entfernt. Bei den anderen Beinstellungen, die hier nicht dargestellt sind (xl, kl ; Abb. 11.6), werden die Positionen in derselben Weise definiert. Bei gekreuzten Händen (hx) wird die Position der beiden Hände in der Stellung hp einfach vertauscht.

	hp		hx	
	ipsi	contra	ipsi	contra
O	11.2	76	54.7	26.6
U	32.2	121	128.7	47.6
gesamt	21.7	98.5	91.7	37.1

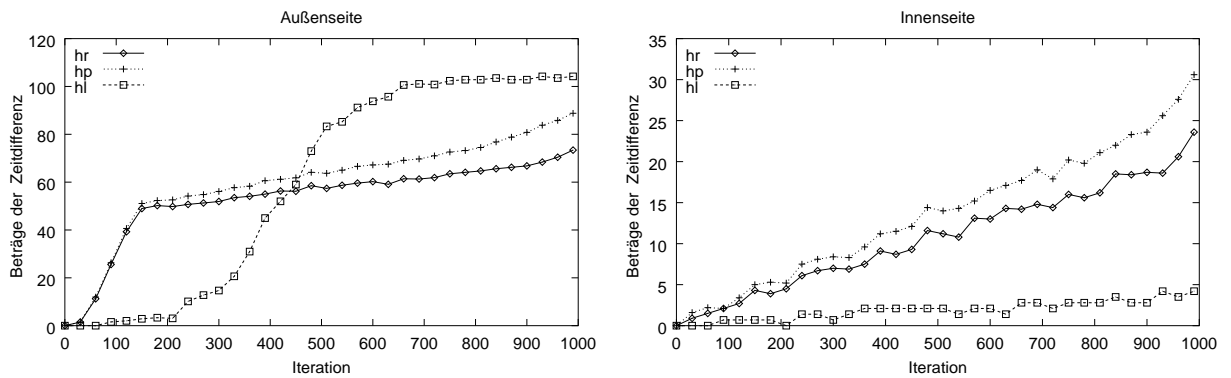
Tabelle 11.1: parallele und gekreuzte Hände bei paralleler Beinstellung

hp: parallele Hände, hx: gekreuzte Hände, O: Oberschenkel, U: Unterschenkel

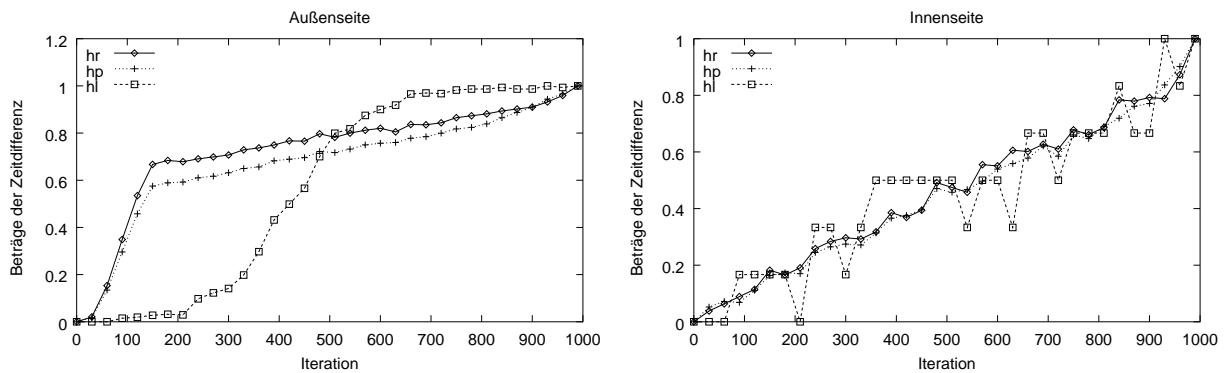
	hr	hp	hl
ipsi	57.3	49.6	32.2
contra	82.2	78.7	86.4
Innenseite (l)	43.4	36.4	36.4
Innenseite (r)	67	67	32.2
Außenseite (l)	47.6	32.2	32.2
Außenseite (r)	121	121	136.4

Tabelle 11.2: Zeitkonsum bei drei Handstellungen (hr, hp und hl)

Die zum Ziel verbrauchte Zeit wird getrennt nach dem Reizort bzw. Aufgabentyp (**ipsi** und **contra**) angegeben. Der Buchstabe in Klammern kennzeichnet die eingesetzte Hand



(a)



(b)

Abbildung 11.8: Zeitkonsumvergleich

Die Beträge der Differenz der Zeit der linken und rechten Hand werden mit Iterationen des Flusses verglichen. Die drei Handstellungen (hr, hp, hl) sind, getrennt nach dem Reizort (die linke Abbildung für die Außenseite und die rechte für die Innenseite) dargestellt. a) zeigt den gesamten Verlauf. In b) wird der Betrag auf den Endwert normiert.

	xl	kl
ipsi	55	38.2
contra	76.85	50.65
Innenseite (l)	68.95	32.2
Innenseite (r)	40	40
Außenseite (l)	70	36.4
Außenseite (r)	84.75	69.1

Tabelle 11.3: Zeitkonsum bei zwei Beinstellungen (xl, kl)

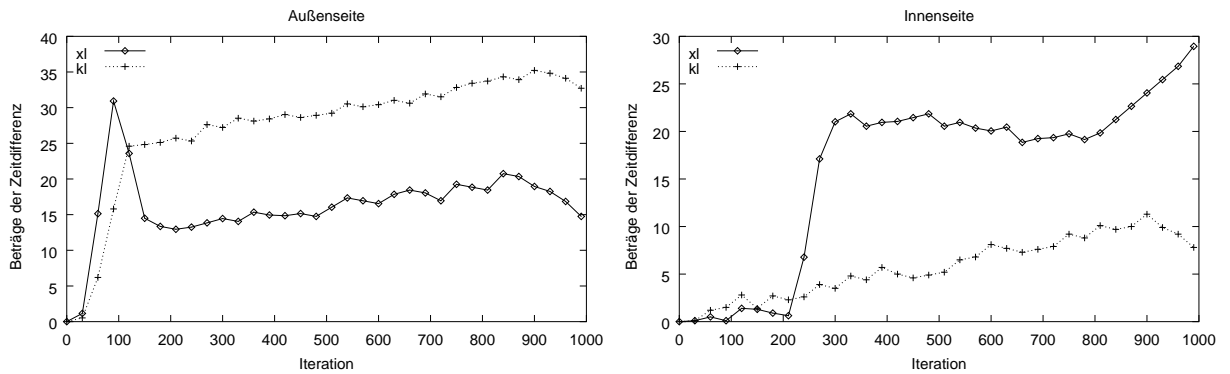
Die zum Ziel verbrauchte Zeit wird getrennt nach dem Reizort bzw. Aufgabentyp (**ipsi** und **contra**) angegeben. Der Buchstabe in Klammern kennzeichnet die eingesetzte Hand

Vergleicht man aber die Differenz zwischen dem Zeitverbrauch der linken und der rechten Hand (Abb. 11.8), dann ist erkennbar, daß bei Reizung der Außenseite die Differenz mit unterschiedlichem Tempo anwächst, während sich bei Reizung der Innenseite das Wachstum voneinander nicht eindeutig unterscheidet. Dieser Verlauf ist in Abb. 11.8 (b) normiert auf den Wert der am Ziel erhaltenen Differenz dargestellt. Bei einer fiktiven Schwellenlinie 0.4 ergibt die Zahl der notwendigen Iterationsschritte das Verhältnis $hr < hp < hl$ bei der Außenseite (Abb. 11.8 b), was der umgekehrten Reihenfolge der Endsumme entspricht (Tab. 11.2). Also entspricht dies den experimentellen Ergebnissen.

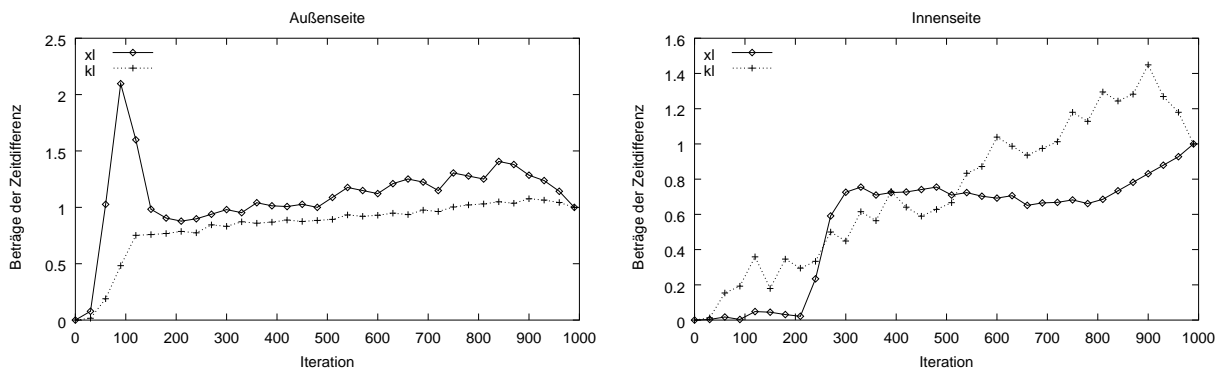
11.4.4 Ergebnisse (Variation der Beinstellung)

In Tab. 11.3 sind die verbrauchten Zeiten angegeben. Mit Ausnahme der Innenseite bei xl, wobei die rechte Hand kürzere Zeit aufweist, verbraucht die linke Hand stets weniger Zeit als die rechte Hand. Sowohl bei der **ipsi** Aufgabe als auch bei der **contra** Aufgabe dauert stets die Stellung xl länger als die Stellung kl.

Vergleicht man auch hier die Differenz des Zeitverbrauchs der jeweiligen Hand (Abb. 11.9 a), dann ergibt sich, daß am Anfang des Verlaufs das Wachstum nicht eindeutig unterscheidbar ist. Dieser Verlauf ist in Abb. 11.9 (b) normiert auf den Wert der am Ziel erhaltenen Differenz dargestellt. Bei einer Schwellenlinie 0.4 ergibt die Zahl der notwendigen Iterationsschritte das Verhältnis $xl < kl$ bei der Außenseite und $kl \cong xl$ bei der Innenseite (Abb. 11.9 b).



(a)



(b)

Abbildung 11.9: Zeitkonsumvergleich

Die Beträge der Differenz der Zeit der linken und rechten Hand werden mit der Iteration des Flusses verglichen. Die zwei Beinstellungen (xl, kl) sind, getrennt nach dem Reizort (die linke Abbildung für die Außenseite und die rechte für die Innenseite) dargestellt. a) zeigt den gesamten Verlauf. In b) wird der Betrag auf den Endwert normiert.

Stellung	Vorzeichenvergleich (Händigkeit vs. Differenz)	
	übereinstimmend	widersprüchlich
php	8	0
phl	8	0
xlhp	6	0
klhp	8	0
klhl	6	2

Tabelle 11.4: Vorzeichenvergleich

Die gemittelte Händigkeit in Kap. 4 (Abb. 4.2) ist mit der Differenz des Energiekonsums (der linken minus der rechten Hand) für jeden Reizort nach dem Vorzeichen verglichen. Eingetragen ist die Zahl der übereinstimmenden bzw. widersprüchlichen Orte.

11.5 Simulation der Entscheidungsverhalten

Erweitert auf alle 8 Orte, wie sie in Kap. 4 untersucht wurden, sollen die Ergebnisse der Simulation mit der gemittelten Händigkeit des Kap. 4 (Abb. 4.2) verglichen werden.

11.5.1 Methode

Das allgemeine Prinzip folgt der in Abschnitt 11.4.1. beschriebenen Methode. Es werden jedoch die in Kap. 4 verwendeten 8 Reizorte (Innenseite, Außenseite; Ober- bzw. Unterschenkel; linkes bzw. rechtes Bein) zur Simulation eingesetzt. Zum Vergleich mit der gemittelten Händigkeit sind die Stellungen php, phl, xlhp, klhp und klhl (siehe Kap. 4) berücksichtigt. Da hier der gesamte Energiekonsum von Interesse ist, ist der zeitliche Verlauf des Flusses nicht dargestellt.

11.5.2 Ergebnisse

Vergleicht man die Differenz des gesamten Energiekonsums (Energiekonsum für die linke Hand minus für die rechte Hand) als Indikator für die zu bevorzugende Hand mit der gemittelten Händigkeit, dann ergibt sich, wenn man zunächst nur das Vorzeichen betrachtet, daß das hier vorgestellte Modell die experimentellen Ergebnisse sehr gut erklären kann (Tab. 11.4). Eine gewisse Abweichung zeigt sich nur bei klhl.

Stellt man die Werte analog zur Abb. 4.4 in Kap. 4 dar, so zeigt diese Differenz eine Korrelation mit der gemittelten Händigkeit beim absoluten Maß von $r = 0.904$ und beim relativen Maß von $r = 0.93$ nach der Polynomregression dritter Ordnung (Abb. 11.10). Die in Abb. 11.10 markierten zwei Punkte (klhl) entsprechen dem Reizort auf der Innenseite des linken Unter- und Oberschenkels.

Betrachtet man lediglich die in Abb. 11.11 mit a und b bezeichneten Reizorte, die durch die Änderung der Beinstellungen die räumliche Position zum Teil deutlich ändern, können die simulierten Werte die Händigkeit gut erklären. Die Orte a und b bei xlhp ändern ihre räumliche Position von der linken zur rechten Seite, wobei nur bei der Innenseite die ursprüngliche Präferenz für die linke Hand zur rechten Hand verschoben wird. Diese Änderung der Präferenz kann gut mit den simulierten Werten erklärt werden. Vergleicht man den Reizort c bei xlhp und klhp, bei dem sich zwar

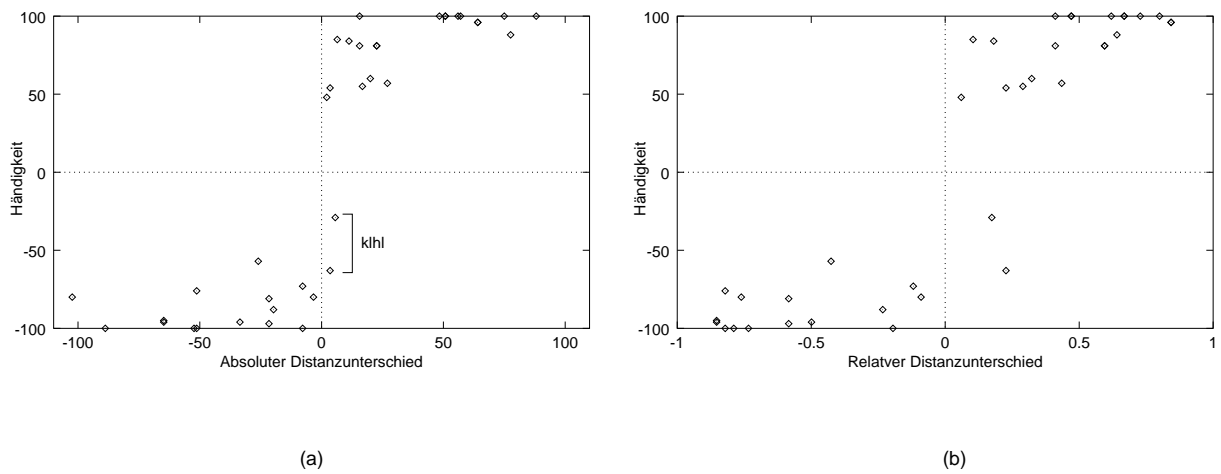


Abbildung 11.10: Händigkeit versus simulierte Distanz

In a) ist der absolute Distanzunterschied durch $E_l - E_r$, in b) der relative Distanzunterschied, berechnet nach $(E_l - E_r) / \max(E_l, E_r)$, gegen die gemittelte Händigkeit der Abb. 4.2 dargestellt, wobei E_l bzw. E_r jeweils den Energiekonsum der linken bzw. rechten Hand bis zum Reizort bezeichnet.

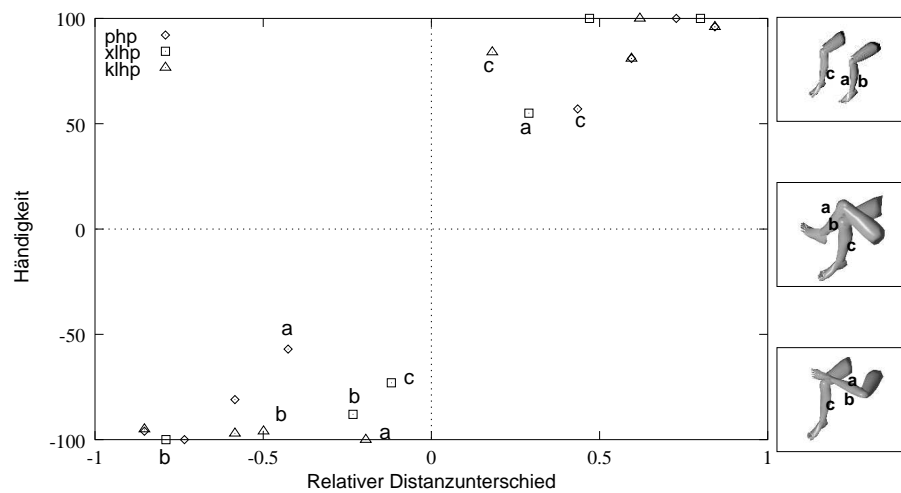


Abbildung 11.11: Händigkeit versus simulierte Distanz, parallele Handstellung

Alle Beinstellungen mit der parallelen Handstellung (php, xlhp und klhp). Dabei sind die zur Beschreibung relevanten Reizorte mit Buchstaben a–c gekennzeichnet. Am rechten Rand ist die Beinstellung in der Reihenfolge von p, xl und kl von oben nach unten schematisch dargestellt. Zu beachten ist die Änderung des markierten Reizortes im Raum.

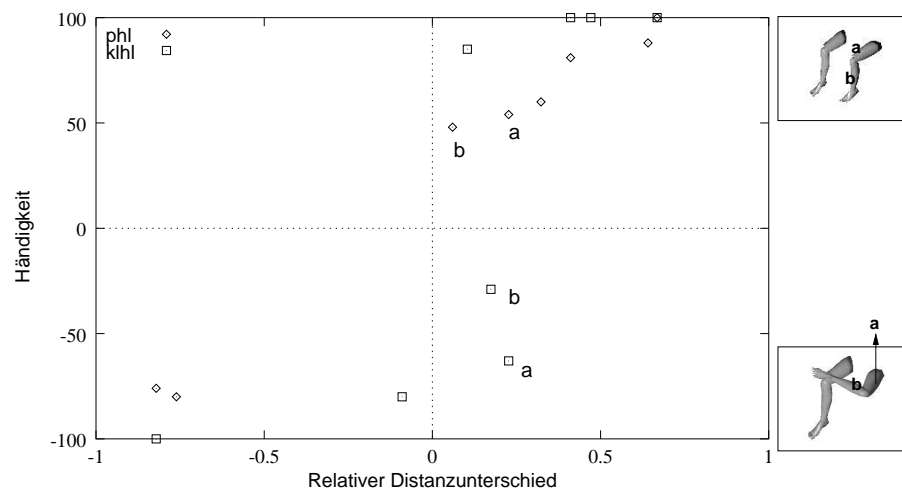


Abbildung 11.12: Hände auf derselben Seite

Die Körperstellungen phl und klhl. Im rechten Schema sind die hier relevanten Reizorte mit Buchstaben a und b gekennzeichnet.

nicht die räumliche Position, wohl aber dessen Präferenz ändert, so erkennt man, daß auch hier diese Änderung gut beschrieben wird.

Falls die beiden Hände auf derselben, linken Seite liegen, zeigen die simulierten Werte bei klhl an Orten ,a' und ,b' große Abweichungen (Abb. 11.12). Die Abweichung an diesen Orten werden auch beim Vergleich mit den gemessenen Trajektorienlängen beobachtet (siehe Abb. 4.4). Dieselben Orte bei phl werden jedoch mit den simulierten Werten gut beschrieben.

11.5.3 Approximation der RT

Die simulierten Werte, die oben im Vergleich mit der gemittelten Händigkeit dargestellt sind, werden nun mit den in Tab. 4.2 dargestellten Reaktionszeiten verglichen. Hierbei sind die Fälle nicht berücksichtigt, in denen der Stichprobenumfang kleiner als 6 ist. In Abb. 11.13 sind die simulierten Werte gegen den Logarithmus der RTs dargestellt. Zwischen den beiden Werten ergibt sich eine Korrelation von $r = 0.476$ (Regressionsgerade: $a_0 = 6.225$, $a_1 = 0.392$). Diese Korrelation ist von $r = 0$ signifikant verschieden ($p < 0.001$).

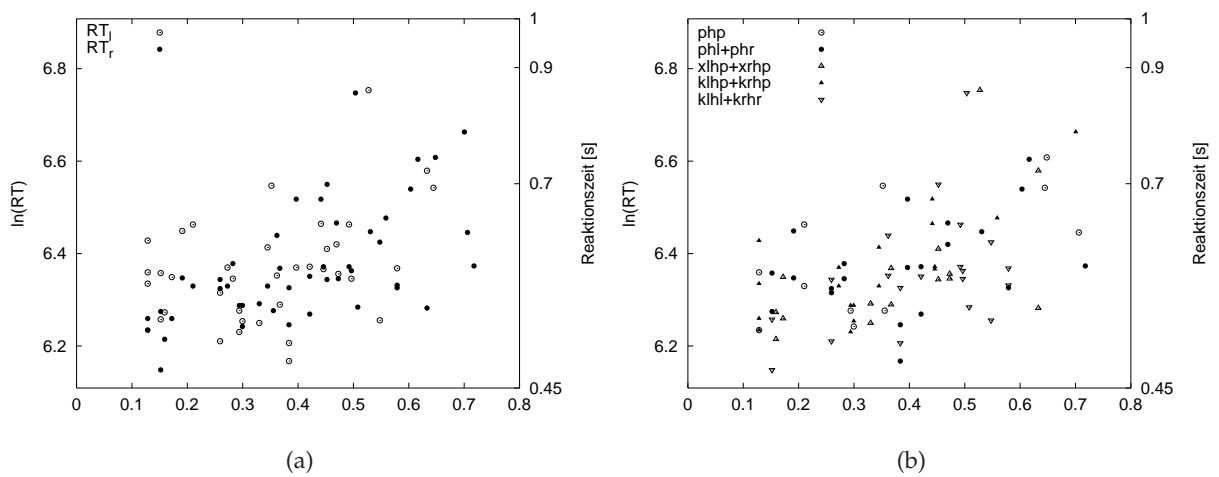


Abbildung 11.13: Reaktionszeit (RT) versus simulierte Werte

Die Reaktionszeiten (Kap. 4, Abb. 4.8, Tab. 4.2) werden mit den simulierten Werten verglichen. In a) sind die RTs der linken und rechten Hand getrennt dargestellt. (b) Die RTs sind getrennt nach den Körperstellungen, die durch die jeweiligen Symbole repräsentiert werden, dargestellt.

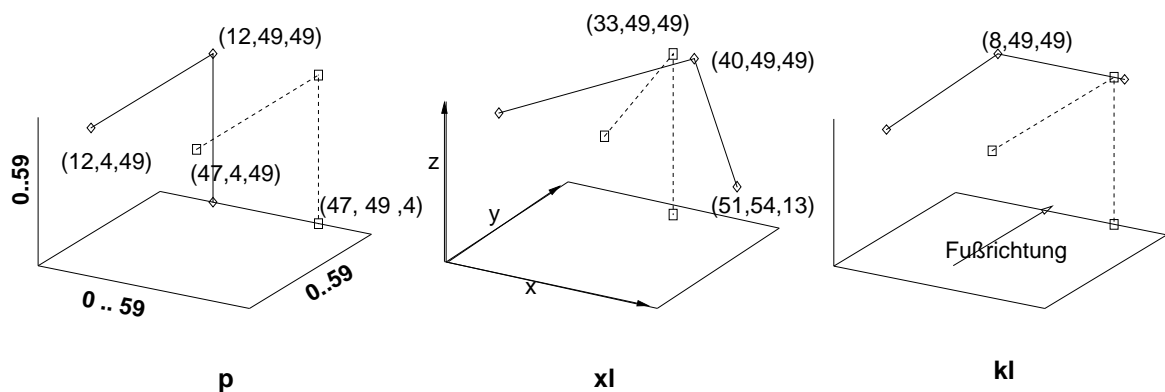


Abbildung 11.14: dreidimensionale Repräsentation der Beine

Die drei Beinstellungen p, xl und kl sind auf einem dreidimensionalen Gitter ($60 \times 60 \times 60$) repräsentiert. Die Koordinate in Klammern bezeichnet die Zelle, in der Gelenke liegen. Die Komponenten (x, y, z) sind in der Reihenfolge von links-rechts, hinten-vorne und unten-oben angegeben.

11.6 Dreidimensionale Repräsentation

11.6.1 Erweiterung zur dreidimensionalen Repräsentation

Im folgenden wird die ursprüngliche zweidimensionale Struktur auf drei Dimensionen erweitert, wobei ein $60 \times 60 \times 60$ Gitter verwendet wird. Die zusätzliche Dimension wird dazu genutzt, die beim zweidimensionalen Gitter projiziert dargestellte Beinstruktur nun dreidimensional zu repräsentieren (Abb. 11.14). Alle anderen Bedingungen wie der Energiekonsum und die Reiz- bzw. Reaktionsorte werden analog zum Abschnitt 11.3 verwendet. Die Reiz- und Reaktionsorte liegen in derselben Ebene, in der sich der entsprechende Ober- bzw. Unterschenkel befindet.

11.6.2 Ergebnisse

Der Vergleich der simulierten Werte mit der gemittelten Händigkeit ergibt eine Korrelation bei absolutem Maß (a) von $r = 0.848$ und bei relativem Maß (b) von $r = 0.84$ nach der Polynomregression dritter Ordnung (Abb. 11.15). Die drei abweichenden Punkte gehören zur Stellung klhl.

Die Änderung der Präferenz bei den drei Orten a–c, die in Abb. 11.11 beschrieben sind, ist auch mit Hilfe des dreidimensionalen Modells (Abb. 11.16) erklärbar.

Falls die beiden Hände auf derselben, linken Seite liegen, zeigt das dreidimensionale Modell im Vergleich zum zweidimensionalen Modell einen weiteren abweichenden Reizort (Abb. 11.17, mit Buchstaben ,c' gekennzeichnet).

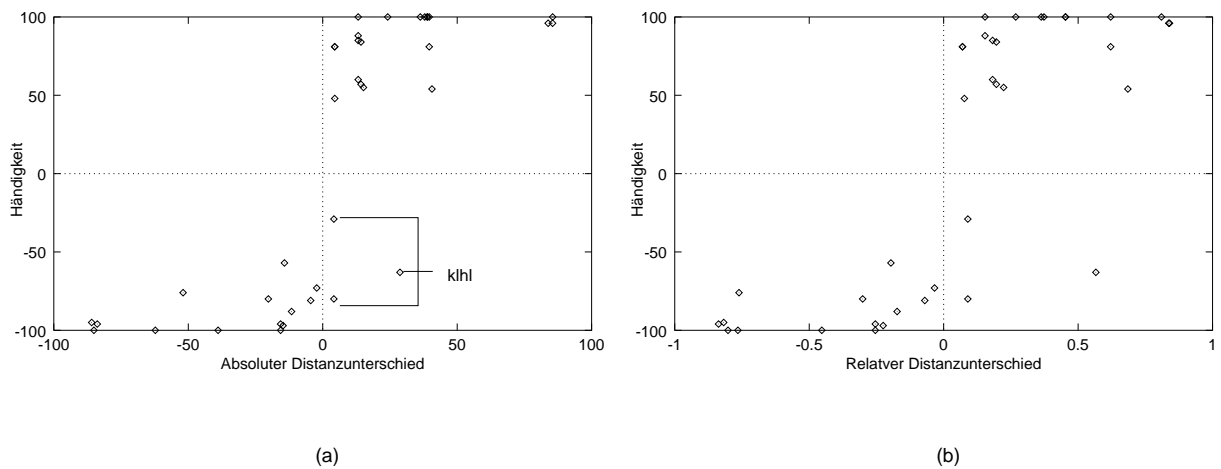


Abbildung 11.15: Händigkeit versus simulierte Distanz
 In a) ist der absolute Distanzunterschied durch $E_l - E_r$, in b) der relative Distanzunterschied, berechnet nach $(E_l - E_r) / \max(E_l, E_r)$, gegen die gemittelte Händigkeit dargestellt, wobei E_l bzw. E_r jeweils den Energiekonsum der linken bzw. rechten Hand bis zum Reizort bezeichnet. Die Distanz wird hier durch das dreidimensionale Modell erhalten.

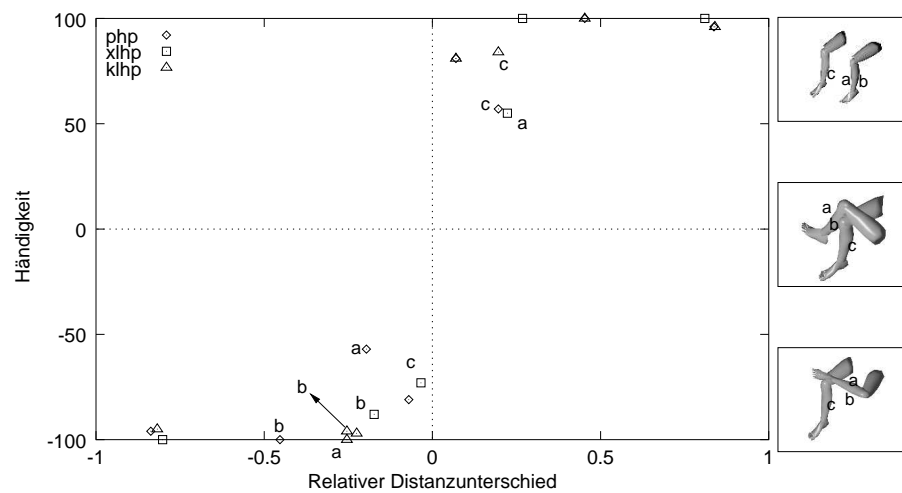


Abbildung 11.16: Händigkeit versus simulierte Distanz, parallele Handstellung (dreidimensional)
 Die Darstellung ist analog zur Abb. 11.11.

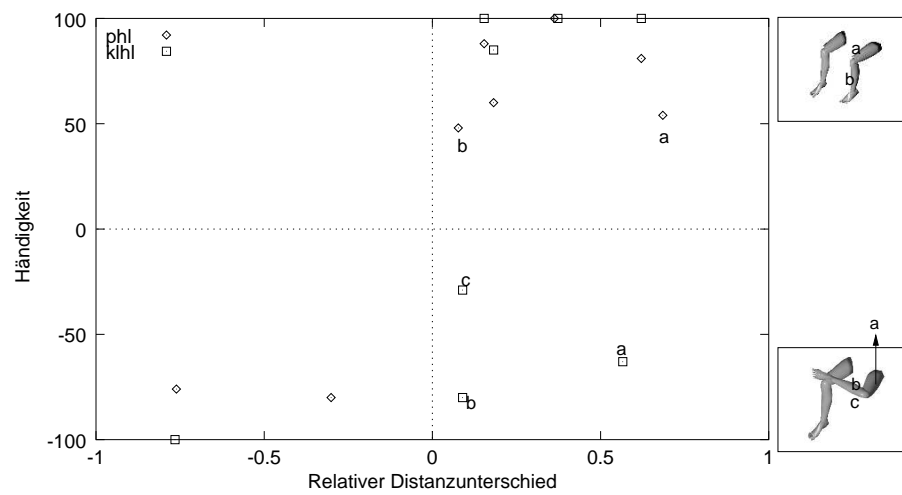


Abbildung 11.17: Hände auf dem linken Oberschenkel (dreidimensional)
 Die Darstellung ist analog zur Abb. 11.12.

12 Erweiterung des MMC Modells

Bei Verarbeitung der räumlichen Information eines taktilen Reizes ist die Integration zwischen morphologischer und propriozeptiver Information notwendig. Im folgenden wird ein Weg vorgeschlagen, wie diese Integration der beiden Informationen realisiert werden könnte. Eine solche Integration ist bei den Simulationen, die in Kap. 10 und Kap. 11 beschrieben sind, eine wichtige Voraussetzung, da die Interaktion zwischen der morphologischen und räumlichen Lage als wesentlicher Faktor betrachtet wird. Durch Erweiterung des MMC Modells soll hier gezeigt werden, daß dieses Modell zur Verarbeitung der räumlichen Information angewandt werden kann.

12.1 Repräsentation der Zwischenpunkten im MMC

Das MMC Modell ist in der Lage, die bidirektionale Transformation zwischen Winkelkoordinaten (Propriozeption) und Raumkoordinaten durchzuführen (Steinkühler and Cruse, 1998). Dank der rekurrenten Architektur mit der in einer entsprechenden Anordnung der Gewichte integrierten Körperinformation ist das MMC weiterhin in der Lage, trotz unterbestimmter Information eine für den Körper angemessene, d.h. geometrisch erlaubte Lösung zu finden (Abb. 12.1).

Die räumliche Repräsentation z.B. eines Armes ist in diesem System jedoch auf Gelenke eingeschränkt. Um die Zwischenpunkte zwischen Gelenkpositionen zu repräsentieren, wird zunächst eine taktile Karte aufgebaut, die die Körperoberfläche topologisch abbildet. Diese Karte generiert bei Reizung ein Aktivierungsmuster. Dieses Muster kann als Parameter zur Interpolation der Zwischenpunkte verwendet werden (Abb. 12.2). Die Raumkoordinaten der vier Positionen (Abb. 12.2, ○), die das MMC-Netz liefert, sollen nun mit den Parametern, die aus der taktilen Karte erhalten werden, integriert werden. Durch diese Interpolation kann jede Position zwischen den Gelenken verarbeitet werden. Weil hier als Parameter die räumliche Verteilung der Aktivierung (z.B. Gauß-Gleichung) auf der Karte eingesetzt ist, stellt dies eine sehr einfache Lösung dar.

Durch Einführung der taktilen Karte, die nur an bestimmten Stellen, z.B. dort wo die Gelenke abgebildet sind, mit der MMC Modell vernetzt wird, können die Zwischenpunkte ohne Aufwand repräsentiert werden (Abb. 12.3).

Als Aktivierungsmuster wird hier $P_i = \exp(-y_i^2/\sigma^2)$ (Gauß-Gleichung) verwendet, wobei y_i die

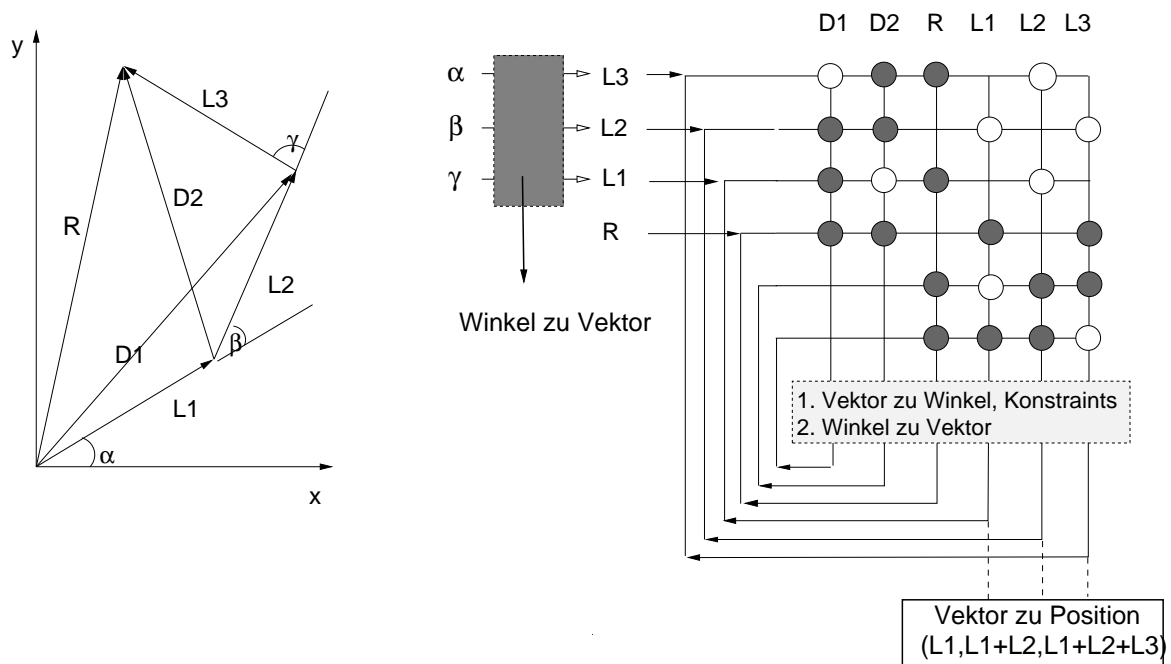


Abbildung 12.1: Struktur des MMC-Netzes

Auf der linken Seite wird ein Arm mit drei Segmenten ($L1$, $L2$, $L3$), jeweils mit entsprechenden Winkeln (α , β , γ) dargestellt. Nach Einführung von weiteren virtuellen Segmenten ($D1$, $D2$, R), kann die Geometrie neuronal rekonstruiert werden, wie auf der rechten Seite dargestellt ist. Dieses rekurrente Netz nutzt die geometrische Beziehung eines Segmentes zu anderen Segmenten. Dank dieser in Form einer entsprechenden Anordnung der Gewichte realisierten Körperinformation ist dieses Netz in der Lage, aus unvollständiger Information über die Stellung des Körpers eine stabile vollständige Körperinformation herzustellen. Die Kästchen bezeichnen zusätzliche Teile des Netzes, die hauptsächlich für die Transformation zwischen Winkeln und Vektoren verantwortlich sind.

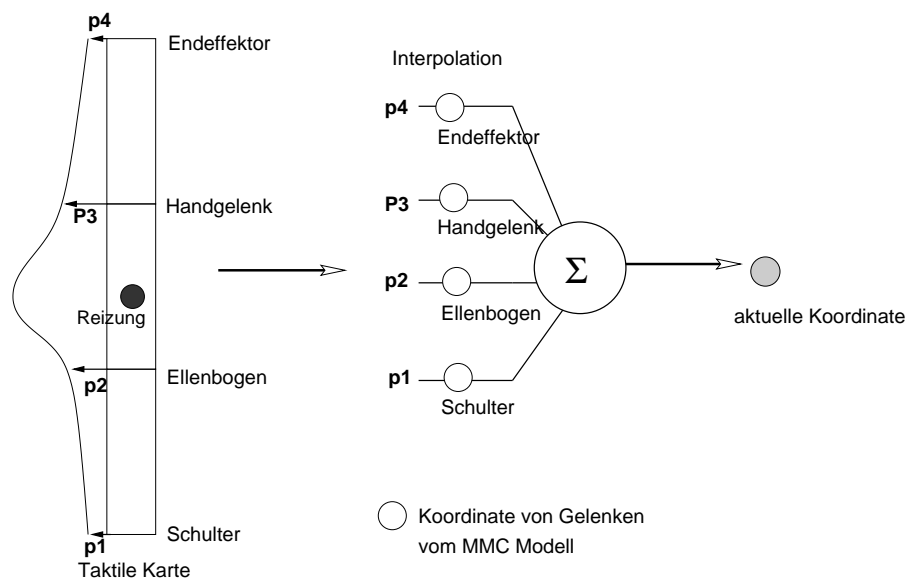


Abbildung 12.2: Interpolation aus Gelenkposition

Auf der linken Seite ist eine einfach konstruierte taktile zweidimensionale Karte dargestellt. Wird eine Position innerhalb dieser Karte aktiviert, dann bilden Zustandsvektoren von Gelenken (auf der rechten Seite) anhand des Aktivierungsmusters eine räumliche Koordinate ab. Die p1—p4 bezeichnen die Potentiale, die nach der Reizung die vier verschiedenen Positionen erreichen.

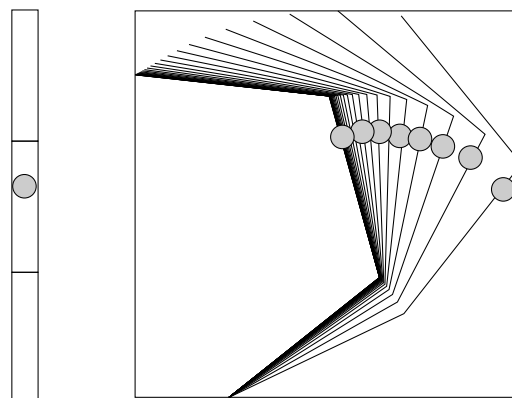


Abbildung 12.3: Repräsentation von Zwischenpunkten

Der Kreis im linken Schema bezeichnet einen Reizort auf einer taktile Karte. Kreise in der rechten Abbildung stellen die Raumkoordinaten des Reizortes während einer Armbewegung dar.

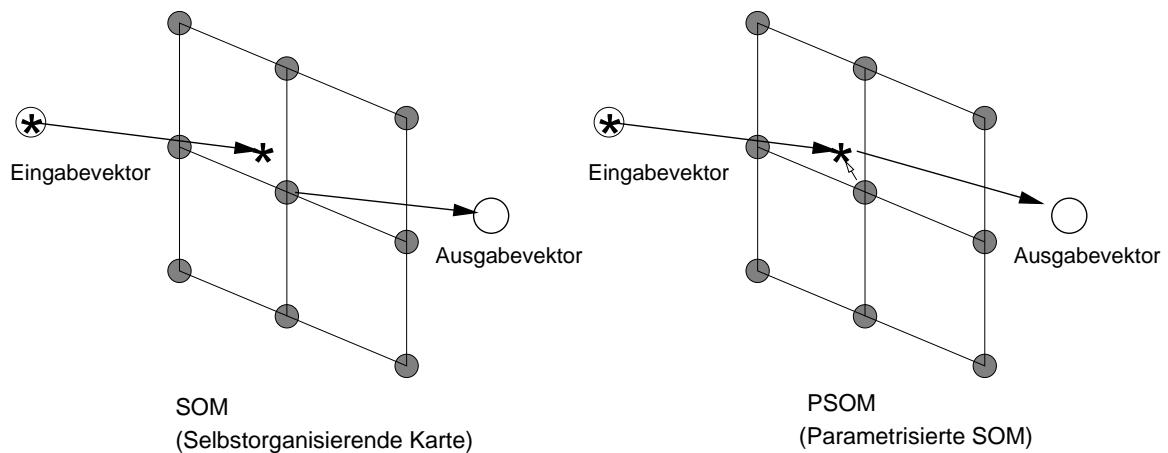


Abbildung 12.4: SOM und PSOM

Bei der SOM aktiviert ein Eingabevektor das nächst liegende Neuron, dessen Gewicht als Ausgabe geliefert wird. Hingegen aktiviert ein Eingabevektor bei der PSOM mehrere Neuronen, deren Ausgabewert durch Interpolation der Gewichte bestimmt wird.

Distanz zwischen einem Punkt (i) und einem Reizort auf der taktilen Karte darstellt. Unter der Annahme, daß die Länge der Karte 3 Einheiten beträgt (Distanz von der Schulter bis zur Hand), ist der Wert σ auf 0.6 gesetzt, damit die Aktivierung räumlich breit verteilt werden kann.

Die Gauß-Gleichung wird allgemein von SOM [Selbstorganisierende Karte (Kohonen, 1982)] zur Beschreibung der Nachbarschaft verwendet. Die beschriebene Interpolation nutzt also diese Nachbarschaft zur Verarbeitung der räumlichen Information. Eine alternative, hier nicht weiter verfolgte Lösung bestünde darin, lediglich die zwei dem Reizort benachbarten Gelenkpunkte zu verwenden.

12.2 Weitere Erweiterung des MMC-Netzes

Die Raumkoordinaten von Gelenken werden beim MMC-Netz zur Zeit unter Verwendung trigonometrischer Gesetze bearbeitet (siehe Abb. 12.1). In diesem Abschnitt wird eine weitere Erweiterung mit Hilfe der PSOM (parametrisierte SOM) durchgeführt, so daß das MMC-Netz auf eine andere Weise neuronal dargestellt werden kann, da in dieser Arbeit die räumliche Verarbeitung aus der morphologischen und propriozeptiven Information von Interesse ist.

12.2.1 PSOM

Die Grundidee der PSOM liegt darin, das diskretisierte Gitter der SOM als Parameter zur Interpolation zu verwenden, so daß trotz kleiner Anzahl der Neuronen der Eingaberaum möglichst fein repräsentiert werden kann (Walter, 1998). Für einen Eingabevektor gibt die SOM einen Wert aus, den ein dem Eingabevektor am nächsten liegendes Neuron enthält. Hingegen gibt die PSOM einen Wert aus, der sich aus der Interpolation der Werte von mehreren Neuronen ergibt (Abb. 12.4).

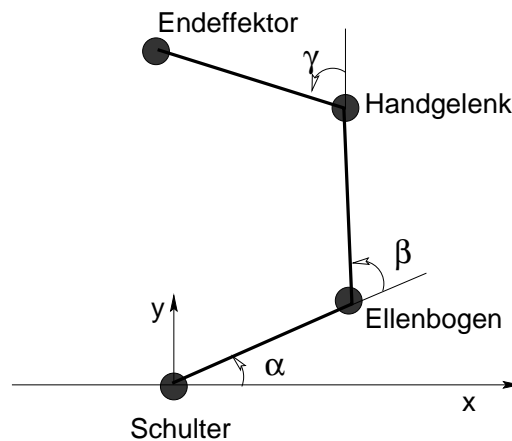


Abbildung 12.5: Schematische Darstellung des Eingavektors.

Der Eingavektor enthält 9-dimensionale Informationen, $(\alpha, \beta, \gamma, El_x, El_y, W_x, W_y, T_x, T_y)$, wobei El den Ellenbogen, W das Handgelenk und T den Endeffektor bezeichnen.

Winkel --> Raumkoordinaten

Raumkoordinaten --> Winkel

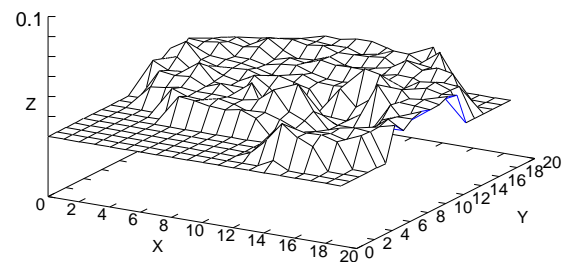
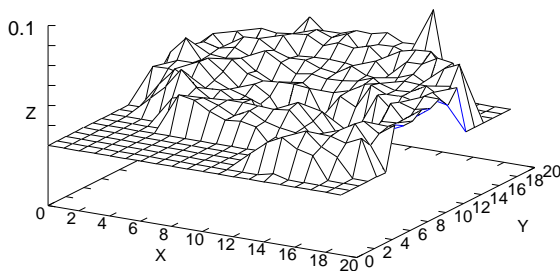


Abbildung 12.6: Fehlerquote beim gelernten Netz

In der linken Abbildung ist der Fehler bei Transformation der Winkel in Raumkoordinaten dargestellt. Der umgekehrte Fall ist in der rechten Abbildung zu sehen. Die Fehler werden dadurch berechnet, daß die Distanz zwischen Soll- und Ist-Position des Endeffektors aufgeteilt in 20×20 Teilräume gemittelt wird. Die beiden Achse x, y liegen jeweils zwischen -3 und 3, wobei die Länge jedes Segmentes 1 beträgt. Die Nullwerte bedeuten, daß im Teilraum keine Daten vorhanden sind. Die Schulter liegt bei (0,0).

12.2.2 Training

Hier wird ein dreigliedriger Arm im zweidimensionalen Arbeitsraum betrachtet. Die Eingavektoren bestehen aus den drei Winkeln (α, β, γ) und den drei jeweiligen Koordinaten (x_i, y_i) der drei Gelenke (Abb. 12.5).

Der insgesamt 9-dimensionale Eingavektor wurde für das Training einer 3-dimensionalen PSOM ($5 \times 5 \times 5$ Neuronen) eingesetzt. Es wurden insgesamt 100,000 Iterationen der Lernschritte durchgeführt, wobei der Lernfaktor linear von 0.8 auf 0.1 abfiel.

Nach dem Training wurde die gelernte Topologie auf die folgende Weise abgefragt. In einem Fall wurde nur die drei Winkel eingegeben. Dies betrifft die Transformation der Winkel in Raumkoordinaten. In einem anderen Fall wurden umgekehrt die Raumkoordinaten eingegeben. Dies betrifft die Transformation der Raumkoordinaten in Winkel.

Suche nach dem ‚best-matching‘ Neuron

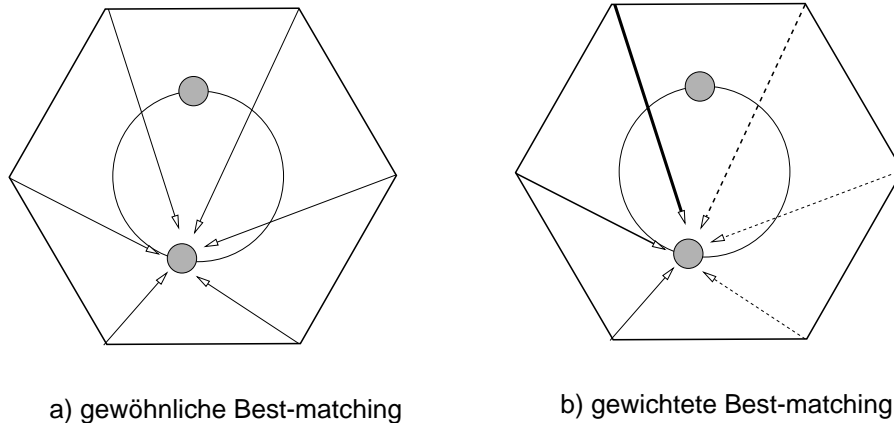


Abbildung 12.7: Best-matching

In a) ist jede Komponente eines Vektors bei der Distanzberechnung gleichberechtigt. In b) ist die Distanz unterschiedlich nach den Komponenten gewichtet. Die gesamte Distanz von 6 Ecken (Komponenten eines Eingabevektors) zu jeder Position (unterschiedliche Neuronen) auf dem Kreis ist dann in a) gleich, aber in b) wegen der unterschiedlichen Gewichte verschieden.

In Abb. 12.6 sind die Ergebnisse dargestellt. In beiden Fällen wurden die Fehler in 400 Teilräumen berechnet. Im ersten Fall stellt die z-Achse die gemittelte Differenz zwischen den Soll- und Istraumkoordinaten, und im zweiten Fall die gemittelte Differenz zwischen den Soll- und Istwinkelwerten. Dieser Test umfaßt insgesamt 2197 zweidimensionale Positionen. In den beiden Fällen ist der Fehler kleiner als 0.1, wobei jedes Segment eine Länge von 1 besitzt.

12.2.3 Repräsentation der Winkelgrenzen

Eine weitere Frage ist hier, wie die Begrenzung der Arbeitsbereiche der Winkel repräsentiert werden kann. Ein Gelenk kann nur in einem mechanisch beschränkten Bereich bewegt werden. Der durch die PSOM repräsentierte Arm weist aber diese nichtlineare Eigenschaft nicht auf, da die PSOM einen Wert von vorhandenen Neuronen zu interpolieren versucht, auch wenn nicht gelernte Winkelwerte eingegeben werden. Es kann z.T. daran liegen, daß das sogenannte „Best-matching“ Neuron ausschließlich durch den Vergleich der euklidischen Distanz mit dem Eingabevektor gesucht wird.

Stellen wir uns einen 6-dimensionalen Raum vor, der in Abb. 12.7 (a) als Hexagon dargestellt ist. Dann sind die Distanzen eines Eingabevektors zu Neuronen, die sich auf dem Kreis befinden, alle gleich. Solche mehrere gleich-entfernte Neurone kommen nicht vor, wenn ein Eingabevektor innerhalb des trainierten Raumes liegt, da die gesamte Distanz zu einem entsprechenden Neuron so klein ist, daß das best-matching Neuron eindeutig zu selektieren ist. Wenn der Eingabevektor aber außerhalb des trainierten Raums liegt, dann ist die Distanz nicht mehr eindeutig zu unterscheiden, was zur Folge hat, daß das best-matching Neuron zufällig selektiert wird. Falls die Vektorkomponenten aber mit unterschiedlichen Gewichten zur Distanzberechnung eingeführt werden (siehe 12.7 b), ist die Distanz zu Neuronen auf dem Kreis nicht mehr gleich.

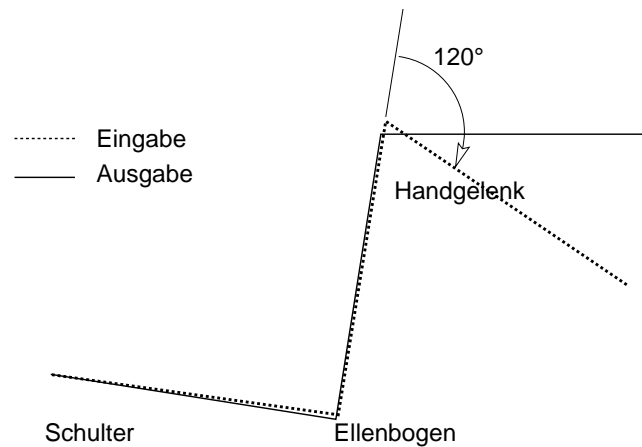


Abbildung 12.8: Unterdrücken der Interpolation am Rand

Die PSOM ist modifiziert, so daß die Interpolation am Rand unterdrückt wird. Daher verhält sich nun die PSOM am Rand wie die SOM. Die gestrichelte Linie stellt die Eingabe dar, wobei der Winkel des Handgelenkes 120° beträgt. Die durchgezogene Linie ist die Ausgabe aus der modifizierten PSOM, wobei das Handgelenk nur im Winkelbereich zwischen -90° und 90° trainiert ist.

Ein wesentlicher Grund, warum die PSOM die Begrenzung der Winkelbereiche nicht repräsentieren kann, liegt aber an der Interpolation der PSOM. Bei der SOM gibt es ein solches Problem nicht, weil das Best-matching Neuron nur innerhalb definierter Neurone ohne Interpolation gefunden wird. Bei der PSOM liegt eine einfache Lösung zur Repräsentation der Begrenzung der Winkelbereiche darin, die Eigenschaft der SOM in Neuronen am Rand einzubauen. Dies kann in der folgenden Weise implementiert werden. Die PSOM verwendet das Lagrange-Polynom zur Interpolation des Punktes, der zwischen den Neuronen existiert. Dabei erfolgt die Interpolation, nachdem das Best-matching Neuron gefunden wird. Wird die Interpolation unterdrückt, falls dieses Neuron am Rand liegt, verhält sich die PSOM am Rand genauso wie die SOM, da die Interpolation der wesentliche Unterschied zwischen der PSOM und SOM ist.

Wie in Abb. 12.8 dargestellt ist, ist die Begrenzung der Winkelbereiche durch das Unterdrücken der Interpolation am Rand realisiert.

12.2.4 MMC und PSOM

Da die PSOM sowohl den Transformationsprozeß, als auch die Begrenzung der Winkelbereiche repräsentiert, kann das MMC-Netz ohne Aufwand mit der PSOM gekoppelt werden. Ein Nachteil dabei ist eine längere Relaxationszeit, die auf den Interpolationsvorgang der PSOM zurückzuführen ist. In Abb. 12.9 (a) wird das Relaxationsverhalten des erweiterten MMC-Netzes dargestellt. Die generierte Trajektorie unterscheidet sich von der des ursprünglichen MMC-Netzes (Abb. 12.9 b).

Die Mischung des MMC-Netzes und der PSOM stellt insofern einen Vorteil dar, als auch der Winkelraum, assoziiert mit dem Arbeitsraum repräsentiert werden kann. Dies hat aber den Nachteil, daß dies die Entwicklung der Trajektorie beschleunigt. Daher ist der Einbau einer weiteren Eigenschaft, die beispielsweise das Umgehen eines Hindernisses simulieren könnte, nicht leicht realisierbar.

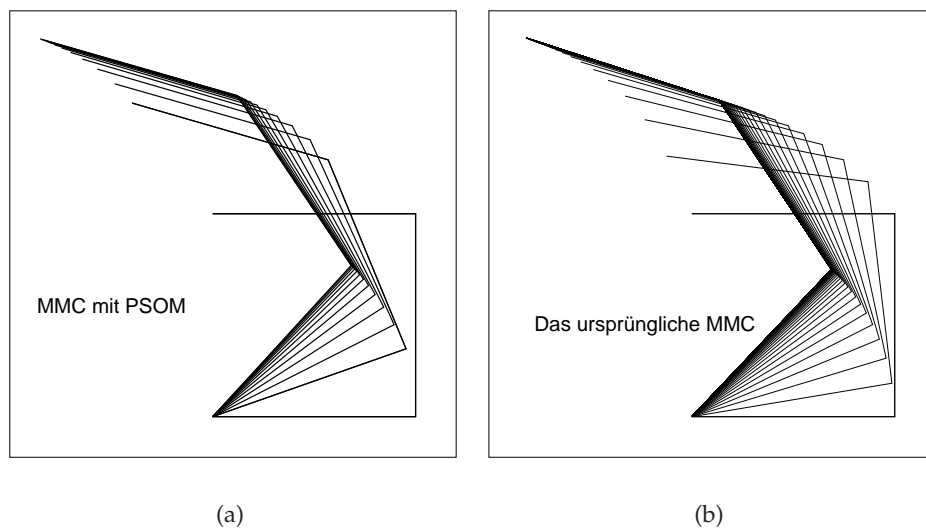


Abbildung 12.9: MMC und PSOM (Zielbewegung)

a) Das Verhalten des erweiterten MMC-Netzes. b) Zum Vergleich wird das Verhalten des ursprünglichen MMC-Netzes dargestellt.

13 Diskussion

In Kap. 10 und 11 wurde versucht, Modelle zu entwickeln, um die experimentell erhaltenen RTs zu beschreiben. Die beiden Modelle basieren auf der in Kap. 8 vorgestellten Hypothese, daß die Interferenz zwischen der morphologischen und räumlichen Lage, und damit die klassische S-R Kompatibilität bei der Reaktion auf einen taktilen Reiz eine wichtige Rolle spielt.

Diffusionsmodell

Das in Kap. 10 beschriebene Diffusionsmodell besteht aus drei Repräsentationssystemen, zwischen denen die Informationsflüsse mit Hilfe eines Diffusionsalgorithmus realisiert sind. Dabei wird darauf abgezielt, die Generierung der RT mit Hilfe des Stage-Modells zu verstehen. Wie in Abb. 10.5 gezeigt ist, ist das Modell in der Lage, auch die klassische S-R Kompatibilität zu beschreiben, falls nur ein Diffusionsfeld, also ein Stage verwendet wird. Für die Simulation der experimentellen Situationen werden aber immer zwei Stages verwendet, die jeweils die morpho-räumliche Interaktion und die S-R Kompatibilität repräsentieren. Bei diesem Modell (Abb. 10.3) ist es möglich, daß das S-R Paar nicht nur binär (links oder rechts), sondern noch feiner positioniert wird. Strukturell unterscheiden sich die beiden Felder nicht voneinander, abgesehen davon, daß das zweite Feld vom ersten Feld aktiviert wird.

In der Situation, in der die CRT bei der ungekreuzten (hp^*) bzw. gekreuzten (hx^*) Handstellung gemessen wird (Abb. 10.10 vs. Abb. 5.9), kann die Relation zwischen den tatsächlichen RTs (Abb. 5.9; **ipsi** bei hp^* < **ipsi** bei hx^* < **contra** bei hp^* < **contra** bei hx^*) durch die Simulation reproduziert werden, unabhängig davon, ob die zwei Stages diskret oder kontinuierlich verbunden sind. Bei der taktilen Reizung scheint also die Interferenz zwischen der morphologischen und räumlichen Lage additiv zur Entstehung der RT beizutragen.

In der anderen Situation, in der nur das linke Bein mit drei unterschiedlichen Handstellungen (hr, hp und hl) taktil gereizt wird (Abb. 10.12, Tab. 10.1), kann die Bevorzugung der Hand mit der jeweils kürzeren RTs (Abb. 6.2) erklärt werden, aber es widerspricht dem experimentellen Ergebnis der Abb. 6.2 (a), daß in der Situation hr , bei der **ipsi**-Bedingung längere Zeit als bei der **contra**-Bedingung nötig ist. Weiterhin ergibt die Simulation das Verhältnis zwischen den drei Handstellungen in der umgekehrten Reihenfolge im Vergleich zu der, die die Experimente (Abb. 6.2 a; CRT bei hr < CRT

bei hl) zeigen. Dies liegt daran, daß bei dem vorgestellten Modell die generierte Zeit im wesentlichen mit der kürzesten Streckenlänge, die die Informationsflüsse zurücklegen, korreliert ist. Da sich die Bedingungen hr und hl im ersten Feld nicht unterscheiden (Abb. 10.11), wird die entsprechende Zeit im zweiten Feld bestimmt. Da die Distanz zwischen dem Reiz- und dem Reaktionsort bei hr größer als bei hl ist, ist entsprechend auch die Zeit bei hr länger. Bei Variation der Beinstellung (Abb. 10.14, Tab. 10.2), wobei die Reizorte hier auch am linken Bein liegen, zeigt die Simulation eine gute Übereinstimmung mit dem experimentellen Ergebnis (Abb. 6.5 b) bei Beschreibung der bevorzugten Hand. Der zeitliche Vorteil im Falle des kompatiblen S-R Paares (**ipsi**) konnte aber bei kl nicht reproduziert werden.

Integriertes Repräsentationssystem

Im Vergleich zu dem ersten Modell zeigt das in Kap. 11 vorgestellte Modell im allgemeinen die besseren Ergebnisse. Die beiden Modelle werden in Tab. 13.1 für die jeweiligen experimentellen Situationen verglichen.

Die Simulation der Situation, die dem Experiment der Abb. 5.6 entspricht, ergibt bei der parallelen Handstellung, daß der Zeitkonsum für die **ipsi** Aufgabe kleiner als für die **contra** Aufgabe ist. Die gekreuzten Hände zeigen hingegen, daß der Zeitkonsum für die **contra** Aufgabe kleiner als für die **ipsi** Aufgabe ist, wobei der Zeitkonsum bei der **contra** Aufgabe jedoch größer als bei der **ipsi** Aufgabe in der parallelen Handstellung ist. Diese Tendenz stimmt qualitativ gut mit den experimentellen Befunden (Abb. 5.6) überein.

Die Simulation der anderen Situation, in der die Reizorte nur auf der morphologisch linken Seite liegen, liefert ebenfalls eine qualitativ gute Beschreibung der experimentellen Befunden. Sowohl bei der Variation der Handstellung als auch bei der Variation der Beinstellung (Abb. 11.8, 11.9) entspricht die Bevorzugung der Hand den experimentellen Ergebnissen (Abb. 6.2, 6.5; Tab. 13.2). Hier stimmt auch das zeitliche Verhältnis zwischen dem kompatiblen (**ipsi**) und inkompatiblen (**contra**) Paar mit den experimentellen Ergebnissen überein.

Ein weiterer wichtiger Vorteil dieses Modells ist, daß das Verhältnis zwischen den Handstellungen hl und hr erklärt werden kann. Jedoch muß dafür eine weitere Überlegung verwendet werden. Es ergibt nämlich der Vergleich der Zeitdifferenz zwischen den alternativen Antworten (Abb. 11.8), daß die Differenz bei hr schneller als bei hl wächst, obwohl die beiden Reaktionsorte bei hr weiter von dem Reizort als bei hl entfernt sind. Dieser Differenzvergleich könnte einen Wettbewerb zwischen den alternativen Antworten repräsentieren. Erreicht die Differenz eine bestimmte Schwelle, dann wird eine Antwort selektiert. Auch dem in Kap. 9 dargestellten Auflösungseffekt könnte eine solche Konkurrenz zugrunde liegen, wie in Abb. 10.16 dargestellt ist.

Wie in Tab. 13.1 vergleichend gezeigt ist, können die experimentellen Ergebnisse besser mit dem zweiten Modell, in dem die Reaktion in einem integrierten Repräsentationsraum stattfindet, erklärt werden. Der Grund kann darin gesucht werden, daß beim zweiten Modell die morphologische Lage dank der integrierten Repräsentation direkt die Reaktionsalternativen beeinflusst. Da im Diffusionsmodell die morphologische Lage und die Reaktionsalternativen jeweils in den unterschiedlichen

	Experiment			Diffusionsmodell			Integrierte Repräsentation		
	Hand		S-R Paar	Hand		S-R Paar	Hand		S-R Paar
	A	I		A	I		A	I	
hr	l	l	i	l	l	c(*)	l	l	i
hp	l	l	i	l	l	i	l	l	i
hl	l	r	i	l	r	i	l	r	i
xl	l	r	i	l	r	i	l	r	i
kl	l	l	i	l	l	nd(*)	l	l	i
Verhältnis zwischen hl und hr	hl > hr			hl <hr (*)			hl >hr		

Tabelle 13.1: Vergleich der Ergebnisse

Die Ergebnisse aus den Experimenten der Abb. 6.2 (hr, hp, hl) und 6.5 (xl, kl) und aus den beiden Simulationen. Die mit den Experimenten nicht übereinstimmenden Fälle sind mit * gekennzeichnet. Die Vergleichskriterien sind die zeitlich bevorzugte (l: linke, r: rechte) Hand und das zeitlich bevorzugte S-R Paar (**ipsi** und **contra**). Zusätzlich wird gezeigt, ob die bei hl im Vergleich zu hr längere RT durch das Modell beschrieben werden kann (unterste Zeile). A und I: jeweils Außenseite und Innenseite, i und c: jeweils **ipsi** und **contra** S-R Paar. nd: nicht feststellbar.

Stages repräsentiert sind, ist ein Einfluß zwischen den beiden nur auf indirekte Weise möglich.

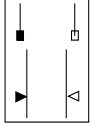
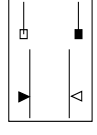
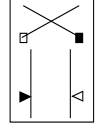
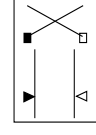
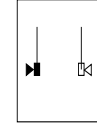
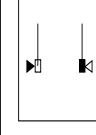
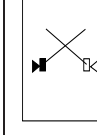
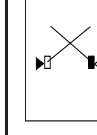
Andererseits hat das Diffusionsmodell den Vorteil, daß die Ergebnisse bei Reizung eines Ortes, der räumlich sehr nahe am Reaktionsort ist, z.B. bei Reizung der Fingerspitze (Abb. 10.16), beschrieben werden können, da hier der Raum wesentlich lateral konstruiert ist und der Reizort und der Reaktionsort unabhängig von der Lage im Raum, innerhalb des Modells räumlich getrennt repräsentiert sind. Diese konzeptionelle Trennung des Reiz- und des Reaktionsortes ist im zweiten Modell nicht vorhanden, weil die S-R Lage im Raum direkt abgebildet wird. Daher entspricht einer geringen Distanz zwischen dem Reiz- und dem Reaktionsort auch eine geringe Distanz innerhalb des Repräsentationssystems. Beispielsweise kann das Experiment der Abb. 5.9 deshalb nicht mit dem zweiten Modell simuliert werden.

Das zweite Modell unterscheidet sich aber wesentlich vom Diffusionsmodell in der Hinsicht, daß der Raum in einen linken und einen rechten Teil getrennt ist. Diese lateral repräsentierte Struktur macht es leicht, eine Reaktion als ein Wettbewerb zu betrachten, da jede Alternative einen eigenen Raum repräsentiert.

In Tab. 13.2 werden die Ergebnisse der zwei Modelle und die entsprechenden experimentellen Resultate zusammengefaßt.

Händigkeit

Die integrierte Repräsentation hat einen weiteren Vorteil insofern, als damit auch die Händigkeit des Kap. 4 beschrieben werden kann, da das Modell zur Generierung einer Trajektorienlänge verwendet werden kann. Die Differenz zwischen den Trajektorienlängen ist ein hypothetisches Kriterium für die Entscheidung über die zu verwendende Hand (Kap. 4; Abb. 4.5,4.6,4.7). Ebenso wie diese Differenz ergibt auch die Differenz der RT zwischen den beiden Händen eine relativ gute Korrelation mit der

	hp		hx		hp*		hx*	
								
	ipsi	contra	ipsi	contra	ipsi	contra	ipsi	contra
experimentelle Resultate	385 ms	466 ms	465 ms	435 ms	350 ms	501 ms	447 ms	660 ms
	Abb. 5.6				Abb. 5.9			
Simulation (Kap. 10)	351 It.	573 It.	573 It.	351 It.	351 It.	573 It.	478 It.	718 It.
Simulation (Kap. 11)	21.7	98.5	91.7	37.1	-	-	-	-

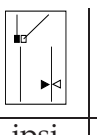
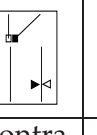
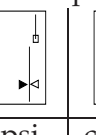
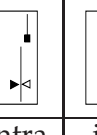
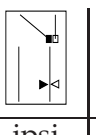
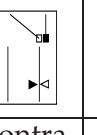
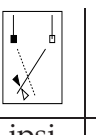
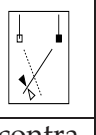
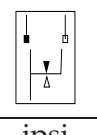
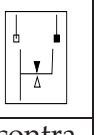
	hr		hp		hl		xl		kl	
										
	ipsi	contra	ipsi	contra	ipsi	contra	ipsi	contra	ipsi	contra
experimentelle Resultate	397 ms	436 ms	440 ms	470 ms	466 ms	525 ms	447 ms	505 ms	466 ms	483 ms
	Abb. 6.2						Abb. 6.5			
Simulation (Kap. 10)	581.5 It.	553 It.	477 It.	518 It.	374 It.	403.5 It.	470 It.	510 It.	445.5 It.	445.5 It.
Simulation (Kap. 11)	57.3	82.2	49.6	78.7	32.2	86.4	55	76.85	38.2	50.65
W. der Diff.	82 It.		101 It.		216 It.		50 It.		52 It.	

Tabelle 13.2: Vergleich der Resultate zwischen den Experimenten und zwei Simulationen. Die experimentellen Situationen sind in der Tabelle schematisch dargestellt. Die jeweilige Aufgabe (**ipsi** und **contra**) ist dadurch symbolisiert, daß der Reizort (Dreieck) und die zu antwortende Hand (Quadrat) gleichfarbig (weiß oder schwarz) markiert sind. W. der Diff. : Beträge der Differenz zwischen **ipsi** und **contra** sind verglichen. Die Werte sind die Zahl der Iterationsschritte, in denen die normierten Werte die Schwelle 0.4 übertreffen. It.: Iterationen.

Handselektion (Abb. 4.13). Dies läßt vermuten, daß die beiden Faktoren auf eine gemeinsame Quelle zurückzuführen sind, was im Prinzip in Abb. 4.12 abgelesen werden kann. Betrachtet man die in der Simulation generierte Zeit nun als eine räumliche Distanz, so kann man den entsprechenden Vergleich mit der gemessenen Handselektion durchführen. Da dieses Modell zweidimensional konstruiert ist, bietet dies eine Möglichkeit, daß im Rahmen zweidimensionaler Informationsverarbeitung wie z.B. bei der S-R Kompatibilität die Handselektion beschrieben werden kann. Die aufgrund der simulierten Trajektorienlänge bestimmte bevorzugte Hand zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Beobachtungen. Jedoch weichen einige Stellen bei klhl (Siehe Abb. 11.12; Innenseite des linken Beines) von den experimentellen Resultaten ab (Tab. 11.4, Abb. 11.10). Dies sind aber diejenigen Stellen, in denen der Vergleich mit der gemessenen Trajektorienlänge auch problematisch ist (Abb. 4.4). Die dreidimensionale Erweiterung der Simulation (Abb. 11.14, Abb. 11.15) verbesserte die Abweichungen an diesen Stellen nicht. Das dreidimensionale Modell erzeugt noch eine weitere abweichende Stelle bei klhl (Abb. 11.17; Außenseite des Unterschenkels). Dies kann daran liegen, daß die dreidimensionale Erweiterung des Raumes den morphologischen Einfluß reduziert, da die Beine einen kleineren Raumanteil im Raum als beim zweidimensionalen Raum besitzen. Der Vergleich zwischen dem zweidimensionalen und dreidimensionalen Modell zeigt, daß die Handselektion trotz der einfachen Struktur durch das zweidimensionale Modell besser beschrieben werden kann (Korrelation beim zweidimensionalen Modell $r = 0.93$, beim dreidimensionalen Modell $r = 0.84$). Die simulierten Werte aus dem zweidimensionalen Modell zeigt außerdem eine gewisse Korrelation mit den gemessenen RTs (Abb. 11.13).

In Kap. 12 wird das Problem behandelt, wie ein Körper in das hier vorgestellte Repräsentationssystem integriert werden könnte. Es ist gezeigt, daß durch die Vernetzung eines Körpermodells (MMC-Modell) mit einer taktilen Karte nun nicht nur die Gelenke, sondern die ganzen Arme räumlich repräsentiert werden können. Durch diese Integration kann die räumliche Lage eines taktilen Reizes verarbeitet werden, was bei der Simulation der Reaktionszeit bzw. der Handselektion angenommen ist. Da das MMC in der Lage ist, aus Winkeln (propriozeptive Information) die räumliche Information zu bestimmen, können auf diese Weise die experimentellen Situationen, in denen die Versuchspersonen über keine visuelle Information verfügen, ohne weiteres erklärt werden. Eine solche Verarbeitung der Rauminformation aus propriozeptiver Information kann man z.B. bei Affen beobachten. Es wurde von Graziano (1998) gezeigt, daß bei bimodalen Neuronen im prämotorischen Kortex, die sowohl auf die visuelle Information als auch auf die taktile Information reagieren, die visuellen rezeptiven Felder nicht abhängig von der Augenbewegung, was man prinzipiell erwarten würde, sondern abhängig von der aktuellen Armposition variiert werden. Dabei ist noch interessant, daß dieser körpernahe (peripersonale) visuelle Raum, der in diesen rezeptiven Feldern abgebildet ist, das kleinere taktile rezeptive Feld umschließt (Rizzolatti et al., 1997). Dies ist ähnlich der Struktur des Modells, das in Kap. 11, Abschnitt 11.3 beschrieben ist. In diesem Modell werden die Reizorte an den Beinen (taktiler Feld) auf einer zweidimensionalen Raumkarte repräsentiert, die dem visuellen Feld entspricht.

14 Zusammenfassung

Versuchspersonen (VP), die die Augen geschlossen halten, werden an einem von 8 möglichen Reizorten an den Beinen mechanisch gereizt (Kap. 4). Sie werden aufgefordert, eine der beiden Hände so schnell wie möglich zu dem Reizort zu bewegen. Bei neun verschiedenen Körperstellungen der Beine und der Arme wird die Häufigkeit der jeweils verwendeten Hand registriert. Außerdem werden Reaktionszeiten (RT) gemessen. Die Ergebnisse der Verhaltensuntersuchung zeigen, daß zwei Kriterien bei der Entscheidung beteiligt sind. Das erste Kriterium ist ein räumlicher Parameter, der durch die Trajektorienlänge der jeweiligen Hand repräsentiert sein könnte. Das zweite Kriterium basiert auf der Morphologie. Es wird eine Bevorzugung der Hand ipsilateral zum Reizort beobachtet. Diese Ergebnisse unterstützen die Hypothese, daß die Repräsentation des Körpers auf zwei Systemen basiert. Das eine verwendet propriozeptive Information und das andere ein morphologisches Bezugssystem. Es wird angenommen, daß die Entscheidung über die auszuwählende Hand auf einer mentalen Konkurrenz basiert. Die Informationsverarbeitung, die diese zwei Repräsentationen verwendet, benötigt für jede Hand eine gewisse Zeit, die von der Körperstellung und dem Reizort abhängt. Dabei ist zu vermuten, daß die RT die Dauer dieser Prozesse widerspiegelt. Die Hand mit der kleineren RT gewinnt die mentale Konkurrenz. Dies wird durch eine Simulation (Kap. 11, Abb. 11.13) beschrieben.

In Kap. 5–6 wird die Informationsverarbeitung für taktile Reize mit Hilfe von RT-Messungen näher untersucht. In verschiedenen Experimenten werden taktile Reize an den Fingern oder den Beinen gegeben, wobei die VPs verschiedene Arm- und Beinstellungen einnehmen, und die RT gemessen. Zum großen Teil unterstützen die Resultate die klassische Idee der S-R Kompatibilität (siehe Kap. 2). Allerdings ergeben sich auch einige Ausnahmen. Zusammengefaßt weisen die Resultate daraufhin, daß die RT von mindestens drei unabhängigen Kriterien abhängt. Das erste Kriterium berücksichtigt, ob die Hände parallel oder überkreuz gestellt sind. Beim zweiten Kriterium wird gefragt, ob der Reizort im Vergleich zum Reaktionsort morphologisch auf derselben (ipsilateral) oder der anderen (kontralateral) Seite liegt. Als drittes Kriterium wird ein Maß für die räumliche Distanz zwischen Reiz- und Reaktionsort vorgeschlagen, wobei dies als eine quantitative Grundlage für die S-R Kompatibilität verstanden werden kann. Diese drei Kriterien bieten eine gute Beschreibung der Experimente, in denen die beiden Reizorte räumlich auseinander liegen (Kap. 5). Jedoch wird ei-

ne andere Hypothese vorgeschlagen, um die Experimente erklären zu können, in denen die beiden Reizorte räumlich nah beieinander liegen (Kap. 6, siehe Diskussion des Kap. 8).

Das Kap. 9 befaßt sich im wesentlichen mit der Frage, in welcher Weise ein taktiler Reiz räumlich repräsentiert wird. Durch Variation der transversalen Distanz zwischen zwei Reizorten wird gezeigt, daß die RT verlängert wird, falls die beiden Reizorte räumlich beieinander liegen. Ein anderes Experiment, in dem die Position der Reizorte auf einem Kreis variiert wird und damit die Distanz zwischen den Reizorten konstant gehalten wird, zeigt, daß die RT nicht ausschließlich von der Distanz abhängt. Die Resultate zeigen, daß die RTs sowohl von der räumlichen Beziehung zwischen den zwei Reizorten als auch von einer morphologischen Eigenschaft, nämlich davon, ob der Reizort auf der linken oder der rechten Körperseite liegt, beeinflußt werden. Dieses Ergebnis kann nicht allein durch die Hypothese der S-R Kompatibilität erklärt werden. Darüberhinaus wird gezeigt, daß in den meisten Experimenten der relevante Parameter nicht die absolute Distanz, sondern vermutlich die auf die transversale Achse projizierte Distanz ist. Einige Experimente lassen vermuten, daß die VPs umschalten können und in bestimmten Situationen stattdessen die Projektion auf die sagittale Ebene verwenden. Zusätzlich durchgeführte Messungen der verbalen Reaktionszeit weisen daraufhin, daß die Informationsverarbeitung bei der manuellen und der verbalen Reaktion auf verschiedenen Bezugssystemen, dem What und dem Where System, basiert.

Abschließend werden in Kap. 10–12 die experimentell erhaltenen RTs unter Verwendung der oben vorgestellten Kriterien simuliert.

Abstracts

Blindfolded subjects are stimulated mechanically at one of eight possible stimulation sites at the legs and then asked to move one of both hands as quickly as possible to the stimulated site (chap. 4). In nine different postures of legs and hands the frequency is registered by which the right or the left hand is used. Furthermore, reaction times (RT) are measured. The behavioural results indicate that two criteria are involved in hand selection. The first is a spatial parameter which is represented by trajectory length of each hand. The hand with the shorter path is preferred. The second is a criterion based on morphology: There is a preference for the hand ipsilateral to the stimulus site. These results support the hypothesis that the representation of body position is based on two systems. One uses proprioceptive information, the other uses a morphological frame of reference. It is assumed that the decision to select a hand is based on a competition. The information processing, based on these two representations, requires more or less time for each hand depending on postures and stimulation sites. RT reflects the duration of this process. The simulated data also support this hypothesis (chap. 11, fig. 11.13). Therefore, the hand with the smaller RT wins the competition.

In chap. 5 and 6 the information processing of tactile stimuli is further investigated. In different experiments tactile stimuli are given at the fingers or the legs, while the subjects take different hand and leg postures. The subjects are asked to release a button to measure reaction times (RT). To a large degree, results support the classical idea of S-R compatibility. However, there are also some exceptions. Taken together, the results suggest that RT depends on at least three independent criteria

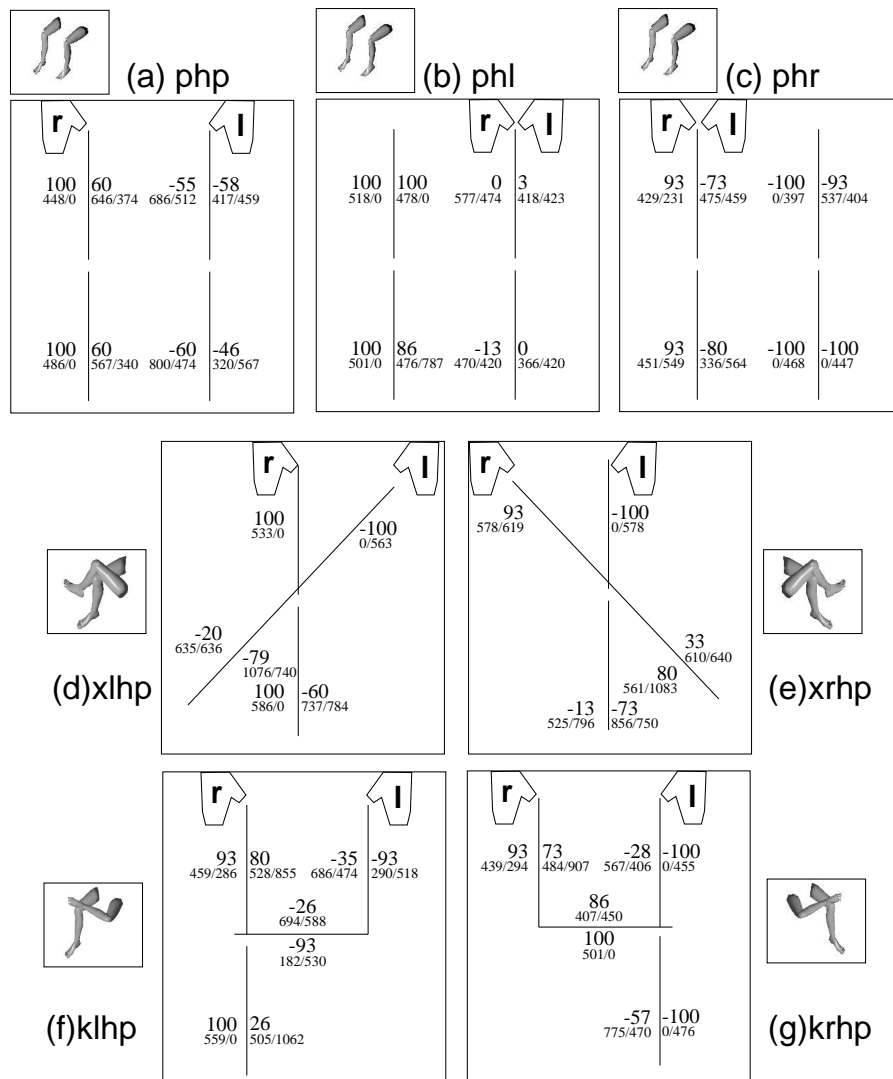
which describe the properties of the experimental situation. One is whether the hands are held in a parallel or a crossed position. The second one is whether the stimulus occurs at the morphological same (ipsilateral) or the other (contralateral) side compared to the site of the required reaction. Third, as a quantitative basis for S-R compatibility, which uses the spatial relation between stimulus site and response site, some measure of the spatial distance between stimulus and response site is proposed. These criteria provide a good description of two experiments where both possible stimulation sites are far apart (chap. 5). However, if stimulation sites are near, a quantitative description would require a more detailed proposal of how to determine the distances between stimulus and response sites (chap. 6, see discussion of chap. 8).

In chap. 9 the information processing of tactile stimuli is investigated concerning the question of whether the stimulation site is spatially represented. The information processing of mechano-tactile stimuli is investigated by measuring choice reaction time (CRT). Variation of transversal distance between two stimuli reveals that reaction time (RT) is prolonged when two stimulus sites are placed close to each other. A second experiment in which the position of the stimulus sites is varied on a circle such that the distance is kept constant shows that the RT does not depend merely on the distance. The results show that RT is not only influenced by the spatial relation between two stimulus sites, but also by a morphological attribute, i.e., whether the stimulus is applied at the right or the left side of the body. Therefore, the results cannot be explained by S-R compatibility hypothesis alone. The results indicate further that in most experiments the relevant parameter is not the absolute distance, but only the projection of the distance on a transversal line. In some experiments subjects seem to switch strategies and to use the projection onto the sagittal plane instead. Repetition of the experiments with verbal response instead of manual response shows that information processing appears to be based on different frames of reference in both cases.

Finally, it is shown that the experimental results are effectively described by simulating each condition adopting the above described criteria (chaps. 10–12).

Anhang

In der unteren Abbildung werden die Meßwerte bei vorgestellter Bewegung dargestellt. Die Händigkeit und die Reaktionszeit der jeweiligen Hand sind analog zur Abb. 4.8 (Kap. 4) angegeben.



Händigkeit und Reaktionszeit bei vorgestellter Bewegung

Obere Zahlen: Händigkeit, Untere Zahlen: RT jeweils der rechten und linken Hand [ms]. RT-Wert 0 bedeutet, daß kein Wert gemessen wurde.

Literatur

- Alderson, J. D. (1994). Phantom limb pain and spinal anaesthesia. *Anaesthesia*, 49:924.
- Annett, J. and Sheridan, M. R. (1973). Effects of S-R and R-R compatibility on bimanual movement time. *Q. J. Exp. Psychol.*, 25:247–52.
- Anzola, G. P., Bertoloni, G., Buchtel, H. A., and Rizzolatti, G. (1977). Spatial compatibility and anatomical factors in simple and choice reaction time. *Neuropsychologia*, 15:295–302.
- Anzola, G. P. and Frisoni, G. B. (1992). The spatial distribution of attention in S-R compatibility. *Behav. Brain Res.*, 49:189–96.
- Avenarius, J. H. and Gerstenbrand, F. (1967). Phantom sensations in spinal cord injuries. *Wien. Klin. Wochenschr.*, 79:450–3.
- Bächtold, D., Baumüller, M., and Brugger, P. (1997). Stimulus-response compatibility in representational space. *Neuropsychologia*, 36:731–735.
- Berlucchi, G. and Aglioti, S. (1997). The body in the brain: neural bases of corporeal awareness. *Trends in Neurosciences*, 20:560–564.
- Berlucchi, G., Crea, F., Di Stefano, M., and Tassinari, G. (1977). Influence of spatial stimulus-response compatibility on reaction time of ipsilateral and contralateral hand to lateralized light stimuli. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept.*, 3:505–17.
- Berlyne, D. E. (1957). Uncertainty and conflict: A point of contact between information-theory and behaviour-theory concepts. *Psychol. Rev.*, 64:329–339.
- Bermudez, J. L., Marcel, A., and Eilan, N. (1995). *The body and the self*. MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England (A Bradford Book).
- Beschin, N., Cazzani, M., Cubelli, R., Sala, S., and Spinazzola, L. (1996). Ignoring left and far: An investigation of tactile neglect. *Neuropsychol.*, 34:41–49.
- Bisiach, E., Pizzamiglio, L., Nico, D., and Antonucci, G. (1996). Beyond unilateral neglect. *Brain*, 119:851–857.
- Brebner, J., Shephard, M., and Cairney, P. (1972). Spatial relationships and S-R compatibility. *Acta Psychol.(Amst)*, 36:1–15.
- Bromage, P. R. and Melzack, R. (1974). Phantom limbs and the body schema. *Can. Anaesth. Soc. J.*, 21:267–74.

- Brooks, R. A. (1990). Elephants don't play chess. *Robotics and Autonomous Systems*, 6:3–15.
- Cash, T. F. and Pruzinsky, T. (1990). *Body Images (development, Deviance, and Change)*. The Guilford press.
- Coles, M. G. H., Gratton, G., Bashore, T. R., Eriksen, C. W., and Donchin, E. (1985). A psychophysiological investigation of the continuous flow model of information processing. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, 11:529–553.
- Corballis, M. C. and McMaster, H. (1996). The roles of stimulus-response compatibility and mental rotation in mirror-image and left-right decisions. *Can. J. Exp. Psychol.*, 50:397–401.
- Cumming, W. (1988). The neurobiology of the body schema. *Br. J. Psychiatry*.
- Dassonville, P. (1995). Haptic localization and the internal representation of the hand in space. *Exp. Brain Res.*, 106:434–448.
- de Jong, R. (1995). Perception-action coupling and S-R compatibility. *Acta Psychol. (Amst)*, 90:287–99.
- Di Stefano, M., Sauerwein, H. C., and Lasseonde, M. (1992). Influence of anatomical factors and spatial compatibility on the stimulus-response relationship in the absence of the corpus callosum. *Neuropsychologia*, 30:177–85.
- Donders, F. C. (1969). On the speed of mental processes. translation by w. g. koster in w. g. koster (ed.). *Attention and Performances*, II:412–431.
- Dornier, L. A. and Gilmour Reeve, T. (1996). Evaluation of mental representation for same and mixed compatibility assignments. *Percept. Psychophys.*, 58:47–55.
- Driver, J. and Spence, C. J. (1994). Spatial synergies between auditory and visual attention. *Attention and Performance XV*.
- Dutta, A. and Proctor, R. W. (1992). Persistence of stimulus-response compatibility effects with extended practice. *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn.*, 18:801–9.
- Eimer, M., Hommel, B., and Prinz, W. (1995). S-R compatibility and response selection. *Acta Psychol.*, 90:301–313.
- Fitts, P. M. and Seeger, C. M. (1953). S-R compatibility: Spatial characteristics of stimulus and response codes. *J. Exp. Psychol.*, 46:199–210.
- Frowein, H. W., Reitsma, D., and Aquarius, C. (1981). Effects of two counteracting stresses on the reaction process. *Attention and Performance*, XIII:575–589.
- Gold, M., Adair, J. C., and et al, D. H. J. (1995). Right-left confusion in Gerstmann's syndrom: A model of body centered spatial orientation. *Cortex*, 31:267–283.
- Goodin, D. S. and Aminoff, M. J. (1984). The relationship between the evoked potential and brain events in sensory discrimination and motor response. *Brain*, 107 (Pt 1):241–51.

- Goodrich, S., Henderson, L., Allchin, N., and Jeevaratnam, A. (1990). On the peculiarity of simple reaction time. *Q. J. Exp. Psychol.*, 42:763–75.
- Graziano, M. S. A. and Gross, C. G. (1998). Visual responses with and without fixation: neurons in premotor cortex encode spatial locations independently of eye position. *Exp. Brain Res.*, 118:373–380.
- Halligan, P. W. and Marshall, J. C. (1991a). Left neglect of near but not far space in man. *Nature*, 350:498–500.
- Halligan, P. W. and Marshall, J. C. (1991b). Spatial compression in visual neglect: a case study. *Cortex*, 27:623–629.
- Halligan, P. W. and Marshall, J. C. (1995). Supernumerary phantom limb after right hemispheric stroke. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, 59:341–2.
- Halligan, P. W., Marshall, J. C., and Wade, D. T. (1993a). Three arms: a case study of supernumerary phantom limb after right hemisphere stroke. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, 56:159–66.
- Halligan, P. W., Marshall, J. C., Wade, D. T., Davey, J., and Morrison, D. (1993b). Thumb in cheek? sensory reorganization and perceptual plasticity after limb amputation. *Neuroreport*, 4:233–6.
- Hasbroucq, T. and Guiard, Y. (1991). Stimulus-response compatibility and the simon effect: toward a conceptual clarification. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, 17:246–66.
- Hawkins, H. L. and Underhill, J. R. (1971). S-R compatibility and the relative frequency effect in choice reaction time. *J. Exp. Psychol.*, 91:280–6.
- Heil, M., Rauch, M., and Hennighausen, E. (1998). Response preparation begins before mental rotation is finished: Evidence from event-related brain potentials. *Acta Psychol.*, 99:217–232.
- Heister, G., Ehrenstein, W. H., and Schroeder-Heister, P. (1987). Spatial S-R compatibility with uni-manual two-finger choice reactions: effects of irrelevant stimulus location. *Percept. Psychophys.*, 42:195–201.
- Heister, G. and Schroeder-Heister, P. (1994). Spatial S-R compatibility: positional instruction vs. compatibility instruction. *Acta Psychol.(Amst)*, 85:15–24.
- Helmholtz, H. L. F. (1950). Über die Methoden, kleinste Zeiteile zu messen, und ihre Anwendung für physiologische Zwecke.
- Hick, W. E. (1952). On the rate of gain of information. *Quart. J. Exp. Psychol.*, 4:11–26.
- Hikosaka, O., Miyauchi, S., and Shimojo, S. (1996). Orienting of spatial attention – its reflexive, compensatory, and voluntary mechanisms. *Cognitive Brain Research*, 5:1–9.
- Hoeffler, W. J. R. (1985). The transmission-line matrix method. theory and applications. *IEEE Trans. on microwave theory and technique*, 33:882–893.
- Hommel, B. (1996a). The cognitive representation of action: automatic integration of perceived action effects. *Psychol. Res.*, 59:176–86.

- Hommel, B. (1996b). No prevalence of right-left over top-bottom spatial codes. *Percept. Psychophys.*, 58:102–10.
- Hommel, B. (1997). Interactions between stimulus-stimulus congruence and stimulus-response compatibility. *Psychol. Res.*, 59:248–260.
- Hyman, R. (1953). Stimulus information as a determinant of reaction time. *J. Exp. Psychol.*, 45:188–196.
- Joraschky, P. (1983). *Das Körperschema und das Körper-Selbst als Regulationsprinzipien der Organismus-Umwelt-Interaktion*. Minerva Publikation München.
- Karnath, H.-O. (1998). Perception of horizontal distances in patients with spatial neglect. *Exp. Brain Res.*, 123:190–191.
- Kinsbourne, M. (1970). A model for the mechanism of unilateral neglect of space. *Trans. Am. Neurol. Assoc.*, 95:143–6.
- Kohonen, T. (1982). Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biol. Cybern.*, 43:59–69.
- Kornblum, S., Hasbroucq, T., and Osman, A. (1990). Dimensional overlap: cognitive basis for stimulus-response compatibility—a model and taxonomy. *Psychol. Rev.*, 97:253–70.
- Krotkov, E., Bares, J., Kanade, T., Mitchell, T., Simmons, R., and Whittaker, W. L. (1991). Ambler: a six-legged planetary rover. *Fifth Intern. Conf. on Advanced Robotics in unstructured Environments*, 1:717–722.
- Krotkov, E. P., Simons, R. G., and Whittaker, W. L. (1995). Ambler: performance of a six-legged planetary rover. *Acta Astronautica*, 35:75–81.
- Ladavas, E., Farne, A., Carletti, M., and Zeloni, G. (1994). Neglect determined by the relative location of responses. *Brain*, 117 (Pt 4):705–14.
- Lakatos, S. and Shepard, R. N. (1997). Time-distance relations in shifting attention between locations on one's body. *Percept. Psychophys.*, 59:557–66.
- Lautenbacher, S., Roscher, S., and F. Strian, J.-C. K. (1993). Theoretical and empirical considerations on the relation between body image and body scheme. *J. Psychosomatic Research*, 37:447–454.
- Luce, R. D. (1986). *Response times: their role in inferring elementary mental organization*. New York : Oxford Univ. Press.
- Maes, P., Mataric, M., Meyer, J., Pollack, J., and Wilson, S. (1996). *From animals to animats 4. Procs. of the Fourth Intern. Conf. on Simulation of Adaptive Behaviour*. MIT Press, Cambridge MA.
- McClelland, J. L. and Rumelhart, D. E. (1981). An interactive activation model of context effects in letter perception, part I: An account of basic findings. *Psychol. Rev.*, 88:375–407.
- McCourt, M. E. and Jewell, G. (1999). Visuospatial attention in line bisection: stimulus modulation of pseudoneglect. *Neuropsychologia*, 37:843–55.

- Melzack, R. (1990). Phantom limbs and the concept of a neuromatrix. *Trends in Neurosciences*, 13:88–92.
- Melzack, R., Israel, R., Lacroix, R., and Schultz, G. (1997). Phantom limbs in people with congenital limb deficiency or amputation in early childhood. *Brain*, 120 (Pt 9):1603–20.
- Merkel, J. (1885). Die zeitlichen verhältnisse der willenstätigkeit. *Philosophische Studien*, 2:73–127.
- Metzinger, T. (1993). *Subjekt und Selbstmodell. Die Perspektivität phänomenalen Bewußtseins vor dem Hintergrund einer naturalistischen Theorie mentaler Repräsentation*. Ferdinand Schöningh, Paderborn · München · Wien · Zürich.
- Mewaldt, S. P., Connelly, C. L., and Simon, R. (1980). Response selection in choice reaction time: test of a buffer model. *Mem. Cognit.*, 8:606–11.
- Miller, J. (1982). Discrete versus continuous stage models of human information processing: in search of partial output. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, 8:273–96.
- Miller, J. (1988). Discrete and continuous models of human information processing: Theoretical distinctions and empirical results. *Acta Psychol.*, 67:191–257.
- Milner, A. and Goodale, M. A. (1993). Visual pathways to perception and action. *Progress in Brain Research*, 95:317–337.
- Nicoletti, R., Anzola, G. P., Luppino, G., Rizzolatti, G., and Umiltà, C. (1982). Spatial compatibility effects on the same side of the body midline. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, 8:664–73.
- Parsons, L. M. and Shimojo, S. (1987). Perceived spatial organization of cutaneous patterns on surface of the human body in various positions. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept.*, 13:488–504.
- Pashler, H. E. (1997). *The Psychology of attention*. A Bradford Book. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts London, England.
- Pellat, J., Carbonnel, S., Chanal, J., Charnallet, A., Nicoul, B., and Gaio, J. M. (1986). Tactile and visual neglect. Preliminary study of 4 patients. *Rev. Neurol. (Paris)*, 142:793–5.
- Poffenberger, A. T. (1912). Reaction time to retinal stimulation with special reference to the time lost in conduction through nerve centers. *Archives of Psychology*, 23:1–73.
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quart. J. Exp. Psychol.*, 32:3–25.
- Posner, M. I., Walker, J. A., Friedrich, F. J., and Rafal, R. D. (1984). Effects of parietal injury on covert orienting of attention. *J. Neurosci.*, 4:1863–74.
- Proctor, R. W. and Reeve, T. G. (1990). *Stimulus-Response compatibility*. Amsterdam, the Netherlands: North-Holland.
- Proctor, R. W., Van Zandt, T., Lu, C. H., and Weeks, D. J. (1993). Stimulus-Response compatibility for moving stimuli: perception of affordances or directional coding? *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, 19:81–91.

- Ragot, R. and Fiori, N. (1994). Mental processing during reactions toward and away from a stimulus: an ERP analysis of auditory congruence and S-R compatibility. *Psychophysiology*, 31:439–46.
- Rainer, G., Asaad, W. F., and Miller, E. K. (1998). Selective representation of relevant information by neurons in the primate prefrontal cortex. *Nature*, 393:577–9.
- Ramachandran, V. S. (1996). What neurological syndromes can tell us about human nature: some lessons from phantom limbs, capgras syndrome, and anosognosia. *Cold Spring Harb. Symp. Quant. Biol.*, 61:115–34.
- Ramachandran, V. S. and Rogers-Ramachandran, D. (1996). Synaesthesia in phantom limbs induced with mirrors. *Proc. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.*, pages 377–86.
- Ramachandran, V. S., Rogers-Ramachandran, D., and Cobb, S. (1995). Touching the phantom limb. *Nature*, 377:489–90.
- Reed, C. L. and Farah, M. J. (1995). The psychological reality of the body schema. *J. Exp. Psychol.*, 21:334–343.
- Renault, B., Fiori, N., and Giami, S. (1988). Latencies of event related potentials as a tool for studying motor processing organization. *Biol. Psychol.*, 26:217–30.
- Riehle, A., Kornblum, S., and Requin, J. (1997). Neuronal correlates of sensorimotor association in stimulus-response compatibility. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, 23:1708–26.
- Ritter, H. (1986). *Planning a dynamic trajectory via path finding in discretized phase space*. Parallel Programming: Logic Organization and Technology.
- Rizzolatti, G. and Berti, A. (1990). Neglect as a neural representation deficit. *Neurol. Rev.*, 146:626–634.
- Rizzolatti, G., Fogassi, L., and Gallese, V. (1997). Parietal cortex: from sight to action. *Curr. Opin. Neurobiol.*, 7:562–7.
- Rizzolatti, G., Umiltà, C. A., and Berlucchi, G. (1970). Simple and choice reaction times to lateralized visual stimuli in normal stimuli. *Brain Res.*, 24:557–8.
- Robertson, I. H. and North, N. (1993). Active and passive activation of left limbs: influence on visual and sensory neglect. *Neuropsychologia*, 31:293–300.
- Sachs, L. (1997). *Angewandte Statistik: Anwendung statistischer Methoden*. Springer-Verlag.
- Salinas, E. and Abbott, L. F. (1995). Transfer of coded information from sensory to motor networks. *J. Neurosci.*, 15:6461–74.
- Simon, J. R. (1990). The effects of an irrelevant directional cue on human information processing. *Stimulus-Response Compatibility (Amst)*, pages 31–86.
- Simon, J. R., Hinrichs, J. V., and Craft, J. L. (1970). Auditory S-R compatibility: reaction time as a function of ear-hand correspondence and ear-response-location correspondence. *J. Exp. Psychol.*, 86:97–102.

- Simon, J. R. and Rudell, A. P. (1967). Auditory S-R compatibility: the effect of an irrelevant cue on information processing. *J. Appl. Psychol.*, 51:300–4.
- Spitzer, M., Bohler, P., Weisbrod, M., and Kischka, U. (1995). A neural network model of phantom limbs. *Biol. Cybern.*, 72:197–206.
- Steels, L. (1988). Steps towards common sense. In *Proc. 8th Eur. Conf. on Artificial Intelligence (ECAI, München, 1988)*, pages 49–54.
- Steels, L. (1994). The artificial life. roots of artificial intelligence. *Artificial Life*, 1:75–11.
- Steinkühler, U., Beyn, W.-J., and Cruse, H. (1995). A simplified MMC model for the control of an arm with redundant degrees of freedom. *Neural Processing Letters*, 2:11–15.
- Steinkühler, U. and Cruse, H. (1998). A holistic model for an internal representation to control the movement of a manipulator with redundant degrees of freedom. *Biol. Cybern.*, 79:457–466.
- Sternberg, R. (1969). The discovery of processing stages: Extension of donders' method. *Acta Psychologica*, 30:276–315.
- Stoffels, E. J. (1996). Uncertainty and processing routes in the selection of a response: an S-R compatibility study. *Acta Psychol.(Amst)*, 94:227–52.
- Styles, E. A. (1997). *The Psychology of attention*. Psychology Press,UK.
- Tegner, R. and Levander, M. (1991). The influence of stimulus properties on visual neglect. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, 54:882–7.
- Tietz, C. (1995). Adaptive Pfadplanung mit Verfahren zur heuristischen Graphensuche. *Dissertation*.
- Tlauka, M. and McKenna, F. P. (1998). Mental imagery yields stimulus-response compatibility. *Acta Psychol.(Amst)*, 98:67–79.
- Toth, J. P., Levine, B., Stuss, D. T., Oh, A., Winocur, G., and Meiran, N. (1995). Dissociation of processes underlying spatial S-R compatibility: evidence for the independent influence of what and where. *Conscious Cogn.*, 4:483–501.
- Valle-Inclan, F. (1996). The locus of interference in the simon effect. *Biol. Psychol.*, 43:147–162.
- Wallace, R. J. (1971). S-R compatibility and the idea of a response code. *J. Exp. Psychol.*, 88:354–60.
- Wallace, R. J. (1972). Spatial S-R compatibility effects involving kinesthetic cues. *J. Exp. Psychol.*, 93:163–8.
- Walter, J. (1998). PSOM network: Learning with few examples. In *Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA-98)*, pages 2054–2059.