

Timo Fischinger

## Zur Psychologie des Rhythmus

Präzision und Synchronisation bei Schlagzeugern

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Erziehungswissenschaft / Humanwissenschaften der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Philosophie (Dr. phil.) angenommen.

Erster Gutachter: Prof. Dr. Jan Hemming  
Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Herbert Bruhn  
Dritter Gutachter: Prof. Dr. Reinhard Kopiez

Tag der mündlichen Prüfung

22. Juni 2008

Die Einzelauswertungen zu dieser Arbeit finden Sie unter:  
<http://www.upress.uni-kassel.de/publi/abstract.php?978-3-89958-824-8>

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2008  
ISBN print: 978-3-89958-824-8  
ISBN online: 978-3-89958-825-5  
URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0002-8253>

© 2009, kassel university press GmbH, Kassel  
[www.upress.uni-kassel.de](http://www.upress.uni-kassel.de)

Umschlaggestaltung: Uda Albrecht grafikdesign und artDirection, [www.uda-albrecht.de](http://www.uda-albrecht.de), Hamburg  
Umschlagbild: Drummer Gene Krupa playing drum at Gjon Mili's studio  
Foto: Gjon Mili, Time & Life Pictures, gettyimages  
Printed in Germany

## Vorwort

Wer einmal erlebt hat, mit welcher Virtuosität so hervorragende Schlagzeugso-  
listen wie Gene Krupa, Peter Sadlo oder Multiperkussionisten wie Martin Grubinger  
ihr Können unter Beweis stellen, der wird sich sicherlich auch die Frage gestellt  
haben, wie ist dies nur möglich? Staunend hört man ihnen zu und ist von der Ge-  
schwindigkeit und Präzision ihrer Bewegungen schlicht fasziniert.

Derartige Höchstleistungen erfordern die Koordination einer Vielzahl komple-  
xer Bewegungsabläufe, die nicht nur in der richtigen Reihenfolge ausgeführt werden  
müssen, sondern deren zeitliche Struktur entscheidend für den Erfolg der musikali-  
schen Darbietung ist. Zu jeder Zeit müssen sie sich darüber im Klaren sein, welche  
Bewegungen sie als nächstes vollziehen wollen, vor allem aber, wann sie ihre Hand-  
lungen starten müssen, um den richtigen Zeitpunkt nicht zu verpassen.

Auf ähnliche Weise gilt dies auch für Laien, wenn sie z.B. den Rhythmus der Mu-  
sik mit ihren Füßen oder Fingern mitklopfen. Auch diese einfache Form der Synchroni-  
sation erfordert eine stete Timing-Kontrolle der Bewegungen, um z.B. kleine Un-  
genauigkeiten der Bewegungsausführung auszugleichen oder um sich den Tempo-  
und Timing-Schwankungen der Musik entsprechend anzupassen.

Eine kaum zu überblickende Anzahl an Studien unterschiedlichster Fachrichtun-  
gen widmet sich mithin der Frage nach den genauen Grundlagen der an der Ausfüh-  
rung einfacher Synchronisationsaufgaben beteiligten Timing-Prozesse. Insbesondere  
in der Psychomotorikforschung hat sich dieses Vorgehen als eines der wichtigsten ex-  
perimentellen Paradigma etabliert. Dabei zeigen Experimente mit Tappingaufgaben  
zu Metronom-Pattern bereits erstaunliche und bisher nicht verstandene Phänomene  
wie die sogenannte negative Asynchronie, die vor allem bei Laien zu beobachten ist.

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel das Timing-Verhalten bei Schlagzeugern  
eingehender zu untersuchen.

Zur Einführung in die Rhythmusforschung wird im Theorieteil der Arbeit zu-  
nächst das Phänomen Rhythmus aus verschiedenen Perspektiven beleuchtet und im  
Hinblick auf philosophische und wahrnehmungspsychologische Aspekte erörtert.  
Der daran anschließenden kritischen Aufarbeitung bestehender Rhythmustheorien  
sowie der Auseinandersetzung mit den aktuellen Erklärungsansätzen zur negativen  
Asynchronie folgt sodann die Entwicklung eines kognitiven Modells, das als inte-  
gratives Zwei-Wege-Modell der Rhythmusverarbeitung bezeichnet wird. Neben der  
theoretischen Fundierung des Modells durch die Kombination handlungstheoreti-  
scher Konzepte mit jüngsten Erkenntnissen aus der Kognitionspsychologie und Neu-  
rophysiologie, wird die Aussagekraft im empirischen Teil durch eine experimentelle  
Studie eingehend geprüft.

Für die zahlreiche Unterstützung, die wertvollen Anregungen und die Mitarbeit, ohne die diese Arbeit nicht hätte entstehen können, danke ich insbesondere

meinem Doktorvater Prof. Dr. Jan Hemming,

meinem Zweitgutachter Prof. Dr. Herbert Bruhn,

meinem Drittgutachter Prof. Dr. Reinhard Kopiez,

meinem Freund und Kollegen Dr. Manfred Nusseck,

den beteiligten VersuchsteilnehmerInnen und meinen Kollegen

sowie den geduldigen Korrekturlesern.

# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Theorie</b>	<b>9</b>
<b>1</b>	<b>Zeit, Musik und Rhythmus</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Rhythmus in der Musik</b>	<b>21</b>
2.1	Zur Definition . . . . .	22
	Beat . . . . .	24
	Puls . . . . .	24
	Tempo . . . . .	25
2.2	Strukturierung durch Grouping . . . . .	27
	Akzent . . . . .	27
	Gestaltprinzipien . . . . .	29
	Metrum . . . . .	30
	Rhythmus-Kontur und -Spannung . . . . .	32
2.3	Kategorienbildung . . . . .	33
2.4	Zusammenfassung . . . . .	41
<b>3</b>	<b>Rhythmusforschung</b>	<b>45</b>
3.1	Grenzen der Wahrnehmung . . . . .	48
	Psychische Präsenzzeit und Gleichzeitigkeit . . . . .	49
3.2	Zeitliche Steuerung sensomotorischer Synchronisation . . . . .	51
	Dynamischer Ansatz . . . . .	53
	Repräsentationaler Ansatz . . . . .	55
3.3	Zusammenfassung und Diskussion . . . . .	58
<b>4</b>	<b>Der negative Synchronisationsfehler</b>	<b>61</b>
4.1	Perceptual-Center-Hypothese . . . . .	62
4.2	Nervenleithypothese . . . . .	64
4.3	Schwellenwertmodell . . . . .	66
4.4	Zeitschätzungsfehler . . . . .	67
4.5	Zusammenfassung und Diskussion . . . . .	70
	Tapping zu Musik . . . . .	70

<b>5</b>	<b>Handlungssteuerung</b>	<b>75</b>
5.1	Antizipation und Kontrolle . . . . .	78
	Sensorische Antizipation . . . . .	79
	Explizite Antizipation . . . . .	79
5.2	Handlungsregulation und Motorik . . . . .	80
	Mechanismen der Bewegungssteuerung . . . . .	83
5.3	Neuronale Strukturen der (Senso-)Motorik . . . . .	84
5.4	Exekutive Funktionen . . . . .	87
	Aufmerksamkeit und Verhalten . . . . .	88
	Interne und externe Bewegungskontrolle . . . . .	90
	Arbeitsgedächtnis . . . . .	91
	Dual-Task . . . . .	93
<b>6</b>	<b>Zwei-Wege-Modell</b>	<b>97</b>
6.1	Kognitive Ebenen der Wahrnehmung und Ausführung . . . . .	99
6.2	Kreislauf von Wahrnehmung und Handlung . . . . .	102
6.3	Kontrolle und automatisierte Bewegungseinleitung . . . . .	103
6.4	Zwei-Wege-Modell der Rhythmusverarbeitung . . . . .	106
<b>II</b>	<b>Empirische Untersuchung</b>	<b>109</b>
<b>7</b>	<b>Experiment</b>	<b>111</b>
7.1	Hypothesen und Operationalisierung . . . . .	112
7.2	Versuchsaufbau . . . . .	113
7.3	Versuchsplan . . . . .	119
7.4	Versuchsablauf . . . . .	121
7.5	Versuchspersonen . . . . .	123
<b>8</b>	<b>Auswertung der Daten</b>	<b>125</b>
8.1	Inter-Onset-Intervall 400, 500 und 600 ms . . . . .	128
8.2	Zweitaufgabe . . . . .	133
8.3	Teil I: Durchläufe „ohne“ vs. „mit“ Zweitaufgabe . . . . .	134
8.4	Teil II: Zweitaufgabe während der Durchläufe . . . . .	137
8.5	Einfluss des Zeitpunkts der Zweitaufgabe . . . . .	138
8.6	Überblick Teil II . . . . .	145
<b>9</b>	<b>Einzelauswertung</b>	<b>149</b>
9.1	Vpn 1-10 (Teil I) . . . . .	149
9.2	Vpn 1-10 (Teil II) . . . . .	151
9.3	Auswertung der Daten (+/- 5 Taps) . . . . .	153
	Teil I: Durchläufe „ohne“ vs. „mit“ Zweitaufgabe . . . . .	156
	Teil II: Zweitaufgabe während der Durchläufe . . . . .	156

9.4	Vergleich der Taps aus Session A & B (+/- 30 Taps) . . . . .	159
9.5	Berechnung des Interventionseffekts . . . . .	171
9.6	Fokussierung der Berechnungen: Zeitfenster +/- 5 Taps . . . . .	175
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung &amp; Diskussion</b>	<b>187</b>
10.1	English summary . . . . .	192
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>221</b>
<b>B</b>	<b>Anhang</b>	<b>223</b>



**Teil I**  
**Theorie**



# Kapitel 1

## Zeit, Musik und Rhythmus

Nach Newton (1686, 5) stellt sich dem Menschen die Zeit als ein unumstößliches und absolutes Naturgesetz dar, das sich als kontinuierliches Maß aller Dinge etabliert hat.

Dabei stellen wir uns die „Zeitfolge durch eine ins Unendliche fortgehende Linie vor (...) und schließen aus den Eigenschaften dieser Linie auf alle Eigenschaften der Zeit“ (Kant, 1781/1966, 97). „Die Zeit ist eine notwendige Vorstellung, die allen Anschauungen zum Grunde liegt.“ (Kant, 1966, 94) Sie sei „a priori“ gegeben und bestimme „das Verhältnis der Vorstellungen in unserm innern Zustande“ (Kant, 1966, 97). Unsere Alltagserfahrung lehrt uns, dass Zeit subjektiv durchaus unterschiedlich lang oder kurz (und abhängig von der jeweils erlebten Situation) empfunden werden kann und somit eher relativen Charakters zu sein scheint.

Bergson (1888/2006) versucht die erlebte Zeit im Begriff der „temps durée“ zu fassen und stellt sie der räumlich vorgestellten linearen Zeit, der „temps espace“ als primäre Zeiterfahrung voran. Er differenziert also zwischen einer psychischen Zeit, die als subjektive Empfindung besteht und einer physikalischen Zeit, die als objektiv gegeben angenommen wird (vgl. Eggebrecht, 1991, 182). Nach Jones (1976, 1990) liefert der physikalische Zeitbegriff jedoch keine adäquaten Erklärungsmodelle für die psychologischen Gegebenheiten der Wahrnehmung von Zeit.

Für Husserl (1928/1985) sind die psychische Zeit der Wahrnehmung und die (objektive) Naturzeit der wahrgenommenen Gegenstände ineinander verschränkt. So überwindet Husserl im Rahmen seiner „*Phänomenologie des intentionalen Bewusstseins*“ den Zwiespalt zwischen psychologischer und physikalischer Zeitanalyse. „In reality, we live by both modes of time“ (Epstein, 1995, 7).

Untrennbar an die Gegenwart gebunden erscheint dabei das Zukünftige und das Vergangene als unzugängliches Terrain. Die drei Zeiten Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft seien demzufolge streng genommen als „gegenwärtige Erinnerung an Vergangenes, gegenwärtiges Anschauen von Gegenwärtigem“ und „gegenwärtige Erwartungen von Zukünftigem“ (Augustinus, 1989, 320) zu charakterisieren.

Die Vorlesungen zur „*Phänomenologie des inneren Zeitbewusstseins*“ (Husserl, 1985) leiten indes von einer reinen Philosophie der Zeit (wie noch bei Kant) hinüber in eine empirisch geleitete Phänomenologie der Zeit. In seinen Untersuchungen be-

zieht Husserl dabei psychologische Grundlagen zur Wahrnehmung von Ereignissen in der Zeit (z.B. das aufeinander folgende Erklingen von Tönen) mit ein. Das Jetzt der Gegenwart, der gegenwärtige Augenblick, dem Wirklichkeit zugestanden wird, ist danach nicht als ein punktuell Ereignis, sondern vielmehr als eine Strecke zu verstehen, „deren Ausdehnung von der Dauer des Vorgangs abhängt, der sie ausfüllt und der als lückenlos zusammenhängend empfunden wird.“ (Dahlhaus, 1976, 111)

Das Zeiterleben kann mithin in folgende mentale Erlebnis-Kategorien unterteilt werden:

1. das Erleben von Gleichzeitigkeit,
2. das Erleben von Folge,
3. das Erleben von Jetzt und
4. das Erleben von Dauer (vgl. Pöppel, 1989, 371).

Bei Bruhn (1997, 464) findet diesbezüglich zwischen den Kategorien Gleichzeitigkeit und Folge eine weitere Kategorie Erwähnung: die Ungleichzeitigkeit. Das Erleben von Ungleichzeitigkeit tritt auf, wenn z.B. zwei aufeinander folgende Töne nicht gleichzeitig gehört werden, ihre Reihenfolge jedoch nicht genau benannt werden kann (s. dazu 3.1 auf Seite 48).

In seiner „*Psychologie der Zeit*“ entwickelte Fraisse (1985) nach Husserls phänomenologischem Ansatz eine Theorie der Zeit, die sich auf Erkenntnisse der Physiologie, Pathologie, genetischen Psychologie und der Analyse psychologischer Funktionen stützt. Für Fraisse ist Zeit „only a concept that subsumes all the aspects of change in our environment“ (Fraisse, 1978, 203), wobei er in seinen Überlegungen den regelmäßigen Wechsel von Tag und Nacht, Sommer und Winter, aber auch die alltäglich wiederkehrenden Regelmäßigkeiten des Lebens mit einbezieht.

Nach Michon (1985) haben sich die (menschlichen) Organismen an die periodischen Veränderungen ihrer Umwelt angepasst, indem sie die Fähigkeit zur Synchronisation ausbildeten. In diesem Sinne sei denn auch die Zeit als ein aus der bewussten Erfahrung heraus entwickeltes Produkt derjenigen Prozesse zu verstehen, die für das adaptive Verhalten an die sich zyklisch wandelnden Umweltbedingungen überlebenswichtig erscheinen (Michon, 1985).

Eines haben alle oben genannten Theorien gemein: Der Lauf der Zeit erfolgt immer nur in die eine Richtung, die Zukunft genannt wird, und es ist nicht möglich den „Zeitpfeil“ (Hawking, 1988, 183) umzukehren. Physikalisch gesehen drückt sich diese Unumkehrbarkeit im zweiten Hauptsatz der Thermodynamik aus, wonach in einem geschlossenen System das Ausmaß der Unordnung - die Entropie - die Tendenz hat zuzunehmen. Demnach hätte ein heiles Ei eine geringere Entropie, als eines, das auf den Boden gefallen und zerplatzt ist.

Durch die Erfahrung von „Musik als Zeitkunst“ (Wiora, 1957) wird diese Erkenntnis ein ums andere Mal bestätigt, indem die Musik den Hörern als strukturierter bzw. gestalteter Prozess in der Zeit (Epstein, 1995) irreversibel entgegentritt und

die Flüchtigkeit ihrer Erscheinung als grundsätzliche Gemeinsamkeit von Zeit und Musik erfahrbar macht. Über das Hören erscheine hierbei die Musik als „zeitliche Gestalt und bedarf des Erlebens und des aktiven Hervorbringens solcher Gestalt“ (Spitzer, 2002, V).

Ist Zeit aber, so fragt Dahlhaus, nur „ein bloßes Medium der Vorgänge, die sich in ihr ereignen, oder ist sie selbst ein Geschehen, das aus der Vergangenheit in die Gegenwart vorrückt, oder der Gegenwart aus der Zukunft entgegenkommt?“ Und bezogen auf Musik: Ist sie „in der Zeit“ oder hat sie umgekehrt „Zeit in sich“? (Dahlhaus, 1976, 112) - Musik ist beides: Ein musikalisches Werk enthält Zeit (-gestalten), so wie einzelne Werke für die Dauer ihrer Aufführung reale unwiederholbare (gestaltete) Zeit bedeuten. Musik sei darüber hinaus „komponierte Erlebniszeit“, die im Zuge der ästhetischen Identifikation mit der musikalisch durchorganisierten Zeit das normale Zeitempfinden beiseite schieben kann (Eggebrecht, 1991, 184).

Zeit ist demnach nicht nur eine naturwissenschaftliche Hilfsgröße, mit der die Abfolge von Ereignissen beschrieben werden kann, sondern stellt „eine Gestaltdimension der Hörwahrnehmung dar, also eine Koordinate, auf welcher auditive Objekte angeordnet sind, welche zueinander in Beziehung stehen, derart, daß ihre Gesamtheit Gestalten bildet, welche davon abhängen, in welchen Zeitpunkten die Objekte auftreten. (...) Eine typische Manifestation der Zeitgestalt ist der Rhythmus“ (Terhardt, 1998, 371).

Die Musik erschließt sich dabei sowohl aus den gerade gehörten Tönen und Klängen, als auch aus der kompletten Vorstellung des jeweiligen Stückes, wie Dahlhaus (1976) treffend beschreibt: „Daß die einzelnen ineinander übergehenden Wahrnehmungen verbunden bleiben, statt sich bloß abzulösen, ist zwar einerseits das Resultat einer teils rezeptiven, teils spontanen Zusammenfassung: die Töne fügen sich zu Motiven, die Motive zu Perioden, die Perioden zu Satzformen. Andererseits aber wird das Ganze eines Werkes, auch eines unbekanntes, von einem Hörer, der an artifizielle Musik gewöhnt ist, immer schon vorausgesetzt; und die Einzelheiten werden als Teile eines antizipierten Zusammenhangs begriffen, der sie umfaßt und umgekehrt aus ihnen hervorgeht“ (Dahlhaus, 1976, 116).

Selten haben sich Musiktheoretiker in Bezug auf Rhythmus mit wahrnehmungstheoretischen Fragen befasst und noch seltener wurde bisher versucht, die elementaren Zusammenhänge musikalisch-rhythmischer Bewegungen beim Musizieren zu ergründen. Die entwickelten Analysen und Rhythmus-Konzeptionen beziehen sich meistens auf das niedergelegte Notenbild von Partituren und beschäftigen sich nicht mit der Frage, welchen Einfluss z.B. das ausdrucksvolle (expressive) Timing eines musikalischen Vortrags auf den tatsächlich wahrgenommenen Rhythmus hat.

In der Musikpsychologie hingegen gibt es eine große Anzahl von Untersuchungen, die sich mit der Beziehung zwischen musikalischer Struktur und (expressivem) Timing auseinandersetzen (vgl. Gabrielsson, 1999; Honing, 2007). Wie bei Honing (2002) dargelegt, verfolgen viele der jüngeren Studien zu Rhythmus, Timing und Zeitwahrnehmung dabei einen kognitiven Ansatz.

Da für die Wahrnehmung der Zeit „an sich“ (vgl. Kant, 1966) kein spezielles Sinnesorgan zur Verfügung steht (Rammsayer, 2000), ist die Wahrnehmung von Zeit auf das Gehirn, genauer auf das Gedächtnis und die zugrunde liegende neuronale Verarbeitung angewiesen. Verschiedene Prozesse im Gehirn sind an der Messung von Zeitspannen beteiligt und damit auch für die empfundene Zeit verantwortlich (für einen Überblick verschiedener Theorien zur Zeitwahrnehmung vgl. Grondin, 2001).

Welche Gehirnstrukturen bei der Herstellung mentaler Zeit die Oberaufsicht führen, ist jedoch noch nicht im Detail erforscht (vgl. Damasio, 2007, 70). Es ist bisher lediglich geklärt, dass der Hypothalamus die chronobiologische „Körperzeit“ überwacht, die sich am Wechsel zwischen Tag und Nacht ausrichtet (s. Damasio, 2007; Wright, 2007).

Als eine der wenigen neurobiologisch fundierten Zeitmessungstheorien gilt die Theorie zur Intervallmessung (Matell & Meck, 2000). Nach Auffassung der Autoren können mithilfe dieser neuronalen Intervalltimer Zeitspannen von Sekunden bis zu Stunden gemessen werden, wie mit einer Stoppuhr, nur nicht ganz so präzise. Diese Intervalltimer seien demnach auch für das Timing bei der Koordination von Bewegungen, wie z.B. beim Mitklatschen zu einer Musik oder beim Fangen eines Balles zuständig.

Zum Stoppen einer gewissen Zeitspanne werden größere Neuronenverbände in der Großhirnrinde kurzfristig synchronisiert, wenn z.B. durch ein äußeres Ereignis Aufmerksamkeit erregt wird. Die im Gehirn zu verarbeitenden Informationen tragen dabei nicht mehr die originären Eigenschaften der einzelnen Sinneswahrnehmungen, sondern bilden diese nur ab. Sie sind aufgrund des Prinzips der „Neutralität des neuronalen Codes“ (Roth, 1996, 249) modalitätsspezifisch nicht voneinander zu unterscheiden. Nachdem die Neuronen synchronisiert wurden, senden (feuern) sie ihre Signale nachfolgend wieder in ihrem eigenen Rhythmus. In aufeinanderfolgende Momentaufnahmen zergliedert, entwerfen die Oszillationen der Neuronen nach dem simultanen Einsatz „ein jeweils charakteristisches, reproduzierbares Muster neuronaler Gesamtaktivität“ (Wright, 2007, 63). Die einzelnen Muster werden wiederum von anderen Zellen beobachtet, die dann anhand der Musterfolgen die verstrichene Zeit messen. Jedes erdenkliche Zeitintervall erhält auf diese Weise einen entsprechenden Zeitstempel, der wieder abgerufen werden kann.

Das Prinzip des Intervalltimers funktioniert zwar nicht hundertprozentig genau, hat jedoch den Vorteil, dass er gestartet, gestoppt, trainiert oder gar ignoriert werden kann und sowohl unerschwellig als auch unter bewusster Kontrolle arbeitet (Matell & Meck, 2000; Rao et al., 2001; Wright, 2007).

Musikalische Rhythmusforschung bezieht sich mithin zwangsläufig auf die Arbeitsweisen und Funktionen des Gehirns einerseits und auf die zugrunde liegenden Integrationsprozesse und Verarbeitungswege bei der Koordination von Bewegungen andererseits. Denn die Synchronisation bzw. Produktion von Rhythmen und rhythmischer Bewegung ist in Bezug auf Musik „letztlich nur zu verstehen vor dem Hin-

tergrund physikalischer Bewegung realer Körper. (...) Unsere Form, unsere Größe und unser Gewicht sowie die Länge und das Gewicht der Arme und Beine bestimmen damit den Rhythmus von Musik wesentlich“ (Spitzer, 2002, 215).

Der Körperbau bestimmte im Laufe der Evolution „die Physiologie seiner Steuerung, und beides [Körperbau und Steuerung; Anm. des Autors] wiederum die Physiologie der Wahrnehmung“ (Spitzer, 2002, 227). Als ein Ergebnis dieser Entwicklung ist Rhythmisierungsfähigkeit eine unverzichtbare koordinative Fähigkeit, die nicht nur für Leistungen im Sport oder in der Musik eine Rolle spielt. Vielmehr stellt sie eine elementare Eigenschaft des Menschen dar, die nach McNeill (1995) primär soziobiologische Funktion hat, denn gemeinsame Bewegung stärke den sozialen Zusammenhalt innerhalb einer Gruppe. Womit eine Erklärung dafür gefunden wäre, wie Rhythmus „ein zentraler Bestandteil von kulturellen Universalien wie Musik, Tanz und rituellen Handlungen“ (Krampe & Engbert, 2005, 483) werden konnte. Wie es scheint, ist rhythmische Koordinationsfähigkeit integraler Bestandteil „bei praktisch allen menschlichen Handlungen“ (Krampe & Engbert, 2005, 484).

Nach Thomas & Farlow (1998) sei die Fähigkeit zu Synchronisation und Rhythmisierung ein evolutionäres Erbe, welche insbesondere bei der Jagd einen nicht zu unterschätzenden Wettbewerbsvorteil bedeutete.

Für Untersuchungen dieser Funktionen eignet sich die Rhythmusproduktion und Synchronisation mit akustischen Stimuli in besonderer Weise, da sie einerseits gut operationalisierbar sind und andererseits durch die Verwendung akustischer Stimuli eine hohe Genauigkeit liefern. Beim Vergleich der Variabilität (Standardabweichung in Millisekunden) von Ergebnissen aus Rhythmusexperimenten mit visuellen und akustischen Stimuli liegt der Wert bei akustischen Stimuli mit 6,5 ms deutlich unter dem Wert mit visuellen Stimuli, der bei 38,8 ms liegt (Jäncke et al., 2000). Abbildung 1.1 auf der nächsten Seite zeigt die Effektstärken und Lokalisationen bei visuellen (V) und akustischen (A) Synchronisationsaufgaben (S) im Vergleich zu sog. visuellen und akustischen Aufgaben, bei denen es z.B. darum geht, das Tapping nach Anhalten des Metronoms weiter zu führen (VC und AC).

Die Analyse der aktivierten Gehirnareale zeigt, dass bei akustischen Stimuli eine stärkere Aktivierung in den Arealen für die Motorik zu erkennen ist als bei der Verwendung visueller Stimuli. Daher fällt es offenbar leichter, sich mit einem auditiven, als mit einem visuell vorgegebenen Rhythmus zu synchronisieren (vgl. Chen et al., 2002). Auch bei gleichzeitiger Präsentation auditiver und visueller Stimuli wird nach Repp & Penel (2002) bei Synchronisationsaufgaben die auditive Modalität vor der visuellen bevorzugt. Dies lässt vermuten, dass zwischen der perzeptiven Aufnahme auditiver Ereignisse und den motorischen Ausführungssystemen sehr enge Verbindungen bestehen (vgl. Fraise, 1982; Krumhansl, 2000; Thaut, 2005).

Rhythmus ruft auf diese Weise Bewegungen hervor, die sich je nach Stil und Richtung der Musik z.B. in Form von Hand- oder Finger-Tappings beobachten lassen. Dieser Prozess der Synchronisation wird oft auch (physikalisch) als Phasenkopplung beschrieben und gelingt dem Menschen im Gegensatz zu fast allen anderen

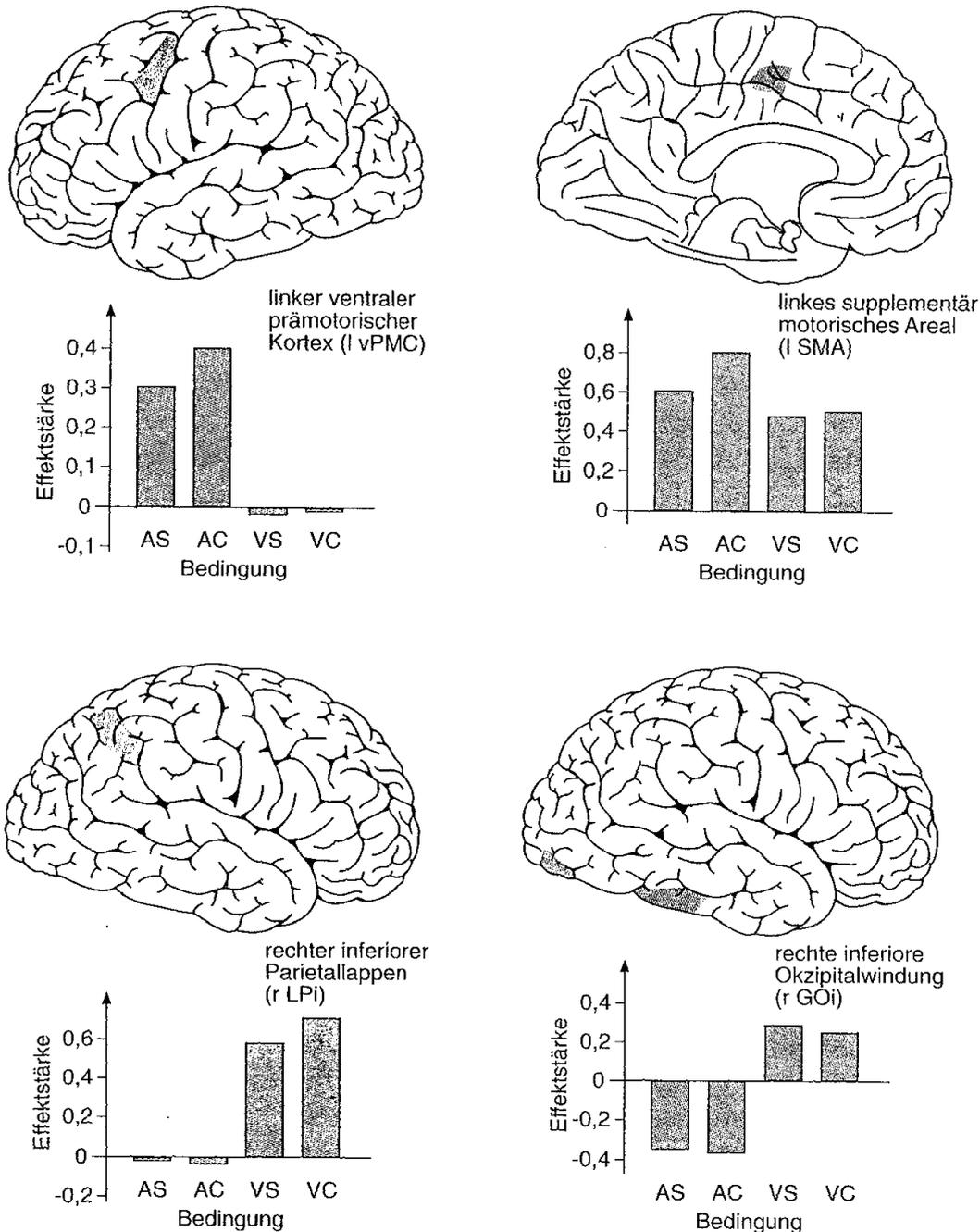


Abbildung 1.1: Darstellung der aktivierten Gehirnareale beim rhythmischen Klopfen. Die Abbildung zeigt die aktivierten Areale beim rhythmischen Klopfen mit dem rechten Zeigefinger zu akustischen (A) und visuellen (V) Stimuli, entweder synchron (S) oder nach der Stimulation noch kontinuierlich weiter (C). Unter den Gehirnschichten ist die Aktivierung in den jeweils grau markierten Arealen unter den vier Bedingungen dargestellt. Linksseitige prämotorische und supplementär motorische Areale werden durch akustische Stimuli stärker aktiviert als durch visuelle, wohingegen rechtsseitige inferior parietale und okzipitale Areale stärker durch visuelle Reize aktiviert werden. Rhythmische Stimuli sind also enger mit der Motorik verknüpft, wenn sie akustisch erklingen. (Spitzer, 2002, 220; nach Jäncke et al., 2000)

Lebewesen mit großer Leichtigkeit. Dennoch steckt hinter dieser scheinbar sehr einfachen Form von Timing-Kontrolle ein sehr differenzierter Integrationsprozess von Wahrnehmung und Handlung, der auch für komplexe koordinative Leistungen - wie das Musizieren - verantwortlich ist.

Es liegt somit nahe, das Timing bzw. die zeitliche Kopplung von Handlungen mit periodischen externen Ereignissen mithilfe der Analyse rhythmischer Fingerbewegungen (Tapping) zu einem Puls, Metrum oder Rhythmus zu untersuchen, um den kognitiv-motorischen Funktionen und Verarbeitungswegen auf die Spur zu kommen. Wie Brodsky (2005) zeigen konnte, eignet sich das Tapping für Wahrnehmungsexperimente besonders gut, weil es zuverlässigere Daten liefert als z.B. Untersuchungen, bei denen Versuchspersonen gebeten werden ihr Tempoempfinden anhand von Metronomeinstellungen auszudrücken.

Im Idealfall verbinden sich hier Wissenschaft und Kunst auf fruchtbare Weise als „*Sciences of the Artificial*“ (Simon, 1996) und profitieren gleichermaßen voneinander (vgl. dazu auch Thaut, 2005 und Altenmüller et al., 2006).

Dabei stehen zumeist die psychologischen Aspekte des Rhythmus im Vordergrund verschiedenster Forschungsdisziplinen, die danach streben, die Wahrnehmung und Herstellung zeitlicher Ereignismuster in Bezug auf Bewegung, Verarbeitung, Sprache und Musik zu erklären. Die vorliegende Arbeit widmet sich infolgedessen den nachstehenden Aspekten der Rhythmuswahrnehmung und den zugrunde liegenden kognitiven Prozessen der Rhythmusproduktion.

Anhand des derzeitigen Forschungsstandes werden in den folgenden Kapiteln die kognitionspsychologischen Grundlagen der musikalischen Rhythmuswahrnehmung erörtert. Im Anschluss daran wird mithilfe neurophysiologischer Erkenntnisse ein integratives Modell entwickelt, welches im Folgenden durch eigene experimentelle Untersuchungen gestützt werden soll. Im Rahmen der Systematischen Musikwissenschaft (Honing, 2004) versteht sich die Arbeit somit als Beitrag psychologischer Grundlagenforschung einer Kognitiven Musikpsychologie (Motte-Haber & Rötter, 2004; Rösing, 1997; Stoffer, 1985), wobei die Methoden und Arbeitsweisen oft ein erhöhtes Maß an Abstraktion und Reduktion des zu untersuchenden Gegenstandes erfordern. Dies geschieht eingedenk der Tatsache, dass einzelne Wahrnehmungsprozesse immer als Teil vielschichtiger, interdependenter Verflechtungen im Sinne ganzheitlicher Prozesse zu verstehen sind. Zudem bleibt zu berücksichtigen, dass in der „Gesamterscheinung des Musikalischen“ (Dürr & Gerstenberg, 1986, 389 ff.) die einzelnen Aspekte Melodie, Tonhöhe, Klang, Form und Rhythmus fortwährend miteinander vereint erscheinen und im Grunde „untereinander nicht trennbar“ (Kurth, 1931, 250) sind. Die auditiv-zeitliche Architektur der Musik wird dabei vor allem durch den Rhythmus zusammengehalten und so sei „in dem Kontext von Raum- und Bewegungseindrücken der Rhythmus - und nicht, wie Kurth annahm, die Melodie - das primäre Moment“, denn ein Rhythmus sei ohne Tonfolge, aber „eine Tonfolge jedoch nicht ohne Rhythmus denkbar“ (Dahlhaus, 1976, 119).

Einzelne Komponenten wie die des Rhythmus herauszugreifen und isoliert zu

untersuchen, bietet hierbei Chancen über den rein musikalischen Erkenntnisgewinn hinaus. So kann ein tieferes Verständnis über die Perzeption und Apperzeption akustischer Ereignisse als Grundlegung musikalischer Wahrnehmung erschlossen werden und es ermöglicht zudem, generelle Funktions- und Arbeitsweisen des Gehirns besser zu verstehen (vgl. Molinari et al., 2003; Thaut, 2005).

Dabei verdiene nach Roth (1996) vor allem das Gedächtnis als das wichtigste „Sinnesorgan“ (Roth, 1996, 263) besondere Aufmerksamkeit, da die im Gedächtnis niedergelegten Erfahrungen und Informationen für unsere Wahrnehmung insbesondere „für stark erfahrungs- und bedeutungsabhängige Gestaltwahrnehmung“ (Roth, 1996, 266) - wie Musik - prägend seien.

Aus diesem Grunde betont auch Spitzer (2002) die Bedeutung des Gedächtnisses, denn erst „wenn Vergangenes und Gegenwärtiges in Beziehung gesetzt werden“, fängt Musik erst an „überhaupt zu existieren“ (Spitzer, 2002, 115).

So erscheint es nach Auffassung von Spitznagel (2000) auch nicht verwunderlich, dass Koffka (1935) in seinen „*Principles of Gestalt psychology*“ das Thema Rhythmus im Abschnitt *Gedächtnis* unterbringt (s. Spitznagel, 2000, 22), denn schon früh konnte „empirisch gesichert werden“ (ebd.), dass die Rhythmisierung eines Lernstoffes das Behalten und Erinnern fördert. Die Rhythmisierung sei danach als eine Form des „Chunkings“ (Miller, 1956) zu betrachten, „die die begrenzte Kapazität und Haltedauer des Kurzzeitspeichers (KZS) bis zu einem gewissen Umfang unterlaufen kann“ (Spitznagel, 2000, 22).

Zusätzlich sind Erlernen und Üben neben Begabung und Erziehung bestimmende Parameter für die Wahrnehmung von Musik, weil Vorerfahrungen über Aufnahmekapazität und Integrationsfähigkeit entscheiden (Seidel, 1998, 263). Das im Gedächtnis abgelegte Wissen in Form gelernter Schemata (Bartlett, 1932) bildet Wahrnehmungserwartungen und fördert so die Reaktions- und Anpassungsfähigkeit des Menschen an die sich verändernde natürliche und soziale Umwelt. So würden bereits gelernte Schemata verwendet, welche die Erkennung neu eingehender Informationen beschleunigen (dazu Bruhn, 1998, 172), indem die absteigenden efferenten Nervenbahnen (*top-down*) die Arbeit aufsteigender afferenter Bahnen (*bottom-up*) bereits ab dem frühesten Stadium (der primären Ebene der Informationsverarbeitung) aufgrund von Wahrnehmungserwartungen verändern (Narmour, 1991; Unyk, 1990). Das Wahrnehmungssystem benötige nach Roth (1996) weniger „Eckdaten“, je vertrauter eine Gestalt oder Situation erscheine, „um ein als vollständig empfundenes Wahrnehmungsbild zu erzeugen, das zu diesen Eckdaten paßt“ (Roth, 1996, 268).

Wie in Abbildung 1.2 auf der nächsten Seite veranschaulicht, erreicht Rhythmus die Ohren in Form feiner Luftdruckschwankungen (*pressure wave in the air*), die im Zuge der auditiven Verarbeitung in neuronale Impulse transformiert werden (Hellbrück & Ellermeier, 2004). Der Strom eingehender Informationen wird bereits in der Hörbahn (durch den Einfluss efferenter Nervenbahnen) analysiert, gefiltert und kategorisiert (Steinberg, 2005). Während der folgenden neuronalen Verarbeitung kommt

es zu einer ständigen Interaktion zwischen dem Langzeitgedächtnis, der Aufmerksamkeitslenkung, der Bildung von Erwartungen und den jeweiligen aktuellen Wahrnehmungsinhalten des Kurzzeitgedächtnisses. Diese Interaktionen führen ihrerseits zu Beeinflussungen der eingehenden Informationen. „Nach allen Erkenntnissen der Kognitionspsychologie müssen im Prinzip beide Richtungen berücksichtigt werden: die bottom-up gerichtete Verarbeitung bei der Kodierung von kleinen Einheiten zu Einheiten immer höherer Ordnung ebenso wie die top-down gerichtete Verarbeitung unter Verwendung musikalischen Vorwissens über die in Musik im Prinzip vorfindbaren Strukturen.“ (Stoffer, 2005, 613)

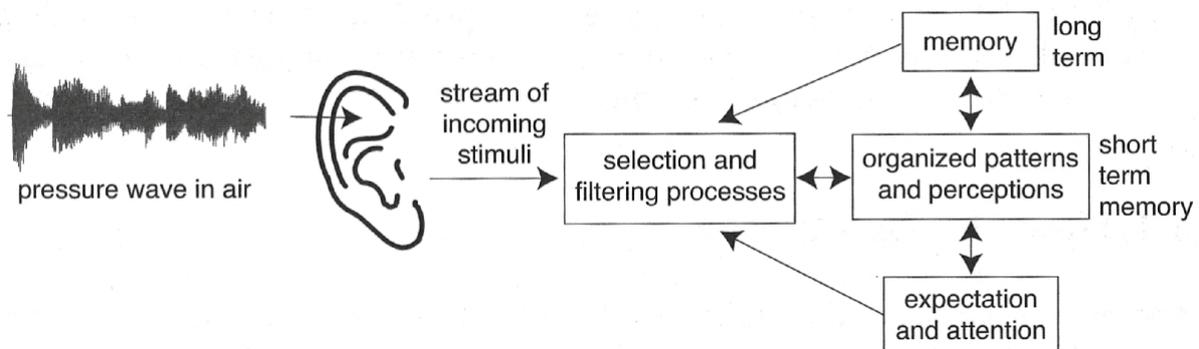


Abbildung 1.2: Vereinfachte Darstellung der auditiven Wahrnehmung: Luftdruckschwankungen treffen auf das Ohr und werden in komplexe neuronale Signale übersetzt und daraufhin durch die Interaktion verschiedener Bereiche (Langzeitgedächtnis, Kurzzeitgedächtnis, Aufmerksamkeit und Erwartung) analysiert, selektiert und kategorisiert (Sethares, 2007, 77).

Das Prinzip der kategorialen Wahrnehmung (Abschnitt 2.3 auf Seite 33) unterstützt diesen Prozess, indem Wahrnehmungsinhalte in Klassen und Entitäten geordnet werden, wobei durch die Einteilungen in Objekt- und Prozessklassen die Wahrnehmung zusätzlich vereinfacht wird.

All dies sorgt für eine verlässliche und stabile Wahrnehmung (des kognitiven Systems), um einer „Orientierung an Umweltmerkmalen zum Zweck des Lebens und des Überlebens“ (Roth, 1996, 85) Vorschub zu leisten. Dabei tritt Zeit als ein entscheidender Faktor allgemeiner Wahrnehmungsprozesse besonders in Erscheinung, da sie einerseits als eine Art Ordnungsprinzip die Wahrnehmung strukturiert (Damasio, 2007, 75), andererseits alle Wahrnehmungsprozesse verschiedenen zeitkritischen Grenzen unterwirft (Abschnitt 3.1 auf Seite 48), die für die Gestaltung eines Wahrnehmungsinhaltes entscheidend mitverantwortlich sind. Vorüber gleitende Zeiträume werden so anhand ihrer Wahrnehmungsinhalte gemessen, weswegen die „erlebte Dauer einer Note oder Pause in einem Musikstück“ nicht wirklich „von der physikalischen Dauer“ abhängig sei (Damasio, 2007, 70).



## Kapitel 2

# Rhythmus in der Musik

Der musikalische Bewegungseindruck einer Musik überträgt sich im Wesentlichen über den wahrgenommenen Rhythmus (vgl. Fischinger & Kopiez, 2008), wobei die verschiedenen rhythmischen Ebenen einer Musik, wie z.B. das Metrum, erst während des Hörens aktiv konstruiert werden (Bruhn, 2000b; Gibson, 1966; Honing, 2002). Hieraus ergeben sich für die Erforschung von Rhythmus einige methodische Schwierigkeiten, denn es gibt einen erheblichen Unterschied zwischen dem, was man physikalisch (genau) messen kann und den Dingen, die tatsächlich wahrgenommen werden.

Bei der Definition von Rhythmus sollte daher zwischen dem rein physikalischen Ereignis und der mentalen Repräsentation von rhythmischen Objekten unterschieden werden. Nach Celibidache ergibt sich eine Aufteilung der Welt in einen Bereich der physikalischen Wirklichkeit, der mit Messinstrumenten erfassbar ist, und einen Bereich, der erst durch die Umwandlung im Gehör und im Nervensystem als psychische Wirklichkeit erfahrbar wird (*Idee der doppelten Wirklichkeit*, erwähnt bei Bruhn & Rösing, 1998, 172).

Roth (1996, 252) und Terhardt (1998, 2) definieren diese beiden Bereiche als Welt der Physik und Welt der subjektiven Wahrnehmung. Überdies fügen sie - in Anlehnung an Popper und Eccles - einen dritten Bereich hinzu und nennen ihn die Welt der Information, die dem Sinn nach auf die Prinzipien der (abstrakten) Informationsverarbeitung abzielt. Diese drei Hauptbereiche der Erfahrungswelt stellen Parallelwelten dar (s. Abb. 2.1 auf der nächsten Seite), „denen sich überhaupt alles, was wissenschaftlich untersucht und beschrieben werden kann, zuordnen läßt“ (Terhardt, 1998, 2).

Auf ähnliche Weise unterscheidet Metzger (1975) sinngemäß zwischen einem ersten Sinn und einem zweiten Sinn von Wirklichkeit. Danach sei die dingliche, physikalische Wirklichkeit (erster Sinn) nicht antreffbar und daher erlebnisjenseitig, während die eigentliche anschauliche Wirklichkeit erlebbar erscheint (zweiter Sinn). Im Zuge seiner phänomenologischen Ausführungen differenziert Metzger den Bereich der anschaulichen Wirklichkeit weiter in *wirklich Angetroffenes*, *Nicht Wirkliches* (Vorgestelltes) und *anschaulich Scheinbares* (vgl. dazu Metzger, 1975).

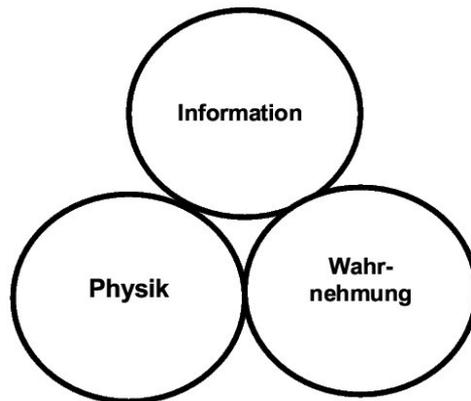


Abbildung 2.1: Die drei Hauptbereiche der Erfahrung bzw. Wissenschaft (nach Terhardt, 1998).

## 2.1 Zur Definition

Die Frage nach einer generellen Definition von Rhythmus wirft Probleme auf, da die dem Begriff inhärente Universalität keine eindeutige Festlegung zulässt. Bereits die kaum zu überblickende Anzahl der Phänomene, die als rhythmisch bezeichnet werden, erschweren eine genaue Definition (vgl. dazu Motte-Haber: „*Zum Problem einer Rhythmusdefinition*“, 1968). Sucht man in den Archiven danach, wird man mit „mehr als 100 Definitionen“ (Spitznagel, 2000) konfrontiert, die sich alle mehr oder weniger unterscheiden (vgl. dazu auch Fraise, 1987). Die definitorischen Schwierigkeiten hängen einerseits mit den rhythmischen Phänomenen selbst zusammen, andererseits ergibt sich die Diversifikation der Definitionen als Resultat allgemeiner fachlicher Spezialisierungsprozesse und Subspezialisierungen innerhalb eines Faches (Spitznagel, 2000, 16f).

Für London (2001) stellt sich die genaue Festlegung des Rhythmusbegriffes im musikalischen Kontext gar als besonders schwierig heraus: „In musical contexts the term is even harder to pin down.“ (London, 2001, 277)

In nahezu allen Lebensbereichen des Menschen gibt es Abläufe und Prozesse, die rhythmischen Eigenschaften unterliegen: zum einen Herzschlag und Atmung, zum anderen der Wechsel zwischen Tag und Nacht (s. dazu „*circadianische Rhythmen*“ nach Hastings, 1998; Lakin-Thomas, 2000), aber auch Sprechrhythmen (Allen, 1975), die durch Artikulation entstehen.

„Grundlegend, wenschon nicht erschöpfend, ist die Definition Platons: Rhythmus ist die Ordnung der Bewegung“ (Seidel, 1998, 257).

Fraise nutzt diese Begriffsbestimmung als Grundlage für seine Arbeiten über Rhythmuswahrnehmung (Fraise, 1978; 1982; 1985; 1987) und erörtert die Grundlagen und Grenzen der Wahrnehmung von Musik, indem er zeitkritische Zusammenhänge und Aspekte der Wahrnehmung von Ereignissen in der Zeit untersucht.

Die elementare Grundeinheit des Rhythmus liege für Fraisse dabei im Wechsel. Danach sei alles - das biologische, psychologische und soziale Leben des Menschen - in Veränderung begriffen (Fraisse, 1978, 9). Im Fluss der Wahrnehmung erscheine der Wechsel als Bewegung. Während nach Kant (1966, 96) die Bewegung als Veränderung des Orts nur durch und in der Zeitvorstellung möglich ist und das Nacheinander überhaupt erst entstehen lässt.

Der Rhythmus - und nach London hat jede Musik „necessarily (...) some manner of rhythm“ (London, 2001, 277) - ist neben der Melodie eines der kennzeichnenden Parameter von Musik (vgl. dazu auch Dahlhaus, 1976). Wird der Rhythmus verändert, verändert sich auch der Charakter eines Stückes. Denn abhängig von Stilrichtung und Art der Musik, ist der Rhythmus maßgeblich formbildend und vermittelt die wesentlichen (gestalthaften) Eigenschaften. Bereits die verschiedenen Taktarten als schriftliche Bezeichnungen für Metren fixieren hierbei die Charakteristik eines Werkes in entscheidender Weise. Der Rhythmus in der Musik kann also als „eigenständig zeitliches Ordnungs- und Gestaltungsprinzip“ verstanden werden, das „einerseits durch Gleichförmigkeit, Bezug zu einem festen Zeitmaß“ (z.B. Metrum oder Takt) und „andererseits durch Gruppierung, Gliederung, Abwechslung“ (Dahlhaus & Eggebrecht, 1989, 43) gekennzeichnet ist.

Um unabhängig von Form und Stil der Musik die rhythmischen Eigenschaften von Musik und ihrer Wahrnehmung zu untersuchen, ist es nötig, die Definition von Rhythmus relativ weit zu fassen und sie gleichsam unter kognitionspsychologischen Aspekten auf eine handhabbare Ebene zu führen. Aus diesem Grund wird Rhythmus hier zunächst nach Bruhn (2000b) als „strukturierte kognitive Repräsentation einer Folge von auditiven Objekten innerhalb definierter Zeiträume“ verstanden (Bruhn, 2000b, 41).

Die Rhythmusdefinition von Bruhn bezieht sich hierbei auf den Wahrnehmungsaspekt unter Berücksichtigung der vorgeschalteten perzeptionellen Prozesse, welche den physikalischen Fluss akustischer Ereignisse in geeigneter Weise segmentieren (*auditory stream segregation*), damit auditive Objekte der Wahrnehmung zugänglich werden (Bregman, 1990, 1993).

Für auditive Objekte finden sich in der Literatur viele unterschiedliche Bezeichnungen (für einen Überblick s. Bruhn, 2000b und Hirsh & Watson, 1996):

- *auditory event* (Handel, 1989; Julesz & Hirsh, 1972; Terhardt, 1998, 370);
- *entities* (Hartmann, 1988);
- *auditory image* (McAdams, 1984);
- *auditory scene, scene of images* (Bregman, 1990; Yost, 1992).

Finden nach Snyder (2000, 159) zwei oder mehr Ereignisse innerhalb der Dauer des Kurzzeitgedächtnisses statt, etabliert sich bereits ein Rhythmus. Snyder verbindet seine Definition von Rhythmus mit einer wahrnehmungsrelevanten Beobachtung:

„Sobald mehr als zwei akustische Ereignisse nacheinander erklingen, werden sie psychisch in ein Metrum von Impuls und Auflösung überführt, ein Pulselement wird als Spannung interpretiert, die sich in den folgenden Pulselementen auflöst“ (Bruhn, 2000b, 49). Der Puls wird hierbei aus einer Vielzahl von akustischen Ereignissen abgeleitet (Zwicker & Fastl, 1999, 274f) und bildet als eine erste rhythmische Ebene den wichtigsten Bezugs- und Orientierungspunkt für die Wahrnehmung weiterer rhythmusrelevanter Elemente. Aus der Summe dieser Elemente ergibt sich der Rhythmus als Ausdifferenzierung eines Metrums. Dabei sind der physikalische und der mentale Rhythmus in unserer Wahrnehmung untrennbar miteinander verbunden und beinhalten immer auch Gestaltwahrnehmungsprozesse wie Gruppierungen, Akzentbildungen und Regelmäßigkeiten innerhalb der psychischen Präsenzzeit (Gabrielsson, 1993, 97). Im Folgenden werden die wichtigsten Teilelemente des Rhythmus detailliert dargestellt.

## Beat

Losgelöst von der rein physikalischen Betrachtungsweise, wird der Beat (Schlag) hier als ein singulärer Punkt in der Zeit, ohne Ausdehnung bzw. Dauer verstanden. Physikalisch gesehen hat ein einzelner Beat-Klang selbstverständlich immer eine gewisse Ausdehnung. Gehörpsychologisch relevant ist hier der Ton-Einsatzpunkt (Onset) eines Tons (für einen Überblick s. Kopiez, 2005 und Abschnitt 4.1 auf Seite 62). Der Abstand zwischen zwei Beats wird als Inter-Beat-Intervall (IBI), Inter-Onset-Interval (IOI) oder Inter-Stimulus(-Onset)-Interval (ISI) definiert und bezieht sich in der Regel auf eine Folge von Beats.

## Puls

Als erstes Referenzsystem eines Musikstücks bezieht sich der Puls auf eine Serie von auditiven Ereignissen (Parncutt, 1987, 1994; Povel & Essens, 1985), die hier als Beat bezeichnet werden. Kein einzelner Beat tritt besonders hervor. Alle Beats sind gleich betont und entwickeln als eine Kette von einzelnen Beats ein internes Zeitmaß, an dem aufeinanderfolgende Klangereignisse gemessen werden (s. Abb. 2.2 auf der nächsten Seite). Dabei entsteht im Zuge der Wahrnehmung eine Gliederung des Pulses in leicht und schwer, welche sich erst durch die mentale Repräsentation konstituiert: „Der Puls einer Folge von auditiven Objekten entsteht aufgrund von Zielpunkten im zeitlichen Ablauf, die erst in der kognitiven Verarbeitung real werden“ (Bruhn, 2000b, 49). Snyder gliedert Puls hierarchisch in verschiedene Pulsarten, wie *basic pulse*, *subpulse*, *central organizing pulse*, *superpulse*, die sich aus der jeweiligen musikalischen Struktur und den mit ihr verbundenen metrisch-rhythmischen Ebenen ergeben (Snyder, 2000, 159). Die Puls-Ebene, die beim Hören und beim Synchronisieren als Referenzpuls gewählt wird, bezeichnen Lerdahl & Jackendoff (1983) als *tactus*.



Abbildung 2.2: Beat und Puls  
(Snyder, 2000, 173).

## Tempo

Das Tempo ist in der Musik durch die Wiederholungsrate eines Pulses mit den physikalischen Werten: MM = Mälzelsches Metronom (seit 1816) bzw. bpm = *beats per minute* definiert, während das empfundene Tempo in der Musik nicht absolut festgelegt werden kann. Vielmehr „hängt das wahrgenommene Tempo von der psychischen Verarbeitung der angeeigneten Informationen ab“ (Bruhn, 1994, 41) bzw. von der rhythmischen Struktur (Auhagen, 1993). Mithin ist die wahrgenommene musikalische Struktur eines Musikstückes ihrerseits vom jeweiligen Tempo abhängig (Handel, 1993; Handel & Oshinsky, 1981). Celibidache sieht hier einen Zusammenhang zwischen dem horizontalen Fluss als physikalische Geschwindigkeit und dem vertikalen Druck als physikalische Informationsdichte eines Musikstückes (s. Bruhn, 1994).

Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass Tempi um 100 bpm als nicht zu schnell und nicht zu langsam, also als moderat empfunden werden. Westergaard (1975) ermittelte einen Bereich für brauchbare Tempi (s. Tab. 2.1).

Beats per minute (bpm)	IOI (ms)	Kommentar
30	2000	zu langsam, um brauchbar zu sein
42	1414	sehr langsam
60	1000	moderat langsam
80	700	moderat
120	500	moderat schnell
168	350	sehr schnell
240	250	zu schnell, um brauchbar zu sein

Tabelle 2.1: Bereich wahrgenommener Tempi (Westergaard, 1975 zit. nach London, 2004, 28).

Zwischen 100 und 120 bpm verteilen sich die Tempi, die - wie Fraise (1982) zeigen konnte - von den meisten Versuchspersonen am ehesten verwendet werden, wenn sie mit ihrem Fuß oder ihrem Finger zu Musik tappen sollen (s. Tab. 2.2).

Wie Parncutt (1994) zeigen konnte, wird das Tapping-Tempo (*tactus*) dabei weitgehend unabhängig vom Tempo der Musik gewählt. Die gleiche Spannbreite ergibt sich auch, wenn ohne Musik getappt wird. Ist das Tempo schneller als 300 oder langsamer als 30 bpm wird die Kette von Ereignissen nicht mehr als einem bestimmten Tempo zugehörig empfunden. Bei einem Tempo von 300 bpm (= 5 Ereignisse pro Sekunde) wird die Folge einzelner musikalischer Ereignisse undeutlich. Dazu Snyder: „it is almost impossible to clearly identify rhythmic patterns at faster tempos“ (Snyder, 2000, 169). Beträgt das Tempo mehr als ca. 900 bpm, verschmelzen die Ereignisse zu einem Ton, beträgt es jedoch nur ca. 7 bpm, können die Ereignisse zueinander nicht in Beziehung gesetzt werden.

In Tab. 2.2 sind die wichtigsten Tempo-Regionen in verschiedenen Maßeinheiten abzulesen. So entspricht z.B. das Tempo 120 bpm (mit 500 MSPB = *milliseconds per beat IOI*) zwei Ereignissen pro Sekunde. Die Theorie des spontanen bzw. bevorzugten Tempos (zwischen 100 und 120 bpm) von Fraise (1982) wird durch Studien bestätigt, die sich der Modellierung oszillatorischer Prozesse als Grundlage von Rhythmuswahrnehmung widmen: So ermittelte Parncutt (1994) in diesem Tempobereich eine „most salient pulse sensation“ bei IOI = 500-600 ms, Langner (2002) eine „einhüllende Funktion“ bei IOI = 598 ms, Todd (1995) „natural periods of the sensorimotor system“ bei IOI = 600 ms und Large (2000) eine „entrainment bias“ bei IOI = 638 ms (für einen Überblick s. Kopiez, 2005).

Interessanterweise konnten Levitin & Cook (1996) in ihren Untersuchungen zum Tempo-Gedächtnis zeigen, dass 72 % der Probanden in der Lage waren, das Originaltempo von bekannten Pop-Titeln ziemlich genau und mit nur geringen Differenzen von weniger als 8 % aus der Erinnerung heraus wiederzugeben.

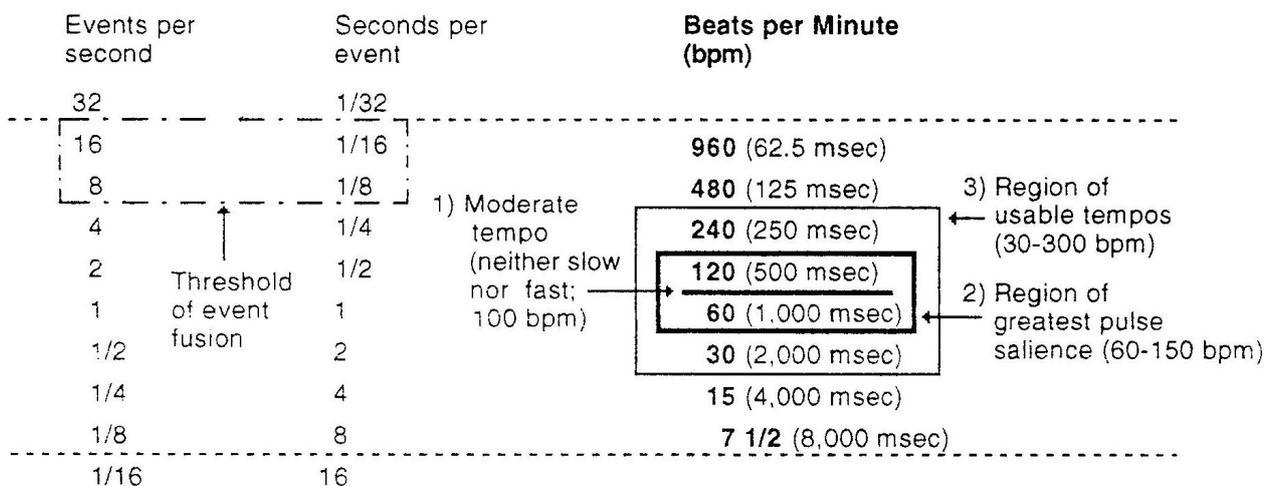


Tabelle 2.2: Die wichtigsten Tempo-Regionen

Darstellung der Tempo-Regionen in verschiedenen Maßeinheiten: Zeitangaben auf der linken und Tempoangaben auf der rechten Seite (Snyder, 2000, 168).

## 2.2 Strukturierung durch Grouping

Musikalische Muster werden als voneinander unterscheidbare Einheiten oder Gestalten wahrgenommen (vgl. Deutsch, 1999, 299; Schulze, 2005, 456ff). Dabei werden die einströmenden Informationen auf dem Weg (Hörbahn) zur zentralen Verarbeitung im Gehirn aufgrund bestimmter Regeln gefiltert. „Auf unterster Ebene hat der Filter ein Zeitfenster für Einzelereignisse, auf höherer Ebene Zeitfenster für die Entdeckung von Gruppen von Ereignissen.“ (Bruhn, 2000b, 45)

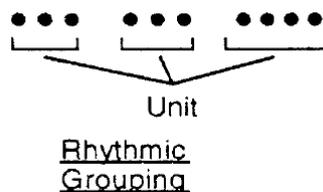


Abbildung 2.3: Rhythmische Gruppierungen (Snyder, 2000, 35).

Dabei wird der zeitliche Ablauf einer Folge von Ereignissen „kognitiv durch die Gewichtung auditiver Objekte strukturiert. Die Gewichtung erfolgt durch Gruppierung nach Prinzipien der Gestaltwahrnehmung und durch die Wahrnehmung von Akzenten“ (Bruhn, 2000b, 45). Eine Folge von Noten (s. Abb. 2.3) wird z.B. aufgrund verschiedener Notenlängen in einzelne Abschnitte (Units) unterteilt wahrgenommen. Noten, die näher zueinander liegen fusionieren zu einer Gruppe, während weite Abstände zwischen Noten zu einer Abgrenzung zwischen einzelnen Gruppen führen (vgl. dazu auch Cooper & Meyer, 1960; Handel, 1998; Jackendoff & Lerdahl, 1982). Die Gruppierungen entsprechen dabei meist den musikalischen Motiven, Phrasen oder Themen der jeweiligen Musik. Erhöht sich das Tempo, so erhöht sich damit in der Regel auch die Anzahl von Elementen innerhalb einer Gruppe (Clarke, 1982).

### Akzent

Durch einen Akzent erhält ein einzelner Beat mittels exponierter Tonhöhe, Lautstärkeänderung und/oder Verlängerung der Tondauer mehr Gewicht bzw. eine Betonung (vgl. Bruhn, 2000b; Clarke, 1999; Jones, 1987). Akzente dienen z.B. der Konturierung und dem Ausdruck und sind physikalisch-objektiver Natur. In seinen Untersuchungen zum Einfluss der Tonhöhe beim Rhythmus konnte Woodrow (1911) zeigen, dass Akzente in Form veränderter Tonhöhe oder Klänge spontan als Anfang oder Ende einer Gruppe wahrgenommen werden.

Dennoch werden beim Hören einer pulsartigen Tonfolge auch dann Akzente subjektiv wahrgenommen, wenn physikalisch keine vorhanden sind (Handel, 1989, 387). Bolton (1894) fand heraus, dass isochrone Tonfolgen (mit identischen Tönen und gleichbleibenden IOI) spontan in Gruppen von zwei, drei oder vier Ereignissen

wahrgenommen werden, weil einzelne Töne auf mentaler Ebene zumeist unwillkürlich einen Akzent erhalten. Wundt, der bereits 1874 vor Bolton zu ähnlichen Erkenntnissen gelangte, nannte dieses Phänomen *subjektive Rhythmisierung*. Gleichwohl ist das Phänomen der subjektiven Rhythmisierung schon früher bekannt gewesen (vgl. Sulzer, 1794/1967) und konnte auch mit Lichtstimuli nachgewiesen werden (vgl. dazu Koffka, 1935).

Als eines „der am besten untersuchten Phänomene“ (Spitznagel, 2000, 20) beweist die subjektive Rhythmisierung einmal mehr, dass Wahrnehmung kein passiver Vorgang, sondern vielmehr ein aktiver und bedeutungsgebender Prozess ist, der bereits auf unterster Ebene (der an der Aufnahme von Sinnesreizen beteiligten Informationsverarbeitung) wirksam wird. Daher sei die Bezeichnung nach Auffassung von Fraise (1982) nicht mehr angemessen, „weil bei jeder Wahrnehmung Subjektivität eine Rolle spielt.“ (Spitznagel, 2000, 20)

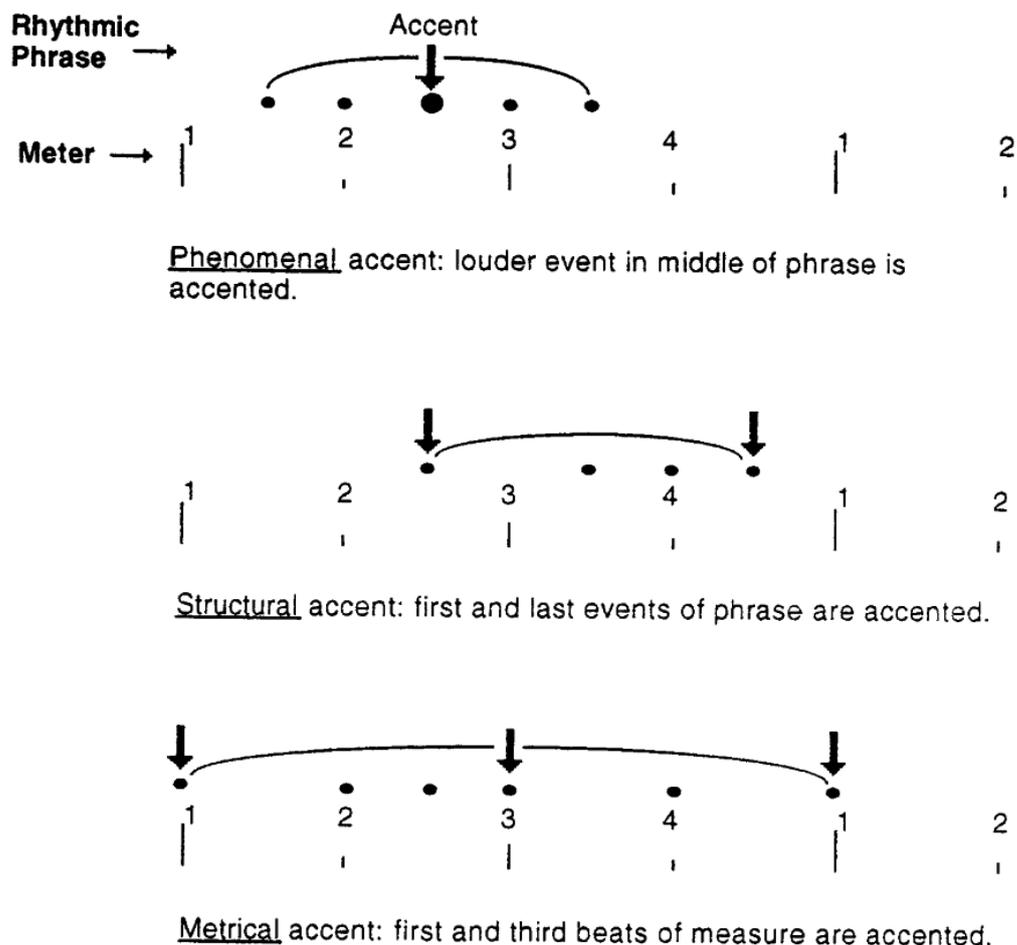


Abbildung 2.4: Der phänomenale, strukturelle und metrische Akzent (Snyder, 2000, 171).

Bruhn (2000b) und Clarke (1999) fassen folgende Akzent-Typen zusammen: Wenn ein Ereignis innerhalb einer Phrase lauter ist, entsteht ein *phänomenaler Ak-*

zent (vgl. auch Lerdahl & Jackendoff, 1983). Liegen einzelne Ereignisse am Anfang oder Ende einer Phrase, so erscheinen sie aufgrund der Struktur eines Patterns akzentuiert als *struktureller Akzent* (Povel & Essens, 1985) und innerhalb eines Taktes erscheinen z.B. im 4/4 Takt der erste und der dritte Beat akzentuiert als *metrischer Akzent* (s. dazu Abb. 2.4). Aber auch durch markante Töne im Verlauf einer Melodie, die aufgrund der melodischen Kontur oder ihrer Tonhöhe hervortreten, finden Akzentuierungen statt (s. Abb. 2.7 auf Seite 31), sogenannte *melodische Akzente* (Huron & Royal, 1996). Strukturelle und metrische Akzente werden im Zuge dessen simultan auf mehreren hierarchischen Ebenen wahrgenommen (s. Abb. 2.8 auf Seite 32). Je länger dabei das zeitliche Intervall (IOI) nach einem Ereignis ist, desto kräftiger erscheint dabei ein Akzent (Steedmann, 1977). Dauert ein Klangereignis mindestens doppelt so lange wie das Klangereignis zuvor, wird es ebenfalls als Akzent empfunden (Müllensiefen, 2004).

Meistens erhält jedes erste Ereignis eines Patterns eine Akzentuierung und prägt die Erwartung auf die jeweilige metrische Beschaffenheit der Musik. Dabei ist es nicht bedeutsam, ob das Pattern auf einer schweren oder leichten Taktzeit beginnt.

In einer Untersuchung zur Rolle melodischer und rythmischer Akzente, in der Versuchspersonen durch Fingertappings angeben sollten, wo sich in den präsentierten Patterns Akzente befanden, konnte gezeigt werden, dass die Versuchspersonen längere (übergeordnete) Zeitspannen mithilfe melodischer und rhythmischer Akzente als strukturgebende Elemente musikalischer Patterns antizipieren und überbrücken (Pfordresher, 2003, 431).

## Gestaltprinzipien

Die Prinzipien der Nähe, der Ähnlichkeit und der Kontinuität gelten in Bezug auf das Hören als die wichtigsten Gesetze der Gestaltwahrnehmung (Deutsch, 1999). Pausen zwischen Gruppierungen verstärken dabei den Gestaltwahrnehmungsprozess (s. Abb. 2.5). Das Phänomen der Gruppierungen erscheint auf verschiedenen Ebenen: Auf einer Ebene werden kleine Gruppierungen gebildet, die wiederum als Teil einer übergeordneten Gruppierungsebene einer Phrase integriert werden (s. Abb. 2.5).

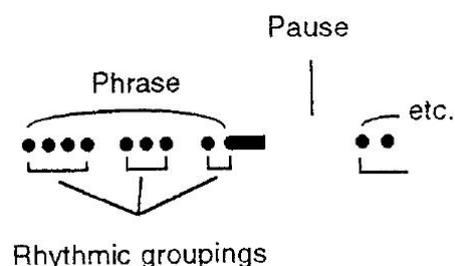


Abbildung 2.5: Rhythmische Gruppierungen durch Segmentierungen bzw. Pausen (Snyder, 2000, 39).

Akzente beeinflussen die Gruppierungen, indem sie der Folge von Ereignissen strukturierende Aspekte beifügen, während (gefühlte) Akzente durch Gruppierungen hervorgerufen werden können (für einen Überblick s. Handel, 1989, 386ff). Sie wirken mithin wechselseitig aufeinander ein.

Gruppierungen finden auf verschiedenen Ebenen statt:

1. in Form einer Ereignis-Verschmelzung innerhalb der Zeit des Echogedächtnisses (bis 250 ms), wenn z.B. schnelle Luftdruckänderungen als Summe vieler Ereignisse als Ton oder Klang wahrgenommen werden,
2. in Form von melodischen oder rhythmischen Schicksalsgemeinschaften innerhalb der phänomenologischen Gleichzeitigkeit und
3. in Form formaler Gliederungen, die durch das Langzeitgedächtnis unterstützt werden (vgl. Snyder, 2000).

Passend dazu entwickelte Todd (1994) die Theorie der seriellen Rhythmusgruppierung, „which is based on a multiscale decomposition of the auditory nerve response“ (Todd, 1994, 25).

## Metrum

Das Metrum ist die Bezeichnung für zyklische Akzentpattern als Folge von schweren und leichten Beats. Es entsteht durch rhythmische Gruppierungen und etabliert sich auch dort, wo physikalisch keine Akzentuierungen vorhanden sind. Das Metrum ist eine Art Puls auf höherer Ebene (Bruhn, 2000b, 51), welcher der musikalischen Orientierung dienlich ist (vgl. London, 2004).

Man geht heute davon aus, dass interne mentale Schemata für die Etablierung und Repräsentation eines Metrums von Bedeutung sind. Dabei kann ein Metrum auch durch Taktangaben schriftlich festgelegt werden. Durch die Festlegung des Metrums erhält die jeweilige Musik eine Art metrisch-rhythmische Korsett, wodurch ein musikalischer Verlauf oder eine Melodie eine gewisse Vorhersagbarkeit erhält. Eine Art zeitliches Priming (vgl. Jones, 1976) evoziert dabei einen Erwartungshorizont für rhythmische Ereignisse in der Zeit. Je eindeutiger bzw. einfacher ein Takt oder ein Metrum ist, desto stabiler erscheint die Musik.

Die Abbildung 2.6 auf der nächsten Seite zeigt Akzentuierungen auf der jeweiligen ersten Zählzeit, hervorgerufen durch das Taktmaß (4/4). Das vorgegebene Metrum bewirkt jeweils für die erste Zählzeit eines Taktes (Accent - Downbeat) eine erhöhte Aufmerksamkeit (Large & Jones, 1999), weil die Regelmäßigkeit des Taktes das Erscheinen eines Akzents erwarten lässt. „Once established, the accent pattern of meter can shape rhythmic expectations even though it may not always be present.“ (Snyder, 2000, 174) Der Downbeat nimmt eine Art zentrale Position in einem metrischen Zyklus ein. Dabei hat er im metrischen Kontext ein Maximum an Stabilität



tischen Ereignissen ab und es „bleibt die Frage, ob die Komposition selbst oder erst die aktuelle Aufführung die metrischen Strukturen vermittelt“ (Bruhn, 2000b, 50).

Musiker wählten in Untersuchungen im Vergleich zu Nicht-Musikern im Durchschnitt langsamere Tempi für den *basic pulse*. Experimentelle Untersuchungen von Snyder und Krumhansl haben gezeigt, dass bei Synchronisationsaufgaben zu Ragtime (Klavier) mit Tapping-Tasks das Finden eines Pulses unabhängig von der Tonhöhe funktioniert (Snyder & Krumhansl, 2001). Für das Finden des Pulses seien nach den Untersuchungsergebnissen vor allem die leicht zu vorhersagenden Bass-Patterns (der linken Hand) und die Noten mit strukturellen Akzenten (beider Hände) verantwortlich. Auch hier wird wieder deutlich, „that meter is not a given; it is constructed by listeners“ (Snyder, 2000, 173). Insbesondere polyrhythmische Pattern lassen danach unterschiedliche Möglichkeiten der Etablierung eines Pulses oder Metrums zu (Handel, 1984; Longuet-Higgins & Lee, 1984; Parncutt, 1994; Povel & Essens, 1985).

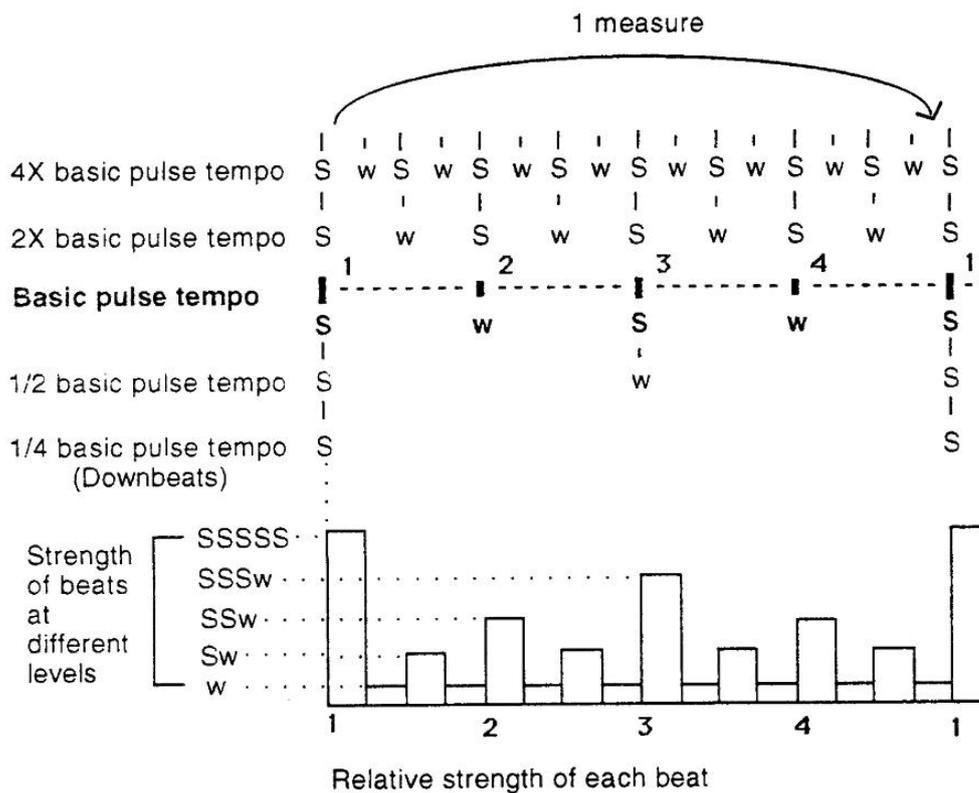


Abbildung 2.8: Hierarchische Darstellung der Rhythmusebenen (Snyder, 2000, 176).

## Rhythmus-Kontur und -Spannung

Der Rhythmus hat auch ohne ein zugrunde liegendes Metrum oder einen gleichmäßigen Puls formbildende Kräfte. Durch rhythmische Konturierungen werden Gestalten

gebildet, die sich aus Momenten der Spannung und Entspannung konstituieren. Werden die Abstände zwischen einer Folge von Ereignissen zunehmend kürzer, erhöht sich also die Frequenz, so erhöht sich die Intensität des Rhythmus. Bei der Streckung der Zeitintervalle innerhalb einer Folge wird dies als Entspannung empfunden. Die Kontur entspricht dabei z.B. einem rhythmischen Spannungsverlauf mit einem Punkt der größten rhythmischen Spannung an der Stelle, an der durch die Verdichtung der Ereignisse ein Höhepunkt erreicht wird, der nachfolgend aber durch eine Verringerung der Frequenz eine Entspannung erfährt (s. dazu Abb. 2.9).

Rhythmische Kontur wird sowohl im Kontext eines Metrums als auch ohne einen metrischen Zusammenhang wirksam und ist oft „the most recognizable form of organization a musical pattern can have“ (Snyder, 2000, 184). Damit bildet sie eine Grundlage für die weitere rhythmische Verarbeitung: Gruppierungen, Entwicklung eines Pulses und Etablierung eines Metrums.

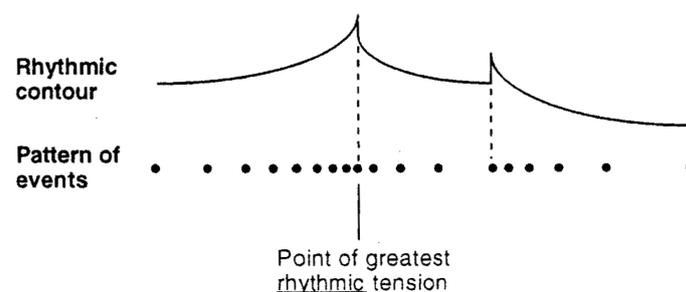


Abbildung 2.9: Rhythmische Kontur und rhythmische Spannung (Snyder, 2000, 185).

## 2.3 Kategorienbildung

Information ist unter anderem dadurch charakterisiert, dass im Zuge der Wahrnehmung „zwischen alternativen Kategorien Entscheidungen getroffen werden“ (Terhardt, 1998, 21). Die Entscheidung wird hier als typisches „Merkmal jeglicher Gewinnung und Verarbeitung von Information“ (Terhardt, 1998, 3) verstanden. Sie dient dem Zweck, „durch Analyse beziehungsweise Zusammenfassung gegebener Objekte neue Objekte zu erzeugen“ (ebd.). Dieser Vorgang der Abstraktion vollzieht sich nach den Prinzipien der Entscheidung und der Kategorisierung bei der Informationsverarbeitung eingehender Signale (der Sinne), und ist für die interne Repräsentation von Objekten verantwortlich. „Aufgenommene Informationen (bottom up) werden mit Vorerfahrungen und erlernten Konzepten verglichen (top down), so daß eine schnelle Identifikation von Reizmustern aufgrund weniger Merkmale möglich wird“ (Bruhn, 1997, 444, s. Abb. 2.18 auf Seite 43).

Durch diesen Informationsverarbeitungsprozess erscheinen bereits vermeintlich einfache Wahrnehmungsinhalte wie der Klang eines Tons als Produkt einer differenzierten kategorialen Wahrnehmung.

Eine der essentiellen Funktionen der kategorialen Wahrnehmung ist es, die Flut der einströmenden perzeptuellen Informationen nach „einem Gesetz der Sparsamkeit“ (Motte-Haber, 1985, 156) in eine überschaubare Zahl voneinander abgegrenzter Kategorien zu reduzieren, um eine schnelle Verarbeitungszeit zu gewährleisten. Dazu stellen sich folgende interessante Fragen: Wird dieses Phänomen beim Hören rhythmischer Gestalten im Sinne einer kategorialen Wahrnehmung von Rhythmus ebenfalls wirksam? Werden Objekte als Ereignisse innerhalb diskreter Zeitkategorien gehört?

Studien von Clarke (1987), Desain & Honing (2003), Fraisse (1982) und Schulze (1989a) weisen darauf hin, dass zeitliche Ereignisse kategorial gehört werden. Der Begriff der kategorialen Wahrnehmung beschreibt die Tendenz der menschlichen Wahrnehmung, einzelne Stimuli in diskreten Kategorien wahrzunehmen und nicht als einzelne Punkte eines Kontinuums. Hierbei ergeben sich perzeptuelle Schwellen, die als Grenzen zwischen einzelnen Kategorien die jeweilige Wahrnehmungsbandbreite bestimmen, auch wenn das Wahrgenommene physikalisch gesehen kontinuierlicher Natur ist. Wahrnehmung wird in diesem Kontext immer als „Perzeption“, nämlich der sinnlichen und unmittelbaren Wahrnehmung als erste Stufe der Erkenntnis verstanden und nicht im Sinne von „Apperzeption“.

In der Musik wird das Konzept der kategorialen Wahrnehmung bezüglich der Tonhöhenwahrnehmung evident. Im Zuge des Wahrnehmungsprozesses wird hier von einer kontinuierlichen Dimension, der Tonhöhe, abstrahiert. Unter zur Hilfenahme neuronal manifesterter Mustererkennung und gelernter Schemata wird in einer ersten Instanz der wahrgenommene Klang durch „Zurechthören“ des Klangspektrums einer Tonhöhenklasse zugeschrieben. Sogar Töne mit einer starken Inharmonizität (wie z.B. bei Gongspielen im Gamelan) oder die Töne eines verstimmt Klaviers werden auf diese Weise „zurechtgehört“, wobei dem Anschein nach Gestalteffekte für die musikalische Verarbeitung verantwortlich sind. „Den Tonhöhenklassen kann man im Sinne der Apperzeption dann wiederum Kategorien auch mit Bezug auf die syntaktischen Funktionen und Relationen der Töne bzw. Tonhöhen zuweisen.“ (Schneider, 1997, 458) Diese Kategorien entsprechen den musikalischen Tonstufen (s. Abb. 2.10 auf der nächsten Seite).

Bereits einfache Tonhöhenwahrnehmungen stehen somit am Ende einer perzeptorischen und kognitiven Leistung eines ausgiebigen Abstraktions- und Reduktionsprozesses unter Echtzeitbedingungen. Durch das „Zurechthören“ wird „es somit möglich, unabhängig von Stimmungssystem und individueller Intonation die Musik in den vom Komponisten beabsichtigten Zuordnungen zu erfassen“ (Fricke, 1988, 84). Die Notationen der westlich-europäischen Musik bilden ebendiese Tonstufen ab, nicht aber die differenzierten Tonhöhen der erklingenden Musik.

Fricke fasst das Phänomen der kategorialen Tonhöhenwahrnehmung wie folgt zusammen: „Den Klangbreiten der Realisationen in der Musik entsprechen die Zonen konstanter Intervallauffassungen in der musikalischen Tonempfindung“ (Fricke, 1988, 67).

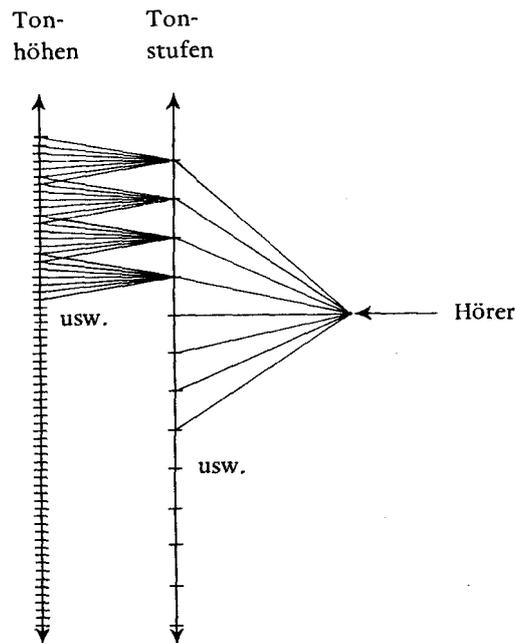


Abbildung 2.10: Tonhöhen und Tonstufen. Die Tonstufen tragen die Funktion diskreter Kategorien als Ergebnis eines kategorialen Wahrnehmungsprozesses (Albersheim, 1979, 173).

Für die Wahrnehmung von Rhythmus gibt es bisher noch kein umfassendes Modell der kategorialen Wahrnehmung (Clarke, 1987, 23). Untersuchungen dazu sind aufgrund der in den vorangestellten Abschnitten besprochenen Einflussfaktoren wie z.B. Akzente, Grouping etc. sehr schwierig. Es gibt jedoch genügend Anzeichen dafür, dass auch beim Rhythmus Kategorisierungen stattfinden (Schulze, 2005, 461ff). Dabei könnte das Phänomen der kategorialen Wahrnehmung erklären, wie sowohl Rhythmus- und Temposchwankungen als auch individuelles Timing mit oftmals beachtlichen Abweichungen voneinander unterschieden und zudem als einheitlich wahrgenommen werden können. Wäre dies nicht so, dann würden bereits kleine Timing- und Temposchwankungen den Sinn für rhythmische Proportionen durcheinander bringen (Snyder, 2000, 181). Ohne die kategoriale Wahrnehmung von rhythmischen Pattern wäre es zudem überhaupt nicht möglich, zwischen computer-genau (isochron) gespielter Musik (deadpan) und expressiv gespielter Musik mit Timingvariationen zu unterscheiden (Desain & Honing, 2003).

Es ist davon auszugehen, dass rhythmische Kategorisierungen auf mindestens drei verschiedenen Ebenen zu finden sind:

1. auf der Ebene des einzelnen Beats, von dem ein Ereignis z.B. durch individuelles Timing geringfügig abweichen kann, indem es etwas zu früh oder etwas zu spät eintritt,
2. auf der Ebene des Takts oder Metrums, bei denen die einzelnen Beats durch ihre funktionale Position kategorisiert werden und

3. auf der Ebene von rhythmischen Pattern, die als Produkt einer Kategorisierung von (zeitlichen) Intervall-Sequenzen entstehen.

Die musikalischen Ereignisse (actual musical events) weichen mitunter von dem jeweiligen idealen Zeitpunkt (prototypical beat) innerhalb eines Pulses (basic pulse) ab, indem sie entweder zu spät oder zu früh sind (s. Abb. 2.11). Wie Untersuchungen von Clarke (1987) zeigen konnten, variiert die Größe einer „Beat-Kategorie“ abhängig vom musikalisch/metrischen Kontext. Die Grenzen liegen nach Ansicht von Parncutt (1994) dabei zwischen  $\frac{1}{8}$  und  $\frac{1}{4}$  des IBI (Inter-Beat-Intervals) vom *basic pulse* vor und hinter der *prototypical beat position* (dazu Abb. 2.11). Dies bedeutet nach Snyder: Ein musikalisches Ereignis kann letztlich zu beiden Seiten sehr weit abweichen und dennoch als ein und derselbe Beat gehört werden (Snyder, 2000, 166).

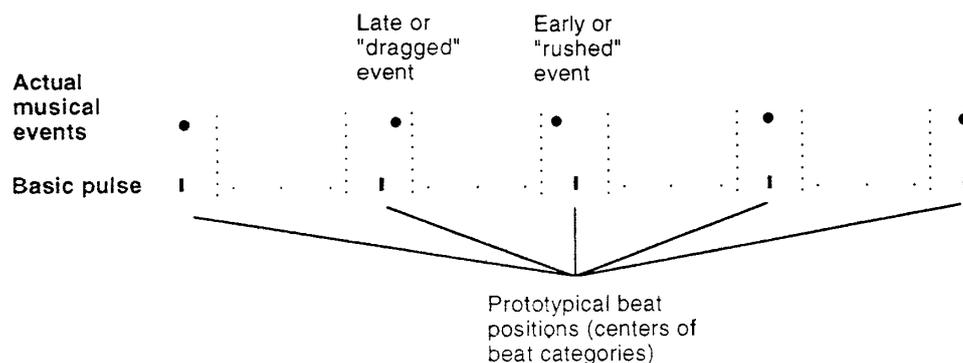


Abbildung 2.11: Beat-Kategorien. Die vertikalen gepunkteten Linien zeigen mögliche Grenzen einzelner Beat-Kategorien (Snyder, 2000, 166).

Um einen Nachweis für Rhythmuskategorien zu erbringen hat Clarke (1987) bei seinen Untersuchungen mit zehn Musikstudierenden folgendes Experiment durchgeführt:

Die Versuchspersonen hörten eine Serie kurzer Musiksequenzen, bei denen die Dauer der vor-vorletzten Note (X) und der vorletzten Note (Y) systematisch zwischen einem Verhältnis 1:1 und 2:1 variiert wurden. Die beiden Sequenzen wurden in zwei unterschiedlichen musikalischen Kontexten präsentiert:

1. in einem 6/8 Takt und
2. in einem 2/4 Takt (s. Abb. 2.12 auf der nächsten Seite).

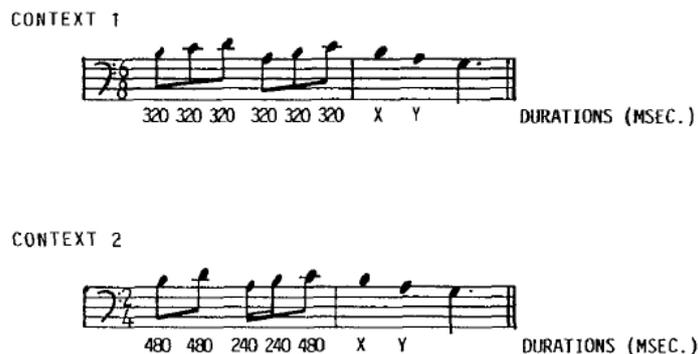


Abbildung 2.12: Kategorisierungen in Abhängigkeit unterschiedlicher musikalischer Kontexte. Die Abbildung zeigt das jeweils angegebene Metrum (6/8 und 2/4), die festgelegten Notenlängen (in ms) und die Positionen zweier Noten mit den variierenden Längen X bzw. Y (Clarke, 1987, 23).

Tabelle 2.3 zeigt die dazugehörigen Werte für die beiden variierenden Notenlängen X und Y. Die Versuchspersonen sollten nach dem Anhören jeder einzelnen Sequenz sagen, ob die jeweilige Sequenz zu Typ A (♩ ♩) oder Typ B (♩♩) gehört. Zusätzlich wurden den Versuchspersonen auch Sequenzpaare vorgespielt, die voneinander unterschieden bzw. jeweils dem Typ A oder B zugeordnet werden sollten. Alle zu beurteilenden Sequenzen wurden in zufälliger Abfolge präsentiert.

SEQUENCE	NOTE 1 (X)	NOTE 2 (Y)	NOTATION
1	640	320	= ♩ ♩
2	620	340	
3	600	360	
4	580	380	
5	560	400	
6	540	420	
7	520	440	
8	500	460	
9	480	480	= ♩♩

Tabelle 2.3: Werte für die perzeptuelle Identifikations- und Diskriminierungsaufgabe. Die Tabelle zeigt die Werte für die beiden variierenden Notenlängen X und Y, die in den neun Sequenzen zur perzeptuellen Identifikations- und Diskriminierungsaufgabe in Abhängigkeit unterschiedlicher musikalischer Kontexte präsentiert wurden (Clarke, 1987, 24).

Abbildung 2.13 auf der nächsten Seite zeigt eben diese Charakteristik der kategorialen Wahrnehmung an:

erstens eine s-förmige Kurve des Graphen für die Identifikation und zweitens einen Höchststand an dem Punkt an dem die Grenze zwischen den beiden Rhythmuskategorien liegt.

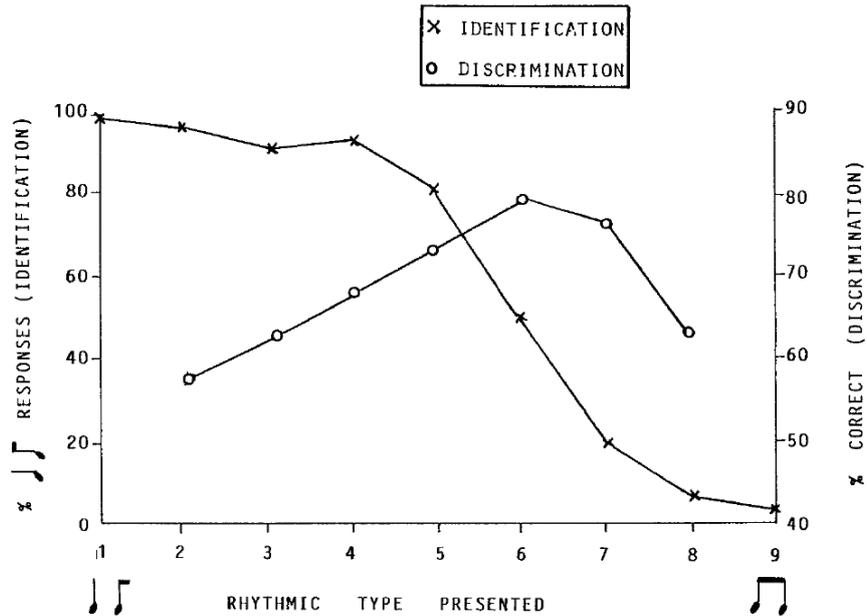


Abbildung 2.13: Die Abbildung zeigt die Funktion für die Identifikation (Skala auf der linken Seite) und die Unterscheidung (Skala auf der rechten Seite) als zusammengefasstes Ergebnis der beiden metrisch verschiedenen Kontexte (Clarke, 1987, 25).

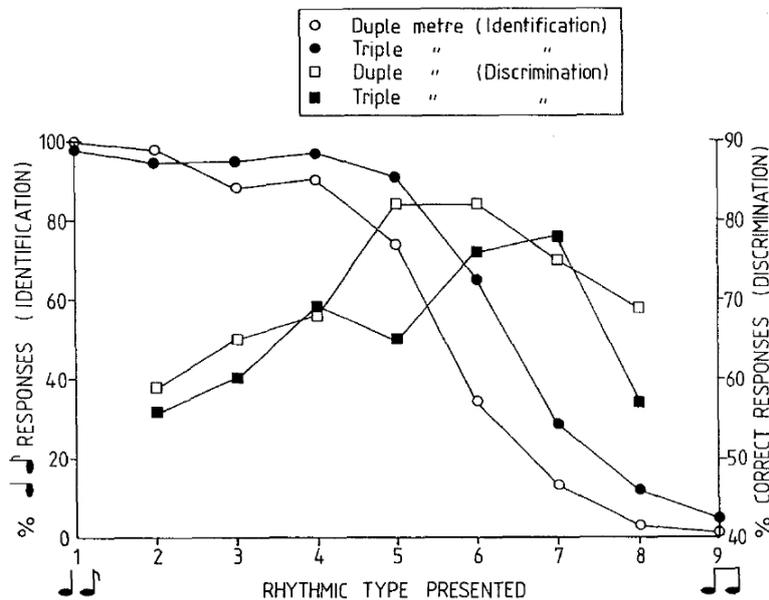


Abbildung 2.14: Darstellung der einzelnen Funktionen der Identifikations- und Unterscheidungsaufgabe in verschiedenen Kontexten (Clarke, 1987, 26).

In Abbildung 2.14 sind die Funktionen für die Identifikation und Diskriminierung in den zwei verschiedenen Kontexten separat dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass

in beiden metrischen Kontexten diskrete perzeptuelle Grenzen wirken, auch wenn diese durch einen veränderten metrischen Kontext verschoben werden.

Es macht also einen Unterschied, ob eine Sequenz im „Duolen-Feeling“ oder im „Triolen-Feeling“ gespielt wird. Für den Rezipienten bedeutet dieser Umstand aber, dass ein Rhythmus nicht immer eindeutig zugeordnet werden kann. Abbildung 2.15 zeigt die jeweilige Dauer dreier Noten (in der Mitte) und zwei mögliche Interpretationen (oben und unten). Das Beispiel könnte sowohl als ein ungerader, „lazy“ Rhythmus im Dreiertakt (s. Interpretation A) oder auch als ein gerader Rhythmus in einem binären Takt - in diesem Fall mit starkem Akzent auf der ersten Note (s. Interpretation B) - aufgefasst werden (Clarke, 1987, 32).

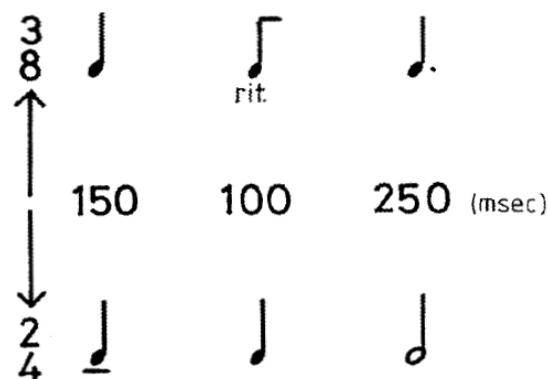


Abbildung 2.15: Zwei Interpretationen für eine nicht eindeutige Folge von Tonlängen (Clarke, 1987, 32).

In einem weiteren Experiment wurden acht verschiedene Rhythmen in einem 4/4 Takt (dazu Abb. 2.16 auf der nächsten Seite, Rhythmus A-H) präsentiert. Es zeigte sich, dass die acht Rhythmen durch den kategorialen Effekt in nur drei rhythmische Gruppen unterteilt und gehört wurden. A und B wurden als zwei Versionen des gleichen Rhythmus gehört. C, D, E und F wurden als vier Versionen eines Rhythmus gehört, während G und H als zwei Versionen eines Rhythmus gehört wurden. Dabei berichteten die Versuchspersonen, dass sich alle acht Rhythmen unterschiedlich „anfühlen“.

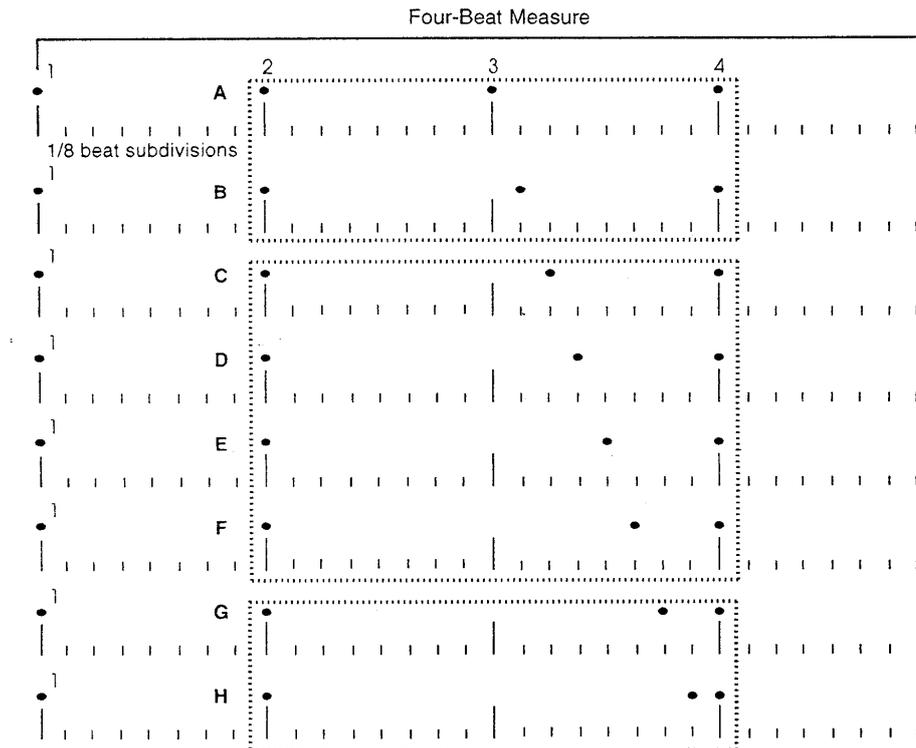


Abbildung 2.16: Acht verschiedene Rhythmus-Variationen eines einfachen geraden Viererrhythmus in Vierteln wurden durch das Verlängern der dritten Note hergestellt und präsentiert. Die Kästen mit den gepunkteten Umrandungen zeigen die drei Bereiche an, die von den Versuchspersonen als jeweils ein Rhythmus gehört wurden. Die ursprünglich acht Rhythmen wurden nur als drei verschiedene Rhythmen wahrgenommen (Snyder, 2000, 182).

Berufsmusiker nutzen den Umstand der zeitlichen Variabilität für ihre Interpretationen und variieren ihr Spiel mit rhythmischen Nuancen zur Betonung bestimmter musikalischer Formen und als Ausdruck ihrer individuellen Spielweise (vgl. Clarke, 1989, 1999; Gabrielsson, 1999; Honing, 2007; Palmer, 1997; Repp, 1992, 1999a). Liegen diese Abweichungen innerhalb der Zeitkategorien, geben sie der Musik den sog. „*Humanfactor*“ und dem Rezipienten mitunter den Eindruck eines perfekten Rhythmus, obwohl die zeitliche Struktur aus einer Vielzahl zufälliger Elemente besteht. Pfeleiderer untersuchte in diesem Zusammenhang die mikrorhythmischen Gestaltungsspielräume in populären Musikstilen (Pfeleiderer, 2002; 2006).

Kommt es hingegen zu größeren Abweichungen, wird Musik beim Hören als rhythmisch ungenau empfunden. Dabei werden systematische Abweichungen von den idealen Zeitpunkten der Beats eher als Tempoveränderung oder Taktwechsel wahrgenommen. Sehr kleine Abweichungen von der idealen Beatposition sind als musikalisches Ausdrucksmittel in Form von Abweichungen innerhalb der einzelnen Kategorie zu verstehen. Beim Hören werden demnach Prototypen eines Rhythmus aus dem Gedächtnis mit dem aktuellen Rhythmus in Beziehung gesetzt. Diese Prototypen beruhen auf zeitlichen Kategorien und bilden nicht den *exakten* rhythmischen

Verlauf einer Musik ab, ähnlich wie Notenwerte nur eine Annäherung an die real erklingende Musik bedeuten. Die Untersuchungsergebnisse von Schulze zur kategorialen Wahrnehmung von Rhythmus liefern indes Raum für weiterführende Spekulationen: Es ist gut möglich, dass die Größe der Zeitkategorien erlernt ist und interindividuell variiert (Schulze, 1989a). So könnten im Prozess der Wahrnehmung kleine rhythmische Veränderungen aufgrund (interindividuell) unterschiedlich großer Kategorienbildungen für den einen als expressive Nuancen und für den anderen bereits als strukturelle, musikalische Veränderungen interpretiert werden.

Aufbauend auf den Studien von Clarke (1987) und Schulze (1989a) haben sich in jüngerer Zeit Desain & Honing (2003) mit der systematischen Untersuchung rhythmischer Kategorisierung beschäftigt. In ihrer interdisziplinär angelegten Forschungsarbeit verbinden die Autoren Konzepte aus der Farbwahrnehmung mit mathematischen Analysemethoden, indem sie die Intervalle zeitlicher Muster in einen  $n$ -dimensionalen Raum überführen. Innerhalb dieses sogenannten *performance space* repräsentiert jeder Punkt ein bestimmtes Rhythmuspattern.

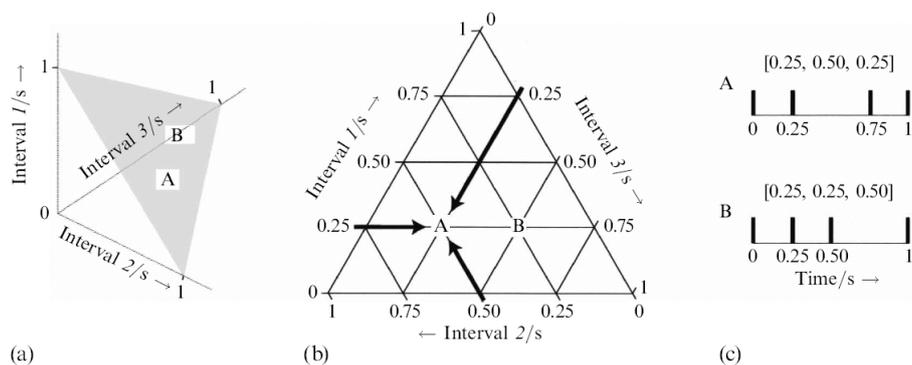


Abbildung 2.17: Dreidimensionale Chronotopic map nach Desain & Honing (2003). Die dreidimensionale „chronotopic map“ mit der Angabe der jeweiligen Intervalldauer von bis zu 1 Sekunde (a), der jeweiligen Position einzelner Pattern innerhalb der Karte (b) und den zwei Beispiel-Pattern A und B (Desain & Honing, 2003, 345).

Die sich daraus ergebende *chronotopic map* kann auf alle erdenkliche Rhythmen mit  $n+1$  Beats (Onsets) zum Vergleich der Stimuli-Pattern mit den tatsächlich wahrgenommenen Pattern herangezogen werden. Abbildung 2.17 zeigt beispielhaft eine chronotopische Karte mit drei Dimensionen und die jeweiligen Punkte für die Pattern A und B.

## 2.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich Rhythmus als mehrdimensionales psychologisches Konstrukt (Bruhn, 2000b, 51) beschreiben. Dabei steht der Puls für Regelmäßigkeit und Strukturierbarkeit, während das Metrum für die Beziehung zwischen Spannung

und Auflösung steht. Eine weitere Dimension sei nach Bruhn das Timing, bei dem es sich zum einen um eine „absichtsvolle und meist systematische Verzerrung von Puls und Metrum“ (Bruhn, 2000b, 51), zum anderen um den Einfluss von Zufallsfehlern (random variations) handele. Bei der Analyse musikalischer Aufzeichnungen hat man es demnach immer mit systematischen, beabsichtigten Veränderungen (z.B. *ritardando* oder *accelerando*) auf der einen und zufälligen Schwankungen (motorische Variabilität) auf der anderen Seite zu tun (Schulze, 2005).

Das beabsichtigte expressive Timing oder Mikrotiming (vgl. Pfeleiderer, 2006, 84-94) wird jedoch erst durch die Bildung von Kategorien wahrnehmbar (Desain & Honing, 2003): Während beide Formen der Information gleichzeitig zur Verfügung stehen, bildet die Funktion der Kategorisierung eine Art Referenz, zu der die relativen Timing-Abweichungen wahrgenommen werden.

Nach Bruhn (dazu Abb. 2.18 auf der nächsten Seite) sind die verschiedenen Dimensionen gemeinsam als Rhythmus auf mehreren Ebenen repräsentiert. Bruhn plädiert dafür, „die Ebenen der kognitiven Informationsverarbeitung nach dem Grad der Bewusstheit zu kategorisieren“ (Bruhn, 2000b, 54). Danach sei die Verarbeitung auf unterster Ebene, auf der die eingehenden Informationen zu auditiven Objekten werden, nicht bewusstseinsfähig. Auf mittlerer Ebene, auf der die auditiven Objekte in Beziehung zueinander und in Beziehung zu bereits dauerhaft repräsentierten Objekten und Ereignissen gebracht werden, seien sie nicht bewusstseinspflichtig, jedoch jederzeit dem Bewusstsein zugänglich (Bruhn, 2000b). Auf höchster Ebene werden danach die bewusstseinspflichtigen Prozesse, wie z.B. Entscheidungen über Handlungsalternativen, verarbeitet.

Die erste Ebene repräsentiert den Bereich, in dem Informationen (z.B. eine Folge rhythmischer Ereignisse) aus der Umwelt mittels Sinnesrezeptoren aufgenommen werden und über Nervenbahnen zur weiteren Verarbeitung an einen nächst höheren Bereich weitergegeben werden. Hierbei kommt es zu Beeinflussungen durch efferente Nervenbahnen: Der Austausch von Aktionspotentialen zwischen den synaptischen Verbindungen führt zu einer Art Auslese der Informationen, da nicht alle Aktionspotentiale weitergeleitet werden. Der dritte Bereich repräsentiert den Abschnitt der Verarbeitung, bei dem gespeichertes Wissen aus dem Gedächtnis mit den eingehenden Informationen abgeglichen und in Beziehung gesetzt wird. Bei den hier besprochenen Verarbeitungsprozessen des Wahrnehmungsapparates geht es im Wesentlichen um die Zuweisung von Bedeutungszusammenhängen. Dabei wird die Information stetig auf ihre Relevanz hin überprüft. Im Falle der Verarbeitung auditiver rhythmischer Ereignisse bewirkt sie zudem eine Stimulierung des motorischen Systems. So führt der geschilderte Verarbeitungsprozess zur Ausführung von zumeist rhythmischen Handlungen als Ausdruck menschlicher Handlungskontrolle.

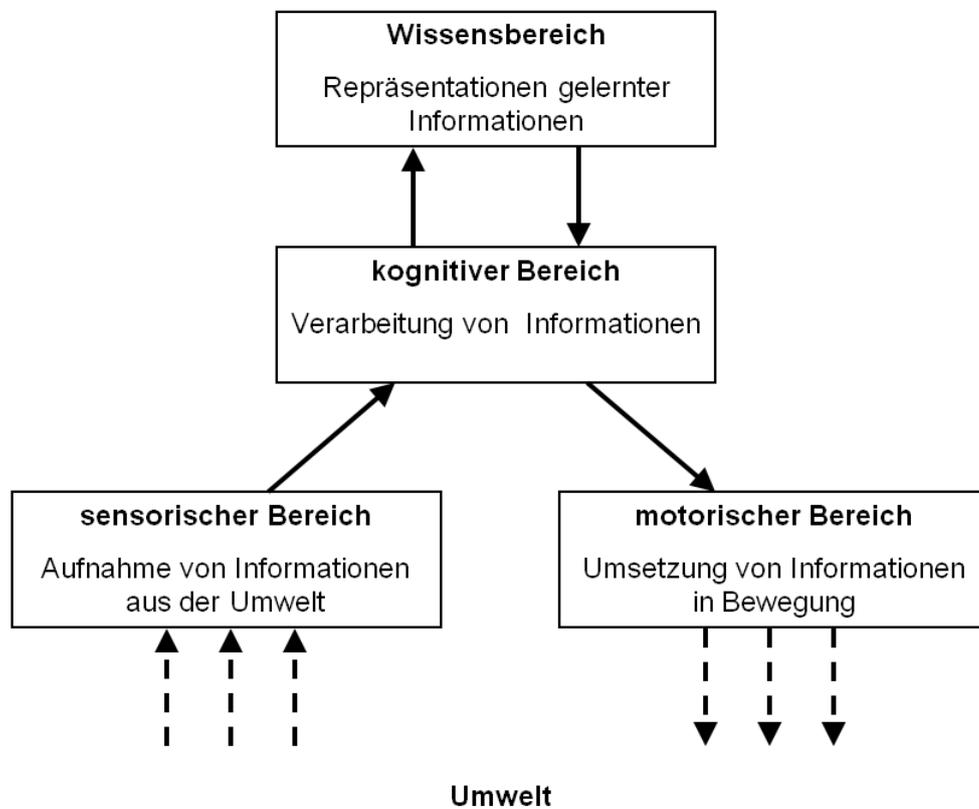


Abbildung 2.18: Hierarchie menschlicher Informationsverarbeitung (nach Bruhn, 1997).



# Kapitel 3

## Rhythmusforschung

Als Teildisziplin der musikwissenschaftlichen Forschung stand die Rhythmik lange Zeit im Schatten der Melodie- und Harmonieforschung. Ebenso wie Riemann (1903) beklagt Motte-Haber (1968) noch Jahrzehnte später die dürftige Literaturlage zum Thema Rhythmus. Ihre Kritik: „Was im eigentlichen eine Systematik der musikalischen Rhythmik betrifft, so ist man heute noch weitgehend auf die aus dem 19. Jahrhundert hervorgewachsenen Ordnungsversuche angewiesen“ (Motte-Haber, 1968, 9). Daran mögen die Studien zur Theorie und Geschichte der musikalischen Rhythmik und Metrik von Apfel und Dahlhaus (1974) auch nicht viel geändert haben. Sie behandeln vornehmlich die systematisch-theoretischen und historischen Gesichtspunkte der musikalischen Rhythmik und Metrik aus der Sicht der traditionellen historischen Musiktheorie und Musikanalyse. Die Musik des 20. Jahrhunderts bleibt in ihren Betrachtungen unberührt. Für einen Überblick verschiedener Rhythmustheorien siehe London (2001), Seidel (1976, 1998) und Pfeleiderer (2006).

Die bestehenden Rhythmustheorien beschränken sich in der Regel darauf, die rhythmische Struktur von Musik anhand der Interpretation des jeweiligen Notenbildes oder eigens entworfener Transkriptionen zu analysieren, weswegen sie nur wenig darüber aussagen können, wie musikalische Rhythmen tatsächlich wahrgenommen werden (Honing, 2002). Lerdahl & Jackendoff (1983) verwenden z.B. „Baumdiagramme“, um die hierarchische Organisation musikalischer Rhythmen zu veranschaulichen, während Yeston (1976) „rhythmische Bewegungsschichten“ verwendet. Petersen (1999) entwickelte eigens eine „Rhythmuspartitur“, die zur Analyse der rhythmischen Eigenschaften eines Musikstückes unterhalb des (originalen) Notentextes erstellt wird. Longuet-Higgins & Steedman (1971) analysierten für ihre Theorie der Rhythmuswahrnehmung ebenfalls nicht die akustische Vorlage, sondern führten ihre Analyse lediglich anhand notierter Musik durch. Dabei sind gerade die Wirkungsphänomene des *erklingenden* Rhythmus und die damit verbundenen physiologischen Bedingungen von besonderem Interesse (vgl. Fischinger & Kopiez (2008).

Erst in jüngerer Zeit wurde der Versuch unternommen, „eine übergreifende Konzeption von Rhythmus und Metrum“ (Pfeleiderer, 2006, 154) unter Berücksichtigung

wahrnehmungspsychologischer Gesichtspunkte und der Hinzunahme von Klanganalysen (einzelner Musikstücke) zu entwickeln. Aufbauend auf den Rhythmustheorien von Lerdahl & Jackendoff (1983), Yeston (1976) und Petersen (1999) stehen bei Pfeleiderer (2006) die „stilanalytischen Untersuchungen ausgewählter Beispiele aus der Geschichte der populären Musik“ im Vordergrund, anhand derer sich das „Wechselspiel von Einfachheit und Komplexität“ (Pfeleiderer, 2006, 330) beschreiben lässt. Zudem sei nach Auffassung von Pfeleiderer der „Zusammenhang von Klanggeschehen, Musikproduktion und Musikrezeption gerade im Falle der populären Musik konstitutiv“, weswegen „musikalische Analysen zugleich in einem sozialgeschichtlichen Fragehorizont der Musikproduktion und -rezeption eingebettet“ sein sollten (Pfeleiderer, 2006, 330). Pfeleiderer (2006) verwendet für seine Analysen hauptsächlich Notentranskriptionen und Spektrogramme der jeweiligen Klangdokumente. Eigene wahrnehmungspsychologische Untersuchungen fehlen. Die Erfahrung dieses rhythmischen Wechselspiels habe nach Gabrielsson (1993) drei unterschiedliche Ebenen:

1. die Ebene, auf der eine kognitiv-strukturelle Erfahrung gemacht wird (s. dazu Kap. 2 auf Seite 21),
2. die Ebene, auf der die Erfahrung von Bewegungsqualitäten vermittelt wird und
3. die Ebene, auf der eine emotionale Qualität erfahren wird.

Neben der ersten Ebene der kognitiv-strukturellen Rhythmuserfahrung, wie sie bereits in Kapitel 2 auf Seite 21 ausführlich behandelt wurde, sei an dieser Stelle nur kurz auf die dritte Ebene des emotionalen Einflusses von Rhythmus eingegangen, um daraufhin die enge Verbindung zwischen Rhythmus und Bewegung zu behandeln.

Musik ruft Emotionen hervor. Zu der Frage, welchen Anteil dabei der Rhythmus übernimmt, führten Gabrielsson & Lindström (2001) eine Metastudie durch, aus der hervorgeht, dass keine allzu eindeutigen Zuordnungen zwischen bestimmten rhythmischen Eigenschaften einer Musik und daran geknüpfte emotionale Reaktionen hergeleitet werden können (vgl. hierzu auch Pfeleiderer, 2006). Aufgrund dessen könne lediglich ein Zusammenhang zwischen Tempo und emotionaler Wirkung als gesichert angesehen werden. Schnelle Tempi werden demzufolge eher mit Aktivität, Aufregung, Heiterkeit, Freude, Überraschung, Ärger und Angst in Zusammenhang gebracht, während ein langsames Tempo zumeist mit Ruhe, Erhabenheit, Empfindlichkeit, Traurigkeit, Langeweile oder auch Ekel assoziiert wird (Gabrielsson & Juslin, 1996; Gabrielsson & Lindström, 2001).

Darüber hat die Wahrnehmung oder Erfahrung von Rhythmus augenscheinlich einen sehr starken (und womöglich direkteren) Einfluss auf den Bewegungssinn. Durch den Rhythmus einer Musik werden unmittelbar sensomotorische Schemata stimuliert, die automatisch spontane körperliche Reaktionen auslösen können. Besonders mitreißende Rhythmen bewirken dabei eine besonders starke Kopplung zwischen auditiver Wahrnehmung und Handlung bzw. zwischen sensorischem Input und

motorischem Output, die den gesamten Körper in Bewegung bringen können. Dieses Phänomen wird im Englischen oft als *"Motor entrainment"*, *"Audiomotor entrainment"* oder schlicht als *"Entrainment"* bezeichnet. Über eine genaue Definition des Begriffs ist man sich jedoch bisher nicht ganz einig (vgl. Clayton et al., 2004).

Der mitreißende Effekt scheint überdies bei besonders lauten Rhythmen durch zusätzliche physiologische Einwirkungen verstärkt zu werden: Ab einem Schallpegel von 90 dB kommen die Schallwellen nicht nur im Gehör, sondern auch im Gleichgewichtsorgan an und können auf diesem Wege unwillkürliche Muskelpotentiale in der Nacken- und Schultermuskulatur hervorrufen (Todd & Cody, 2000; Todd, 2001).

Mithin haben sehr laute Rhythmen (wie z.B. beim Techno) eine sehr mobilisierende Wirkung auf den menschlichen Organismus und fordern rhythmische Bewegungen zur Musik geradezu heraus (vgl. auch Fischinger & Kopiez, 2008).

Das Mitreißende eines Rhythmus bewirkt dadurch oft eine zusätzliche Steigerung der musikalischen Anziehungskraft und führt zu Flow-Erfahrungen (Csikszentmihalyi, 2000), trotz oder gerade wegen der hochgradig stereotypen und sich wiederholenden automatisierten Bewegungen und Handlungen.

Während es in der Musiktheorie wenig Untersuchungen gibt, die sich mit den Hintergründen der Rhythmuswahrnehmung und den zugrunde liegenden Prozessen der Rhythmusproduktion beschäftigen, gibt es innerhalb der (musik-) psychologischen Forschung eine große Fülle an Untersuchungen, die sich dem „Phänomen“ Rhythmus widmen (vgl. Honing, 2002; Spitznagel, 2000).

Auf der Grundlage der experimentellen Psychologie, die ihrerseits bereits auf eine mehr als 140-jährige Geschichte der psychologischen Rhythmusforschung (vgl. Fraise, 1985, 1987; Handel, 1989; Jones & Yee, 1993; Spitznagel, 2000) zurückblicken kann, befasst sie sich mit der Erforschung von Rhythmuswahrnehmung und Rhythmusproduktion. Als „Verbindung zwischen der Musikwissenschaft und der Physik und Physiologie einerseits, der Psychologie und Ästhetik andererseits“ (Revesz, 1946, XI) bewegt sich der musikpsychologische Diskurs dabei auf einem interdisziplinär angelegten Forschungsfeld (vgl. dazu Müller & Aschersleben, 2000), innerhalb dessen „Psychophysik, Zeitwahrnehmung, Gedächtnis, Motorik, Sprachverarbeitung (Planung und Wahrnehmung)“ mal mehr und mal weniger „eigenständige Ziele mit jeweils auch unterschiedlichen historischen Verankerungen“ (Spitznagel, 2000, 2) verfolgen. Einen ausführlichen Überblick „Zur Geschichte der psychologischen Rhythmusforschung“ gibt es bei Spitznagel (2000).

Seit den frühesten psychologischen Untersuchungen zum Rhythmus (vgl. Bolton, 1894) hat sich im Zuge dessen (besonders in den letzten 15 Jahren) ein eigenständiges Forschungsgebiet zu den Grundlagen der Rhythmuswahrnehmung und Rhythmusproduktion herausgebildet (vgl. Desain & Windsor, 2000; Müller & Aschersleben, 2000) (Desain & Windsor, 2000; Müller & Aschersleben, 2000), wie z.B. der in regelmäßigen Abständen stattfindende „*Rhythm Perception and Production Workshop*“ (RPPW) zeigt (dazu Wing & Todd, 2002).

Aus den Workshops der letzten Jahre sind einige Sonderausgaben der Zeit-

schriften *Music Perception* und *Psychological Research* hervorgegangen. Die große Zahl an Veröffentlichungen zum Thema Rhythmus beschäftigt sich dabei meist mit Aspekten der rhythmischen Koordination von Wahrnehmung und Handlung im Allgemeinen, aber im Besonderen auch in musikalischen Zusammenhängen wie z.B. bei Clarke (1999).

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die wahrnehmungsrelevanten Grundlagen bzw. Grenzen der Rhythmusverarbeitung erörtert. Im Anschluss daran sollen die wichtigsten Theorien zur sensomotorischen Koordination rhythmischer Bewegungen besprochen werden.

### 3.1 Grenzen der Wahrnehmung

Die menschliche Wahrnehmung unterliegt Grenzen (vgl. Schulze, 2005, 453). Sie beziehen sich, abhängig von der jeweiligen Sinnesmodalität und den interindividuellen Unterschieden, einerseits auf die „unmittelbar perzeptorische Diskriminierung von Stimuli und deren Merkmale“, andererseits auf „den bewusst werdenden Inhalt der Wahrnehmung und also auf Apperzeption“ (Schneider, 1997, 104). Perzeption meint hier die Gesamtheit der Vorgänge des Wahrnehmens und deren zugrunde liegenden neurophysiologischen Prozesse, während Apperzeption für das Auffassen, Erkennen, Beurteilen und die willentliche Zuwendung der Aufmerksamkeit des Wahrnehmenden steht.

Beim Hören steht jede dieser Grenzen für Anfang bzw. Ende eines Zeitfensters oder markiert eine perzeptive Ordnungsschwelle, die z.B.

1. für die Folge (*succession*) und die Reihenfolge (*order*) von Ereignissen und
2. die Dauer (*duration*) eines Ereignisses oder eines Intervalls zwischen zwei Ereignissen bestimmend ist (Fraisse, 1978).

Dabei ergibt sich für Pöppel die Dauer „aus der Reichhaltigkeit der im Bewusstsein verarbeiteten Ereignisse“ (Pöppel, 1989, 373). Pöppel (1997) fügt den zwei Hauptaspekten Folge und Dauer noch das Erlebnis der Gleichzeitigkeit gegenüber Ungleichzeitigkeit hinzu. Bezogen auf die Wahrnehmung einzelner aufeinanderfolgender Ereignisse beim Hören erscheint alles, was innerhalb von 2-5 ms geschieht, als gleichzeitig. Dies konnte durch Diskriminierungsaufgaben mit sehr kurzen Klickgeräuschen experimentell nachgewiesen werden. Ähnliche Experimente mit visuellen Reizen haben gezeigt, dass das Fenster der Gleichzeitigkeit (die minimale Integrationszeit) bis zu 10 ms andauert. Die Gleichzeitigkeitsschwelle ist demnach modalitätsabhängig und bei auditiven Stimuli am kleinsten (vgl. Grüsser, 1989; Müller, 2000). Das Erlebnis von Gleichzeitigkeit ist demnach relativ, zumal sich die psychologische Gleichzeitigkeit nicht mit der physikalischen Gleichzeitigkeit deckt.

Rasch (1988) konnte durch Untersuchungen zu Timing und Synchronisation beim Musizieren im Ensemble zeigen, dass es immer eine gewisse Asynchronie

beim gemeinsamen Musizieren gibt und nennt die zeitlichen Anfänge (Onsets) der zusammenklingenden Töne: „*quasi-simultaneous*“. Im Mittel lag die Asynchronie bei 30 bis 50 ms zwischen den einzelnen Instrumenten im Ensemble. Liegen die zwei zu unterscheidenden Ereignisse (oder Klänge) zeitlich weiter auseinander, wird zwar gehört, dass es sich um zwei einzelne Ereignisse in der Zeit handelt, doch es kann nicht bestimmt werden, welches der Ereignisse zuerst stattgefunden hat. Erst im Bereich der Ordnungsschwelle ab 20-50 ms zwischen zwei Klicks ist es möglich, eine Folge von Ereignissen zu identifizieren, wobei deren perzeptive Aufeinanderfolge innerhalb des psychologischen Jetzt von dem unterschieden werden muss, was durch Erinnerung konstruiert wird.

Damit zwei Ereignisse innerhalb einer Folge von Beats gut voneinander getrennt wahrnehmbar sind, sollten sie nach London (2002) mindestens 100-120 ms (IOI) auseinander liegen. Noorden & Moelants (1999) geben indes einen Mindestabstand von 200 ms an (siehe auch Repp, 2006, 59).

Die zeitliche Auflösung unseres Wahrnehmungssystems stellt somit neben der begrenzten Auflösung der Intensitätswahrnehmung (Schulze, 2005, 453) und den kapazitären Limitierungen des Gedächtnisses ein entscheidendes Kriterium der Rhythmusverarbeitung dar (vgl. Schulze, 1978, 1989b).

## Psychische Präsenzzeit und Gleichzeitigkeit

Der Begriff „psychische Präsenzzeit“ wurde zunächst durch Stern (1897) geprägt. Danach sei das Erleben der Gegenwart in unserer Wahrnehmung zeitlich begrenzt. Nach Pöppel erfährt das mentale Leben gar eine stete Segmentierung in Zeitfenster von ca. 3 Sekunden Länge (Pöppel, 2004). Die Kontinuität des Denkens werde vom Gehirn demnach in sekundenlange Zeit-Quanten „zerhackt“ (Pöppel, 1989, 373).

Dazu Stern: „Der unmittelbaren Wahrnehmung ist eben ‚Gegenwart‘ etwas Anderes als der logischen Abstraktion, nicht der mathematische Punkt, nicht die bloße Grenze zwischen dem Vergangenen und Kommenden, sondern eine, wenn auch kleine, so doch positive und endliche Zeitstrecke“ (Stern, 1897, 334). Stern nennt die psychische Gegenwart *psychische Präsenzzeit* und unterteilt in

1. ca. 2-3 Sekunden bei visuellen und anderen Sinneswahrnehmungen und
2. ca. 4-7 Sekunden insbesondere bei Ton- bzw. Musikwahrnehmungen.

„Daß vier aufeinanderfolgende Schälle (...) sich unmittelbar als ein bestimmter Rhythmus oder vier aufeinanderfolgende Töne (...) sich als eine bestimmte Melodie darbieten, ist nur dadurch möglich, daß die vier psychischen Vorgänge sich ohne weiteres, ungeachtet ihrer Verschiedenzeitigkeit, zu einem Gesamtbilde vereinigen“ (Stern, 1897, 334). Fernerhin scheint die Fähigkeit zur zeitlichen Projektion „in Bezug auf Tonfolgen besonders entwickelt zu sein, (...) Ehrenfels betonte die Tatsache, daß wir gerade beim Hören von Melodien im Stande sind, den Inhalt einer

besonders großen Zeitstrecke zu einem einheitlichen Bewußtseinsakt zusammenzufassen“ (Stern, 1897, 335). Ohne diese Fähigkeit zur Synthese wäre der Mensch nicht in der Lage, Töne zu hören.

Die Aufnahmekapazität ist nach Stern interindividuell unterschiedlich groß und in zwei Abteilungen zu gliedern:

1. die adäquate Zeit, das für das Individuum angemessene Intervall zur Integration von Ereignissen und
2. die günstigste Zeit, als Bedingung für den Vollzug einer Reihe von Ereignissen.

Während die Angaben von Stern und weiteren Autoren auf Beobachtungen und Spekulationen beruhen, verweist Pöppel (1989) auf physiologisch messbare Ereignisse auf neuronaler Ebene, um seine Theorie der 3-Sekunden-Zeitfenster zu begründen. Danach fügen sich minimale Integrationsfenster (Oszillationen zwischen 30-40 ms) zu größeren Integrationsfenstern von ca. 3 s (vgl. Pöppel, 1989). Ebeling (2008) gibt hingegen an, dass der neuronalen Verarbeitung beim Hören von Tönen einzelne Integrationsfenster von 0,8 ms zugrunde liegen.

In diesem Zusammenhang weist auch Schneider (1997) darauf hin, dass sich die Konzepte der adäquaten Zeit und der psychischen Präsenzzeit bei Stern auf die Apperzeption beziehen und nicht auf die rein perzeptorischen Leistungen. Fraise (1978; 1985) unterscheidet indes die perzeptorische Leistung des maximalen zeitlichen Integrationsfensters von ca. 1,8-2 s (vgl. dazu auch Pressing, 1984), innerhalb dessen zwei einzelne Ereignisse in der Zeit noch als zusammengehörig empfunden werden von einer durch Konzentration und Aufmerksamkeit steuerbaren *perzeptuellen Gegenwart* von ca. 5 s, innerhalb derer ein bestimmtes Maximum an Elementen oder Chunks (vgl. Miller, 1956) erfasst werden kann. Ebenso beziffert auch Block (1990) die Obergrenze der zeitlichen Aufnahmekapazität (psychische Gegenwart) bei ca. 5 s, während Clarke (1999) sogar ca. 3-8 s angibt (vgl. dazu auch Michon, 1978).

Hierbei entspricht die psychische Gegenwart in vielen Darstellungen in etwa dem Arbeitsgedächtnis (s. dazu Abschnitt 5.4 auf Seite 91) und ist somit variabel bzw. abhängig vom Inhalt. Aus dieser Abhängigkeit heraus ist die exakte Dauer der psychischen Gegenwart nur schwer zu ermitteln, weswegen die Angaben erheblich variieren. Dies verwundert nicht, denn aus phänomenologischer Sicht ist die Gegenwart situationsabhängig und im Grunde nicht definierbar (vgl. dazu „*Reduktion und Gleichzeitigkeit*“ bei Bruhn, 1994, 137ff).

Ein Musikstück könne nach Bruhn (1994) „ebenso wie ein Bild oder eine Skulptur in einem einzigen Moment als Ganzes erlebt werden.“ (Bruhn, 1994, 137) Denn während die Aufnahme von Informationen aus der physikalischen Welt „im zeitlichen Nacheinander“ erfolgt, ist „die Wahrnehmung im Bewußstein in der phänomenologischen *Gleichzeitigkeit*.“ (Bruhn, 1994, 138) Danach existiere die Vergan-

genheit sowie Erwartungen für zukünftige Ereignisse in der Gleichzeitigkeit, zum Zeitpunkt des „Jetzt“ als Ergebnis von „Reduktion“.

Reduzieren meint hier „das Zurückführen einer Vielfalt von physikalischen Ereignissen auf eine psychologische Einheit.“ (Bruhn, 1994, 138)

## 3.2 Zeitliche Steuerung sensomotorischer Synchronisation

Die zeitliche Präzision von rhythmischen Bewegungen ist seit Stevens (1886) Gegenstand psychologischer Forschung (z.B. Aschersleben & Prinz, 1995; Dunlap, 1910; Fraisse, 1985; Miyake, 1902; Woodrow, 1932; Repp, 2005). Dabei geht es um die experimentelle Untersuchung kognitiv-motorischer Funktionen, bei denen Versuchspersonen dazu angehalten werden, sich mittels Finger-Tapping möglichst genau zu einer gleichmäßigen (isochronen) Stimulussequenz eines Metronoms oder zu einem Musikstück zu synchronisieren (Dixon & Goebel, 2002; Franek et al., 1987; Snyder & Krumhansl, 2001; Toiviainen & Snyder, 2003). (Für eine ausführliche Beschreibung des experimentellen Paradigmas „Finger-Tapping“ sei hier auf Krampe & Engbert, 2005, 491ff und 520ff verwiesen.)

Obwohl sich die Wahrnehmungsprozesse gemeinhin der unmittelbaren Beobachtung entziehen (Motte-Haber & Rötter, 2004, 55), lassen Zeitreihenanalysen (vgl. Krampe & Engbert, 2005, 493) und die Beobachtung der Bewegungen bei diesen Experimenten Rückschlüsse auf grundlegende Aspekte der Rhythmuswahrnehmung und Rhythmusproduktion zu (für einen Überblick siehe Repp, 2005, 2006).

Die sogenannte sensomotorische Synchronisation wird dabei als eine Form referenziellen Verhaltens verstanden (Pressing, 1999), bei dem sich die zeitliche Koordination von Handlungen an einem vorhersagbaren externen Ereignis (als Referenz) orientiert. Diese Kopplung von Handlungen mit periodischen, externen Ereignissen beim Synchronisationstapping entspricht einer einfachen Form von Timing-Kontrolle und es wird davon ausgegangen, dass die stattfindende Integration von Wahrnehmung und Handlung auch für komplexe koordinative Leistungen wie das Musizieren verantwortlich ist (s. Repp, 2005 und auch Kap. 5 auf Seite 75 „Zur Kopplung von Wahrnehmung und Handlung“).

Sind z.B. die Musikerinnen und Musiker eines Ensembles darauf angewiesen, ihre Handlungen anhand der visuell und auditiv wahrgenommenen Bewegungen ihrer Mitspieler miteinander zu synchronisieren, ist es beim Jazz oder in der Pop- und Rockmusik teils sogar üblich, mit einem Metronom im Ohr („click track“) zu üben. Besonders Schlagzeuger verwenden das Metronom als Referenz beim Üben, aber auch bei Auftritten, um ihr Timing-Verhalten zu verbessern. In seinem Buch „Die Kunst des Rhythmus. Professionelles Know How in Theorie und Praxis“ empfiehlt Peter Giger (1993) die Verwendung eines Metronoms als „Pulsgeber“ zur Verbesserung der rhythmischen Kontrolle (s. dazu „Umgedeutete Metronomschläge“ bei

Giger, 1993, 136).

Wie in Kapitel 2 auf Seite 21 beschrieben, entwickeln sich beim Hören von Musik zeitliche Erwartungen in Form von Pulssequenzen (Jones, 2003), die es ermöglichen, sich zu einer Musik zu synchronisieren. Der extrahierte Puls (vgl. Abschnitt 2.1 auf Seite 24) entspricht hierbei im Grunde der isochronen Pulsationsfolge eines Metronoms.

Oft wird das Tappingverhalten analysiert, um Rückschlüsse über mögliche Verarbeitungsprozesse beim Pulsfinden zu erhalten: Toiviainen & Snyder (2003) nutzten Tappingexperimente, um das Pulsfinden mit Computer-modellierten „*beat induction models*“ (vgl. Scheirer, 1998) zu vergleichen. Dabei geht es nicht nur um die Untersuchung wahrnehmungsrelevanter Aspekte, sondern auch um die Entwicklung von Programmen, die den Rhythmus einer Musik in Echtzeit erfassen, analysieren und antizipieren können (vgl. dazu Pfeleiderer, 2006, 77ff, Schulze, 2005, 473ff und Sethares, 2007). Während dies für den Menschen eine sehr leichte Aufgabe darstellt, fällt es nach wie vor sehr schwer, computergestützte Modelle zu entwickeln, die dazu (in Echtzeit) in der Lage wären (Eck, 2002). Denn der Prozess, bei dem es darum geht Downbeats oder einen Puls zu ermitteln, wird durch eine nicht geringe Anzahl musikimmanenter Aspekte, wie z.B. Harmonie, Melodie und Rhythmus (s. Kap. 2) beeinflusst (vgl. Cooper & Meyer, 1960; Lerdahl & Jackendoff, 1983; Repp, 2005).

Eine Reihe weiterer Experimente vergleicht das Tappingverhalten unter verschiedenen Bedingungen, indem z.B. das Tappingverhalten zu rhythmisch/mechanisch und rhythmisch/expressiv gespielter Musik miteinander verglichen wird (Drake et al., 2000; Repp, 2002). Auf diese Weise kann der Einfluss musikalisch-rhythmischer Strukturen analysiert werden (s. dazu Abschnitt 4.5 auf Seite 70 „Tapping zu Musik“).

Professionelle Musiker führen oft sehr komplexe und automatisierte Bewegungen aus, die jahrelanges Training erfordern (Palmeri, 2002). Die dabei eingesetzten sequenziellen Bewegungen sind meist rhythmisch und setzen sich aus einer Vielzahl von Bewegungsabschnitten zusammen: Während des Lernprozesses werden einzelne (einfache) Bewegungen als Chunks (Miller, 1956) zu Bewegungssequenzen zusammengefasst und neu organisiert. Sehr komplexe Bewegungsbläufe bestehen aus einer Serie von Chunks, die ebenfalls durch Lernprozesse formiert werden. Sakai et al. (2004) nehmen an, dass die Bildung von Chunkmustern durch das Cerebellum gesteuert wird. Automatische Bewegungsprogramme innerhalb der Chunks werden dabei ebenso unterstützt und kontrolliert, wie die nicht-automatischen Bewegungen zwischen den Chunks.

Die Steuerung der Bewegungsprogramme wird wiederum durch *Rhythmusgeneratoren* und *interne Taktgeber* gesteuert, deren Existenz an verschiedenen Stellen des Zentralnervensystems und vor allem im Cerebellum vermutet wird (Ivry & Richardson, 2002; Justus & Ivry, 2001; Lewis & Miall, 2003a,b; Matell & Meck, 2000; Meck & Malapani, 2004; Rao et al., 1997, 2001). Die genaue Beschaffenheit und Lage neuronaler Schaltkreise, die für die Dekodierung und Herstellung zeitlicher Infor-

mationen zuständig sind, ist jedoch noch nicht hinreichend geklärt (Ivry & Spencer, 2004).

Shaffer (1984) nimmt an, dass es eine innere Uhr gibt, die beim Musizieren und der damit verbundenen Koordination von Bewegungssequenzen wirksam wird. Diese Uhr ticke zwar nicht so regelmäßig wie eine richtige Uhr, sei jedoch in der Lage motorische Timinganforderungen mit einer sehr hohen Präzision zu kontrollieren (Shaffer, 1984, 424). Diese interne Uhr sei eine Art Taktgeber, anhand dessen sich die Ausführungsebene des motorischen Systems orientiere (Shaffer, 1982). Studien zum Klavierspiel hätten gezeigt, dass das motorische System komplexe Bewegungsabläufe herstellen kann, die ihre Handlungsziele auf kontrollierte Weise vor oder nach den jeweiligen idealen Zeitpunkten der von der internen Uhr vorgegebenen Zeitpunkte setzen können (Shaffer, 1982, 118).

Neben der Theorie der inneren Uhr von Shaffer (1981, 1982, 1984) wurden etliche weitere konkrete Zeitgeber-Modelle vorgeschlagen (vgl. z.B. Drewing, 2001, 22ff; Rötter, 1996). Für einen aktuellen Überblick sei hier auf Karmarkar & Buonomano (2007) verwiesen.

Im Folgenden sollen die beiden wichtigsten theoretischen Rahmenmodelle vorgestellt werden, die gegenwärtig zur Diskussion stehen (vgl. Krampe et al., 2002; Krampe & Engbert, 2005, 494).

## **Dynamischer Ansatz**

Der *dynamische* Ansatz betrachtet das Gehirn als ein sich selbstorganisierendes, musterbildendes System (Krampe et al., 2002; Krampe & Engbert, 2005). Menschliches Verhalten wird danach durch nichtlineare Wechselwirkungen im Nervensystem spontan generiert. Die Untersuchungen zur Rhythmusproduktion beziehen sich hierbei in der Regel auf die Übergänge qualitativ verschiedener Verhaltensweisen, wie sie z.B. bei Tempoveränderungen zu beobachten sind. Diese qualitativen Übergänge können mit nichtlinearen Gleichungen von gekoppelten Oszillatoren modelliert werden (z.B. Haken et al., 1985, 1996; Kelso & Haken, 1997). Dabei sei nach Turvey (1990) die Dauer einer Bewegung eine Eigenschaft, „die sich aus der Interaktion der nicht näher identifizierbaren, aber als elementar gedachten Systemkomponenten ergibt, und damit eine emergente und implizite Qualität des Systems“ darstellt (Drewing, 2001, 21). Eine Beschreibung des dynamischen Ansatzes bieten z.B. Kelso et al. (1993) und Schöner (2002) und geben zudem eine Einführung in die Grundlagen der Modellierung.

Die dem Rhythmus inhärente zeitlich vorhersagbare Struktur einzelner Ereignisse in der Zeit evozieren rhythmische Erwartungen und erleichtern nicht nur die Steuerung der Aufmerksamkeit bzw. Wahrnehmung beim Hören oder Musizieren, sondern stellt nach Jones (2003) vielmehr eine elementare Grundvoraussetzung dar, die mithilfe adaptiver Oszillatoren modelliert werden kann. Die Nachahmung biologischer Uhren durch adaptive Oszillatoren (Strogatz & Stewart, 1993), die ihre Peri-

ode und Phase zu externen Ereignissen synchronisieren, sind sehr gut für die Modellierung von Synchronisationsprozessen geeignet (vgl. Sethares, 2007). Die meisten jüngeren musiktheoretischen Untersuchungen (vgl. Huron, 2006; London, 2004) beziehen sich infolgedessen auf eine der einflussreichsten Theorien in diesem Bereich: die „*Theorie der dynamischen Aufmerksamkeit*“ von Jones (1976, 1982, 1987); Jones & Boltz (1989); Jones (1990); Jones & Yee (1993); Large & Jones (1999); Jones (2003, 2004).

Das periodische Verhalten oszillatorischer Prozesse im Gehirn steuert unsere Erwartungen in Form einer aktiven zeitlichen Antizipation, wie beim Vorausahnen oder Voraushören der Sekundenschläge einer Uhr (Large & Jones, 1999, 124). Wird ein solcher oszillatorischer Prozess mit einem externen Rhythmus gekoppelt (Phasenkopplung), kann er sich zu diesem Rhythmus synchronisieren (Phänomen gekoppelter Oszillatoren, s. z.B. Strogatz & Stewart, 1993). Abbildung 3.1 zeigt, wie sich das Verhalten eines einzelnen Oszillators in Bezug auf eine Folge von Beats im Laufe der Zeit verändern kann: Je länger sich die Pulsfolge etabliert, desto stärker und fokussierter werden die Erwartungen (zu erkennen an den zunehmend höher und spitzer werdenden Peaks).

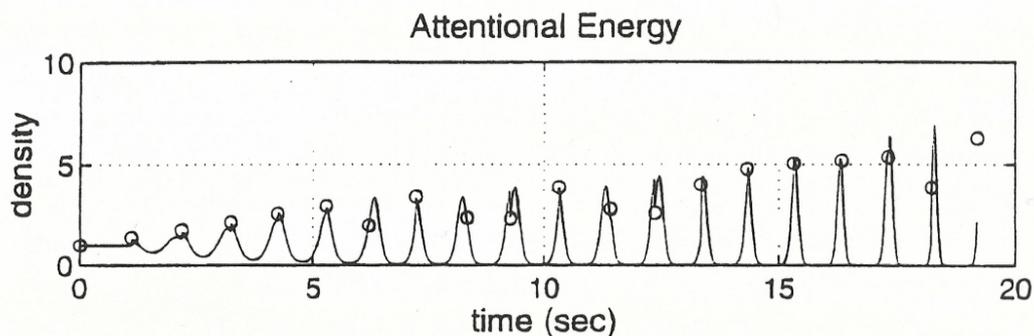


Abbildung 3.1: Entstehung regelmäßiger zeitlicher Erwartungen als Resonanz auf einen regelmäßigen Stimulus (Large & Jones, 1999, 134).

Wie in Abbildung 3.2 auf der nächsten Seite zu sehen, überlagern sich diese oszillatorisch wiederkehrenden Erwartungen verschiedener musikalischer Ebenen zudem abhängig vom jeweiligen metrischen Kontext: Die durch die Viertelnoten hervorgerufenen Oszillationen (*beat level 1*) überlagern sich mit den Oszillationen, die durch die metrischen Erwartungen des  $3/4$  Taktes entstehen (*beat level 2*) und bewirken auf diese Weise eine Betonung (*strong beat*) auf der ersten Zählzeit des Taktes (hier in der Mitte des Diagramms zu sehen).

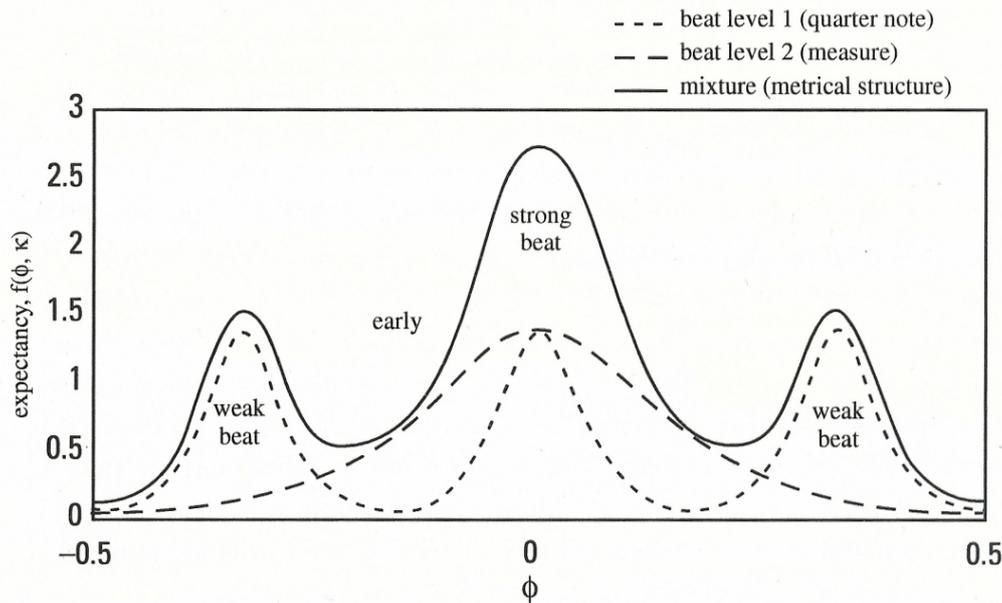


Abbildung 3.2: Darstellung sich überlagernder Erwartungs-Ebenen in einem 3/4-Takt. Überlagerung verschiedener Ebenen (*beat level 1* = Viertelnoten und *beat level 2* = Takt) eines 3/4 Taktes und der daraus resultierenden metrischen Struktur (*mixture*), nach Large & Palmer (2002) aus London (2004, 22).

Weitere dynamische Theorien zur Rhythmuswahrnehmung wurden von Langner (2002); Large & Kolen (1994); Large (2000); Pressing (1998); Toiviainen (1997) entwickelt, während die neuronalen Korrelate rhythmisch-oszillatorischer Erwartungen in jüngster Zeit von Zanto & Large (2006) untersucht wurden.

## Repräsentationaler Ansatz

Der *repräsentationale* Ansatz geht davon aus, dass als Grundlage für die Steuerung von Synchronisationshandlungen die Parameter für die Steuerung einer Bewegung in einem Motorschema (Schmidt, 1975) oder Motorprogramm (Keele et al., 1990) mental repräsentiert werden (vgl. Rosenbaum, 1991, 1998). Wichtige Parameter für die Rhythmusproduktion sind dabei die Abstände zwischen zwei aufeinanderfolgenden Taps (Semjen et al., 2000; Vorberg & Wing, 1994). Als eines der einflussreichsten Modelle gilt das „*clock model*“ von Povel (1981), welches mentale Repräsentationen der Zeitintervalle annimmt, die als eine Art Zeitgeber funktionieren (vgl. auch Large & Jones, 1999). Als Erweiterung dieses Modells haben Povel & Essens (1985) ein (zeit-diskretes) Modell mit mehreren hierarchisch organisierten Zeitgeber-Ebenen entwickelt (vgl. Schulze, 2005, 467ff).

Ebenfalls auf Grundlage des repräsentationalen Ansatzes haben Wing & Kristofferson (1973a,b) ein *Zwei-Prozess-Modell* entwickelt, das zwischen einer zentralen kognitiven Uhr (*central timer*) auf kognitiver Ebene und motorischen Verzögerungen (*motor delays*) bei der Ausführung von Bewegungen unterscheidet (s. Abb. 3.3).

Entsprechende zentrale Zeitgeber-Prozesse werden auf neuronaler Ebene im Kleinhirn vermutet (Hazeltine et al., 1997). Wing & Kristofferson gehen davon aus, dass diese zwei Prozesse einander nicht beeinflussen.

Auf der zentralen Ebene des Zeitgebers werden Intervalle der Länge  $Z$  produziert. Am Ende eines solchen Intervalls beginnt zum einen wieder ein nächstes Intervall und zum anderen wird ein motorisches Kommando ausgelöst, welches dann mit einer Verzögerung  $M$  eine *beobachtbare Reaktion* (Tap bzw. Tastendruck) bewirkt. Das (beobachtete) Intertap-Intervall  $I$  an der Stelle  $j$  (Intertap-Intervall  $I_j$ ) setzt sich aus dem Zeitgeber-Intervall  $Z_j$  und den jeweiligen motorischen Verzögerungen  $M_j$  und  $M_{j-1}$  zusammen:

$$I_j = Z_j + M_j - M_{j-1}.$$

Die Variabilität der Tapping-Intervalle setzt sich aus der Varianz des zentralen Zeitgebers und der Varianz der motorischen Verzögerung zusammen. Benachbarte Intervalle einer beobachteten Tapping-Sequenz sind dabei innerhalb der Voraussagen des Modells statistisch gesehen negativ korreliert (*negative Lag-1 Autokorrelation*).

In umgekehrter Richtung kann der Einfluss zentraler und peripherer Faktoren aus der Autokorrelation berechnet werden. Die Annahmen des Modells werden „im Großen und Ganzen“ durch eine große Anzahl an Studien unterstützt, erscheint jedoch in seiner „Originalinterpretation der Kennwerte nicht perfekt“ (Drewing, 2001, 37). Für einen Überblick zum „Zwei-Prozess-Modell“ sei hier auf Drewing (2001, 35-37) verwiesen.

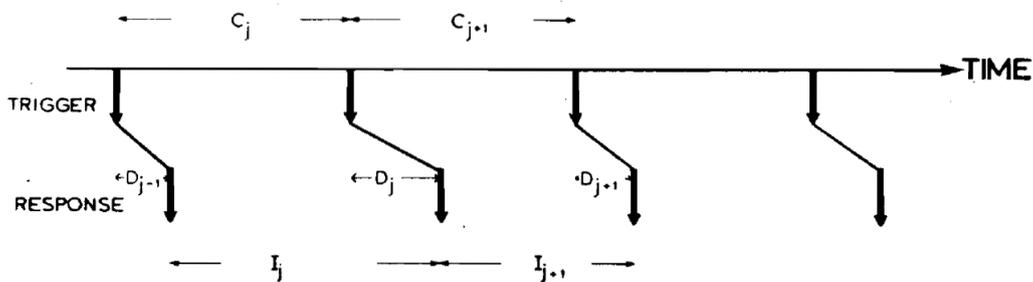


Abbildung 3.3: Grundkonzeption des Zwei-Prozess-Modells  $Z$  = Zeitgeber-Intervall,  $M$  = motorische Verzögerung,  $I$  = beobachtbares Intertap-Intervall (Wing & Kristofferson, 1973a,b).

Das Zwei-Prozess-Modell wird als *Open-Loop-Model* bezeichnet, da es den Einfluss sensorischer oder propriozeptiver Rückkopplungsprozesse (*feedback*) nicht berücksichtigt und somit Fehlerkorrekturen ausschließt.

Darauf aufbauend schlägt Drewing (2001) eine Reformulierung des Zwei-Prozess-Modells vor, da nach seiner Auffassung „ein zusätzlicher Prozess die sensorischen Reafferenzen der Bewegungen auswertet, um die Zeitgeber-Intervalle auf eine adäquate Länge zu *adjustieren*“ (Drewing, 2001, 50). In Abbildung 3.4 ist die „*Reformulierung des Zwei-Prozess-Modells*“ nach Drewing (2001) skizziert

(vgl. dazu auch Semjen, 1996).

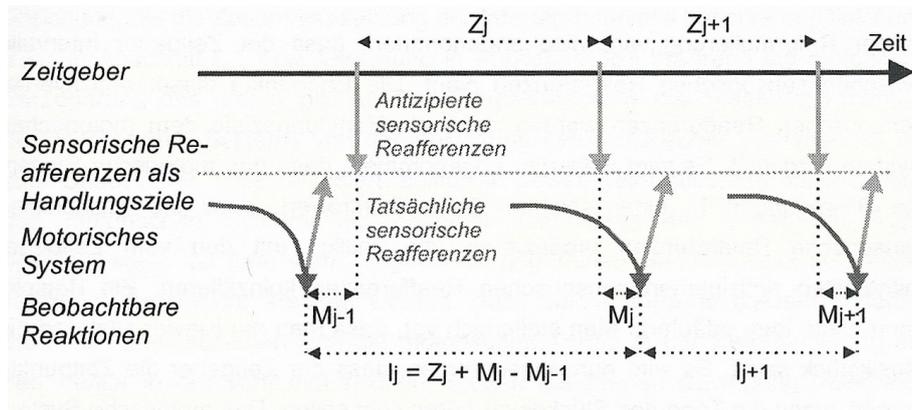


Abbildung 3.4: Skizze einer Reformulierung des Zwei-Prozess-Modells Der Zeitgeber plant die Intervalle zwischen Handlungszielen in Form sensorimotorischer Reafferenzen.  $Z$  = Zeitgeber-Intervall,  $M$  = motorischer Fehler,  $I$  = Intertap-Interval (Drewing, 2001).

Wie das ursprüngliche Modell von Wing & Kristofferson (1973a,b) ist jedoch auch die Reformulierung ein „*Open-Loop-Model*“, „denn die Zeitgeber-Intervalle hängen nicht von den Zeitpunkten der tatsächlichen sensorischen Reafferenzen ab, sondern von den Zeitpunkten *antizipierter sensorischer Reafferenzen*“ (Drewing, 2001, 178).

Zuvor wurde von Vorberg & Wing (1994, 1996) die *Rhythmusprogrammhypothese* vorgeschlagen, die auf einem erweiterten Zwei-Prozess-Modell für das Timing bei bimanuellen Tappingaufgaben von Vorberg & Hambuch (1978, 1984) aufbaut. Durch dieses Modell sei es möglich, nicht nur die rhythmische Synchronisation mittels Fingerbewegungen zu einem Metronom zu erklären, sondern auch die besonderen rhythmisch-musikalischen Timinganforderungen bei Tapping-Aufgaben zu Musik. Das theoretische Modell der Rhythmusprogrammhypothese versucht die musikalischen Gesichtspunkte insofern zu berücksichtigen, indem es verschiedene Zeitgeber über hierarchisch geordnete Ebenen im Sinne der rhythmisch-hierarchischen Ebenen der jeweiligen Musik Lerdahl & Jackendoff (1983) unterstellt. Im Unterschied zu Wing & Kristofferson (1973b,a) gehen die Autoren hier nicht mehr von einer zentralen „Multifunktionsuhr“ aus, die beliebig umprogrammierbar ist, sondern nehmen das Konzept der stochastischen Zeitgeber (*timekeeper*) von Vorberg & Hambuch (1984) auf, wonach es ganze Sets von Zeitgebern gebe, die jeweils spezifische Verzögerungen (*delays*) repräsentieren und nach dem Prinzip von Eieruhren auf einen bestimmten Zielwert eingestellt werden können.

Dieses *Closed-Loop-Model* erlaubt außerdem die Integration von Korrekturmechanismen, die durch Feedback hervorgerufen werden (Rosenbaum, 1991). Das Prinzip der stochastischen Zeitgeber wurde in diesem Modell durch die Auswechslung der Zeitgebervariable  $T$  durch eine neue Variable  $T^*$  mit einem linearen Fehlerkorrekturprozess verknüpft:

$T^* = T - \alpha A$ . Die Variable  $T^*$  wird dabei proportional zu dem Wert der vorangegangenen Asynchronie  $A$  verringert (vgl. Vorberg & Wing, 1994, 1996).

Man unterscheidet hier die *Phasenkorrektur*, bei der die Schwankungen der Schwingungsphase zwischen dem Metronom und den Taps korrigiert werden, von der *Periodenkorrektur*, bei der die Intervalldauer des Zeitgebers an das Metronomtempo angepasst wird (vgl. dazu Repp, 1999b, 2000, 2005, 2006; Semjen et al., 1998, 2000; Thaut et al., 1998a,b; Vorberg & Schulze, 2002). Repp (2005) nimmt zudem an, dass diese zwei Fehler-Korrektur-Prozesse auf unterschiedliche Weise gesteuert werden. So sei die Phasenkorrektur auf eine weitestgehend automatisierte und eher unterbewusste Steuerung zurückzuführen, während die Periodenanpassungen hauptsächlich durch eine eher bewusste kognitive Prozedur kontrolliert werden (Repp, 2005, 987).

Thaut (2005) kritisiert indes die Annahme eines derartigen Fehler-Korrektur-Modells, da die Unterscheidung zwischen einer Perioden- und Phasenkorrektur nur durch die Anwendung von Rechenmodellen ableitbar seien, die noch dazu nur unter bestimmten Voraussetzungen funktionieren. Die zwei verschiedenen Korrekturformen können nämlich nur herausgerechnet werden, wenn die Tappingsequenzen eine klassische *negative Lag-1 Autokorrelation* aufweisen. Eine solche sei bei rhythmisch gruppierten Tappingintervallen jedoch nicht zu beobachten, wie neben Thaut (2005) auch Vorberg & Hambuch (1978, 1984) nachweisen konnten (vgl. dazu auch Krampe & Engbert, 2005, 497).

### 3.3 Zusammenfassung und Diskussion

Nur wenige musiktheoretische Untersuchungen befassen sich auch mit den psychologischen Grundlagen der Rhythmuswahrnehmung, während es in der Psychologie eine kaum zu überblickende Anzahl an Literatur zum Thema Rhythmus gibt (Honing, 2002). Die Wahrnehmung von Rhythmus unterliegt unterschiedlichen perceptuellen Grenzen, wobei insbesondere die sogenannte psychische Präsenzzeit ein wichtiges wahrnehmungsrelevantes Ordnungskriterium darstellt (vgl. Abschnitt 3.1 auf Seite 49).

Eine Vielzahl an Untersuchungen beschäftigt sich mit den wahrnehmungspsychologischen und kognitiv-motorischen Grundlagen der Rhythmusverarbeitung mithilfe von Synchronisationsexperimenten. Die sensomotorische Koordination und zeitliche Steuerung periodischer Bewegungen (z.B. Mitklopfen zu einem Metronom) ist dabei von mentalen Zeitgeberprozessen oder oszillatorischen Anpassungsprozessen abhängig, deren genaue Funktionsweisen jedoch noch nicht vollends geklärt sind. Vielmehr spiegelt der aktuelle Diskurs zwei divergierende Ansätze zur Erklärung der zugrunde liegenden Prozesse bei der Rhythmusverarbeitung wider (vgl. Beek et al., 2000; Krampe et al., 2002):

Die Vertreter dynamischer Modelle lehnen die Annahme einer „inneren Uhr“

grundsätzlich ab. Sie verweisen darauf, dass kognitive Repräsentationen als Erklärung für die Rhythmusproduktion, welche die Komplexität und Abstraktheit eines Rhythmusprogramms erreichen können, unwahrscheinlich sind. Zwar seien die linearen Modelle z.B. von Wing & Kristofferson (1973a,b) sehr gut entwickelt, doch seien sie schlussendlich nicht in der Lage, die zugrunde liegenden Verarbeitungsprozesse des Musizierens hinreichend zu erklären (Jones & Boltz, 1989), denn die fixierte Struktur der Uhrenmodelle sei nicht robust genug, um mit kleinen (Timing-)Abweichungen innerhalb rhythmischer Pattern umzugehen. Nichtlineare Modelle seien hingegen zwar weniger kompliziert, jedoch viel besser geeignet, komplexe motorische Handlungen zu simulieren (Large & Jones, 1999). Thaut (2005) betont in diesem Zusammenhang, dass insbesondere für den repräsentationalen Ansatz gilt, dass die Dynamik musikalischer Synchronisation nicht allein durch einfache mathematisch-statistische Modelle erfasst oder erklärt werden könne (Thaut, 2005, 57).

Die Vertreter des repräsentationalen Ansatzes sehen den Nachteil nichtlinearer dynamischer Modelle darin, dass sie zunächst von einer „*black-box*“ ausgehen und gar nicht erst versuchen, die zugrunde liegenden Prozesse zu erklären. Darüber hinaus spielen Wissensrepräsentationen (z.B. in Form von musikalisch relevanten Vorwissen) in den dynamischen Modellen bisher nur eine untergeordnete Rolle. Krampe et al. (2002) beklagen, dass die Autoren der einzelnen Ansätze nicht aufeinander Bezug nehmen und bisher nur sehr wenige Modelle entwickelt wurden, in denen beide Ansätze wie bei Pressing (1998, 1999) konzeptuell integriert erscheinen.

Für die Rhythmusproduktion in musikalischen Zusammenhängen darf angenommen werden, dass die Bewegungen diskrete Ereignisse darstellen, die eindeutig bestimmbare zeitliche Abstände aufweisen, wie z.B. das Anschlagen einer Klaviertaste oder der Schlag auf eine Trommel. Nach Semjen (2002) geht es dabei um ein Zielen auf Zeitpunkte, wobei Handlungsziele definiert und mental repräsentiert werden. Es ist anzunehmen, dass beide Ansätze jeweils geeignet sind, zumindest bestimmte (Teil-)Aspekte der sensomotorischen Synchronisation zu erklären, da sie womöglich auch auf unterschiedliche neuronale Verarbeitungsprozesse zurückzuführen sind (Repp, 2005, 970). So deuten sich „vielversprechende Perspektiven für eine Integration stochastischer Zeitgebermodelle mit ihren repräsentationalen Aspekten und nichtlinearer Modelle an“, wie Krampe & Engbert (2005, 527) ausdrücklich betonen.



# Kapitel 4

## Der negative Synchronisationsfehler

Die Synchronisation zu einem Metronom ist für Versuchspersonen im Normalfall keine schwierige Aufgabe. Dennoch ist ein systematischer Fehler zu beobachten: Die Taps der Versuchspersonen (s. Abb. 4.1) erfolgen im Durchschnitt zwischen 20-80 Millisekunden (ms) vor dem Führungston des Metronoms, wie sich in einer Vielzahl von Studien bestätigen ließ (Aschersleben & Prinz, 1995; Aschersleben, 2000; Dunlap, 1910; Franek et al., 1994; Johnson, 1898; Mates et al., 1994; Miyake, 1902; Woodrow, 1932).

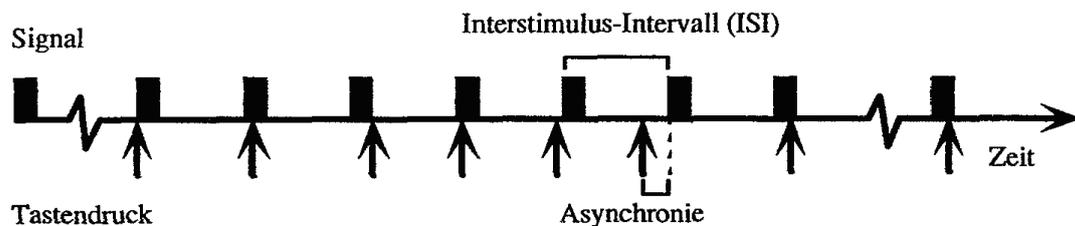


Abbildung 4.1: Illustration der Synchronisationsaufgabe und der negativen Asynchronie Aschersleben, 2000, 139.

Bei Synchronisationsaufgaben zu einem Metronom mit einer Folge isochroner Inter-(Stimulus)-Onset-Intervalle (IOI) der Dauer  $T$  werden sowohl die Inter-Reaktions-Intervalle (IRI)  $I_i$  der Taps in ms genau gemessen, als auch der Synchronisationsfehler (tapping error)  $e_i$ . Der Synchronisationsfehler  $e_i$  ergibt sich aus der Zeit zwischen der gemessenen Reaktionszeit  $R_i$  und dem Metronomschlag  $S_i$ . Daraus folgt:  $e_i = R_i - S_i$ , während  $I_i$  die Zeit zwischen den einzelnen Taps  $R_i$  also  $I_i = R_{i+1} - R_i$  darstellen (Chen et al., 1997).

Abbildung 4.2 auf der nächsten Seite verdeutlicht, dass  $I_i$  und  $e_i$  abhängige Variablen darstellen:

$$\begin{cases} I_i = T + e_{i+1} - e_i, \\ e_i = e_0 + \sum_{k=0}^i (I_{k-1} - T). \end{cases}$$

Das Phänomen des negativen Synchronisationsfehlers zeigt, dass die Versuchspersonen nicht einfach nur dem Führungston Schlag für Schlag zu folgen versuchen und ihm hinterher-tappen, sondern einer intern vorgegebenen Motorsequenz eines (zentralen) Zeitgebers (s. Abschnitt 3.2 auf Seite 51) zu folgen scheinen, die sich zwar an dem externen Metronom orientiert, aber eigenständig läuft. Dabei merken die Versuchspersonen meistens nichts von dem Zeitunterschied zwischen dem Metronomschlag  $S_i$  und ihrem Tap  $R_i$ . Der Synchronisationsfehler  $e_i$  beziffert damit die zeitliche Differenz zwischen der bewusst wahrgenommenen kognitiven Synchronizität und der physikalisch messbaren Synchronizität. Die Synchronisation zu einem Metronom stellt somit keine klassische Reaktionsaufgabe dar (vgl. Krampe & Engbert, 2005).

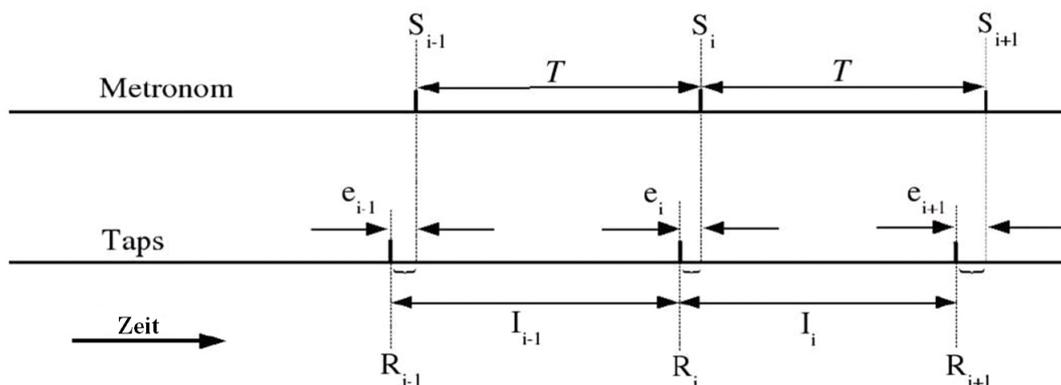


Abbildung 4.2: Definition des Synchronisationsfehlers  $e_i$  und des Inter-Reaktions-Intervalls (IRI)  $I_i$  nach Chen et al. (1997).

Die möglichen Ursachen für den negativen Synchronisationsfehler sind bisher nicht hinreichend geklärt und werden nach wie vor kontrovers diskutiert (Aschersleben, 2000, 155). Im Folgenden sollen nun die prominentesten Erklärungsansätze vorgestellt werden (für einen Überblick s. auch Aschersleben, 2002 und Repp, 2005).

## 4.1 Perceptual-Center-Hypothese

Die P-Center-Hypothese geht davon aus, dass der negative Synchronisationsfehler durch die Art der verwendeten Stimuli hervorgerufen oder zumindest durch sie beeinflusst wird. Abhängig vom Einschwingvorgang und der Dauer eines Klicks sind

die physikalischen Anfänge (Onsets) der Stimuli meist nicht identisch mit den tatsächlich wahrgenommenen Onsets. Deswegen wird angenommen, dass nicht die einzelnen Onsets der Taps mit denen der Führungstöne synchronisiert werden, sondern mit den sogenannten P-Centern (vgl. Aschersleben, 2000). Das P steht hier für *perceptual*, womit der Zeitpunkt gemeint ist, an dem der Onset eines Tones wahrgenommen wird (Morton et al., 1976). Abhängig vom Einschwingvorgang weicht dieser zumeist vom physikalischen Onset ab (vgl. dazu Pompino-Marshall, 1989; Scott, 1998; Vos & Rasch, 1981; Zwicker & Fastl, 1999), denn das P-Center kann durch die Art des Einschwingvorgangs und die Dauer des jeweiligen Stimulus verschoben werden. Je länger der Stimulus (samt Einschwingvorgang) sind, desto geringer ist in der Regel der negative Synchronisationsfehler (Vos et al., 1995). Die Zeitpunkte für den physikalischen und den wahrgenommenen Anfang eines Klicks können dabei (abhängig von der Form des Einschwingvorgangs und der Dauer) relativ weit auseinander liegen (s. Abb. 4.1): bei f) ist  $\Delta t = 60$  ms während bei h)  $\Delta t = 0$  ist. Daraus folgt, dass bei Tappingexperimenten lediglich extrem kurze Klänge mit steiler Einschwingkurve verwendet werden sollten, um reliable Messungen im Millisekundenbereich zu erhalten.

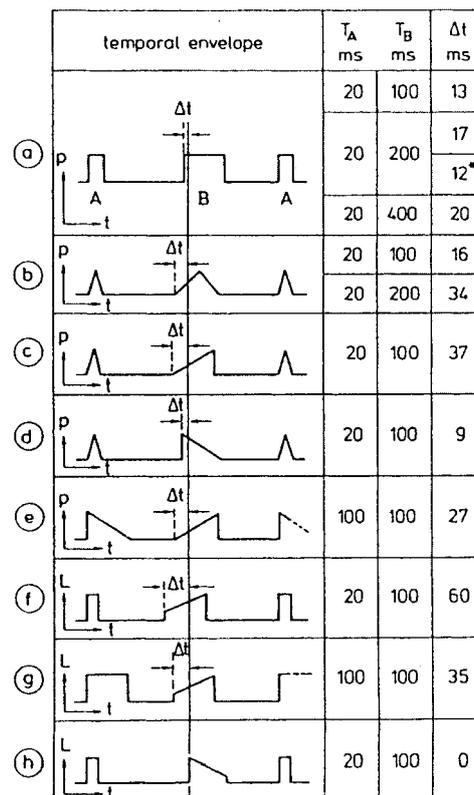


Tabelle 4.1: Differenzen zwischen dem jeweils physikalischen Beginn eines Klicks und seiner Wahrnehmung aus einem Einschwingungsexperiment von Zwicker und Fastl (1999).

Bei lang einschwingenden Klängen verschiebt sich das P-Center erheblich und

führt zu einer Abnahme des negativen Synchronisationsfehlers oder gar zu einem positiven Synchronisationsfehler, wie die Untersuchungen von Toiviainen & Snyder (2003) zeigen. In ihrer Studie „Tapping to Bach: Resonance-based modeling of pulse“ ermittelten die Autoren einen mittleren positiven Synchronisationsfehler von 16 ms bei einem Inter-Beat-Intervall (IBI) von 800 ms.

Das Auftreten eines positiven Synchronisationsfehlers widerspricht somit den eingangs erwähnten Tappingstudien (s. Kap. 4 auf Seite 61), entspräche jedoch den Ergebnissen aus Studien mit Tapping zu Musik (Snyder & Krumhansl, 2001) oder Tapping zu Pattern, die komplexer sind als die isochronen Intervallsequenzen eines Metronoms (Wohlschläger & Koch, 2000). Eine weitere Erklärung für die durchweg verspäteten Taps sehen die Autoren in folgendem Umstand begründet: „Another factor besides pattern complexity that could affect tap delay is the instrument timbre, which in this case was an organ with onsets less sharp than typical laboratory sine tones.“ (Toiviainen & Snyder, 2003, 61) Neben dem Einschwingvorgang sei hier mit hoher Wahrscheinlichkeit auch die Länge der als Stimulus verwendeten Orgelklänge als ein erheblicher Einfluss auf das gemessene Tappingverhalten zu werten.

Aus Studien von Rasch (1979; 1988) ist bekannt, dass bei langen Einschwingzeiten, wie sie z.B. bei Streichinstrumenten auftreten, asynchrone bzw. ungenaue Einsätze nicht so sehr ins Gewicht fallen, während Ungenauigkeiten beim Zusammenspiel von Musikinstrumenten mit kurzen Einschwingzeiten viel eher bemerkt werden. Die Länge bzw. Dauer des Führungstons bei Tappingexperimenten hat demnach auch erheblichen Einfluss auf das Synchronisationsverhalten, wie dies Wohlschläger & Koch (2000) betonen.

Für Tappingexperimente werden aus den oben genannten Gründen daher in der Regel perkussive, scharf einschwingende Klänge als Stimuli verwendet, um eine höchst mögliche Deckungsgleichheit des physikalischen und des perzeptionellen Onsets zu gewährleisten.

Trägt die P-Center-Hypothese kaum etwas zur Klärung des negativen Synchronisationsfehlers bei (s. Abschnitt 4.5 auf Seite 70), so macht sie doch mehr als deutlich, dass die Art und Form der Stimuli einen entscheidenden Einflussfaktor darstellen.

## 4.2 Nervenleithypothese

Das nachfolgende Erklärungsmodell basiert auf zwei Grundannahmen: Es geht davon aus, dass

1. die Synchronisation von Ton und Tastendruck im Gehirn stattfindet und
2. die zentrale Repräsentation des Tastendrucks aus der somatosensorischen Rückmeldung (Feedback) der Fingerbewegung (Propriozeption) und vor allem aber aus der Rückmeldung der Tastenberührung (taktiles Feedback) hervorgeht.

Bei der Nervenleit- oder Paillard-Fraisse-Hypothese (Fraisse, 1980; Paillard, 1949; Prinz, 1992) wird davon ausgegangen, dass der negative Synchronisationsfehler infolge verschiedener peripherer Übertragungszeiten zustande kommt (Aschersleben & Prinz, 1995; Aschersleben, 2000). Das taktile, kinästhetische Signal brauche aus der Berührung der Taste länger zur zentralen Verarbeitung im Gehirn als das akustische Signal des Metronoms. Die Berührung der Taste müsste demnach auch früher stattfinden, wenn die beiden Ereignisse auf zentraler Ebene als simultan empfunden werden sollen (s. Abb. 4.3).

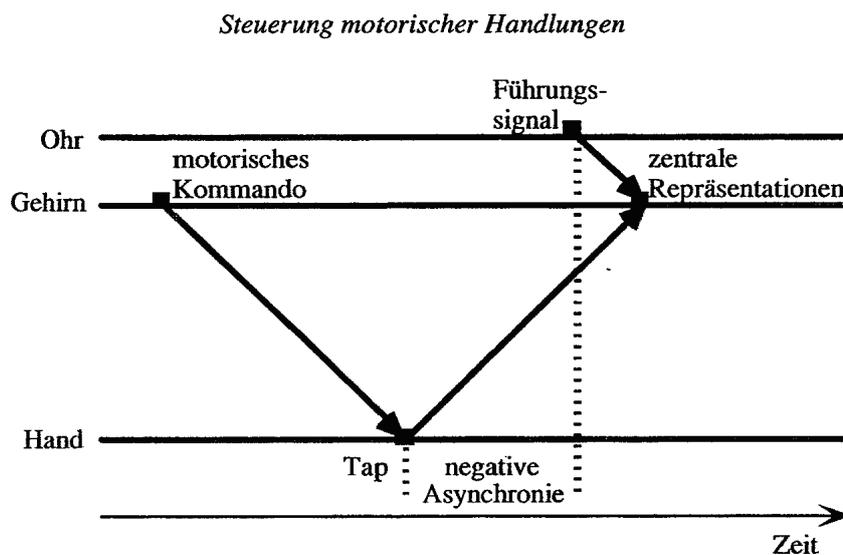


Abbildung 4.3: Illustration der Nervenleithypothese (nach Prinz, 1992, in: Aschersleben, 2000, 143).

So sei nach Aschersleben (2000) auch zu erklären, wie die Effekte bei verspätetem, akustischem Feedback zustande kommen. Es sei folgerichtig, dass die negative Asynchronie bei Synchronisationsaufgaben mit Fuß-Tapping aufgrund der längeren Nervenbahnen zwischen Fuß und Gehirn größer sein müsse als bei gleichem Versuchsaufbau mit Hand-Tappings.

Durch eine Verzögerung des akustischen Feedbacks nimmt die negative Asynchronie zu, vorausgesetzt, die Versuchspersonen bemerken die Verzögerung nicht.

Die Nervenleithypothese liefert jedoch keine plausible Erklärung dafür, warum z.B. Schlagzeugstudierende einen geringeren oder keinen negativen Synchronisationsfehler zeigen (Fischer, 2003). Zudem ist die jeweils genaue biophysikalische Nervenleitgeschwindigkeit nicht annähernd so genau oder gleichbleibend schnell, wie sie im Rahmen dieses Modells sein müsste (Thaut, 2005, 45). Die Nervenleitgeschwindigkeit ist nur schwer zu ermitteln.

Einer der schwerwiegendsten Einwände gegen die Nervenleithypothese liefert indes die Beobachtung, dass der Synchronisationsfehler vom Tempo des Führungssignals abhängig ist. Ausgehend von einer konstanten Nervenleitgeschwindigkeit

müsste der Synchronisationsfehler auch bei unterschiedlichen Tempi konstant bleiben. Das Gegenteil ist jedoch der Fall: Der negative Synchronisationsfehler wird umso geringer, je höher die Geschwindigkeit des Führungssignals ist (Mates et al., 1994; Peters, 1989; Pressing, 1999; Repp, 2003; Semjen et al., 1998, 2000). Hier soll nicht unerwähnt bleiben, dass die Vertreter der Nervenleithypothese fast ausschließlich nur ein bestimmtes Tempo (IOI = 800 ms) für ihre Untersuchungen verwenden.

### 4.3 Schwellenwertmodell

Beim Schwellenwertmodell wird davon ausgegangen, dass die Dichte der neuronalen afferenten Signale den Synchronisationsfehler beeinflussen (Aschersleben, 2000), wobei auch hier, wie bei der Nervenleithypothese, die zentrale Repräsentation von Tastendruck und Führungssignal (Stimulus-Klang) im Gehirn als Grundannahme vorangestellt wird (s. Kap. 4.2 auf Seite 64).

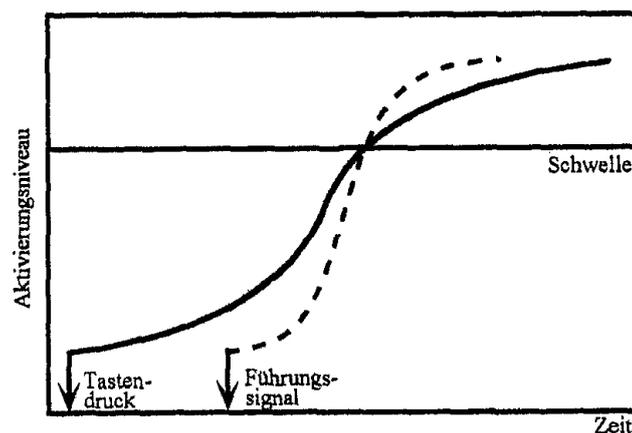


Abbildung 4.4: Illustration der Schwellenwerthypothese (nach Gehrke, 1996, in: Aschersleben, 2000, 146).

Vermutet wird, dass die akustischen Signale schneller akkumuliert werden als die taktilen und kinästhetischen, weswegen wie bei der Nervenleithypothese die Taps früher stattfinden müssten, damit sie als simultan empfunden werden. Diese These wird von Forschungsergebnissen gestützt, die besagen, dass stärkere bzw. intensivere Taps zu einer Reduzierung der negativen Asynchronie führen sollen, wohingegen die Elimination der internen taktilen Rückmeldung durch Lokalanästhesie zu einer Vergrößerung der negativen Asynchronie führen (vgl. Aschersleben et al., 2000).

Die Untersuchungen zur Beweisführung der Schwellenwerthypothese demonstrieren nach Auffassung von Aschersleben (2000) die wichtige Rolle der taktilen Rückmeldung bei der zeitlichen Steuerung der Synchronisationshandlungen. Doch werden diese Schlussfolgerungen von Wohlschläger & Koch (2000) in Frage gestellt. So konnte bei Synchronisationsexperimenten mit Personen, die taub waren

und gestörte Nervenfasern hatten, nachgewiesen werden, dass sie auch ohne ein sensorisches oder akustisches Feedback in der Lage waren, sich mit einem Metronom zu synchronisieren, während sie die gleiche negative Asynchronie zeigten wie die Versuchspersonen der Kontrollgruppe. Bei den Messungen von Gehrke (1996) wurde aus der jeweiligen Anschlagsamplitude auf die Anschlagsstärke geschlossen. Dies scheint ebenfalls nicht unbedingt plausibel. Vielmehr ist zu vermuten, dass nicht das taktile Feedback allein, sondern die größere Bewegung und das damit verbundene stärkere propriozeptionelle Feedback einen Einfluss ausüben.

## 4.4 Zeitschätzungsfehler

Wohlschläger & Koch (2000) verfolgen einen gänzlich anderen Ansatz, den negativen Synchronisationsfehler zu erklären, indem sie davon ausgehen, dass der Synchronisationsfehler aufgrund eines internen Zeitschätzungsfehlers hervorgerufen wird.

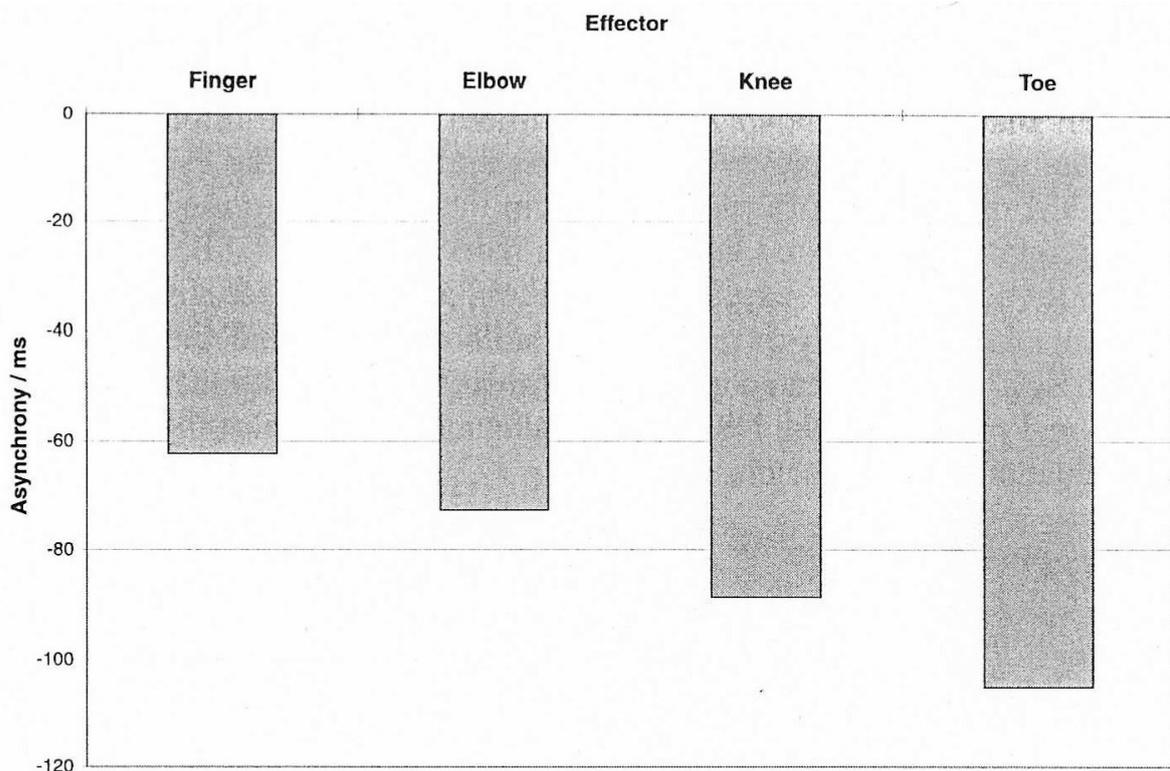


Abbildung 4.5: Durchschnittlicher Synchronisationsfehler bei vier verschiedenen Effektoren (Wohlschläger & Koch, 2000).

Ausgehend von dem repräsentationalen Erklärungsmodell der Nervenleithypothese sollte der Synchronisationsfehler davon abhängig sein, wie lang die Nervenbahn von einem Effektor (z.B. vom Finger oder Fuß) zum Gehirn ist. Für das Schwellenwertmodell hingegen sollte aufgrund der unterschiedlichen Rezeptordichte der

Haut an den vier verschiedenen Effektoren Hand, Ellenbogen, Knie und Fuß herauskommen, dass Tappings mit dem Knie und dem Ellenbogen zu einem relativ hohen Synchronisationsfehler führen und Tappings mit dem Fuß oder Finger im Vergleich einen geringeren Synchronisationsfehler aufweisen.

Die Studien von Wohlschläger & Koch (2000) widersprechen beiden Erklärungen. Abbildung 4.5 auf der vorherigen Seite zeigt dazu die durchschnittlichen Synchronisationsfehler bei Ausführung mit verschiedenen Effektoren.

Des Weiteren haben die Autoren nachweisen können, dass der Synchronisationsfehler geringer wird, wenn die Versuchspersonen Zwischentaps („in-between taps“) ausführen, wodurch scheinbar die Zeitschätzungen für die Taps vereinfacht bzw. genauer werden (s. dazu Abb. 4.6 auf der nächsten Seite).

Die Ergebnisse von Wohlschläger & Koch (2000) bestätigen die Vermutung, dass Synchronisationsaufgaben mit Tapping-Tasks sehr stark abhängig sind von der Struktur der IOIs. Wird das IOI durch Körperbewegungen unterteilt, wie z.B. bei Zwischentaps ohne Berührung des Tapping-Pads, nimmt der Synchronisationsfehler signifikant ab. Gleiches konnte in Vergleichsexperimenten mit Tappings zu Musik oder Tappings zu einem Metronom belegt werden. Es ergab sich ein reduzierter Synchronisationsfehler für die Fälle, bei denen zu Musik getappt wurde im Vergleich zur Synchronisation mit den Klicks eines Metronoms. Daraus folgern Snyder & Krumhansl, dass man beim Tapping zu Musik, welche zwischen den einzelnen Beats eines Pulses weitere Noten beinhaltet, die Beobachtung eines negativen Synchronisationsfehler nicht erwarten dürfe. (Snyder & Krumhansl, 2001)

Je kleiner also ein leeres IOI ist, desto geringer ist auch der Synchronisationsfehler oder die negative Asynchronie. Die dargestellten Argumente und Untersuchungsergebnisse weisen nach Auffassung der Autoren darauf hin, dass ihr Ansatz die oben genannten Einflussfaktoren besser erklären kann, da sie nicht von einem Cartesianischen Theater im Kopf ausgehen, wie es die repräsentationalen Ansätze nahe legen. Nach Dennett & Kinsbourne (1992) seien derartige zeitlich eingeschränkte Informationsverarbeitungsprozesse nicht durch einen sogenannten zentralen Beobachter zu erklären. In der Vergangenheit ist immer wieder versucht worden, das Bewusstsein des Menschen an einem bestimmten (zentralen) Ort im Gehirn zu lokalisieren. Descartes vermutete z.B. das Bewusstsein als zentrale Einheit in der Zirbeldrüse (Epi-physe). Dennett (1994) beschreibt sehr ausführlich, warum ein solches Cartesianisches Theater im Kopf nicht angenommen werden darf. Bei Roth (1996) finden sich dazu die neurobiologischen Grundlagen für die kognitiven Bedingungen im Gehirn.

Die dargestellte Hypothese bleibt in ihren Grundzügen jedoch zu allgemein, da die Autoren keine weiterführenden Modellbildungen oder Begründungen des Zeitschätzungsfehlers anführen. Zudem wird die Behauptung, der negative Synchronisationsfehler sei ein Artefakt der künstlichen Laborbedingungen, nur sehr geringfügig durch Daten gestützt. Ähnlich wie bei den zuvor besprochenen Modellen, gibt es keine hinreichende (plausible) Begründung für die Ursache des negativen Synchronisationsfehlers. Die angeführten Untersuchungsergebnisse belegen im Grunde

lediglich die jeweiligen Einflussfaktoren auf den Synchronisationsfehler.

Die Verminderung des Zeitschätzungsfehlers durch Inter-Tap-Intervalle bzw. Strukturierung langer z.B. musikalischer Intervalle durch Bewegungen ist bei Schlagzeugern und Schlagwerkern in Orchestern durchaus zu beobachten. Um eine höhere Timing-Präzision zu erreichen, werden (längere) Intervalle quantisiert und durch oft sehr stereotype automatisiert-repetitive Körperbewegungen repräsentiert, wobei Perkussionisten möglicherweise besondere Techniken zur Strukturierung der Intervalle entwickelt haben (vgl. Wohlschläger & Koch, 2000, 125).

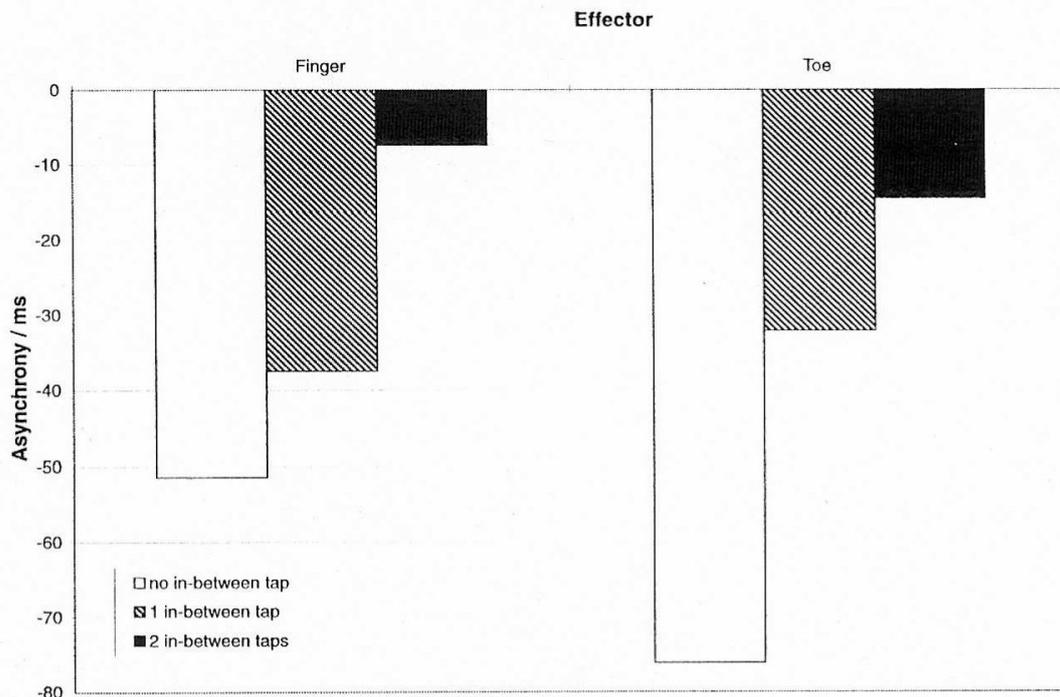


Abbildung 4.6: Darstellung des durchschnittlichen Synchronisationsfehlers für Finger und Fußzehen, die entweder keinen, einen oder zwei jeweils kontaktfreie Zwischentaps machen (Wohlschläger & Koch, 2000).

Hierin liegt ein Vorteil der von Wohlschläger & Koch (2000) vertretenen These bezüglich der Beantwortung der Frage nach den Einflussfaktoren „Übung“ und „Expertise“. So können die Nervenleithypothese und das Schwellenwertmodell die Verringerung des Synchronisationsfehlers (bis  $\sim 0$  ms), die durch Übung erreicht werden kann und z.B. die generell besseren Ergebnisse von Berufsschlagzeugern nicht erklären. Die Theorie des Zeitschätzungsfehlers bedarf noch einer differenzierteren Ausarbeitung der Begründungszusammenhänge und einer genaueren Untersuchung der zugrunde liegenden Verarbeitungsprozesse.

## 4.5 Zusammenfassung und Diskussion

Allen genannten Erklärungsmodellen mangelt es offenkundig an Konsistenz, denn keines der Modelle liefert eine befriedigende Antwort auf die Frage nach den Ursachen des negativen Synchronisationsfehlers. Vielmehr widersprechen sich die jeweiligen Verfechter in ihren Modellen teils vehement. So sei nach Aschersleben „die Forderung zu stellen, dass sich die weitere Forschung weniger mit der Testung verschiedener Erklärungsansätze gegeneinander beschäftigen sollte (wie das bisher aber überwiegend der Fall war), als vielmehr der Versuch unternommen werden sollte, integrative Ansätze zu entwickeln, die die Ideen verschiedener Hypothesen verbinden.“ (Aschersleben, 2000, 155)

Indes liefert Thaut (2005) eine gänzlich andere Erklärung für das Phänomen der negativen Asynchronie: Ausgehend davon, dass der (isochrone) Rhythmus eine zeitlich voraussagbare Struktur äquidistanter Ereignisse in der Zeit darstellt, nutzt das kognitive System nach Auffassung von Thaut diese einfache Vorhersagbarkeit, um die motorischen Reaktionen besser zu antizipieren. Eine exakte Reaktion auf den idealen Zeitpunkt Null sei in einem motorischen System, dessen motorische Programmierungs- und Ausführungsebene einer gewissen „Schlupfzeit“ und „built-in imprecision“ unterliegt, physiologisch ohnehin nicht möglich (Thaut, 2005, 45). Es sei vielmehr von besonderem Vorteil, wenn die Reaktionen ein wenig zu früh initiiert würden (*feedforward control*), denn die Wahrnehmung des Führungssignals nach der Ausführung der Reaktion/Bewegung liefere die passende sensorische Bestätigung, wann Korrekturen für den nachfolgenden Zyklus vorgenommen werden können, während ein Feedback des Taps nach dem Klick des Führungssignals keine adäquaten Korrekturen mehr erlauben würde (Thaut, 2005, 45).

Damit einhergehend konnten Müller et al. (2000) in ihren MEG-Studien zur präzisen zeitlichen Steuerung motorischer Handlungen je nach Ausrichtung des Synchronisationsfehlers (negativ oder positiv) verschiedene kortikale Quellen detektieren, die funktional mit den beiden Ereignissen (Tap und Klick) assoziiert sind. Müller (2000) vermutet, dass der aktivierte Prozess eine Evaluations- und Abgleichfunktion zwischen Tap und Klick vornimmt, da er erst aktiviert wird, sobald beide Ereignisse erfolgt sind. Das jeweils letzte Ereignis ist dabei Auslöser für die Aktivierung des (fortlaufenden) Evaluationsprozesses, der sich im primären somatosensorischen Kortex lokalisieren lässt. Die Lokalisation dieser als Evaluator spezifizierten Komponente veränderte sich dabei in Abhängigkeit der Modalität (für das Führungssignal), was darauf hindeutet, „dass zentrale Kontroll-Einheiten zeitlicher Präzision modalitätsspezifisch in unterschiedlichen Arealen lokalisiert sind.“ (Müller, 2000, 309)

### Tapping zu Musik

Obwohl die Fähigkeit zur zeitlich präzisen sensomotorischen Koordination und Synchronisation unverzichtbare Voraussetzungen für das Tanzen und Musizieren darstel-

len, gibt es überraschend wenig Studien, die sich mit der Untersuchung ebendieser zugrunde liegenden Prinzipien (und Verarbeitungsprozesse) im Kontext „echter Musik“ beschäftigen. In den meisten Studien werden standardmäßige Tappingexperimente mit monotonen auf einzelne Tonimpulse reduzierte Stimuli verwendet, wobei die Frage nach dem Einfluss des auditiven Feedbacks oft vernachlässigt wird (Repp, 2005, 985). Beim Musizieren jedoch richtet sich das Timing hauptsächlich nach dem *auditiven* Feedback vorangegangener Bewegungen.

Hinzu kommt, dass die klassischen Tappingstudien das Synchronisationsverhalten überwiegend bei Nicht-Musikern untersuchen. Experimente zur Timing-Präzision mit Berufsmusikern oder insbesondere mit Schlagzeugern gibt es kaum. Einige der wenigen Ausnahmen sind die Studien von Dahl (2000; 2004), Drake et al. (2000), Gerard & Rosenfeld (1995), Toiviainen & Snyder (2003) und Repp (1999c), wobei der negative Synchronisationsfehler in den genannten Untersuchungen lediglich eine untergeordnete Rolle spielt oder gar keine Erwähnung findet. Dies erscheint nicht weiter verwunderlich, denn sobald bei Tappingexperimenten mit komplexeren Rhythmen gearbeitet wird, ist kein negativer Synchronisationsfehler mehr zu beobachten (vgl. dazu z.B. Snyder & Krumhansl, 2001; Thaut et al., 1997; Toiviainen & Snyder, 2003).

Aus unterschiedlichen Gründen führt Tapping zu Musik zu durchweg anderen Ergebnissen, als Tapping-Studien, in denen ausschließlich Metronomsignale verwendet werden. Die genauen Zusammenhänge bleiben jedoch im Dunkeln, da das Synchronisationsverhalten allzu sehr von den jeweiligen Versuchsbedingungen und im Besonderen von der Art und Struktur des Stimulus-Materials abhängig ist.

Eine der wenigen Studien, die den Einfluss von computergenerierter Musik mit isochronen Metronomsequenzen im Unterschied zu vom Menschen gespielter Musik erforscht, soll an dieser Stelle exemplarisch betrachtet werden:

In ihrer Untersuchung zu „*Tapping in time with mechanically and expressively performed music*“ konnten (Drake et al., 2000) zeigen, wie kleine Variationen in Timing, Intensität und Artikulation die Wahrnehmung von Musik beeinflussen. Musiker und Nicht-Musiker wurden gebeten, auf einer Trommel zu sechs verschiedenen Musikausschnitten zu tappen, wobei jeder Musikausschnitt in jeweils drei verschiedenen Versionen präsentiert wurde:

1. „*mechanical*“ (als einfaches Synthesizer-File),
2. „*accented*“ (ebenfalls „*mechanical*“, aber mit Akzenten) und
3. „*expressive*“ (Live-Aufnahme eines Konzertpianisten).

Die Teilnehmer (Vpn) wurden nach der Theorie „The Dynamics of Attending“ (Jones, 1976, 2003, 2004; Large & Jones, 1999) auf drei verschiedene Prozesse hin beurteilt:

1. „*attunement*“ (Abstimmung)

2. „*use of referent level*“ (spontane Synchronisationsrate)
3. „*focal attending*“ (Spannweite des Synchronisationslevels).

Nach den „beat induction models“ (dazu Large & Jones, 1999) sollten Synchronisationen mit mechanischer, zeitlich sehr regelmäßiger (isochroner) Musik ohne Akzente besser funktionieren als mit expressiv gespielter Musik. Es zeigte sich jedoch, dass die Synchronisation zu der expressiven Musik eine geringere Abweichung von der theoretisch/idealen, metrischen Hierarchie aufwies (vgl. dazu auch Repp, 2002).

Drake und ihre Kollegen schließen daraus, „that performance microstructure transmits a particular metrical interpretation to the listener and enables the perceptual organization of events over time spans“ (Drake et al., 2000). Dabei synchronisierten sich Musiker im Vergleich sehr viel genauer als Nicht-Musiker. Es wird angenommen, dass Musiker über längere Zeitspannen hinweg die wahrgenommenen Ereignisse organisieren und ein deutlicheres Abbild der hierarchischen Organisation der Musik haben als Nicht-Musiker. Das Wissen über den jeweiligen musikalischen Verlauf hilft den Probanden bei der Vorhersage von expressiven Timing-Variationen. Leider gibt die Studie keine Auskunft über den Grad und die Richtung der Abweichungen beider Gruppen.

Die Untersuchungsergebnisse von Repp zum expressiven Timing einer melodischen Geste, die wiederholt in Robert Schumanns Klavierstück „Träumerei“ erscheint, unterstützen die Hypothese, „that there are classes of optimal temporal shapes for melodic gestures in music performance and that musically acculturated listeners know and expect these shapes“ (Repp, 1992, 221 und vgl. dazu auch Dixon & Goebel, 2002). Die Antizipation und Synchronisation zu rhythmischen Ereignissen scheint somit nach den vorliegenden Studien durch interne rhythmische Zeitgeber erklärbar, die ihrerseits erheblich durch Gestaltwahrnehmungsprozesse beeinflusst werden. So konnte Repp (1999b; 1999c; 2002) in seinen Tappingexperimenten mit metronomisch genau (isochron) gespielter Musik (als Stimulus) sehr kleine, aber systematische Timing-Fehler feststellen, die nach seiner Ansicht auf die musikalische Struktur zurückzuführen seien (Repp, 2005, 985). „Thus, it appears that some aspects of musical structure have an involuntary influence on the precise timing of the coordinated movements.“ (Repp, 2005, 985)

Die Studie macht die übergeordnete Rolle der Einflussfaktoren bei Tappingexperimenten zum Synchronisationsverhalten ein weiteres Mal mehr als deutlich. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Ausprägung des negativen Synchronisationsfehlers vorwiegend von den folgenden Einflussfaktoren abhängig ist:

- Art und Form der verwendeten Stimuli: Das Tappingverhalten ist sehr stark von der Länge der verwendeten Führungstöne und ebenso von der Länge ihrer Einschwingphasen abhängig. Wie in Kapitel 4.1 auf Seite 62 besprochen, verschiebt sich das sogenannte P-Center deutlich, sobald lange Führungstöne verwendet werden.

- Qualität des Feedbacks: Die Bewegungskoordination bei Synchronisationsaufgaben ist vom taktilen/kinästhetischen und auditiven Feedback abhängig. Der negative Synchronisationsfehler kann reduziert werden, wenn das taktile/kinästhetische Feedback verstärkt oder ein akustisches Feedback hinzugefügt wird (Aschersleben & Prinz, 1995; Aschersleben et al., 2000).
- Tempo: Der negative Synchronisationsfehler ist nicht konstant, sondern vom Tempo abhängig. Je kleiner die Inter-Stimulus-Intervalle sind bzw. je schneller das Tempo ist, desto geringer ist auch der negative Synchronisationsfehler (Mates et al., 1994; Peters, 1989; Pressing, 1999; Repp, 2003; Semjen et al., 1998, 2000). Dieser Umstand spricht damit für die von Wohlschläger & Koch (2000) vertretene These des Zeitschätzungsfehlers und widerspricht der Nervenleithypothese (s. Kap. 4.2 auf Seite 64), wonach der Synchronisationsfehler auch bei verschiedenen Tempi gleich bleiben müsste. Daneben gibt es für Synchronisationsexperimente Tempogrenzen: Liegen die zu antizipierenden Tempi über 200 bpm oder unter 30 bpm wird es für die Versuchspersonen sehr schwierig, sich mit den Führungstönen zu synchronisieren. Die Dauer des Intervalls zwischen aufeinanderfolgenden Signalen (IOI) für die Bewältigung einfacher Synchronisationsaufgaben liegt demnach für nicht-trainierte Personen zwischen 300 ms und 2000 ms (Aschersleben, 2000; Wohlschläger & Koch, 2000).
- Struktur des Inter-Onset-Intervalls: Bei einfachen Metronomsequenzen mit leeren IOI ist ein negativer Synchronisationsfehler zu beobachten, während bei Tappings zu komplexen Rhythmussequenzen ein sehr viel geringerer oder kein negativer Synchronisationsfehler zu beobachten ist (s. dazu genauer Kap. 4.4 auf Seite 67).
- Sinnesmodalitäten: In ihren Untersuchungen zur Rolle der sensorischen Modalität bei Synchronisationsexperimenten konnten Müller et al. (2000) (mithilfe bildgebender Verfahren) feststellen, dass der unter auditivem Führungssignal auftretende negative Synchronisationsfehler nicht zu beobachten ist, wenn die Wahrnehmung des Führungssignals und des Handlungseffektes innerhalb einer Modalität bleiben, indem bei Experimenten mit Fingertappings als Stimulus z.B. isochrome Metronomsequenzen in Form taktiler Reize verwendet werden (vgl. Müller et al., 2000; Müller, 2000).
- Effektoren, wie z.B. Finger, Hand oder Fuß: Der negative Synchronisationsfehler ist davon abhängig, ob Tappings mit dem Fuß oder mit der Hand ausgeführt werden. Tappings mit dem Fuß erfolgen in der Regel ca. 20 ms vor den Hand-Tappings (Aschersleben, 2000; Wohlschläger & Koch, 2000).
- Faktor Übung und Training: Durch Übung kann der negative Synchronisationsfehler verringert werden. Dabei hilft Feedback den Versuchspersonen, die

negative Asynchronie zu verringern (Aschersleben, 2003; Fischer et al., 2005; Gerard & Rosenfeld, 1995). Experten, wie z.B. Schlagzeuger zeigen indes keinen erheblichen negativen Synchronisationsfehler (Fischer, 2003).

Die zusammengetragenen Argumente verdeutlichen, dass Tappingexperimente z.B. zu einem Metronom lediglich eine spezielle Form der musikalisch-rhythmischen Synchronisation darstellen, da sie die komplexen Zusammenhänge, wie sie beim Musizieren zum Tragen kommen nicht vollends berücksichtigen. Vielmehr liegt es in der methodologischen Herangehensweise psychologischer Forschung, entsprechende reduktionistische Versuchs-Designs zu wählen, um eine möglichst hohe Kontrolle der Variablen zu gewährleisten. Aus musikalischer Sicht erscheinen daher viele Tapping-Studien als nicht relevant, da sie meistens auf ein auditives Feedback der Taps verzichten. Mitunter werden „Rückmeldetöne“ gar als „ungewöhnliche Handlungsziele für Tap-Bewegungen“ (Drewing, 2001, 178) verstanden.

Selbstverständlich wäre es wünschenswert, zukünftige Untersuchungen weniger unter Laborbedingungen als unter musikalischen und somit natürlichen Bedingungen stattfinden zu lassen, „in denen z.B. propriozeptives und auditives Feedback zum Tragen kommen können“ (Krampe & Engbert, 2005, 526), um dem Dilemma der eingeschränkten „Aussagekraft im Hinblick auf die musikalische Bedeutung ihrer Ergebnisse“ (Reinecke, 1962, 44) von nicht musikalischen Hör- und Synchronisationsversuchen entgegenzutreten. Hier gilt es, einen angemessenen Kompromiss zwischen Validität und Übertragbarkeit zu finden, indem man sich z.B. zum Ziel setzt, die zugrunde liegenden Prinzipien und wahrnehmungspsychologischen Strategien zu ergründen, die in komplexen Zusammenhängen eine Rolle spielen und darüber hinaus *aussagekräftige* Zergliederungen in einfache Muster erlauben.

Experimente mit Synchronisationsaufgaben mittels Fingertapping zu einer metronomartigen Pulsfolge unter Verwendung musikalischer Klänge und Instrumente bieten in diesem Zusammenhang einen sinnvollen Ansatz, die zeitliche Kopplung von Wahrnehmung und Handlung und der damit verbundenen Integrationsleistungen als Grundlage der notwendigen koordinativen Fähigkeiten beim Musizieren anhand einfacher Formen von Timingkontrolle halbwegs realistisch zu untersuchen. So sieht Thaut (2005) in der Verwendung von Synchronisationsaufgaben dieser Art eine der aussagekräftigsten Modelle zur Untersuchung von Rhythmusverarbeitung und weist zudem darauf hin, dass die Reduktion eines musikalischen Rhythmus auf einen isochronen Puls durchaus mit den psychologischen Grundlagen der Rhythmuswahrnehmung (*pulse-salient models*) vereinbar ist. Denn fast jede Musik ist auf irgendeine Weise rhythmisch oder gar metrisch organisiert und bewirkt letztendlich die Ableitung eines (mental)en Pulses (vgl. Bruhn, 2000b; London, 2001; Parncutt, 1994), weswegen es durchaus sinnvoll erscheint, den Rhythmus einer Musik auf isochrone Prototypen zu reduzieren (Jackendoff & Lerdahl, 1982; Thaut, 2005; Vos & Helsen, 1992). Die Synchronisation zu einem einfachen Metrum oder Pattern sei nach London (2004) nicht weniger kompliziert als die Synchronisation zu einem metrisch komplexeren Rhythmus.

# Kapitel 5

## Handlungssteuerung

„Die Zukunft ist nicht, was uns entgegenkommt, sondern das, dem wir entgegengehen.“ (Guyau, 1890/1993, 50)

War man sich in der Frühphase der Psychologie noch weitestgehend darüber einig, dass „am Anfang die Antizipation des Handlungsergebnisses als Handlungsziel steht und dass von hier aus die Handlung in Bewegung kommt“ (Engelkamp & Zimmer, 2006, 485), wurde das Interesse an der Handlungsforschung der 'frühen Psychologen' wie James (1890), Wundt (1874), Münsterberg (1888) und auch Lotze (1852) durch die Entwicklung des Behaviorismus Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts zunächst verdrängt.

Lediglich die von den westlichen Wissenschaftlern weitestgehend ignorierten sowjetischen Psychologen um Leontjew (1977), Wygotzki (1987) und Luria (1976) beschäftigten sich in den folgenden Jahren mit handlungstheoretischen Grundlagen. Leontjew ist es, der eine allgemeine Tätigkeitstheorie formuliert, die zwischen *Tätigkeit* (Motiv), *Handlung* (Ziel) und *Operation* (Aufgabe) unterscheidet (Leontjew, 1977). Gemeinsam mit seinen oben genannten Kollegen gilt Leontjew als Begründer der kulturhistorischen Schule der russischen Psychologie, welche später maßgeblichen Einfluss auf die Entwicklung der Kritischen Psychologie (vgl. Holzkamp, 1972) und auch der Musikpsychologie haben sollte (vgl. Oerter, 1993). Daran anschließend wurden die drei Ebenen der Handlung von Oerter auf die „Handlungsprozesse in der Musik“ übertragen (Oerter, 1993). Der sinnstiftende Rahmen der *Tätigkeitsebene* kann hiernach in musikalischen Zusammenhängen z.B. durch Verschmelzungserlebnisse einerseits und Bewältigungserlebnisse andererseits verbunden sein (vgl. „Flow-Erleben“ bei Csikszentmihalyi, 2000), während musikalische *Handlungen* bei der „Musikausübung und Musikrezeption“ danach streben, konkrete Ziele zu erreichen (Oerter, 1993, 262). Die dritte Ebene der *Operationen* beinhaltet „automatisierte Handlungen, die rasch und ohne unmittelbare bewußte Kontrolle ablaufen“ (Oerter, 1993, 262; s. dazu auch „Automatisierte Handlungssteuerung“ bei Bruhn, 2005b, 548ff).

Neben den russischen Psychologen war es dann zunächst vor allem Neisser, durch den es zu einer Wiederbelebung der Handlungsforschung kam. Für Neisser

stellt bereits die Wahrnehmung einen Verhaltensakt dar, der durch die Unterstützung sogenannter antizipierender Schemata (Bartlett, 1932) eine aktive Reizsuche bewirkt, indem während des Wahrnehmungsprozesses zusätzlich zu den äußeren Reizen weitere neue Reize erzeugt werden (vgl. Neisser, 1967/1996). Gemäß Neisser sei Wahrnehmung kein passiver, sondern ein aktiver, konstruktiver Prozess, der einer Handlung gleichkommt. So beschreibt auch der Philosoph Noë in seinem Buch „*Action in Perception*“ Wahrnehmung als eine Art gedanklich-konstruktive Aktivität, die nicht nur im Gehirn ablaufe, sondern vielmehr die Einbindung des ganzen Körpers verlange, wobei Noë bekannte Ansätze der „frühen“ Gestaltpsychologen mit aktuellen Erkenntnissen aus der Neuropsychologie verbindet (Noë, 2004).

Aebli formuliert hierzu passend: „Der tüchtige Wahrnehmer geht nicht mit leeren Händen an das Geschäft des Erkundens der Welt. Er weiß, was in einer Situation zu *erwarten* ist. Er *antizipiert* das kommende Geschehen und die Merkmale, die er noch nicht sieht. Er gleicht einem Handelnden, der einen Plan hat und sich aufgrund einer kognitiven Landkarte bewegt.“ (Aebli, 1979/1996, 7f)

In Bezug auf die Verarbeitung und Ausführung von musikalischen Rhythmen kann die Aufnahme selbstspezifizierender Informationen mithilfe kognitiver Landkarten auch als eine Form *auditiver Propriozeption* verstanden werden (vgl. Gibson, 1966), die es den Musikern ermöglicht, ihre Bewegungen anhand der akustischen Szenerie (Bregman, 1990) zu koordinieren. Der Begriff Propriozeption steht hier für die Wahrnehmung der jeweiligen Position und Bewegung der eigenen Gliedmaßen mithilfe sensorischer Rezeptoren (sogenannter Propriozeptoren), die sich innerhalb der Gelenke, der Haut, der Muskeln und Sehnen befinden (vgl. Engelkamp & Zimmer, 2006, 394).

Wahrnehmung und Handlung sind dabei sehr eng miteinander verbunden (s. Gibson, 1982b), wobei viele Reizereignisse sogar erst durch Handlungen erzeugt werden (s. dazu Hommel, 2006, 541ff). Handlungen können mithin direkten Einfluss auf die Wahrnehmung ausüben. Alle Experimente und Untersuchungen, die sich mit der zeitlichen Steuerung von Handlungen beschäftigen, beziehen sich somit unweigerlich immer auch auf die Aspekte der zugrunde liegenden Wahrnehmungsprozesse (s. dazu Rosenbaum, 1998, 228f). Nach dem handlungstheoretischen Konzept von Aebli gehe das Denken gar aus dem Tun hervor (s. Aebli, 1980), da es (erst) dort beginne, „wo die Struktur der Handlung bedroht oder verbesserungsfähig ist“ (Funke, 2006, 396; nach Aebli, 1979/1996).

Verschiedene empirische Befunde liefern dazu passend eine Vielzahl von Anzeichen für die enge Kopplung von Wahrnehmung und Handlung (vgl. Hommel, 2006, 451ff).

Hommel nennt in diesem Zusammenhang vor allem *Ressourcenüberlappung*, *visuelle Adaption*, *Reiz - Reaktions - Kompatibilität*, *Handlungs - Wahrnehmungs - Kompatibilität* und *überlappende neuronale Strukturen* (Hommel, 2006, 542).

Dies zeige sich nach Roth (2001) bereits auf der Ebene einzelner Neurone bzw. kleiner Neuronenverbände: Die Wahrnehmung handlungsrelevanter Objekte sowie

die Planung und Ausführung von Bewegungen gehen auf zellulärer Ebene nahtlos ineinander über und bilden auf diese Weise eine „Einheit von Perzeption und Aktion“ (Roth, 2001, 387). So seien nach Rizzolatti & Craighero (2004) z.B. sogenannte *Spiegelneurone* im prämotorischen Kortex „sowohl bei der Planung von Handlungen als auch bei deren Beobachtung aktiv“ (Hommel, 2006, 542; vgl. dazu auch Konczak, 2006, 627). Dies legt nahe, „dass der prämotorische Kortex eine wichtige Rolle bei der senso-motorischen Kodierung und Kontrolle intentionaler Handlungen spielt“ (Hommel, 2006, 544), wobei die Repräsentationen von Handlungen durch „motorische Programme mit perzeptiven Erwartungen bezüglich derjenigen Ereignisse“ verknüpft sind, „die durch die Ausführung dieser Programme erzeugt werden können“ (Hommel, 2006, 543). Nach Auffassung von Prinz (1997, 1998, 2000) wird die Handlungssteuerung (*action control*) dabei durch Vorstellungen antizipierter sensorischer Handlungseffekte geleitet (vgl. dazu auch Koch et al., 2006, 497ff. und „*Planung einfacher Handlungen*“ bei Nattkemper, 2006).

Prinz nimmt in diesem Zusammenhang eine gemeinsame Repräsentationsebene für die Kodierung von Handlungen und wahrgenommener Reize an („*Prinzip der gemeinsamen Kodierung*“; Prinz, 2000). In den Neurowissenschaften herrscht indes nach wie vor das große Problem, das Zusammenspiel der an der Handlungsplanung und -kontrolle beteiligten kognitiven Strukturen zu verstehen, denn auf neuronaler Ebene gibt es nach Grafton & Ivry (2004, 442) keine umfassend-einheitlichen Repräsentationen speziell nur für Handlungen.

Die Idee, dass Handlungen durch die Antizipation der Handlungskonsequenz determiniert werden, wurde nach Neisser erst wieder durch Prinz (1983; 1998) in den Diskurs der kognitiven Psychologie eingebracht (vgl. Engelkamp & Zimmer, 2006, 485).

Eine Handlung wird als ein Verhalten definiert, welches jeweils auf ein Ziel hin ausgerichtet ist (so Oerter in „*Intentionalität des Handelns*“, 1993/1999), während z.B. eine Reaktion nach Koch et al. (2006) ein Verhalten darstellt, das mittels Stimuli hervorgerufen wird. Die Initiierung und Steuerung einer Handlung hängt nach Müsseler et al. (1996, 350) darüber hinaus nicht allein „von der Information ab, die durch die Reaktionssignale vorgegeben wird“, sondern werde vielmehr durch Intentionen bestimmt, wie Guyau in seiner Abhandlung über „*La Genèse de l'idée de temps*“ feinsinnig zum Ausdruck bringt (Guyau, 1890/1993, 50). Die Intentionen einer Handlung geben dem Verhalten somit erst ihren Sinn und Zweck (vgl. Funke, 2006; Oerter, 1993). In diesem Sinne sollten Handlungen und Reaktionen auch streng voneinander unterschieden werden, denn zwischen beiden besteht im Rahmen kognitionspsychologischer Forschung „eine konzeptionelle Kluft“, wie Koch et al. (2006) betonen. Der menschliche Organismus sei keine passive Maschine zur Informationsverarbeitung, sondern vielmehr dafür geschaffen, mit seiner Umwelt zu interagieren (Gazzaniga et al., 2002, 447).

Für die psychologische und neurobiologische Handlungstheorie ist indes bedeutsam, „dass explizites, bewusstes Planen von Handlungen und abwägendes Entschei-

den zwischen Handlungsalternativen nur das eine Extrem eines großen Spektrums bilden, an dessen anderem Ende sich mehr oder weniger automatisierte Aktionen befinden, die einer bewussten Kontrolle gar nicht mehr unterliegen und dennoch die Kriterien von Willkürhandlungen erfüllen“ (Roth, 2001, 409). *Bewegungen* seien danach nicht gleich Bewegungen, wie Roth (2001, 378) herausstellt (vgl. dazu auch „*Psychologische Modelle der Handlungssteuerung*“ bei Elsner & Prinz, 2006). Dabei unterliegt die Bewegungssteuerung einem hoch komplexen „Wechselspiel aktiver und passiver Kräfte“ (Heuer, 2006, 529), welches sich nicht nur im Alltag, sondern insbesondere beim Musizieren als eine der komplexesten, menschengespezifischen Integrationsleistungen entfaltet (vgl. Altenmüller et al., 2000). Aufgrund jahrelanger Übung können professionelle Musiker sehr komplexe automatisierte Bewegungen ausführen (s. hierzu Palmer, 1997; Palmeri, 2002), welche sie zudem im Sinne intentionalen und zielgerichteten Handelns einsetzen können. Die zeitliche Vorwegnahme der Handlung und der Handlungsziele spielen dabei neben der Kontrolle der Handlung selbst eine entscheidende Rolle.

## 5.1 Antizipation und Kontrolle

In Anlehnung an Butz (2003) soll antizipatorisches Verhalten hier nicht nur als vorausschauendes Handeln, sondern vielmehr als ein zielgerichteter Prozess verstanden werden, bei dem zukünftige Ereignisse erwartet oder vorhergesehen werden, während Voreinstellungen und Handlungen in Bezug auf die Vorhersagen (ständig neu) geändert, angepasst und kontrolliert werden.

Durch die Zielgerichtetheit der Lenkung und Kanalisierung des Handlungs- und Bewegungsflusses wirkt antizipatorisches Verhalten dabei stabilisierend auf die Ausführung von Handlungen und erzeugt - was die Reflexion und Planung von Handlungen sowie die Verbesserung kooperativen Verhaltens anlangt - eine schnellere Adaptivität in dynamischen Umgebungen als grundsätzliche Voraussetzung für soziale Interaktion (s. Butz, 2003, 8).

Für Stadler & Wehner (1985) stellt das Prinzip der Antizipation eine Grundvoraussetzung für zielgerichtetes Handeln dar, wobei nach Lomov (1980) verschiedene Ebenen der Antizipation zu unterscheiden sind. In einer ersten Gruppe könne demnach die eher regulativen Prozesse, der perzeptiven, sensomotorischen und subsensorischen Ebenen der Antizipation zusammenfassen, während mit der repräsentationalen Ebene der Vorstellungen und Anschauungen sowie der Ebene des abstrakten Denkens die kognitiven Funktionen höherer Verarbeitungsstufen eine zweite Gruppe bilden (vgl. Stadler & Wehner, 1985, 73ff).

In diesem Sinne unterscheidet auch Butz (2003) verschiedene Formen antizipatorischer Handlungen, von denen hier die Konzepte der sensorischen und expliziten Antizipation zur Veranschaulichung vorgestellt werden sollen (Butz, 2003, 95f).

## Sensorische Antizipation

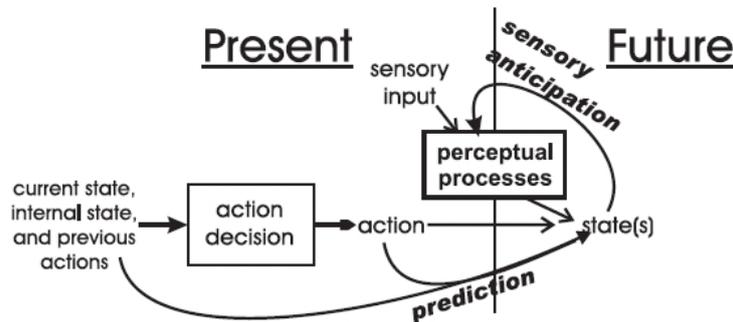


Abbildung 5.1: Sensorische Antizipation: Sensorisch-antizipatorisches Verhalten beeinflusst oder prädisponiert sensorische Informationsverarbeitung (Butz, 2003, 95).

Sensorische Antizipation beeinflusst Handlungen zunächst nicht direkt, bewirkt jedoch eine Prädisposition sensorischer Verarbeitungsprozesse, indem z.B. erwartete sensorische Eingaben schneller verarbeitet werden als unerwartete (Butz, 2003, 95). Abbildung 5.1 zeigt, wie parallel zu den aufgabenbezogenen Erwartungen (predictions) neu eintreffende sensorische Eingaben (sensory input) ihrerseits den Wahrnehmungsprozess und somit auch die (sensorische) Antizipation zukünftiger Ereignisse auf direkte Weise beeinflussen. Das Wissen in Form von erlernten Regeln, Schemata, Prototypen oder auch hierarchischen Kodierungsmodellen spielt auf der Ebene der regulativen Prozesse bereits eine wichtige Rolle (dazu auch Stoffer, 2005, 611ff). Die beschriebenen Prozesse gehen jedoch kaum über die perzeptionellen und sensorimotorischen Bereiche hinaus. Sie verlaufen eher unterschwellig und automatisiert ab, womit sie den subkortikalen Regionen der neuronalen Verarbeitung zuzuordnen sind.

Als Beispiel wären hier die subliminalen Timing-Anpassungen beim Tapping zu nennen, die z.B. von Fuchs (2006), Repp (2000) und Thaut (2005) experimentell nachgewiesen werden konnten.

## Explizite Antizipation

Durch explizite Antizipationen wird das Verhalten jeweils während der Ausführung durch die Vorstellung zukünftiger Zustandsrepräsentationen beeinflusst (Butz, 2003, 95). Wie bei der sensorischen Antizipation wird hierzu passend ein prädiktives Modell  $m^p$  angenommen (ebd.), das in der Regel auf zuvor Gelerntes und - im Sinne des „*contextual cuings*“ - auf sowohl explizites, aber auch implizites Wissen und Prozeduren zurückgreift (s. dazu Stoffer, 2005, 641). Im Unterschied zur sensorischen Antizipation beeinflusst die explizite Antizipation die jeweils aktuellen Handlungen auf direkte Weise, indem ein stetes Monitoring durchgeführt wird.

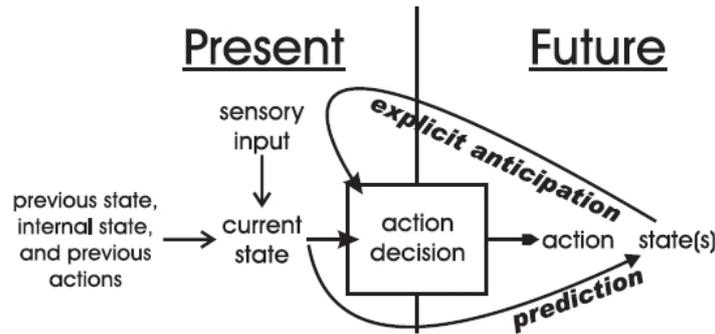


Abbildung 5.2: Explizite Antizipationen beeinflussen gegenwärtige Handlungs-Entscheidungen und -Planungen bezüglich der Vorhersagen, Erwartungen oder Intentionen (Butz, 2003, 96).

Das Modell der expliziten Antizipation integriert zielgerichtetes, antizipatorisches und planvolles Handeln, indem explizite Vorhersagen und immer wieder aufs Neue abgestimmte Repräsentationen zukünftiger Ereignisse und Zustände zur Steuerung und Feinabstimmung von Bewegungen herangezogen werden. Das Feedback setzt sich hierbei aus Informationen zusammen, die als Resultat eines hochdifferenzierten und über alle Modalitäten ausgedehnten Integrationsprozesses verschiedener kognitiver Systeme ermittelt wurde.

Durch die Vorwegnahme zukünftiger Ereignisse (s. „Vorweghören“ bei Bruhn, 2005a; Huron, 2006) werden die virtuellen (Ziel-)Zeitpunkte antizipiert, wobei in einem weitestgehend präattentiv ablaufenden Prozess (s. Eimer, 1996, 306f) sowohl explizite als auch implizite Erfahrungen, Gedächtnis- und Wissensinhalte zur Steuerung von Handlungen herangezogen werden.

## 5.2 Handlungsregulation und Motorik

In der Literatur finden sich unterschiedlichste Modelle zur Handlungsregulation und Motorik (für einen Überblick s. Birklbauer, 2006; Kirchner & Pöhlmann, 2005 und Illert, 1997 „Zur Motorik des Musizierens“).

Vom Modell des einfachen „Reflexbogens“ bis hin zu „Selbstorganisations- und Synergetik-Modellen“ versuchen sie jeweils das motorische Verhalten abzubilden, wobei sie sich in der Regel jeweils nur auf ganz bestimmte Bewegungstypen beziehen, denn: „Unter Einschluss seiner Veränderungsmöglichkeiten (capacity for change) ist das motorische System nahezu unbegrenzt“ (Kirchner & Pöhlmann, 2005, 89) und lässt somit eine Vielzahl an Interpretations- oder Modellierungsmöglichkeiten zu.

Die Modelle unterscheiden sich im Wesentlichen anhand ihrer „Grundmechanismen (offene oder geschlossene Modelle)“, dem „Grad ihrer Komplexitätsadäquatheit (Wechselwirkung handlungstheoretischer Dimensionen)“ und „der

„Detailliertheit der Dimensionsdifferenzierung (Arten des Feedbacks bzw. der KR-Differenzierung)“ (Kirchner & Pöhlmann, 2005, 89).

Kirchner & Pöhlmann (2005, 89) wählten folgende Modelle als repräsentativ aus: das „*Modell des Reflexbogens*“, das „*Reafferenzmodell*“ nach Holst/Mittelstedt, das „*komplexe funktionale System*“ nach Anochin, das „*Closed-Loop-Modell*“ nach Adams, das „*Open-Loop-Modell*“ nach Schmidt, das „*Handlungsregulationsmodell*“ nach Hacker, das „*Mehr-Ebenen-Mehr-Ziel-Modell*“ nach Bernstein und die „*Selbstorganisations- und Synergetik-Modelle*“ von Kelso.

Weitere Modelle lieferten Schmidt & Lee, wie z.B. das „*simplified information-processing model*“ (Schmidt & Lee, 1999, 42) oder auch das „*expanded information-processing model*“ (Schmidt & Lee, 1999, 45). Sie geben einen guten Einstieg in die Denkweise und Struktur derartiger Modelle der Motorik, innerhalb derer der menschliche Organismus zunächst als Informationsverarbeitungssystem angesehen wird, das zwischen Wahrnehmung und Handlung seinen Platz einnimmt. Diese zu verarbeitenden Prozesse können nicht direkt sichtbar gemacht werden (s. Schmidt & Lee, 1999, 42).

Um die Problematik näher zu beleuchten, haben Grafton & Ivry (2004) zur Veranschaulichung unterschiedliche Formulierungen des „*perception-action interface*“ zusammengestellt (Grafton & Ivry, 2004, 442). In Abbildung 5.3, 5.4 auf der nächsten Seite und 5.5 auf der nächsten Seite sind dazu einige grundlegend unterschiedliche Modellvorstellungen dargestellt.

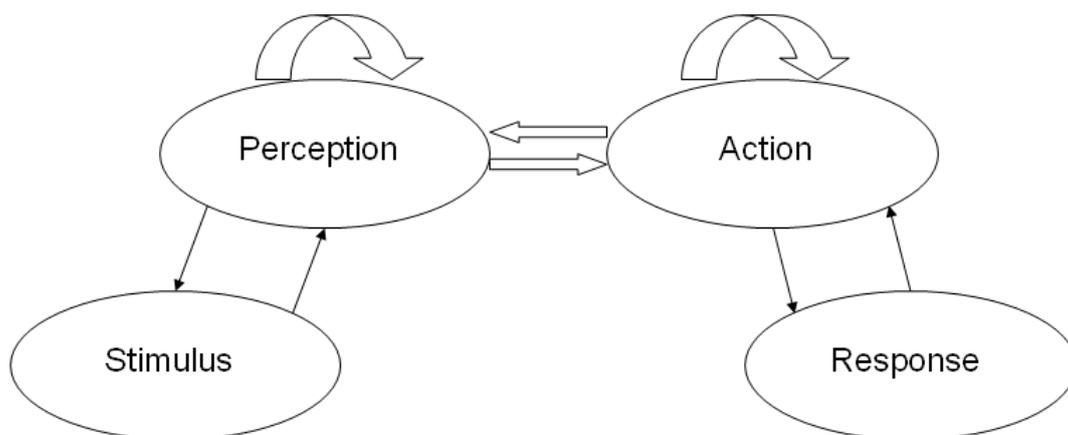


Abbildung 5.3: Formulierung des „*perception-action interface*“ nach Grafton & Ivry (2004, 441). In dieser Darstellung erscheinen Wahrnehmung (Perception) und Handlung (Action) als voneinander getrennte Verarbeitungsstationen.

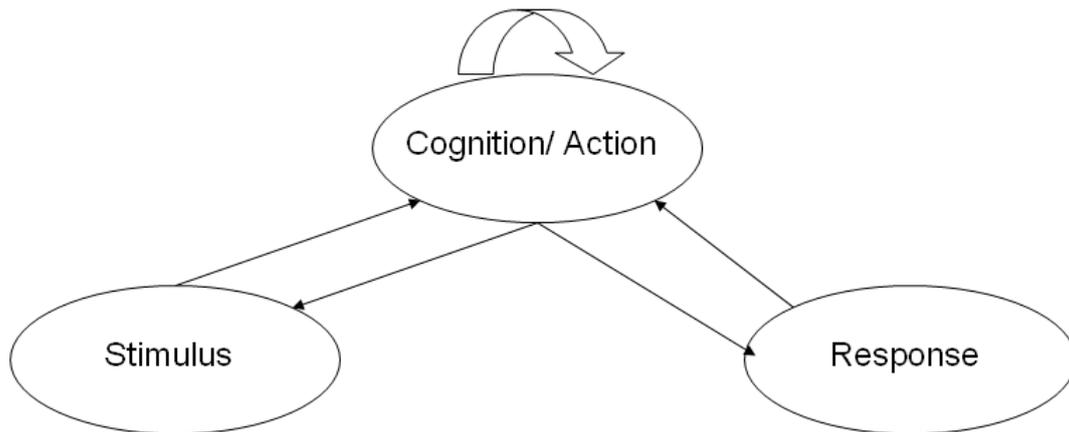


Abbildung 5.4: Formulierung des „perception-action interface“ nach Grafton & Ivry (2004, 441). In dieser Darstellung sind Wahrnehmung und Handlung (Action) sehr eng miteinander verbunden, denn sie werden auf der gleichen kognitiven Ebene repräsentiert.

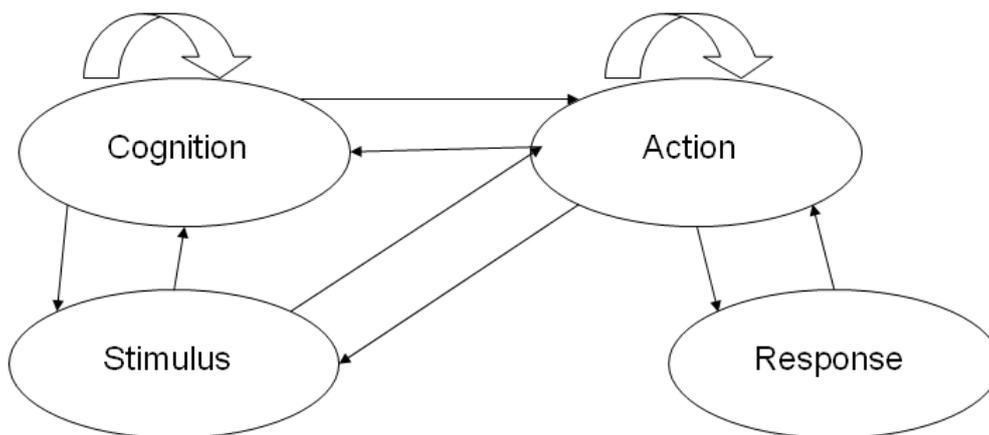


Abbildung 5.5: Verschiedene Formulierungen des „perception-action interface“ nach Grafton & Ivry (2004, 441). Hier gibt es sowohl direkte Verbindungen zwischen Stimulus und Handlung (Action), als auch eine indirekte Verbindung über weitere kognitiven Einheiten (Cognition), die von der für Handlungen verantwortlichen Repräsentationen getrennt liegen.

Das kognitive Modell „Adaptive control of thought-rational“ (ACT-R) von Anderson et al. (2004) basiert auf der Annahme eines „Flaschenhalssystems“ für die serielle Verarbeitung sensomotorischer Informationen (s. Abb. 5.6 auf der nächsten Seite). Nach Ruthruff et al. (2003) spricht vieles dafür, dass zusätzlich zu diesem Weg auch direkte Verbindungen zwischen einzelnen Modulen im Sinne von „Überbrückungskabeln“ bestehen und das Ausführungssystem auf diese Weise umgangen wird (s. Anderson et al., 2004).

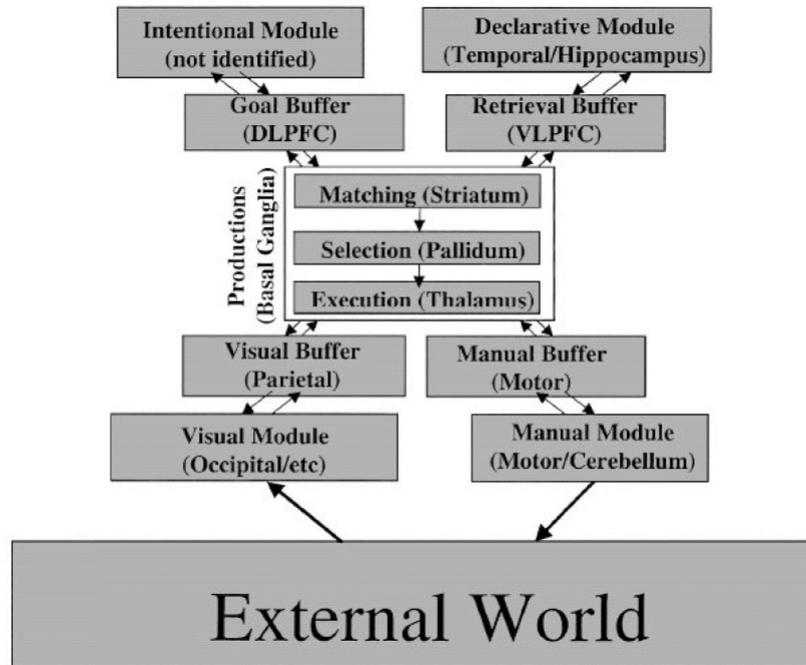


Abbildung 5.6: Das kognitive Modell: Adaptive control of thought-rational (ACT-R 5.0) von Anderson et al. (2004).

## Mechanismen der Bewegungssteuerung

An der Bewegungskontrolle sind im Wesentlichen zwei unterschiedliche Mechanismen beteiligt (vgl. Schmidt & Lee, 1999): Die Ausführung von *gesteuerten* Bewegungen nutzt programmgesteuerte Informationen (in Form gespeicherter Bewegungsprogramme) für die Ausführung von z.B. schnellen, ballistischen Bewegungen unabhängig vom Feedback („*open-loop control*“), während die Ausführung *geregelter* Bewegungen durch sensorische Feedbackinformationen adaptiv gesteuert und kontrolliert wird („*closed-loop control*“). Wie in Abbildung (5.7) dargestellt, werden bei der Open-Loop-Kontrolle alle für die Bewegungsausführung relevanten Informationen vor Beginn der Bewegung als Ganzes festgelegt und von der zentralen motorischen Ebene als Muskelkommandos an die Effektoren geleitet. Der gestartete Bewegungsablauf läuft sodann ohne weitere Korrektur oder Regelung ab (vgl. dazu auch Elsner & Prinz, 2006; Engelkamp & Zimmer, 2006, 389ff.). Die automatische Informationsverarbeitung unterliegt dabei nicht der willentlichen oder bewussten Kontrolle, wobei Interferenzen mit anderen Erfahrungs- und Herstellungsprozessen in der Regel entfallen.

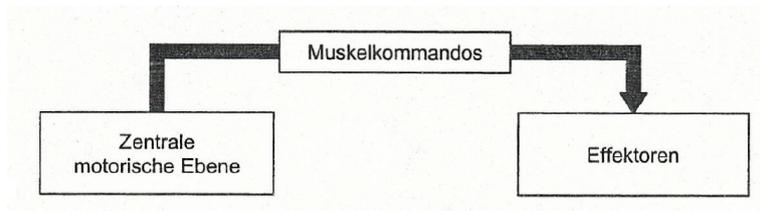


Abbildung 5.7: Kontrollmechanismus für die Bewegungssteuerung: Open-loop control. Die Muskelkommandos enthalten alle Informationen, die für die Bewegungsausführung erforderlich ist. Feedback wird zwar produziert, aber es wird nicht zur Kontrolle der Bewegung verwendet weil es nicht benötigt wird oder weil die Zeit nicht ausreicht, um es zu verarbeiten (Elsner & Prinz, 2006, 294).

Um eine Bewegung oder Handlung anhand aktueller eingehender Sinneseindrücke anzupassen, ist ein geschlossener Regelkreis (closed-loop) mit negativer Rückkopplung notwendig (s. Rosenbaum, 1991). Wie in Abbildung 5.8 zu sehen, wird hierbei sensorisches Feedback („Ist-Zustand“ des aktuellen Handlungsstandes“ nach Oerter, 1993/1999) zur Bewegungskontrolle herangezogen, um es mit einem vor der Bewegungsausführung erstellten Referenzwert („Soll-Zustand“ als Handlungsziel nach Oerter, 1993/1999) der zu erwartenden Effekte einer Bewegung zu vergleichen (vgl. dazu auch Elsner & Prinz, 2006; Engelkamp & Zimmer, 2006, 389ff). Dieser Verarbeitungsweg dient der Regelung meist zielgerichteter Bewegungen und beruht auf rückbenötigter Aufmerksamkeit, wobei immer nur eine limitierte Menge an Informationen (pro Zeiteinheit) verarbeitet werden kann.

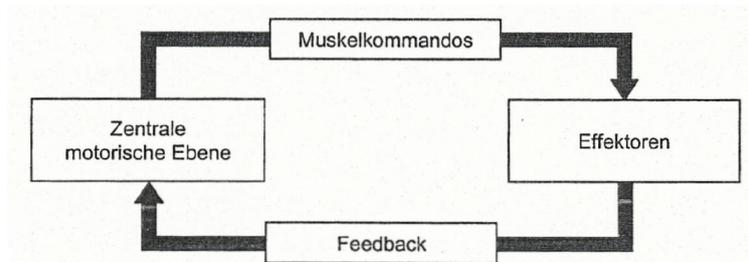


Abbildung 5.8: Kontrollmechanismus für die Bewegungssteuerung: Closed-loop control. Die Muskelkommandos werden durch afferente Informationen aus verschiedenen Rezeptoren ergänzt. Das Feedback informiert über die gerade ausgeführte Bewegung und ermöglicht eine kontinuierliche Anpassung der Muskelkommandos an die Erfordernisse der Interaktion mit der Umwelt (Elsner & Prinz, 2006, 294).

### 5.3 Neuronale Strukturen der (Sensio-)Motorik

Auf praktisch allen Ebenen des Zentralnervensystems (ZNS) sind motorische Zentren zu finden, die teils hierarchisch, teils parallel zusammenarbeiten (Schandry, 2003, 207). Wobei neben den motorischen Kortexarealen insbesondere die pyrami-

dalen und extrapyramidalen Bahnen, die Basalganglien und das Kleinhirn zu nennen sind (vgl. Gazzaniga et al., 2002; Schandry, 2003).

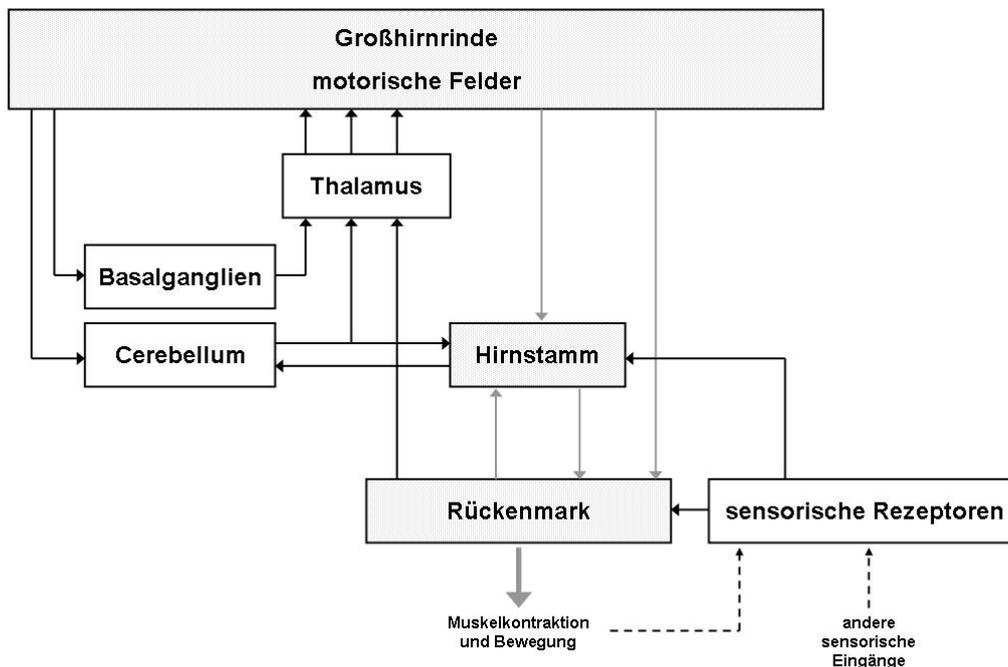


Abbildung 5.9: Darstellung der an der Bewegungsplanung beteiligten subkortikalen Hirnregionen (nach Herrmann & Fiebach, 2004, 97).

Abbildung 5.9 zeigt die funktionalen Verbindungen der motorischen Systeme nach Herrmann & Fiebach (2004) als quasi hierarchisches Gefüge. Hiernach sind vor allem subkortikale Regionen an der Bewegungsplanung und Ausführung beteiligt (vgl. dazu auch Schandry, 2003), wobei jede Bewegung zunächst eine genaue Planung und Koordination der einzelnen Teilbewegungen voraussetzt.

Bevor nun vom motorischen Kortex aus ein Nervenimpuls über die langen Neuronen der Pyramidenbahn oder der extrapyramidalen Bahn an die entsprechenden motorischen Einheiten (Interneuronen und Motoneuronen im Rückenmark) auf den Weg gebracht wird, läuft er - vergleichbar einer Schleife - über die Basalganglien zum Thalamus und wieder zurück zum Kortex. Diese Schleife dient unter anderem der „Überprüfung und Modulation von Bewegungsentwürfen“ (Schandry, 2003, 212), denn nur „wenn die Bewegung erfolgreich geplant wurde, wird sie schließlich ausgeführt“ (Herrmann & Fiebach, 2004, 96).

Zusätzlich befinden sich innerhalb der Basalganglien weitere Feedbackschleifen, sodass „die in den Einzelementen generierten Befehle stets der Kontrolle und Modulation des Gesamtsystems unterliegen.“ (Schandry, 2003, 212) Dabei nehmen nur ca. 5% der pyramidalen Nervenfasern direkten Kontakt zu Motoneuronen auf, während ca. 95% der Fasern an Interneuronen enden (Schandry, 2003, 207).

Parallel dazu befindet sich das Kleinhirn (Cerebellum) als zusätzliche Kontrollinstanz in einer weiteren Feedbackschleife, bestehend aus Kortex-(Pons)-Kleinhirn-

Thalamus-Kortex. Das Kleinhirn gilt als ein Ort, an dem „reichhaltige Informationen über kortikal generierte motorische Pläne“ abgelegt sind (so Schandry, 2003, 209). Zur Feinabstimmung von Bewegungen werden hier auch die aus dem Rückenmark stammenden efferenten sensorischen Impulse daraufhin geprüft, ob sie eine korrekte Ausführung der Bewegungen anzeigen (vgl. Herrmann & Fiebach, 2004; Konczak, 2006; Schandry, 2003). Dieser, insbesondere für das sensomotorische Lernen verantwortliche Kontrollmechanismus, beruht auf dem *Reafferenzprinzip* nach Holst & Mittelstaedt (1950). Wenn vom Großhirn motorische Kommandos an die spinalen motorischen Neurone geschickt werden, erhält das Kleinhirn eine Kopie dieser Befehle (Efferenzkopie). Wie in Abbildung 5.10 auf Seite 94 dargestellt, erreichen das Kleinhirn zur selben Zeit teils vorverarbeitete Informationen aus fast allen sensorischen Bereichen des Großhirns und aktuelle Signale der Propriozeptoren spinaler Afferenzen (vgl. Konczak, 2006, 627ff). Die Efferenzkopie wird im weiteren Verlauf mit der entsprechenden rückläufigen Reafferenz (der Sensorik) verglichen, um mögliche Bewegungsfehler zu ermitteln, die wiederum an die motorischen und präfrontalen Areale geleitet werden. Das Kleinhirn erweist sich auf diese Weise als ein hilfreicher Regler beim Korrigieren von Bewegungsfehlern (Konczak, 2006, 630). So sei es möglich, „dass sogar bei automatisiert ablaufenden Handlungen präattentiv Fehler korrigiert werden, bevor die Bewegung überhaupt ausgeführt wird“ (Bruhn, 2005b, 549; s. dazu auch Baldissera et al., 1981 und Haschke et al., 1986). Weitere Erläuterungen zum Reafferenzprinzip finden sich bei Engelkamp & Zimmer (2006, 441) und Stadler & Wehner (1985, 69).

Ein beträchtlicher Teil der für die sensomotorischen Schaltkreise wichtigen auditiven Informationsverarbeitung wird ebenfalls auf subkortikaler Ebene geleistet (vgl. Abb. 5.11 auf Seite 95). Noch bevor die auditorischen Informationen in den Thalamus gelangen, werden sie in mehreren subkortikalen Kerngebieten vorverarbeitet (vgl. Steinberg, 2005). Wie in Abbildung 5.11 auf Seite 95 dargestellt, werden die Schalldruckschwingungen in der Cochlea des Innenohrs in Nervenimpulse umgesetzt und erreichen zunächst den Nucleus cochlearis des Hirnstamms. Von dort werden die Impulse an den Olivenkern und den Colliculus Inferior weitergeleitet, um dann zum Corpus geniculatum mediale des Thalamus zu gelangen. Wie alle anderen eingehenden Informationen aus der Umwelt, werden die Signale/Informationen vom Thalamus aus an die jeweiligen spezialisierten Regionen des Kortex weitergeleitet (vgl. Schandry, 2003; Steinberg, 2005). Der Thalamus fungiert dabei nicht nur als eine reine Umschaltstation für die Nervenfasern, sondern leitet ein- und ausgehende Informationen - abhängig von der Aufmerksamkeit - entweder weiter oder nicht (s. Herrmann & Fiebach, 2004, 95).

Doch schon zuvor bestehen direkte Verbindungen zwischen der auditiven Wahrnehmung und den motorischen Zentren (vgl. Thaut, 2005). Wie in Abbildung 5.11 auf Seite 95 zu sehen ist, bestehen bereits, ausgehend vom Nucleus cochlearis (dorsal) und dem Colliculus inferior, enge Verbindungen zum Cerebellum. So findet auf dieser sehr frühen subkortikalen Ebene der neuronalen Verarbeitung eine direkte sen-

somotorische Kopplung statt, um einer schnellen, präzisen und robusten Rhythmusverarbeitung Vorschub zu leisten. Untersuchungen von Thaut (2005) konnten zeigen, dass Rhythmen sehr stabile und äußerst präzise, intervallbasierte Zeitschablonen erzeugen, die unterhalb der bewussten Wahrnehmung direkt an das motorische System geleitet werden (Thaut et al., 1998a; Large et al., 2002). Die neurobiologischen Grundlagen dieser schnellen, präzisen subliminalen Tempoanpassungen werden von Thaut (2005, 47) nicht nur beschrieben, sondern auch durch neurophysiologische Untersuchungen gestützt und auf musiktherapeutische Methoden zur Rehabilitation von Patienten mit Bewegungsstörungen angewendet (Neurologische Musiktherapie).

Im Zuge der therapeutischen Anwendung werden bei Schlaganfall- und Parkinsonpatienten durch Rhythmen motorische Reaktionen ausgelöst, welche eine Verbesserung der Gangmotorik auch ohne Unterstützung von Medikamenten bewirken kann. Dabei reagiert das motorische System sehr sensibel auf Erregungen aus den für die auditive Wahrnehmung zuständigen Bereichen, die neuronale Impulse unmittelbar in motorische Strukturen projizieren. Auf diesem Wege werden rhythmisch-zeitliche Schablonen hergestellt, die als Grundlage für die zeitliche Organisation motorischer Reaktionen und Handlungen dienen.

Nach Karmarkar & Buonomano (2007) ergeben sich diese intervallbasierten Zeit-Schablonen aus dem jeweiligen Zustand des an der auditiven Verarbeitung beteiligten Netzwerks. Das sich wandelnde Nervenmuster trägt die Dauer der jeweiligen Zeitintervalle bzw. der verstrichenen Zeit als Information bereits in sich. Die Autoren nehmen zudem an, dass neuronale Taktgeber einer Uhr vergleichbar (s. Abschnitt 3.2 auf Seite 51) aus neurophysiologischer Sicht für die Wahrnehmung sehr kurzer Zeitabschnitte von weniger als 30 ms zu langsam sind. Sie müssten mit einer Mindestfrequenz von 200 Impulsen pro Sekunde feuern, damit eine Differenz von 5 ms erkannt werden kann (vgl. Abschnitt 3.1 auf Seite 48).

Karmarkar & Buonomano (2007) führten zur Überprüfung ihrer Hypothese Computersimulationen mit einem Netzwerk von 500 virtuellen Neuronen durch, wobei das Netzwerk problemlos darauf trainiert werden konnte, unterschiedliche zeitliche Muster zu differenzieren.

Darüber hinaus legen weitere Experimente mit Versuchspersonen den Schluss nahe, dass im Gehirn kein „*internes Metronom*“ existiert, das Intervalle im Millisekundenbereich messen kann.

## 5.4 Exekutive Funktionen

In vielen kognitionspsychologischen Modellen finden sich Komponenten, die jeweils „eine kontrollierende und steuernde Funktion im Prozess der Informationsverarbeitung“ enthalten (Kluwe, 2006, 547). Voraussetzung dafür ist die Annahme einer hierarchischen Organisation des kognitiven Systems mit „unbewusster, rasch und parallel ablaufender Informationsverarbeitung auf unteren Ebenen sowie mit einer

exekutiven Instanz auf höherer Ebene.“ (Kluwe, 2006, 547) Diese, meistens auch als „zentrale Exekutive“ oder „exekutive Funktion“ beschriebene „unabhängige Systemkomponente kontrolliert und steuert die Verarbeitungsprozesse auf unteren Ebenen entsprechend der aktuellen Ziele des Organismus“ und gilt zudem als eine autonome Instanz zur Steuerung der Aufmerksamkeit (Kluwe, 2006, 547). Norman & Shallice (1986) sprechen daher auch von einem „supervisory attentional system“.

## Aufmerksamkeit und Verhalten

Das Prinzip der Aufmerksamkeit stellt eine der wichtigsten Fähigkeiten des kognitiven Systems dar (vgl. Müller & Krummenacher, 2006) und gilt als ein gleichermaßen „schwieriges wie zentrales Thema der kognitiven Psychologie“ (Engelkamp & Zimmer, 2006, 339). Ausführliche Erläuterungen und Diskussionen zum Thema Aufmerksamkeit und exekutive Kontrolle finden sich bei Engelkamp & Zimmer (2006, 367ff).

Eine der grundsätzlichen Funktionen der Aufmerksamkeit ist es, „relevante Anteile aus der schier unendlichen Menge von Informationen zu selektieren, um diese höheren (z.B. bewussten) Verarbeitungsprozessen zugänglich zu machen sowie die effiziente Steuerung von Handlungen (einschließlich Denkprozessen) zu kontrollieren“ (Müller & Krummenacher, 2006, 118). Selektive Aufmerksamkeit ist demnach eine wichtige Bedingung für die erfolgreiche Handlungssteuerung.

Sowohl *perzeptive* (James, 1890) als auch *handlungsbezogene* Selektion (Allport, 1987) spielen hierbei eine entscheidende Rolle (vgl. dazu auch Müller & Krummenacher, 2006, 118).

Nach Gibson (1982a, 168) seien zudem die Anpassungen der Wahrnehmungsorgane und die damit verbundene Lenkung der Aufmerksamkeit beim Hören, Sehen, Schmecken, Riechen und Berühren als ein aktives Suchen nach Invarianzen zu verstehen, welches die Optimierung der Informationsaufnahme (Wahrnehmung) zum Ziel hat, während für die handlungsbezogene Selektion der Handlungskontrolle sogenannte Monitoringfunktionen wirksam werden (s. dazu auch „*self-monitoring*“ bei Illert, 1997, 639-649).

In diesem Zusammenhang konzentriert sich die psychologische Forschung jedoch bisher fast ausschließlich auf Phänomene der visuellen Aufmerksamkeit. Die Frage nach den zugrunde liegenden Prozessen der Aufmerksamkeitslenkung bzw. -steuerung in musikalischen Zusammenhängen ist nach wie vor nicht hinreichend beantwortet.

Auditive Aufmerksamkeit ist indes ein zentrales Thema der Musikpsychologie. Hier stehen vor allem die Aufmerksamkeitsprozesse beim Musikhören im Vordergrund.

Die Steuerung der Aufmerksamkeit werde beim Hören durch implizit gelernte dynamische Ereignismodelle beeinflusst, die (implizites) musikalisch-syntaktisches Wissen repräsentieren (s. dazu „*contextual cuing*“ bei Stoffer, 2005).

In diesem Sinne orientiere sich die Aufmerksamkeitslenkung anhand einer kognitiven Karte (dazu auch Stadler & Wehner, 1985, 69). Derartige Karten stehen Musikliebhabern ebenso wie Musikern (Experten) in Form implizit gelernten Wissens gleichermaßen zur Verfügung (vgl. Bruhn, 2005b, 537) und beeinflussen die Wahrnehmung eingehender Reize in erheblicher Weise. So hält auch Langner (2002, 137) die Klärung von Vorerfahrungen als eines der am schwersten zu lösenden Probleme bei der Modellierung von Rhythmuswahrnehmung.

Die Aktivierung impliziten musikalisch-syntaktischen Wissens ist in der Regel ein phänomenal völlig unscheinbarer Vorgang, verläuft weitestgehend automatisiert und ist nach Stoffer (2005) mehr als nur ein „Voraushören“ durch hierarchische Kodierungsmodelle, Regeln oder Prototypen wie bei Jones (1982; s. dazu auch Abschnitt 3.2 auf Seite 53 „*Theorie der dynamischen Aufmerksamkeit*“).

Neben der Erwartungsbildung durch musikalisch-syntaktisches Wissen stehen dabei Repräsentationen musikalischer Strukturen und Objekte aus dem Langzeitgedächtnis als Informationsbasis zur Verfügung (dazu Stoffer, 2005, 604), wobei sich die Art der Aufmerksamkeitssteuerung in folgende grundlegende Kategorien einteilen lässt:

1. unwillkürlich (unbeabsichtigt) und willkürlich (intentional) in Bezug auf die Ausrichtung,
2. unabhängig (bottom-up-Steuerung) und abhängig (top-down-Steuerung) in Bezug auf vorhandenes Wissen,
3. räumlich und nicht-räumlich in Bezug auf Selektionskriterien (vgl. dazu auch Stoffer (2005, 643).

Nach Allport (1987) und Neumann (1987) stehe die Aufmerksamkeit vor allem im Dienst zielorientierten Verhaltens und sei nicht als eine „Funktion begrenzter Aufmerksamkeitskapazitäten“ zu sehen (Engelkamp & Zimmer, 2006, 383). Vielmehr sei das Nervensystem im Verlauf der Evolution immer komplexer geworden, womit auch die Anzahl der Reize, die in der Lage seien, Verhalten zu steuern, zugenommen habe.

Um ein geordnetes Verhalten zu ermöglichen, müssten demnach zwangsläufig Selektions- und Intergrationsmechanismen etabliert werden, welche das gleichzeitige Reagieren auf Reize vermeiden. Wechselseitige „Verhaltenshemmung“ auf der einen und „aktive Steuerung der Selektion durch Sensibilisierung“ auf der anderen Seite stellen die wichtigsten Mechanismen dar, um ein Verhaltenschaos zu vermeiden (Engelkamp & Zimmer, 2006, 383).

Abbildung 5.12 auf der nächsten Seite veranschaulicht passend hierzu den durch die zwei verschiedenen Mechanismen beeinflussten Aufmerksamkeits-Wettbewerb (vgl. Engelkamp & Zimmer, 2006, 384).

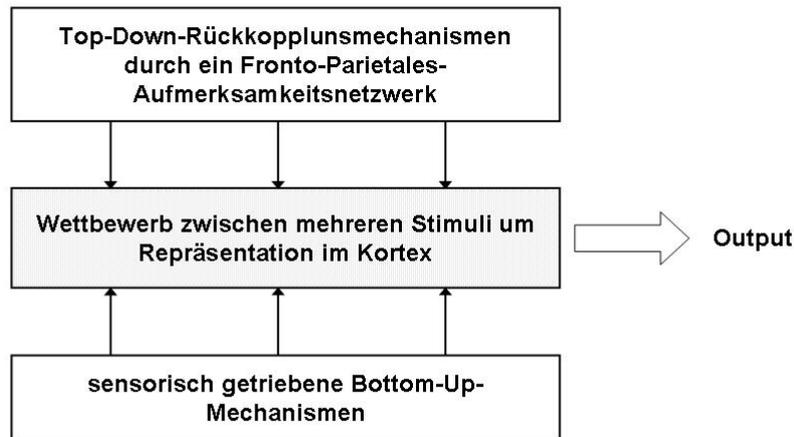


Abbildung 5.12: Veranschaulichung der bottom-up und top-down gesteuerten Aufmerksamkeit im Wettbewerb um die Verarbeitung und Handlungskontrolle (nach Engelkamp & Zimmer, 2006, 384).

## Interne und externe Bewegungskontrolle

Die Ausführung von Bewegungen scheint davon abhängig zu sein, ob sie eher einer intern gesteuerten und somit selbstbestimmten Kontrolle unterliegt oder ob sie einer durch externe Informationen beeinflussten Bewegungskontrolle folgt (Gazzaniga et al., 2002, 470ff).

Ergebnisse aus physiologischen Untersuchungen unterstützen die Annahme der „internal-external control hypothesis“ nach Goldberg (1985), wonach durchaus zwischen zwei unterschiedlichen Verarbeitungswegen bei der Ausführung von Bewegungen differenziert werden kann. Wie in Abbildung 5.13 auf Seite 96 dargestellt, lassen sich eine externe und eine interne Schleife funktional voneinander unterscheiden: Die externe Schleife, welche das Cerebellum, den parietalen Kortex und den lateralen prämotorischen Kortex (hier: PMC) einbezieht, dominiert bei der Ausführung visuell, auditiv oder somatosensorisch geführter Bewegungen, während die interne Schleife unter Einschluss der Basalganglien und der supplementär-motorischen Area (SMA) bei der Ausführung „selbst-geführter“ und erlernter Bewegungen dominiert (vgl. Gazzaniga et al., 2002, 470). Auch Singer (1985) differenziert zwischen Bewegungen, die der Ausführende selbst bestimmen kann (self-paced) und Bewegungen, die durch die jeweilige Situation oder Aufgabe spezifische Anforderungen an den Ablauf einer Bewegung stellt (externally-paced).

## Arbeitsgedächtnis

Unter dem Begriff Arbeitsgedächtnis wurde in der Vergangenheit häufig - in Abgrenzung zum Langzeitgedächtnis - auch das sogenannte Kurzzeitgedächtnis verstanden. Heute wird meist nur noch der Ausdruck Arbeitsgedächtnis verwendet (vgl. Kluge, 1997). Die Bezeichnung geht aus dem *Arbeitsgedächtnismodell* von Baddeley & Hitch (1974) hervor, welches neben dem *Multispeichermodell* von Atkinson & Shiffrin (1968) in der psychologischen Forschung seit seiner Entwicklung in den 1960er Jahren besondere Beachtung findet. Eine kritische Erörterung der Modelle findet sich bei Engelkamp & Zimmer (2006, 215-336) oder auch bei Goschke (1996).

Zuvor wurde die Idee einer derartigen Arbeitsgedächtniskomponente, welche zur kurzzeitigen Speicherung von Informationen und außerdem an der Planung und Durchführung kognitiver Operationen beteiligt sei, bereits von Miller et al. (1960/1973; s. auch Seidler-Brandler, 2002, 15ff) formuliert. Für einen Überblick zur *Musikpsychologischen Forschung im Kontext allgemeinspsychologischer Gedächtnismodelle* sei an dieser Stelle auf Lange (2004) verwiesen.

Anstelle eines einheitlichen Kurzzeitspeichers wie noch bei Atkinson & Shiffrin (1968) geht das Arbeitsgedächtnismodell (Baddeley, 1986) von mehreren weitgehend unabhängig voneinander arbeitenden Subsystemen innerhalb des Arbeitsgedächtnisses aus (vgl. dazu auch Baddeley, 2003).

Wie in Abbildung 5.14 zu sehen, besteht das Arbeitsgedächtnis zunächst aus einer *phonologischen Schleife*, die der Aufrechterhaltung sprachlicher Informationen dient, und einem *visuell-räumlichen Skizzenblock* zur Aufrechterhaltung visueller Vorstellungen. Zudem wird eine Supervisionseinheit - *zentrale Exekutive* genannt - (vgl. Abschnitt 5.4 auf Seite 87), den beiden Subsystemen übergeordnet (vgl. Engelkamp & Zimmer, 2006; Goschke, 1996; Seidler-Brandler, 2002).

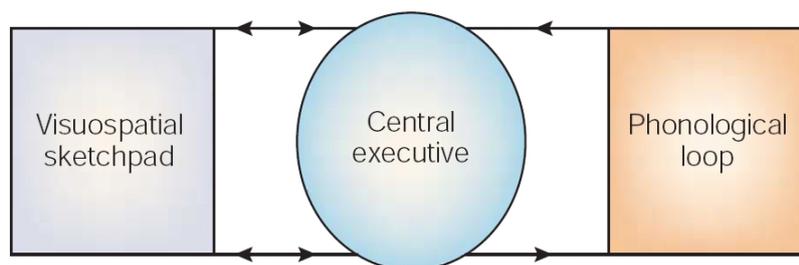


Abbildung 5.14: Das Modell geht nach Baddeley & Hitch (1974) von einem Kontrollsystem, der zentralen Exekutive („Central executive“) aus, welches zwei Subsysteme, den visuellen Skizzenblock („Visuospatial sketchpad“) und die phonologische Schleife („Phonological loop“) kontrolliert (Baddeley, 2003, 830).

Nach Engelkamp & Zimmer (2006, 238ff) fällt die Beschreibung des visuell-räumlichen Skizzenblocks bei Baddeley (1986, 1997) äußerst spärlich aus. Denn er sei lediglich für das Generieren und Manipulieren visueller „Images“ bzw. Re-

präsentationen zuständig und funktioniere analog zur phonologischen Schleife (vgl. Engelkamp & Zimmer, 2006, ebd.).

Die phonologische Schleife setzt sich ihrerseits aus zwei Komponenten zusammen. Wie in Abbildung 5.15 dargestellt, besteht die phonologische Schleife aus einem (passiven) phonologischen Speicher („*phonological store*“) und einem (aktiven) artikulatorischen Kontrollprozess, welcher auf der Funktion einer inneren Sprechhandlung beruht („*articulatory control process based on inner speech*“ (Baddeley, 1997, 52). In diesen artikulatorischen Kontrollprozess können auch geschriebene Wörter eingelesen werden (s. Engelkamp & Zimmer, 2006, 233), wobei ohne eine Reaktivierung der sprachlichen Informationen im phonologischen Speicher alle auditiven Informationen nach etwa 1,5 bis 2 Sekunden zerfallen.

Viele Studien zur phonologischen Schleife beziehen sich somit vor allem auf sprachbezogene Untersuchungen. So führten Baddeley et al. (1981) Experimente mit Lese-Aufgaben durch, während Logie & Baddeley (1987) ihre Probanden zählen ließen und Versuchsreihen zum Spracherwerb durchführten (Baddeley et al., 1998; s. auch Engelkamp & Zimmer, 2006, 232-235: „phonologischer Ähnlichkeitseffekt“, „Effekt irrelevanter Sprache im Hintergrund“, „Wortlängeneffekt“ und „Effekt der artikulatorischen Unterdrückung“).

Inwiefern die phonologische Schleife auch an Verarbeitungsprozessen nicht-sprachlicher akustischer Informationen beteiligt ist, wurde erst in jüngerer Zeit eingehender untersucht. Nach Seidler-Brandler (2002) sei die phonologische Schleife des Arbeitsgedächtnisses ebenfalls an kurzzeitigen Merkvorgängen von Zeit- und Rhythmusinformationen beteiligt (Grube, 1996, 1998, 1999; dazu auch Salamé & Baddeley, 1989).

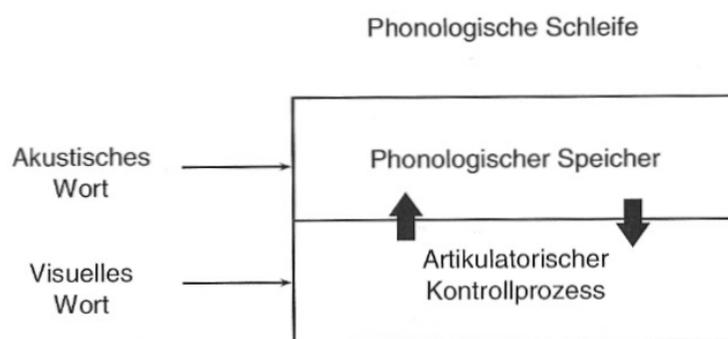


Abbildung 5.15: Aufbau der phonologischen Schleife (nach Baddeley, 1986, in: Engelkamp & Zimmer, 2006, 233).

Das Modell des musikalischen Arbeitsgedächtnisses von Berz (1995) geht demgegenüber davon aus, dass es neben der phonologischen Schleife auch eine separate Schleife für melodische Inhalte geben müsse, die weitestgehend analog zur phonologischen Schleife arbeite (vgl. dazu auch Snyder, 2000; Müllensiefen, 2004).

## Dual-Task

Bei der gleichzeitigen Bearbeitung zweier Aufgaben (Dual-Task bzw. Doppelaufgabe) wird die jeweilige Leistung in der Regel eingeschränkt, da die Bewältigung der Doppelaufgabe einen „fortlaufenden, schnellen Wechsel zwischen beiden Aufgaben“ verlangt und zugleich eine Konkurrenz um „beanspruchte spezifische Verarbeitungsprozesse“ entsteht (Kluwe, 2006, 550f). Es kommt zu Interferenzen, da sich die beiden Aufgaben gegenseitig stören (s. dazu auch Engelkamp & Zimmer, 2006, 366ff).

Die Einschränkung der Leistung bei Zweitaufgaben kann jedoch unter bestimmten Umständen und bei entsprechender Übung verringert werden (Brown & Bennett, 2002).

In Bezug auf rhythmisches Timing mittels Tapping haben Experimente mit Zweitaufgaben („dual-task-technique“, vgl. Baddeley & Logie, 1999) gezeigt, dass zwei wesentliche Prozesse für die Synchronisation zu einem externen Signal verantwortlich sind (Miyake et al., 2004): Bei Synchronisationsaufgaben zu einem Metronom mit einem Interstimulus-Onset-Interval (IOI)  $< 1500$  ms wird das Tappingverhalten bzw. der negative Synchronisationsfehler (bei dem der Tap-Onset vor dem auditiven Stimulus-Onset erfolgt) durch eine Zweitaufgabe (nach Baddeley, 1986) kaum oder gar nicht beeinflusst, während sich bei Synchronisationsaufgaben mit IOI  $> 1800$  ms (IOI  $< 4000$  ms) der Synchronisationsfehler verändert. Miyake et al. (2004) schließen daraus, dass bei Tappingaufgaben mit IOI  $< 1500$  ms (IOI  $> 450$  ms) automatisierte Prozesse (*low level*) eine Rolle spielen, die durch Prozesse im Arbeitsgedächtnis (*high level*) nicht beeinflusst werden. Bei Tappingaufgaben mit IOI  $> 1800$  ms werden für das Timing nach Miyake et al. (2004) hingegen Ressourcen des Arbeitsgedächtnisses benötigt, die im Falle einer Zweitaufgabe nicht mehr zur Verfügung stehen.

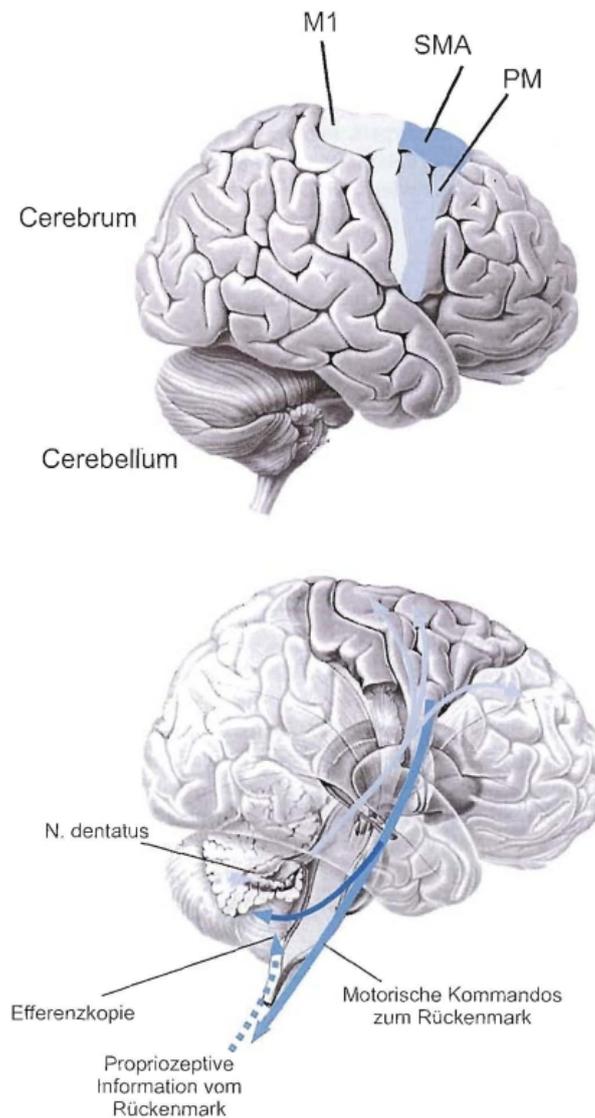


Abbildung 5.10: **a.** Lateralansicht von Cerebrum (Großhirn) und Cerebellum (Kleinhirn). Die Zellen des primärmotorischen Kortex (M1) liegen im präzentralen Gyrus (Brodmann-Area 4). Anterior zu M1 liegen der prämotorische Kortex (PM) und die supplementär-motorische Area (SMA), deren Neurone auf M1 projizieren, aber auch direkte Projektionen zu spinalen Neuronen haben. **b.** Die zerebrozerebelläre Funktionsschleife. Die efferenten Signale der Neurone der motorischen Kortex gelangen auf direktem (kortikospinaler Trakt) oder indirektem Wege (Balbus) zu den Motoneuronen im Rückenmark. Eine Kopie dieser efferenten, motorischen Kommandos wird über die pontinen Kerne zum Kleinhirnkortex geleitet. Das Kleinhirn wiederum schickt efferente Signale über die tiefen Kleinhirnrkerne (z.B. N. dentatus) vornehmlich an M1 und PM, aber auch an Regionen im Temporallappen sowie im präfrontalen Kortex bzw. Assoziationskortex (Konczak, 2006, 627).

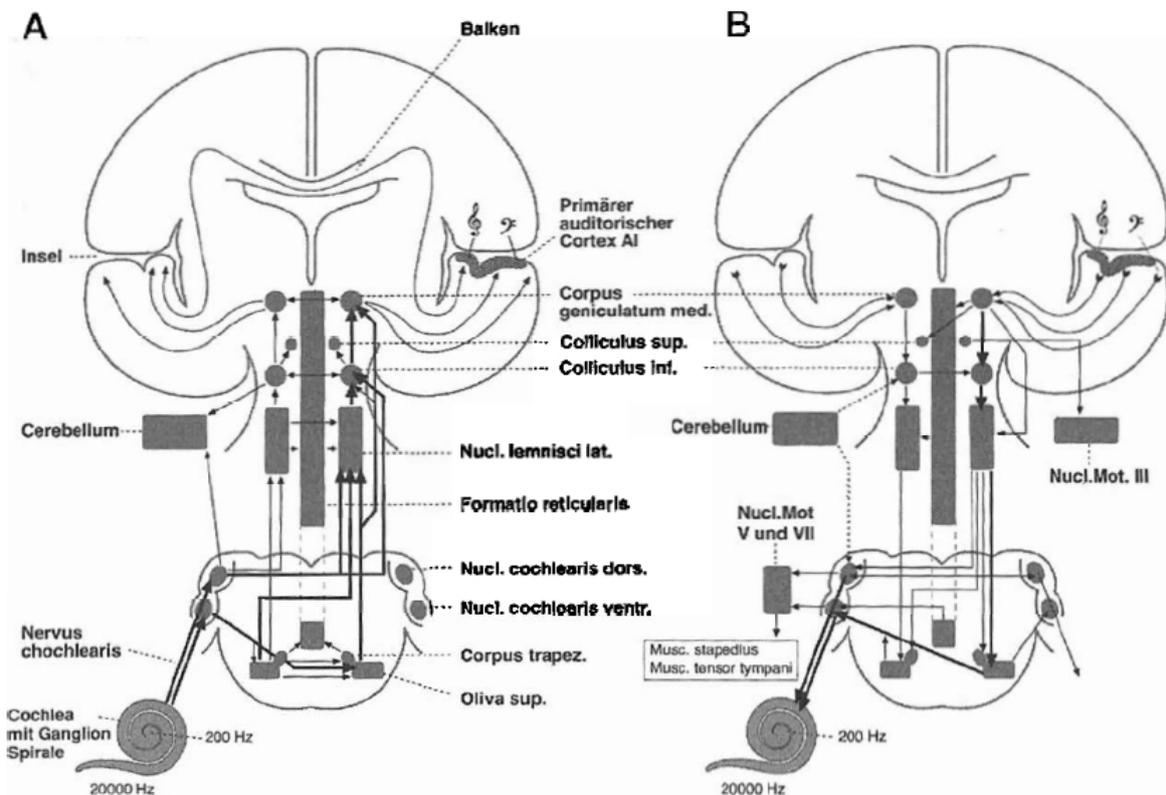


Abbildung 5.11: Schematische Darstellung der wichtigsten afferenten (A) und efferenten (B) Bahnen, Umschaltkerne und Projektionsgebiete der zentralen Hörbahn (Steinberg, 2005).

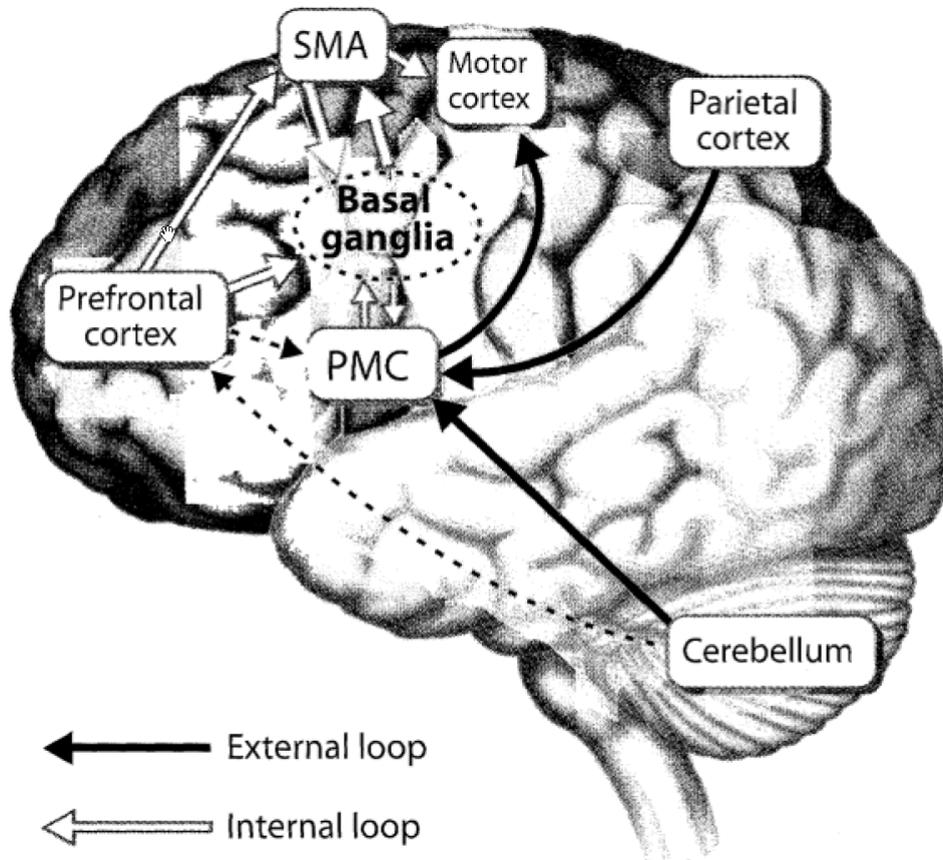


Abbildung 5.13: In seiner „*internal-external control hypothesis*“ unterscheidet Goldberg (1985) zwei unterschiedliche Verarbeitungswege der Bewegungskontrolle. Bei der sog. externen Verarbeitungsschleife („*External loop*“) wird die Ausführung von Bewegungen vor allem durch (sensorische) Informationen von Außen geführt, während bei der internen Verarbeitungsschleife („*Internal loop*“) überwiegend interne Informationen zur Bewegungskontrolle verwendet werden. Die externe Verarbeitungsschleife, welche unter anderem das Cerebellum, den parietalen Kortex und den lateralen prämotorischen Kortex beinhaltet, dominiert während der Ausführung extern geführter Bewegungen. Die interne Verarbeitungsschleife, welche vor allem den präfrontalen Kortex, die Basalganglien und die supplementär-motorische Area (SMA) einbezieht, dominiert während der Ausführung selbstgeführter und gut gelernter Bewegungen (Gazzaniga et al., 2002, 471).

# Kapitel 6

## Zwei-Wege-Modell

„Skilled movement is teleological in the sense that it aims at targets in space and time.“ (Shaffer, 1982, 109)

Eine der wichtigsten Erkenntnisse jüngster Rhythmusforschung ist die Unterscheidung zwischen (eher) automatisiert ablaufenden Synchronisationsprozessen und (eher) kognitiv kontrollierten Timingprozessen (Repp, 2005, 987).

Nach einer Metastudie von Lewis & Miall (2003a) kann man inzwischen sogar zwei funktional sehr unterschiedliche (distinkte) Prozeduren der Rhythmusverarbeitung unterscheiden, die wie folgt charakterisiert werden sollen: Ein Prozessweg steht für die implizite und automatisierte Timing-Kontrolle auf unterer Ebene, während der andere Prozessweg für die explizite Verarbeitung zeitlicher Informationen auf höherer Ebene steht (vgl. dazu auch Fischer & Nusseck, 2006; Miyake et al., 2004). Beide funktionieren teils parallel, teils in konkurrierender Weise (s. Lewis & Miall, 2003a).

Nach Krampe et al. (2005) könnte man zwischen einem „low-level timing mechanism“ und einem „higher level sequencing mechanism“ differenzieren.

Thaut (2005) nimmt an, dass unterschiedliche Netzwerke auf subkortikaler Ebene für unbewusste und auf kortikaler Ebene für bewusste sensomotorische Informationsverarbeitung aktiv werden (Thaut, 2005, 49). Aufgrund der hohen Präzision, Geschwindigkeit und Stabilität der auditiv-motorischen Transformationsprozesse rhythmischer Signale gehen Dakin & Thaut (2001) davon aus, dass unter anderem neuronale Netzwerke aktiv werden, die bereits auf sehr frühen Stufen der Informationsverarbeitung direkte sensomotorische Verbindungen gewährleisten (Dakin & Thaut, 2001, 156). Diese engen Verknüpfungen scheinen auch aus physiologischer Sicht gegeben, denn auf subkortikaler Ebene bestehen bereits enge Verbindungen zwischen einzelnen Stationen der auditiven Verarbeitungswege der zentralen Hörbahn und dem Kleinhirn (Cerebellum): Wie in Abbildung 5.11 auf Seite 95 dargestellt, projiziert neben dem Nucleus cochlearis (dorsal) auch der Umschaltkern Colliculus inferior bereits Signale zum Cerebellum, während beide Kerne auch in anderer Richtung Signale vom Cerebellum erhalten (Casseday & Covey, 1995). Die genauen neuronalen Verarbeitungsmechanismen bei Timingaufgaben sind bisher jedoch noch

nicht genau beschrieben (Karmarkar & Buonomano, 2007).

Studien von Thaut (2005) haben zeigen können, dass gehörte Rhythmen stabile und äußerst präzise intervallbasierte Zeitschablonen erzeugen, welche auf diesem Wege direkt an motorische Strukturen weitergeleitet werden (dazu auch Thaut et al., 1998a; Large et al., 2002). Das motorische System reagiert sehr sensibel und bereits unterhalb der bewussten Wahrnehmung auf die eintreffenden Signale: „motor entrainment to rhythmic auditory stimuli can be induced by directly influencing motor effectors either in the cortex or at spinal levels“ (Molinari et al., 2003, 317). So nutzt Thaut (2005) diesen Weg der Rhythmusverarbeitung zur Rehabilitation von Parkinson- und Schlaganfallpatienten: Er aktiviert diese direkten Verschaltungen zwischen Sensorik und Motorik durch Musik und setzt den Entrainmentprozess für die Verbesserung der Mobilität seiner Patienten ein.

Weitere neurophysiologische Befunde weisen neben den Basalganglien vor allem das Kleinhirn als „sensorisch-motorisches Umsetzungsglied“ (Roth, 2001, 407) und damit als eine der wichtigsten Schnittstellen zwischen Sensorik und Motorik aus (vgl. dazu auch Bower & Parsons, 2003; Hazeltine et al., 1997; Thaut, 2005). Für einen aktuellen Überblick neurowissenschaftlicher Untersuchungen zum Thema Timing, motorische Kontrolle und sensomotorische Synchronisation sei an dieser Stelle auf Karmarkar & Buonomano (2007) und Repp (2005, 983ff) verwiesen.

Zur Veranschaulichung der Erkenntnisse soll ein Modell genutzt werden, das Pribram (1991) aus physiologischen Daten ableitete und von Bruhn (1997, 2000a, 2005b) auf die Musikverarbeitung übertragen wurde.

Die Verarbeitung rhythmischer Informationen setzt sich aus verteilten (distribuierten) Prozeduren auf verschiedenen kognitiven Ebenen zusammen. Ein integratives Modell der rhythmischen Timing-Kontrolle berücksichtigt die enge Verknüpfung von Wahrnehmung und Handlung sowie die bewussten kognitiv kontrollierten und (präattentiven) automatisierten Verarbeitungswege.

**Kognitive Ebene:** Der erste Weg beinhaltet explizite Vorhersagen und zielorientierte Handlungen auf höherer kognitiver Ebene.

**Implizite Ebene:** Der zweite Weg besteht aus impliziter automatisierter Verarbeitung der Sinnesinformationen.

Erst durch die Beschreibung des Zusammenspiels beider Verarbeitungswege lässt sich das Timing-Verhalten beim Musizieren (besser) verstehen und auf *echte* musikalische Situationen übertragen.



Mustererkennungprozessen unterzogen (s. Bregman, 1993, „*auditory scene analysis*“ bzw. Kap. 2). Nach dieser ersten Stufe der „Stimulus-Erkennung“ werden die weitergeleiteten Informationen auf der nächst höheren Ebene der „*kognitiven Verarbeitung*“ (Bruhn, 2000a, 136ff) in parallel verlaufenden Prozeduren eingehender analysiert, beurteilt und auf ihre Relevanz für Handlungen geprüft (s. „Beurteilung“, „Verstehen“ und „Relevanz“ in Abbildung 6.1 auf der vorherigen Seite). „Verstehen“ („*comprehension*“ bei Pribram, 1991) steht hierbei für eine meist implizit angewendete Prozedur, bei der Wahrnehmungsobjekte identifiziert und zueinander in Beziehung gesetzt werden. Akustische Ereignisse werden im Zuge dessen z.B. zu musikalischen Einheiten zusammengefasst (vgl. Bruhn, 2000a, 140). In einer weiteren Prozedur der „Beurteilung“ („*familiarization and valuation*“ bei Pribram, 1991) werden die eingehenden Signale durch „Vergleichsprozesse mit gespeicherten Informationen (Gedächtnis)“ auf ihre Neuheit hin untersucht und bewertet (Bruhn, 2000a, 140).

Neben der konkreten Benennung bereits bekannter Ereignisse werden zudem „Emotionen wachgerufen, die mit diesem oder einem ähnlichen akustischen Erlebnis in Verbindung gebracht werden können“ (Bruhn, 2000a, 140). Die beschriebenen und unter den Begriffen „Verstehen“ und „Beurteilung“ zusammengefassten Prozeduren sind für die Wahrnehmung von Musik besonders wichtig, denn „Art und Differenziertheit der meist implizit, unbewusst angewandten Regelstrukturen über Musikstile und auch das deklarative, bewusstseinsfähige Wissen über Musik“ beeinflussen die Musikwahrnehmung maßgeblich, wie Bruhn (2000a, 141f) betont.

In einer weiteren Prozedur („Relevanz“) werden die eingehenden und vorverarbeiteten Umweltinformationen daraufhin geprüft, ob sie in Bezug auf die Vorbereitung von Handlungen eher irrelevant erscheinen oder Anlass geben zu Veränderungen („*irrelevance and innovation*“ bei Pribram, 1991). Die sich daraus möglicherweise ergebende Handlungsbereitschaft entsteht aus dem Zusammenspiel der parallel zueinander ablaufenden Prozeduren (s.o.), welche nach Bruhn auf dieser Stufe der Verarbeitung „nicht bewusstseinspflichtig, aber unter Umständen bewusstseinsfähig“ sind (Bruhn, 2000a, 141).

Darüber waltet eine zentrale Einheit mit exekutiven Funktionen, die dafür verantwortlich ist, „bewusstseinspflichtige“ Denkvorgänge und Prozeduren zu steuern („zentrale Steuerung“ bei Bruhn, 2000a, 142). Die Ausführung exekutiver Funktionen (s. Abschnitt 5.4 auf Seite 87) geht dabei mit der Lenkung der Aufmerksamkeit einher, indem z.B. das Bewusstsein auf Prozesse gerichtet wird. Die Frage nach der genauen Beschaffenheit und Bedeutung des Bewusstseins ist Inhalt großer Diskussionen verschiedener Fachrichtungen und soll an dieser Stelle nicht weiter erörtert werden. Zum Phänomen des menschlichen Bewusstseins sei hier auf folgende Literatur verwiesen: Dennett & Kinsbourne (1992), Dennett (1994) und Prinz (1996).

Die hierarchische Ordnung dieses Informationsverarbeitungsmodells soll nicht verdecken, dass auf allen oben beschriebenen „Ebenen der menschlichen Informationsverarbeitung“ stets „mehrere Verarbeitungsprozesse gleichzeitig zueinander ab-

laufen“ (Bruhn, 2000a, 137). Das Drei-Ebenen-Modell der menschlichen Informationsverarbeitung von Bruhn (2000a), auf das hier Bezug genommen wird, baut im Wesentlichen auf den physiologischen Erkenntnissen von Pribram (1991) auf (s. dazu auch Bruhn, 2000a, 141f).

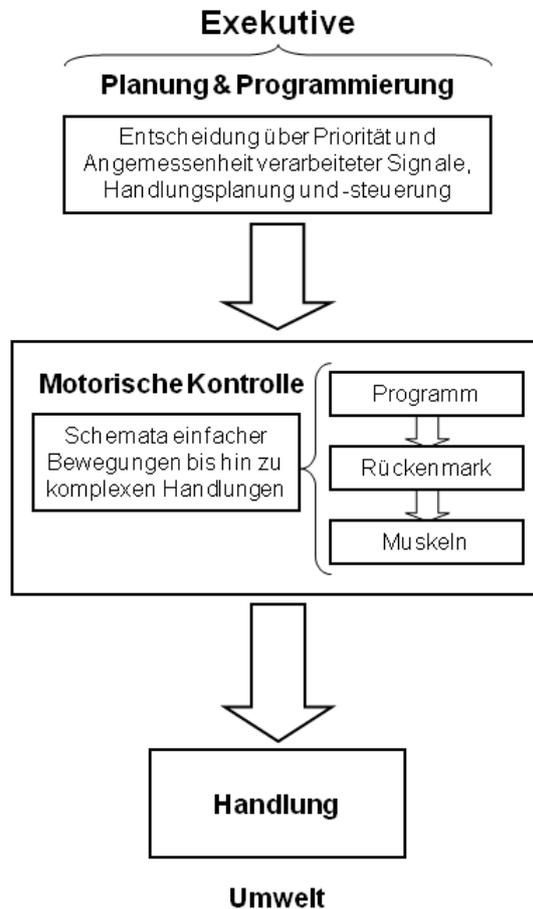


Abbildung 6.2: Stationen beteiligter Ebenen der Handlungs- und Bewegungskontrolle: Willkürliche Bewegungen werden zunächst auf der Ebene der zentralen Steuerung (Exekutive) geplant, wobei die generierten Bewegungsimpulse anschließend an die Bereiche der motorischen Kontrolle weitergeleitet werden.

Willkürliche Bewegungen werden auf der Ebene der zentralen Steuerung oder auch „Exekutive“ (s. Abschnitt 5.4 auf Seite 87) in Gang gesetzt, indem zunächst darüber entschieden wird, ob und wenn ja, welche Bewegungen zu welchem Zeitpunkt in Bezug auf ein Handlungsziel ausgeführt werden sollen. Im Gegensatz zu Handlungen sind Bewegungen hier als motorische Bestandteile einer Handlung zu verstehen, die nicht zielgerichtet sein müssen (vgl. Elsner & Prinz, 2006, 286). Nach der Entscheidung über Priorität und Angemessenheit vorverarbeiteter Informationen und eingegangener Signale (Reize aus der Umwelt) auf der einen Seite und der Abwägung bezüglich bestehender Intentionen und Ziele auf der anderen Seite

übernimmt die zentrale Steuerung im weiteren die Planung und Programmierung von auszuführenden Bewegungen und übergibt diese Handlungsanweisungen an Bereiche der motorischen Kontrolle weiter. Dort werden gespeicherte Bewegungsprogramme ausgewählt, koordiniert und zur Ausführung über das Rückenmark an die entsprechenden (motorischen Einheiten) Muskeln weitergeleitet.

## 6.2 Kreislauf von Wahrnehmung und Handlung

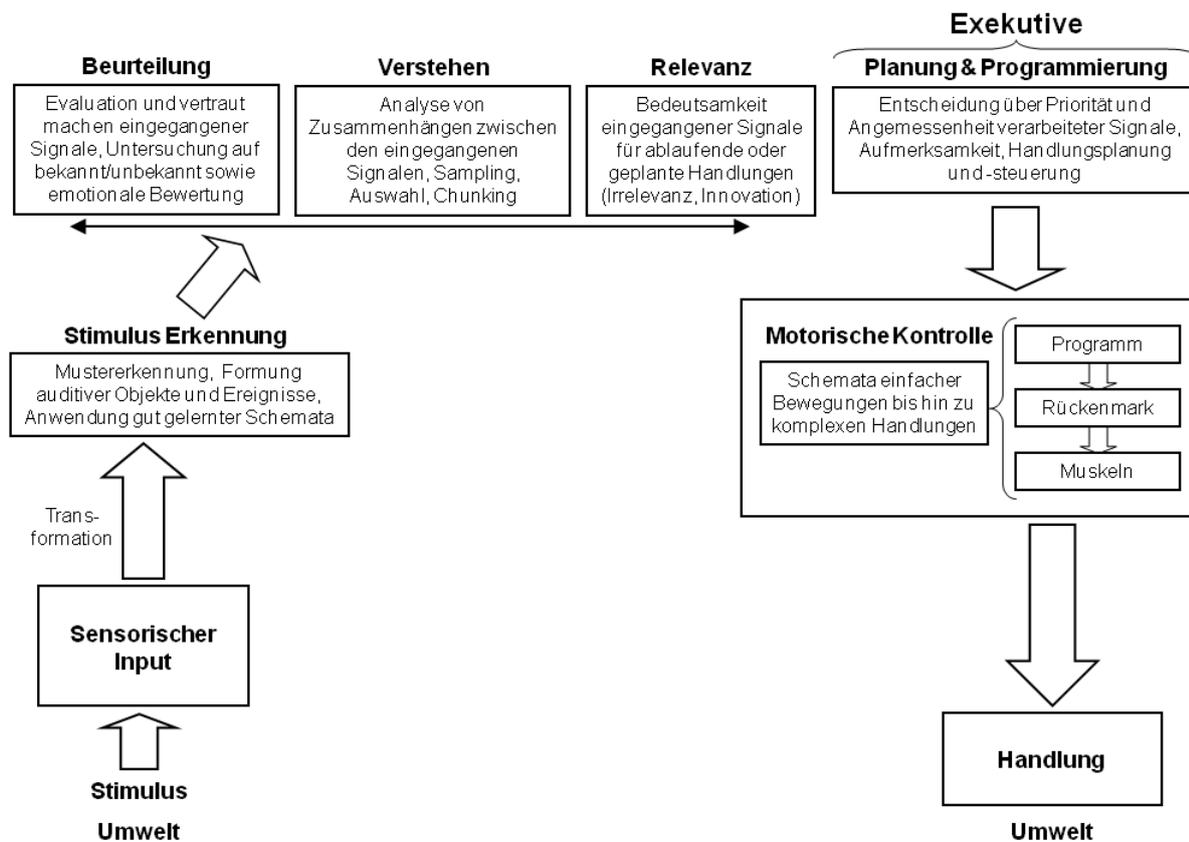


Abbildung 6.3: Kreislauf von Wahrnehmung und Handlung: Das ursprüngliche Modell nach Pribram (1991) wurde an dieser Stelle durch die Komponenten „Planung & Programmierung“ und „Motorische Kontrolle“ ergänzt.

Durch die Kombination von Wahrnehmungsseite und Ausführungsseite wird ersichtlich, welche kognitiven Teilprozesse von der Wahrnehmung eines Reizes bis zur Reaktion bzw. Handlungsausführung (hier im Sinne eines Open-Loop-Modells) beteiligt sind (s. Abb. 6.3). Das Modell entspricht in seinen Grundzügen dem „expanded information-processing model“ von Schmidt & Lee (1999, 44f), welches zwischen „Stimulus“ (Input) und „Movement“ (Output) drei sequenziell (seriell) arbeitende Module annimmt: „Stimulus identification“, „Response selection“, „Response programming“ (s. Schmidt & Lee, 1999, 43ff).

## 6.3 Kontrolle und automatisierte Bewegungseinleitung

Wie in den vorangestellten Abschnitten erläutert, sind die kognitiven Teilprozesse der Rhythmusverarbeitung unterschiedlichen Verarbeitungsebenen zuzuordnen (s. dazu Abschnitt 6.1 auf Seite 99). Während die Ebene der sensorischen Eingabe und Stimulus-Erkennung (psychophysische Konfiguration) auf der einen und die motorische Kontrolle auf der anderen Seite dem Bewusstsein nicht zugänglich sind und automatisiert ablaufen, sind die Prozesse auf höheren kognitiven Ebenen zumindest bewussteinfähig und im Falle der zentralen Steuerung (Exekutive) sogar bewussteinspflichtig. Es lassen sich mithin zwei deutlich voneinander trennbare Ebenen der kognitiven Verarbeitung unterscheiden, die im Folgenden genauer dargestellt werden sollen.

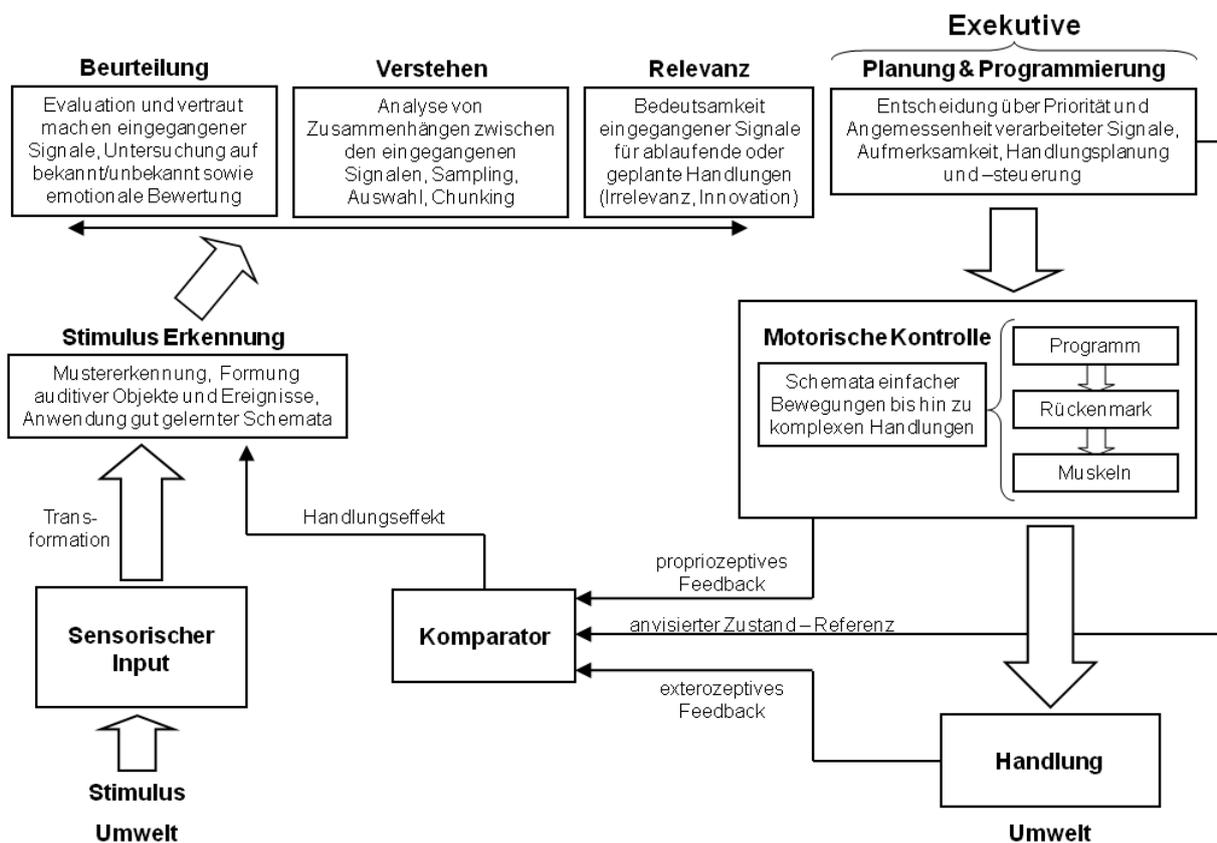


Abbildung 6.4: Explizite Timing-Kontrolle: Durch propriozeptionelles und exterozeptives Feedback (in Form eines inneren und eines äußeren Regelkreises) in Kombination mit einer Referenz-Komponente zur expliziten Antizipation anvisierter Zustände und Ziele wird die explizite Timing-Kontrolle gewährleistet.

Der Prozessweg der kognitiv kontrollierten Verarbeitung und expliziten Timing-Kontrolle setzt sich zunächst aus dem oben beschriebenen Kreislauf von Wahrnehmung und Handlung zusammen, wurde jedoch im Gegensatz zu der vorange-

stellten Ausführung des Modells (s. Abschnitt 6.2 auf Seite 102) durch Feedback-Komponenten (propriozeptives und exterozeptives Feedback) ergänzt und somit um eine Closed-loop-Variante nach Vorbild des „expanded closed-loop model for movement control“ von Schmidt & Lee (1999, 115) sinnvoll erweitert. Darin ist eine Komponente enthalten, die im Sinne der expliziten Antizipation (s. Abschnitt 5.1 auf Seite 79) eine weitere Kontrollinstanz darstellt, durch die das Erreichen anvisierter Ziele überprüft wird (s. „*anvisierter Zustand - Referenz*“ Abb. 6.4 auf der vorherigen Seite und „*reference of correctness*“ bei Schmidt & Lee, 1999, 115). Die antizipierten Zielvorgaben und das Feedback werden dabei in eine Art Regler-Modul miteinander verglichen („Komparator“), um den Effekt einer Bewegung oder Handlung zu ermitteln. Das Ergebnis dieses Abgleichs wird dem Kreislauf von Wahrnehmung und Handlung zur Regulation auszuführender Bewegungen und Handlungen (als „Handlungseffekt“) wieder zugeführt, um mögliche Korrekturen und Verbesserungen von (Teil-)Bewegungen zu ermöglichen (s. „closed-loop control“ in Abschnitt 5.2 auf Seite 83). Erst durch die Einbindung dieser Feedbackschleifen lässt sich adaptives und timing-genaues Verhalten adäquat beschreiben. Musizieren erfordert eine komplexe Integrationsleistung verschiedener kognitiver Systeme, die, wie hier dargestellt, teils seriell (sequentiell) und teils parallel (simultan) ablaufen. Auch wenn dabei eine große Anzahl gelernter, automatisierter Prozesse in Anspruch genommen wird, handelt es sich hierbei immer um planvolles, zielgerichtetes Handeln. Das Handlungsziel ist dabei stets das Zielen auf *virtuelle Zeitpunkte*, welche den jeweils optimalen/idealen Zeitpunkt für eine bestimmte Note, ein Klangereignis oder auch einer Pause im Sinne der musikalischen Sinnstruktur (in Form einer mentalen Vorlage) markieren. Diese teils aus Gedächtnisinhalten, teils spontan generierte mentale Vorlage gibt zunächst den Handlungsplan vor, der mit den anderen Prozeduren auf der Ebene der kognitiven Verarbeitung abgeglichen und in Einklang gebracht wird, bevor eine durch die Exekutive gesteuerte Planung und Programmierung gestartet wird. Sensorische Informationen (einschließlich der Feedbackinformationen) werden hierbei genutzt, um Handlungsausführungen zu optimieren und zu kontrollieren.

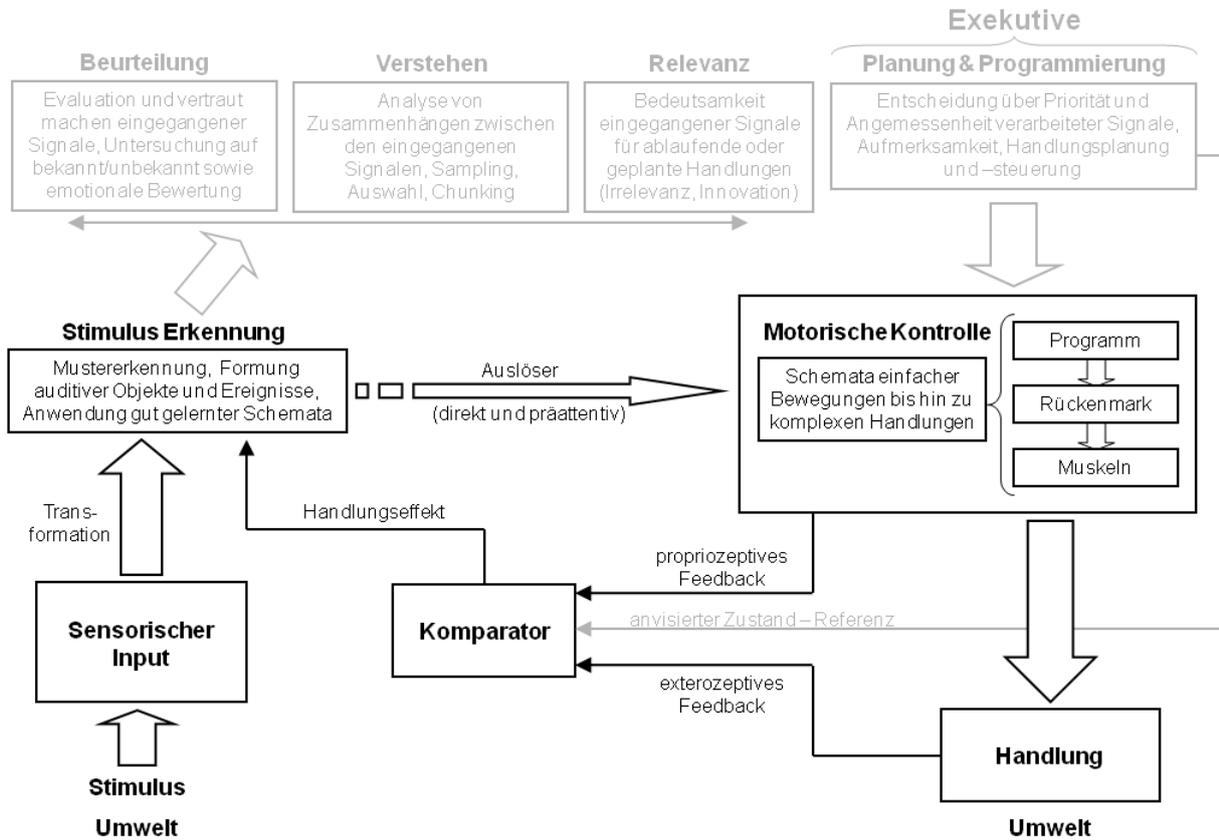


Abbildung 6.5: Präattentive Rhythmusverarbeitung: Zusätzlich zur bewusstseinsfähigen kognitiven Verarbeitung der expliziten Timing-Kontrolle (hier grau dargestellt) verläuft eine direkte und sehr schnelle Verbindung (Auslöser) auf subkortikaler Ebene von der Stimulus-Erkennung zum Kontrollzentrum für die Motorik.

Wie in der Einleitung zu diesem Kapitel angeführt, deutet in Bezug auf die Rhythmusverarbeitung vieles auf das Vorhandensein von Bottom-Up-Prozessen hin, die quasi direkt handlungsleitend wirken (s. dazu auch „Entrainment“ in Kap. 3 auf Seite 45), indem durch eine sehr enge Verschaltung von Sensorik und Motorik automatisierte und teils autonome Prozesse in Gang gesetzt werden (vgl. Thaut, 2005). Abbildung 6.5 zeigt, wie die eingehenden Signale bereits auf der präattentiven Ebene der Stimulus-Erkennung (psychophysische Konfiguration) direkt auf die für die motorische Kontrolle verantwortlichen Komponenten einwirken. Die auf diesem Wege ausgelösten Bewegungen können sowohl open-loop als auch closed-loop-Charakter haben, wobei das motorische System und die damit verbundene taktil-propriozeptionelle Feedbackkontrolle dominieren. Michon wies bereits 1985 auf die Möglichkeit einer sehr schnellen, parallelen Rhythmusverarbeitung, die der kognitiven Kontrolle nicht zugänglich ist, hin (Michon, 1985). Nun weisen zudem neurophysiologische Befunde auf frühe und schnelle Verschaltungen in subkortikalen Bereichen zwischen dem Colliculus inferior und dem Kleinhirn (vgl. Abschnitt 5.3 auf Seite 84) als eines der wichtigsten Zentren motorischer Kontrolle (s. Steinberg, 2005; Thaut, 2005, 47).

## 6.4 Zwei-Wege-Modell der Rhythmusverarbeitung

Im Ganzen ergibt sich aus den vorangestellten Überlegungen ein integratives „Zwei-Wege-Modell der Rhythmusverarbeitung“ („*integrative dual-route model of rhythm perception and production*“) im Sinne des „*parallel distributed processing*“ (nach Rumelhart et al., 1986; McClelland et al., 1986).

Es verdeutlicht die verschiedenen Verarbeitungsebenen, indem es neben den *bewusstseinsfähigen* und den darüber ablaufenden, *bewussten* Monitoring-Prozessen auf höheren kognitiven Ebenen auch die parallel dazu ablaufenden, *vorbewussten* Monitoring-Prozesse auf unteren Ebenen berücksichtigt. Diese *vorbewussten*, *subkortikal* angesiedelten und teils *autonom* ablaufenden Prozesse der Rhythmusverarbeitung können durch die dargestellten kognitiven Prozeduren höherer Ebenen dominiert werden (vgl. Abschnitt 5.4 auf Seite 90).

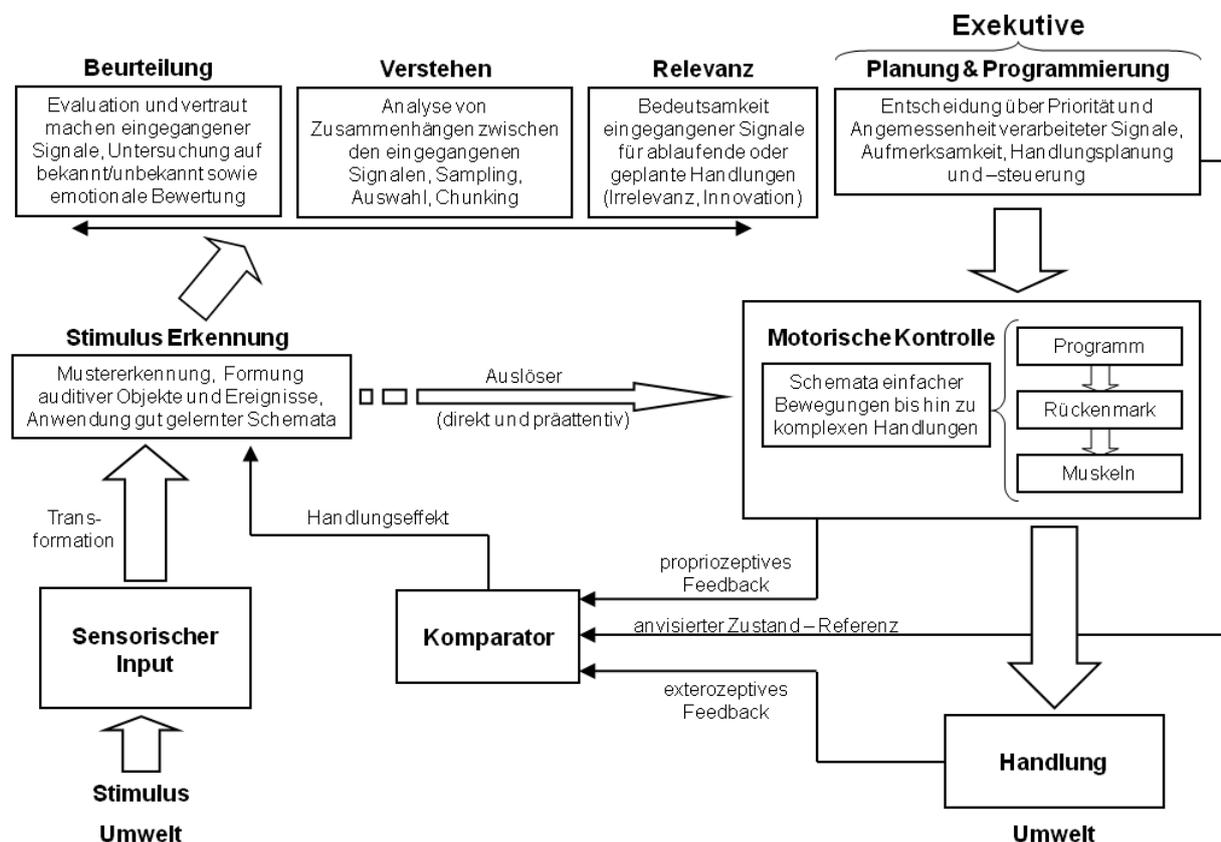


Abbildung 6.6: Das integrative Zwei-Wege-Modell der Rhythmusverarbeitung

Zwar spielen lang eingeübte und automatisierte motorische Programme oder Schemata beim Musizieren (Rhythmus und Timing) eine erhebliche Rolle, doch können die außerordentlich präzisen und fein abgestimmten Bewegungen beim Timing nicht allein durch eine lediglich auf sensorischer (und *vorbewusster*) Ebene stattfindenden Antizipation erklärt werden. Anpassung und Timingpräzision sind in besonderem Maße von den musikalischen Parametern und Regeln der jeweiligen

Musik abhängig und verlangen eine stete kognitive Kontrolle bei der Ausführung der Bewegungen.

Musikalisches Timing setzt sich mithin aus einer Kombination rhythmisch-antizipatorischer Verarbeitungswege zusammen, welche zielorientierte Handlungen einerseits und automatisierte Antizipationen andererseits beinhaltet. Das teleologische Prinzip der zielorientierten Antizipation mithilfe gut gelernter Bewegungsabläufe dient hierbei dem zeitlich sehr präzisen, sehr fein abgestimmten Zielen auf virtuelle Zeitpunkte (vgl. Shaffer, 1982, 109).

Das Zwei-Wege-Modell dient der Überprüfung wichtiger Unterscheidungen in der Forschung zu Rhythmus und Timing:

1. Tapping-Bewegungen gehören zu den *einfachen* Bewegungen, während (präzises) Timing beim Musizieren in der Regel auf (sehr) komplexen Bewegungen beruht.
2. Tapping-Bewegungen gehören (bei mäßigem und schnellem Tempo) zu den *automatisierten* Bewegungen, während präzises Timing beim Musizieren *bewusstseinspflichtige* Prozesse verlangt.
3. Tapping-Bewegungen entsprechen den Eigenschaften *ballistischer* Bewegungen, während musikalische (gelernte) Bewegungen beim Musizieren vielmehr die Eigenschaften *geführter* Bewegungen aufweisen, die einer ständigen Regelung und einer hohen Ziel- und Ablaufpräzision unterliegen.
4. Tapping-Bewegungen sind überwiegend aufgaben- und situationsabhängig bezüglich der Anforderungen der Bewegung, also eher *fremdbestimmt*, während präzises Timing beim Musizieren weitestgehend *selbstbestimmt* abläuft (vgl. dazu auch Birklbauer, 2006, 26f).

Das Zwei-Wege-Modell kann das Phänomen des negativen Synchronisationsfehlers bei Tapping-Aufgaben durch einen neuen integrativen Ansatz erklären:

Der negative Synchronisationsfehler könnte aus Laufzeitunterschieden verschiedener kognitiver Verarbeitungswege entstehen. Während die Rhythmusverarbeitung auf unteren (subkortikalen) Ebenen mit seinen sehr schnellen Verbindungen zwischen Sensorik und Motorik stattfindet, werden parallel dazu auf höheren kognitiven Ebenen sensomotorische Informationen verarbeitet, die eine längere Verarbeitungszeit benötigen.

Die motorische Handlungsausführung wird also zunächst auf unterer Ebene prä-attentiv eingeleitet, während die kognitive Verarbeitung (auf höheren Ebenen) beim Durchlaufen dieses schnelleren Verarbeitungsweges *nicht ausgeschaltet* ist, sondern dem handelnden Subjekt als Beobachtungsinstanz zur Verfügung steht (monitoring).

Die Beobachtungsinstanz ist der Ausführung gegenüber jedoch verzögert und kann auf den Ablauf der automatisiert eingeleiteten Handlungssequenz nur begrenzt Einfluss nehmen. Der über die kognitive Verarbeitung generierte Handlungsimpuls

kommt beim motorischen System gewissermaßen *zu spät* an und trifft auf die Efferenzkopie der bereits eingeleiteten Bewegung.

Ist der Zugriff auf die Efferenzkopie einer Bewegung und damit auf die unbewusst vorgenommenen Korrekturen im motorischen System durch Vorsatzbildung aufgrund neuer bzw. modifizierter Handlungsziele möglich, so wird auch eine neue Interpretation des Phänomens des negativen Synchronisationsfehlers bei Tapping-Aufgaben möglich. Die stereotypen Bewegungsabläufe beim Synchronisationstapping zu einem vorgegebenen Beat eines Metronoms sind äußerst einfach zu erlernen und verlaufen daher meist automatisiert ab.

Auf dem Weg der Einflussnahme über die Reafferenz im motorischen System wird der Ablauf des motorischen Schemas aufgrund des *zu spät* eintreffenden Handlungsimpulses der kognitiven Verarbeitung *beschleunigt*. Dies führt dazu, dass die reale Handlungsausführung beim Tapping zu früh erfolgt (negativer Synchronisationsfehler). Dieses Tappingverhalten manifestiert sich auf der Ebene automatisierter Bewegungssteuerung, sodass für die weitere Koordination der Tapping-Bewegungen kaum Aufmerksamkeit erforderlich erscheint. Mithilfe des Reafferenzprinzips ist es somit möglich, den Zeitschätzungsfehler (Wohlschläger & Koch, 2000) des Gehirns zu erklären.

In diesem Sinne muss der negative Synchronisationsfehler als typisches Merkmal für die automatisierte Rhythmusverarbeitung betrachtet werden.

Der empirische Teil der Arbeit widmet sich mithin der Untersuchung des Synchronisationsverhaltens bei Experten (Schlagzeugern), welche gelernt haben, die automatisierte Ausführung rhythmischer Bewegungen über kognitive Verarbeitungsverfahren höherer Ebenen zu kontrollieren bzw. zu dominieren, um der Tendenz des „*Zu-früh-seins*“ der automatisiert ablaufenden Prozesswege entgegenzuwirken. Eine der zentralen Fragen ist hierbei, ob und inwieweit sich die zwei unterschiedlichen Prozesswege der Rhythmusverarbeitung innerhalb der experimentellen Untersuchung (mithilfe eines Dual-Task-Paradigmas) dissoziieren lassen.

**Teil II**

**Empirische Untersuchung**



# Kapitel 7

## Experiment

Tapping-Experimente bieten die Möglichkeit, die zugrunde liegenden Prozesse beim Ausführen von timing-genauen Handlungen besser zu verstehen. Es ist davon auszugehen, dass diese Timing-Prozesse auch bei der Ausführung komplexer Rhythmusproduktionen, z.B. beim Musizieren, wirksam sind.

Im Sinne des „Zwei-Wege-Modells für Rhythmusverarbeitung“ (s. Abschnitt 6.4 auf Seite 106) sind daran vermutlich unterschiedliche neuronale Verarbeitungswege beteiligt.

Experimente mit Zweitaufgaben (vgl. Abschnitt 5.4 auf Seite 93) haben bereits zeigen können, dass zwei wesentliche Prozesse für die Synchronisation zu einem externen periodischen Puls (isochrone Folge von Beats) verantwortlich sind: Bei Synchronisationsaufgaben zu einem Metronom mit einem Interstimulus-Onset-Interval (ISI bzw. IOI) kleiner als 1500 ms ist nach bisherigem Kenntnisstand das Tappingverhalten bei musikalischen Laien durch eine Zweitaufgabe kaum oder gar nicht beeinflussbar, während sich der Synchronisationsfehler bei Synchronisationsaufgaben mit IOI größer als 1800 ms ( $IOI < 4000$  ms) verändert. Daraus wurde geschlossen, dass bei Tappingaufgaben mit IOI kleiner als 1500 ms (und  $IOI > 450$  ms) automatisierte Prozesse auf unteren Verarbeitungsstufen eine Rolle spielen, die durch Prozesse (vgl. Abschnitt 5.4 auf Seite 91) auf höheren kognitiven Ebenen nicht beeinflusst werden (s. dazu Abschnitt 5.4 auf Seite 93).

Da in bisherigen Experimenten ausschließlich Nicht-Musiker untersucht wurden, erwuchs zunächst die Frage, ob und inwieweit das Synchronisationsverhalten bei Schlagzeugern - also Timing-Experten - durch Zweitaufgaben bei IOI kleiner als 1000 ms beeinflusst wird. Die Annahme eines kognitiv kontrollierten und eines automatisierten Timingverhaltens in Bezug auf das „Zwei-Wege-Modell für Rhythmusverarbeitung“ soll bestätigt werden:

Es wird angenommen, dass es bei der Ausführung von Tappingbewegungen eines Monitorings der Bewegungsausführung bedarf, um der automatisierten Tendenz zur negativen Asynchronie entgegenzuwirken. Dieses Monitoring kann auch von Experten bei der Ausführung von Synchronisationsbewegungen nicht vollends automatisiert ablaufen, es bedarf einer bewussten Kontrolle (s. Prozessweg II aus dem

„Zwei-Wege-Modell“ in Abschnitt 6.4 auf Seite 106). Wird nun das Monitoring des Prozesswegs II durch eine Zweitaufgabe gestört, erfolgt die Tappingkontrolle über die automatisierte Verbindung der Prozesswege I & II und der negative Synchronisationsfehler nimmt zu.

Folgende Hypothesen wurde daraus abgeleitet:

## 7.1 Hypothesen und Operationalisierung

Erhalten Schlagzeuger (Experten) beim Synchronisationstapping zu einem Metronompattern zusätzlich eine Zweitaufgabe, die Aufmerksamkeit und Ressourcen des Arbeitsgedächtnisses beansprucht, so erhöht sich der negative Synchronisationsfehler deutlich (Hypothese A).

Es zeigt sich dabei für die Bedingungen mit IOI = 400 ms, IOI = 500 ms und IOI = 600 ms ein gleich großer Effekt der Zweitaufgabe (Hypothese B).

### Synchronisationstapping

In einem ersten Schritt sollen Abweichungen aus Zeitreihenanalysen von gesammelten Timestamps (gemessen in ms) aus Synchronisationsaufgaben abgeleitet werden. Dabei wird jeder Versuchsperson (Vp) ein Rhythmus in Form eines akustischen isochronen Metronom-Patterns mit IOI = 400, 500 oder 600 ms präsentiert, zu dem sich die Vp mittels Finger-Taps auf ein Eingabegerät synchronisieren soll. Eine besondere Schwierigkeit liegt dabei in der Präzision der Ausführung, denn die Vp erhält die Aufgabe die einzelnen Beats des Metronoms möglichst genau zu treffen. Je weiter die Zeitpunkte der Taps von dem durch das Metronom (Pacing Signal) vorgegebenen Position entfernt liegen, desto größer ist die vermutete Abweichung.

Ein Steuerungsprogramm übernimmt dabei das Vorspielen des Metronompatterns (Stimulus) und registriert gleichzeitig sowohl die Timestamps des Metronompatterns als auch die Timestamps der Fingertaps der Vpn millisekunden-genau, um sie in einer Datenmatrix zu speichern. Im Anschluss daran werden aus der erstellten Datenmatrix die Differenzen zwischen den Timestamps des Metronom-Patterns und der Fingertaps ermittelt.

Die Liste der ermittelten Differenzen bildet die Grundlage für weitere Analysen, bei denen die Häufigkeitsverteilungen, Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen berechnet werden. Die so errechneten Daten geben Auskunft über die Größe der Abweichung der Vpn und können im Anschluss zum Vergleich inter- und intraindividuelle Unterschiede herangezogen werden.

### Experten

Als Vpn werden Schlagzeuger gewählt, die z.B. durch ein Schlagzeugstudium sehr hohe Ansprüche an die Verarbeitung und Produktion von Rhythmen erfüllen und

daher als Rhythmus-Experten bezeichnet werden.

### **Zweitaufgabe und Pretest**

In einem weiteren Schritt werden die Vpn gebeten, zeitgleich zu der soeben beschriebenen Synchronisationsaufgabe (Erstaufgabe) eine weitere Aufgabe auszuführen, welche die Aufmerksamkeit von den notwendigen Monitoringprozessen abziehen soll (Dual-Task-Paradigma). Die Zweitaufgabe besteht darin, eine Liste von Wörtern zu lesen und sich zu merken. Die Wortliste besteht aus fünf bis sechs Wörtern und wird der jeweiligen Vp entweder vor oder auch während eines Tappingdurchlaufs auf einem Bildschirm eingeblendet. Zuvor wird getestet, inwieweit und wie gut die Vp die Zweitaufgabe (ohne Tapping) erfüllen kann (vgl. dazu Abschnitt 7.3 auf Seite 119).

Wie bei den oben beschriebenen Synchronisationsaufgaben werden die Tappingdaten in einer Matrix gespeichert, während die zu behaltenden Wörter jeweils am Ende eines Durchlaufs mit Zweitaufgabe abgefragt und notiert werden.

Hypothese A soll als bestätigt gelten, wenn sich unter der Bedingung einer Zweitaufgabe signifikante Veränderungen im Vergleich zu den Bedingungen ohne Zweitaufgabe ermitteln lassen.

Hypothese B soll als bestätigt gelten, wenn trotz Variation des Tempos: IOI = 400, 500 und 600 ms der gemessene Effekt vom Tempo unabhängig ist.

Zur Überprüfung der Hypothesen werden die Tapping-Daten der Kontrolldurchläufe ohne Zweitaufgabe mit den Tapping-Daten der jeweiligen Durchläufe mit Zweitaufgabe zunächst mittels *t*-Test und ANOVA miteinander verglichen. Das Ausmaß des ermittelten negativen Synchronisationsfehlers dient hierbei als Indikator dafür, ob die Vpn während der Ausführung der Tappingaufgabe durch die Zweitaufgabe gestört werden oder nicht.

## **7.2 Versuchsaufbau**

Für die Durchführung des Experiments wurde ein Setting zusammengestellt, das verschiedene Computerprogramme auf einem Standard PC mit MIDI-fähigen Musikinstrumenten kombiniert. Ein Ablaufprogramm übernimmt dabei sowohl die Steuerung der Software für Tapping-Experimente als auch die Koordination eines Programms für die zusätzliche Durchführung der Zweitaufgaben.

### **Ablaufprogramm**

Das Experiment wird durch ein spezielles, eigens für dieses Experiment in der Programmiersprache C erstelltes Ablaufprogramm gesteuert.

Vom Anfang („Press ENTER to start the experiment.“) bis zum Ende einer Session („Thank you!“) steuert das Ablaufprogramm alle wichtigen Teilprogramme: Es

sorgt jeweils für die Randomisierung der Reihenfolge der Versuchsdurchläufe (s. Abb. 7.7 auf Seite 120), koordiniert für jeden Durchlauf die Starts der Programme für die Worteinblendungen und die Tappingaufgaben (FTAP) und speichert zwischen den Durchläufen alle wichtigen Daten (Datum, Uhrzeit, Vpn-Nr., Durchlauf-Nr., Kondition, Liste der zu behaltenden Wörter und die komplette FTAP-Datei mit allen Tapping-Daten) eines Durchlaufs in einer Text-Datei.

Für die Tappingaufgabe übernimmt das Programm FTAP sowohl die Ausgabe des Pacing-Signals als auch die Zeitmessung und Speicherung der Tappingdaten (s. Abb. 7.1 auf der nächsten Seite). FTAP (F[eedback] oder F[lexible] Tap) sammelt MIDI-Daten (Timestamps) nachweisbar in Millisekunden und speichert diese nach Beendigung des jeweiligen experimentellen Durchlaufs in einer Textdatei im ASCII-Format. Während „The MIDILAB Music Research System“ kommerziell vertrieben wird, wurde das Programm FTAP von seinem Autor Steven A. Finney (2001) als Download unter: <http://dactyl.som.ohio-state.edu/ftap> ins Internet gestellt und ist unter den Bedingungen der GNU Public License zur kostenfreien Nutzung freigegeben.

MIDI steht für *Musical Instrument Digital Interface* und bildet eine digitale Schnittstelle für die Vernetzung von elektronischen Musikinstrumenten und Computern. „Diese digitale Standard-Schnittstelle wurde im Herbst 1982 nach langen Diskussionen und notwendigen Kompromissen, in der Hardware und den Spezifikationen festgelegt.“ (Philipp, 1986, 14)

Vom Eingabegerät werden die sog. *Keystrokes* (Tastendrucke) via MIDI an das Programm FTAP gesendet, in einer Output-Text-Datei mit der Signatur *K* gesammelt und an das *Feedback Mapping* weitergegeben. Hier können die Daten z.B. in Tonhöhe oder Lautstärke verändert werden, indem sie durch die zuvor angegebenen Feedback-Parameter transformiert werden. Diese Feedback-Daten werden auf dem Weg zum Tongenerator wiederum von FTAP gelesen und unter *F* in die Matrix der Output-Text-Datei geschrieben. Die vom internen Metronom gesendeten Daten werden ebenfalls auf dem Weg zum Tongenerator gelesen und unter *M* in die Output-Text-Datei geschrieben.

Mit einem kurzen Testprogramm kann die jeweilige Konfiguration auf ihre Messgenauigkeit hin getestet werden. Bei diesem *MIDI Troughput Benchmarking Loop-test* werden der Ein- und Ausgang am Computer miteinander verbunden. Nach dem Testdurchlauf kann anhand der ausgegeben Textdatei abgelesen werden, mit welcher Genauigkeit FTAP die MIDI-Ereignisse gesammelt und gespeichert hat. Dieser Test wird vor der Durchführung des Experiments vorgenommen, womit nachgewiesen werden soll, dass das experimentelle Setup einwandfrei funktioniert.

Die erstellte Textdatei aus den jeweiligen Durchläufen enthält eine Aufstellung mit den wichtigsten Angaben zum Durchlauf (Datum, Vpn-Nr., Timestamps, etc.) und eine Matrix, die für eine spätere Auswertung in ein Statistikprogramm (z.B. SPSS) zur Zeitreihenanalyse importiert werden kann. Für die Eingabe der für ein Experiment festgelegten Parameter (Steuerungscode) werden ebenfalls einfache Textdateien verwendet.

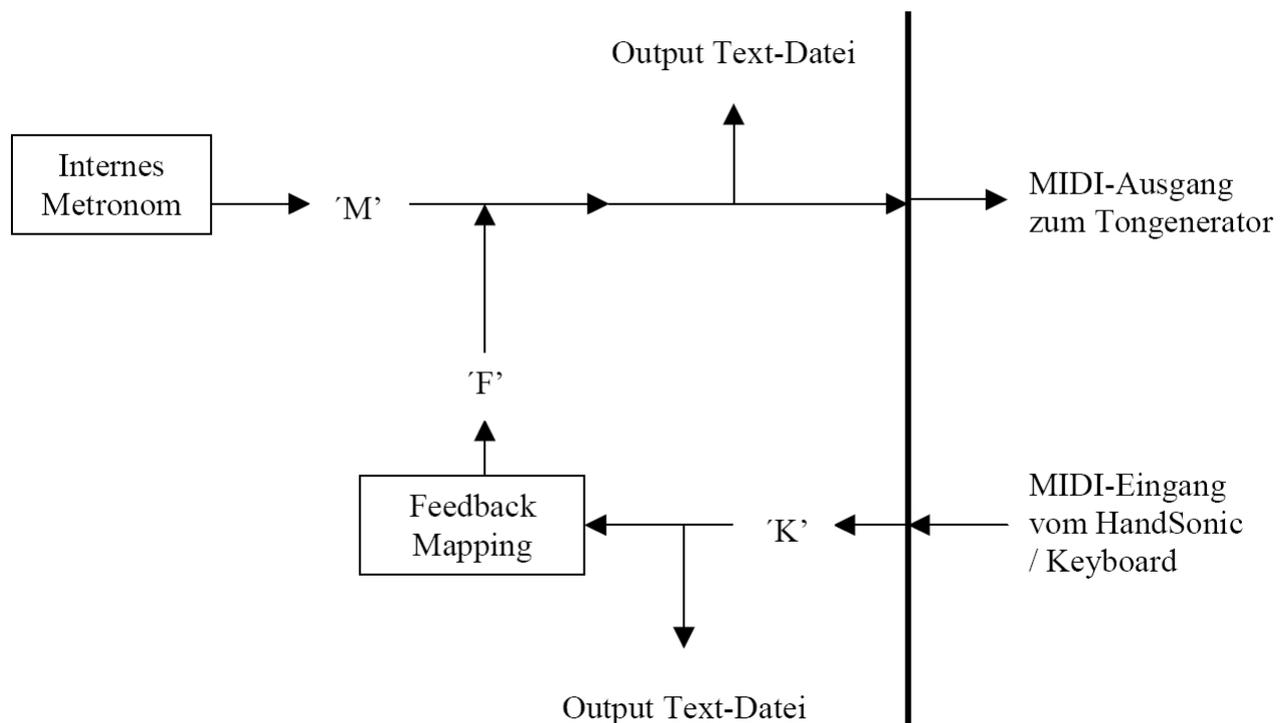


Abbildung 7.1: Architektur von FTAP: Die Buchstaben 'M', 'K' und 'F' geben an, woher das Signal kommt; alle Signale werden in einer gemeinsamen Text-Datei (ASCII) gesammelt und gespeichert (nach Finney, 2001, 67).

### Zweitaufgabenprogramm

Für die Tapping-Durchläufe mit Zweitaufgabe (Tapping + Wörter lesen und merken) und den Pretest wird ein eigens für dieses Experiment erstelltes Programm (in C) für Worteinblendungen verwendet, welches die Möglichkeit bietet, zu jedem beliebigen Zeitpunkt mehrere Wörter simultan als Wortliste auf einem Computer-Bildschirm zu präsentieren. Die Programmierung der Worteinblendung erfolgt über eine einfache Textdatei, welche die gewünschten Parameter *Zeitpunkt* und *Dauer* der Einblendung sowie die *Wortlisten* enthält. Für das vorliegende Experiment werden ausschließlich zweisilbige und unterdurchschnittlich bildhafte Wörter gewählt, die eine visuelle Strategie des Behaltens möglichst unterbinden. Keines der verwendeten Wörter wird doppelt verwendet (s. Wörter im Anhang B auf Seite 223).

### Hardware

Die oben genannten Programme werden auf einem Standard-PC mit 2 GHz CPU (AMD Athlon XP 2400) unter SuSe 8.2 Linux OS Distribution (Kernel 2.4.20) ausgeführt. Da die Auswertung vorangegangener Experimente mit dem Roland HPD15 HandSonic Perkussionsinstrument gezeigt haben, dass es aufgrund der Verarbei-

tungshierarchie des HandSonic (laut Eigenauskunft des Entwicklers) zu einem Messfehler kommen kann, wenn die eingehenden MIDI-Signale (Taps der Versuchspersonen) zum gleichen Zeitpunkt wie die Stimulus-Signale auftreten, wird als Eingabegerät für die Tappings ein externes Roland PD-8 Dual Trigger Pad an einem TMC-6 Trigger-to-MIDI-Converter verwendet, während als Tonerzeuger das HPD15 HandSonic mit seinem integrierten MIDI-Controller und Soundmodul mit angeschlossenen AKG Studio-Kopfhörern dient.

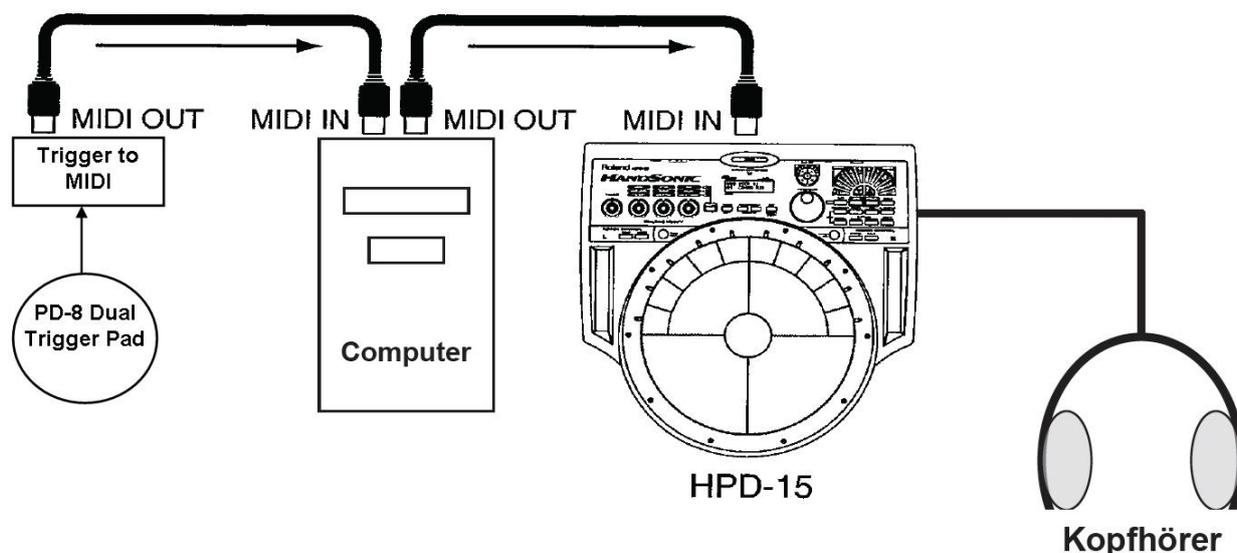


Abbildung 7.2: Technischer Versuchsaufbau I: Vom PD-8 Dual Trigger Pad gehen die Signale über den Trigger-to-MIDI-Converter direkt in den Computer, während die vom Computer ausgehenden MIDI-Signale in den Soundgenerator des HPD-15 HandSonic geschickt werden, welches die Stimulus- und Feedbacksounds an die angeschlossenen Kopfhörer weitergeben.

Mittels MIDI wird der Informationsaustausch vom Pad über den Trigger-to-MIDI-Converter und einem Joystick-/MIDI-Port Adapterkabel zwischen dem Trigger (Roland PD-8 Dual Pad), dem Soundmodul (Roland HPD15 HandSonic) und dem PC hergestellt (s. Abb. 7.2).

Die MIDI-Schnittstelle am PC wird dabei durch eine Creative SoundblasterLive! 5.1 Soundkarte mit original EMU10K1 Chipsatz und dem ALSA (Advanced Linux Sound Architecture) Version 0.9 Soundtreiber unterstützt. Die verwendeten Klänge sind extrem steil einschwingende Perkussionssounds mit einer naturgetreuen Ausklingphase (Preset: *P02 AFRICAN*, *07 Log Drum* - high/low) aus dem Soundmodul des HPD15 HandSonic (s. Abb. 7.3 und 7.4).

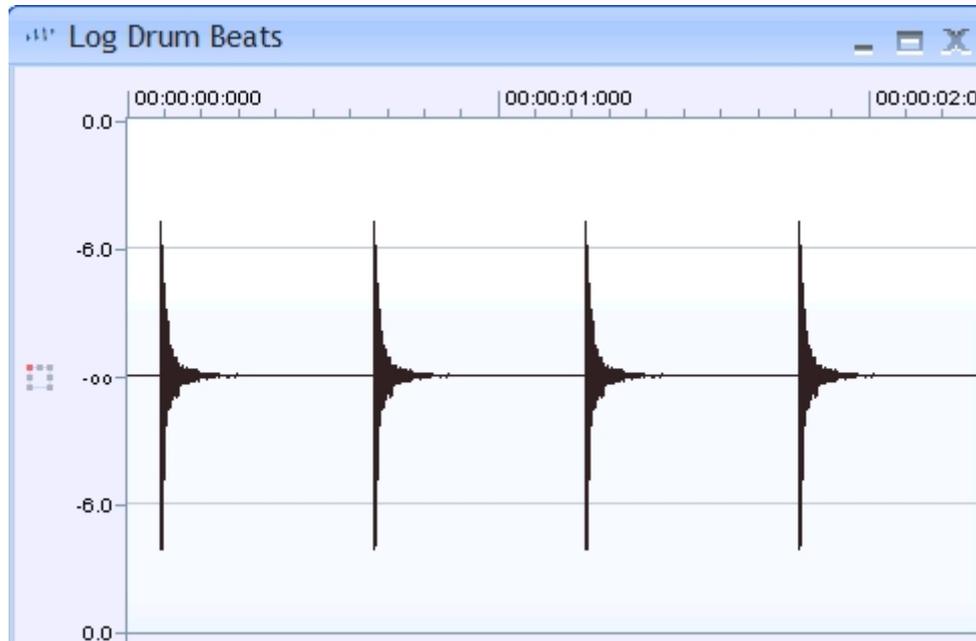


Abbildung 7.3: Soundanalyse der HPD15 HandSonic Presets: P02 AFRICAN, 07 Log Drum (high).

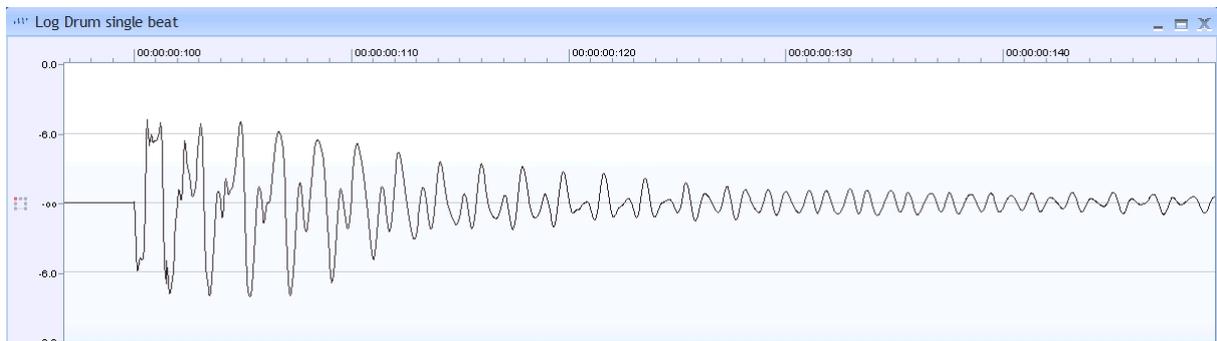


Abbildung 7.4: Einzelanalyse des HPD15 HandSonic Presets: P02 AFRICAN, 07 Log Drum (high).

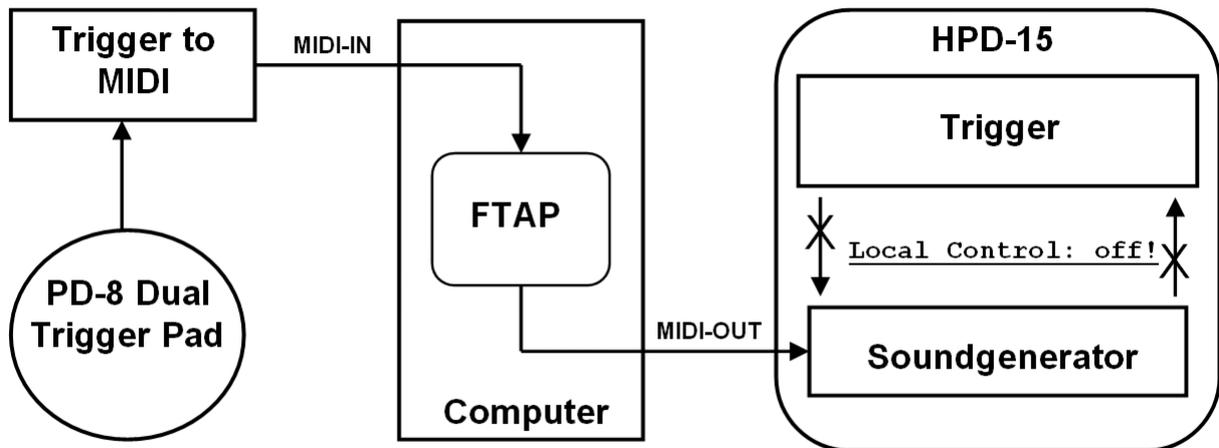


Abbildung 7.5: Technischer Versuchsaufbau II: Vom PD-8 Dual Trigger Pad werden die Signale über den Trigger-to-MIDI-Converter direkt an das Programm FTAP geschickt. Als eine Art zentrale Steuerungsinstanz übernimmt FTAP die Koordination aller ein- und ausgehenden MIDI-Signale. Alle ausgehenden MIDI-Signale werden im Zuge dessen direkt an den Soundgenerator des HPD-15 HandSonic weitergeleitet.

Durch die für das Experiment notwendige Einstellung *<LocalControl: OFF>* kann der interne Klangerzeuger und der Pad Controller des Roland HPD15 HandSonic getrennt voneinander angesteuert werden (vgl. dazu Abb. 7.5). Dadurch ist es möglich, die eingehenden Signale des Trigger Pads via MIDI-Signal an den angeschlossenen PC zu senden (damit dieser den genauen Zeitpunkt des MIDI-Signals registrieren kann) und die vom PC (zurück-)kommenden Signale über den Soundgenerator des HPD15 HandSonic (MIDI-IN) auszugeben.

Die Übertragungsrate bei MIDI-Daten liegt bei 31,25 KBaud (+/- 1%). Das entspricht 320 Mikrosekunden pro Byte oder 0,96 ms für ein 3 Byte MIDI-Ereignis (ergibt 1040 Datenbündel pro Sekunde) und liefert damit eine ausreichend hohe Auflösung der Messungen (+/- 1 ms). Die 3 Bytes ergeben sich dabei aus verschiedenen Informationen:

a) Tonhöhe, Tondauer (NOTE EIN/AUS), b) Anschlagsdynamik (Velocity) und c) Programmwahl (Sound) und d) Timestamps. Es können auch noch weitere Informationen ausgetauscht werden: e) After-Touch und f) Modulation. Diese werden jedoch nicht von jedem Gerät oder Instrument unterstützt (vgl. Philipp, 1986).

## 7.3 Versuchsplan

Es wird ein Versuchsplan mit einem Pretest zur Ermittlung der Wortspanne und einem Hauptexperiment mit 18 Durchläufen entworfen, bei dem sich die Vpn in jedem der Durchläufe mittels Fingertapping möglichst präzise zu den vorgegebenen Metronompatterns synchronisieren sollen. Alle Vpn absolvieren je zwei Sessions mit jeweils einem Block, wobei für die Zweitaufgabe kein Wort doppelt verwendet wird (s. Wörter im Anhang B auf Seite 223). Abbildung 7.6 zeigt den groben Ablauf der einige Tage auseinander liegenden Sessions A und B.

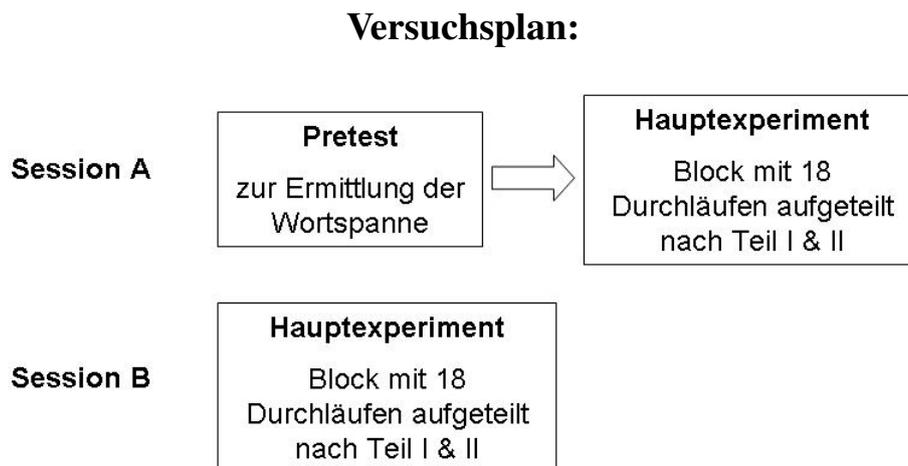


Abbildung 7.6: Versuchsplan: In der ersten Session (A) wird vor dem Hauptexperiment ein Pretest zur Ermittlung der Wortspanne durchgeführt. Danach folgt ein Block mit 18 Durchläufen, der in Session B erneut (mit anderen/neuen Wörtern für die Zweitaufgabe) durchgeführt wird.

In dem vorangestellten Pretest zur Wortspanne aus Session A wird (in Anlehnung an Haarmann et al., 2003) vor der Durchführung des Hauptexperiments ermittelt, wie viel zweisilbige Wörter sich eine Vp merken kann, um den Schwierigkeitsgrad (Länge der Wortlisten) der Zweitaufgabe im Hauptexperiment jeweils individuell anzupassen. Dazu werden den Vpn auf einem Bildschirm nacheinander für 3 Sekunden zwischen simultan 2 und 9 Wörter präsentiert, welche sich die Vpn merken und nachher in der richtigen Reihenfolge wiedergeben sollen. Es werden jeweils 2 Durchläufe in einer Setgröße (Anzahl der Wörter in einer Liste) durchgeführt, wobei die Setgröße jeweils erhöht wird, wenn davon ein oder zwei Durchläufe erfolgreich absolviert werden. Dabei wird keines der Wörter doppelt verwendet und es wird bei der Zusammstellung der Wortlisten darauf geachtet, dass die Wörter semantisch und phonetisch möglichst keine Ähnlichkeit miteinander haben. Sobald in einer Setgröße keiner der zwei Durchläufe erfolgreich durchgeführt werden kann, wird der Test abgebrochen. Für jeden bis dahin korrekt durchgeführten Durchlauf wird ein Punkt vergeben. Aus den summierten Punkten wird ermittelt, wie viele Wörter in den jeweiligen Wortlisten für die Zweitaufgabe des Hauptexperiments verwendet werden

müssen.

Das Hauptexperiment setzt sich aus einem Block mit 18 aufeinander folgenden Durchläufen mit unterschiedlichen Konditionen zusammen (s. Abb. 7.7). Jeder Durchlauf dauert eine Minute, wobei die Vpn den jeweiligen Start eines Durchlaufs selbstständig bestimmen können.

### Hauptexperiment:

#### Block mit 18 Durchläufen in randomisierter Reihenfolge

Randomisierte Reihenfolge	Vorlauf I IOI = 400 ms Referenz	Vorlauf II IOI = 500 ms Referenz	Vorlauf III IOI = 600 ms Referenz	
Randomisierte Reihenfolge	IOI = 400 ms ohne Dual- Task	IOI = 500 ms ohne Dual- Task	IOI = 600 ms ohne Dual- Task	} Teil I
	IOI = 400 ms mit Dual- Task (-3s)	IOI = 500 ms mit Dual- Task (-3s)	IOI = 600 ms mit Dual- Task (-3s)	
	IOI = 400 ms mit Dual- Task (30s)	IOI = 500 ms mit Dual- Task (30s)	IOI = 600 ms mit Dual- Task (30s)	} Teil II
	IOI = 400 ms mit Dual- Task (35s)	IOI = 500 ms mit Dual- Task (35s)	IOI = 600 ms mit Dual- Task (35s)	
	IOI = 400 ms mit Dual- Task (40s)	IOI = 500 ms mit Dual- Task (40s)	IOI = 600 ms mit Dual- Task (40s)	

Abbildung 7.7: Block mit 18 Tapping-Durchläufen: Die ersten 3 Durchläufe sind jeweils vorab in randomisierter Reihenfolge ohne Dual-Task-Bedingungen zu absolvieren. Die nachfolgenden 15 Durchläufe gliedern sich in Teil I und II und sind ebenfalls in randomisierter Reihenfolge zu absolvieren. Teil I beinhaltet die Durchläufe ohne Einblendung von Wörtern und die Durchläufe, bei denen für 3 Sekunden vor dem jeweiligen Durchlauf eine Wortliste eingeblendet wird (Dual-Task -3 s). Teil II beinhaltet diejenigen Durchläufe bei denen während des Tappings nach 30, 35 oder 40 Sekunden Wörter (Dual-Task 30 s, 35 s & 40 s) eingeblendet werden.

Vor oder während eines Durchlaufs werden den Vpn zusätzlich zu der Tappingaufgabe für 3 Sekunden simultan einzelne Listen mit mehreren zweisilbigen, unzusammenhängenden Wörtern präsentiert, die sie sich für die verbleibende Dauer

des Tappingdurchlaufs merken sollen (Zweitaufgabe). In den Kontrolldurchläufen erhalten die Vpn neben der Tappingaufgabe indes keine zweite Aufgabe. Alle Tappingdurchläufe oder Teile eines Tappingdurchlaufs, die ohne zusätzliche Aufgabe zu absolvieren sind, werden als „Baseline“ bezeichnet, während alle Durchläufe oder Teile eines Durchlaufs, bei denen neben der Tappingaufgabe eine Zweitaufgabe zu bewältigen ist, als „Concurrent“ bezeichnet werden (vgl. Abb. 7.8 auf der nächsten Seite).

Am Anfang des Blocks soll zunächst je ein Tappingdurchlauf mit IOI = 400, 500 und 600 ms ohne Zweitaufgabe in randomisierter Reihenfolge absolviert werden. Diese Durchläufe dienen in der späteren Auswertung zusätzlich als Referenz für die Baseline-Werte. Nach diesen 3 Durchläufen folgen 15 Durchläufe in randomisierter Reihenfolge, wobei davon jeweils 5 Durchläufe mit IOI = 400 ms, 5 Durchläufe mit IOI = 500 ms und 5 Durchläufe mit IOI = 600 ms zu absolvieren sind (Variation der AV). Die 5 Durchläufe einer IOI-Gruppe beinhalten dabei jeweils in randomisierter Folge einen Tappingdurchlauf

- ohne Zweitaufgabe
- mit Zweitaufgabe bzw. Dual-Task, bei dem die Wörter vor Beginn der Tappingaufgabe eingeblendet wird und
- je einen Durchlauf, bei dem die Wörter nach 30, 35 oder 40 s eingeblendet werden (randomisiert auftretende Störung bzw. Zweitaufgabe).

Die Durchläufe ohne und mit Dual-Task, bei denen die Einblendung der Wörter vor dem Anfang des Durchlaufs stattfindet, werden als Teil I des Experiments definiert, während die Durchläufe, bei denen die Einblendung der Wörter nach 30, 35 oder 40 Sekunden beginnt, als Teil II definiert werden (s. dazu Abb. 7.8 auf der nächsten Seite).

## 7.4 Versuchsaufbau

Der Ablauf jeder einzelnen Session gestaltet sich wie folgt:

Nach einer Einweisung durch den Versuchsleiter und Erklärungen zum Ablauf des Experiments, wird die Vp gebeten, mit ihren Fingern so genau wie möglich auf die einzelnen Beats eines vorgegebenen Metronom-Patterns zu treffen. Die Fingertaps werden mit dem Zeige- oder Mittelfinger der rechten Hand auf einem Eingabepad ausgeführt, während die Vpn über Kopfhörer das Metronom-Pattern und ihre eigenen Taps zu hören bekommen. Die Vpn sitzen dabei an einem Tisch, auf dem sich vor ihnen zur Eingabe der Tappings ein Eingabepad (Roland PD-8 Dual Trigger Pad) und für die Präsentation der Wortblöcke ein Standard-Computerbildschirm in Augenhöhe befindet. Zwischen den einzelnen Durchläufen werden Fragen der Vpn

## Art der Durchläufe

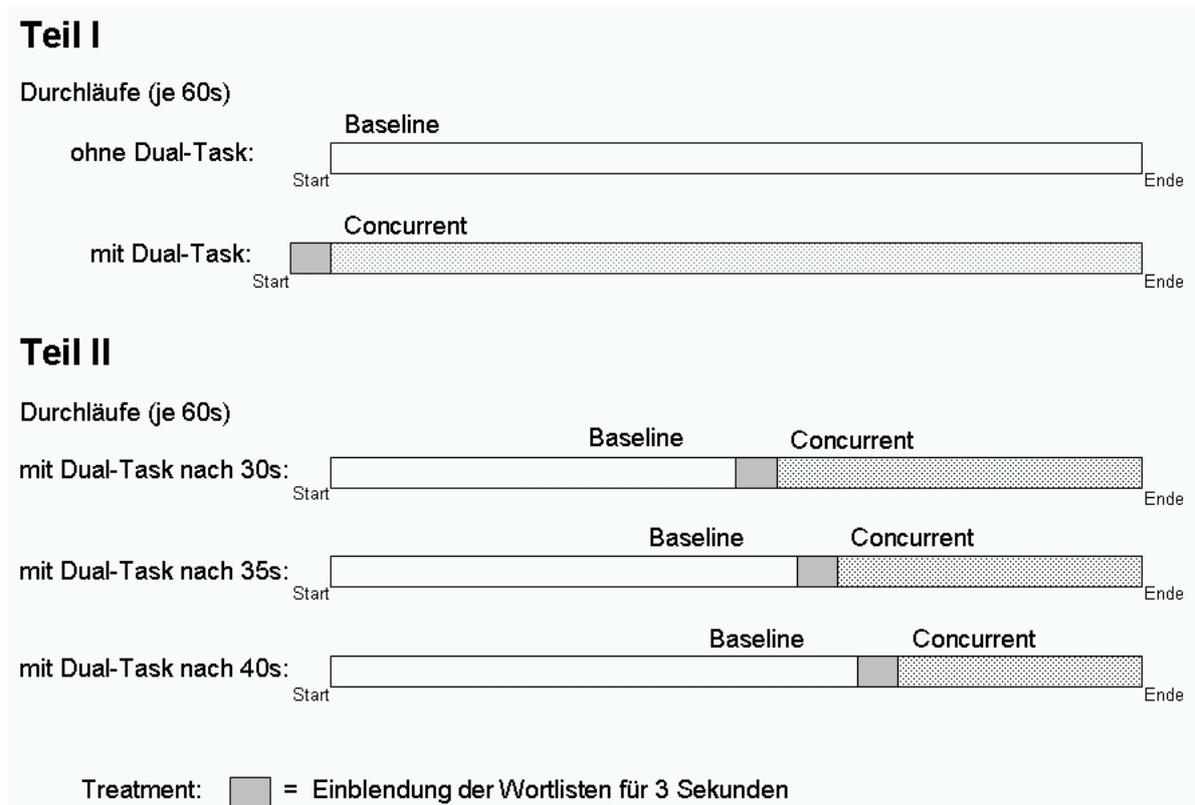


Abbildung 7.8: Schematische Darstellung der verschiedenen Durchläufe: Teil I beinhaltet die Durchläufe ohne Einblendung von Wörtern (Baseline) und die Durchläufe, bei denen 3 Sekunden vor dem jeweiligen Durchlauf Wörter eingeblendet werden (Concurrent). Teil II beinhaltet all die Durchläufe bei denen während des Tappings nach 30, 35 oder 40 Sekunden Wörter eingeblendet werden. Die Taps vor dem Einblenden der Wörter dienen als Baseline, während die Taps nach Beginn der Wörter-Einblendung als Concurrent betrachtet werden.

geklärt und es kann über die jeweiligen Tapping-Erfahrungen der Vpn gesprochen werden. Jeder Durchlauf dauert genau eine Minute.

Nachdem das Programm für einen Block mit 18 Durchläufen durch den Versuchsleiter gestartet wird, können die Vpn während des automatisierten Ablaufs selbstständig über die Länge der Pausen zwischen den einzelnen Durchläufen entscheiden. Das Ablaufprogramm generiert für jede einzelne Vp jeweils eine randomisierte Reihenfolge der Durchläufe 1-3 bzw. 4-18 und steuert sowohl das Programm zur Präsentation der Wortblöcke als auch das Programm FTAP (vgl. Abschnitt 7.2 auf Seite 113).

Während des gesamten Experiments erhalten die Vpn keinerlei Feedback über die Ergebnisse ihrer Tappings. Erst nach Durchführung beider Sessions wird den Vpn ein Feedback und eine erste Kurzanalyse ihrer Tapping-Ergebnisse präsentiert.

Die ersten drei Durchläufe (jeweils IOI = 400, 500 und 600 ms) dienen der Eingewöhnung und alle Vpn werden zuvor darüber in Kenntnis gesetzt, dass hier neben

der Tappingaufgabe keine Zweitaufgabe zu erwarten ist. Die aus den Vorläufen gesammelten Daten sollen zudem später als ein weiterer Kontrollwert (Referenz) für das Tappingverhalten ohne Zweitaufgabe (Baseline) ausgewertet werden.

Die Vpn nehmen an je zwei Sessions à 60 Minuten mit einem Block von 18 Durchläufen teil.

## 7.5 Versuchspersonen

Zehn Versuchspersonen, davon acht männliche und zwei weibliche im Alter von 20-44 Jahren ( $M = 26$ ) nahmen an dem Experiment teil. Alle Vpn waren nach Selbstauskunft Rechtshänder, verfügten über ein normales Seh- und Hörvermögen und hatten jeweils mehr als 10 Jahre Schlagzeugunterricht erhalten. Unter den Vpn waren zum Zeitpunkt der Untersuchung 2 Berufsschlagzeuger, 7 Studierende mit Hauptinstrument Schlagzeug und ein Dozent für Perkussion von der Hochschule für Musik und Theater Hamburg. Ihre Teilnahme war freiwillig und sie erhielten keine Aufwandsentschädigung. Alle Vpn nahmen zunächst an einem Pretest zur Wortmerkfähigkeit (Word-Span-Test) und an je zwei Sessions (à 60 min.) mit einem Block von 18 Durchläufen teil.

Die Vpn waren hoch motiviert und führten die Versuche sehr konzentriert durch. Dabei zeigten die Vpn über die Dauer des Experiments eine sehr gute Eigenwahrnehmung bezüglich der Tappings (Einschätzung und Korrektur), bewiesen insgesamt einen professionellen Umgang mit der ihnen gestellten Aufgabe und waren sehr daran interessiert, die sie betreffenden Auswertungen im Anschluss präsentiert zu bekommen.



# Kapitel 8

## Auswertung der Daten

Die Gesamtzahl der durch FTAP (in 360 Durchläufen) gespeicherten Taps beträgt 22.200 Taps. Jeder einzelne Tap repräsentiert dabei die jeweilige Abweichung (in ms) zu einem bestimmten Zeitpunkt innerhalb eines Durchlaufs. Die Abweichungen samt der dazu gehörenden Zeitleiste eines jeden Durchlaufs wurden mithilfe eines eigens für diese Auswertung (in C) geschriebenen Auswertungsprogramms zunächst aus den FTAP-Dateien extrahiert und in Text-Dateien abgelegt. Danach wurden die aufbereiteten Daten in eine Matrix überführt und mithilfe von Excel (2003) und SPSS (Version 14) umfassend analysiert.

Für die Auswertung der Daten aus Teil I des Experiments wurden jeweils 30 Taps vom Anfang der Durchläufe herangezogen, während für die Auswertung der Daten aus Teil II jeweils 30 Taps vor und 30 Taps nach Beginn des Treatments herangezogen wurden (vgl. dazu Abb. 7.8 auf Seite 122).

Aus den jeweils 15 Durchläufen eines Blocks (ohne Vorläufe) mit den verschiedenen Konditionen Baseline und Concurrent ergeben sich auf diese Weise insgesamt 480 Datensätze (14.400 Taps), die zunächst unabhängig von den Referenzwerten aus den Vorläufen berechnet werden. Die gemessene Veränderung des Tappingverhaltens ergibt sich im weiteren aus der Differenz der jeweiligen Messwerte für die Konditionen Baseline und Concurrent. Dazu wird in Kapitel 9 auf Seite 149 zusätzlich eine detaillierte Einzelauswertung mit grafischen Analysen für jede Vp durchgeführt.

Im Anschluss daran soll in Kapitel 9.3 auf Seite 153 der Zeitraum für die Einblendung der Wörter (Zweitaufgabe) genauer analysiert werden, indem jeweils 5 Taps vor und nach Beginn des Treatments in die Berechnungen einbezogen werden. Auch hier folgen Einzelanalysen mit grafischen Analysen für jede Vp.

In einem weiteren Kapitel werden die Werte aus Session A und Session B miteinander verglichen und auf eventuelle Testübungseffekte hin untersucht (s. Kap. 9.4 auf Seite 159), woraufhin zum Abschluss in Kapitel 9.5 auf Seite 171 anhand der Tappingdaten aus Teil II mit einer MANOVA für wiederholte Messungen der Einfluss des Treatments überprüft werden soll (Interventionsprüfung).

Abbildung 8.1 zeigt die mittleren Asynchronien (in ms) für die Tapping-Aufgaben mit IOI = 400, 500 und 600 ms unter den zwei getesteten Bedingungen

Baseline (orange) und Concurrent (blau). Bei IOI = 400 ms sind die Werte für beide Bedingungen fast gleich, während sich die Werte für die Baseline- und die Concurrent-Bedingungen deutliche Unterschiede anzeigen.

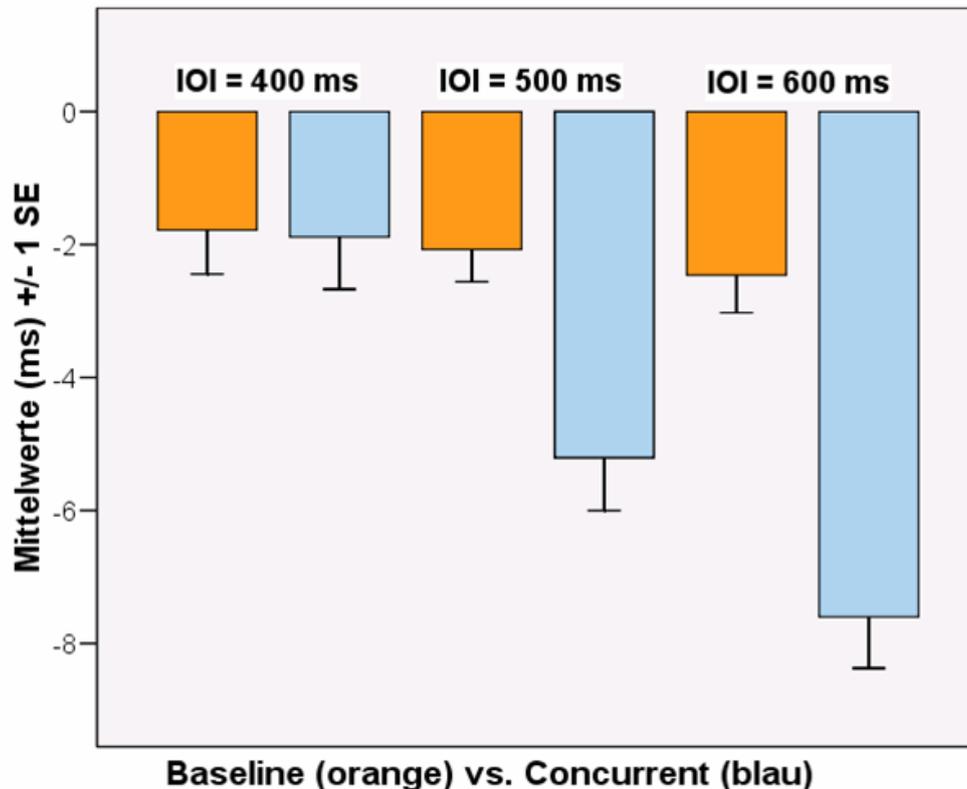


Figure 8.1: Mittelwerte und Standardfehler (zwischen den Durchläufen) der Asynchronien für die Tapping-Durchläufe mit IOI = 400, 500 und 600 ms unter den zwei getesteten Bedingungen Baseline (orange) und Concurrent (blau).

Tabelle 8.1 zeigt die Mittelwerte der Asynchronien mit Standardabweichungen für die verschiedenen Tapping-Bedingungen. Tabelle 8.1 zeigt zudem die Unterschiede zwischen den Bedingungen Baseline und Concurrent (BC-Diff) unter allen Durchläufen ( $N = 80$ , pro Bedingung und IOI) sowie die dazugehörigen Effektgrößen für abhängige Stichproben nach Cohen (1988).

Die  $t$ -Tests für gepaarte Stichproben über die Mittelwerte der Asynchronien zeigen einen signifikanten Haupteffekt für die Concurrent-Bedingungen mit IOI = 500 and 600 ms ( $p < 0.001$ ) an, während die Mittelwerte der Durchläufe mit IOI = 400 ms sich nicht signifikant voneinander unterscheiden ( $p = 0.90$ ).

Für die Durchläufe unter Concurrent-Bedingungen liegen die Standardabweichungen höher als bei den Baseline-Bedingungen. Die Tapping-Aufgabe wurde demnach während der Concurrent-Durchläufe mit einer höheren Variabilität ausgeführt. Die Berechnungen der jeweiligen Effektgrößen zeigen zudem, dass der Haupteffekt für die Concurrent-Bedingungen im Wesentlichen vom Tempo bzw. der Länge des IOIs abhängig ist: Es ergibt sich ein großer Effekt für die Concurrent-Durchläufe mit

ohne vs. mit Dual-Task		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
Baseline	Alle Taps	7200	-61	124	-2,10	11,773	138,593
	Gültige Werte (Listenweise)	7200					
Concurrent	Alle Taps	7200	-238	88	-4,90	15,246	232,454
	Gültige Werte (Listenweise)	7200					

Tabelle 8.2: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) der verschiedenen Durchläufe (Vpn 1-10).

IOI = 600 ms ( $d = 0.75$ ), ein mittlerer Effekt mit IOI = 500 ms ( $d = 0.48$ ) und ein nur sehr kleiner Effekt mit IOI = 400 ms ( $d = 0.01$ ).

	IOI = 400 ms	IOI = 500 ms	IOI = 600 ms
Baseline	-1.77 (5.94)	-2.07 (4.37)	-2.45 (5.06)
Concurrent	-1.88 (7.03)	-5.2 (7.1)	-7.59 (6.93)
BC-Diff	-0.11	-3.13	-5.14
<i>t</i> -Test	$p = 0.90$	$p < 0.001$	$p < 0.001$
Effektgröße	0.01	0.48	0.75

Table 8.1: Mittelwerte der Asynchronien in ms (mit Standardabweichungen), BC-Diffs (Differenzen zwischen Baseline- und Concurrent-Bedingungen), *t*-Tests für gepaarte Stichproben über die aggregierten Mittelwerte der Asynchronien aus den einzelnen Durchläufen und Effektgrößen für IOI = 400, 500 und 600 ms.

Ein erster oberflächlicher Blick in die Rohdaten lässt bereits vermuten, dass sich das Tappingverhalten unter den unterschiedlichen Bedingungen Baseline und Concurrent deutlich voneinander unterscheiden.

Wie in Abbildung 8.2 zu sehen, ergeben sich bei einer ersten groben Berechnung der Daten unterschiedliche Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent: Der Mittelwert zeigt für die Kondition Baseline mit  $M = -2,10$  ms bei einer Standardabweichung  $SD = 11,773$  und einer Varianz  $s^2 = 138,593$  einen sehr geringen negativen Wert an, während der Wert für die Kondition Concurrent mit  $M = -4,90$  ( $SD = 15,246$  und  $s^2 = 232,454$ ) eine etwas größere negative Asynchronie anzeigt.

Die Differenz der Werte beider Konditionen ist nicht groß. Dennoch zeigt der *t*-Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline und Concurrent (s. Abb. 8.3 auf der nächsten Seite) einen statistisch hoch signifikanten Unterschied an ( $p < .001$ ).

Test bei unabhängigen Stichproben

		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
									Untere	Obere
Alle Taps	Varianzen sind gleich	268,086	,000	12,308	14398	,000	2,794	,227	2,349	3,239
	Varianzen sind nicht gleich			12,308	13532,094	,000	2,794	,227	2,349	3,239

Tabelle 8.3: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) (Vpn 1-10).

## 8.1 Inter-Onset-Intervall 400, 500 und 600 ms

Wenn man nun alle Taps nach IOI getrennt betrachtet (s. Abb. 8.4 auf der nächsten Seite), ergibt sich bereits ein differenzierteres Bild der gesammelten Daten: Während die Mittelwerte für die zwei Konditionen bei IOI = 400 ms mit  $M = -1,78$  ms (Baseline) und  $M = -1,89$  ms (Concurrent) fast identisch sind, ergeben sich für die Durchläufe mit IOI = 500 ms (Baseline:  $M = -2,07$  und Concurrent:  $M = -5,21$ ) und IOI = 600 ms (Baseline:  $M = -2,46$  und Concurrent:  $M = -7,60$ ) deutliche Differenzen. Darüberhinaus unterscheiden sich Standardabweichung und Varianz der Kondition Concurrent bei IOI = 500 ms (Baseline:  $SD = 10,796$ ,  $s^2 = 116,544$  und Concurrent:  $SD = 15,682$ ,  $s^2 = 245,935$ ) und 600 ms (Baseline:  $SD = 12,186$ ,  $s^2 = 148,498$  und Concurrent:  $SD = 16,019$ ,  $s^2 = 256,606$ ) im Vergleich zu den entsprechenden Baseline-Werten. Die Werte liegen hier für die Concurrent-Kondition jeweils höher als die Baseline-Werte. Nur bei IOI = 400 ms liegen die Werte sehr dicht beieinander (Baseline:  $SD = 12,273$ ,  $s^2 = 150,621$  und Concurrent:  $SD = 13,362$  und  $s^2 = 178,544$ ). Das Ausmaß des negativen Synchronisationsfehlers aus den Baseline-Durchläufen ist außerordentlich gering, wobei die Werte mit jeweils  $M \approx -2$  ms für die einzelnen IOI sehr dicht beieinander liegen. Die Werte aus den Concurrent-Durchläufen heben sich indes abhängig vom Tempo deutlich voneinander ab. Je größer das IOI, desto größer erscheint auch der negative Synchronisationsfehler.

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline und Concurrent (s. Abb. 8.4 auf der nächsten Seite) zeigt für die Bedingungen IOI = 500 ms und IOI = 600 ms einen statistisch hoch signifikanten Unterschied an ( $p < .001$ ), während für die Werte aus den Durchläufen mit IOI = 400 ms kein signifikanter Unterschied ermittelt wurde ( $p = .773$ ).

Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 8.2 auf Seite 130 einen grafischen Vergleich der Mittelwerte (in ms) für die Durchläufe Baseline („ohne“) und Concurrent („mit“) nach IOI differenziert.

Deskriptive Statistik

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
IOI 400	Baseline	Alle Taps	2400	-61	124	-1,78	12,273	150,621
		Gültige Werte (Listerweise)	2400					
	Concurrent	Alle Taps	2400	-58	88	-1,89	13,362	178,544
		Gültige Werte (Listerweise)	2400					
IOI 500	Baseline	Alle Taps	2400	-45	36	-2,07	10,796	116,544
		Gültige Werte (Listerweise)	2400					
	Concurrent	Alle Taps	2400	-238	47	-5,21	15,682	245,935
		Gültige Werte (Listerweise)	2400					
IOI 600	Baseline	Alle Taps	2400	-48	116	-2,46	12,186	148,498
		Gültige Werte (Listerweise)	2400					
	Concurrent	Alle Taps	2400	-100	49	-7,60	16,019	256,606
		Gültige Werte (Listerweise)	2400					

Test bei unabhängigen Stichproben

Tempo			Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
			F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
										Untere	Obere
IOI 400	Alle Taps	Varianzen sind gleich	20,855	,000	,288	4798	,773	,107	,370	-6,19	,833
		Varianzen sind nicht gleich			,288	4763,719	,773	,107	,370	-6,19	,833
IOI 500	Alle Taps	Varianzen sind gleich	121,257	,000	8,071	4798	,000	3,137	,389	2,375	3,899
		Varianzen sind nicht gleich			8,071	4255,732	,000	3,137	,389	2,375	3,899
IOI 600	Alle Taps	Varianzen sind gleich	121,934	,000	12,509	4798	,000	5,139	,411	4,334	5,945
		Varianzen sind nicht gleich			12,509	4479,015	,000	5,139	,411	4,334	5,945

Tabelle 8.4: T-Test für die Mittelwertgleichheit bei unabhängigen Stichproben für die Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline und Concurrent differenziert nach IOI = 400, 500 und 600 ms (Vpn 1-10).

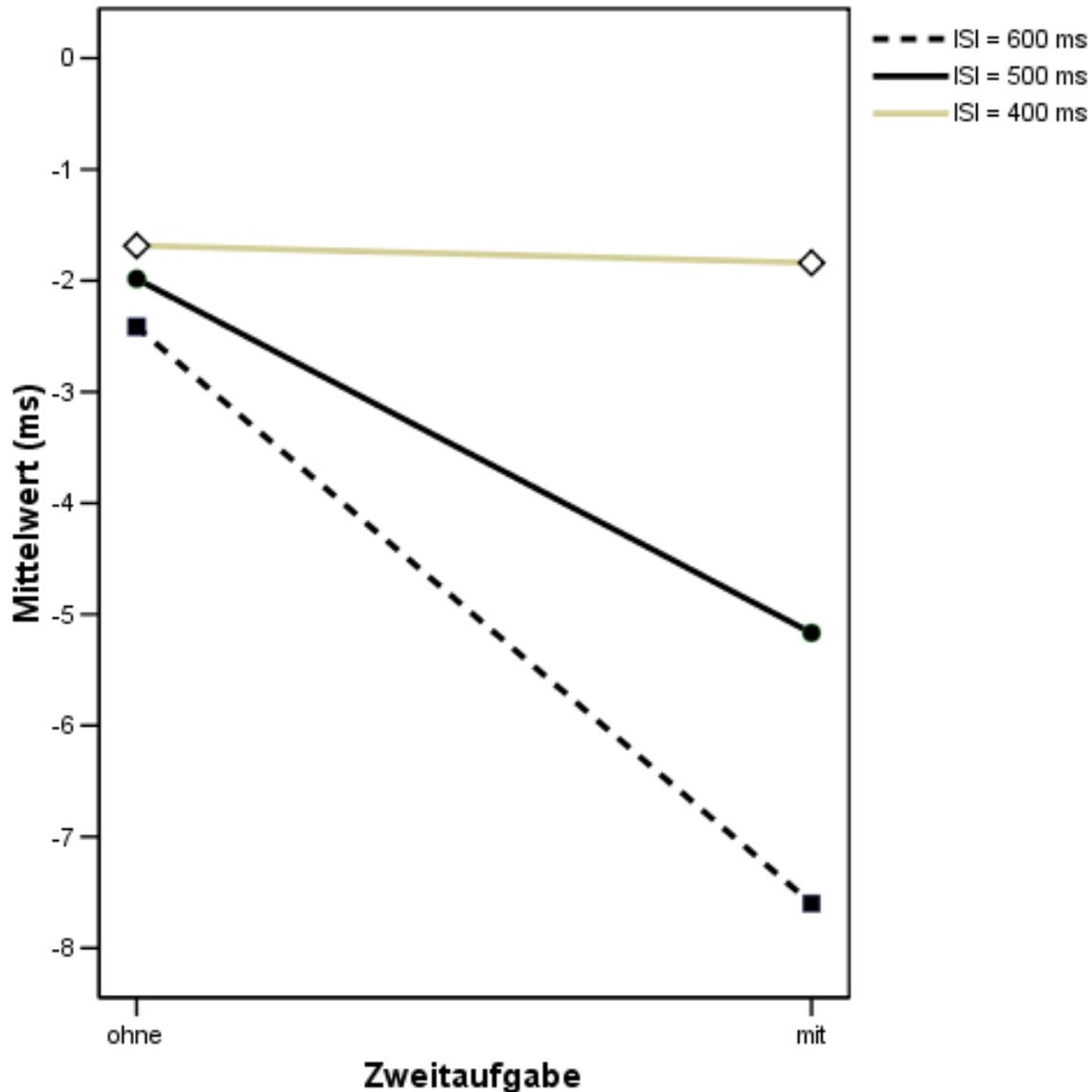


Abbildung 8.2: Vergleich der Mittelwerte (in ms) aller Vpn (N = 10) ohne und mit Zweitaufgabe für alle Durchläufe mit IOI = 600 ms, 500 ms und 400 ms.

Wie in Abbildung 8.2 zu sehen ist, ergibt sich bei IOI = 400 ms zwischen den beiden Bedingungen Baseline und Concurrent kein nennenswerter Unterschied. Der Faktor Zweitaufgabe scheint bei diesem Tempo keinen Einfluss auf das Tappingverhalten zu haben.

Demgegenüber ist der negative Synchronisationsfehler bei IOI = 500 und 600 ms deutlich höher, wenn neben der Tappingaufgabe eine Zweitaufgabe zu erfüllen ist.

Eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) für wiederholte Messungen ergibt einen statistisch signifikanten Effekt des Faktors Zweitaufgabe für die Tappingaufgaben mit IOI = 600 ms ( $F_{1,9} = 22.16, p < .001$ ) und IOI = 500 ms ( $F_{1,9} = 10.21, p < .05$ ), während sich bei den Durchläufen mit IOI = 400 ms kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden verschiedenen Tappingaufgaben zeigt ( $F_{1,9} = 0.01, p = .903$ ).

Passend hierzu ist in Abbildung 8.3 die jeweilige Streuung um die Mittelwerte der Vpn in Bezug auf die einzelnen Bedingungen zu sehen. Danach ist die Streuung der Werte für die Concurrent-Kondition („mit Zweitaufgabe“) jeweils größer, als für die jeweilige Baseline-Kondition.

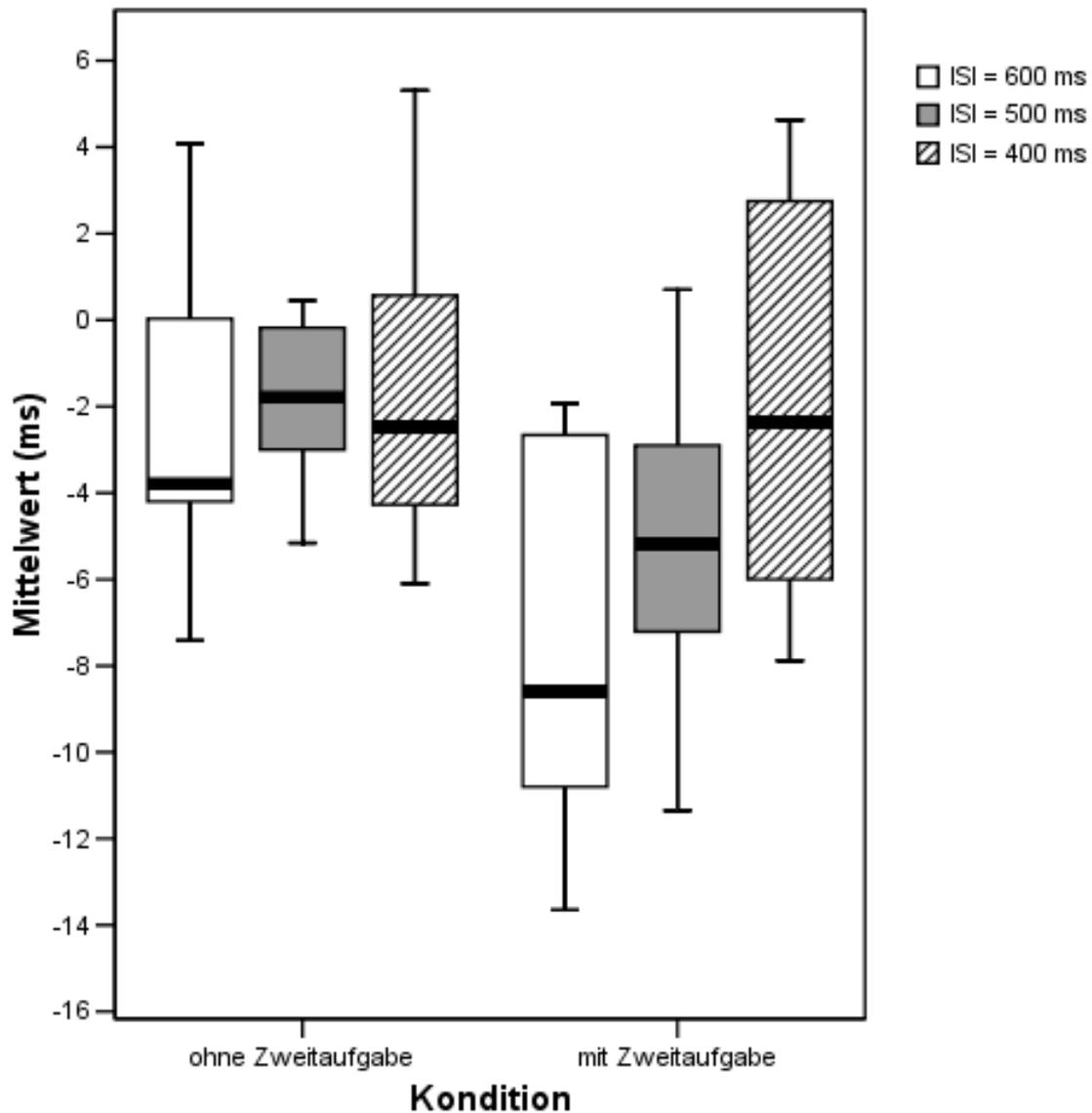


Abbildung 8.3: Vergleich der Mittelwerte (in ms) aller Vpn (N = 10) ohne und mit Zweitaufgabe für alle Durchläufe mit IOI = 600 ms, 500 ms und 400 ms.

Dieser Unterschied zeigt sich ebenso im Vergleich der Varianzen (s. Abb. 8.4 auf der nächsten Seite): Während sich die gemittelten Werte der Varianzen aller Vpn (N = 10) bei IOI = 400 ms zwischen Baseline („ohne“) und Concurrent („mit“) kaum unterscheiden, sind die Concurrent-Werte („mit“) bei IOI = 500 ms und IOI = 600 ms wesentlich höher als ihre Vergleichswerte der Baseline („ohne Zweitaufgabe“).

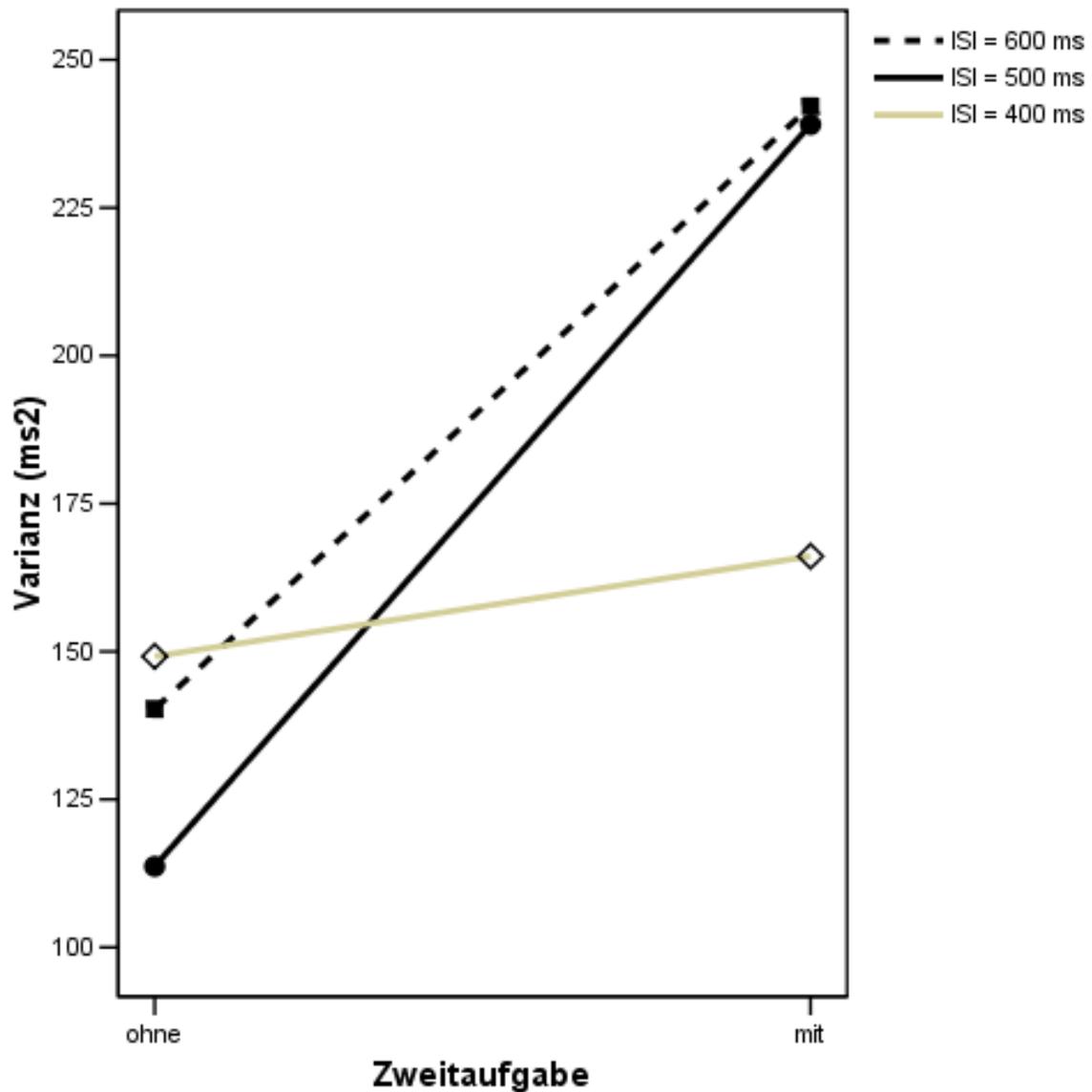


Abbildung 8.4: Vergleich der Varianzen (in ms<sup>2</sup>) aller Vpn (N = 10) ohne und mit Zweitaufgabe für alle Durchläufe mit IOI = 600 ms, 500 ms und 400 ms.

Abbildung 8.5 auf der nächsten Seite zeigt zudem, dass die Werte der Varianzen für die Durchläufe mit Zweitaufgabe bei IOI = 500 ms und IOI = 600 ms eine sehr viel größere Streuung aufweisen, als die Werte aus den Durchläufen ohne Zweitaufgabe, wobei aus den Durchläufen mit IOI = 400 ms zwischen den beiden Konditionen kaum Unterschiede zu ersehen sind.

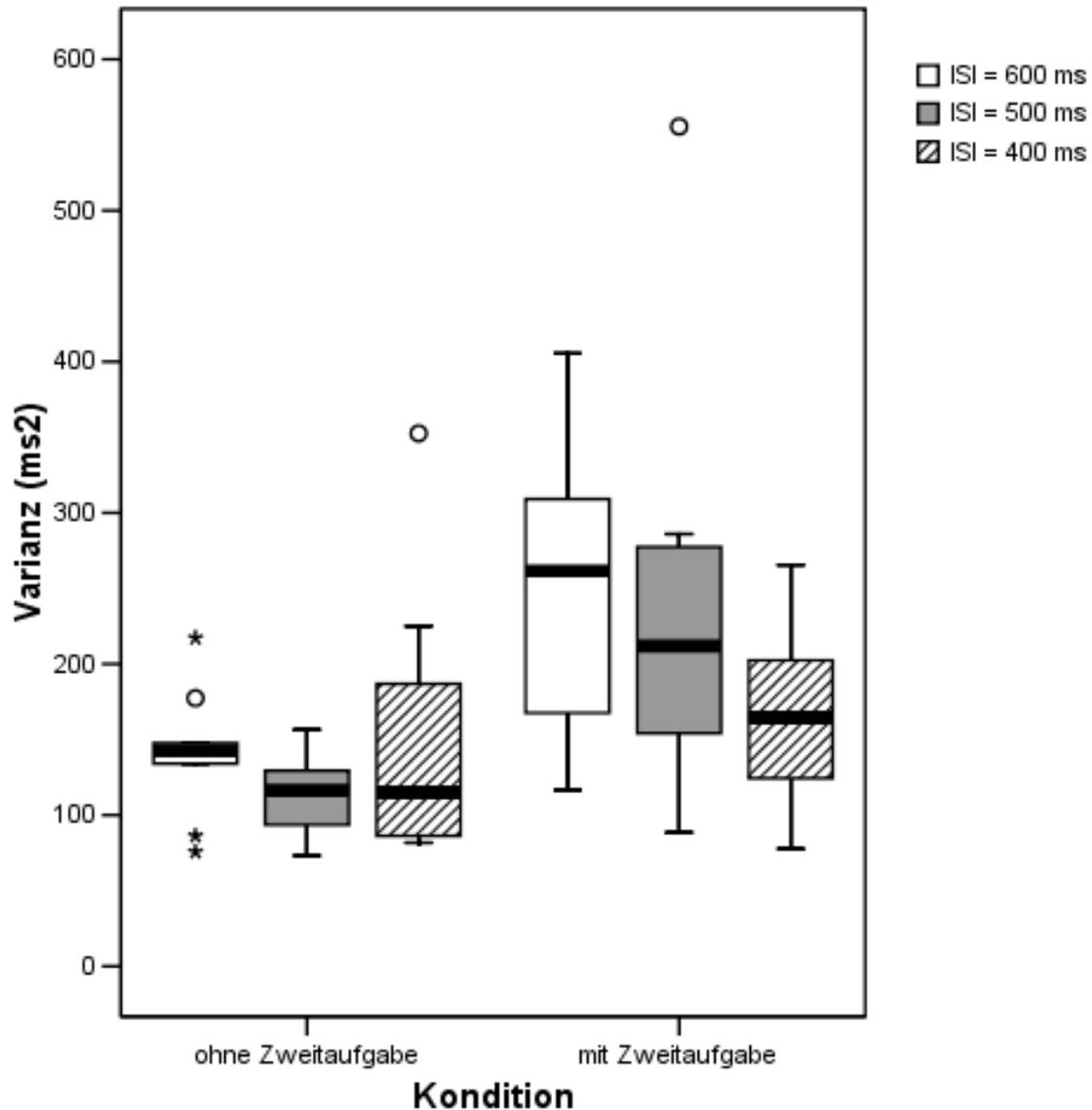


Abbildung 8.5: Vergleich der Varianzen (in  $\text{ms}^2$ ) aller Vpn ( $N = 10$ ) mit und ohne Zweitaufgabe für alle Durchläufe mit IOI = 600 ms, 500 ms und 400 ms.

Hinsichtlich der Tapping-Werte lassen sich keine bedeutenden Gruppenunterschiede zwischen den weiblichen und männlichen Vpn erkennen. Daher wird im Weiteren auf eine detaillierte Analyse der Tapping-Daten bezüglich möglicher geschlechtsspezifischer Unterschiede verzichtet.

## 8.2 Zweitaufgabe

Die durchschnittliche Gedächtnisspanne für zweisilbige Wörter während der Dual-Task-Bedingungen beträgt  $M = 4,20$  ( $SD = 0,46$ ). Daraus ergibt sich ein Wert von 85 % für die erfolgreiche Bewältigung der Zweitaufgabe bei einer Wortlistenlänge von sechs Wörtern für Vp 5 und fünf Wörtern für alle weiteren Vpn (vgl. dazu Abb.

Gedächtnisspanne (Dual-Task)			
Vpn	Wörter	Session I	Session II
1	4,16 (von 5)	100%	83,30%
2	5,00 (von 5)	100%	100%
3	4,50 (von 5)	96,60%	90%
4	4,08 (von 5)	75%	81,60%
5	4,89 (von 6)!	95%	81,60%
6	3,75 (von 5)	75%	75%
7	3,58 (von 5)	85%	71,60%
8	4,25 (von 5)	96,60%	85%
9	3,91 (von 5)	78,30%	78,30%
10	3,91 (von 5)	81,60%	78,30%
Alle	4,20 Wörter (SD = 0,46)	88%	82%

Tabelle 8.5: Tabelle mit den durchschnittlichen Werten für die Gedächtnisspanne aus den Durchläufen mit Zweitaufgabe aller Vpn.

8.5). Die jeweilige Länge der Wortlisten für die Zweitaufgabe ergibt sich hierbei aus dem Pretest zur Wortspanne (s. Abschnitt 7.3 auf Seite 119).

Hinsichtlich der Leistung beim Pretest zur Wortspanne und den erzielten Leistungen beim Absolvieren der Zweitaufgabe gibt es keine bedeutenden Gruppenunterschiede zwischen den weiblichen und männlichen Vpn.

Nach dieser ersten groben Analyse werden die Daten im Folgenden anhand der genauen Ausprägung der Zweitaufgabe differenziert und getrennt analysiert.

### 8.3 Teil I: Durchläufe „ohne“ vs. „mit“ Zweitaufgabe

Für einen Vergleich werden zunächst einerseits alle Durchläufe herausgegriffen, bei denen keine Zweitaufgabe zu bewältigen ist, während andererseits alle Durchläufe einbezogen werden, bei denen die Einblendung der Wörter 3 s vor Beginn der Tappings beginnt (Teil I des Experiments). Diese ausgewählten Durchläufe entsprechen dem Sinn nach dem Vorgehen aus den Experimenten von Miyake et al. (2004) und sollen daher getrennt von den Durchläufen ausgewertet werden, bei denen die Zweitaufgabe und damit auch die Einblendung der Wörter während der laufenden Tapping-Durchläufe stattfindet.

Die Berechnung der Tapping-Werte für diese Durchläufe zeigt zunächst deutliche Unterschiede zwischen den beiden Konditionen Baseline und Concurrent an: Wie in Abbildung 8.6 auf der nächsten Seite zu sehen, unterscheiden sich die Baseline-Werte mit  $M = -0,91$ ,  $SD = 13,423$  und  $s^2 = 180,171$  von den Concurrent-Werten mit  $M = -4,38$ ,  $SD = 16,425$  und  $s^2 = 269,786$ .

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline und Concurrent der Durchläufe

ohne vs. mit Dual-Task		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
Baseline	Alle Taps	1800	-61	124	-,91	13,423	180,171
	Gültige Werte (Listenweise)	1800					
Concurrent	Alle Taps	1800	-233	88	-4,38	16,425	269,786
	Gültige Werte (Listenweise)	1800					

Tabelle 8.6: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (Einblendung der Wörter am Anfang des Durchlaufs) aller Vpn.

		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
									Untere	Obere
Alle Taps	Varianzen sind gleich	26,753	,000	6,947	3598	,000	3,473	,500	2,493	4,454
	Varianzen sind nicht gleich			6,947	3460,724	,000	3,473	,500	2,493	4,454

Tabelle 8.7: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (Einblendung der Wörter am Anfang des Durchlaufs) aller Vpn.

ohne Einblendung und mit Einblendung der Wörter am Anfang eines Durchlaufs (s. Abb. 8.7) zeigt zudem einen statistisch hoch signifikanten Unterschied an ( $p < .001$ ).

Interessanter und zudem aussagekräftiger erscheint auch hier wieder ein Blick auf die nach IOI sortierten Daten dieser Durchläufe:

Während die Mittelwerte für die zwei Konditionen bei IOI = 400 ms mit  $M = 0,33$  ms (Baseline) und  $M = 0,51$  ms (Concurrent) fast deckungsgleich sind, ergeben sich für die Durchläufe mit IOI = 500 ms (Baseline:  $M = -1,18$  und Concurrent:  $M = -4,95$ ) und IOI = 600 ms (Baseline:  $M = -1,86$  und Concurrent:  $M = -8,69$ ) deutliche Differenzen. Darüber hinaus unterscheiden sich Standardabweichung und Varianz der Kondition Concurrent bei IOI = 500 ms (Baseline:  $SD = 11,494$ ,  $s^2 = 132,107$  und Concurrent:  $SD = 16,720$ ,  $s^2 = 279,572$ ) und 600 ms (Baseline:  $SD = 13,516$ ,  $s^2 = 182,688$  und Concurrent:  $SD = 17,430$ ,  $s^2 = 303,818$ ) im Vergleich zu den entsprechenden Baseline-Werten. Die Werte liegen hier für die Kondition Concurrent jeweils höher als die Baseline-Werte. Nur bei IOI = 400 ms liegen die Werte wieder sehr dicht beieinander (Baseline:  $SD = 14,960$ ,  $s^2 = 223,804$  und Concurrent:  $SD = 13,566$ ,  $s^2 = 184,047$ ).

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline und Concurrent (s. Abb. 8.8 auf der nächsten Seite) zeigt für die Bedingungen IOI = 500 ms und IOI = 600 ms einen statistisch hoch signifikanten Unterschied an ( $p < .001$ ), während für die Werte aus

Deskriptive Statistik

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
IOI 400	Baseline	Alle Taps	600	-61	124	,33	14,960	223,804
		Gültige Werte (Listerweise)	600					
	Concurrent	Alle Taps	600	-38	88	,51	13,566	184,047
		Gültige Werte (Listerweise)	600					
IOI 500	Baseline	Alle Taps	600	-36	35	-1,18	11,494	132,107
		Gültige Werte (Listerweise)	600					
	Concurrent	Alle Taps	600	-233	47	-4,95	16,720	279,572
		Gültige Werte (Listerweise)	600					
IOI 600	Baseline	Alle Taps	600	-35	116	-1,86	13,516	182,688
		Gültige Werte (Listerweise)	600					
	Concurrent	Alle Taps	600	-100	47	-8,69	17,430	303,818
		Gültige Werte (Listerweise)	600					

Test bei unabhängigen Stichproben

Tempo	Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit								
	F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz			
								Untere	Obere		
IOI 400	Alle Taps	Varianzen sind gleich	1,411	,235	-2,214	1198	,830	-,177	,824	-1,794	1,441
		Varianzen sind nicht gleich			-2,214	1186,724	,830	-,177	,824	-1,794	1,441
IOI 500	Alle Taps	Varianzen sind gleich	14,758	,000	4,549	1198	,000	3,768	,828	2,143	5,393
		Varianzen sind nicht gleich			4,549	1061,764	,000	3,768	,828	2,143	5,394
IOI 600	Alle Taps	Varianzen sind gleich	25,099	,000	7,583	1198	,000	6,828	,900	5,062	8,595
		Varianzen sind nicht gleich			7,583	1128,071	,000	6,828	,900	5,062	8,595

Tabelle 8.8: T-Test für die Mittelwertgleichheit bei unabhängigen Stichproben für die Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline und Concurrent differenziert nach IOI = 400, 500 und 600 ms (Vpn 1-10).

		Deskriptive Statistik					
ohne vs. mit Dual-Task		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
Baseline	Alle Taps	5400	-54	45	-2,50	11,141	124,127
	Gültige Werte (Listenweise)	5400					
Concurrent	Alle Taps	5400	-238	49	-5,07	14,830	219,938
	Gültige Werte (Listenweise)	5400					

Tabelle 8.9: Tabelle der Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent, bei denen während der Durchläufe nach 30, 35 oder 40 Sekunden zusätzlich zum Tapping eine Zweitaufgabe (Wörter lesen und merken) zu bewältigen war (Vpn 1-10).

den Durchläufen mit IOI = 400 ms kein signifikanter Unterschied ermittelt wurde ( $p = .830$ ).

Das Ausmaß des (negativen) Synchronisationsfehlers aus den Baselinedurchläufen ist auch hier außerordentlich gering, wobei die Werte für die einzelnen IOI dicht beieinander liegen. Für die Durchläufe mit IOI = 400 ms werden sogar Werte im positiven Bereich angezeigt. Vermutlich kommt hier für die Berechnung der Mittelwerte der Umstand zum Tragen, dass die Tapping-Durchläufe (Baseline) meistens mit ein paar wenigen positiven Werten am Anfang beginnen (Einschwingvorgang). Die Werte aus den Concurrent-Durchläufen heben sich indes abhängig vom Tempo deutlich voneinander ab. Je größer das IOI, desto größer erscheint auch der negative Synchronisationsfehler.

Hier deutet sich bereits ein wesentliches Ergebnis der empirischen Untersuchung an.

## 8.4 Teil II: Zweitaufgabe während der Durchläufe

In einem weiteren Schritt werden die Daten aller Durchläufe analysiert, bei denen nach 30, 35 oder 40 Sekunden zusätzlich eine Zweitaufgabe (Wörter merken) zu bewältigen war (Teil II des Experiments). Die Variation des Zeitpunkts für die Einblendung der Wörter sollte einen Lern- oder Übungseffekt vermeiden. Für die Analyse wurden die jeweils 30 Tap-Werte eines Durchlaufs vor und 30 Tap-Werte nach dem Treatment zusammengefasst.

Wie in Abbildung 8.9 zu sehen, ergeben sich bei einer ersten Berechnung der Daten unabhängig vom Tempo (IOI) unterschiedliche Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent: Der Mittelwert zeigt für die Kondition Baseline mit  $M = -2,50$  ms bei einer Standardabweichung  $SD = 11,141$  und einer Varianz  $s^2 = 124,127$  einen sehr geringen negativen Wert an, während der Wert für die Kondition Concurrent mit  $M = -5,07$  ( $SD = 14,830$  und  $s^2 = 219,938$ ) eine etwas größere negative Asynchronie anzeigt.

Test bei unabhängigen Stichproben

		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
									Untere	Obere
Alle Taps	Varianzen sind gleich	272,295	,000	10,173	10798	,000	2,568	,252	2,073	3,063
	Varianzen sind nicht gleich			10,173	10020,939	,000	2,568	,252	2,073	3,063

Tabelle 8.10: T-Test für die Mittelwertgleichheit bei unabhängigen Stichproben für die Werte aus den Durchläufen mit IOI = 400 ms und den Konditionen Baseline und Concurrent bei denen während der Durchläufe nach 30, 35 oder 40 Sekunden zusätzlich zum Tapping eine Zweitaufgabe (Wörter lesen und merken) zu bewältigen war (Vpn 1-10).

Die Differenz der Werte beider Konditionen ist nicht sehr groß. Dennoch zeigt der *t*-Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline und Concurrent, bei denen nach 30, 35 oder 40 Sekunden zusätzlich eine Zweitaufgabe (Wörter merken) zu bewältigen war (s. Abb. 8.10), einen statistisch hoch signifikanten Unterschied an ( $p < .001$ ).

Sortiert man die Daten dieser Durchläufe nach IOI, ergeben sich folgende Werte:

Während die Mittelwerte für die zwei Konditionen bei IOI = 400 ms mit  $M = -2,48$  ms (Baseline) und  $M = -2,68$  ms (Concurrent) fast deckungsgleich sind, ergeben sich für die Durchläufe mit IOI = 500 ms (Baseline:  $M = -2,37$  und Concurrent:  $M = -5,29$ ) und IOI = 600 ms (Baseline:  $M = -2,66$  und Concurrent:  $M = -7,24$ ) deutliche Differenzen. Darüber hinaus unterscheiden sich Standardabweichung und Varianz der Kondition Concurrent bei IOI = 500 ms (Baseline:  $SD = 10,539$   $s^2 = 111,077$  und Concurrent:  $SD = 15,325$   $s^2 = 234,843$ ) und 600 ms (Baseline:  $SD = 11,706$   $s^2 = 137,036$  und Concurrent:  $SD = 15,508$   $s^2 = 240,501$ ) im Vergleich zu den entsprechenden Baseline-Werten. Die Werte liegen hier für die Kondition Concurrent jeweils höher als die Baseline-Werte. Nur bei IOI = 400 ms liegen die Werte wieder sehr dicht beieinander (Baseline:  $SD = 11,152$   $s^2 = 124,362$  und Concurrent:  $SD = 13,201$  und  $s^2 = 174,269$ ).

Der *t*-Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline und Concurrent (s. Abb. 8.11 auf der nächsten Seite) zeigt für die Bedingungen IOI = 500 ms und IOI = 600 ms einen statistisch hoch signifikanten Unterschied an ( $p < .001$ ), während für die Werte aus den Durchläufen mit IOI = 400 ms kein signifikanter Unterschied ermittelt wurde ( $p = .622$ ).

## 8.5 Einfluss des Zeitpunkts der Zweitaufgabe

Wenn man alle Taps nach IOI und Art des Durchlaufs (Teil I & II) getrennt betrachtet, ergibt sich folgendes Bild:

Deskriptive Statistik

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
IOI 400	Baseline	Alle Taps	1800	-54	32	-2,48	11,152	124,362
		Gültige Werte (Listerweise)	1800					
	Concurrent	Alle Taps	1800	-58	45	-2,68	13,201	174,269
		Gültige Werte (Listerweise)	1800					
IOI 500	Baseline	Alle Taps	1800	-45	36	-2,37	10,539	111,077
		Gültige Werte (Listerweise)	1800					
	Concurrent	Alle Taps	1800	-238	40	-5,29	15,325	234,843
		Gültige Werte (Listerweise)	1800					
IOI 600	Baseline	Alle Taps	1800	-48	45	-2,66	11,706	137,036
		Gültige Werte (Listerweise)	1800					
	Concurrent	Alle Taps	1800	-82	49	-7,24	15,508	240,501
		Gültige Werte (Listerweise)	1800					

Test bei unabhängigen Stichproben

Tempo			Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
			F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
										Untere	Obere
IOI 400	Alle Taps	Varianzen sind gleich	45,617	,000	,494	3598	,622	,201	,407	-5,97	1,000
		Varianzen sind nicht gleich			,494	3500,243	,622	,201	,407	-5,97	1,000
IOI 500	Alle Taps	Varianzen sind gleich	115,180	,000	6,675	3598	,000	2,926	,438	2,067	3,786
		Varianzen sind nicht gleich			6,675	3189,684	,000	2,926	,438	2,067	3,786
IOI 600	Alle Taps	Varianzen sind gleich	97,970	,000	9,992	3598	,000	4,576	,458	3,678	5,474
		Varianzen sind nicht gleich			9,992	3346,650	,000	4,576	,458	3,678	5,474

Tabelle 8.11: T-Test für die Mittelwertgleichheit bei unabhängigen Stichproben für die Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline und Concurrent differenziert nach IOI = 400, 500 und 600 ms (Vpn 1-10).

Deskriptive Statistik

trial		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
ohne vs. mit Dual-Task (Einblendung -3s vor dem Trial)	Baseline (IOI 400)	600	-61	124	,33	14,960	223,804
	Concurrent (IOI 400)	600	-38	88	,51	13,566	184,047
	Gültige Werte (Listerweise)	600					
ohne vs. mit Dual-Task (Einblendung nach 30s)	Baseline (IOI 400)	600	-54	30	-2,46	11,752	138,105
	Concurrent (IOI 400)	600	-58	41	-1,51	13,030	169,780
	Gültige Werte (Listerweise)	600					
ohne vs. mit Dual-Task (Einblendung nach 35s)	Baseline (IOI 400)	600	-37	32	-1,86	10,718	114,872
	Concurrent (IOI 400)	600	-37	45	-3,08	12,609	158,985
	Gültige Werte (Listerweise)	600					
ohne vs. mit Dual-Task (Einblendung nach 40s)	Baseline (IOI 400)	600	-39	27	-3,12	10,942	119,724
	Concurrent (IOI 400)	600	-47	35	-3,46	13,873	192,466
	Gültige Werte (Listerweise)	600					

Tabelle 8.12: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent mit IOI = 400 ms der verschiedenen Durchläufe (Vpn 1-10).

Bei IOI = 400 ms liegen die jeweiligen Werte für die Bedingungen Baseline und Concurrent nicht weit auseinander. Wie in Abbildung 8.12 zu sehen ist, sind davon lediglich die Mittelwerte aus den Durchläufen mit der Einblendung der Wörter (-3 s) vor dem jeweiligen Durchlauf leicht im positiven Bereich. Alle anderen liegen zwischen -1,50 und -3,50 ms. Vermutlich kommt auch hier für die Berechnung der Mittelwerte der Umstand zum Tragen, dass diese Tapping-Durchläufe meistens mit ein paar wenigen positiven Werten am Anfang eines jeweiligen Durchlaufs beginnen (Einschwingvorgang).

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline und Concurrent der aus Teil I stammenden Durchläufe ohne Einblendung und mit Einblendung der Wörter am Anfang eines Durchlaufs (s. Abb. 8.13 auf der nächsten Seite) zeigt hier keinen signifikanten Unterschied an ( $p = .830$ ).

Und auch der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline und Concurrent der Durchläufe (Teil II), bei denen während eines Durchlaufs nach 30, 35 oder 40 Sekunden zusätzlich eine Zweitaufgabe (Wörter merken) zu bewältigen war (s. Abb. 8.14 auf der nächsten Seite) zeigt keinen signifikanten Unterschied an ( $p = .622$ ).

Bei IOI = 500 ms liegen die jeweiligen Mittelwerte für die Bedingungen Baseline und Concurrent zwischen 2,09 und 3,77 ms auseinander (s. Abb. 8.15 auf Seite 142). Die jeweiligen Standardabweichungen und Varianzen der Concurrent-Werte unterscheiden sich ebenfalls erheblich von denen der Baseline-Werte: Im Vergleich sind die Werte aus den Concurrent-Durchläufen sehr viel höher.

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Wer-

**Gruppenstatistiken**

ohne vs. mit Dual-Task		N	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
IOI 400	Baseline	600	,33	14,960	,611
	Concurrent	600	,51	13,566	,554

**Test bei unabhängigen Stichproben**

		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
									Untere	Obere
IOI 400	Varianzen sind gleich	1,411	,235	-,214	1198	,830	-,177	,824	-1,794	1,441
	Varianzen sind nicht gleich			-,214	1186,724	,830	-,177	,824	-1,794	1,441

Tabelle 8.13: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (Einblendung der Wörter am Anfang des Durchlaufs) mit IOI = 400 ms (Vpn 1-10).

**Gruppenstatistiken**

ohne vs. mit Dual-Task		N	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
IOI 400	Baseline	1800	-2,48	11,152	,263
	Concurrent	1800	-2,68	13,201	,311

**Test bei unabhängigen Stichproben**

		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
									Untere	Obere
IOI 400	Varianzen sind gleich	45,617	,000	,494	3598	,622	,201	,407	-,597	1,000
	Varianzen sind nicht gleich			,494	3500,243	,622	,201	,407	-,597	1,000

Tabelle 8.14: T-Test für die Mittelwertgleichheit bei unabhängigen Stichproben für die Werte aus den Durchläufen mit IOI = 400 ms und den Konditionen Baseline und Concurrent bei denen während der Durchläufe nach 30, 35 oder 40 Sekunden zusätzlich zum Tapping eine Zweitaufgabe (Wörter lesen und merken) zu bewältigen war (Vpn 1-10).

Deskriptive Statistik							
trial		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
ohne vs. mit Dual-Task (Einblendung -3s vor dem Trial)	Baseline (IOI 500)	600	-36	35	-1,18	11,494	132,107
	Concurrent (IOI 500)	600	-233	47	-4,95	16,720	279,572
	Gültige Werte (Listerweise)	600					
ohne vs. mit Dual-Task (Einblendung nach 30s)	Baseline (IOI 500)	600	-35	33	-3,48	10,583	112,010
	Concurrent (IOI 500)	600	-55	40	-6,85	15,044	226,322
	Gültige Werte (Listerweise)	600					
ohne vs. mit Dual-Task (Einblendung nach 35s)	Baseline (IOI 500)	600	-45	36	-2,09	10,687	114,221
	Concurrent (IOI 500)	600	-238	39	-5,01	17,134	293,559
	Gültige Werte (Listerweise)	600					
ohne vs. mit Dual-Task (Einblendung nach 40s)	Baseline (IOI 500)	600	-36	35	-1,54	10,265	105,364
	Concurrent (IOI 500)	600	-57	33	-4,03	13,466	181,332
	Gültige Werte (Listerweise)	600					

Tabelle 8.15: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent mit IOI = 500 ms der verschiedenen Durchläufe (Vpn 1-10).

te aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline und Concurrent der Durchläufe (Teil I) ohne Einblendung und mit Einblendung der Wörter am Anfang eines Durchlaufs (s. Abb. 8.16 auf der nächsten Seite) zeigt hier einen hoch signifikanten Unterschied an ( $p < .001$ ).

Und auch der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline und Concurrent der Durchläufe aus Teil II, bei denen während eines Durchlaufs nach 30, 35 oder 40 Sekunden zusätzlich eine Zweitaufgabe (Wörter merken) zu bewältigen war (s. Abb. 8.17 auf der nächsten Seite) zeigt einen signifikanten Unterschied an ( $p < .001$ ).

Bei IOI = 600 ms liegen die jeweiligen Mittelwerte für die Bedingungen Baseline und Concurrent zwischen 4 und knapp 7 ms auseinander (s. Abb. 8.18). Die jeweiligen Standardabweichungen und Varianzen der Concurrent-Werte unterscheiden sich hier ebenfalls erheblich von denen der Baseline-Werte: Im Vergleich sind die Werte aus den Concurrent-Durchläufen sehr viel höher.

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline und Concurrent der Durchläufe (Teil I) ohne Einblendung und mit Einblendung der Wörter am Anfang eines Durchlaufs (s. Abb. 8.19 auf Seite 144) zeigt einen signifikanten Unterschied an ( $p < .001$ ).

Und auch der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline und Concurrent der Durchläufe aus Teil II, bei denen während eines Durchlaufs nach 30, 35 oder 40 Sekunden zusätzlich eine Zweitaufgabe (Wörter merken) zu bewältigen war (s. Abb. 8.20 auf Seite 145) zeigt einen signifikanten Unterschied an ( $p < .001$ ).

**Gruppenstatistiken**

ohne vs. mit Dual-Task		N	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
IOI 500	Baseline	600	-1,18	11,494	,469
	Concurrent	600	-4,95	16,720	,683

**Test bei unabhängigen Stichproben**

		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
									Untere	Obere
IOI 500	Varianzen sind gleich	14,758	,000	4,549	1198	,000	3,768	,828	2,143	5,393
	Varianzen sind nicht gleich			4,549	1061,764	,000	3,768	,828	2,143	5,394

Tabelle 8.16: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (Einblendung der Wörter am Anfang des Durchlaufs) mit IOI = 500 ms (Vpn 1-10).

**Gruppenstatistiken**

ohne vs. mit Dual-Task		N	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
IOI 500	Baseline	1800	-2,37	10,539	,248
	Concurrent	1800	-5,29	15,325	,361

**Test bei unabhängigen Stichproben**

		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
									Untere	Obere
IOI 500	Varianzen sind gleich	115,180	,000	6,675	3598	,000	2,926	,438	2,067	3,786
	Varianzen sind nicht gleich			6,675	3189,684	,000	2,926	,438	2,067	3,786

Tabelle 8.17: T-Test für die Mittelwertgleichheit bei unabhängigen Stichproben für die Werte aus den Durchläufen mit IOI = 500 ms und den Konditionen Baseline und Concurrent bei denen während der Durchläufe nach 30, 35 oder 40 Sekunden zusätzlich zum Tapping eine Zweitaufgabe (Wörter lesen und merken) zu bewältigen war (Vpn 1-10).

## Deskriptive Statistik

trial		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
ohne vs. mit Dual-Task (Einblendung -3s vor dem Trial)	Baseline (IOI 600)	600	-35	116	-1,86	13,516	182,688
	Concurrent (IOI 600)	600	-100	47	-8,69	17,430	303,818
	Gültige Werte (Listerweise)	600					
ohne vs. mit Dual-Task (Einblendung nach 30s)	Baseline (IOI 600)	600	-40	25	-2,94	11,447	131,028
	Concurrent (IOI 600)	600	-82	48	-7,88	15,446	238,572
	Gültige Werte (Listerweise)	600					
ohne vs. mit Dual-Task (Einblendung nach 35s)	Baseline (IOI 600)	600	-35	45	-1,45	11,721	137,393
	Concurrent (IOI 600)	600	-73	49	-6,31	14,607	213,353
	Gültige Werte (Listerweise)	600					
ohne vs. mit Dual-Task (Einblendung nach 40s)	Baseline (IOI 600)	600	-48	35	-3,60	11,862	140,719
	Concurrent (IOI 600)	600	-69	43	-7,52	16,402	269,035
	Gültige Werte (Listerweise)	600					

Tabelle 8.18: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent mit IOI = 600 ms der verschiedenen Durchläufe (Vpn 1-10).

## Gruppenstatistiken

ohne vs. mit Dual-Task	N	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
IOI 600 Baseline	600	-1,86	13,516	,552
Concurrent	600	-8,69	17,430	,712

## Test bei unabhängigen Stichproben

	Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
	F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
								Untere	Obere
IOI 600	25,099	,000	7,583	1198	,000	6,828	,900	5,062	8,595
Varianzen sind gleich									
Varianzen sind nicht gleich			7,583	1128,071	,000	6,828	,900	5,062	8,595

Tabelle 8.19: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (Einblendung der Wörter am Anfang des Durchlaufs) mit IOI = 600 ms (Vpn 1-10).

Gruppenstatistiken

ohne vs. mit Dual-Task		N	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
IOI 600	Baseline	1800	-2,66	11,706	,276
	Concurrent	1800	-7,24	15,508	,366

Test bei unabhängigen Stichproben

		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
									Untere	Obere
IOI 600	Varianzen sind gleich	97,970	,000	9,992	3598	,000	4,576	,458	3,678	5,474
	Varianzen sind nicht gleich			9,992	3346,650	,000	4,576	,458	3,678	5,474

Tabelle 8.20: T-Test für die Mittelwertgleichheit bei unabhängigen Stichproben für die Werte aus den Durchläufen mit IOI = 600 ms und den Konditionen Baseline und Concurrent bei denen während der Durchläufe nach 30, 35 oder 40 Sekunden zusätzlich zum Tapping eine Zweitaufgabe (Wörter lesen und merken) zu bewältigen war (Vpn 1-10).

## 8.6 Überblick Teil II

Die Mittelwerte der Baseline-Kondition aus Teil II liegen unabhängig vom Tempo bzw. IOI jeweils zwischen -2 und -3 ms. Wie in Abbildung 8.6 dargestellt, unterscheiden sich indes die jeweiligen Mittelwerte der Concurrent-Kondition bei IOI = 500 und 600 ms deutlich von den entsprechenden Baseline-Werten. Nur der Mittelwert der Concurrent-Kondition bei IOI = 400 ms differiert kaum vom Vergleichswert der entsprechenden Baseline (vgl. Abschnitt 8.11 auf Seite 139). Abbildung 8.6 auf der nächsten Seite verdeutlicht: Je länger das IOI ist, desto größer ist auch der durchschnittliche negative Synchronisationsfehler während der Concurrent-Bedingung.

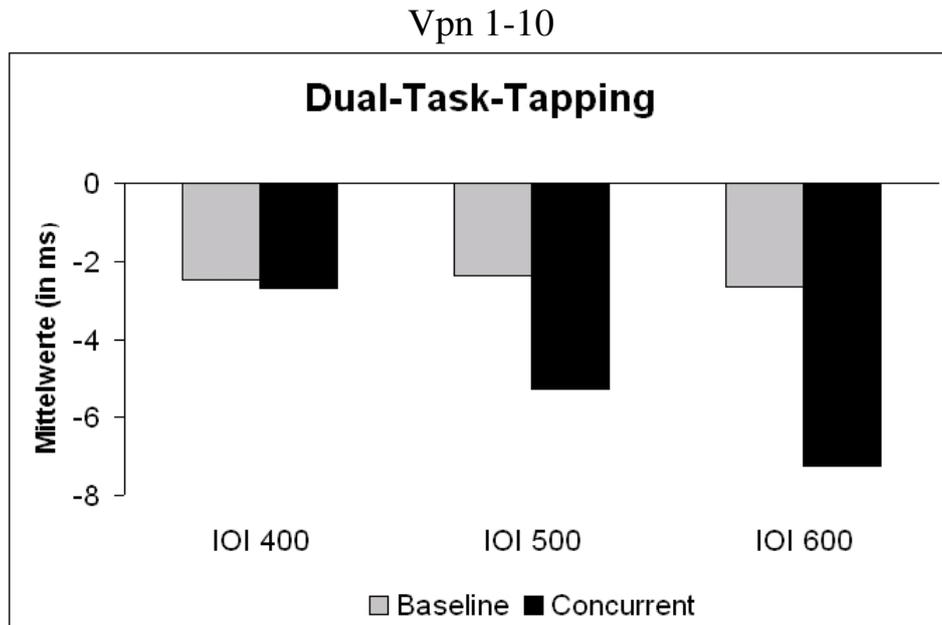


Abbildung 8.6: Grafische Darstellung der Mittelwerte für die Konditionen Baseline und Concurrent bei IOI = 400, 500 und 600 ms der Vpn 1-10 (Teil II) zusammengefasst.

Durch eine Einzelanalyse soll geprüft werden, ob sich die Tendenz auch aus den Mittelwerten einzelner Vpn ablesen lässt. In der folgenden Tabelle (s. Abbildung 8.21 auf der nächsten Seite) sind daher die jeweiligen Mittelwerte und Differenzwerte für die Konditionen Baseline und Concurrent für jede einzelne Vp dargestellt.

Aus der Tabelle (Abb. 8.21 auf der nächsten Seite) wird ersichtlich, dass lediglich die Differenzwerte von Vp 1, Vp 5, Vp 6, Vp 7 und Vp 9 eine ähnliche Tendenz erkennen lassen. Alle weiteren Werte weisen keine einheitliche Tendenz auf.

Vpn	Tempo	Mittelwert Baseline	Mittelwert Concurrent	Differenzwert
1	IOI 400	-0,97	3,40	4,37
	IOI 500	-2,41	-4,21	-1,80
	IOI 600	-1,31	-8,88	-7,57
2	IOI 400	-1,77	-9,21	-7,44
	IOI 500	-4,12	-12,43	-8,31
	IOI 600	-1,28	-8,64	-7,36
3	IOI 400	-5,75	-7,28	-1,53
	IOI 500	-5,14	-6,60	-1,46
	IOI 600	-6,41	-9,36	-2,96
4	IOI 400	0,14	-4,11	-4,25
	IOI 500	0,80	-7,90	-8,70
	IOI 600	-3,97	-3,76	0,21
5	IOI 400	-5,57	-1,49	4,07
	IOI 500	-2,57	-4,11	-1,54
	IOI 600	-3,66	-9,84	-6,18
6	IOI 400	-2,98	4,71	7,69
	IOI 500	-1,99	2,04	4,04
	IOI 600	2,04	-4,49	-6,54
7	IOI 400	-8,31	-8,16	0,16
	IOI 500	-1,76	-7,21	-5,45
	IOI 600	-3,86	-11,70	-7,84
8	IOI 400	-3,75	-2,62	1,13
	IOI 500	-5,61	-8,00	-2,39
	IOI 600	-7,46	-9,70	-2,24
9	IOI 400	4,80	5,27	0,47
	IOI 500	-0,28	-0,98	-0,70
	IOI 600	4,38	-2,04	-6,43
10	IOI 400	-0,66	-7,34	-6,68
	IOI 500	-0,58	-3,53	-2,95
	IOI 600	-5,09	-3,94	1,15
Alle	IOI 400	-2,48	-2,68	-0,20
	IOI 500	-2,37	-5,29	-2,92
	IOI 600	-2,66	-7,24	-4,58

Tabelle 8.21: Tabelle der Mittelwerte für die Konditionen Baseline und Concurrent und den sich daraus ergebenden Differenzwerten bei IOI = 400, 500 und 600 ms der Vpn 1-10.



# Kapitel 9

## Einzelbewertung

Die Darstellung der Einzelbewertungen jeder einzelnen Versuchsperson dient zunächst dem Einblick in die für die statistischen Berechnungen zugrunde liegende Datenbasis. Sie gibt zudem Auskunft über die intraindividuellen und interindividuellen Unterschiede des Tapping-Verhaltens, die aus den Mittelwertberechnungen nicht ersichtlich werden. Die Darstellung der Ergebnisse der einzelnen Versuchsdurchläufe aller Versuchspersonen sind online unter folgendem Link zu finden: .

### 9.1 Vpn 1-10 (Teil I)

Zur grafischen Analyse wurden die jeweils ersten 30 Taps aller Durchläufe, bei denen keine Zweitaufgabe zu bewältigen war (Baseline) oder bei denen die Einblendung der Wörter 3 s vor Beginn der Tappings (Concurrent) begann, jeweils übereinander gelegt. Die grafischen Darstellungen zeigen somit die Mittelwerte der einzelnen Tap-Positionen des jeweiligen Verlaufs an.

Wie in Abbildung 9.1 auf der nächsten Seite gut zu erkennen ist, unterscheiden sich die Verläufe Baseline und Concurrent mit  $IOI = 400$  ms kaum voneinander. Jeweils am Anfang häufen sich Werte im positiven Bereich, während die Werte im weiteren Verlauf leicht im negativen Bereich liegen.

Auch die Mittelwerte der Baseline und  $IOI = 500$  ms zeigen einen ähnlichen Verlauf. Die Werte liegen häufiger im negativen Bereich, wohingegen der Verlauf der Concurrent-Bedingung im selben Tempobereich deutlich mehr Tap-Mittelwerte im negativen Bereich zeigt. Bereits die ersten Mittelwerte liegen deutlich in einem Bereich zwischen  $-5$  und  $-8$  ms und heben sich damit sehr deutlich von den ersten Taps des Baseline-Verlaufs ab. Der grafische Verlauf macht hier anschaulich, dass die Zweitaufgabe bei  $IOI = 500$  ms direkt zu Beginn eine Wirkung auf das Tappingverhalten auslöst, welche sich in Form eines negativen Synchronisationsfehlers niederschlägt. Während in den Baseline-Durchläufen am Anfang meist einige Taps im positiven Bereich liegen, sind die Tap-Werte in den Concurrent-Durchläufen von Anfang an im negativen Bereich (s. dazu die grafischen Einzelbewertungen der

Durchläufe Teil 1). Bis auf einen Ausreißer auf Tap-Position 24 mit dem Wert -16,95 ms, der aufgrund eines ungewöhnlichen Ausreißers (-233 ms) von Vp 10 zustande gekommen ist, liegen die Tap-Mittelwerte im Folgenden nicht mehr so weit im negativen Bereich, wie noch am Anfang.

## Mittelwerte

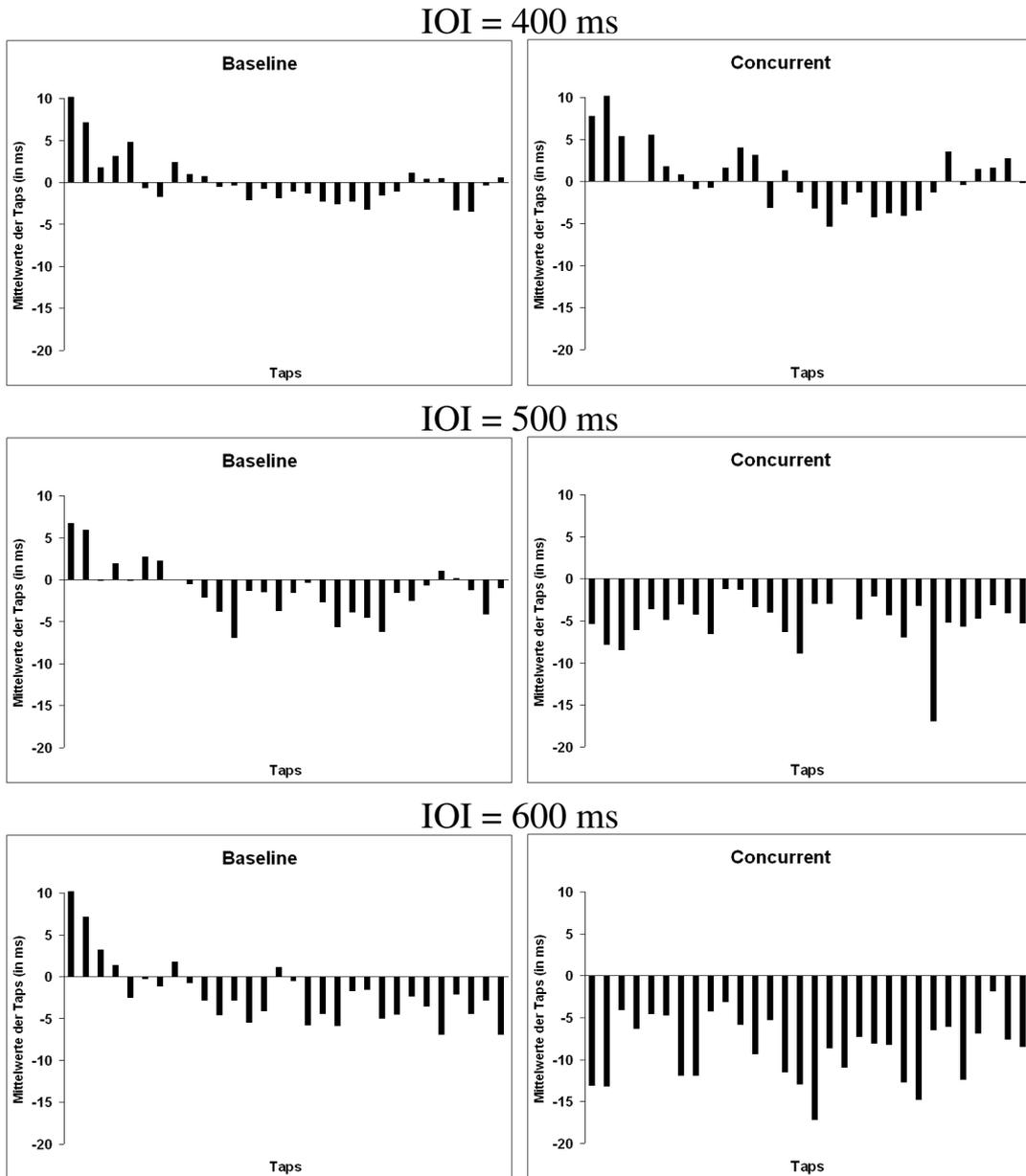


Abbildung 9.1: Grafische Darstellung der Mittelwerte für die Bedingungen ohne Zweitaufgabe (Baseline) und mit Zweitaufgabe (Concurrent) aus den verschiedenen Durchläufen aller Vpn mit IOI = 400 ms, 500 ms und 600 ms (Session A & B zusammengefasst).

Der Vergleich der Verläufe Baseline und Concurrent mit IOI = 600 ms zeigt noch deutlichere Unterschiede auf: Der Verlauf der Concurrent Bedingung im selben Tempobereich zeigt indes am meisten Tap-Mittelwerte im negativen Bereich. Hier liegen

die ersten zwei Werte sogar unter -13 ms. Damit heben sich die ersten Tap-Werte sehr deutlich von den ersten Taps des Baseline-Verlaufs ab. Der grafische Darstellung macht hier sehr anschaulich, dass die Zweitaufgabe bei IOI = 600 ms eine sofortige Wirkung auf das Tappingverhalten auslöst, welche sich in Form eines erhöhten negativen Synchronisationsfehlers niederschlägt. Während in den Baseline-Durchläufen am Anfang meist einige Taps im positiven Bereich liegen, sind die Tap-Werte in den Concurrent-Durchläufen von Anfang an im negativen Bereich. Insgesamt liegen hier auch im weiteren Verlauf sehr viel mehr Werte im negativen Bereich.

## 9.2 Vpn 1-10 (Teil II)

Abbildung 9.2 zeigt die grafische Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Mittelwerte aus allen Durchläufen mit IOI = 400 ms (Teil II) zusammengefasst. Die Mittelwerte der Taps vor dem Treatment (Zweitaufgabe) sind in Grau dargestellt, während die Mittelwerte der Taps nach Beginn des Treatments in Schwarz dargestellt sind. Es zeigt sich für beide Bedingungen ein sehr ähnlicher Verlauf, wobei die Mittelwerte jeweils leicht im negativen Bereich zwischen 0 und -6 ms liegen. Lediglich der Wert 4 Taps nach Beginn des Treatments liegt mit 0,97 ms im positiven Bereich.

Die Zweitaufgabe scheint bei einem IOI = 400 ms keinen (eindeutigen) Einfluss auf das Tappingverhalten zu haben.

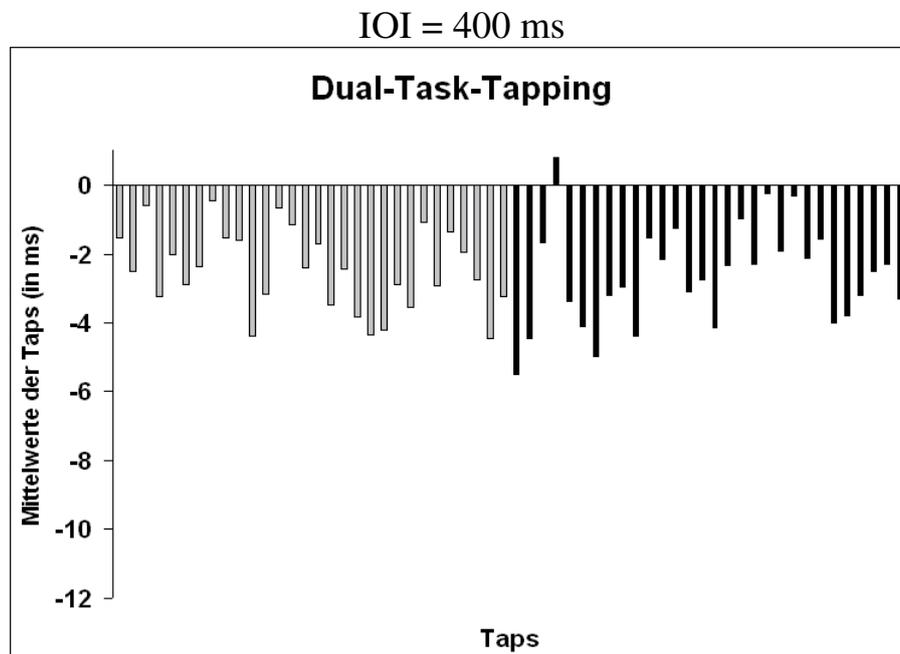


Abbildung 9.2: Grafische Darstellung des zeitlichen Verlaufs (von links nach rechts) der Mittelwerte vor dem Einblenden der Wörter (ohne Zweitaufgabe = grau) und nachher (mit Zweitaufgabe = schwarz) aller Vpn aus den Durchläufen mit IOI = 400 ms.

Demgegenüber zeigt sich bei IOI = 500 ms ein erheblicher Unterschied im Tap-

pingverhalten zwischen den Bedingungen vor und nach dem Beginn des Treatments. Wie in Abbildung 9.3 dargestellt, liegen die Mittelwerte der Taps vor Beginn der Zweitaufgabe (in Grau) nur leicht im negativen Bereich, während die Werte mit Beginn des Treatments sehr viel deutlicher im negativen Bereich liegen. Insbesondere die ersten neun Mittelwerte der Taps nach Beginn der Zweitaufgabe zeigen mit Werten zwischen -6 und -11 ms einen sehr viel größeren negativen Synchronisationsfehler an. Die Zweitaufgabe hat somit scheinbar einen erheblichen Einfluss auf das Tappingverhalten bei IOI = 500 ms, wobei sich die Veränderung des Tappingverhaltens vor allem ab dem Beginn des Treatments für die Dauer der Wörter-Einblendung zeigt.

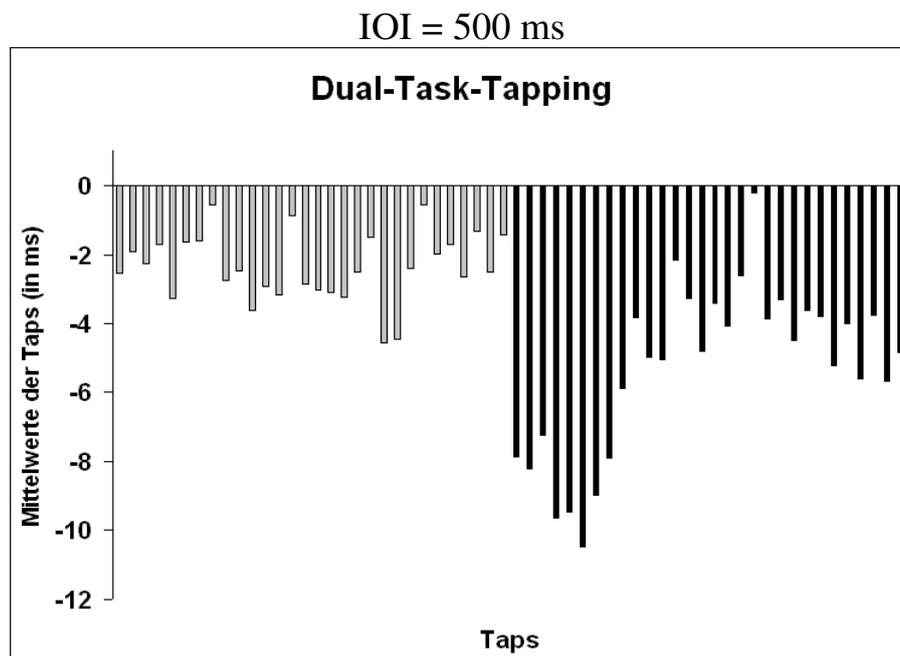


Abbildung 9.3: Grafische Darstellung des zeitlichen Verlaufs (von links nach rechts) der Mittelwerte vor dem Einblenden der Wörter (ohne Zweitaufgabe = grau) und nachher (mit Zweitaufgabe = schwarz) aller Vpn aus den Durchläufen mit IOI = 500 ms.

Die grafische Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Mittelwerte aus den Durchläufen mit IOI = 600 ms zeigt ebenfalls eine erhebliche Veränderung des Tappingverhaltens mit Beginn der Zweitaufgabe an (s. Abb. 9.4 auf der nächsten Seite). Während die Werte vor dem Treatment (in Grau) zumeist nur leicht im negativen Bereich liegen, zeigen die Mittelwerte der Taps nach Beginn des Treatments (in Schwarz) einen sehr hohen negativen Synchronisationsfehler an. Wie zuvor bei IOI = 500 ms weisen insbesondere die Werte genau nach Beginn der Zweitaufgabe bei sieben Mittelwerten einen deutlich erhöhten negativen Synchronisationsfehler auf. Im Anschluss daran gehen die Werte für kurze Zeit (6 Taps) mit Werten zwischen -3 und -4 ms wieder zurück in einen nur leicht negativen Bereich, wobei sie für die verbleibende Zeit wieder einen deutlich erhöhten negativen Synchronisationsfehler

mit Werten zwischen -6 und -9 ms anzeigen.

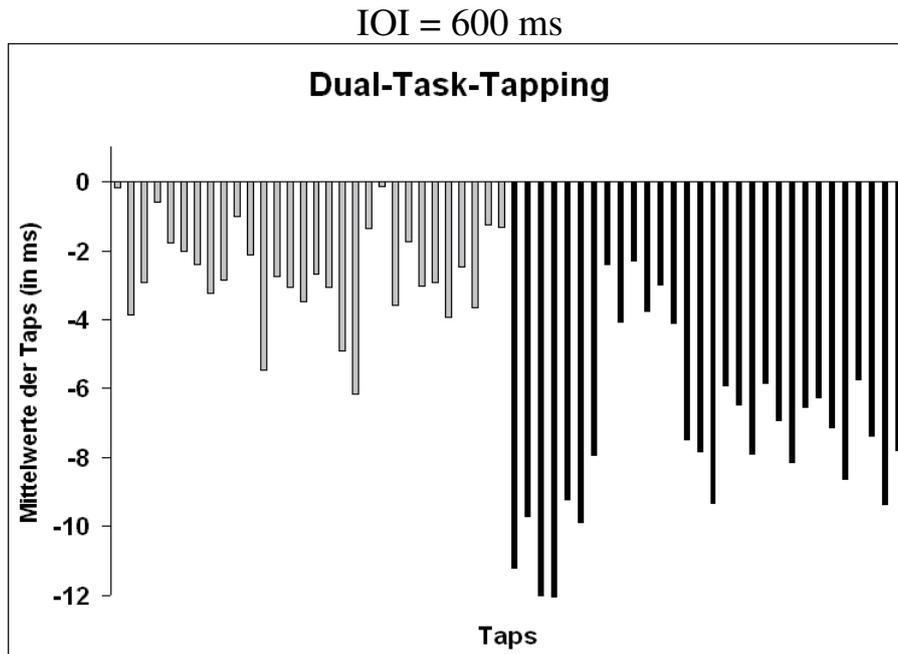


Abbildung 9.4: Grafische Darstellung des zeitlichen Verlaufs (von links nach rechts) der Mittelwerte vor dem Einblenden der Wörter (ohne Zweitaufgabe = grau) und nachher (mit Zweitaufgabe = schwarz) aller Vpn aus den Durchläufen mit IOI = 600 ms.

### 9.3 Auswertung der Daten (+/- 5 Taps)

Im Folgenden soll nun ein genauer Blick auf die jeweils 5 Tap-Werte geworfen werden, die sich in unmittelbarer Nähe des Zeitpunkts für die Einblendung der Wörter befinden. Neben der allgemeinen Anforderung der Zweitaufgabe (Wörter merken) hat das Lesen der Wörter (für 3 Sekunden) voraussichtlich einen besonderen Einfluss auf das Tappingverhalten, da es möglicherweise ein anderes Ausmaß der Störung hervorruft. Die jeweils 5 Tap-Werte um den Beginn des Treatments liegen genau in diesem Bereich.

Wie in Abbildung 9.1 auf der nächsten Seite zu sehen ist, ergeben sich bei der Berechnung sich deutlich voneinander zu unterscheidende Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent unabhängig vom Tempo (IOI): Der Mittelwert zeigt für die Kondition Baseline mit  $M = -0,27$  ms ( $SD = 14,084$  und einer  $s^2 = 198,369$ ) einen äußerst geringen negativen Wert an, während der Wert für die Kondition Concurrent mit  $M = -6,29$  ( $SD = 15,246$  und  $s^2 = 232,454$ ) eine größere negative Asynchronie anzeigt.

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline und Concurrent (s. Abb. 9.2) einen statistisch hoch signifikanten Unterschied an ( $p < .001$ ).

ohne vs. mit Dual-Task		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
Baseline	Alle Taps	1200	-52	124	-,27	14,084	198,369
	Gültige Werte (Listerweise)	1200					
Concurrent	Alle Taps	1200	-238	88	-6,29	18,986	360,477
	Gültige Werte (Listerweise)	1200					

Tabelle 9.1: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent der verschiedenen Durchläufe (Vpn 1-10).

		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
Alle Taps	Varianzen sind gleich	55,578	,000	8,819	2398	,000	6,018	,682	4,680	7,357
	Varianzen sind nicht gleich			8,819	2211,882	,000	6,018	,682	4,680	7,357

Tabelle 9.2: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) aller Vpn.

Wenn man alle Taps nach IOI getrennt betrachtet (s. Abb. 9.3 auf der nächsten Seite), ergibt sich ein differenzierteres Bild: Während die Mittelwerte für die zwei Konditionen bei IOI = 400 ms mit  $M = 0,51$  ms (Baseline) und  $M = -0,66$  ms (Concurrent) sehr dicht beieinanderliegen, ergeben sich für die Durchläufe mit IOI = 500 ms (Baseline:  $M = -1,03$  und Concurrent:  $M = -7,95$ ) und IOI = 600 ms (Baseline:  $M = -0,29$  und Concurrent:  $M = -10,27$ ) sehr deutliche Differenzen. Darüber hinaus unterscheiden sich Standardabweichung und Varianz der Kondition Concurrent bei IOI = 500 ms (Baseline:  $SD = 11,357$ ,  $s^2 = 128,972$  und Concurrent:  $SD = 19,782$ ,  $s^2 = 391,328$ ) und 600 ms (Baseline:  $SD = 13,909$ ,  $s^2 = 193,466$  und Concurrent:  $SD = 18,543$ ,  $s^2 = 343,854$ ) im Vergleich zu den entsprechenden Baseline-Werten. Die Werte liegen hier für die Kondition Concurrent jeweils höher als die Baseline-Werte. Nur bei IOI = 400 ms liegen die Werte sehr dicht beieinander (Baseline:  $SD = 16,507$ ,  $s^2 = 272,481$  und Concurrent:  $SD = 17,254$  und  $s^2 = 297,684$ ). Das Ausmaß des negativen Synchronisationsfehlers aus den Baseline-Durchläufen ist außerordentlich gering, wobei die Werte zwischen 0 und -1 ms für die einzelnen IOI sehr dicht beieinander liegen. Die Werte aus den Concurrent-Durchläufen heben sich indes abhängig vom Tempo deutlich voneinander ab. Je größer das IOI, desto größer erscheint auch der negative Synchronisationsfehler.

Eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) für wiederholte Messungen ergab einen statistisch signifikanten Effekt des Faktors Zweitaufgabe für die Tappingaufgaben mit IOI = 600 ms ( $F_{1,9} = 14,04$ ,  $p < .005$ ) und IOI = 500 ms ( $F_{1,9} = 20,39$ ,

Deskriptive Statistik

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz	
IOI 400	Baseline	Alle Taps	400	-52	124	,51	16,507	272,481
		Gültige Werte (Listerweise)	400					
	Concurrent	Alle Taps	400	-58	88	-,66	17,254	297,684
		Gültige Werte (Listerweise)	400					
IOI 500	Baseline	Alle Taps	400	-35	35	-1,03	11,357	128,972
		Gültige Werte (Listerweise)	400					
	Concurrent	Alle Taps	400	-238	47	-7,95	19,782	391,328
		Gültige Werte (Listerweise)	400					
IOI 600	Baseline	Alle Taps	400	-37	116	-,29	13,909	193,466
		Gültige Werte (Listerweise)	400					
	Concurrent	Alle Taps	400	-100	49	-10,27	18,543	343,854
		Gültige Werte (Listerweise)	400					

Test bei unabhängigen Stichproben

Tempo			Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
			F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
										Untere	Obere
IOI 400	Alle Taps	Varianzen sind gleich	6,354	,012	,976	798	,329	1,165	1,194	-1,179	3,509
		Varianzen sind nicht gleich			,976	796,444	,329	1,165	1,194	-1,179	3,509
IOI 500	Alle Taps	Varianzen sind gleich	28,494	,000	6,065	798	,000	6,918	1,141	4,679	9,156
		Varianzen sind nicht gleich			6,065	636,232	,000	6,918	1,141	4,678	9,157
IOI 600	Alle Taps	Varianzen sind gleich	18,119	,000	8,604	798	,000	9,973	1,159	7,697	12,248
		Varianzen sind nicht gleich			8,604	740,029	,000	9,973	1,159	7,697	12,248

Tabelle 9.3: T-Test für die Mittelwertgleichheit bei unabhängigen Stichproben für die Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline und Concurrent differenziert nach IOI = 400, 500 und 600 ms (Vpn 1-10).

$p < .001$ ), während sich bei den Durchläufen mit  $\text{IOI} = 400$  ms kein signifikanter Unterschied zwischen beiden verschiedenen Tappingaufgaben zeigte ( $F_{1,9} = 0.44$ ,  $p = .523$ ).

### Teil I: Durchläufe „ohne“ vs. „mit“ Zweitaufgabe

Während die Mittelwerte für beide Konditionen bei  $\text{IOI} = 400$  ms mit  $M = 6,76$  ms (Baseline) und  $M = 5,95$  ms (Concurrent) sehr dicht aneinander im positiven Bereich liegen, ergeben sich für die Durchläufe mit  $\text{IOI} = 500$  ms (Baseline:  $M = 2,88$  und Concurrent:  $M = -6,30$ ) und  $\text{IOI} = 600$  ms (Baseline:  $M = 4,43$  und Concurrent:  $M = -8,28$ ) deutliche Differenzen (s. Abb. 9.4 auf der nächsten Seite). Darüber hinaus unterscheiden sich Standardabweichung und Varianz der Kondition Concurrent bei  $\text{IOI} = 500$  ms (Baseline:  $SD = 14,078$ ;  $s^2 = 198,187$  und Concurrent:  $SD = 18,864$ ;  $s^2 = 355,869$ ) und  $600$  ms (Baseline:  $SD = 18,101$  und  $s^2 = 327,662$  und Concurrent:  $SD = 21,525$ ;  $s^2 = 463,315$ ) im Vergleich zu den entsprechenden Baseline-Werten. Die Werte liegen für die Kondition Concurrent jeweils höher als die Baseline-Werte. Nur bei  $\text{IOI} = 400$  ms liegen die Werte wieder sehr dicht beieinander (Baseline:  $SD = 23,876$ ;  $s^2 = 570,063$  und Concurrent:  $SD = 20,466$ ;  $s^2 = 418,876$ ).

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline und Concurrent (s. Abb. 9.4 auf der nächsten Seite) zeigt für die Bedingungen  $\text{IOI} = 500$  ms und  $\text{IOI} = 600$  ms einen statistisch hoch signifikanten Unterschied an ( $p < .001$ ), während sich für die Werte aus den Durchläufen mit  $\text{IOI} = 400$  ms kein signifikanter Unterschied ergibt ( $p = .797$ ).

Das Ausmaß des (negativen) Synchronisationsfehlers aus den Baseline-Durchläufen ist auch hier außerordentlich gering, wobei die Werte für die einzelnen  $\text{IOI}$  dicht beieinander liegen. Für die Durchläufe mit  $\text{IOI} = 400$  ms werden sogar Werte im positiven Bereich angezeigt. Vermutlich kommt hier für die Berechnung der Mittelwerte der Umstand zum Tragen, dass die Tapping-Durchläufe (Baseline) meistens mit ein paar wenigen positiven Werte am Anfang beginnen (Einschwingvorgang). Die Werte aus den Concurrent-Durchläufen heben sich indes abhängig vom Tempo deutlich voneinander ab. Je größer das  $\text{IOI}$ , desto größer erscheint auch der negative Synchronisationsfehler.

### Teil II: Zweitaufgabe während der Durchläufe

Während die Mittelwerte für die zwei Konditionen bei  $\text{IOI} = 400$  ms mit  $M = -1,58$  ms (Baseline) und  $M = -2,86$  ms (Concurrent) sehr ähnliche Werte aufweisen, ergeben sich für die Durchläufe mit  $\text{IOI} = 500$  ms (Baseline:  $M = -2,33$  und Concurrent:  $M = -8,50$ ) und  $\text{IOI} = 600$  ms (Baseline:  $M = -1,87$  und Concurrent:  $M = -10,93$ ) sehr deutliche Differenzen. Darüber hinaus unterscheiden sich Standardabweichung und Varianz der Kondition Concurrent bei  $\text{IOI} = 500$  ms (Baseline:  $SD = 9,983$ ;  $s^2 =$

Deskriptive Statistik

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz	
IOI 400	Baseline	Alle Taps	100	-52	124	6,76	23,876	570,063
		Gültige Werte (Listerweise)	100					
	Concurrent	Alle Taps	100	-37	88	5,95	20,466	418,876
		Gültige Werte (Listerweise)	100					
IOI 500	Baseline	Alle Taps	100	-26	35	2,88	14,078	198,187
		Gültige Werte (Listerweise)	100					
	Concurrent	Alle Taps	100	-49	47	-6,30	18,864	355,869
		Gültige Werte (Listerweise)	100					
IOI 600	Baseline	Alle Taps	100	-28	116	4,43	18,101	327,662
		Gültige Werte (Listerweise)	100					
	Concurrent	Alle Taps	100	-100	45	-8,28	21,525	463,315
		Gültige Werte (Listerweise)	100					

Test bei unabhängigen Stichproben

Tempo	Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit								
			F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
										Untere	Obere
IOI 400	Alle Taps	Varianzen sind gleich	,391	,532	,258	198	,797	,810	3,145	-5,391	7,011
		Varianzen sind nicht gleich			,258	193,478	,797	,810	3,145	-5,392	7,012
IOI 500	Alle Taps	Varianzen sind gleich	6,686	,010	3,900	198	,000	9,180	2,354	4,538	13,822
		Varianzen sind nicht gleich			3,900	183,165	,000	9,180	2,354	4,536	13,824
IOI 600	Alle Taps	Varianzen sind gleich	1,126	,290	4,519	198	,000	12,710	2,812	7,164	18,256
		Varianzen sind nicht gleich			4,519	192,343	,000	12,710	2,812	7,163	18,257

Tabelle 9.4: T-Test für die Mittelwertgleichheit bei unabhängigen Stichproben für die Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline und Concurrent differenziert nach IOI = 400, 500 und 600 ms (Vpn 1-10).

Deskriptive Statistik

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
IOI 400	Baseline	Alle Taps	300	-39	100	-1,58	12,547	157,415
		Gültige Werte (Listerweise)	300					
	Concurrent	Alle Taps	300	-58	45	-2,86	15,462	239,068
		Gültige Werte (Listerweise)	300					
IOI 500	Baseline	Alle Taps	300	-35	24	-2,33	9,983	99,668
		Gültige Werte (Listerweise)	300					
	Concurrent	Alle Taps	300	-238	34	-8,50	20,079	403,167
		Gültige Werte (Listerweise)	300					
IOI 600	Baseline	Alle Taps	300	-37	25	-1,87	11,821	139,735
		Gültige Werte (Listerweise)	300					
	Concurrent	Alle Taps	300	-82	49	-10,93	17,427	303,694
		Gültige Werte (Listerweise)	300					

Test bei unabhängigen Stichproben

Tempo			Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
			F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
										Untere	Obere
IOI 400	Alle Taps	Varianzen sind gleich	20,255	,000	1,116	598	,265	1,283	1,150	-,974	3,541
		Varianzen sind nicht gleich			1,116	573,669	,265	1,283	1,150	-,975	3,541
IOI 500	Alle Taps	Varianzen sind gleich	23,868	,000	4,761	598	,000	6,163	1,295	3,621	8,706
		Varianzen sind nicht gleich			4,761	438,319	,000	6,163	1,295	3,619	8,708
IOI 600	Alle Taps	Varianzen sind gleich	23,520	,000	7,452	598	,000	9,060	1,216	6,672	11,448
		Varianzen sind nicht gleich			7,452	526,076	,000	9,060	1,216	6,672	11,448

Tabelle 9.5: T-Test für die Mittelwertgleichheit bei unabhängigen Stichproben für die Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline und Concurrent differenziert nach IOI = 400, 500 und 600 ms (Vpn 1-10).

99,668 und Concurrent:  $SD = 20,079$ ;  $s^2 = 403,167$ ) und 600 ms (Baseline:  $SD = 11,821$ ;  $s^2 = 139,735$  und Concurrent:  $SD = 17,427$ ;  $s^2 = 303,694$ ) im Vergleich zu den entsprechenden Baseline-Werten. Die Werte liegen hier für die Kondition Concurrent jeweils höher als die Baseline-Werte. Nur bei IOI = 400 ms liegen die Werte nicht so weit auseinander (Baseline:  $SD = 12,547$ ;  $s^2 = 157,415$  und Concurrent:  $SD = 15,462$  und  $s^2 = 239,068$ ).

Der *t*-Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus den Durchläufen mit den Konditionen Baseline und Concurrent (s. Abb. 9.5) zeigt für die Bedingungen IOI = 500 ms und IOI = 600 ms einen statistisch hoch signifikanten Unterschied an ( $p < .001$ ), während für die Werte aus den Durchläufen mit IOI = 400 ms kein signifikanter Unterschied ermittelt wurde ( $p = .265$ ).

**Überblick**

Die Mittelwerte der Baseline-Kondition aus Teil II liegen unabhängig vom Tempo bzw. IOI jeweils zwischen -2 und -3 ms. Wie in Abbildung (9.5) dargestellt, unterscheiden sich indes die jeweiligen Mittelwerte der Concurrent-Kondition bei IOI = 500 und 600 ms deutlich von den entsprechenden Baseline-Werten. Nur der Mittel-

wert der Concurrent-Kondition bei IOI = 400 ms differiert kaum vom Vergleichswert der entsprechenden Baseline (vgl. Abschnitt 8.11 auf Seite 139). Abbildung 9.5 verdeutlicht: Je länger das IOI ist, desto größer ist auch der durchschnittliche negative Synchronisationsfehler während der Concurrent-Bedingung.

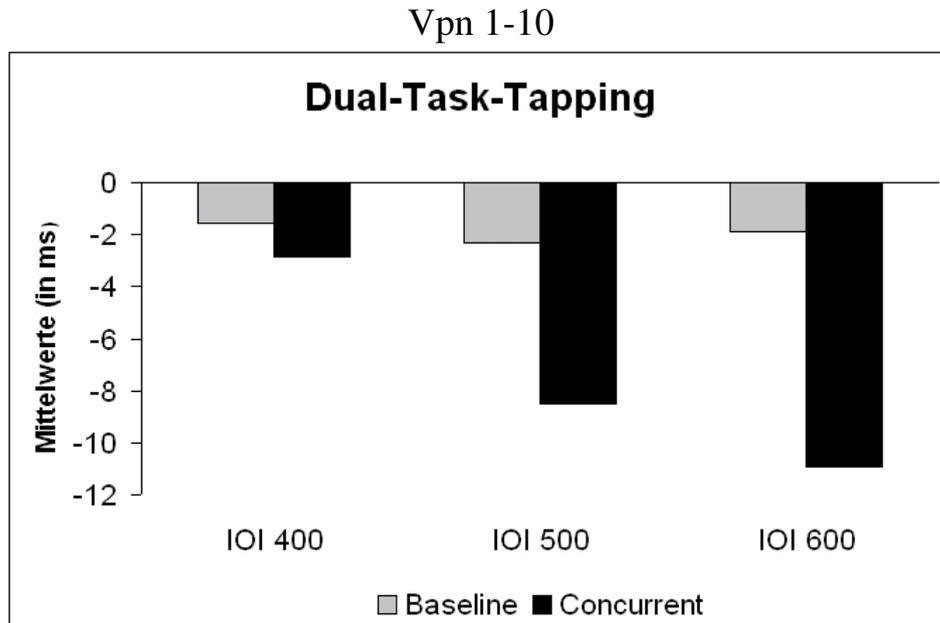


Abbildung 9.5: Grafische Darstellung der Mittelwerte für die Konditionen Baseline und Concurrent bei IOI = 400, 500 und 600 ms (Teil II) von Vpn 1-10 zusammengefasst.

Durch eine Einzelanalyse soll auch hier geprüft werden, ob sich diese allgemeine Tendenz ebenfalls aus den Mittelwerten einzelner Vpn ablesen lässt. In der folgenden Tabelle (s. Abb. 9.6 auf der nächsten Seite) sind daher die jeweiligen Mittelwerte für die Konditionen Baseline und Concurrent nach Tempo (IOI) differenziert für jede einzelne Vp samt der sich daraus ergebenden Differenzwerte dargestellt.

Aus der Tabelle (Abb. 9.6 auf der nächsten Seite) wird ersichtlich, dass lediglich die Differenzwerte von Vp 1, Vp 2, Vp 5, Vp 6, Vp 7 und Vp 9 eine solche Tendenz erkennen lassen. Alle weiteren Werte weisen keine einheitliche Tendenz auf.

## 9.4 Vergleich der Taps aus Session A & B (+/- 30 Taps)

Vergleicht man alle Baseline- und Concurrent-Werte von Session A mit den entsprechenden Werten aus Session B, so ergibt sich folgendes Bild: Sowohl die Werte für die Baseline- als auch für die Concurrent-Bedingung zeigen in der zweiten Session einen geringeren negativen Synchronisationsfehler an (s. Abb. 9.7 auf Seite 161). So liegt der Baseline-Wert aus Session A mit  $M = -2,47$  ( $SD = 12,436$  und  $s^2 = 154,662$ ) etwas weiter im negativen Bereich als der entsprechende Baseline-Wert aus Session B mit  $M = -1,74$  ( $SD = 11,059$  und  $s^2 = 122,295$ ), während der Concurrent-Wert aus

Vpn	Tempo	Mittelwert Baseline	Mittelwert Concurrent	Differenzwert
1	IOI 400	-1,83	1,00	2,83
	IOI 500	-2,40	-11,17	-8,77
	IOI 600	0,50	-12,53	-13,03
2	IOI 400	-2,77	-6,47	-3,70
	IOI 500	-4,30	-9,47	-5,17
	IOI 600	-2,47	-16,27	-13,80
3	IOI 400	-0,73	-13,60	-12,87
	IOI 500	-6,30	-9,90	-3,60
	IOI 600	-7,67	-20,53	-12,87
4	IOI 400	-1,97	-0,70	1,27
	IOI 500	3,53	-9,83	-13,37
	IOI 600	-2,67	-5,00	-2,33
5	IOI 400	-6,03	-4,33	1,70
	IOI 500	-4,90	-13,57	-8,67
	IOI 600	-0,30	-24,93	-24,63
6	IOI 400	-0,17	7,97	8,13
	IOI 500	-0,80	5,80	6,60
	IOI 600	3,87	1,27	-2,60
7	IOI 400	-5,00	-6,27	-1,27
	IOI 500	-4,07	-9,13	-5,07
	IOI 600	-4,27	-13,43	-9,17
8	IOI 400	-1,77	-8,13	-6,37
	IOI 500	-7,47	-12,60	-5,13
	IOI 600	-7,20	-11,53	-4,33
9	IOI 400	3,27	8,57	5,30
	IOI 500	0,83	1,37	0,53
	IOI 600	6,87	-2,97	-9,83
10	IOI 400	1,20	-6,67	-7,87
	IOI 500	2,53	-16,47	-19,00
	IOI 600	-5,33	-3,33	2,00
Alle	IOI 400	-1,58	-2,86	-1,28
	IOI 500	-2,33	-8,50	-6,17
	IOI 600	-1,87	-10,93	-9,06

Tabelle 9.6: Tabelle der Mittelwerte für die Konditionen Baseline und Concurrent (Teil II) und den sich daraus ergebenden Differenzwerten bei IOI = 400, 500 und 600 ms von Vpn 1-10.

Deskriptive Statistik

Session	ohne vs. mit Dual-Task		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
Session I	Baseline	taps	3600	-61	124	-2,47	12,436	154,662
		Gültige Werte (Listerweise)	3600					
	Concurrent	taps	3600	-238	87	-5,73	16,543	273,666
		Gültige Werte (Listerweise)	3600					
Session II	Baseline	taps	3600	-52	57	-1,74	11,059	122,295
		Gültige Werte (Listerweise)	3600					
	Concurrent	taps	3600	-73	88	-4,07	13,781	189,922
		Gültige Werte (Listerweise)	3600					

Tabelle 9.7: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent der verschiedenen Durchläufe aus Session A und Session B (Vpn 1-10).

Test bei unabhängigen Stichproben

ohne vs. mit Dual-Task			Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
			F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
										Untere	Obere
Baseline	taps	Varianzen sind gleich	27,010	,000	-2,643	7198	,008	-,733	,277	-1,277	-,189
		Varianzen sind nicht gleich			-2,643	7101,013	,008	-,733	,277	-1,277	-,189
Concurrent	taps	Varianzen sind gleich	56,241	,000	-4,636	7198	,000	-1,664	,369	-2,367	-,960
		Varianzen sind nicht gleich			-4,636	6970,541	,000	-1,664	,369	-2,367	-,960

Tabelle 9.8: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen von Session A und Session B für die Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) aller Vpn.

Session A mit  $M = -5,73$  ( $SD = 16,543$  und  $s^2 = 273,666$ ) mehr im negativen Bereich liegt als der entsprechende Concurrent-Wert aus Session B mit  $M = -4,07$  ( $SD = 13,781$  und  $s^2 = 189,922$ ).

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus Session A und B zeigt denn auch für die Baseline-Kondition mit  $p < .01$  und die Concurrent-Kondition ( $p < .001$ ) jeweils einen statistisch signifikanten Unterschied an (s. Abb. 9.8).

Die Analyse der Daten legt die Vermutung nahe, dass es sich hier um einen leichten Testübungseffekt handeln könnte.

Im Folgenden werden nun die Werte nach IOI differenziert und abermals auf Unterschiede zwischen Session A und B hin untersucht.

### IOI = 400 ms

Die Werte der Durchläufe mit IOI = 400 ms aus Session A und B liegen für die Baseline- und Concurrent-Bedingung jeweils sehr nah beieinander. Wie in Abbil-

Deskriptive Statistik

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	Session	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz	
IOI 400	Baseline	Session I	taps	1200	-61	124	-2,17	13,497	182,172
			Gültige Werte (Listerweise)	1200					
		Session II	taps	1200	-52	57	-1,39	10,904	118,896
			Gültige Werte (Listerweise)	1200					
	Concurrent	Session I	taps	1200	-58	87	-1,86	14,394	207,173
			Gültige Werte (Listerweise)	1200					
		Session II	taps	1200	-47	88	-1,91	12,250	150,062
			Gültige Werte (Listerweise)	1200					

Tabelle 9.9: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent der verschiedenen Durchläufe aus Session A und Session B mit IOI = 400 ms (Vpn 1-10).

Test bei unabhängigen Stichproben

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	taps	Levene-Test der Varianzgleichheit	T-Test für die Mittelwertgleichheit									
				F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz		
											Untere	Obere	
IOI 400	Baseline	taps	Varianzen sind gleich	26,813	,000	-1,544	2398	,123	-,773	,501	-1,756	,209	
			Varianzen sind nicht gleich			-1,544	2296,556	,123	-,773	,501	-1,756	,209	
		Concurrent	taps	Varianzen sind gleich	26,610	,000	,095	2398	,925	,052	,546	-1,018	1,122
				Varianzen sind nicht gleich			,095	2338,239	,925	,052	,546	-1,018	1,122

Tabelle 9.10: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit IOI = 400 ms von Session A und Session B für die Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) aller Vpn.

dung 9.9 dargestellt, liegt der Mittelwert der Baseline aus Session A mit  $M = -2,17$  ( $SD = 13,497$  und  $s^2 = 182,172$ ) nur geringfügig weiter im negativen Bereich als der entsprechende Wert aus Session B mit  $M = -1,39$  ( $SD = 10,904$  und  $s^2 = 118,896$ ). Die jeweiligen Concurrent-Werte liegen mit  $M = -1,86$  ( $SD = 14,394$  und  $s^2 = 207,173$ ) aus Session A und  $M = -1,91$  ( $SD = 12,250$  und  $s^2 = 150,062$ ) aus Session B noch sehr viel näher beieinander.

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus Session A und B zeigt für die Baseline-Kondition ( $p = .123$ ) und die Concurrent-Kondition ( $p = .925$ ) jeweils keinen statistisch signifikanten Unterschied an (s. Abb. 9.10).

Aufgrund des nur geringen Unterschiedes zwischen den Werten der beiden Sessions ist für die Durchläufe mit IOI = 400 ms kein Testübungseffekt ableitbar.

Deskriptive Statistik

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	Session	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz	
IOI 500	Baseline	Session I	taps	1200	-34	35	-2,58	10,990	120,783
			Gültige Werte (Listerweise)	1200					
	Concurrent	Session II	taps	1200	-45	36	-1,56	10,578	111,884
			Gültige Werte (Listerweise)	1200					

Tabelle 9.11: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent der verschiedenen Durchläufe aus Session A und Session B mit IOI = 500 ms (Vpn 1-10).

Test bei unabhängigen Stichproben

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	taps	Levene-Test der Varianzgleichheit	T-Test für die Mittelwertgleichheit								
				F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
											Untere	Obere
IOI 500	Baseline	taps	Varianzen sind gleich	2,163	,141	-2,313	2398	,021	-1,018	,440	-1,882	-,155
			Varianzen sind nicht gleich			-2,313	2394,498	,021	-1,018	,440	-1,882	-,155
	Concurrent	taps	Varianzen sind gleich	24,684	,000	-3,675	2398	,000	-2,347	,639	-3,599	-1,094
			Varianzen sind nicht gleich			-3,675	2213,452	,000	-2,347	,639	-3,599	-1,094

Tabelle 9.12: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit IOI = 500 ms von Session A und Session B für die Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) aller Vpn.

**IOI = 500 ms**

Die Werte der Durchläufe mit IOI = 500 ms aus Session A und B liegen für die Baseline- und Concurrent-Bedingung hingegen ein wenig weiter auseinander. Wie in Abbildung 9.11 zu sehen ist, liegt der Mittelwert der Baseline aus Session A mit  $M = -2,58$  ( $SD = 10,990$  und  $s^2 = 120,783$ ) etwas weiter im negativen Bereich als der entsprechende Wert aus Session B mit  $M = -1,56$  ( $SD = 10,578$  und  $s^2 = 111,884$ ). Die jeweiligen Concurrent-Werte liegen mit  $M = -6,38$  ( $SD = 17,757$  und  $s^2 = 315,305$ ) aus Session A und  $M = -4,03$  ( $SD = 13,191$  und  $s^2 = 174,015$ ) aus Session B knapp 2 ms auseinander.

Der *t*-Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus Session A und B zeigt für die Baseline-Kondition ( $p < .05$ ) und die Concurrent-Kondition ( $p < .001$ ) jeweils einen statistisch signifikanten Unterschied an (s. Abb. 9.12).

Die Differenzen zwischen den Werten der Durchläufe mit IOI = 500 ms aus Session A und B lassen auf einen leichten Testübungseffekt schließen, denn insbesonde-

Deskriptive Statistik

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	Session	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz	
IOI 600	Baseline	Session I	taps	1200	-48	116	-2,66	12,694	161,148
			Gültige Werte (Listerweise)	1200					
		Session II	taps	1200	-45	45	-2,26	11,657	135,889
			Gültige Werte (Listerweise)	1200					
	Concurrent	Session I	taps	1200	-100	49	-8,95	16,529	273,206
			Gültige Werte (Listerweise)	1200					
		Session II	taps	1200	-73	45	-6,25	15,381	236,583
			Gültige Werte (Listerweise)	1200					

Tabelle 9.13: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent der verschiedenen Durchläufe aus Session A und Session B mit IOI = 600 ms (Vpn 1-10).

re die Concurrent-Werte aus Session B weisen einen geringeren negativen Synchronisationsfehler auf.

## IOI = 600 ms

Die Werte der Durchläufe mit IOI = 600 ms aus Session A und II liegen für die Baseline-Bedingung sehr dicht beieinander. Wie in Abbildung 9.13 zu sehen, liegt der Mittelwert der Baseline aus Session A mit  $M = -2,66$  ( $SD = 12,694$  und  $s^2 = 161,148$ ) nur geringfügig weiter im negativen Bereich als der entsprechende Wert aus Session B mit  $M = -2,26$  ( $SD = 11,657$  und  $s^2 = 135,889$ ). Die jeweiligen Concurrent-Werte liegen indes mit  $M = -8,95$  ( $SD = 16,529$  und  $s^2 = 273,206$ ) aus Session A und  $M = -6,25$  ( $SD = 15,381$  und  $s^2 = 236,583$ ) aus Session B über 2,5 ms deutlich auseinander.

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus Session A und B zeigt für die Baseline-Kondition ( $p = .413$ ) keinen statistisch signifikanten Unterschied an, während für die Concurrent-Bedingung mit  $p < .001$  ein statistisch signifikanter Unterschied angezeigt wird (s. Abb. 9.14).

Für die Durchläufe mit IOI = 600 ms zeigt sich kein erheblicher Unterschied zwischen den Baseline-Werten aus Session A und B. Somit ist zumindest für die Baseline-Bedingung kein Testübungseffekt erkennbar. Wohingegen die deutlichen Differenzen zwischen den Concurrent-Werten aus Session A und B einen Testübungseffekt vermuten lassen.

**Test bei unabhängigen Stichproben**

				Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
				F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	taps	Varianzen sind gleich Varianzen sind nicht gleich							Untere	Obere	
IOI 600	Baseline	taps	Varianzen sind gleich	4,130	,042	-,819	2398	,413	-,408	,498	-1,383	,568
			Varianzen sind nicht gleich			-,819	2380,784	,413	-,408	,498	-1,383	,568
	Concurrent	taps	Varianzen sind gleich	3,882	,049	-4,136	2398	,000	-2,696	,652	-3,974	-1,418
			Varianzen sind nicht gleich			-4,136	2385,688	,000	-2,696	,652	-3,974	-1,418

Tabelle 9.14: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit IOI = 600 ms von Session A und Session B für die Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) aller Vpn.

**Deskriptive Statistik**

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	Session	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz	
IOI 400	Baseline	Session I	taps	300	-61	124	,51	16,612	275,943
			Gültige Werte (Listerweise)	300					
	Session II	taps	300	-52	57	,15	13,128	172,346	
		Gültige Werte (Listerweise)	300						
Concurrent	Session I	taps	300	-38	87	2,04	14,124	199,487	
			Gültige Werte (Listerweise)	300					
	Session II	taps	300	-37	88	-1,03	12,826	164,514	
		Gültige Werte (Listerweise)	300						

Tabelle 9.15: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent der verschiedenen Durchläufe aus Session A und Session B mit IOI = 400 ms (Vpn 1-10).

## Teil I

Im Folgenden werden die Werte aus Teil I und II des Experiments getrennt und nach IOI differenziert auf Unterschiede zwischen Session A und B hin untersucht.

### IOI = 400 ms

Die Werte der Durchläufe mit IOI = 400 ms (Teil I) aus Session A und B liegen für die Baseline-Bedingung sehr nah beieinander. Wie in Abbildung 9.15 dargestellt, liegt der Mittelwert der Baseline aus Session A mit  $M = 0,51$  ( $SD = 16,612$  und  $s^2 = 275,943$ ) ähnlich wie der entsprechende Wert aus Session B mit  $M = 0,15$  ( $SD = 13,128$  und  $s^2 = 172,346$ ) äußerst geringfügig im positiven Bereich. Die jeweiligen Concurrent-Werte liegen indes mit  $M = 2,04$  ( $SD = 14,124$  und  $s^2 = 199,487$ ) aus Session A und  $M = -1,03$  ( $SD = 12,826$  und  $s^2 = 164,514$ ) aus Session B knapp 3 ms auseinander.

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte

**Test bei unabhängigen Stichproben**

				Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
				F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
Tempo	ohne vs. mit Dual-Task								Untere	Obere		
IOI 400	Baseline	taps	Varianzen sind gleich	4,452	,035	,297	598	,766	,363	1,222	-2,037	2,764
			Varianzen sind nicht gleich			,297	567,683	,766	,363	1,222	-2,038	2,764
	Concurrent	taps	Varianzen sind gleich	1,033	,310	2,781	598	,006	3,063	1,102	,900	5,227
			Varianzen sind nicht gleich			2,781	592,530	,006	3,063	1,102	,900	5,227

Tabelle 9.16: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit IOI = 400 ms von Session A und Session B für die Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) aller Vpn.

**Deskriptive Statistik**

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	Session		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
IOI 500	Baseline	Session I	taps	300	-34	35	-2,44	12,420	154,261
			Gültige Werte (Listerweise)	300					
		Session II	taps	300	-36	33	,08	10,354	107,208
			Gültige Werte (Listerweise)	300					
	Concurrent	Session I	taps	300	-233	38	-7,23	19,699	388,042
			Gültige Werte (Listerweise)	300					
		Session II	taps	300	-49	47	-2,68	12,714	161,651
			Gültige Werte (Listerweise)	300					

Tabelle 9.17: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent der verschiedenen Durchläufe aus Session A und Session B mit IOI = 500 ms (Vpn 1-10).

aus Session A und B zeigt für die Baseline-Kondition ( $p = .766$ ) keinen statistisch signifikanten Unterschied an, während sich für die Berechnung der Concurrent-Werte mit  $p < .01$  ein signifikanter Unterschied ergibt (s. Abb. 9.16).

## IOI = 500 ms

Die Werte der Durchläufe mit IOI = 500 ms (Teil I) aus Session A und B liegen für die Baseline- und Concurrent-Bedingung hingegen ein wenig weiter auseinander. Wie in Abbildung 9.17 zu sehen, liegt der Mittelwert der Baseline aus Session A mit  $M = -2,44$  ( $SD = 12,420$  und  $s^2 = 154,261$ ) im negativen Bereich, während der entsprechende Wert aus Session B mit  $M = 0,08$  ( $SD = 10,354$  und  $s^2 = 107,208$ ) knapp im positiven Bereich liegt. Die jeweiligen Concurrent-Werte liegen mit  $M = -7,23$  ( $SD = 19,699$  und  $s^2 = 388,042$ ) aus Session A und  $M = -2,68$  ( $SD = 12,714$  und  $s^2 = 161,651$ ) aus Session B mit knapp 5 ms recht weit auseinander.

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus Session A und B zeigt denn auch für die Baseline-Kondition ( $p < .01$ ) und die

**Test bei unabhängigen Stichproben**

				Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
				F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
Tempo	ohne vs. mit Dual-Task								Untere	Obere		
IOI 500	Baseline	taps	Varianzen sind gleich	6,247	,013	-2,699	598	,007	-2,520	,934	-4,353	-,687
			Varianzen sind nicht gleich			-2,699	579,242				,007	-2,520
	Concurrent	taps	Varianzen sind gleich	8,941	,003	-3,361	598	,001	-4,550	1,354	-7,208	-1,892
			Varianzen sind nicht gleich			-3,361	511,277				,001	-4,550

Tabelle 9.18: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit IOI = 500 ms von Session A und Session B für die Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) aller Vpn.

**Deskriptive Statistik**

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	Session		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
IOI 600	Baseline	Session I	taps	300	-34	116	-1,51	14,474	209,495
			Gültige Werte (Listerweise)	300					
		Session II	taps	300	-35	31	-2,21	12,500	156,251
			Gültige Werte (Listerweise)	300					
	Concurrent	Session I	taps	300	-100	47	-10,89	18,619	346,671
			Gültige Werte (Listerweise)	300					
		Session II	taps	300	-56	45	-6,48	15,882	252,224
			Gültige Werte (Listerweise)	300					

Tabelle 9.19: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent der verschiedenen Durchläufe aus Session A und Session B mit IOI = 600 ms (Vpn 1-10).

Concurrent-Kondition ( $p = .001$ ) jeweils einen statistisch signifikanten Unterschied an (s. Abb. 9.18).

### IOI = 600 ms

Die Werte der Durchläufe mit IOI = 600 ms (Teil I) aus Session A und B liegen für die Baseline-Bedingung dicht beieinander. Wie in Abbildung 9.19 zu sehen, liegt der Mittelwert der Baseline aus Session A mit  $M = -1,51$  ( $SD = 14,474$  und  $s^2 = 209,495$ ) etwas weniger weit im negativen Bereich als der entsprechende Wert aus Session B mit  $M = -2,21$  ( $SD = 11,500$  und  $s^2 = 156,251$ ). Die jeweiligen Concurrent-Werte liegen mit  $M = -10,89$  ( $SD = 18,619$  und  $s^2 = 346,671$ ) aus Session A und  $M = -6,48$  ( $SD = 15,882$  und  $s^2 = 252,224$ ) aus Session B über 4 ms deutlich auseinander.

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus Session A und B zeigt für die Baseline-Kondition ( $p = .530$ ) keinen statistisch signifikanten Unterschied an, während für die Concurrent-Bedingung mit  $p < .01$  ein statistisch signifikanter Unterschied angezeigt wird (s. Abb. 9.14 auf Seite 165).

**Test bei unabhängigen Stichproben**

				Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
				F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
Tempo	ohne vs. mit Dual-Task								Untere	Obere		
IOI 600	Baseline	taps	Varianzen sind gleich	,611	,435	,628	598	,530	,693	1,104	-1,475	2,862
			Varianzen sind nicht gleich			,628						
	Concurrent	taps	Varianzen sind gleich	3,653	,056	-3,121	598	,002	-4,410	1,413	-7,185	-1,635
			Varianzen sind nicht gleich			-3,121						

Tabelle 9.20: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit IOI = 600 ms von Session A und Session B für die Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) aller Vpn.

**Deskriptive Statistik**

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	Session		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
IOI 400	Baseline	Session I	taps	900	-54	32	-3,06	12,166	148,001
			Gültige Werte (Listerweise)	900					
		Session II	taps	900	-38	26	-1,91	10,010	100,197
			Gültige Werte (Listerweise)	900					
	Concurrent	Session I	taps	900	-58	45	-3,16	14,255	203,204
			Gültige Werte (Listerweise)	900					
		Session II	taps	900	-47	35	-2,21	12,045	145,074
			Gültige Werte (Listerweise)	900					

Tabelle 9.21: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent der verschiedenen Durchläufe aus Session A und Session B mit IOI = 400 ms (Vpn 1-10).

## Teil II

### IOI = 400 ms

Die Werte der Durchläufe mit IOI = 400 ms (Teil II) aus Session A und B liegen für die Baseline-Bedingung nicht sehr weit auseinander. Wie in Abbildung 9.21 dargestellt, liegt der Mittelwert der Baseline aus Session A mit  $M = -3,06$  ( $SD = 12,166$  und  $s^2 = 148,001$ ) etwas weiter im negativen Bereich als der entsprechende Wert aus Session B mit  $M = -1,91$  ( $SD = 10,010$  und  $s^2 = 100,197$ ). Die jeweiligen Concurrent-Werte liegen mit  $M = -3,16$  ( $SD = 14,255$  und  $s^2 = 203,204$ ) aus Session A und  $M = -2,21$  ( $SD = 12,945$  und  $s^2 = 145,075$ ) aus Session B etwas mehr als 1 ms auseinander.

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus Session A und B zeigt für die Baseline-Kondition ( $p < .05$ ) einen statistisch signifikanten Unterschied an, während sich für die Berechnung der Concurrent-Werte mit  $p = .126$  kein Unterschied ergibt (s. Abb. 9.22).

**Test bei unabhängigen Stichproben**

				Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
				F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
Tempo	ohne vs. mit Dual-Task									Untere	Obere	
IOI 400	Baseline	taps	Varianzen sind gleich	29,013	,000	-2,194	1798	,028	-1,152	,525	-2,182	-,122
			Varianzen sind nicht gleich			-2,194					1733,686	,028
	Concurrent	taps	Varianzen sind gleich	26,061	,000	-1,531	1798	,126	-9,952	,622	-2,172	,268
			Varianzen sind nicht gleich			-1,531					1749,269	,126

Tabelle 9.22: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit IOI = 400 ms von Session A und Session B für die Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) aller Vpn.

**Deskriptive Statistik**

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	Session	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz	
IOI 500	Baseline	Session I	taps	900	-32	33	-2,63	10,477	109,774
			Gültige Werte (Listerweise)	900					
		Session II	taps	900	-45	36	-2,11	10,600	112,370
			Gültige Werte (Listerweise)	900					
	Concurrent	Session I	taps	900	-238	40	-6,10	17,063	291,146
			Gültige Werte (Listerweise)	900					
	Session II	taps	900	-57	35	-4,49	13,323	177,500	
		Gültige Werte (Listerweise)	900						

Tabelle 9.23: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent der verschiedenen Durchläufe aus Session A und Session B mit IOI = 400 ms (Vpn 1-10).

### IOI = 500 ms

Die Werte der Durchläufe mit IOI = 500 ms (Teil II) aus Session A und B liegen für die Baseline-Bedingung nicht weit auseinander. Wie in Abbildung 9.23 zu sehen, liegt der Mittelwert der Baseline aus Session A mit  $M = -2,63$  ( $SD = 10,477$  und  $s^2 = 109,774$ ) nur geringfügig weiter im negativen Bereich als der entsprechende Wert aus Session B mit  $M = -2,11$  ( $SD = 10,600$  und  $s^2 = 112,370$ ). Die jeweiligen Concurrent-Werte liegen indes mit  $M = -6,10$  ( $SD = 17,063$  und  $s^2 = 291,146$ ) aus Session A und  $M = -4,49$  ( $SD = 13,323$  und  $s^2 = 177,500$ ) aus Session B etwas über 2 ms auseinander.

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus Session A und B zeigt für die Baseline-Kondition ( $p = .297$ ) keinen signifikanten Unterschied an, während für die Concurrent-Kondition mit  $p = .01$  ein statistisch signifikanter Unterschied angezeigt wird (s. Abb. 9.24 auf der nächsten Seite).

**Test bei unabhängigen Stichproben**

				Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
				F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
Tempo	ohne vs. mit Dual-Task								Untere	Obere		
IOI 500	Baseline	taps	Varianzen sind gleich	,170	,680	-1,042	1798	,297	-5,18	,497	-1,492	,457
			Varianzen sind nicht gleich			-1,042	1797,755					
	Concurrent	taps	Varianzen sind gleich	15,864	,000	-2,234	1798	,026	-1,612	,722	-3,028	-,197
			Varianzen sind nicht gleich			-2,234	1698,141					

Tabelle 9.24: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit IOI = 400 ms von Session A und Session B für die Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) aller Vpn.

**Deskriptive Statistik**

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	Session		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
IOI 600	Baseline	Session I	taps	900	-48	35	-3,05	12,027	144,659
			Gültige Werte (Listerweise)	900					
	Session II	taps	900	-45	45	-2,27	11,370	129,266	
		Gültige Werte (Listerweise)	900						
Concurrent	Session I	taps	Gültige Werte (Listerweise)	900	-82	49	-8,30	15,729	247,391
			Gültige Werte (Listerweise)	900					
	Session II	taps	900	-73	40	-6,17	15,219	231,621	
		Gültige Werte (Listerweise)	900						

Tabelle 9.25: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent der verschiedenen Durchläufe aus Session A und Session B mit IOI = 400 ms (Vpn 1-10).

## IOI = 600 ms

Die Werte der Durchläufe mit IOI = 600 ms (Teil II) aus Session A und B liegen für die Baseline-Bedingung nicht weit auseinander. Wie in Abbildung 9.25 dargestellt, liegt der Mittelwert der Baseline aus Session A mit  $M = -3,05$  ( $SD = 12,027$  und  $s^2 = 144,659$ ) etwas weiter im negativen Bereich als der entsprechende Wert aus Session B mit  $M = -2,27$  ( $SD = 11,370$  und  $s^2 = 129,266$ ). Die jeweiligen Concurrent-Werte liegen mit  $M = -8,30$  ( $SD = 15,729$  und  $s^2 = 247,391$ ) aus Session A und  $M = -6,17$  ( $SD = 15,219$  und  $s^2 = 231,621$ ) aus Session B über 2 ms auseinander.

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus Session A und B zeigt für die Baseline-Kondition ( $p = .161$ ) keinen statistisch signifikanten Unterschied an, während für die Concurrent-Bedingung mit  $p < .01$  ein statistisch signifikanter Unterschied angezeigt wird (s. Abb. 9.26).

Test bei unabhängigen Stichproben

				Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
				F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	taps	Varianzen sind gleich Varianzen sind nicht gleich							Untere	Obere	
IOI 600	Baseline	taps	Varianzen sind gleich	3,623	,057	-1,404	1798	,161	-,774	,552	-1,856	,308
			Varianzen sind nicht gleich			-1,404	1792,341	,161	-,774	,552	-1,856	,308
	Concurrent	taps	Varianzen sind gleich	1,207	,272	-2,912	1798	,004	-2,124	,730	-3,555	-,694
			Varianzen sind nicht gleich			-2,912	1796,053	,004	-2,124	,730	-3,555	-,694

Tabelle 9.26: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit IOI = 400 ms von Session A und Session B für die Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) aller Vpn.

## 9.5 Berechnung des Interventionseffekts

Um zu prüfen, ob der Einfluss der Zweitaufgabe im Teil II des Experiments eindeutig mit dem Beginn des Treatments zu einer Veränderung des Tappingverhaltens führt, wird im Folgenden eine MANOVA für wiederholte Messungen durchgeführt.

```

* * * * * A n a l y s i s   o f   V a r i a n c e * * * * *

180 cases accepted.
  0 cases rejected because of out-of-range factor values.
  0 cases rejected because of missing data.
  1 non-empty cell.

1 design will be processed.

-----

* * * * * A n a l y s i s   o f   V a r i a n c e -- design 1 * * * * *

EFFECT .. CONSTANT
Multivariate Tests of Significance (S = 1, M = 4 , N = 84 )

Test Name          Value      Exact F Hypoth. DF   Error DF   Sig. of F

Pillais             ,34257      8,85827      10,00      170,00      ,000
Hotellings          ,52107      8,85827      10,00      170,00      ,000
Wilks               ,65743      8,85827      10,00      170,00      ,000
Roys                ,34257
Note.. F statistics are exact.

-----

EFFECT .. CONSTANT (Cont.)
Univariate F-tests with (1;179) D. F.

Variable   Hypoth. SS   Error SS Hypoth. MS   Error MS           F   Sig. of F

T1         4342,40450  11360,7455  4342,40450   63,46785   68,41896   ,000
T2          ,08889   22185,9111      ,08889   123,94364   ,00072   ,979
T3           8,88889   23927,1111     8,88889   133,67101   ,06650   ,797
T4          4,67222   30452,3278     4,67222   170,12474   ,02746   ,869
T5          99,75556   27778,2444    99,75556   155,18572   ,64281   ,424
TREATMNT   6956,45000   46120,5500  6956,45000   257,65670   26,99891   ,000
T7          96,80000   112075,200    96,80000   626,11844   ,15460   ,695
T8         43,02222   93736,9778    43,02222   523,67027   ,08216   ,775
T9          2,68889   43045,3111     2,68889   240,47660   ,01118   ,916
T10        13,33889   51453,6611    13,33889   287,45062   ,04640   ,830
    
```

Abbildung 9.6: MANOVA (repeated measures) über alle IOI und Vpn.

Abbildung 9.6 auf der vorherigen Seite zeigt den Ausdruck der MANOVA-Berechnung für alle Durchläufe aus Teil II (Vpn 1-10) fünf Taps vor (T1 - T5) und fünf Taps nach Beginn des Treatments (TREATMNT - T 10). Die Berechnung zeigt für den Zeitpunkt bzw. Beginn des Treatments (TREATMNT) mit  $p < .001$  einen statistisch hoch signifikanten F-Wert an.

## IOI = 400 ms

Abbildung 9.7 zeigt den Ausdruck der MANOVA-Berechnung für alle Durchläufe aus Teil II mit IOI = 400 ms (Vpn 1-10) fünf Taps vor (T1 - T5) und fünf Taps nach Beginn des Treatments (TREATMNT - T 10). Die Berechnung zeigt für den Zeitpunkt bzw. Beginn des Treatments (TREATMNT) keinen signifikanten F-Wert an ( $p = .206$ ).

```

IOI: 400
***** Analysis of Variance *****

    60 cases accepted.
    0 cases rejected because of out-of-range factor values.
    0 cases rejected because of missing data.
    1 non-empty cell.

    1 design will be processed.

-----

***** Analysis of Variance -- design 1 *****

EFFECT .. CONSTANT
Multivariate Tests of Significance (S = 1, M = 4 , N = 24 )

Test Name          Value      Exact F Hypoth. DF   Error DF   Sig. of F

Pillais            ,22538      1,45477      10,00      50,00      ,185
Hotellings         ,29095      1,45477      10,00      50,00      ,185
Wilks              ,77462      1,45477      10,00      50,00      ,185
Roys               ,22538
Note.. F statistics are exact.

-----

EFFECT .. CONSTANT (Cont.)
Univariate F-tests with (1;59) D. F.

Variable   Hypoth. SS   Error SS Hypoth. MS   Error MS           F   Sig. of F

T1          471,52067  3992,55933   471,52067    67,67050    6,96789    ,011
T2          21,60000  6880,40000    21,60000    116,61695    ,18522    ,668
T3           38,40000  6007,60000    38,40000    101,82373    ,37712    ,542
T4          173,40000  8822,60000   173,40000    149,53559    1,15959    ,286
T5           91,26667  6848,73333    91,26667    116,08023    ,78624    ,379
TREATMNT    322,01667  11600,9833   322,01667    196,62684    1,63770    ,206
T7           68,26667  13055,7333    68,26667    221,28362    ,30850    ,581
T8          459,26667  8160,73333   459,26667    138,31751    3,32038    ,073
T9          375,00000  12535,0000   375,00000    212,45763    1,76506    ,189
T10         1066,81667  11314,1833  1066,81667    191,76582    5,56312    ,022

-----

```

Abbildung 9.7: MANOVA (for repeated measures) über alle Durchläufe (Vpn 1-10) mit IOI = 400 ms.

**IOI = 500 ms**

Abbildung 9.8 zeigt den Ausdruck der MANOVA-Berechnung für alle Durchläufe aus Teil II mit IOI = 500 ms (Vpn 1-10) fünf Taps vor (T1 - T5) und fünf Taps nach Beginn des Treatments (TREATMNT - T 10). Die Berechnung zeigt für den Zeitpunkt bzw. Beginn des Treatments (TREATMNT) einen statistisch signifikanten F-Wert an ( $p < .01$ ).

```

IOI: 500
***** Analysis of Variance -- design 1*****

    60 cases accepted.
    0 cases rejected because of out-of-range factor values.
    0 cases rejected because of missing data.
    1 non-empty cell.

    1 design will be processed.

-----

***** Analysis of Variance -- design 1*****

EFFECT .. CONSTANT
Multivariate Tests of Significance (S = 1, M = 4, N = 24)

Test Name      Value      Exact F Hypoth. DF   Error DF   Sig. of F

Pillais        ,42673      3,72186      10,00      50,00      ,001
Hotellings     ,74437      3,72186      10,00      50,00      ,001
Wilks         ,57327      3,72186      10,00      50,00      ,001
Roys          ,42673

Note.. F statistics are exact.

-----

EFFECT .. CONSTANT (Cont.)
Univariate F-tests with (1:59) D. F.

Variable  Hypoth. SS   Error SS Hypoth. MS   Error MS      F   Sig. of F

T1        1629,68817 3696,56183 1629,68817   62,65359   26,01109   ,000
T2         52,26667  7181,73333   52,26667   121,72429    ,42939   ,515
T3        104,01667 11478,9833 104,01667   194,55904    ,53463   ,468
T4         81,66667 10042,3333   81,66667   170,20904    ,47980   ,491
T5         68,26667  9183,73333   68,26667   155,65650    ,43857   ,510
TREATMNT  2483,26667 16468,7333 2483,26667   279,13107    8,89642   ,004
T7          8,06667  72615,9333    8,06667  1230,77853    ,00655   ,936
T8         58,01667  69274,9833    58,01667  1174,15226    ,04941   ,825
T9        345,60000  6666,40000   345,60000   112,98983    3,05868   ,086
T10       1,66667 10814,3333    1,66667   183,29379    ,00909   ,924

-----

```

Abbildung 9.8: MANOVA (repeated measures) über alle Durchläufe (Vpn 1-10) mit IOI = 500 ms.

**IOI = 600 ms**

Abbildung 9.9 zeigt den Ausdruck der MANOVA-Berechnung für alle Durchläufe aus Teil II mit IOI = 600 ms (Vpn 1-10) fünf Taps vor (T1 - T5) und fünf Taps nach Beginn des Treatments (TREATMNT - T 10). Die Berechnung zeigt für den Zeitpunkt bzw. Beginn des Treatments (TREATMNT) einen statistisch hoch signifikanten F-Wert an ( $p < .001$ ).

```

IOI: 600
***** Analysis of Variance -- design 1*****

    60 cases accepted.
    0 cases rejected because of out-of-range factor values.
    0 cases rejected because of missing data.
    1 non-empty cell.

    1 design will be processed.

-----

***** Analysis of Variance -- design 1*****

EFFECT .. CONSTANT
Multivariate Tests of Significance (S = 1, M = 4 , N = 24 )

Test Name      Value      Exact F Hypoth. DF   Error DF   Sig. of F

Pillais        ,59474      7,33768      10,00      50,00      ,000
Hotellings     1,46754      7,33768      10,00      50,00      ,000
Wilks          ,40526      7,33768      10,00      50,00      ,000
Roys           ,59474

Note.. F statistics are exact.

-----

EFFECT .. CONSTANT (Cont.)
Univariate F-tests with (1:59) D. F.

Variable      Hypoth. SS   Error SS Hypoth. MS   Error MS      F   Sig. of F

T1             2709,50400  3203,31600  2709,50400   54,29349   49,90477   ,000
T2             129,06667  7920,93333   129,06667   134,25311    ,96137   ,331
T3             84,01667  6222,98333    84,01667   105,47429    ,79656   ,376
T4            340,81667  10996,1833   340,81667   186,37599    1,82865   ,181
T5             ,26667  11685,7333    ,26667   198,06328    ,00135   ,971
TREATMNT      5880,60000  16321,4000  5880,60000   276,63390   21,25770   ,000
T7            135,00000  26289,0000   135,00000   445,57627    ,30298   ,584
T8            312,81667  15514,1833   312,81667   262,95226    1,18963   ,280
T9            13,06667  23112,9333    13,06667   391,74463    ,03336   ,856
T10           627,26667  27642,7333   627,26667   468,52090    1,33882   ,252

-----

```

Abbildung 9.9: MANOVA (repeated measures) über alle Durchläufe (Vpn 1-10) mit IOI = 600 ms.

## 9.6. FOKUSSIERUNG DER BERECHNUNGEN: ZEITFENSTER +/- 5 TAPS175

Deskriptive Statistik

Session	ohne vs. mit Dual-Task		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
Session I	Baseline	taps	600	-39	124	,34	15,605	243,519
		Gültige Werte (Listerweise)	600					
	Concurrent	taps	600	-238	87	-6,46	20,927	437,928
		Gültige Werte (Listerweise)	600					
Session II	Baseline	taps	600	-52	57	-,88	12,362	152,810
		Gültige Werte (Listerweise)	600					
	Concurrent	taps	600	-73	88	-6,13	16,840	283,573
		Gültige Werte (Listerweise)	600					

Tabelle 9.27: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent der verschiedenen Durchläufe aus Session A und Session B (Vpn 1-10).

## 9.6 Fokussierung der Berechnungen: Zeitfenster +/- 5 Taps

Die vorangegangene Analyse der Daten soll nun in gleichem Umfang auch für die jeweils ersten 5 Taps eines jeden Durchlaufs oder Abschnitts (im Sinne der Auswertung aus Kap. 9.3 auf Seite 153) hinsichtlich der Differenzen zwischen Session A und II durchgeführt werden.

Vergleicht man den zusammengefassten Baseline- und Concurrent-Wert aus Session A mit dem entsprechenden Wert aus Session B, so ergibt sich folgendes Bild: Sowohl der Wert für die Baseline- als auch für die Concurrent-Bedingung zeigen jeweils für die zweite Session fast den gleichen Wert an (s. Abb. 9.27).

So liegt der Baseline-Wert aus Session A mit  $M = 0,34$  ( $SD = 15,605$  und  $s^2 = 243,519$ ) minimal im positiven Bereich, während der Baseline-Wert aus Session B mit  $M = -0,88$  ( $SD = 12,362$  und  $s^2 = 152,810$ ) nur äußerst geringfügig im negativen Bereich liegt. Daneben liegt der Concurrent-Wert aus Session A mit  $M = -6,46$  ( $SD = 20,927$  und  $s^2 = 437,928$ ) ebenfalls sehr dicht an dem entsprechenden Concurrent-Wert aus Session B mit  $M = -6,13$  ( $SD = 16,840$  und  $s^2 = 283,573$ ).

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus Session A und B zeigt für die Baseline-Kondition mit  $p = .135$  und die Concurrent-Kondition mit  $p = .765$ ) keine statistisch signifikanten Unterschiede an (s. Abb. 9.28 auf der nächsten Seite).

Die Werte zeigen demnach unabhängig vom Messzeitpunkt (Session A oder B) stabile Werte an. Testübungseffekte scheinen in Bezug auf die unmittelbare Störung durch das Treatment (Wörter lesen) keine Rolle zu spielen.

Im Folgenden werden nun die Werte nach IOI differenziert und ein weiteres Mal auf Unterschiede zwischen Session A und B hin untersucht.

**Test bei unabhängigen Stichproben**

			Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
			F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
ohne vs. mit Dual-Task	taps	Varianzen sind gleich Varianzen sind nicht gleich							Untere	Obere	
Baseline	taps	Varianzen sind gleich	2,268	,132	1,495	1198	,135	1,215	,813	-,380	2,810
		Varianzen sind nicht gleich			1,495	1138,370	,135	1,215	,813	-,380	2,810
Concurrent	taps	Varianzen sind gleich	4,668	,031	-,299	1198	,765	-,328	1,097	-2,460	1,823
		Varianzen sind nicht gleich			-,299	1145,569	,765	-,328	1,097	-2,460	1,823

Tabelle 9.28: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen von Session A und Session B für die Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) aller Vpn.

**Deskriptive Statistik**

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	Session	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz	
IOI 400	Baseline	Session I	taps	200	-39	124	2,16	18,753	351,659
			Gültige Werte (Listerweise)	200					
		Session II	taps	200	-52	57	-1,15	13,755	189,200
			Gültige Werte (Listerweise)	200					
	Concurrent	Session I	taps	200	-58	87	,77	18,685	349,123
			Gültige Werte (Listerweise)	200					
		Session II	taps	200	-37	88	-2,09	15,609	243,630
			Gültige Werte (Listerweise)	200					

Tabelle 9.29: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent der verschiedenen Durchläufe aus Session A und Session B mit IOI = 400 ms (Vpn 1-10).

## IOI = 400 ms

Die Werte der Durchläufe mit IOI = 400 ms aus Session A und B liegen für die Baseline- und Concurrent-Bedingung jeweils um 3 ms auseinander. Wie in Abbildung 9.29 zu sehen, liegt der Mittelwert der Baseline aus Session A mit  $M = 2,16$  ( $SD = 18,753$  und  $s^2 = 351,659$ ) etwas im positiven, während der entsprechende Wert aus Session B mit  $M = -1,15$  ( $SD = 13,755$  und  $s^2 = 189,200$ ) leicht im negativen Bereich liegt. Der jeweilige Concurrent-Wert liegt mit  $M = 0,77$  ( $SD = 18,685$  und  $s^2 = 349,123$ ) aus Session A leicht im positiven Bereich, während der entsprechende Concurrent-Wert aus Session B mit  $M = -2,09$  ( $SD = 15,609$  und  $s^2 = 243,630$ ) ein wenig im negativen Bereich liegt.

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus Session A und B zeigt für die Baseline-Kondition ( $p < .05$ ) einen statistisch signifikanten Unterschied an, während der Unterschied der Concurrent-Werte indes mit  $p = .097$  das statistische Signifikanzkriterium verfehlt (s. Abb. 9.30 auf der nächsten Seite).

## 9.6. FOKUSSIERUNG DER BERECHNUNGEN: ZEITFENSTER +/- 5 TAPS177

**Test bei unabhängigen Stichproben**

				Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
				F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
Tempo	ohne vs. mit Dual-Task								Untere	Obere		
IOI 400	Baseline	taps	Varianzen sind gleich	1,134	,288	2,007	398	,045	3,300	1,644	,067	6,533
			Varianzen sind nicht gleich			2,007	365,063	,046	3,300	1,644	,066	6,534
	Concurrent	taps	Varianzen sind gleich	5,809	,016	1,661	398	,097	2,860	1,722	-,524	6,244
			Varianzen sind nicht gleich			1,661	385,781	,097	2,860	1,722	-,525	6,245

Tabelle 9.30: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit IOI = 400 ms von Session A und Session B für die Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) aller Vpn.

**Deskriptive Statistik**

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	Session	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz	
IOI 500	Baseline	Session I	taps	200	-26	35	-1,42	11,650	135,722
			Gültige Werte (Listerweise)	200					
		Session II	taps	200	-35	25	-,64	11,071	122,563
			Gültige Werte (Listerweise)	200					
	Concurrent	Session I	taps	200	-238	38	-9,03	22,422	502,753
			Gültige Werte (Listerweise)	200					
		Session II	taps	200	-49	47	-6,87	16,719	279,514
			Gültige Werte (Listerweise)	200					

Tabelle 9.31: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent der verschiedenen Durchläufe aus Session A und Session B mit IOI = 500 ms (Vpn 1-10).

### IOI = 500 ms

Die Werte der Durchläufe mit IOI = 500 ms aus Session A und B liegen für die Baseline- und Concurrent-Bedingung zwischen 2 und 3 ms auseinander. Wie in Abbildung 9.31 zu sehen, liegt der Mittelwert der Baseline aus Session A mit  $M = -1,42$  ( $SD = 11,650$  und  $s^2 = 135,722$ ) etwas weiter im negativen Bereich als der entsprechende Wert aus Session B mit  $M = -0,64$  ( $SD = 11,071$  und  $s^2 = 122,563$ ). Die jeweiligen Concurrent-Werte liegen mit  $M = -9,03$  ( $SD = 22,422$  und  $s^2 = 502,753$ ) aus Session A und  $M = -6,87$  ( $SD = 16,719$  und  $s^2 = 279,514$ ) aus Session B knapp 3 ms auseinander.

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus Session A und B zeigt sowohl für die Baseline-Kondition ( $p = .493$ ) als auch für die Concurrent-Kondition ( $p = .274$ ) keinen statistisch signifikanten Unterschied an (s. Abb. 9.32 auf der nächsten Seite).

**Test bei unabhängigen Stichproben**

				Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
				F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
Tempo	ohne vs. mit Dual-Task									Untere	Obere	
IOI 500	Baseline	taps	Varianzen sind gleich	,337	,562	-,686	398	,493	-,780	1,136	-3,014	1,454
			Varianzen sind nicht gleich			-,686	396,970	,493	-,780	1,136	-3,014	1,454
	Concurrent	taps	Varianzen sind gleich	,029	,864	-1,095	398	,274	-2,165	1,978	-6,053	1,723
			Varianzen sind nicht gleich			-1,095	368,028	,274	-2,165	1,978	-6,054	1,724

Tabelle 9.32: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit IOI = 500 ms von Session A und Session B für die Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) aller Vpn.

**Deskriptive Statistik**

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	Session		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
IOI 600	Baseline	Session I	taps	200	-37	116	,27	15,466	239,193
			Gültige Werte (Listerweise)	200					
		Session II	taps	200	-30	31	-,86	12,169	148,074
			Gültige Werte (Listerweise)	200					
	Concurrent	Session I	taps	200	-100	49	-11,11	19,633	385,451
			Gültige Werte (Listerweise)	200					
		Session II	taps	200	-73	45	-9,43	17,394	302,567
			Gültige Werte (Listerweise)	200					

Tabelle 9.33: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent der verschiedenen Durchläufe aus Session A und Session B mit IOI = 600 ms (Vpn 1-10).

## IOI = 600 ms

Die Werte der Durchläufe mit IOI = 600 ms aus Session A und B liegen für die Baseline-Bedingung dicht beieinander. Wie in Abbildung 9.33 zu sehen, liegt der Mittelwert der Baseline aus Session A mit  $M = 0,27$  ( $SD = 15,466$  und  $s^2 = 239,193$ ) minimal im positiven Bereich, während der entsprechende Wert aus Session B mit  $M = -0,86$  ( $SD = 12,169$  und  $s^2 = 148,074$ ) geringfügig im negativen Bereich liegt. Die jeweiligen Concurrent-Werte liegen indes mit  $M = -11,11$  ( $SD = 19,633$  und  $s^2 = 385,451$ ) aus Session A und  $M = -9,43$  ( $SD = 17,394$  und  $s^2 = 302,567$ ) aus Session B nur knapp 2 ms auseinander im negativen Bereich.

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus Session A und B zeigt hier sowohl für die Baseline-Kondition ( $p = .419$ ) als auch für die Concurrent-Kondition ( $p = .366$ ) keinen statistisch signifikanten Unterschied an (s. Abb. 9.34 auf der nächsten Seite).

## 9.6. FOKUSSIERUNG DER BERECHNUNGEN: ZEITFENSTER +/- 5 TAPS179

**Test bei unabhängigen Stichproben**

				Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
				F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
Tempo	ohne vs. mit Dual-Task									Untere	Obere	
IOI 600	Baseline	taps	Varianzen sind gleich	,562	,454	,808	398	,419	1,125	1,392	-1,611	3,861
			Varianzen sind nicht gleich			,808	377,123	,419	1,125	1,392	-1,611	3,861
	Concurrent	taps	Varianzen sind gleich	,721	,396	-,906	398	,366	-1,680	1,855	-5,326	1,966
			Varianzen sind nicht gleich			-,906	392,307	,366	-1,680	1,855	-5,326	1,966

Tabelle 9.34: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit IOI = 600 ms von Session A und Session B für die Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) aller Vpn.

**Deskriptive Statistik**

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	Session		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
IOI 400	Baseline	Session I	taps	50	-29	124	12,82	25,040	627,008
			Gültige Werte (Listerweise)	50					
		Session II	taps	50	-52	57	,70	21,209	449,806
			Gültige Werte (Listerweise)	50					
	Concurrent	Session I	taps	50	-31	87	8,10	20,885	436,173
			Gültige Werte (Listerweise)	50					
		Session II	taps	50	-37	88	3,80	20,017	400,694
			Gültige Werte (Listerweise)	50					

Tabelle 9.35: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent der verschiedenen Durchläufe aus Session A und Session B mit IOI = 400 ms (Vpn 1-10).

## Teil I

### IOI = 400 ms

Die Werte der Durchläufe mit IOI = 400 ms (Teil I) aus Session A und B liegen für die Baseline-Bedingung recht weit auseinander. Wie in Abbildung 9.35 dargestellt, liegt der Mittelwert der Baseline aus Session A mit  $M = 12,82$  ( $SD = 25,040$  und  $s^2 = 627,008$ ) weit im positiven Bereich. Demgegenüber liegt der entsprechende Wert aus Session B mit  $M = 0,70$  ( $SD = 21,209$  und  $s^2 = 449,806$ ) nur geringfügig im positiven Bereich. Die jeweiligen Concurrent-Werte liegen mit  $M = 8,10$  ( $SD = 20,885$  und  $s^2 = 436,173$ ) aus Session A und  $M = 3,80$  ( $SD = 20,017$  und  $s^2 = 400,694$ ) aus Session B ebenfalls im positiven Bereich und knapp 5 ms auseinander.

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus Session A und B zeigt für die Baseline-Kondition ( $p < .05$ ) einen statistisch signifikanten Unterschied an, während sich für die Berechnung der Concurrent-Werte mit  $p = .296$  kein signifikanter Unterschied ergibt (s. Abb. 9.36 auf der nächsten Seite).

**Test bei unabhängigen Stichproben**

				Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
				F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
Tempo	ohne vs. mit Dual-Task								Untere	Obere		
IOI 400	Baseline	taps	Varianzen sind gleich	,060	,806	2,612	98	,010	12,120	4,641	2,911	21,329
			Varianzen sind nicht gleich			2,612	95,416				,010	12,120
	Concurrent	taps	Varianzen sind gleich	,158	,692	1,051	98	,296	4,300	4,091	-3,819	12,419
			Varianzen sind nicht gleich			1,051	97,824				,296	4,300

Tabelle 9.36: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit IOI = 400 ms von Session A und Session B für die Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) aller Vpn.

**Deskriptive Statistik**

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	Session		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
IOI 500	Baseline	Session I	taps	50	-26	35	1,28	15,660	245,226
			Gültige Werte (Listerweise)	50					
		Session II	taps	50	-20	25	4,48	12,246	149,969
			Gültige Werte (Listerweise)	50					
	Concurrent	Session I	taps	50	-42	38	-10,40	18,792	353,143
			Gültige Werte (Listerweise)	50					
		Session II	taps	50	-49	47	-2,20	18,209	331,551
			Gültige Werte (Listerweise)	50					

Tabelle 9.37: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent der verschiedenen Durchläufe aus Session A und Session B mit IOI = 500 ms (Vpn 1-10).

Sehr hohe Standardabweichung bzw. Varianz.

Die positiven Werte ergeben sich vor allem aus dem Umstand, dass die ersten Taps eines Durchlaufs im Zuge einer Art Einschwingvorgangs meistens nach dem Stimulus erfolgen.

## IOI = 500 ms

Die Werte der Durchläufe mit IOI = 500 ms (Teil I) aus Session A und B liegen für die Baseline- und Concurrent-Bedingung ebenfalls recht weit auseinander. Wie in Abbildung 9.37 zu sehen, liegt der Mittelwert der Baseline aus Session A mit  $M = 1,28$  ( $SD = 15,660$  und  $s^2 = 245,226$ ) im positiven Bereich, während der entsprechende Wert aus Session B mit  $M = 4,48$  ( $SD = 12,246$  und  $s^2 = 149,969$ ) noch etwas weiter im positiven Bereich liegt. Die jeweiligen Concurrent-Werte liegen mit  $M = -10,40$  ( $SD = 18,792$  und  $s^2 = 353,143$ ) aus Session A und  $M = -2,20$  ( $SD = 18,209$  und  $s^2 = 331,551$ ) aus Session B dagegen im negativen Bereich über 8 ms recht weit auseinander.

## 9.6. FOKUSSIERUNG DER BERECHNUNGEN: ZEITFENSTER +/- 5 TAPS181

Test bei unabhängigen Stichproben

				Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
				F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
Tempo	ohne vs. mit Dual-Task									Untere	Obere	
IOI 500	Baseline	taps	Varianzen sind gleich	3,083	,082	-1,138	98	,258	-3,200	2,811	-8,779	2,379
			Varianzen sind nicht gleich			-1,138					92,619	,258
	Concurrent	taps	Varianzen sind gleich	,155	,694	-2,216	98	,029	-8,200	3,701	-15,544	-,856
			Varianzen sind nicht gleich			-2,216					97,903	,029

Tabelle 9.38: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit IOI = 500 ms von Session A und Session B für die Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) aller Vpn.

Der *t*-Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus Session A und B zeigt für die Baseline-Kondition ( $p = .258$ ) keinen signifikanten Unterschied an, während für die Concurrent-Kondition ( $p = .05$ ) eine statistisch signifikanter Unterschied angezeigt wird (s. Abb. 9.38).

Während die Baseline-Werte demnach keinen Testübungseffekt vermuten lassen, ergibt sich für die Concurrent-Bedingung scheinbar ein deutlicher Testübungseffekt.

### IOI = 600 ms

Die Werte der Durchläufe mit IOI = 600 ms (Teil I) aus Session A und B liegen für die Baseline-Bedingung nicht weit auseinander. Wie in Abbildung 9.39 zu sehen, liegt der Mittelwert der Baseline aus Session A mit  $M = 5,12$  ( $SD = 22,276$  und  $s^2 = 496,230$ ) etwas weiter im positiven Bereich als der entsprechende Wert aus Session B mit  $M = 3,74$  ( $SD = 12,838$  und  $s^2 = 164,809$ ). Die jeweiligen Concurrent-Werte liegen mit  $M = -11,84$  ( $SD = 23,634$  und  $s^2 = 558,545$ ) aus Session A und  $M = -4,72$  ( $SD = 18,753$  und  $s^2 = 351,675$ ) aus Session B jeweils im negativen Bereich und über 7 ms deutlich auseinander.

Der *t*-Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus Session A und B zeigt für die Baseline-Kondition ( $p = .705$ ) keinen statistisch signifikanten Unterschied an. Für die Concurrent-Bedingung wird mit  $p = .098$  ebenfalls das Signifikanzkriterium verfehlt (s. Abb. 9.40 auf der nächsten Seite).

In der zweiten Session (B) ist der mittlere negative Synchronisationsfehler geringer als in Session A. Dies deutet abermals auf einen Testübungseffekt für die Concurrent-Bedingung hin auch wenn der *t*-Test keinen signifikanten Unterschied ergibt.

Deskriptive Statistik

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	Session	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz	
IOI 600	Baseline	Session I	taps	50	-28	116	5,12	22,276	496,230
			Gültige Werte (Listerweise)	50					
		Session II	taps	50	-20	31	3,74	12,838	164,809
			Gültige Werte (Listerweise)	50					
	Concurrent	Session I	taps	50	-100	24	-11,84	23,634	558,545
			Gültige Werte (Listerweise)	50					
		Session II	taps	50	-47	45	-4,72	18,753	351,675
			Gültige Werte (Listerweise)	50					

Tabelle 9.39: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent der verschiedenen Durchläufe aus Session A und Session B mit IOI = 600 ms (Vpn 1-10).

Test bei unabhängigen Stichproben

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit						
			F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
										Untere	Obere
IOI 600	Baseline	taps	2,150	,146	,380	98	,705	1,380	3,636	-5,836	8,596
		Varianzen sind nicht gleich			,380	78,314	,705	1,380	3,636	-5,858	8,618
	Concurrent	taps	,628	,430	-1,669	98	,098	-7,120	4,267	-15,587	1,347
		Varianzen sind nicht gleich			-1,669	93,187	,099	-7,120	4,267	-15,593	1,353

Tabelle 9.40: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit IOI = 600 ms von Session A und Session B für die Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) aller Vpn.

## 9.6. FOKUSSIERUNG DER BERECHNUNGEN: ZEITFENSTER +/- 5 TAPS183

Deskriptive Statistik

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	Session	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz	
IOI 400	Baseline	Session I	taps	150	-39	100	-1,40	14,580	212,577
			Gültige Werte (Listerweise)	150					
		Session II	taps	150	-35	22	-1,76	10,161	103,244
			Gültige Werte (Listerweise)	150					
	Concurrent	Session I	taps	150	-58	45	-1,67	17,286	298,799
			Gültige Werte (Listerweise)	150					
		Session II	taps	150	-33	35	-4,05	13,345	178,091
			Gültige Werte (Listerweise)	150					

Tabelle 9.41: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent der verschiedenen Durchläufe aus Session A und Session B mit IOI = 400 ms (Vpn 1-10).

Test bei unabhängigen Stichproben

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	taps	Levene-Test der Varianzgleichheit	T-Test für die Mittelwertgleichheit								
				F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
											Untere	Obere
IOI 400	Baseline	taps	Varianzen sind gleich	2,664	,104	,248	298	,804	,360	1,451	-2,496	3,216
			Varianzen sind nicht gleich			,248	266,108	,804	,360	1,451	-2,497	3,217
	Concurrent	taps	Varianzen sind gleich	10,274	,001	1,335	298	,183	2,380	1,783	-1,129	5,889
			Varianzen sind nicht gleich			1,335	280,058	,183	2,380	1,783	-1,130	5,890

Tabelle 9.42: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit IOI = 400 ms von Session A und Session B für die Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) aller Vpn.

## Teil II

### IOI = 400 ms

Die Werte der Durchläufe mit IOI = 400 ms (Teil II) aus Session A und B liegen für die Baseline-Bedingung sehr dicht beieinander. Wie in Abbildung 9.41 dargestellt, liegt der Mittelwert der Baseline aus Session A mit  $M = -1,40$  ( $SD = 14,580$  und  $s^2 = 212,577$ ) nur etwas weniger im negativen Bereich als der entsprechende Wert aus Session B mit  $M = -1,76$  ( $SD = 10,161$  und  $s^2 = 103,244$ ). Die jeweiligen Concurrent-Werte liegen mit  $M = -1,67$  ( $SD = 17,286$  und  $s^2 = 298,799$ ) aus Session A und  $M = -4,05$  ( $SD = 13,345$  und  $s^2 = 178,091$ ) aus Session B ebenfalls im negativen Bereich und nur knapp 3 ms auseinander.

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus Session A und B zeigt sowohl für die Baseline-Kondition ( $p = .804$ ) als auch für die Concurrent-Kondition ( $p = .183$ ) keinen statistisch signifikanten Unterschied an (s. Abb. 9.42).

Deskriptive Statistik

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	Session	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz	
IOI 500	Baseline	Session I	taps	150	-26	24	-2,32	9,867	97,360
			Gültige Werte (Listerweise)	150					
		Session II	taps	150	-35	24	-2,35	10,131	102,644
			Gültige Werte (Listerweise)	150					
	Concurrent	Session I	taps	150	-238	34	-8,57	23,548	554,488
			Gültige Werte (Listerweise)	150					
		Session II	taps	150	-49	30	-8,42	15,954	254,541
			Gültige Werte (Listerweise)	150					

Tabelle 9.43: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent der verschiedenen Durchläufe aus Session A und Session B mit IOI = 500 ms (Vpn 1-10).

Test bei unabhängigen Stichproben

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	taps	Levene-Test der Varianzgleichheit	T-Test für die Mittelwertgleichheit								
				F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	95% Konfidenzintervall der Differenz	
											Untere	Obere
IOI 500	Baseline	taps	Varianzen sind gleich	,013	,909	,023	298	,982	,027	1,155	-2,246	2,299
			Varianzen sind nicht gleich			,023	297,792	,982	,027	1,155	-2,246	2,299
	Concurrent	taps	Varianzen sind gleich	,097	,756	-,066	298	,947	-,153	2,322	-4,724	4,417
			Varianzen sind nicht gleich			-,066	261,988	,947	-,153	2,322	-4,726	4,420

Tabelle 9.44: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit IOI = 500 ms von Session A und Session B für die Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) aller Vpn.

## IOI = 500 ms

Die Werte der Durchläufe mit IOI = 500 ms (Teil II) aus Session A und B liegen für die Baseline- und die Concurrent-Bedingung sehr dicht beieinander. Wie in Abbildung 9.43 zu sehen, liegt der Mittelwert der Baseline aus Session A mit  $M = -2,32$  ( $SD = 9,867$  und  $s^2 = 97,360$ ) nur sehr geringfügig weniger im negativen Bereich als der entsprechende Wert aus Session B mit  $M = -2,35$  ( $SD = 10,131$  und  $s^2 = 102,644$ ). Die jeweiligen Concurrent-Werte liegen mit  $M = -8,57$  ( $SD = 23,548$  und  $s^2 = 554,488$ ) aus Session A und  $M = -8,42$  ( $SD = 15,954$  und  $s^2 = 254,541$ ) aus Session B ebenfalls sehr nah beieinander im negativen Bereich.

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus Session A und B zeigt hier sowohl für die Baseline-Kondition ( $p = .982$ ) als auch für die Concurrent-Kondition ( $p = .947$ ) keinen statistisch signifikanten Unterschied an (s. Abb. 9.44).

9.6. FOKUSSIERUNG DER BERECHNUNGEN: ZEITFENSTER +/- 5 TAPS185

Deskriptive Statistik

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	Session	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz	
IOI 600	Baseline	Session I	taps	150	-37	25	-1,35	12,072	145,745
			Gültige Werte (Listerweise)	150					
		Session II	taps	150	-30	24	-2,39	11,581	134,118
			Gültige Werte (Listerweise)	150					
	Concurrent	Session I	taps	150	-82	49	-10,86	18,190	330,873
			Gültige Werte (Listerweise)	150					
		Session II	taps	150	-73	35	-10,99	16,690	278,544
			Gültige Werte (Listerweise)	150					

Tabelle 9.45: Tabelle aller Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen für die Konditionen Baseline und Concurrent der verschiedenen Durchläufe aus Session A und Session B mit IOI = 600 ms (Vpn 1-10).

Test bei unabhängigen Stichproben

Tempo	ohne vs. mit Dual-Task	taps	Levene-Test der Varianzgleichheit	T-Test für die Mittelwertgleichheit								
				Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit				95% Konfidenzintervall der Differenz		
				F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)	Mittlere Differenz	Standardfehler der Differenz	Untere	Obere
IOI 600	Baseline	taps	Varianzen sind gleich	,001	,980	,761	298	,447	1,040	1,366	-1,648	3,728
			Varianzen sind nicht gleich			,761	297,487	,447	1,040	1,366	-1,648	3,728
	Concurrent	taps	Varianzen sind gleich	,353	,553	,066	298	,947	,133	2,016	-3,833	4,100
			Varianzen sind nicht gleich			,066	295,819	,947	,133	2,016	-3,833	4,100

Tabelle 9.46: T-Test für die Mittelwertgleichheit der Werte aus den Durchläufen mit IOI = 600 ms von Session A und Session B für die Konditionen Baseline (ohne Zweitaufgabe) und Concurrent (mit Zweitaufgabe) aller Vpn.

**IOI = 600 ms**

Die Werte der Durchläufe mit IOI = 600 ms (Teil II) aus Session A und B liegen für die Baseline-Bedingung sehr nah beieinander. Wie in Abbildung 9.45 zu sehen, liegt der Mittelwert der Baseline aus Session A mit  $M = -1,35$  ( $SD = 12,072$  und  $s^2 = 145,745$ ) nur etwas weniger im negativen Bereich als der entsprechende Wert aus Session B mit  $M = -2,39$  ( $SD = 11,581$  und  $s^2 = 134,118$ ). Die jeweiligen Concurrent-Werte liegen mit  $M = -10,86$  ( $SD = 18,190$  und  $s^2 = 330,873$ ) aus Session A und  $M = -10,99$  ( $SD = 16,690$  und  $s^2 = 278,544$ ) aus Session B sehr nah beieinander im negativen Bereich.

Der  $t$ -Test für die Mittelwertgleichheit (bei unabhängigen Stichproben) der Werte aus Session A und B zeigt hier sowohl für die Baseline-Kondition ( $p = .447$ ) als auch für die Concurrent-Kondition ( $p = .947$ ) keinen statistisch signifikanten Unterschied an (s. Abb. 9.46).



# Kapitel 10

## Zusammenfassung & Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wird ein integratives *Zwei-Wege-Modell der Rhythmusverarbeitung* vorgestellt. Das Modell baut auf dem aktuellen Stand der Forschung auf, indem es unter anderem wahrnehmungspsychologische Erkenntnisse und handlungstheoretische Konzepte mit jüngsten neurophysiologischen Befunden verbindet.

Ausgehend von den philosophischen und psychologischen Grundlagen der Wahrnehmung musikalischer Ereignisse, geht der Theoriebildung zunächst eine Aufarbeitung des Phänomens Rhythmus voraus. Im Anschluss daran werden die bestehenden Rhythmustheorien erörtert und einer kritischen Musterung unterzogen. Durch die Zusammenführung von Handlungstheorie, kognitionspsychologischen und neurophysiologischen Erkenntnissen zu Fragen der Antizipation und Handlungssteuerung, werden die theoretischen Überlegungen zu einem integrativen Modell der kognitiven Rhythmusverarbeitung verdichtet.

Wie bereits durch vorangegangene Forschungsergebnisse belegt werden konnte, sind verteilte Informationsverarbeitungsprozesse auf kortikaler und subkortikaler Ebene für die rhythmische Timing-Kontrolle beim Musizieren verantwortlich. Die Interaktion automatisierter und kognitiv kontrollierter Prozeduren gewährleistet hierbei eine sehr robuste, aber auch flexibel-adaptive (Bewegungs-)Steuerung. Das Zwei-Wege-Modell der Rhythmusverarbeitung berücksichtigt diese Erkenntnisse, indem es auf Grundlage neurophysiologischer Befunde zwei distinkte Prozesswege beschreibt, die für die Rhythmusverarbeitung verantwortlich sind. Der erste Weg steht für die implizite automatisierte Antizipation rhythmischer Ereignisse, während der zweite Weg für die explizite bewusste Verarbeitung zeitlicher Informationen bei der Ausführung rhythmischer Handlungen steht.

Die Aussagekraft des Zwei-Wege-Modells wird durch eine empirische Studie im zweiten Teil der Arbeit einer eingehenden Prüfung unterzogen, indem das Timing-Verhalten von Schlagzeugern (Timing-Experten) bei einfachen Synchronisationsaufgaben untersucht wird.

Synchronisationsaufgaben gelten in diesem Zusammenhang als das wichtigste

experimentelle Paradigma der Psychomotorikforschung und bieten Zugang zu einem besseren Verständnis der zeitlichen Steuerung antizipatorischer Handlungen und ihrer zugrunde liegenden Verarbeitungsprozesse. Experimente mit Tappingaufgaben zu Metronom-Pattern offenbaren bemerkenswerte und bisher ungeklärte Phänomene wie z.B. den sogenannten negativen Synchronisationsfehler. Wie etliche empirische Studien bereits gezeigt haben, handelt es sich hierbei um einen systematischen Fehler, der vor allem bei Laien zu Tage tritt, wenn sie gebeten werden, sich mittels Fingertapping möglichst genau mit einer Metronomsequenz zu synchronisieren. Die Taps werden im Mittel zwischen 20 und 80 Millisekunden vor dem (physikalischen) Klick des Metronoms ausgeführt. Die verschiedenen, teils konkurrierenden Erklärungsansätze zum negativen Synchronisationsfehler werden ebenfalls kritisch diskutiert. Bisher ist keiner der Ansätze in der Lage, die Ursachen für die negative Asynchronie hinreichend zu erklären.

Experten zeigen bei derartigen Synchronisationsaufgaben gegenüber den Laien entweder einen äußerst geringen oder gar keinen negativen Synchronisationsfehler. Da sich die bisherige Forschung fast ausschließlich auf experimentelle Untersuchungen zum Synchronisationsverhalten von Laien konzentriert, widmet sich die vorliegende Studie im Unterschied dazu ausdrücklich der Analyse des Timing- und Synchronisationsverhaltens bei professionellen Schlagzeugern.

Dem Zwei-Wege-Modell nach machen sich Schlagzeuger Verarbeitungswege zunutze, die einerseits erst nach sehr viel Übung zur Verfügung stehen und andererseits kontinuierlich Aufmerksamkeit beanspruchen. Wird Schlagzeugern während des Tappings eine Wortmerkaufgabe gestellt, die z.B. Ressourcen des Arbeitsgedächtnisses erfordert, ändert sich ihr Tappingverhalten deutlich: Die Zweitaufgabe konkurriert mit der expliziten Timing-Kontrolle der Rhythmusverarbeitung und verdrängt die Ausführung des Tappings auf einen zweiten automatisiert ablaufenden Prozessweg (vgl. Kap. 6 auf Seite 97).

Im Teil I des Experiments wurden die Wörter (dual-task) jeweils *vor* Beginn eines Tappingdurchlaufs auf einem Bildschirm angezeigt, während die Einblendung der Wörter im Teil II des Experiments erst *nach* 30, 35 oder 40 Sekunden (bei gleichzeitigem Tapping) eingeblendet wurden (s. ausführlicher Abschnitt 7.3 auf Seite 119).

Für die Auswertung wurden alle Tappingdurchläufe ohne Zweitaufgabe (Baseline) mit den Durchläufen verglichen, bei denen zusätzlich zur Synchronisationsaufgabe eine Zweitaufgabe zu bewältigen war (Concurrent).

Die ausführliche Analyse der Daten zeigt, dass sich der negative Synchronisationsfehler bei Schlagzeugern deutlich erhöht, wenn gleichzeitig zum Tapping (mit  $\text{IOI} \leq 600 \text{ ms}$  bzw.  $\leq 100 \text{ bpm}$ ) Aufmerksamkeit durch eine Zweitaufgabe abgefordert wird. Dies gilt insbesondere für den Zeitraum der Wort-Einblendung aus Teil II des Experiments (vgl. Kap. 9.3 auf Seite 153).

Mithin kann Hypothese A als bestätigt angesehen werden (vgl. Abschnitt 7.1). Die Hypothese lautet wie folgt: Erhalten Schlagzeuger (Experten) beim Synchroni-

sationstapping zu einem Metronom-Pattern zusätzlich eine Zweitaufgabe, die Aufmerksamkeit und Ressourcen des Arbeitsgedächtnisses beansprucht, so erhöht sich der negative Synchronisationsfehler deutlich.

Es zeigt sich jedoch auch, dass der Effekt der Zweitaufgabe abhängig vom jeweiligen Tappingtempo bzw. IOI ist, denn das Ausmaß des negativen Synchronisationsfehlers fällt für die verschiedenen Concurrent-Bedingungen mit IOI = 400, 500 und 600 ms unterschiedlich hoch aus. Der größte Effekt lässt sich bei den Durchläufen mit IOI = 600 ms erkennen, während die Durchläufe mit IOI = 500 ms ebenfalls einen signifikanten, aber etwas kleineren Effekt aufweisen. Bei einem Tempo mit IOI = 400 ms hat die zusätzliche Zweitaufgabe indes keinen erkennbaren Einfluss auf das Tappingverhalten. Die Tappingverläufe der Baseline-Bedingung unterscheiden sich hier kaum von den Verläufen der Concurrent-Bedingung. Hypothese B muss daher als nicht bestätigt angesehen werden (vgl. Abschnitt 7.1 auf Seite 112). Sie ging davon aus, dass sich für die Bedingungen mit IOI = 400, 500 und 600 ms ein gleich großer Effekt der Zweitaufgabe zeigt.

An dieser Stelle lässt sich noch keine befriedigende Antwort darauf finden, warum sich das Tappingverhalten bei IOI = 400 ms (plus Zweitaufgabe) nicht so einheitlich verändert wie bei IOI = 500 und 600 ms. Ob es sich hier um eine physiologische (konstante) Grenze oder vielmehr um eine trainierbare Komponente handelt, kann nur durch weiterführende Untersuchungen geklärt werden.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse im Gegensatz zur Studie von Miyake et al. (2004), dass die Inanspruchnahme des Arbeitsgedächtnisses durch die Zweitaufgabe einen erheblichen Einfluss auf das Tappingverhalten (effects of higher brain functions) bei IOI = 500 ms und IOI = 600 ms bewirkt, wobei der Synchronisationsfehler als Indikator für die zu beobachtende Veränderung des Tappingverhaltens der Zweitaufgabe dient. Die Intervention löst sowohl in Teil I als auch in Teil II des Experiments sofortige Wirkungen aus: erstens, es kommt zu einer abrupten Veränderung des Synchronisationsfehlers, zweitens, die Daten weisen eine sehr viel höhere Varianz auf als zuvor.

Während die Baseline-Werte aus Teil I am Anfang eines Durchlaufs in der Regel deutlich im positiven Bereich liegen, sind die entsprechenden Concurrent-Werte von Beginn an im negativen Bereich zu finden. Dies lässt auf einen eindeutigen Einfluss der Zweitaufgabe schließen (vgl. dazu die grafischen Analysen in Abschnitt 9.1).

Ob es hierbei zu Interferenzen innerhalb der phonologischen Schleife kommt, bleibt jedoch unklar, denn die Beeinträchtigung der Tappingaufgabe kann auch durch die Belastung der zentralen Exekutiven (des Arbeitsgedächtnisses) herbeigeführt worden sein (vgl. dazu Abschnitt 5.4). Hier bedarf es weiterführender Untersuchungen.

Die Baseline-Werte aus Teil II unterscheiden sich ebenfalls erheblich von den entsprechenden Concurrent-Werten. Hier liegen die Baseline-Werte nur leicht im negativen Bereich, während die Concurrent-Werte mit Beginn der Zweitaufgabe deutlich in den negativen Bereich rutschen, wie die grafischen Analysen in Abschnitt 9.2 auf Seite 151 deutlich machen.

Ein Vergleich der Referenz- mit den Baseline-Werten zeigt leichte Unterschiede an, welche vermutlich darauf zurückgeführt werden können, dass die Vorläufe für einige der Vpn als eine Art Eingewöhnung dienten und sie sich auf die folgenden Durchläufe besser einstellen konnten (Übungseffekt). Eine weitere Erklärung für die nur leichten Abweichungen könnte sein, dass die Baseline-Durchläufe stets mit einer gewissen Erwartungshaltung in Bezug auf eine mögliche Störung (Zweitaufgabe) durchgeführt wurden, während die Vorläufe jeweils frei von einer solchen Erwartungshaltung absolviert werden konnten.

Der zweite Messzeitpunkt (Session B) erhöht die interne Validität der Daten. Die Zweitaufgabe wirkt sich bei der Durchführung des zweiten Blocks ebenfalls auf das Tappingverhalten der Vpn aus. Die Verbesserung der Reliabilität der Veränderungsmaße durch den zweiten Messzeitpunkt wird jedoch durch Übungseffekte begleitet: Bei genauer Analyse der Daten lassen sich für die Berechnungen der Tappingreihen aus Teil I und II mit 30 Taps vor und nach Beginn des Treatments Übungseffekte vermuten, die den Einfluss der Intervention in der zweiten Session deutlich abschwächen (vgl. Kap. 9.4).

Auch ein Vergleich der jeweils 5 Tap-Werte zu Beginn eines Durchlaufs aus Teil I des Experiments weist auf leichte Übungseffekte hin, während sich aus der Datenanalyse der Durchläufe aus Teil II mit +/- 5 Taps um den Beginn des Treatments (Einblendung der Wörter) keine Übungseffekte ergeben (s. Abschnitt 9.6 auf Seite 175). Hier sind die Werte in beiden Sessions äußerst stabil. Sowohl die Baseline- als auch die Concurrent-Werte stimmen weitestgehend überein.

Das Lesen der Wörter (Zweitaufgabe) führt zu einer stärkeren und auch verlässlicheren Ablenkung von der Tappingaufgabe als die Merkaufgabe. Es darf vermutet werden, dass sich die Vpn beim Tapping mit Merkaufgabe besser auf die gleichzeitige Bewältigung beider Aufgaben einstellen.

Eine Interventions- bzw. Treatmentprüfung mithilfe einer MANOVA (for repeated measures) ermittelte im Sinne einer Regressions-Diskontinuitäts-Analyse darüber hinaus einen klaren *Cutoff-Point* für den Zeitpunkt der Worteinblendung bzw. den Beginn des Treatments von Teil II des Experiments (vgl. Kap. 9.5 auf Seite 171).

Dass die Vpn durch die Zweitaufgabe dazu verleitet werden, *zu früh* zu tappen und nicht etwa *zu spät*, ist in Hinblick auf das vorgeschlagene Modell als ein klares Indiz für die Existenz zweier unterschiedlicher Verarbeitungswege zu verstehen, denn die Interferenzen mit einem einzelnen, separaten Rhythmus- oder Musikzentrum müssten nach dem Dual-Task-Paradigma eher zu einem *positiven* Synchronisationsfehler führen.

Es muss angenommen werden, dass das Tappingverhalten aufgrund der Störung durch die Zweitaufgabe auf einen (eher) automatisierten Ablauf verlagert wird, der weitestgehend unabhängig von Aufmerksamkeitsprozessen funktioniert. Eine direkte Verbindung zwischen dem für die auditive Verarbeitung verantwortlichen Bereich und den für die Bewegungsausführung zuständigen motorischen Zentren auf unterer Ebene der kognitiven Verarbeitung würde dies im Sinne des Modells gewähr-

leisten können. Die Annahme solcher direkten Verschaltungen ist durch neurophysiologische Untersuchungen belegt und es muss weiter angenommen werden, dass hauptsächlich dieser Weg genutzt wird, wenn Nicht-Experten Synchronisationsaufgaben zu einem vorgegebenen Metronom absolvieren, während Timing-Experten in der Lage sind, diesen automatisierten Weg mithilfe einer weiteren/anderen Prozedur höherer kognitiver Ebenen zu dominieren.

Durch den Einsatz von Zweitaufgaben während der Ausführung der Synchronisationsaufgabe gelingt es in der vorliegenden empirischen Untersuchung, die eher automatisiert ablaufenden von den kognitiv kontrollierten Verarbeitungswegen zu differenzieren. Die Ergebnisse zeigen zudem sehr deutlich, dass präzises rhythmisches Timing auch nach sehr viel Übung und einer Automatisierung der (Bewegungs-) Abläufe bei einem Tappingtempo zwischen 100 und 120 bpm ein hohes Maß an Konzentration und Aufmerksamkeit verlangt. Bisher galt die Annahme, dass Tappingaufgaben in diesem Tempo-Bereich ausschließlich durch automatisierte Prozesse gesteuert werden.

Zusammenfassend lassen sich aus den vorliegenden Ergebnissen folgende Schlüsse ziehen:

- Ein separates Zentrum einzig für Rhythmusverarbeitung gibt es nicht.
- Mithilfe der Reafferenztheorie (s. Abschnitt 5.3) als Grundlage von Bewegungs- bzw. Handlungskontrolle erlaubt das vorgestellte Modell einen plausiblen und gänzlich neuen Erklärungsansatz für das Phänomen des negativen Synchronisationsfehlers.
- Fast alle bisherigen Studien beschäftigen sich allein mit der Untersuchung des Timing- und Tappingverhaltens, das im Sinne des Zwei-Wege-Modells durch einen direkten präattentiven Weg auf subkortikaler Ebene gesteuert wird. Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf die Rhythmusproduktion in musikalischen Zusammenhängen erscheint damit äußerst begrenzt. Lediglich in Bezug auf wahrnehmungsrelevante Aspekte besitzen sie eine nicht zu verleugnende Aussagekraft.
- Erst durch die im Zwei-Wege-Modell beschriebene Aufteilung in verschiedene Wege wird es möglich, das rhythmische Timing-Verhalten beim Musizieren sinnvoll zu untersuchen und zu beschreiben.
- Die enge Kopplung von Wahrnehmung und Handlung bei der rhythmischen Synchronisation findet teils parallel, teils konkurrierend auf unterschiedlichen Ebenen der kognitiven Verarbeitung statt.
- Das Ausmaß des negativen Synchronisationsfehlers ist abhängig vom Tappingtempo.

- Der (Störungs-)Effekt der Zweitaufgabe beim Synchronisationstapping ist abhängig vom jeweiligen Tempo.

Mit den vorliegenden Ergebnissen bestätigt sich somit die Annahme einer verteilten Rhythmusverarbeitung im Sinne des Zwei-Wege-Modells. Experten können demnach - im Gegensatz zu Laien - auch bei einem relativ hohen Tempo ihr Tappingverhalten kontrollieren und von Beat zu Beat Korrekturen vornehmen, wenn sie nicht gestört werden. Für Schlagzeuger ist dabei die Kontrolle über das Ohr elementar.

Interessanterweise haben alle Vpn der empirischen Studie das Synchronisationstapping als eine sehr musikalische Aufgabe empfunden. Vp 10 sprach sogar davon, sie habe das Metronom als Ensemble-Mitspieler wahrgenommen und demzufolge versucht, dem imaginierten Mitspieler ihr eigenes Timing bzw. Feeling aufzuzwingen, obwohl ihr klar war, dass es sich um ein vom Computer ausgegebenes, unveränderbares Metronom-Pattern handelt.

Das integrative Zwei-Wege-Modell der Rhythmusverarbeitung ermöglicht zudem gut operationalisierbare Hypothesenüberprüfungen, um weitere musikalisch relevante Anforderungen beim Musizieren, z.B. in Bezug auf Timing-Strategien oder den Umgang mit Groove, zu untersuchen. Die Analyse von Bewegungsdaten durch Motion-Capture-Verfahren wäre diesbezüglich ein Erfolg versprechender Ansatz.

Es wäre wünschenswert, wenn die angesprochenen kognitiven Prozesse und Funktionen des vorgeschlagenen Modells mithilfe bildgebender Verfahren zukünftig eingehender untersucht werden (vgl. Delignières et al., 2004).

## 10.1 English summary

Anticipatory behaviour is a crucial ability in everyday life (Butz, 2003) and an elementary skill for playing a musical instrument in particular. A growing body of recent publications has addressed this issue from a number of additional perspectives, often focusing on the analysis of synchronization behaviour when tracking isochronous rhythms like metronome patterns (see Repp, 2005, for a review). This kind of sensorimotor synchronization is based on a tight coupling of perception and action (Prinz & Hommel, 2002) as a crucial requirement for timing control (Rosenbaum, 1998) in musical contexts (see Repp, 2006). It is also regarded as one of the most important experimental paradigms in this field of research because it appears to give further more detailed insights into the underlying processes of action and timing control (Vorberg & Wing, 1996).

Experiments with simple tapping tasks to a metronome already show distinctive features like the occurrence of the negative mean asynchrony (Aschersleben & Prinz, 1995; Aschersleben, 2000; Dunlap, 1910; Franek et al., 1994; Johnson, 1898; Mates et al., 1994; Miyake, 1902; Woodrow, 1932). Nonmusicians in particular show this systematic timing error when they have to synchronize to a given metronome sequence of isochronous beats as precisely as possible. In general the taps tend to

precede the physical onset of the metronome click during tapping trials. Although there have been several approaches to find an explanation for the negative synchronization error, the causes for this phenomenon still remain unclear.

Two essential processes responsible for synchronization tasks have recently been identified and can be characterized separately: One is the implicit automatic anticipation and the other is the explicit processing of temporal information (Fischer & Nusseck, 2006; Miyake et al., 2004; Repp, 2005). According to this Krampe et al. (2005) differentiate between a low-level timing mechanism and a higher level sequencing mechanism.

Studies from neuroimaging also clarify two distinct systems for automatic and cognitively controlled time measurement which seem to work in both a partly parallel and partly concurrent manner (Lewis & Miall, 2003a). Thaut (2005) argues that different brain networks on subcortical levels are responsible for mostly subconscious processing of sensorimotor information while networks on cortical levels become active for conscious sensorimotor processing.

Different distributed stages in both cortical and subcortical brain networks are responsible for movement and timing control in general, as well as in musical context. At the same time the interaction between automatic and cognitive controlled mechanisms guarantees a robust but flexible and adaptive motion control proving crucial to play a musical instrument.

Taking into account that there seem to be different cognitive pathways, an *integrative dual-route model of rhythm perception and production* is proposed in this thesis. This new model is based on fundamental psychological principles of perception, action control and relevant neurobiological findings regarding rhythm processing and sensorimotor synchronization. The dual-route model also provides a new outlook on the phenomenon of the negative mean asynchrony.

Synchronization tapping is regarded as the most important experimental paradigm in the field of sensorimotor research because the analysis of such experiments helps provide further detailed insights into the underlying processes of motor control and anticipatory behaviour.

In the empirical study set down in the second part of this work, a dual-task paradigm was used during synchronization tapping to elucidate the effects of higher brain functions such as concentration. The aim was to examine whether professional drummers show a change in tapping performance when they have to draw their attention to another task. At the end all tapping trials without a secondary task (baseline condition) were compared to all of the dual-task trials (concurrent condition).

In contrast to other experiments on sensorimotor synchronization with nonmusicians, the results show a considerable effect in tapping performance of timing experts for the concurrent condition with interstimulus-onset interval (ISI) = 500 and 600 ms, whereas no significance at ISI = 400 ms was observed. Overall these results provide further evidence for the existence of both an automatic and a cognitive controlled timing procedure which is also in line with the *integrative dual-route model*

*of rhythm perception and production* mentioned above.

# Literaturverzeichnis

- Aebli, H. (1980, 1981). *Denken: das Ordnen des Tuns. Band I: Kognitive Aspekte der Handlungstheorie. Band II: Denkprozesse*. Stuttgart: Klett-Cotta.
- Aebli, H. (1996). Zur Einleitung. In U. Neisser (Hg.), *Kognition und Wirklichkeit: Prinzipien und Implikationen der kognitiven Psychologie* (2. Aufl.) (S. 7–9). Stuttgart: Klett-Cotta.
- Albersheim, G. (1979). *Zur Musikpsychologie* (2. Aufl.). Wilhelmshaven: Heinrichshofen.
- Allen, G. D. (1975). Speech rhythm: Its relation to performance universals and articulatory timing. *Journal of Phonetics*, 3, 75–86.
- Allport, D. A. (1987). Selection for action: some behavioural and neurophysiological considerations of attention and action. In H. Heuer & A. F. Sanders (Eds.), *Perspectives on Perception and Action* (pp. 395–419). Hillsdale: Erlbaum.
- Altenmüller, E., Schuppert, M., Kuck, H., Bangert, M. & Großbach, M. (2000). Neuronale Grundlagen der Verarbeitung musikalischer Zeitstrukturen. In K. Müller & G. Aschersleben (Hg.), *Rhythmus. Ein interdisziplinäres Handbuch* (S. 59–78). Bern: Huber.
- Altenmüller, E., Wiesendanger, M. & Kesselring, J. (2006). *Music, motor control and the brain*. Oxford: University Press.
- Anderson, J. R., Bothell, D., Byrne, M. D., Douglass, S., Lebiere, C. & Qin, Y. (2004). An integrated theory of the mind. *Psychological Review*, 111, 4, 1036–1060.
- Apfel, E. & Dahlhaus, C. (1974). *Studien zur Theorie und Geschichte der musikalischen Rhythmik und Metrik*. München: Katznbichler.
- Aschersleben, G. (2000). Zeitliche Steuerung einfacher motorischer Handlungen. In K. Müller & G. Aschersleben (Hg.), *Rhythmus. Ein interdisziplinäres Handbuch* (S. 137–158). Bern: Huber.

- Aschersleben, G. (2002). Temporal control of movements in sensorimotor synchronisation. *Brain and Cognition*, 48, 66–79.
- Aschersleben, G. (2003). Effects of training on the timing of simple repetitive movements. *Advances in Psychology Research*, 23, 15–30.
- Aschersleben, G., Gehrke, J. & Prinz, W. (2000). Tapping with peripheral nerve block. A role for tactile feedback in the timing of movements. *Experimental Brain Research*, 136, 3, 331–339.
- Aschersleben, G. & Prinz, W. (1995). Synchronization actions with events: The role of sensory information. *Perception & Psychophysics*, 57, 3, 305–317.
- Atkinson, R. C. & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In K. W. Spence & J. T. Spence (Eds.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory*, Vol. 2 (pp. 89–195). New York: Academic Press.
- Augustinus, A. (1989). *Bekenntnisse*. Stuttgart: Reclam.
- Auhagen, W. (1993). Musikalische Satzstruktur und Tempoempfinden. *Systematische Musikwissenschaft*, 1, 2, 353–369.
- Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. New York: Oxford University Press.
- Baddeley, A. D. (1997). *Human memory*. Hove: Psychology Press.
- Baddeley, A. D. (2003). Working memory: looking back and looking forward. *Nature Reviews Neuroscience*, 4, 829–839.
- Baddeley, A. D., Eldridge, M. & Lewis, V. J. (1981). The role of subvocalization in reading. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 33, 439–454.
- Baddeley, A. D., Gathercole, S. E. & Papagno, C. (1998). The phonological loop as a language learning device. *Psychological Review*, 105, 1, 158–173.
- Baddeley, A. D. & Hitch, G. J. (1974). Working memory. In G. H. Bower (Ed.), *Recent Advances in Learning and Motivation* (pp. 47–90). New York: Academic Press.
- Baddeley, A. D. & Logie, R. H. (1999). Working memory: The multi-component model. In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of working memory* (pp. 28–61). Cambridge: University Press.
- Baldissera, F., Hultorn, H. & Illert, M. (1981). Integration in spinal neuronal systems. In V. B. Brooks (Ed.), *Handbook of Physiology. The nervous system, Vol. II, motor control, part 1* (pp. 509–595). Bethesda, MD: American Physiological Society.

- Bartlett, F. C. (1932). *Remembering: A study in experimental and social psychology*. Cambridge: University Press.
- Beek, P. J., Peper, C. E. & et al. (2000). Timekeepers versus nonlinear oscillators: How the approaches differ. In P. Desain & L. Windsor (Eds.), *Rhythm Perception and Production* (pp. 9–33). Lisse: Swets and Zeitlinger.
- Bergson, H. (2006). *Zeit und Freiheit*. (3. Aufl.). Hamburg: Philo & Philo Fine Arts / EVA.
- Berz, W. L. (1995). Working memory in music: A theoretical model. *Music Perception*, 12, 353–364.
- Birklbauer, J. (2006). *Modelle der Motorik. Eine vergleichende Analyse moderner Kontroll-, Steuerungs- und Lernkonzepte*, Bd. 5 von *Spektrum Bewegungswissenschaft*. Aachen: Meyer & Meyer.
- Block, R. A. (1990). Models of psychological time. In R. A. Block (Ed.), *Cognitive models of musical time*. (pp. 1–35). Hillsdale: Erlbaum.
- Bolton, T. L. (1894). Rhythm. *American Journal of Psychology*, 6, 145–238.
- Bower, J. M. & Parsons, L. M. (2003). Rätsel Kleinhirn. *Spektrum der Wissenschaft*, 11, 60–66.
- Bregman, A. S. (1990). *Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound*. Cambridge: MIT Press.
- Bregman, A. S. (1993). Auditory scene analysis: Hearing in complex environments. In S. McAdams & E. Bigand (Eds.), *Thinking in sound: The cognitive psychology of human audition* (pp. 10–36). Oxford: University Press.
- Brodsky, W. (2005). The effects of metronomic pendular adjustment versus tap-tempo input on the stability and accuracy of tempo perception. *Cognitive Processing*, 6, 117–127.
- Brown, S. & Bennett, E. (2002). The role of practice and automaticity in temporal and nontemporal dual-task performance. *Psychological Research*, 66, 1, 80–89.
- Bruhn, H. (1994). *Wahrnehmung von Musik: Eine Allgemeine Musiklehre aus der Sicht von Psychologie und Musikgeschichte*. (Vorlesungsskript) Universität Flensburg: Institut für Musik.
- Bruhn, H. (1997). Psychologische Grundlagen. Tonpsychologie - Gehörpsychologie - Musikpsychologie. In H. Bruhn, R. Oerter & H. Rösing (Hg.), *Musikpsychologie. Ein Handbuch* (3. Aufl.) (S. 439–451). Reinbek: Rowohlt.

- Bruhn, H. (1998). Psychophysiologie der Wirkung von Musik. In H. Bruhn & H. Rösing (Hg.), *Musikwissenschaft. Ein Grundkurs* (S. 168–187). Reinbek: Rohwolt.
- Bruhn, H. (2000a). *Musiktherapie: Geschichte, Theorien, Methoden*. Göttingen: Hogrefe.
- Bruhn, H. (2000b). Zur Definition von Rhythmus. In K. Müller & G. Aschersleben (Hg.), *Rhythmus. Ein interdisziplinäres Handbuch* (S. 41–56). Bern: Huber.
- Bruhn, H. (2005a). Entwicklung von Rhythmus und Timing. In R. Oerter & T. H. Stoffer (Hg.), *Spezielle Musikpsychologie: Entwicklungspsychologische, differenzielle, sozialpsychologische und angewandte Aspekte* (S. 89–121). Göttingen: Hogrefe.
- Bruhn, H. (2005b). Wissen und Gedächtnis. In T. H. Stoffer & R. Oerter (Hg.), *Allgemeine Musikpsychologie* (S. 537–590). Göttingen: Hogrefe.
- Bruhn, H. & Rösing, H. (1998). *Musikwissenschaft. Ein Grundkurs*. Reinbek: Rowohlt.
- Butz, M. V. (2003). *Anticipatory behavior in adaptive learning systems. Foundations, theories, and systems*. Heidelberg: Springer.
- Casseday, J. H. & Covey, E. (1995). Mechanisms for analysis of auditory temporal patterns in the brainstem of echolocating bats. In E. Covey, H. L. Hawkins & R. F. Port (Eds.), *Neural Representations of Temporal Patterns* (pp. 25–52). New York: Plenum Press.
- Chen, Y., Ding, M. & Kelso, J. A. S. (1997). Long memory processes ( $1/f^\alpha$  type) in human coordination. *Physical Review Letters*, 79, 22, 4501–4504.
- Chen, Y., Repp, B. H. & Patel, A. D. (2002). Spectral decomposition of variability in synchronization and continuation tapping: Comparison between auditory and visual pacing and feedback conditions. *Human Movement Science*, 21, 515–532.
- Clarke, E. F. (1982). Timing in the performance of Erik Satie's "Vexations". *Acta Psychologica*, 1, 1–19.
- Clarke, E. F. (1987). Categorical rhythm perception. An ecological perspective. In A. Gabrielsson (Ed.), *Action and perception in rhythm and music* (pp. 19–33). Royal Swedish Academy of Music.
- Clarke, E. F. (1989). The perception of expressive timing in music. *Psychological Research*, 51, 2–9.
- Clarke, E. F. (1999). Rhythm and timing in music. In D. Deutsch (Ed.), *The psychology of music*, Vol. 2 (pp. 473–500). New York: Academic Press.

- Clayton, M., Will, U. & Sager, R. (2004). In time with the music: The concept of entrainment and its significance for ethnomusicology. *ESEM-Counterpoint, 1*, 1–82.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd Ed.). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Cooper, G. & Meyer, L. B. (1960). *The rhythmic structure of music*. Chicago: University of Chicago Press.
- Csikszentmihalyi, M. (2000). *Das flow-Erlebnis - Jenseits von Angst und Langeweile: Im Tun aufgehen*. Klett-Cotta.
- Dahl, S. (2000). The playing of an accent - preliminary observations from temporal and kinematic analysis of percussionists. *Journal of New Music Research, 29*, 3, 225–233.
- Dahl, S. (2004). Playing the accent - comparing striking velocity and timing in an ostinato rhythm performed by four drummers. *Acta Acustica, 90*, 762–776.
- Dahlhaus, C. (1976). *Musikästhetik*. Köln: Gerig.
- Dahlhaus, C. & Eggebrecht, H. H. (1989). Rhythmus. In C. Dahlhaus & H. H. Eggebrecht (Hg.), *Brockhaus Riemann Musiklexikon* (S. 42–45). Mainz: Schott.
- Dakin, M. A. & Thaut, M. H. (2001). Possible anatomical correlates of auditory-motor integration. In *Cognitive Neuroscience Society 8<sup>th</sup> Annual Conference*, (p. 156).
- Damasio, A. R. (2007). Wenn das Zeitempfinden verloren geht. *Spektrum der Wissenschaft Spezial - Phänomen Zeit, 1*, 70–77.
- Delignières, D., Lemoine, L. & Torre, K. (2004). Time intervals production in tapping and oscillatory motion. *Human Movement Science, 23*, 87–103.
- Dennett, D. C. (1994). *Philosophie des menschlichen Bewußtseins*. Hamburg: Hoffmann & Campe.
- Dennett, D. C. & Kinsbourne, M. (1992). Time and the observer: The where and when of consciousness in the brain. *Behavioral and Brain Sciences, 15*, 183–247.
- Desain, P. & Honing, H. (2003). The formation of rhythmic categories and metric priming. *Perception, 32*, 341–365.
- Desain, P. & Windsor, L. (2000). *Rhythm perception and production*. Lisse: Swets & Zeitlinger.

- Deutsch, D. (1999). Grouping mechanisms in music. In D. Deutsch (Hg.), *The psychology of music* (2. Aufl.) (S. 299–348). San Diego: Academic Press.
- Dixon, S. & Goebel, W. (2002). Pinpointing the beat: tapping to expressive performances. *7th International Conference on Music Perception and Cognition in Sydney*, (pp. 1–24).
- Drake, C., Penel, A. & Bigand, E. (2000). Tapping in time with mechanically and expressively performed music. *Music Perception*, 18, 1, 1–24.
- Drewing, K. (2001). *Die Rolle sensorischer Reafferenzen bei der zeitlichen Steuerung von Handlungen*. München: Logos.
- Dunlap, K. (1910). Reactions on rhythmic stimuli, with attempt to synchronize. *Psychological Review*, 17, 399–416.
- Dürr, W. & Gerstenberg, W. (1986). Rhythmus, Metrum, Takt. In F. Blume (Hg.), *Musik in Geschichte und Gegenwart*, Bd. 11, (Sp. 383–419). Kassel: Bärenreiter.
- Ebeling, M. (2008). Konsonanz und Dissonanz. In H. Bruhn, R. Kopiez & A. C. Lehmann (Hg.), *Musikpsychologie. Das neue Handbuch*. (S. 499–521). Reinbek: Rowohlt.
- Eck, D. (2002). Finding downbeats with a relaxation oscillator. *Psychological Research*, 66, 1, 18–25.
- Eggebrecht, H. H. (1991). Musik und Zeit. In C. Dahlhaus & H. H. Eggebrecht (Hg.), *Was ist Musik?* (3. Aufl.) (S. 181–186). Wilhelmshaven: Florian Noetzel.
- Eimer, M. (1996). Wahrnehmung und Aufmerksamkeit. In G. Roth & W. Prinz (Hg.), *Kopf-Arbeit. Gehirnfunktionen und kognitive Leistungen* (S. 281–308). Heidelberg: Spektrum.
- Elsner, B. & Prinz, W. (2006). Psychologische Modelle der Handlungssteuerung. In H.-O. Karnath & P. Thier (Hg.), *Neuropsychologie*. (2. Aufl.) Kap. 27, (S. 286–295). Heidelberg: Springer.
- Engelkamp, J. & Zimmer, H. D. (2006). *Lehrbuch der Kognitiven Psychologie*. Göttingen: Hogrefe.
- Epstein, D. (1995). *Shaping time: Music, the brain, and performance*. New York: Schirmer.
- Essens, P. J. & Povel, D. J. (1985). Metrical and non-metrical representations of temporal patterns. *Perception & Psychophysics*, 37, 1–7.

- Finney, S. A. (2001). FTAP: A linux-based program for tapping and music experiment. *Behaviour Research Methods, Instruments, and Computers*, 33, 65–72.
- Fischer, T. (2003). *Zur Wirksamkeit von Zeitkategorien - Ein Beitrag zur Rhythmusforschung*. Examensarbeit, Hochschule für Musik und Theater Hamburg.
- Fischer, T. & Nusseck, M. (2006). Anticipatory behaviour in music: Towards a new approach to musical synchronization. In M. Baroni, A. R. Addressi, R. Caterina & M. Costa (Eds.), *Proceedings of the 9th International Conference on Music Perception and Cognition*, (pp. 163). Bologna.
- Fischer, T., Nusseck, M. & Bruhn, H. (2005). Timing precision in synchronization tapping and effects of training. In *Proceedings of the 8th Tübinger Perception Conference*, (p. 61). Tübingen.
- Fischinger, T. & Kopiez, R. (2008). Wirkungsphänomene des Rhythmus. In H. Bruhn, R. Kopiez & A. C. Lehmann (Hg.), *Musikpsychologie. Das neue Handbuch*. (S. 458–475). Reinbek: Rowohlt.
- Fraisse, P. (1978). Time and rhythm perception. In E. C. Carterette & M. P. Friedman (Eds.), *Handbook of perception, perceptual coding*, Vol. VIII (pp. 203–247). New York: Academic Press.
- Fraisse, P. (1980). Les synchronisations sensori-motrices aux rythmes. In J. Requin (Ed.), *Anticipation et comportement* (pp. 233–257). Paris: Centre National.
- Fraisse, P. (1982). Rhythm and tempo. In D. Deutsch (Ed.), *The psychology of music* (pp. 149–180). New York: Academic Press.
- Fraisse, P. (1985). *Psychologie der Zeit: Konditionierung, Wahrnehmung, Kontrolle, Zeitschätzung, Zeitbegriff*. München/Basel: Reinhardt.
- Fraisse, P. (1987). A historical approach to rhythm as perception. In A. Gabrielsson (Ed.), *Action and perception in rhythm and music* (pp. 7–17). No. 55, Stockholm: Royal Swedish Academy of Music.
- Franek, M., Mates, J., Radil, T., Beck, K. & Pöppel, E. (1994). Sensorimotor synchronization: Motor responses to pseudoregular auditory patterns. *Perception & Psychophysics*, 55, 2, 204–217.
- Franek, M., Radil, R., Indra, M. & Lansky, P. (1987). Following complex rhythmical acoustical patterns by tapping. *International Journal of Psychophysiology*, 5, 187–192.
- Fricke, J. (1988). Klangbreite und Tonempfindung. Bedingungen kategorialer Wahrnehmung aufgrund experimenteller Untersuchungen der Intonation. *Musikpsychologie. Jahrbuch der Deutschen Gesellschaft für Musikpsychologie*, 5, 67–89.

- Fuchs, A. (2006). *Tapping along bad metronomes: Correction and learning mechanisms of synchronization with perturbed metronomes*. Dissertation, Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig.
- Funke, J. (2006). Denken: Ansätze und Definitionen. In J. Funke & P. A. Frensch (Hg.), *Handbuch der Allgemeinen Psychologie - Kognition*, Bd. 5 (S. 391–399). Göttingen: Hogrefe.
- Gabrielsson, A. (1993). The complexities of rhythm. In T. J. Tighe & W. J. Dowling (Eds.), *Psychology and music. Understanding of melody and rhythm* (pp. 94–120). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Gabrielsson, A. (1999). The performance of music. In D. Deutsch (Ed.), *The psychology of music* (pp. 501–602). San Diego: Academic Press.
- Gabrielsson, A. & Juslin, P. (1996). Emotional expression in music performance: Between the performer's intentions and the listener's experience. *Psychology of Music*, 24, 1, 68–91.
- Gabrielsson, A. & Lindström, E. (2001). The influence of musical structure on emotional expression. In P. N. Juslin & J. A. Sloboda (Eds.), *Music and emotion: Theory and research* (pp. 223–248). Oxford: University Press.
- Gazzaniga, M., Ivry, R. & Mangun, G. (2002). *Cognitive neuroscience: The biology of the mind* (2nd Ed.). New York: McGraw-Hill.
- Gehrke, J. (1996). *Afferente Informationsverarbeitung und die Synchronisation von Ereignissen*. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Gerard, C. & Rosenfeld, M. (1995). Pratique musicale et regulations temporelles. *L'annee Psychologique*, 95, 571–591.
- Gibson, J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gibson, J. (1982a). *Reasons for realism: Selected essays of James J. Gibson*. Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
- Gibson, J. J. (1982b). *Wahrnehmung und Umwelt*. München: Urban & Schwarzenberg.
- Giger, P. (1993). *Die Kunst des Rhythmus. Professionelles Know How in Theorie und Praxis*. Mainz: Schott.
- Goldberg, G. (1985). Supplementary motor area structure and function: Review and hypothesis. *Behavioral Brain Science*, 8, 567–616.

- Goschke, T. (1996). Lernen und Gedächtnis: Mentale Prozesse und Gehirnstrukturen. In G. Roth & W. Prinz (Hg.), *Kopf-Arbeit: Gehirnfunktionen und kognitive Leistungen* (S. 359–410). Heidelberg: Spektrum.
- Grafton, S. T. & Ivry, R. B. (2004). The representation of action. In M. S. Gazzaniga (Hg.), *The cognitive neurosciences*. (3rd Ed.)(pp. 441–451). Cambridge: MIT Press.
- Grondin, S. (2001). From physical time to the first and second moments of psychological time. *Psychological Bulletin*, 127, 1, 22–44.
- Grüsser, O.-J. (1989). Zeit und Gehirn. Zeitliche Aspekte der Signalverarbeitung in den Sinnesorganen und im Zentralnervensystem. In H. Gumin & H. Meier (Hg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick* (S. 79–132). München: Piper.
- Grube, D. (1996). Verarbeitung akustisch dargebotener Zeitintervalle im Sekundenbereich: Eine Leistung der phonologischen Schleife des Arbeitsgedächtnisses. *Zeitschrift für Experimentelle Psychologie*, XLIII, 4, 527–546.
- Grube, D. (1998). Die Kapazität des phonetischen Speichers des Arbeitsgedächtnisses als äuditive Präsenzzeit und ihr Einfluss auf die Reproduktion von Zeitmustern. In U. Kotkamp & W. Krause (Hg.), *Intelligente Informationsverarbeitung* (S. 223–231). Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
- Grube, D. (1999). *Arbeitsgedächtnis und Zeitverarbeitung* Münster: Waxmann.
- Guyau, J.-M. (1890/1993). *Die Entstehung des Zeitbegriffs*. Cuxhaven: Junghans.
- Haarmann, H. J., Davelaar, E. J. & Usher, M. (2003). Individual differences in semantic short-term memory capacity and reading comprehension. *Journal of Memory and Language*, 48, 320–345.
- Haken, H., Kelso, J. A. S. & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transition in human hand movements. *Biological Cybernetics*, 51, 347–356.
- Haken, H., Peper, C. E., Beek, P. J. & Daffertshofer, A. (1996). A model for phase transitions in human hand movements during multifrequency tapping. *Physica D*, 90, 179–196.
- Handel, S. (1984). Using polyrhythms to study rhythm. *Music Perception*, 1, 465–484.
- Handel, S. (1989). *Listening: An introduction to the perception of auditory events*. Cambridge: MIT Press.
- Handel, S. (1993). The effect of tempo and tone duration on rhythm discrimination. *Perception & Psychophysics*, 54, 3, 370–382.

- Handel, S. (1998). The interplay between metric and figural rhythmic organization. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24, 5, 1546–1561.
- Handel, S. & Oshinsky, J. S. (1981). The meter of syncopated auditory polyrhythms. *Perception & Psychophysics*, 30, 1–9.
- Hartmann, W. M. (1988). Pitch perception and the organization and integration of auditory entities. In G. W. Edelman, W. Gall & W. M. Cowan (Eds.), *Auditory function: Neurobiological bases of hearing* (pp. 623–645). New York: Wiley.
- Haschke, W., Haschke, R., Dorman, W. U. & Schwind, J. (1986). Objectives of refferent information processing. In F. Klix & H. Hagendorf (Eds.), *Human Memory and Cognitive Capabilities. Mechanisms and Performances*, Vol. 2 (pp. 629–637). North-Holland: Elsevier.
- Hastings, M. (1998). The brain, circadian rhythms, and clock genes. *BMJ*, 317, 1704–1707.
- Hawking, S. W. (1988). *Eine kurze Geschichte der Zeit*. Reinbek: Rowohlt.
- Hazeltine, E., Helmuth, L. L. & Ivry, R. B. (1997). Neural mechanism of timing. *Trends in Cognitive Science*, 1, 163–169.
- Hellbrück, J. & Ellermeier, W. (2004). *Hören: Physiologie, Psychologie und Pathologie* (2. Aufl.). Göttingen: Hogrefe.
- Herrmann, C. & Fiebach, C. (2004). *Gehirn und Sprache*. Frankfurt a. M.: Fischer.
- Heuer, H. (2006). Bewegungssteuerung. In J. Funke & P. A. Frensch (Hg.), *Handbuch der Allgemeinen Psychologie - Kognition*, Bd. 5 (S. 529–547). Göttingen: Hogrefe.
- Hirsh, I. J. & Watson, C. S. (1996). Auditory psychophysics and perception. *Annual Review of Psychology*, 47, 461–484.
- Holst, W. v. & Mittelstaedt, H. (1950). Das Reafferenzprinzip. Wechselwirkung zwischen Zentralnervensystem und Peripherie. *Naturwissenschaft*, 37, 464–476.
- Holzkamp, K. (1972). *Kritische Psychologie. Vorbereitende Arbeiten*. Frankfurt a. M.: Fischer.
- Hommel, B. (2006). Wahrnehmung und Handlung. In J. Funke & P. A. Frensch (Hg.), *Handbuch der Allgemeinen Psychologie - Kognition*, Bd. 5 (S. 541–547). Göttingen: Hogrefe.

- Honing, H. (2002). Structure and interpretation of rhythm and timing. *Tijdschrift voor Muziektheorie*, 7, 3, 227–232.
- Honing, H. (2004). The comeback of systematic musicology: New empiricism and the cognitive revolution. *Tijdschrift voor Muziektheorie*, 9, 241–244.
- Honing, H. (2007). Is expressive timing relational invariant under tempo transformation? *Psychology of Music*, 35, 2, 276–285.
- Huron, D. (2006). *Sweet anticipation: Music and the psychology of expectation*. Cambridge: MIT Press.
- Huron, D. & Royal, M. (1996). What is melodic accent? Concerning evidence from musical practice. *Music Perception*, 13, 489–516.
- Husserl, E. (1985). *Texte zur Phänomenologie des inneren Zeitbewußtseins (1893-1917)*. Hamburg: Meiner.
- Illert, M. (1997). Die Motorik des Musizierens. In H. Bruhn, R. Oerter & H. Rösing (Hg.), *Musikpsychologie. Ein Handbuch* (3. Aufl.) (S. 639–649). Reinbek: Rowohlt.
- Ivry, R. B. & Richardson, T. C. (2002). Temporal control and coordination: The multiple timer model. *Brain and Cognition*, 48, 117–132.
- Ivry, R. B. & Spencer, R. M. C. (2004). The neural representation of time. *Current Opinion in Neurobiology*, 14, 225–232.
- Jackendoff, R. & Lerdahl, F. (1982). Grammatical parallels between music and language. In M. Clynes (Hg.), *Music, mind, and brain* (S. 83–118). New York: Plenum Press.
- James, W. (1890). *The principles of psychology*, Bd. 1 & 2. New York: Holt.
- Jäncke, L., Losse, R., Lutz, K., Specht, K. & Shah, N. J. (2000). Cortical activations during paced finger-tapping applying visual and auditory pacing stimuli. *Cognitive Brain Research*, 10, 51–66.
- Johnson, W. S. (1898). Researches in practice and habit. *Studies from the Yale Psychology Laboratory*, 6, 51–105.
- Jones, M. R. (1976). Time, our lost dimension: Toward a new theory of perception, attention, and memory. *Psychological Review*, 83, 323–355.
- Jones, M. R. (1982). Music as a stimulus for psychological motion: Part II. An expectancy model. *Psychomusicology*, 2, 1–13.

- Jones, M. R. (1987). Dynamic pattern structure in music: Recent theory and research. *Perception & Psychophysics*, 41, 621–634.
- Jones, M. R. (1990). Musical events and models of musical time. In R. A. Block (Ed.), *Cognitive models of psychological time* (pp. 207–240). Hillsdale: Erlbaum.
- Jones, M. R. (2003). Temporal expectancies, capture and timing in auditory sequences. In C. Folk & B. Gibson (Eds.), *Attraction, distraction and action: Multiple perspectives on attentional capture* (pp. 191–230). Amsterdam: Elsevier.
- Jones, M. R. (2004). Attention and timing. In J. Neuhoff (Ed.), *Ecological psychoacoustics* (pp. 49–88). San Diego: Elsevier.
- Jones, M. R. & Boltz, M. (1989). Dynamic attending and responses to time. *Psychological Review*, 83, 459–491.
- Jones, M. R. & Yee, W. (1993). Attending to auditory events: The role of temporal organization. In S. McAdams & E. Bigand (Eds.), *Thinking in sound: The cognitive psychology of human audition* (pp. 69–112). Oxford: University Press.
- Julesz, B. & Hirsh, I. J. (1972). Visual and auditory perception: An essay of comparison. In E. E. David & P. Denes (Hg.), *Human communication: A unified view* (S. 283–340). New York: McGraw-Hill.
- Justus, T. C. & Ivry, R. B. (2001). The cognitive neuropsychology of the cerebellum. *International Review of Psychiatry*, 13, 276–282.
- Kant, I. (1966). *Kritik der reinen Vernunft*. Leipzig: Reclam.
- Karmarkar, U. R. & Buonomano, D. V. (2007). Timing in the absence of clocks: Encoding time in neural network states. *Neuron*, 53, 427–438.
- Keele, S. W., Cohen, A. & Ivry, R. (1990). Motor programs: Concepts and issues. In M. Jeannerod (Ed.), *Attention and performance XIII: Motor representation and control*. (pp. 77–110). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Kelso, J. A. S., Ding, M. & Schöner, G. (1993). Dynamic pattern formation: A primer. In L. B. Smith & E. Thelen (Eds.), *A dynamic systems approach to development* (pp. 13–50). Cambridge, MA: MIT Press.
- Kelso, J. A. S. & Haken, H. (1997). Im Organismus sind neue Gesetze zu erwarten. In M. P. Murphy & L. A. S. O'Neill (Eds.), *Was ist das Leben? Die Zukunft der Biologie* (pp. 157–182). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Kirchner, G. & Pöhlmann, R. (2005). *Lehrbuch der Sportmotorik. Psychologische Grundlagen und Anwendungen*, Bd. 37 von *Psychomotorik in Forschung und Praxis*. Kassel: Zimmermann & Kaul.

- Kluwe, R. H. (1997). Komponenten des Arbeitsgedächtnisses: Zum Stand kognitionswissenschaftlicher Forschung. In G. Lüer & U. Lass (Hg.), *Erinnern und Behalten: Wege zur Erforschung des menschlichen Gedächtnisses* (S. 140–171). Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.
- Kluwe, R. H. (2006). Exekutive Funktionen. In J. Funke & P. A. Frensch (Hg.), *Handbuch der Allgemeinen Psychologie - Kognition*, Bd. 5 (S. 547–555). Göttingen: Hogrefe.
- Koch, I., Knoblich, G. & Prinz, W. (2006). Handlungsplanung und -steuerung: Überblick, Definitionen und methodische Ansätze. In J. Funke & P. A. Frensch (Hg.), *Handbuch der Allgemeinen Psychologie - Kognition*, Bd. 5 (S. 497–506). Göttingen: Hogrefe.
- Koffka, K. (1935). *Principles of gestalt psychology*. London: Lund Humphries.
- Konczak, J. (2006). Motorisches Lernen. In H.-O. Karnath & P. Thier (Hg.), *Neuropsychologie* (2. Aufl.) Kap. 61, (S. 624–631). Heidelberg: Springer.
- Kopiez, R. (2005). Musikalischer Rhythmus und seine wahrnehmungspsychologischen Grundlagen. In C. Brüstle, N. Ghattas, C. Risi & S. Schouten (Hg.), *Aus dem Takt. Rhythmus in Kunst, Kultur und Natur* (S. 127–148). Bielefeld: transcript.
- Krampe, R. T. & Engbert, R. (2005). Produktion und Synchronisation von Rhythmen. In T. H. Stoffer & R. Oerter (Hg.), *Allgemeine Musikpsychologie. Enzyklopädie der Psychologie, Musikpsychologie*, Bd. 1 (S. 483–536). Göttingen: Hogrefe.
- Krampe, R. T., Engbert, R. & Kliegl, R. (2002). Representational models and nonlinear dynamics: Irreconcilable approaches to human movement timing and coordination or two sides of the same coin. *Brain and Cognition*, 48, 1–6.
- Krampe, T. R., Mayr, U. & Kliegl, R. (2005). Timing, sequencing, and executive control in repetitive movement production. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31, 3, 379–397.
- Krumhansl, C. L. (2000). Rhythm and pitch in music cognition. *Psychological Bulletin*, 126, 1, 159–179.
- Kurth, E. (1931). *Musikpsychologie*. Berlin: Max Hesses.
- Lakin-Thomas, P. L. (2000). Circadian rhythms: New function for old clock genes? *TIG*, 16, 3, 135–142.
- Lange, E. B. (2004). Musikpsychologische Forschung im Kontext allgemeinpsychologischer Gedächtnismodelle. In H. d. l. Motte-Haber & G. Rötter (Hg.), *Musikpsychologie. Handbuch der Systematischen Musikwissenschaft*, Bd. 3 Laaber: Laaber.

- Langner, J. (2002). *Musikalischer Rhythmus und Oszillation: eine theoretische und empirische Erkundung*. Wien: Lang.
- Large, E. W. (2000). On synchronisation movements to music. *Human Movement Science, 19*, 527–566.
- Large, E. W., Fink, P. & Kelso, J. A. (2002). Tracking simple and complex sequences. *Psychological Research, 66* (1), 3–17.
- Large, E. W. & Jones, M. R. (1999). The dynamics of attending: How people track timevarying events. *Psychological Review, 106*, 119–159.
- Large, E. W. & Kolen, J. F. (1994). Resonance and the perception of musical meter. *Connection Science, 6*, 177–208.
- Large, E. W. & Palmer, C. (2002). Perceiving temporal regularity in music. *Cognitive Sciences, 26*, 1–37.
- Leontjew, A. N. (1977). *Tätigkeit, Bewußtsein, Persönlichkeit*. Stuttgart: Klett.
- Lerdahl, F. & Jackendoff, R. (1983). *A generative theory of tonal music*. Cambridge: MIT Press.
- Levitin, D. & Cook, P. R. (1996). Memory for musical tempo: Additional evidence that auditory memory is absolute. *Perception & Psychophysics, 58*, 6, 927–935.
- Lewis, P. A. & Miall, R. C. (2003a). Distinct systems for automatic and cognitively controlled time measurement: Evidence from neuroimaging. *Current Opinion in Neurobiology, 13*, 250–255.
- Lewis, P. A. & Miall, R. C. (2003b). Overview: An image of human neural timing. In W. H. Meck (Hg.), *Functional and neural mechanisms of intervall timing* (S. 515–532). Boca Raton: CRC Press.
- Logie, R. H. & Baddeley, A. D. (1987). Cognitive processes in counting. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 13*, 310–326.
- Lomov, B. F. (1980). On levels of anticipation. In *Proceedings, XXII International Congress on Psychology*, (S. 154–158). Leipzig.
- London, J. (2001). Rhythm. In J. Tyrrell & S. Sadie (Eds.), *The New Grove Dictionary of Music and Musicians*, Vol. 21 (pp. 277–309).
- London, J. (2002). Cognitive constraints on metric systems. Some observations and hypotheses. *Music Perception, 19*, 529–550.

- London, J. (2004). *Hearing in time - Psychological aspects of musical meter*. New York: Oxford University Press.
- Longuet-Higgins, H. C. & Lee, C. S. (1984). The rhythmic interpretation of monophonic music. *Music Perception, 1*, 424–441.
- Longuet-Higgins, H. C. & Steedman, M. J. (1971). On interpreting Bach. In B. Meltzer & D. Michie (Eds.), *Machine intelligence*, Vol. 6 (pp. 221–241). Edinburgh: University Press.
- Lotze, R. H. (1852). *Medicinische Psychologie der Seele*. Leipzig: Weidmann'sche Buchhandlung.
- Luria, A. R. (1976). *Cognitive development. Its cultural and social foundations*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Matell, M. S. & Meck, W. H. (2000). Neuropsychological mechanisms of interval timing behavior. *BioEssays, 22*, 94–103.
- Mates, J., Müller, U., Radil, T. & Pöppel, E. (1994). Temporal integration in sensorimotor synchronization. *Journal of Cognitive Neuroscience, 6*, 332–340.
- McAdams, S. (1984). The auditory image: A metaphor for musical and psychological research on auditory organization. In W. R. Crozier & A. J. Chapman (Eds.), *Cognitive processes in the perception of art* (pp. 289–323). North-Holland: Elsevier.
- McClelland, J. J., Rumelhart, D. E. & the PDP Research Group (1986). *Parallel distributed processing. Explorations in the microstructure of cognition, Vol. 2: Psychological and biological models* Cambridge, MA: MIT Press.
- McNeill, W. H. (1995). *Keeping together in time. Dance and drill in human history*. Cambridge: Harvard University Press.
- Meck, W. H. & Malapani, C. (2004). Neuroimaging of interval timing. *Cognitive Brain Research, 21*, 133–137.
- Metzger, W. (1975). *Psychologie - Die Entwicklung ihrer Grundannahmen seit der Entwicklung des Experiments*. Darmstadt: Dr. Dietrich Steinkopff.
- Michon, J. A. (1978). The making of the present: A tutorial review. In J. Requin (Ed.), *Attention and performance* (pp. 89–111). Hillsdale: Erlbaum.
- Michon, J. A. (1985). The complete time experiencer. In J. A. Michon & J. L. Jackson (Eds.), *Time, mind and behavior* (pp. 21–52). Berlin: Springer.

- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus minus two. Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63, 81–97.
- Miller, G. A., Galanter, E. & Pribram, K. H. (1960/1973). *Strategien des Handelns. Pläne und Strukturen des Verhaltens* Stuttgart: Klett.
- Miyake, I. (1902). Researches on rhythmic action. *Studies from the Yale Psychology Laboratory*, 10, 1–48.
- Miyake, Y., Onishi, Y. & Pöppel, E. (2004). Two types of anticipation in synchronization tapping. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 64, 415–426.
- Müllensiefen, D. (2004). *Variabilität und Konstanz von Melodien in der Erinnerung. Ein Beitrag zur musikpsychologischen Gedächtnisforschung*. Dissertation, Universität Hamburg.
- Müller, H. J. & Krummenacher, J. (2006). Aufmerksamkeit. In J. Funke & P. A. Frensch (Hg.), *Handbuch der Allgemeinen Psychologie - Kognition*, Bd. 5 (S. 118–126). Göttingen: Hogrefe.
- Müller, K. (2000). Neurophysiologische Methoden zur Analyse zeitlicher Steuerungsmechanismen. In K. Müller & G. Aschersleben (Hg.), *Rhythmus. Ein interdisziplinäres Handbuch* (S. 293–310). Bern: Huber.
- Müller, K. & Aschersleben, G. (2000). *Rhythmus. Ein interdisziplinäres Handbuch*. Bern: Huber.
- Müller, K., Schmitz, F., Aschersleben, G., Schnitzler, A., Freund, H.-J. & Prinz, W. (2000). Neuromagnetic correlates of sensorimotor synchronization. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 1–10.
- Münsterberg, H. (1888). *Beiträge zur Experimentalpsychologie*, Nr. 1, Freiburg: J.C.B. Mohr.
- Molinari, M., Leggio, M. G., Martin, M. d., Cerasa, A. & Thaut, M. H. (2003). Neurobiology of rhythmic motor entrainment. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 999, 313–321.
- Morton, J., Marcus, S. M. & Frankish, C. (1976). Perceptual centers (P-centers). *Psychological Review*, 83, 405–408.
- Motte-Haber, H. d. l. (1968). *Ein Beitrag zur Klassifikation musikalischer Rhythmen. Experimentalpsychologische Untersuchungen*. Köln: Arno Volk.
- Motte-Haber, H. d. l. (1985). *Handbuch der Musikpsychologie*. Laaber: Laaber.

- Motte-Haber, H. d. l. & Rötter, G. (2004). *Musikpsychologie. Handbuch der Systematischen Musikwissenschaft*, Bd. 3, Laaber: Laaber.
- Müsseler, J., Aschersleben, G. & Prinz, W. (1996). Die Steuerung von Handlungen. In G. Roth & W. Prinz (Hg.), *Kopf-Arbeit: Gehirnfunktionen und kognitive Leistungen* (S. 309–358). Heidelberg: Spektrum.
- Narmour, E. (1991). The top-down and bottom-up systems of musical implication: Building on Meyer's theory of emotional syntax. *Music Perception*, 9, 1, 1–26.
- Nattkemper, D. (2006). Planung einfacher Handlungen. In J. Funke & P. A. Frensch (Hg.), *Handbuch der Allgemeinen Psychologie - Kognition*, Bd. 5 (S. 507–512). Göttingen: Hogrefe.
- Neisser, U. (1996). *Kognition und Wirklichkeit: Prinzipien und Implikationen der kognitiven Psychologie* (2. Aufl.). Stuttgart: Klett-Cotta.
- Neumann, O. (1987). Zur Funktion der selektiven Aufmerksamkeit für die Handlungssteuerung. *Sprache und Kognition*, 3, 107–125.
- Newton, I. (1686). *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. London: Joseph Streater.
- Noë, A. (2004). *Action in perception*. Cambridge: MIT Press.
- Noorden, L. v. & Moelants, D. (1999). Resonance in the perception of musical pulse. *Journal of New Music Research*, 28, 43–66.
- Norman, D. & Shallice, T. (1986). Attention to action: Willed and automatic control of behaviour. In R. J. Davidson, G. E. Schwartz & D. Shapiro (Eds.), *Consciousness and Self-Regulation: Advances in Research and Theory*, Vol. IV New York: Plenum Press.
- Oerter, R. (1993). Musik und Individuum. Handlungstheoretische Fundierung. In H. Bruhn, R. Oerter & H. Rösing (Hg.), *Musikpsychologie. Ein Handbuch*. (S. 253–267). Reinbek: Rowohlt.
- Oerter, R. (1993/1999). *Psychologie des Spiels. Ein handlungstheoretischer Ansatz*. Weinheim: Beltz.
- Paillard, J. (1949). Quelques données psychologiques relatives au déclenchement de la commande motrice. *L'Année Psychologique*, 48, 28–47.
- Palmer, C. (1997). Music performance. *Annual Review of Psychology*, 48, 115–138.

- Palmer, C. & Krumhansl, C. L. (1990). Mental representation for musical meter. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 728–741.
- Palmeri, T. J. (2002). Automaticity. In L. Nadel (Ed.), *Encyclopedia of Cognitive Science* (pp. 390–401). London: Nature Publishing Group.
- Parncutt, R. (1987). The perception of pulse in musical rhythm. In A. Gabrielsson (Ed.), *Action and perception in rhythm and music* (pp. 127–138). Stockholm: Royal Swedish Academy of Music.
- Parncutt, R. (1994). A perceptual model of pulse salience and metrical accent in musical rhythm. *Music Perception*, 11, 409–464.
- Peters, M. (1989). The relationship between variability of intertap intervals and interval duration. *Psychological Research*, 51, 38–42.
- Petersen, P. (1999). Die "Rhythmuspartitur". Über eine Methode zur rhythmisch-metrischen Analyse pulsgebundener Musik. *Hamburger Jahrbuch für Musikwissenschaft*, 16, 83–110.
- Pfleiderer, M. (2002). It don't mean a thing if it ain't got that swing - Überlegungen zur mikrorhythmischen Gestaltung in populärer Musik. *Musikpsychologie. Jahrbuch der Deutschen Gesellschaft für Musikpsychologie*, 16, 102–122.
- Pfleiderer, M. (2006). *Rhythmus. Psychologische, theoretische und stilanalytische Aspekte populärer Musik*. Bielefeld: transcript.
- Pfordresher, P. Q. (2003). The role of melodic and rhythmic accents in musical structure. *Music Perception*, 20, 4, 431–464.
- Philipp, S. (1986). *MIDI-Kompendium 2*. Fränkisch-Crumbach: Kapehl & Philipp.
- Pompino-Marshall, B. (1989). On the psychoacoustic nature of the p-center phenomenon. *Journal of Phonetics*, 17, 175–192.
- Povel, D. & Essens, P. (1985). Perception of temporal patterns. *Music Perception*, 2, 411–440.
- Povel, D.-J. (1981). Internal representation of simple temporal patterns. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7, 1, 3–18.
- Pöppel, E. (1989). Erlebte Zeit und die Zeit überhaupt: Ein Versuch der Integration. In H. Gumin & H. Meier (Hg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick*. München: Piper.
- Pöppel, E. (1997). *Grenzen des Bewußtseins*. Frankfurt a. M.: Insel.

- Pöppel, E. (2004). Lost in time: A historical frame, elementary processing units and the 3-second window. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 64, 295–301.
- Pressing, J. (1984). Cognitive processes in improvisation. In W. R. Crozier & A. J. Chapman (Eds.), *Cognitive processes in the perception of art* (pp. 345–363). North-Holland: Elsevier.
- Pressing, J. (1998). Error correction processes in temporal pattern production. *Journal of Mathematical Psychology*, 42, 63–101.
- Pressing, J. (1999). The referential dynamics of cognition and action. *Psychological Review*, 106, 4, 714–747.
- Pribram, K. H. (1991). *Brain and Perception: Holonomy and Structure in Figural Processing*. Hillsdale: Erlbaum.
- Prinz, W. (1983). *Wahrnehmung und Tätigkeitssteuerung*. Heidelberg: Springer.
- Prinz, W. (1992). Why don't we perceive our brain states. *European Journal of Cognitive Psychology*, 4, 1–20.
- Prinz, W. (1996). Bewusstsein- und Ich-Konstitution. In G. Roth & W. Prinz (Hg.), *Kopf-Arbeit. Gehirnfunktionen und kognitive Leistungen* (S. 451–467). Heidelberg: Spektrum.
- Prinz, W. (1997). Perception and action planning. *European Journal of Cognitive Psychology*, 9, 2, 129–154.
- Prinz, W. (1998). Die Reaktion als Willenshandlung. *Psychologische Rundschau*, 49, 10–20.
- Prinz, W. (2000). Kognitionspsychologische Handlungsforschung. *Zeitschrift für Psychologie*, 208, 32–54.
- Prinz, W. & Hommel, B. (2002). *Common mechanisms in perception and action: Attention & Performance XIX* Oxford: University Press.
- Rammsayer, T. (2000). Zeitwahrnehmung und Rhythmuswahrnehmung. In K. Müller & G. Aschersleben (Hg.), *Rhythmus. Ein interdisziplinäres Handbuch*. (S. 83–106). Bern: Huber.
- Rao, S. M., Harrington, D. L., Haaland, K. Y., Bobholz, J. A., Cox, R. W. & Binder, J. R. (1997). Distributed neural systems underlying the timing of movements. *The Journal of Neuroscience*, 17, 14, 5528–5535.
- Rao, S. M., Mayer, A. R. & Harrington, D. L. (2001). The evolution of brain activation during temporal processing. *Nature Neuroscience*, 4, 3, 317–323.

- Rasch, R. A. (1979). Synchronization in performed ensemble music. *Acustica*, 43, 121–131.
- Rasch, R. A. (1988). Timing and synchronization in ensemble performance. In J. A. Sloboda (Ed.), *Generative processes in music* (pp. 70–90). Oxford: Claredon.
- Reinecke, L. H. (1962). Über die Eigengesetzlichkeit des musikalischen Hörens und die Grenzen der naturwissenschaftlichen Akustik. *Musikalische Zeitfragen*, 10, 34–44.
- Repp, B. H. (1992). A constraint on the expressive timing of a melody gesture: Evidence from performance and aesthetic judgement. *Music Perception*, 10, 2, 221–241.
- Repp, B. H. (1999a). Control of expressive and metronomic timing in pianists. *Journal of Motor Behavior*, 31, 145–164.
- Repp, B. H. (1999b). Detecting deviations from metronomic timing in music: Effects of perceptual structure on the mental timekeeper. *Perception & Psychophysics*, 61, 3, 529–548.
- Repp, B. H. (1999c). Relationships between performance timing, perception of timing perturbations, and perceptual-motor synchronization in two Chopin preludes. *American Journal of Psychology*, 51, 188–203.
- Repp, B. H. (2000). Compensation for subliminal timing perturbations in perceptual-motor synchronization. *Psychological Research*, 63, 2, 106–128.
- Repp, B. H. (2002). The embodiment of musical structure: Effects of musical context on sensorimotor synchronization with complex timing patterns. In W. Prinz & B. Hommel (Eds.), *Common mechanisms in perception and action: Attention and performance XIX* (pp. 245–265). Oxford: Oxford University Press.
- Repp, B. H. (2003). Rate limits in sensorimotor synchronization with auditory and visual sequences: The synchronization threshold and the benefits and costs of interval subdivision. *Journal of Motor Behavior*, 35, 355–370.
- Repp, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization: A review of the tapping literature. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12, 969–992.
- Repp, B. H. (2006). Musical synchronization. In E. Altenmüller, M. Wiesendanger & J. Kesselring (Eds.), *Music, motor control and the brain* (pp. 55–76). Oxford: University Press.
- Repp, B. H. & Penel, A. (2002). Auditory dominance in temporal processing: New evidence from synchronization with simultaneous visual and auditory sequences.

*Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28, 1085–1099.

Revesz, G. (1946). *Einführung in die Musikpsychologie*. Bern: Francke.

Riemann, H. (1903). *System der musikalischen Rhythmik und Metrik*. Leipzig: Breitkopf und Härtel.

Rizzolatti, G. & Craighero, L. (2004). The mirror neuron system. *Annual Review of Neuroscience*, 27, 169–192.

Rosenbaum, D. A. (1991). *Human motor control*. New York: Academic Press.

Rosenbaum, D. A. (1998). *Timing of behavior*. London: Bradford Book.

Roth, G. (1996). *Das Gehirn und seine Wirklichkeit. Kognitive Neurobiologie und ihre philosophischen Konsequenzen*. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.

Roth, G. (2001). *Fühlen, Denken, Handeln. Wie das Gehirn unser Verhalten steuert*. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.

Rösing, H. (1997). Musikpsychologie I: Geschichte der Musikpsychologie. In L. Fincher (Hg.), *Musik in Geschichte und Gegenwart*, Bd. 6, 2. Auflage, Sachteil, (Sp. 1551-1601). Kassel: Bärenreiter.

Rötter, G. (1996). Zeit- und Rhythmuswahrnehmung. In H. d. l. Motte-Haber (Hg.), *Handbuch der Musikpsychologie* (S. 483–503). Regensburg: Laaber.

Rumelhart, D. E., McClelland, J. J. & the PDP Research Group (1986). *Parallel distributed processing. Explorations in the microstructure of cognition* Cambridge, MA: MIT Press.

Ruthruff, E., Pashler, H. E. & Hazeltine, E. (2003). Dual-task interference with equal task emphasis: Graded capacity sharing or central postponement? *Perception & Psychophysics*, 65, 5, 801–816.

Sakai, K., Hikosaka, O. & Nakamura, K. (2004). Emergence of rhythm during motor learning. *Trends in Cognitive Sciences*, 8, 12, 547–553.

Salamé, P. & Baddeley, A. (1989). Effects of background music on phonological short-term memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 41A, 1, 107–122.

Schandry, R. (2003). *Biologische Psychologie*. Weinheim: Beltz.

Scheirer, E. D. (1998). Tempo and beat analysis of acoustic musical signals. *Journal of the Acoustical Society of America*, 103, 1, 588–601.

- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82, 225–260.
- Schmidt, R. A. & Lee, T. D. (1999). *Motor control and learning. A behavioral emphasis*. Champaign: Human Kinetics.
- Schneider, A. (1997). *Tonhöhe, Skala, Klang. Akustische, tonometrische und psychoakustische Studien auf vergleichender Grundlage*. Bonn: Orpheus.
- Schöner, G. (2002). Timing, clocks, and dynamical systems. *Brain and Cognition*, 48, 31–51.
- Schulze, H.-H. (1978). The detectability of local and global displacements in regular rhythmic patterns. *Psychological Research*, 40, 173–181.
- Schulze, H.-H. (1989a). Categorical perception of rhythmic patterns. *Psychological Research*, 51, 10–15.
- Schulze, H.-H. (1989b). The perception of temporal deviations in isochronic patterns. *Perception & Psychophysics*, 45, 291–296.
- Schulze, H.-H. (2005). Wahrnehmung von Rhythmus und Metrum. In T. H. Stoffer & R. Oerter (Hg.), *Allgemeine Musikpsychologie. Enzyklopädie der Psychologie, Musikpsychologie*, Bd. 1 Kap. 13, (S. 451–482). Göttingen: Hogrefe.
- Scott, S. K. (1998). The point of p-centers. *Psychological Research*, 61, 1, 4–11.
- Seidel, W. (1976). *Rhythmus. Eine Begriffsbestimmung*. Darmstadt.
- Seidel, W. (1998). Rhythmus, Metrum, Takt. In L. Finscher (Hg.), *Musik in Geschichte und Gegenwart*, Bd. 8, 2. Aufl., Sachteil, (Sp. 257-317). Kassel: Bärenreiter.
- Seidler-Brandler, U. (2002). *Die Verarbeitung tonaler Information im Arbeitsgedächtnis*. Aachen: Shaker.
- Semjen, A. (1996). Emergent versus programmed temporal properties of movement sequences. In H. Helfrich (Ed.), *Time and Mind* (pp. 25–43). Seattle: Hogrefe & Huber.
- Semjen, A. (2002). On the timing basis of bimanual coordination in discrete and continuous tasks. *Brain and Cognition*, 48, 133–148.
- Semjen, A., Schulze, H.-H. & Vorberg, D. (2000). Timing precision in continuation and synchronization tapping. *Psychological Research*, 63, 137–147.

- Semjen, A., Vorberg, D. & Schulze, H.-H. (1998). Getting synchronized with the metronome: Comparison between phase and period correction. *Psychological Research*, 61, 44–55.
- Sethares, W. A. (2007). *Rhythm and Transforms*. London: Springer.
- Shaffer, L. H. (1981). Performance of Chopin, Bach, and Bartok: Studies in motor programming. *Cognitive Psychology*, 13, 326–376.
- Shaffer, L. H. (1982). Rhythm and timing in skill. *Psychological Review*, 89, 2, 109–122.
- Shaffer, L. H. (1984). Timing in solo and duet piano performances. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 36A, 577–595.
- Simon, H. A. (1996). *The sciences of the artificial* (3. Aufl.). MIT Press.
- Singer, R. N. (1985). *Motorisches Lernen und menschliche Leistung*. Bad Homburg: Limpert.
- Snyder, B. (2000). *Music and memory*. Cambridge: MIT Press.
- Snyder, J. & Krumhansl, C. L. (2001). Tapping to ragtime: Cues to pulse finding. *Music Perception*, 18, 4, 455–489.
- Spitzer, M. (2002). *Musik im Kopf*. Stuttgart: Schattauer.
- Spitznagel, A. (2000). Zur Geschichte der psychologischen Rhythmusforschung. In K. Müller & G. Aschersleben (Hg.), *Rhythmus. Ein interdisziplinäres Handbuch* (S. 1–40). Bern: Huber.
- Stadler, M. & Wehner, T. (1985). Anticipation as a basic principle in goal directed action. In M. Frese & J. Sabini (Eds.), *Goal directed behavior: The concept of action in psychology* (pp. 67–77). Hillsdale NJ: Erlbaum.
- Steedmann, M. (1977). The perception of musical rhythm and metre. *Perception*, 6, 555–569.
- Steinberg, R. (2005). Musikhören: Beteiligte neuronale Strukturen und deren Pathologie. In T. H. Stoffer & R. Oerter (Hg.), *Allgemeine Musikpsychologie. Enzyklopädie der Psychologie, Musikpsychologie*, Bd. 1 (S. 149–201). Göttingen: Hogrefe.
- Stern, L. W. (1897). Psychische Präsenzzeit. *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane*, 13.
- Stevens, L. T. (1886). On the time-sense. *Mind*, 11, 393–404.

- Stoffer, T. H. (1985). Parallelen zwischen Ernst Kurths Konzeption der Musikpsychologie und der gegenwärtigen Entwicklung einer Kognitiven Musikpsychologie. *Musikpsychologie. Jahrbuch der Deutschen Gesellschaft für Musikpsychologie*, 2, 87–99.
- Stoffer, T. H. (2005). Aufmerksamkeitsprozesse beim Musikhören: Wissensunabhängige und wissensabhängige Selektionsprozesse. In T. H. Stoffer & R. Oerter (Hg.), *Allgemeine Musikpsychologie. Enzyklopädie der Psychologie, Musikpsychologie*, Bd. 1 Kap. 16, (S. 591–656). Göttingen: Hogrefe.
- Strogatz, S. H. & Stewart, I. (1993). Coupled oscillators and biological synchronization. *Scientific American*, 269, 102–109.
- Sulzer, J. G. (1794/1967). Rhythmus, rhythmisch. In *Allgemeine Theorie der schönen Künste*. (2 Aufl.) (S. 90–105). Nr. Bd. IV, Hildesheim: Olms.
- Terhardt, E. (1998). *Akustische Kommunikation*. Berlin/Heidelberg: Springer.
- Thaut, M. H. (2005). *Rhythm, music, and the brain: Scientific foundations and clinical applications*. New York: Routledge.
- Thaut, M. H., Miller, R. A. & Schauer, L. M. (1998a). Multiple synchronization strategies in rhythmic sensorymotor tasks - phase vs. period correction. *Biological Cybernetics*, 79, 3, 241–250.
- Thaut, M. H., Rathbun, J. A. & Miller, R. A. (1997). Music versus metronome timekeeper in a rhythmic motor task. *International Journal of Arts Medicine*, 5, 4–12.
- Thaut, M. H., Tian, B. & Azimi-Sadjadi, M. R. (1998b). Rhythmic finger tapping to cosine-wave modulated metronome sequences: Evidence of subliminal entrainment. *Human Movement Science*, 17, 6, 839–863.
- Thomas, D. A. & Farlow, J. O. (1998). Spuren einer Dinosaurierjagd. *Spektrum der Wissenschaft, Februar*, 86–91.
- Todd, N. P. (2001). Evidence for a behavioural significance of saccular acoustic sensitivity in humans. *Journal of the Acoustical Society of America*, 110, 380–390.
- Todd, N. P. & Cody, F. W. (2000). Vestibular responses to loud dance music. A physiological basis of the "Rock'n'Roll Treshold"? *Journal of the Acoustical Society of America*, 107, 496–500.
- Todd, N. P. M. (1994). The auditory "primal sketch": A multiscale model of rhythmic grouping. *Journal of New Music Research*, 23, 25–70.

- Todd, N. P. M. (1995). The kinematics of musical expression. *Journal of the Acoustical Society of America*, 97, 1940–1949.
- Toiviainen, P. (1997). Modelling the perception of metre with competing subharmonic oscillators. In A. Gabrielsson (Ed.), *Proceedings of the Third Triennial ESCOM Conference*, (pp. 511–516). Uppsala: University Press.
- Toiviainen, P. & Snyder, J. S. (2003). Tapping to Bach: Resonance-based modeling of pulse. *Music Perception*, 21, 1, 43–80.
- Turvey, M. T. (1990). Coordination. *American Psychologist*, 45, 8, 938–953.
- Unyk, A. (1990). An information-processing analysis of expectancy in music. *Psychomusicology*, 9, 229–240.
- Vorberg, D. & Hambuch, R. (1978). On the temporal control of rhythmic performance. In J. Requin (Hg.), *Attention and performance.*, Bd. VII (S. 535–555). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Vorberg, D. & Hambuch, R. (1984). Timing of two-handed rhythmic performance. In J. Gibbon & L. Allan (Eds.), *Annals of the New York academy of sciences*, Bd. 423 (pp. 390–406). New York: Academy of Sciences.
- Vorberg, D. & Schulze, H.-H. (2002). Linear phase-correction in synchronization: Predictions, parameter estimation, and simulation. *Journal of Mathematical Psychology*, 46, 56–87.
- Vorberg, D. & Wing, A. (1994). Modelle für Variabilität und Abhängigkeit bei der zeitlichen Steuerung. In H. Heuer & S. Keele (Eds.), *Psychomotorik. Enzyklopädie der Psychologie, Vol. III* (pp. 223–320). Göttingen: Hogrefe.
- Vorberg, D. & Wing, A. (1996). Modeling variability and dependence in timing. In H. Heuer & S. W. Keele (Eds.), *Handbook of perception and action*, Vol. 3 (pp. 179–262). Dordrecht: Kluwer.
- Vos, J. & Rasch, R. A. (1981). The perceptual onset of musical tones. *Perception & Psychophysics*, 29, 4, 323–335.
- Vos, P. G. & Helsen, E. L. (1992). Tracking simple rhythms: On-beat versus offbeat performance. In F. Macar & V. Pouthas (Eds.), *Time, action and cognition: Towards bridging the gap* (pp. 287–299). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Vos, P. G., Mates, J. & van Kruysbergen, N. W. (1995). The perceptual centre of a stimulus as the cue for synchronization to a metronome: Evidence from asynchronies. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 48A, 1024–1040.

- Westergaard, P. (1975). *An introduction to tonal theory*. New York: W. W. Norton.
- Wing, A. & Todd, N. (2002). Topics in rhythm perception and production. *Psychological Research*, 66, 1–2.
- Wing, A. M. & Kristofferson, A. B. (1973a). Response delays and the timing of discrete motor responses. *Perception & Psychophysics*, 14, 1, 5–12.
- Wing, A. M. & Kristofferson, A. B. (1973b). The timing of interresponse intervals. *Perception & Psychophysics*, 13, 3, 455–460.
- Wiora, W. (1957). Musik als Zeitkunst. *Die Musikforschung*, X, 15–28.
- Wohlschläger, A. & Koch, R. (2000). Synchronization error: An error in time perception. In P. Desain & L. Windsor (Eds.), *Rhythm perception and production* (pp. 115–127). Lisse: Swets & Zeitlinger.
- Woodrow, H. (1911). The role of pitch in rhythm. *Psychological Review*, 18, 54–71.
- Woodrow, H. (1932). The effect of rate of sequence upon the accuracy of synchronization. *Journal of Experimental Psychology*, 15, 357–379.
- Wright, K. (2007). Zeit unseres Lebens. *Spektrum der Wissenschaft Spezial - Phänomen Zeit*, 1, 62–69.
- Wundt, W. (1874). *Grundzüge der physiologischen Psychologie*. Leipzig: Engelmann.
- Wygotzki, L. S. (1987). *Ausgewählte Schriften. Arbeiten zur psychologischen Entwicklung der Persönlichkeit*, Bd. 2, Berlin/DDR: Volk und Wissen.
- Yeston, M. (1976). *The stratification of musical rhythm*. New Haven: Yale University Press.
- Yost, W. A. (1992). Auditory image perception and analysis. *Hearing Research*, 56, 8–19.
- Zanto, T. P. Snyder, J. S. & Large, E. W. (2006). Neural correlates of rhythmic expectancy. *Advances in Cognitive Psychology*, 2, 2-3, 221–231.
- Zwicker, E. & Fastl, H. (1999). *Psychoacoustics: Facts and models*. Heidelberg: Springer.

# Anhang A

# Anhang

```
SUB   Vpn1
BLOCK 1
TRIAL 1

FEED_ON           1
FEED_CHAN         1
FEED_NOTE         64
FEED_VMODE        1
FEED_VEL          120
FEED_LEN          100
FEED_PMODE        1
FEED_DMODE        0

METRON_ON         1
MSPB              400
MET_CHAN          1
MET_NOTE          67
MET_VEL           120
MET_LEN           30

FEED_ON 1
METRON_ON 1
TRIGGER 1 T 120000 END_EXP 0
```

Abbildung A.1: FTAP-Steuerungsdatei für die Versuchsdurchläufe mit MSPB bzw. IOI = 400 ms.

```

SUB   Vpn1
BLOCK 1
TRIAL 1

FEED_ON           1
FEED_CHAN         1
FEED_NOTE         64
FEED_VMODE        1
FEED_VEL          120
FEED_LEN          100
FEED_PMODE        1
FEED_DMODE        0

METRON_ON         1
MSPB              500
MET_CHAN          1
MET_NOTE          67
MET_VEL           120
MET_LEN           30

FEED_ON 1
METRON_ON 1
TRIGGER 1 T 120000 END_EXP 0

```

Abbildung A.2: FTAP-Steuerungsdatei für die Versuchsdurchläufe mit MSPB bzw. IOI = 500 ms.

```

SUB   Vpn1
BLOCK 1
TRIAL 1

FEED_ON           1
FEED_CHAN         1
FEED_NOTE         64
FEED_VMODE        1
FEED_VEL          120
FEED_LEN          100
FEED_PMODE        1
FEED_DMODE        0

METRON_ON         1
MSPB              600
MET_CHAN          1
MET_NOTE          67
MET_VEL           120
MET_LEN           30

FEED_ON 1
METRON_ON 1
TRIGGER 1 T 120000 END_EXP 0

```

Abbildung A.3: FTAP-Steuerungsdatei für die Versuchsdurchläufe mit MSPB bzw. IOI = 600 ms.

# Anhang B

## Anhang

### Verwendete Wörter für den Wortspannen-Test

Kabel Schinken	Atlas Vase
Ziege Wetter Apfel	Harfe Mutter Weise
Buche Hirse Vater Quelle	Zirkus Arbeit Vogel Schraube
Opa Reise Stange Kirche Teppich	Fenster Palme Winter Liste Foto
Fichte Meile Technik Erde Watte Leuchter	Schuster Pizza Haken Silbe Einsatz Biene
Jahre Auto Birke Pinsel Tochter Saite Stange	Kugel Pauke Stimme Balken Sendung Mieter Ecke
Seife China Welle Zeitung Regel Lager Flasche Engel	Geige Bruder Pfanne Wiese Daten Wasser Butter Pendel

Abbildung B.1: Verwendete Wörter für den Wortspannen-Test.

## Verwendete Wörter für das Dual-Task-Experiment: Block I

Bambus Quinte Hebel Folge Haare Meile	Muskel Lichter Anker Katze Teile Steuer	Judo Glocke Oper Sprache Meise Zyklus
Grenze Lippe Spiegel Hamster Tonband Name	Tempo Flieger Waage Hammer Kreisel Schenke	Tuba Finger Stunde Maler Regen Panter
Dose Mauer Teller Zwiebel Poster Haken	Insel Kater Sommer Rasen Lampe Bauer	Hose Ampel Fieber Spende Polster Tage
Gabel Sonne Korpus Leute Frage Kamin	Wunder Note Rahmen Muster Kurve Farbe	Ufer Winkel Meter Bogen Konto Zelle

Abbildung B.2: Verwendete Wörter für die Zweitaufgabe der Durchläufe aus dem ersten Block (Session A).

## Verwendete Wörter für das Dual-Task-Experiment: Block II

Fenster Palme Winter Liste Foto Zirkus	Butter Pendel Taste Bogen Junge Kante	Geige Bruder Pfanne Wiese Daten Wasser
Ufer Winkel Meter Puste Zelle Flügel	Harfe Mutter Weise Buche Quelle Sopran	Schuster Pizza Haken Silbe Einsatz Biene
Eisen Streicher Panter Feder Meister Schaukel	Kamin Wasser Atlas Vase Butter Schaukel	Kugel Pauke Stimme Balken Sendung Ecke
Taste Pendel Lager Flasche Engel Mieter	Birne Orgel Sieger Spalte Junge Fliege	Auge Honig Besen Wiege Fahne Strecke

Abbildung B.3: Verwendete Wörter für die Zweitaufgabe der Durchläufe aus dem zweiten Block (Session B).



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Darstellung der aktivierten Gehirnareale beim rhythmischen Klopfen. Die Abbildung zeigt die aktivierten Areale beim rhythmischen Klopfen mit dem rechten Zeigefinger zu akustischen (A) und visuellen (V) Stimuli, entweder synchron (S) oder nach der Stimulation noch kontinuierlich weiter (C). Unter den Gehirnschichten ist die Aktivierung in den jeweils grau markierten Arealen unter den vier Bedingungen dargestellt. Linksseitige prämotorische und supplementär motorische Areale werden durch akustische Stimuli stärker aktiviert als durch visuelle, wohingegen rechtsseitige inferior parientale und okzipitale Areale stärker durch visuelle Reize aktiviert werden. Rhythmische Stimuli sind also enger mit der Motorik verknüpft, wenn sie akustisch erklingen. (Spitzer, 2002, 220; nach Jäncke et al., 2000) . . . . .	16
1.2	Vereinfachte Darstellung der auditiven Wahrnehmung: Luftdruckschwankungen treffen auf das Ohr und werden in komplexe neuronale Signale übersetzt und daraufhin durch die Interaktion verschiedener Bereiche (Langzeitgedächtnis, Kurzzeitgedächtnis, Aufmerksamkeit und Erwartung) analysiert, selektiert und kategorisiert (Sethares, 2007, 77). . . . .	19
2.1	Die drei Hauptbereiche der Erfahrung bzw. Wissenschaft (nach Terhardt, 1998). . . . .	22
2.2	Beat und Puls . . . . .	25
2.3	Rhythmische Gruppierungen (Snyder, 2000, 35). . . . .	27
2.4	Der phänomenale, strukturelle und metrische Akzent (Snyder, 2000, 171). . . . .	28
2.5	Rhythmische Gruppierungen durch Segmentierungen bzw. Pausen (Snyder, 2000, 39). . . . .	29
2.6	Schematische Darstellung eines Metrums mit der dazugehörigen Akzentbildung (Snyder, 2000, 173). . . . .	31
2.7	Akzentbildungen und Metrum (Snyder, 2000, 174). . . . .	31
2.8	Hierarchische Darstellung der Rhythmusebenen (Snyder, 2000, 176). . . . .	32
2.9	Rhythmische Kontur und rhythmische Spannung (Snyder, 2000, 185). . . . .	33

2.10	Tonhöhen und Tonstufen. Die Tonstufen tragen die Funktion diskreter Kategorien als Ergebnis eines kategorialen Wahrnehmungsprozesses (Albersheim, 1979, 173). . . . .	35
2.11	Beat-Kategorien. Die vertikalen gepunkteten Linien zeigen mögliche Grenzen einzelner Beat-Kategorien (Snyder, 2000, 166). . . . .	36
2.12	Kategorisierungen in Abhängigkeit unterschiedlicher musikalischer Kontexte. Die Abbildung zeigt das jeweils angegebene Metrum (6/8 und 2/4), die festgelegten Notenlängen (in ms) und die Positionen zweier Noten mit den variierenden Längen X bzw. Y (Clarke, 1987, 23). . . . .	37
2.13	Die Abbildung zeigt die Funktion für die Identifikation (Skala auf der linken Seite) und die Unterscheidung (Skala auf der rechten Seite) als zusammengefasstes Ergebnis der beiden metrisch verschiedenen Kontexte (Clarke, 1987, 25). . . . .	38
2.14	Darstellung der einzelnen Funktionen der Identifikations- und Unterscheidungsaufgabe in verschiedenen Kontexten (Clarke, 1987, 26). . . . .	38
2.15	Zwei Interpretationen für eine nicht eindeutige Folge von Tonlängen (Clarke, 1987, 32). . . . .	39
2.16	Acht verschiedene Rhythmus-Variationen eines einfachen geraden Viererrhythmus in Vierteln wurden durch das Verlängern der dritten Note hergestellt und präsentiert. Die Kästen mit den gepunkteten Umrandungen zeigen die drei Bereiche an, die von den Versuchspersonen als jeweils ein Rhythmus gehört wurden. Die ursprünglich acht Rhythmen wurden nur als drei verschiedene Rhythmen wahrgenommen (Snyder, 2000, 182). . . . .	40
2.17	Dreidimensionale Chronotopic map nach Desain & Honing (2003). Die dreidimensionale „chronotopic map“ mit der Angabe der jeweiligen Intervalldauer von bis zu 1 Sekunde (a), der jeweiligen Position einzelner Pattern innerhalb der Karte (b) und den zwei Beispiel-Pattern A und B (Desain & Honing, 2003, 345). . . . .	41
2.18	Hierarchie menschlicher Informationsverarbeitung (nach Bruhn, 1997). . . . .	43
3.1	Entstehung regelmäßiger zeitlicher Erwartungen als Resonanz auf einen regelmäßigen Stimulus (Large & Jones, 1999, 134). . . . .	54
3.2	Darstellung sich überlagernder Erwartungs-Ebenen in einem 3/4-Takt Überlagerung verschiedener Ebenen ( <i>beat level 1</i> = Viertelnoten und <i>beat level 2</i> = Takt) eines 3/4 Taktes und der daraus resultierenden metrische Struktur ( <i>mixture</i> ), nach Large & Palmer (2002) aus London (2004, 22). . . . .	55

3.3	Grundkonzeption des Zwei-Prozess-Modells $Z =$ Zeitgeber-Intervall, $M =$ motorische Verzögerung, $I =$ beobachtbares Intertap-Intervall (Wing & Kristofferson, 1973a,b). . . . .	56
3.4	Skizze einer Reformulierung des Zwei-Prozess-Modells Der Zeitgeber plant die Intervalle zwischen Handlungszielen in Form sensorischer Reafferenzen. $Z =$ Zeitgeber-Intervall, $M =$ motorischer Fehler, $I =$ Intertap-Intervall (Drewing, 2001). . . . .	57
4.1	Illustration der Synchronisationsaufgabe und der negativen Asynchronie Aschersleben, 2000, 139. . . . .	61
4.2	Definition des Synchronisationsfehlers $e_i$ und des Inter-Reaktions-Intervalls (IRI) $I_i$ nach Chen et al. (1997). . . . .	62
4.3	Illustration der Nervenleithypothese . . . . .	65
4.4	Illustration der Schwellenwerthypothese (nach Gehrke, 1996, in: Aschersleben, 2000, 146). . . . .	66
4.5	Durchschnittlicher Synchronisationsfehler bei vier verschiedenen Effektoren (Wohlschläger & Koch, 2000). . . . .	67
4.6	Darstellung des durchschnittlichen Synchronisationsfehlers für Finger und Fußzehen, die entweder keinen, einen oder zwei jeweils kontaktfreie Zwischentaps machen (Wohlschläger & Koch, 2000). . . . .	69
5.1	Sensorische Antizipation: Sensorisch-antizipatorisches Verhalten beeinflusst oder prädisponiert sensorische Informationsverarbeitung (Butz, 2003, 95). . . . .	79
5.2	Explizite Antizipationen beeinflussen gegenwärtige Handlungs-Entscheidungen und -Planungen bezüglich der Vorhersagen, Erwartungen oder Intentionen (Butz, 2003, 96). . . . .	80
5.3	Formulierung des „perception-action interface“ nach Grafton & Ivry (2004, 441). In dieser Darstellung erscheinen Wahrnehmung (Perception) und Handlung (Action) als voneinander getrennte Verarbeitungsstationen. . . . .	81
5.4	Formulierung des „perception-action interface“ nach Grafton & Ivry (2004, 441). In dieser Darstellung sind Wahrnehmung und Handlung (Action) sehr eng miteinander verbunden, denn sie werden auf der gleichen kognitiven Ebene repräsentiert. . . . .	82
5.5	Verschiedene Formulierungen des „perception-action interface“ nach Grafton & Ivry (2004, 441). Hier gibt es sowohl direkte Verbindungen zwischen Stimulus und Handlung (Action), als auch eine indirekte Verbindung über weitere kognitiven Einheiten (Cognition), die von der für Handlungen verantwortlichen Repräsentationen getrennt liegen. . . . .	82
5.6	Das kognitive Modell: Adaptive control of thought-rational (ACT-R 5.0) von Anderson et al. (2004). . . . .	83

- 5.7 Kontrollmechanismus für die Bewegungssteuerung: Open-loop control. Die Muskelkommandos enthalten alle Informationen, die für die Bewegungsausführung erforderlich ist. Feedback wird zwar produziert, aber es wird nicht zur Kontrolle der Bewegung verwendet weil es nicht benötigt wird oder weil die Zeit nicht ausreicht, um es zu verarbeiten (Elsner & Prinz, 2006, 294). . . . . 84
- 5.8 Kontrollmechanismus für die Bewegungssteuerung: Closed-loop control. Die Muskelkommandos werden durch afferente Informationen aus verschiedenen Rezeptoren ergänzt. Das Feedback informiert über die gerade ausgeführte Bewegung und ermöglicht eine kontinuierliche Anpassung der Muskelkommandos an die Erfordernisse der Interaktion mit der Umwelt (Elsner & Prinz, 2006, 294). . . . . 84
- 5.9 Darstellung der an der Bewegungsplanung beteiligten subkortikalen Hirnregionen (nach Herrmann & Fiebach, 2004, 97). . . . . 85
- 5.12 Veranschaulichung der bottom-up und top-down gesteuerten Aufmerksamkeit im Wettbewerb um die Verarbeitung und Handlungskontrolle (nach Engelkamp & Zimmer, 2006, 384). . . . . 90
- 5.14 Das Modell geht nach Baddeley & Hitch (1974) von einem Kontrollsystem, der zentralen Exekutive („Central executive“) aus, welches zwei Subsysteme, den visuellen Skizzenblock („Visualspatial sketchpad“) und die phonologische Schleife („Phonological loop“) kontrolliert (Baddeley, 2003, 830). . . . . 91
- 5.15 Aufbau der phonologischen Schleife (nach Baddeley, 1986, in: Engelkamp & Zimmer, 2006, 233). . . . . 92
- 5.10 **a.** Lateralansicht von Cerebrum (Großhirn) und Cerebellum (Kleinhirn). Die Zellen des primärmotorischen Kortex (M1) liegen im präzentralen Gyrus (Brodmann-Area 4). Anterior zu M1 liegen der prämotorische Kortex (PM) und die supplementär-motorische Area (SMA), deren Neurone auf M1 projizieren, aber auch direkte Projektionen zu spinalen Neuronen haben. **b.** Die zerebrozerebelläre Funktionsschleife. Die efferenten Signale der Neurone der motorischen Kortex gelangen auf direktem (kortikospinaler Trakt) oder indirektem Wege (Balbus) zu den Motorneuronen im Rückenmark. Eine Kopie dieser efferenten, motorischen Kommandos wird über die pontinen Kerne zum Kleinhirnkortex geleitet. Das Kleinhirn wiederum schickt efferente Signale über die tiefen Kleinhirnerne (z.B. N. dentatus) vornehmlich an M1 und PM, aber auch an Regionen im Temporallappen sowie im präfrontalen Kortex bzw. Assoziationskortex (Konczak, 2006, 627). . . . . 94
- 5.11 Schematische Darstellung der wichtigsten afferenten (A) und efferenten (B) Bahnen, Umschaltkerne und Projektionsgebiete der zentralen Hörbahn (Steinberg, 2005). . . . . 95

5.13 In seiner „*internal-external control hypothesis*“ unterscheidet Goldberg (1985) zwei unterschiedliche Verarbeitungswege der Bewegungskontrolle. Bei der sog. externen Verarbeitungsschleife („*External loop*“) wird die Ausführung von Bewegungen vor allem durch (sensorische) Informationen von Außen geführt, während bei der internen Verarbeitungsschleife („*Internal loop*“) überwiegend interne Informationen zur Bewegungskontrolle verwendet werden. Die externe Verarbeitungsschleife, welche unter anderem das Cerebellum, den parietalen Kortex und den lateralen prämotorischen Kortex beinhaltet, dominiert während der Ausführung extern geführter Bewegungen. Die interne Verarbeitungsschleife, welche vor allem den präfrontalen Kortex, die Basalganglien und die supplementär-motorische Area (SMA) einbezieht, dominiert während der Ausführung selbstgeführter und gut gelernter Bewegungen (Gazzaniga et al., 2002, 471). . . . . 96

6.1 Auditive Wahrnehmung mit anknüpfender Informationsverarbeitung: Eingehende Signale werden zunächst auf einer ersten Ebene der Stimulus-Erkennung Mustererkennungsprozessen unterzogen (psychophysische Konfiguration). Auf einer nächst höheren Ebene der kognitiven Verarbeitung werden die eingehenden Informationen in parallel ablaufenden Prozeduren beurteilt, analysiert und auf ihre Relevanz geprüft (s. „Beurteilung“, „Verstehen“ und „Relevanz“). Eine darüber liegende Ebene der zentralen Steuerung (Exekutive Funktionen) übernimmt bewusste Entscheidungen über die Priorität und Angemessenheit verarbeiteter Informationen zur Koordination einer möglichen/resultierenden Handlungsplanung und -steuerung (nach Pribram, 1991 und Bruhn, 1997, 2000a modifiziert). . . . . 99

6.2 Stationen beteiligter Ebenen der Handlungs- und Bewegungskontrolle: Willkürliche Bewegungen werden zunächst auf der Ebene der zentralen Steuerung (Exekutive) geplant, wobei die generierten Bewegungsimpulse anschließend an die Bereiche der motorischen Kontrolle weitergeleitet werden. . . . . 101

6.3 Kreislauf von Wahrnehmung und Handlung: Das ursprüngliche Modell nach Pribram (1991) wurde an dieser Stelle durch die Komponenten „Planung & Programmierung“ und „Motorische Kontrolle“ ergänzt. . . . . 102

6.4 Explizite Timing-Kontrolle: Durch propriozeptionelles und exterozeptives Feedback (in Form eines inneren und eines äußeren Regelkreises) in Kombination mit einer Referenz-Komponente zur expliziten Antizipation anvisierter Zustände und Ziele wird die explizite Timing-Kontrolle gewährleistet. . . . . 103

6.5	Präattentive Rhythmusverarbeitung: Zusätzlich zur bewusstseinsfähigen kognitiven Verarbeitung der expliziten Timing-Kontrolle (hier grau dargestellt) verläuft eine direkte und sehr schnelle Verbindung (Auslöser) auf subkortikaler Ebene von der Stimulus-Erkennung zum Kontrollzentrum für die Motorik. . . . .	105
6.6	Das integrative Zwei-Wege-Modell der Rhythmusverarbeitung . . .	106
7.1	Architektur von FTAP: Die Buchstaben 'M', 'K' und 'F' geben an, woher das Signal kommt; alle Signale werden in einer gemeinsamen Text-Datei (ASCII) gesammelt und gespeichert (nach Finney, 2001, 67). . . . .	115
7.2	Technischer Versuchsaufbau I: Vom PD-8 Dual Trigger Pad gehen die Signale über den Trigger-to-MIDI-Converter direkt in den Computer, während die vom Computer ausgehenden MIDI-Signale in den Soundgenerator des HPD-15 HandSonic geschickt werden, welches die Stimulus- und Feedbacksounds an die angeschlossenen Kopfhörer weitergeben. . . . .	116
7.3	Soundanalyse der HPD15 HandSonic Presets: P02 AFRICAN, 07 Log Drum (high). . . . .	117
7.4	Einzelanalyse des HPD15 HandSonic Presets: P02 AFRICAN, 07 Log Drum (high). . . . .	117
7.5	Technischer Versuchsaufbau II: Vom PD-8 Dual Trigger Pad werden die Signale über den Trigger-to-MIDI-Converter direkt an das Programm FTAP geschickt. Als eine Art zentrale Steuerungsinstanz übernimmt FTAP die Koordination aller ein- und ausgehenden MIDI-Signale. Alle ausgehenden MIDI-Signale werden im Zuge dessen direkt an den Soundgenerator des HPD-15 HandSonic weitergeleitet. . . . .	118
7.6	Versuchsplan: In der ersten Session (A) wird vor dem Hauptexperiment ein Pretest zur Ermittlung der Wortspanne durchgeführt. Danach folgt ein Block mit 18 Durchläufen, der in Session B erneut (mit anderen/neuen Wörtern für die Zweitaufgabe) durchgeführt wird.	119
7.7	Block mit 18 Tapping-Durchläufen: Die ersten 3 Durchläufe sind jeweils vorab in randomisierter Reihenfolge ohne Dual-Task-Bedingungen zu absolvieren. Die nachfolgenden 15 Durchläufe gliedern sich in Teil I und II und sind ebenfalls in randomisierter Reihenfolge zu absolvieren. Teil I beinhaltet die Durchläufe ohne Einblendung von Wörtern und die Durchläufe, bei denen für 3 Sekunden vor dem jeweiligen Durchlauf eine Wortliste eingeblendet wird (Dual-Task -3 s). Teil II beinhaltet diejenigen Durchläufe bei denen während des Tappings nach 30, 35 oder 40 Sekunden Wörter (Dual-Task 30 s, 35 s & 40 s) eingeblendet werden. . . . .	120

7.8 Schematische Darstellung der verschiedenen Durchläufe: Teil I beinhaltet die Durchläufe ohne Einblendung von Wörtern (Baseline) und die Durchläufe, bei denen 3 Sekunden vor dem jeweiligen Durchlauf Wörter eingeblendet werden (Concurrent). Teil II beinhaltet all die Durchläufe bei denen während des Tappings nach 30, 35 oder 40 Sekunden Wörter eingeblendet werden. Die Taps vor dem Einblenden der Wörter dienen als Baseline, während die Taps nach Beginn der Wörter-Einblendung als Concurrent betrachtet werden. . . . . 122

8.1 Mittelwerte und Standardfehler (zwischen den Durchläufen) der Asynchronien für die Tapping-Durchläufe mit IOI = 400, 500 und 600 ms unter den zwei getesteten Bedingungen Baseline (orange) und Concurrent (blau). . . . . 126

8.2 Vergleich der Mittelwerte (in ms) aller Vpn (N = 10) ohne und mit Zweitaufgabe für alle Durchläufe mit IOI = 600 ms, 500 ms und 400 ms. . . . . 130

8.3 Vergleich der Mittelwerte (in ms) aller Vpn (N = 10) ohne und mit Zweitaufgabe für alle Durchläufe mit IOI = 600 ms, 500 ms und 400 ms. . . . . 131

8.4 Vergleich der Varianzen (in ms<sup>2</sup>) aller Vpn (N = 10) ohne und mit Zweitaufgabe für alle Durchläufe mit IOI = 600 ms, 500 ms und 400 ms. . . . . 132

8.5 Vergleich der Varianzen (in ms<sup>2</sup>) aller Vpn (N = 10) mit und ohne Zweitaufgabe für alle Durchläufe mit IOI = 600 ms, 500 ms und 400 ms. . . . . 133

8.6 Grafische Darstellung der Mittelwerte für die Konditionen Baseline und Concurrent bei IOI = 400, 500 und 600 ms der Vpn 1-10 (Teil II) zusammengefasst. . . . . 146

9.1 Grafische Darstellung der Mittelwerte für die Bedingungen ohne Zweitaufgabe (Baseline) und mit Zweitaufgabe (Concurrent) aus den verschiedenen Durchläufen aller Vpn mit IOI = 400 ms, 500 ms und 600 ms (Session A & B zusammengefasst). . . . . 150

9.2 Grafische Darstellung des zeitlichen Verlaufs (von links nach rechts) der Mittelwerte vor dem Einblenden der Wörter (ohne Zweitaufgabe = grau) und nachher (mit Zweitaufgabe = schwarz) aller Vpn aus den Durchläufen mit IOI = 400 ms. . . . . 151

9.3 Grafische Darstellung des zeitlichen Verlaufs (von links nach rechts) der Mittelwerte vor dem Einblenden der Wörter (ohne Zweitaufgabe = grau) und nachher (mit Zweitaufgabe = schwarz) aller Vpn aus den Durchläufen mit IOI = 500 ms. . . . . 152

9.4	Grafische Darstellung des zeitlichen Verlaufs (von links nach rechts) der Mittelwerte vor dem Einblenden der Wörter (ohne Zweitaufgabe = grau) und nachher (mit Zweitaufgabe = schwarz) aller Vpn aus den Durchläufen mit IOI = 600 ms. . . . .	153
9.5	Grafische Darstellung der Mittelwerte für die Konditionen Baseline und Concurrent bei IOI = 400, 500 und 600 ms (Teil II) von Vpn 1-10 zusammengefasst. . . . .	159
9.6	MANOVA (repeated measures) über alle IOI und Vpn. . . . .	171
9.7	MANOVA (for repeated measures) über alle Durchläufe (Vpn 1-10) mit IOI = 400 ms. . . . .	172
9.8	MANOVA (repeated measures) über alle Durchläufe (Vpn 1-10) mit IOI = 500 ms. . . . .	173
9.9	MANOVA (repeated measures) über alle Durchläufe (Vpn 1-10) mit IOI = 600 ms. . . . .	174
A.1	FTAP-Steuerungsdatei für die Versuchsdurchläufe mit MSPB bzw. IOI = 400 ms. . . . .	221
A.2	FTAP-Steuerungsdatei für die Versuchsdurchläufe mit MSPB bzw. IOI = 500 ms. . . . .	222
A.3	FTAP-Steuerungsdatei für die Versuchsdurchläufe mit MSPB bzw. IOI = 600 ms. . . . .	222
B.1	Verwendete Wörter für den Wortspannen-Test. . . . .	223
B.2	Verwendete Wörter für die Zweitaufgabe der Durchläufe aus dem ersten Block (Session A). . . . .	224
B.3	Verwendete Wörter für die Zweitaufgabe der Durchläufe aus dem zweiten Block (Session B). . . . .	225