

---

# Zeitwahrnehmung in isochronen Sequenzen:

Ein Vergleich verschiedener Modelle zum Einfluss des  
Kontextes auf die Wahrnehmungsleistung

Dissertation  
zur Erlangung des mathematisch-  
naturwissenschaftlichen Doktorgrades  
"Doctor rerum naturalium"  
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von  
Stefan Blaschke  
aus Karlshafen

Göttingen 2009

---

D7

Referent: Prof. Dr. Thomas Rammsayer

1. Koreferent: PD. Dr. Henning Gibbons

2. Koreferent: Prof. Dr. Hans-Henning Schulze

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Juli 2009

---

Für alle Menschen guten Herzens

## Vorwort

Die Zeit stellt eines der wichtigsten Dinge in unserem Leben dar. Wäre ein Leben ohne Zeit überhaupt möglich? Gäbe es keine Zeit, gäbe es keine Entwicklung. Selbst wenn es ein Sein gäbe ohne Zeit, was wäre das dann für ein Sein? Zeitloses Sein? Wäre dieses Sein dann ewig oder ist ewig nicht auch schon ein zeitliche Qualifikation, die es ohne Zeit gar nicht geben könnte? Unser Denken und unsere Erfahrungen sind gebunden an die Zeit und den Raum, sagt Immanuel Kant. Einstein geht in seiner Relativitätstheorie davon aus, dass Raum und Zeit nicht zwei unabhängige Größen sind, sondern sich beeinflussen („Krümmung der Zeit durch den Raum“). Die Zeit fordert alle heraus, Physiker, Philosophen, Theologen, Biologen, Psychologen, eigentlich jede wissenschaftliche Disziplin befasst sich mit der Zeit. Auch und gerade im Alltag außerhalb des wissenschaftlichen Bereichs, in denen ja manchmal doch eigene Gesetzmäßigkeiten gelten, spielt Zeit eine enorm wichtige Rolle, da wir alle unser Leben in der Zeit bestreiten müssen. Wir werden erwachsen und organisieren unser Leben in der Zeit, bis der Zeitpunkt gekommen ist, wo wir „das Zeitliche segnen“.

In der folgenden Arbeit wird es ebenfalls um Zeit gehen, genauer gesagt um Zeitwahrnehmung. Welche Mechanismen ermöglichen es uns, Zeit wahrzunehmen? Gerade für den Bereich der Zeitwahrnehmung von wenigen Millisekunden bis Sekunden wissen wir sehr wenig darüber, wie es uns gelingt, z.T. nur wenige Millisekunden große Unterschiede zwischen zwei Intervallen zu erkennen.

Mit dieser Arbeit möchte ich einen kleinen Beitrag dazu leisten, diesen Mechanismen etwas mehr auf die Spur zu kommen. Warum es wichtig ist, sich mit diesem Problem zu beschäftigen, wurde ich oft gefragt: Und was kann man damit anfangen? Einen direkten Anwendungsbezug hat diese Arbeit nicht. Z.T. werden Zusammenhänge zwischen Lese-Rechtschreib-Problemen oder auch Intelligenz gesehen. Dementsprechend können Ergebnisse möglicherweise für eine verbesserte Diagnostik eingesetzt werden. Dies war für mich jedoch nicht das Hauptmotiv, mich mit dem Thema zu beschäftigen. Mir macht es grundsätzlich Freude, Dinge besser verstehen zu lernen und nach Wegen und Mitteln zu suchen, Dinge in Erfahrung zu bringen. Die kognitive Psychologie stellt dabei für mich einen äußerst interessanten Weg dar. Es ist eine große Herausforderung, sich den Mechanismen der Wahrnehmung über Verhaltensexperimente zu nähern. Allein über die

Wahrnehmungsleistung von Menschen, unter verschiedenen Bedingungen, Rückschlüsse auf die dahinter liegenden Mechanismen zu ziehen zu versuchen, ist sehr spannend. „Auf den Geschmack“ gebracht hat mich Prof. Rolf Ulrich, der mich damals schon in Zeiten meines Grundstudiums durch seine eigene Arbeit für die Zeitwahrnehmung begeistert hat. Ihm verdanke ich inhaltlich und methodisch sehr viel durch seine dezidiert theoriegeleitete Vorgehensweise, die er mir vermittelt hat. Von daher gebührt ihm zuerst großer Dank auch im Bezug auf diese Arbeit.

Danken möchte ich auch Prof. Thomas Rammsayer und Dr. Michael Herrmann, die es mir ermöglicht haben, diese Arbeit im Rahmen meiner Anstellung am Bernstein Center for Computational Neuroscience anzufertigen. Sie haben mir extrem viel Freiheit gelassen bei der Planung, Durchführung und Auswertung bis hin zur Ergebnispräsentation.

Großer Dank gebührt auch Joachim Hass, der mir mit seinen z.T. grundsätzlichen Anfragen zu den diskutierten psychologischen Modellen neue Blickwinkel eröffnet und mich durch seine Anfragen dazu motiviert hat, meine bisherige Sichtweise auf die Modelle nochmals näher zu spezifizieren und zu überdenken. Er hat mir durch unsere Gespräche auch geholfen, Zugang zur Computational Neuroscience Forschung zu finden. Die Wichtigkeit von Simulationen von Modellen ist mir durch die Zusammenarbeit mit ihm deutlich bewusst geworden, da man für Simulationen sehr konkret einzelne Verarbeitungsprozesse und Stufen durchdenken muss.

Danken möchte ich auch meinen anderen Kolleginnen und Kollegen, Anne Armbrrecht, Anna-Sophia Fritzsche, Henning Gibbons, Stefanie Grabianowski, Nadine Helmbold, Christina Petras und Jutta Stahl für den tollen kollegialen Rahmen, der sehr viel dazu beigetragen hat, sich jeden Tag auf die Arbeit im Institut zu freuen. Sie standen mir immer gerne mit Rat und Tat zur Seite, wenn ich Fragen hatte.

Auch möchte ich Sophia Rossig und Sven Ritzkowski für ihre Anfragen und Anmerkungen zu den Modellen und zu Diskussionen über methodische Fragen und Ergebnissen im Rahmen ihrer Diplom- bzw. Bachelorarbeit danken, wie auch dafür, dass sie mir dabei geholfen haben, Daten zu sammeln.

Den Mitgliedern der Prüfungskommission, insbesondere den Nebenfachprüfern Prof. Stülke (Mikrobiologie) und Prof. Mühlenberg (Naturschutz), danke ich für ihre Bereitschaft, mich zu prüfen. Ganz besonderer Dank gilt darüber hinaus den Gutachtern für die Erstellung des Gutachtens zu dieser Arbeit.

Eigentlich muss ich hier auch noch meiner Familie, inklusive Elisabeth, Danke sagen. Aber so ein großes „Danke“ kann man nicht in Worte fassen. Ich werde es daher auch nicht mal ansatzweise probieren.

Göttingen 2009



---

<b>2. Experimentelle Prüfung der Fragestellung</b>	<b>39</b>
2.1. Experiment 1: Einfluss der Anzahl präsentierter Standarddauern auf die Wahrnehmungsleistung eines folgenden Vergleichsreizes	39
2.1.1. Methode	40
2.1.2. Ergebnisse	45
2.1.3. Diskussion	46
2.2. Experiment 2: Einfluss der ISI-Dauer auf die Wahrnehmungsleistung	51
2.2.1. Methode	59
2.2.2. Ergebnisse	60
2.2.3. Diskussion	63
2.3. Experiment 3: Einfluss der Anzahl an Intervallen in der Sequenz auf die Wahrnehmungsleistung	66
2.3.1. Methode	70
2.3.2. Ergebnisse	70
2.3.3. Diskussion	74
2.4. Experiment 4: Endeffekt verursacht durch eine ungerade Anzahl an Intervallen?	78
2.4.1. Methode	80
2.4.2. Ergebnisse	81
2.4.3. Diskussion	83
2.5. Experiment 5: Geblockte (versus randomisierte) Präsentation von SI-Dauern bei ISIs von 125 ms	85
2.5.1. Methode	87
2.5.2. Ergebnisse	88
2.5.3. Diskussion	93
2.6. Experiment 6: Replizierbarkeit von ISI-Nulleffekten und Effekten des Präsentationsmodus bei ISIs, die der SI-Dauer entsprechen?	98
2.6.1. Methode	101
2.6.2. Ergebnisse	102
2.6.3. Diskussion	109
2.7. Zusammenfassung der Effekte von SI-Dauer, Position des VI, ISI-Dauer und Präsentationsmodus über die Experimente 1-2 und 5-6	113
2.8. Experiment 7: Erklärung der beobachteten Effekte durch Veränderungen des PSE oder/und DL?	118



2.8.1. Methode	122
2.8.2. Ergebnisse	124
2.8.3. Diskussion	131
<b>3. Allgemeine Diskussion</b>	<b>140</b>
3.1. Diskussion einzelner zentraler Effekte dieser Arbeit	141
3.1.1. Einfluss mehrfacher Standarddauerpräsentationen: Impulsgeber-Zähler-Modell vs. Dynamic-Attending-Theorie und Multiple-Look-Modell (Experimente 1-7)	141
3.1.2. Einfluss der ISI-Dauer auf die Wahrnehmungsleistung: Dynamic-Attending-Theorie vs. Multiple-Look-Modell (Experiment 1 vs. 2 & 5 vs. 6; 7)	142
3.1.3. Effekt der Anzahl an Intervallen in der Sequenz auf die Wahrnehmungsleistung: Endeffekt Kapazitäts- oder Zeitlimitationseffekt? (Experimente 3-4)	144
3.1.4. Effekt der Standarddauer und Anzahl an Intervallen auf die Sequenzlänge: holistische vs. analytische Verarbeitung (Experimente 1-2 vs. 3-4)	145
3.1.5. Effekt einer geraden Anzahl an Intervallen auf die Wahrnehmungsleistung: Endeffekt Problem eines paarweisen Vergleichs? (Experiment 4)	146
3.1.6. Einfluss einer geblockten und einer randomisierten Präsentation von SI-Dauern auf die Wahrnehmungsleistung: Übertragungseffekt zwischen Durchgängen und Etablierung einer Langzeitrepräsentation über mehrere Durchgänge hinweg (Experimente 1 vs. 6 und 2 vs. 5)	146
3.2. Offene Fragen und Probleme	149
3.2.1. Extrem schlechte Wahrnehmungsleistung	149
3.2.1.1. <i>Randomisierte vs. geblockte Darbietung von Standarddauern</i>	152
3.2.1.2. <i>Anzahl an Vergleichsreizen/abweichenden Intervallen</i>	152
3.2.1.3. <i>Verteilung der Vergleichsreize (Positionierung der VI relativ zur SI-Dauer, Spanne und Dichte der verwendeten Dauern)</i>	153
3.2.1.4. <i>Reizmaterial gefüllte vs. leere Intervalle</i>	155
3.2.1.5. <i>Einfluss der ISI-Dauer auf die Wahrnehmungsleistung</i>	156

---

3.2.1.6. <i>Einfluss der Aufmerksamkeit</i>	161
3.2.2. Endeffekt	164
3.2.3. „Paarvergleichsaufgabe“ in Experiment 4 nicht vergleichbar mit klassischer Paarvergleichsaufgabe?	165
3.3. Tatsächlich die innere Uhr erforscht oder nicht?	168
3.3.1. Erzählen die Gedächtniseffekte etwas über die innere Uhr?	168
3.3.2. Erzählen die Aufmerksamkeitseffekte etwas über die innere Uhr?	170
3.3.3. Genuin zeitspezifische Entdeckungen	171
3.4. Bedeutung der behavioralen Befunde für die Erforschung der biologischen Prozesse der Zeitwahrnehmung	172
3.4.1. Bedeutung für biologische Untersuchungsmethoden	172
3.4.2. Eine oder mehrere Uhren?	173
3.4.3. Beteiligung oszillatorischer Prozesse bei der Verarbeitung zeitlicher Informationen grundsätzlich ausgeschlossen?	175
3.4.4. Ist die „CNV“ von Pfeuty, et al. (2003) ein neurophysiologisches Korrelat für das ermittelte Leistungsprofil der Experimente 1-7 dieser Arbeit?	175
3.5. Abschließende Beurteilung des Sequenzparadigmas	178
3.5.1. Vorteile des Sequenzparadigmas gegenüber der Paarvergleichsaufgabe	178
3.5.2. Ökologische Validität des Sequenzparadigmas	179
3.6. Fazit	180
<b>4. Zusammenfassung</b>	<b>182</b>
<b>5. Literaturverzeichnis</b>	<b>184</b>
Lebenslauf	

## Allgemeine Einleitung: Überblick zum Aufbau und zu Zielen dieser Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, mehr über die Mechanismen zu erfahren, die es uns ermöglichen, Zeitunterschiede von z.T. nur wenigen Millisekunden zu erkennen. Auch wenn die Erforschung der Zeitwahrnehmung bereits auf eine fast 150-jährige Geschichte zurückblicken kann (erste experimentelle Untersuchungen wurden z.B. von Höring, 1864, und Mach, 1865, durchgeführt), so ist uns die Funktionsweise der inneren Uhr, mit der wir Zeitdauern im Bereich von Millisekunden und Sekunden abschätzen, bis heute noch immer nicht genau bekannt. Das auch heute noch am meisten diskutierte Modell innerhalb der psychologischen Zeitwahrnehmungsforschung ist das Impulsgeber-Zähler-Modell von Creelman (1962), dessen Vorhersagen sich vielfach mit empirischen Beobachtungen decken (Grondin, 2005). Allerdings wurde es auch vielfach kritisiert, da es sich um ein Modell handelt, bei dem Zeitdauern, ähnlich wie bei einer mechanischen Uhr, unabhängig voneinander verarbeitet und dementsprechend Einflüsse eines zeitlichen Kontexts ausgeschlossen werden. Mit der Dynamic-Attending-Theorie stellten Barnes und Jones (2000) dem Impulsgeber-Zähler-Modell von Creelman ein sehr kontextsensitives Modell gegenüber. Es geht davon aus, dass die Wahrnehmung von Zeitintervallen die Verarbeitung nachfolgender Intervalle beeinflusst. Diese beiden konzeptionell verschiedenen Modelle stellen daher eine gute Ansatzmöglichkeit für eine empirische Überprüfung ihrer unterschiedlichen Vorhersagen zum Einfluss eines zeitlichen Kontexts auf die Zeitwahrnehmung dar. Der Vergleich beider Modelle ermöglicht es, sich den Mechanismen der Zeitwahrnehmung zu nähern und sie zu spezifizieren.

Bevor man sich mit der Erforschung der Wahrnehmung von etwas beschäftigt, sollte man sich zunächst um eine nähere Beschreibung dessen bemühen, was wahrgenommen werden soll. Es macht kaum Sinn, über die Wahrnehmung eines roten Kreises zu reden, ohne sich über das Sein eines Kreises und sein Rot Gedanken gemacht zu haben. Daher soll auch im ersten Abschnitt dieser Arbeit das Sein der Zeit Thema sein. Wie sehr Zeit und Zeit Erfahrung zusammenhängen, zeigen die philosophischen Überlegungen des Aurelius Augustinus zum Sein der Zeit sowie Immanuel Kants (1781) Überlegungen zu den Erkenntnismöglichkeiten durch Erfahrung und Denken.

Auch wenn eine Definition des Seins der Zeit unmöglich erscheint, werde ich in einem weiteren Abschnitt versuchen aufzuzeigen, wie es der Mensch trotzdem geschafft hat, mit Zeit sehr gut umgehen zu können, indem er Zeit messbar macht und in definierte Einheiten zerlegt. Um die eigentliche Fragestellung nach den der Zeitwahrnehmung zugrunde liegenden Mechanismen näher spezifizieren zu können, werde ich in einem weiteren Abschnitt eine Unterteilung der Zeitskala vorstellen, auf die sich Zeitwahrnehmung für den Menschen im Wesentlichen beschränkt. Diese wird auch von vielen anderen Autoren verwendet (z.B. Buhusi & Meck, 2005). Die Einteilung der Zeitskala wird dabei anhand bereits entdeckter und vermuteter biologischer Uhrmechanismen erfolgen, über deren Erforschung ich jeweils kurz berichten werde.

Die Lokalisation einer inneren Uhr im Gehirn, die für die Wahrnehmung von Intervallen im Bereich von wenigen Millisekunden bis Sekunden tickt, erweist sich trotz z.T. enormen methodischen und technischen Aufwands durch z.B. Bildgebende Verfahren als schwierig. Da sich zudem die Funktion der inneren Uhr nicht aus der Lokalisation im Gehirn direkt ableiten lässt, soll in dieser Arbeit versucht werden, mit Hilfe psychophysischer Methoden mehr über die Funktionsweise der inneren Uhr in Erfahrung zu bringen.

Neben dem Impulsgeber-Zähler-Modell und der Dynamic-Attending-Theorie werde ich zunächst auch das Multiple-Look-Modell von Drake und Botte (1993) vorstellen, da es eine gute Möglichkeit bietet, die Eigenschaften der beiden anderen Modelle zu integrieren. In einem kurzen Überblick werde ich dann über Ergebnisse bisheriger behavioraler Untersuchungen zum Einfluss der Verarbeitung vorausgehender Zeitintervalle auf die folgenden Intervalle berichten. Danach werde ich in dem experimentellen Teil dieser Arbeit die eigenen Experimente und ihre Ergebnisse vorstellen. Die Ergebnisse von insgesamt sieben Experimenten, über die ich ausführlich berichten werde, befinden sich im Einklang mit den Vorhersagen des Multiple-Look-Modells und widersprechen denen des Impulsgeber-Zähler-Modells sowie der Dynamic-Attending-Theorie. Abschließend werde ich die Ergebnisse dieser Studie im Hinblick auf andere Studien und biologische Modelle im Abschnitt „Allgemeine Diskussion“ näher erörtern.

## 1. Einleitung

### 1.1. Zeit als ein unbegreifliches und variables Phänomen

Zeit ist eine der bestimmenden Dimensionen jeglichen Lebens und prägt nicht nur Lebewesen (z.B. durch Altern) sondern auch unbelebte Materie (z.B. durch Verwitterung). Dementsprechend verwundert es auch nicht, dass sich die Menschen seit Urzeiten Gedanken über die Zeit machten. Stumme, aber durchaus eindrucksvolle Zeugen davon sind z.B. die Steininformationen von Stonehenge im Süden Englands. Sie entstanden vermutlich um 3000 v. Chr. und dienten zur Vorhersage von Sommer- und Wintersonnenwende. Aber auch in der Literatur finden sich frühe und z.T. detaillierte Überlegungen zur Zeit. In der abendländischen Literatur ist hier vor allem ein Abschnitt aus den „Confessiones“ des Aurelius Augustinus, Bischof von Hippo um 400 n. Chr., zu nennen. Augustinus philosophiert über das Sein von Zeit und versucht sich diesem quasi per Introspektion zu nähern. Ihm zufolge erleben wir Zeit nicht als etwas konkret Fassbares, sondern nur als etwas, das schon vergangen ist oder aber erst noch werden wird. Die Vergangenheit ist dadurch gekennzeichnet, dass sie schon war, also nicht mehr ist. Zukunft ist das, was noch sein wird und somit auch noch kein Sein hat. Die Gegenwart, die ist, ist in dem Moment, in dem man sie zu erfassen glaubt, auch schon wieder Vergangenheit und ist dementsprechend bereits nicht mehr. Das Sein der Zeit besteht für Augustinus (wenn überhaupt) nur in diesem flüchtigen Moment des Jetzt, der sofort wieder vergeht. Man kann Zeit nicht aufhalten oder sie beeinflussen. Sie ist gekennzeichnet durch einen ständigen Strom des Vergehens, der durch die Abfolge von Ereignissen erfahrbar wird. Während Augustinus versuchte, sich dem Sein der Zeit durch eine Approximation über die Erfahrung zu nähern, geht Immanuel Kant davon aus, dass das Sein aller Dinge und gerade auch das Sein der Zeit weder allein durch Erfahrung (der Philosophie des Aristoteles entsprechend) noch durch den Verstand (der Philosophie des Platon entsprechend) allein zu erschließen wäre. Ihm zufolge muss man beim Interpretieren von Erfahrungen vorsichtig sein, denn die Dinge erscheinen uns nicht so, wie sie sind, sondern so, wie wir sie durch unseren Verstand wahrzunehmen vermögen (→ kopernikanische Wende der Metaphysik). Denn unsere Anschauungen sind gebunden an Prinzipien des Verstandes, die ihm *à priori* gegeben sind. Kant verweist auf zwei *à priori* gegebene Bedingungen, denen unser

Verstand unterworfen ist und denen er sich nicht entziehen kann: Dies sind für ihn Raum und Zeit. Wir können weder raum- noch zeitlos denken oder etwas erfahren, denn alles ist mit diesen beiden Dimensionen verbunden. Die Erfahrung ist niemals unmittelbar. Unsere Wahrnehmung, aber auch unser Denken, ist von vornherein geprägt durch Zeit und Raum. Und somit gehört Zeit, Kant zufolge, zu den Dingen, deren Sein wir uns weder mit dem Verstand noch durch Erfahrungen zuverlässig nähern können, da wir weder mit Hilfe der Logik noch der Empirie hinter diese (von jeder Logik und Erfahrung gegebenen) Bedingungen zurückgehen können. Insofern ist die Erschließung des Seins der Dinge nicht objektiv möglich, sondern das Sein aller Dinge ist ein Konstrukt. Konstruiert wird es aus Raum und Zeit, die dem Verstand und der Erfahrung der Dinge *à priori* gegeben sind.

Wenn sich die psychologische Forschung also dem Thema Zeit als Wissenschaft vom Erleben, Denken und Handeln des Menschen widmet, so tut sie dies nicht ontologisch, sondern phänomenologisch. Welchen Einfluss hat der Strom der Zeit auf unser Empfinden, Denken und Handeln? Ist das Erleben von Zeit etwas Gleichmäßiges, Person- oder Situationsunabhängiges? Man kann sehr schnell aufgrund seiner Alltagserfahrung feststellen, dass Zeit unterschiedlich wahrgenommen wird. Sie wird eigentlich nie als etwas erlebt, das immer in gleicher Weise wahrgenommen wird.

Ein gutes, anschauliches Beispiel für eine unterschiedliche Wahrnehmung von Zeit liefert Albert Einstein: „When a man sits with a pretty girl for an hour, it seems like a minute. But let him sit on a hot stove for a minute and it's longer than any hour. That's relativity.” (Einstein, 1938). Was Einstein hier für ein psychologisches Phänomen berichtet, veranschaulicht gut, dass Zeit nicht absolut, sondern vielmehr sehr unterschiedlich wahrgenommen wird. Anhand unserer eigenen Alltagserfahrung können wir selbst schnell feststellen, dass Zeit-Erleben sich als stark abhängig von Situationen und Personen erweist. Der jeweilige Kontext scheint einen erheblichen Einfluss auf die Zeitwahrnehmung zu haben. Anhand solcher Beispiele wird sehr schnell klar, dass wir Zeit nicht unmittelbar wahrnehmen. Zeitwahrnehmung wird geprägt durch Emotionen und Kognitionen, sie wird daher eher konstruiert als einfach nur erfahren.

## 1.2. Zeit als ein handhabbares und invariantes Phänomen

Trotz dieser großen Varianz in der Wahrnehmung von Zeitdauern muss man jedoch auch feststellen, dass Zeit für uns auch invariante und handliche Züge hat. Es stellt eine erstaunliche technische Leistung dar, dass man sich mit jemandem auf der anderen Seite des Globus verabreden und sich pünktlich auf die Sekunde genau treffen kann. Zeit ist durch eine Vielzahl von Uhren beherrschbar geworden. Wir versinken nicht in einem zeitlichen Chaos, da es uns gelungen ist, durch Uhren Zeit besser abschätzen zu können.

Dies ist nicht nur als ein Phänomen der Neuzeit zu sehen. Menschen haben bereits vor Tausenden von Jahren den Verlauf von Gestirnen beobachtet. Sie taten dies, um zukünftige Ereignisse zu antizipieren und sich darauf einstellen zu können. So kam den Jahreszeiten zu Zeiten der Jäger und Sammler eine besondere Bedeutung zu. Es war wichtig, sich auf den Winter vorzubereiten. Um wichtige Zeitpunkte zu erkennen, orientierte man sich an mehr oder weniger planmäßig wie ein Uhrwerk zyklisch auftretenden Naturereignissen (Mondphasen, Bewegung von Gestirnen, Klimaveränderungen, Tierwanderungen). Die Zeitmessung, egal ob Jahreszeiten-Uhr oder Atomuhr, zeichnet sich dadurch aus, dass regelmäßige Ereignisse beobachtet und registriert werden. So stellt die Basis einer jeden technischen Uhr ein sogenanntes Schwingsystem dar. Dieses Schwingsystem sorgt für das Auftreten zeitlich regelmäßiger Ereignisse wie z.B. die Schwingung eines Pendels. Wie viel Zeit vergangen ist, kann man so z.B. bei einer alten Standuhr an der Zahl der Schwingungen des Pendels feststellen, während moderne Uhren z.B. die Strahlenfrequenz von Elektroden freier Atome als Ereignisse nutzen, um Zeit zu messen (Atomuhren). Jeweils wird eine Anzahl regelmäßiger (normierter) Ereignisse genutzt, um festzustellen, wie viel Zeit vergangen ist. Da die Anzahl an Ereignissen, um eine Sekunde abzubilden, klar geregelt ist (9192631770 Atomschwingungen von Caesium), gelingt es uns, eine Verabredung zu einer Videokonferenz exakt auf die Sekunde genau auch mit jemandem auf der anderen Seite der Erde einzuhalten. Wichtig an einem jeden Uhrsystem ist, dass die Ereignisse, die eine Zeiteinheit abbilden, immer und überall gleich groß sind. Eine Uhr ist dann ungenau, wenn sie die Ereignisse unregelmäßig produziert und fehlerhaft summiert. Verhält sie sich aber im Bereich der definierten Parameter, kann man mit einem solchen System Zeit sehr gut abschätzen.

Aber auch ohne technische oder externe natürliche Hilfen gelingt es Menschen und Tieren, über ihre innere Uhr teilweise erstaunlich genau Zeit abzuschätzen. Lejeune und Wearden (1991) zeigen für einige Spezies (angefangen von Schildkröten über Tauben, Ratten, Katzen und Affen), wie genau Tiere allein aufgrund ihrer eigenen, inneren Uhr Zeit über mehrere Sekunden und Minuten recht genau einschätzen können. Dass dies den verschiedenen Lebewesen so gut gelingt, wird vielfach damit begründet, dass das genaue Abschätzen von Zeitdauern z.T. lebenswichtig sein kann. Habe ich noch genügend Zeit, mich auf dem Baum in Sicherheit zu bringen oder wird der Tiger vor mir dort sein? Wie lange sollte ein Greifvogel auf seinem Ansitz auf Beute warten, bevor er den Ansitz wechselt, um in ein anderes Gebiet zu fliegen, in dem mehr Nahrung vorhanden ist? Ab wann sollte er seinen Sturzflug beenden, um die Maus einerseits noch zu erwischen aber andererseits eine nicht zu heftige Landung in Kauf nehmen zu müssen? Eine gute Zeitschätzung, oft nur wenige Millisekunden betreffend, ist hier notwendig, um das Überleben zu sichern. Unterschätzt man die Zeitdauer, kommt einen dies teuer zu stehen, weil man gefressen wird oder aber verhungert. Die Erfassung von Zeit stellt somit einen bedeutsamen Punkt für Verhalten jeglicher Art dar. Bei jeder Bewegung muss nicht nur die Strecke, sondern auch die Dauer der Bewegung einkalkuliert werden, damit die Handlung ihr Ziel möglichst effizient erreicht. Dieser hohe Selektionsdruck ist vermutlich dafür verantwortlich, dass wir z.T. sehr gut mit Zeit umgehen können.

Anhand der bisher gegebenen Beispiele für Zeiterleben wird aber auch klar, dass Zeit auf unterschiedlichen Zeitskalen durchaus andere Phänomene im Erleben zeigt. Die Zeit, die ein Bussard auf seinem Ansitz auf Beute wartet, wird sich vermutlich von seinem Zeiterleben im Sturzflug auf die Beute unterscheiden. Ein allgemeines Urteil darüber zu fällen, wie Zeit verarbeitet wird, erscheint aufgrund der extremen Unterschiede zwischen den Zeitdauer-Bereichen als aussichtslos. Dementsprechend ist es sinnvoll, sich zunächst einmal einen groben Überblick über verschiedene Zeitdauerbereiche und deren Erforschung zu verschaffen.



### 1.3. Zeitskalen und ihre biologische Erforschung

Wenn Zeit unendlich lang und minimal kurz in ihrer Erstreckung sein kann, dann ist das eine extreme Spanne, die wir uns kaum vorstellen können. Im normalen Alltagsgeschehen denkt der Mensch selten über kommende oder vergangene Jahrzehnte nach. Viel eher erstreckt sich das Zeitkontinuum, in dem wir denken und Zeit erfahren, über Zeitspannen mit einer Dauer von wenigen Sekunden bis hin zu einigen Tagen. Die Verarbeitung kürzerer wie auch längerer Dauern läuft oft automatisch und unbewusst ab. So wird in der Zeitforschung oft als größte zu betrachtende Einheit die Spanne eines Tag angesehen (siehe z.B. Buhusi & Meck, 2005).

#### 1.3.1. Timing eines Tages

Die Steuerung eines Organismus im Tagesverlauf wird durch die zirkadiane Rhythmik bestimmt und kann als bereits gut erforscht angesehen werden (Darlington, et al., 1998). So hat man den suprachiasmatischen Kern (*nucleus suprachiasmaticus*, SCN) des Hypothalamus als die treibende Uhr für die Steuerung verschiedenster Systeme, wie Schlaf- und Wachrhythmus, oder Appetit, identifizieren können. Die hormonelle Steuerung des Systems wird durch Licht (Reppert & Weaver, 2002) und soziale Reize beeinflusst (Levine, Funes, Dowse, & Hall, 2002). Der SCN wirkt dabei (bei Lichteinfall) hemmend auf den paraventriculären Kern (*nucleus paraventricularis*). Er ist für die Ausschüttung des Botenstoffs Melatonin über die Zirbeldrüse (*corpus pineale*) zuständig. Durch die Abhängigkeit (z.B. von der Lichtintensität) erweist sich die zirkadiane Uhr auch als kontextabhängig und variabel, da sie sich den vorherrschenden Lichtverhältnissen anpasst. Dies hat den Vorteil, dass nach einer gewissen Übergangsphase Nachtarbeit leichter zu bewältigen ist und, wenn wir in ferne Länder reisen, sich unsere innere zirkadiane Uhr an den dort vorherrschenden Tag-Nacht-Rhythmus anpasst. Auf der anderen Seite erweist sich diese innere Uhr unter kontrollierten Bedingungen als höchst invariabel. So zeigen menschliche Zellen in einer Petrischale isoliert bei konstanten Lichtverhältnissen einen 24-Stunden-Rhythmus, der pro Tag um weniger als 1 % abweicht (Aschoff, 1984). Neben dem Rhythmus, den der SCN vorgibt, scheint es noch weitere unabhängige 24-Stunden-Rhythmen im Körper zu geben. So kann der Rhythmus von Leberzellen durch bestimmte Fütterungszeiten gegenüber

dem Rhythmus des SCN z.B. um 12 h verschoben werden (Stokkan, Yamazaki, Tei, Sakaki, & Menaker, 2001).

### 1.3.2. Timing von Mikrosekunden

Am unteren Ende der Zeitskala zu verorten ist die Zeitverarbeitung von wenigen Mikrosekunden. Zeitliche Unterschiede von weniger als 100 Mikrosekunden zwischen dem Eintreffen eines akustischen Signals am linken und rechten Ohr einer Schleiereule ermöglichen es ihr, die Schallquelle im Raum zu orten. Die zugrundeliegenden biologischen Mechanismen sind seit längerer Zeit bekannt (Jeffress, 1948). Carr und Konishi (1990) zufolge nutzen Schleiereulen sogenannte delay-line-Mechanismen, um Unterschiede im zeitlichen Eintreffen akustischer Informationen beider Ohren im Gehirn registrieren zu können. Auditive Informationen aus dem magnozellularären cochleären Kern (*nucleus magnocellularis cochlei*) werden über afferente Neurone in den laminären Kern (*nucleus laminaris*; bei Säugetieren entspricht dies der oberen Olive, *nucleus olivaris superior*) weitergeleitet. Die Informationen, die aus beiden Ohren hier ankommen, treffen zeitlich verzögert ein, wenn ein Ohr der Schallquelle mehr zugewandt ist als das andere (interaurale Zeitdifferenz). Die Neuronen des laminären Kerns sind räumlich systematisch angeordnet, sodass sie eine kortikale Karte („topological map“ ähnlich der tonotopen Karte der Cochlea oder der retinotopen Karte des seitlichen Kniehöckers, *corpus geniculatum laterale*) ergeben. Sie reagieren mit einer erhöhten Feuerrate, wenn die Signale zeitgleich bei ihnen aus beiden Ohren eintreffen und werden daher auch als Koinzidenzdetektoren bezeichnet. Ist die Schallquelle von beiden Ohren gleichweit entfernt, kommen die Signale von beiden Ohren in der Mitte der Karte zeitgleich an und die Neurone reagieren mit einer erhöhten Feuerrate. Ist die Schallquelle aber dem linken Ohr näher gewesen, so reagieren die Koinzidenzdetektoren der kortikalen Karte mit Aktionspotentialen, die eher dem rechten Ohr zugewandt liegen, da die Information aus dem rechten Ohr langsamer das ihm zugehörige Ende der kortikalen Karte erreicht und die Information aus dem linken Ohr durch die größere Nähe zur Schallquelle mehr Zeit hatte, die kortikale Karte zu durchwandern. Je nachdem, welches Neuron in der Karte eine Koinzidenz entdeckt, ergeben sich Rückschlüsse auf die Position der Schallquelle. Dieses Modell gilt vor allem für Vögel, findet sich in ähnlicher Form aber auch bei Säugetieren wieder. Bei Säugern finden sich in der auditiven Verarbeitungskette erste Hinweise

auf eine Sensitivität hinsichtlich interauraler Zeitdifferenzen der oberen Olive (Fitzpatrick, Batra, Stanford, & Kuwada, 1997). Weitergeleitet an die unteren Hügel der Vierhügelplatte (*colliculi inferiores*) und den auditorischen Thalamus erreicht die Sensitivität für interaurale Zeitdifferenzen nochmals höhere Auflösungen. Hierfür könnten zusätzliche inhibitorische Verschaltungen, die den Vögeln fehlen, verantwortlich sein (Pecka, Brand, Behrend, & Grothe, 2008).

### **1.3.3. Timing von Stunden, Minuten, Sekunden und Millisekunden**

Zwischen dem Timing von Tagen auf der einen und dem von Mikrosekunden auf der anderen Seite werden weitere Unterscheidungen der Zeitskala vorgenommen, die sich auf physiologische wie behaviorale Untersuchungsergebnisse stützen können. Die Befunde aus zahlreichen Studien, die sich um eine Lokalisierung der inneren Uhr mit Hilfe von bildgebenden Verfahren (fMRI, PET, MEG etc.) für Zeitdauern von wenigen Millisekunden bis mehreren Stunden bemühen, verweisen auf verschiedene Bereiche des Gehirns, die besonders aktiv sind, wenn derartige Aufgaben zu lösen sind. Im Gegensatz zur relativ klaren Lokalisierung der „zirkadianen Uhr“ oder der „interauralen Uhr“ wurde noch keine einzelne biologische Struktur ausfindig gemacht, die für die Zeitverarbeitung im Bereich von Millisekunden bis Stunden verantwortlich gemacht werden könnte. Die Studien unterscheiden sich z.T. stark, was die Lokalisierung der inneren Uhr angeht (siehe z.B. Matell & Meck, 2000, vs. Ivry & Keele, 1989). Das könnte daran liegen, dass im Wesentlichen nicht nur eine einzelne Region für diese Aufgabe verantwortlich ist, sondern ein Verbund verschiedener Systeme als eine große Uhr funktioniert. Dabei können die verschiedenen Regionen unterschiedliche Aufgaben erfüllen/Funktionen ausüben. D.h. man würde von einer einzigen inneren Uhr ausgehen, die aber quasi dezentralisiert arbeitet und auf verschiedene Regionen des Gehirns verteilt ist (siehe Ivry, 1996; Ivry & Spencer, 2004). Zudem könnten diese verschiedenen Systeme nicht allein für die Verarbeitung von Zeitinformationen ausgelegt, sondern die Verarbeitung von Zeit nur ein Nebenprodukt ihrer eigentlichen Aufgabe sein, z.B. Koordination von Armbewegungen (-> emergent Timing, Ivry & Spencer, 2004). Ebenso ist es möglich, dass die Zeitskala von wenigen Millisekunden bis Stunden nochmals aufzuteilen ist, da hier nochmals verschiedene Uhren für verschiedene Zeitdauerbereiche verantwortlich sein könnten. Hinweise auf die Notwendigkeit einer feineren Unterscheidung der Zeitskala liefert z.B. ein Übersichtsartikel von

Lewis und Miall (2003a). Die Autoren zeigen in ihrem Übersichtsartikel, dass durch die weitere Aufteilung der Zeitskala mit einer Unterscheidung zwischen den Bereichen über und unter einer Sekunde die z.T. widersprüchlichen Resultate verschiedener Studien kohärenter erscheinen, wenn man die Studien nach der verwendeten Zeitdauer-Diskriminations-Aufgabe ( $<$  oder  $>$  als 1 Sekunde) analysiert. Daher unterscheiden auch Buhusi und Meck (2005) ebenfalls nochmals zwischen dem sogenannten Intervall-Timing ( $>1$  Sekunde) und dem Millisekunden-Timing ( $< 1$  Sekunde). Allerdings wird durch diese Differenzierung und Analyse bei Studien, die bildgebende Verfahren einsetzen, noch keine genaue oder einheitliche Lokalisierung einer inneren Uhr für den jeweiligen Zeitdauerbereich erreicht, da erneut verschiedene Regionen des Gehirns eine erhöhte Aktivität auch bei Konstanthaltung der zu verarbeitenden Dauer aufweisen. Dementsprechend gehen viele Forscher inzwischen von einer dezentralen Struktur der inneren Uhr sowohl für das Intervall- als auch für das Millisekunden-Timing aus.

### *1.3.3.1. Intervall-Timing ( $> 1$ Sekunde)*

Als biologische Uhr des Intervall-Timings wird z.B. von Meck und verschiedenen Mitautoren vor allem ein Verbundsystem aus Kortex, Basalganglien und Thalamus verantwortlich gemacht (Buhusi & Meck, 2005; Matell & Meck, 2000; Meck & Benson, 2002). Meck geht anhand seiner Untersuchungen z.B. davon aus, dass es eine Reihe von Oszillatoren im Kortex gibt, die voneinander unabhängig jeweils ihren eigenen Zyklus (10-40 Zyklen pro Sekunde) aufweisen. Der Onset eines Reizes bewirkt einen gemeinsamen Reset aller Oszillatoren. Das Ende eines Reizes soll Meck zufolge eine verstärkte Ausschüttung des Transmitters Dopamin in der Substantia nigra (eines Teils der Basalganglien) und somit ein Auslesen des Status der Oszillatoren bewirken. Liest man die unterschiedlichen zyklischen Zustände der Oszillatoren am Ende eines Reizes aus, erhält man auf diese Weise ein typisches Muster der Oszillatorzustände für den präsentierten Reiz. Dieser ist in Abhängigkeit von der Reizdauer mit dem Onset des Reizes und der damit zunächst einhergehenden Synchronisation aller Oszillatoren entstanden. Dieses Muster aus unterschiedlichen Oszillatorzuständen wird vom Thalamus weiter neuronal enkodiert und an den Kortex weitergeleitet. Die besondere Bedeutung von Dopamin im Zusammenhang mit der Zeitwahrnehmung wurde vielfach untersucht, z.B. an Parkinson Patienten (Meck, 1996; Pastor, Artieda, Jahanshahi, & Obeso, 1992;

Rammsayer & Classen, 1997). Diese leiden an einer nicht ausreichenden Ausschüttung von Dopamin im Striatum, was dazu führt, dass die Patienten die Dauer von Ereignissen unterschätzen. Nehmen sie ihre Medikamente (z.B. Levodopa und Apomorphine), so kann man feststellen, dass dieser Bias in der Zeitwahrnehmung verschwindet. Verabreichungen von z.B. Kokain (Matell, King, & Meck, 2004) oder Metamphetaminen (Cevik, 2003) führen zu einer Überschätzung von Zeitdauern, während z.B. Haloperidol (MacDonald, & Meck, 2005) oder Raclopride (Roitman, van Dijk, Thiele, & Bernstein, 2001) zu einer Unterschätzung der Zeit führen. Ebenfalls ist zu beobachten, dass Stress (Gilbert, Dillbeck, Curran, & Little, 1977) eine Überschätzung von Zeitdauern bewirkt. Dementsprechend empfinden wir unangenehme Situationen, die uns unter Stress setzen, als zeitlich länger andauernd als Situationen, in denen wir entspannt sind.

#### 1.3.3.2. Millisekunden-Timing (< 1 Sekunde)

Während für das Intervall-Timing vor allem Kortex, Basalganglien und Thalamus verantwortlich zu sein scheinen, wird für das Millisekunden-Timing eher das Kleinhirn (*cerebellum*) in Betracht gezogen (Buhusi & Meck, 2005; Jacobson, Rokni & Yarom, 2008; Lewis & Miall, 2003b). Dem Model von Jacobson, et al. (2008) zufolge könnte ein System, bestehend aus der inferioren Olive, Neuronen der cerebellären Kerne (*nucleus dentatus*, *nucleus emboliformis*, *nucleus globosus*, *nucleus fastigii*) und des Kleinhirns für das Timing im Bereich von Millisekunden verantwortlich sein. Die Autoren gehen davon aus, dass zeitliche Ereignisse durch oszillatorische Prozesse in der inferioren Olive enkodiert werden. Wenn Zeitdauern verarbeitet werden, erzeugt der cerebellare Kortex ein Signal, das ein Auslesen oszillierender Neurone der Olive in Gang setzt. Dieses Auslesen erfolgt über Purkinjenzellen und Neuronen der cerebellären Kerne, deren Subpopulationen inhibitorisch oder exzitatorisch auf Zellen der inferioren Olive wirken. So werden Teile der inferioren Olive gehemmt, andere erregt. Da die Oszillatoren in der Olive normalerweise gekoppelt arbeiten, wird diese Koppelung durch exitatorischen Einfluss der Zellen der cerebellären Kerne teilweise gestört, sie hören auf zu oszillieren. Solange diese Störung anhält, kommt es zu einer Phasenverschiebung zwischen den Neuronen der Olive, da durch die Aktivität der inhibitorischen Zellen der cerebellären Kerne andere Zellen der inferioren Olive weiterhin oszillieren. Diese Phasenverschiebungen zwischen den gehemmt und nicht gehemmt Zellen der

Olive erzeugen (rückgemeldet über Outputneurone in die cerebellären Kerne) letztlich ein Spikeprofil, das dieses zeitliche Muster und somit die Dauer von Intervallen enkodieren kann.

#### *1.3.3.3. Kritische Betrachtung der Aufteilung in Millisekunden und Intervalltiming mittels Lokalisierung ihrer Uhren im Gehirn*

Auch wenn vielfach das Kleinhirn für das Millisekunden-Timing verantwortlich gemacht wird, so gibt es doch auch eine Reihe von Befunden, die einen Einbezug kortikaler Bereiche in diese Verarbeitung nahelegen. So fanden Haarington, Haaland und Knight (1998), dass bei Patienten mit rechtshemisphärischer Schädigung durch einen Schlaganfall die Zeitdauerdiskrimination im Millisekundenbereich (300 und 600 ms Dauern) stärker eingeschränkt ist als bei Patienten mit linkshemisphärischer Schädigung oder bei einer Kontrollgruppe. Ihnen zufolge dient vor allem der präfrontale Kortex als Gedächtnis für diese Dauern. Hingegen gehen Raymond, Lisberger und Mauk (1996) oder Koekoek, et al. (2008) davon aus, dass die Speicherung für Zeitdauern im Kleinhirn selbst stattfindet und verweisen hierzu auf Effekte der Langzeit-Depression an Purkinjezellen im Zusammenhang mit dem Augenlidreflex.

Zudem fanden Brancucci, D'Anselmo, Martello und Tommasi (2008) Hinweise auf eine linkshemisphärische Verarbeitung für Dauern im Millisekundenbereich beim dichotischen Hören und verweisen auf zahlreiche andere Studien, die ähnlich widersprüchliche Ergebnisse liefern. Dementsprechend sind nicht nur Teile des Kleinhirns für das Millisekunden-Timing verantwortlich, sondern es handelt sich vielmehr um ein dezentralisiertes Netzwerk verschiedener Regionen, das eine Uhr konstituiert.

Ebenso uneinheitliche Befunde gibt es hinsichtlich des Intervall-Timings, das eigentlich Meck (Buhusi & Meck, 2005; Matell & Meck, 2000; Meck & Benson, 2002) zufolge über den Kortex, die Basalganglien und den Thalamus verarbeitet werden sollte. Denn Malapani, Dubois, Rancurel und Gibbon (1998) zeigen, dass auch das Intervall-Timing durch Läsionen des Kleinhirns gestört wird. Dies steht im Widerspruch zu dem Uhrsystem für das Intervall-Timing von Meck, bestehend aus Kortex, Basalganglien und Thalamus, da Meck zufolge das Kleinhirn keinen Einfluss auf das Intervall-Timing System ausübt. Zudem fanden Aparicio, Diedrichsen und Ivry (2005) keine Beeinträchtigung des Intervall-Timings, als sie Patienten, die

Läsionen im Striatum aufwiesen, untersuchten. Sie argumentieren, dass möglicherweise das Striatum eine untergeordnete Rolle beim Timing spielen könnte. Die Studien an Parkinson-Patienten wären schwierig zu bewerten, da durch die Krankheit nicht nur lokal die Basalganglien betroffen sind, sondern zugleich auch andere Teile des Gehirns durch den degenerativen Prozess deutlich in Mitleidenschaft gezogen sind. Funktionsdefizite der Basalganglien könnten auch durch eine funktionelle Störung kortikaler Areale entstehen (Owen, Doyon, Dagher, Sadikot, & Evans 1998). So gibt es bis heute sehr unterschiedliche Meinungen darüber, was die Funktion und Lokalisierung einzelner Areale angeht. So werden zum einen die Basalganglien u.a. als Zeitgeber angesehen, aber auch eher mit einer nicht zeitlich spezifischen Funktion in Form eines Entscheidungs-Mechanismus in Verbindung gebracht (Ivry & Spencer 2004).

Dementsprechend ist letztlich auch bis heute unklar, inwieweit eine Identifikation verschiedener Zeitdauersysteme (spezifisch für Zeitdauerbereiche unter oder über einer Dauer von Sekunden) durch unterschiedliche Lokalisierungen im Kortex möglich ist. Lewis und Miall (2003a) versuchten, neben dem Kriterium des Zeitdauerbereichs (Intervall- oder Millisekunden- Timing) weitere Merkmale von Zeitwahrnehmungsaufgaben zu identifizieren, die die unterschiedlichen Befunde hinsichtlich der Lokalisierung der inneren Uhr besser erklären könnten. Möglicherweise ist nicht nur die Zeitdauer der zu bearbeitenden Intervalle entscheidend dafür, welche Bereiche des Gehirns aktiviert sind, sondern auch, ob die Aufgabe, die in den Experimenten zu lösen war, eine präzise zeitliche motorische Reaktion erforderte oder sie eine rein perzeptuelle Aufgabe war. Weiterhin nennen Lewis und Miall (2003a) als einen bedeutsamen Faktor der Aufgabe, ob die Beurteilung der präsentierten Intervalle zeitlich diskret (wie z.B. bei einer Paarvergleichsaufgabe) oder eher kontinuierlich/automatisch (z.B. Mitklopfen eines Taktes) war. Aber auch diese noch weiter diversifizierte Sichtweise rundet das Bild nicht eindeutig ab, da es nicht ohne weiterhin bestehende widersprüchliche Ergebnisse auskommt. In einer ihrer eigenen Arbeiten z.B. gehen Lewis und Miall (2002) der Frage nach, ob sich automatische Bewegungen, wie z.B. Mitklopfen eines Rhythmus, von nicht-automatischen Bewegungen unterscheiden. Sie stellten fest, dass nicht ausschließlich der prämotorische Kortex sowie das Kleinhirn bei der Verarbeitung automatischer Bewegungen aktiv sind, sondern auch Areale, die eher mit einer nicht motorischen, diskreten Zeitverarbeitung zu tun haben sollten. Ebenso

ist festzustellen, dass Areale wie der dorsolaterale präfrontale Kortex (DLPFC), der für sensorische und diskrete Verarbeitung zuständig sein sollte, auch bei motorischen Aufgaben aktiv ist. Ivry und Keele (1989) stellten bereits fest, dass bei einer Schädigung des Kleinhirns nicht nur das Mitklopfen eines Rhythmus gestört ist, sondern auch die rein perzeptuelle Zeitverarbeitung. Eine strikte Trennung sensorischer oder motorischer, kontinuierlicher oder diskreter, Sekunden oder Millisekunden betreffender Zeitdaueraufgaben und entsprechender Uhren scheint dementsprechend schwierig. Dementsprechend werden z.T. auch Hybridsysteme diskutiert, die Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen den Aufgaben und Ergebnissen erklären sollen (Gibbon, Malapani, Dale, & Gallistel, 1997).

#### **1.3.4. Fazit zu den biologischen Ansätzen des Intervall- und Millisekunden-Timings**

Eine Vielzahl von Strukturen, die für die Zeitwahrnehmung im Bereich von Millisekunden bis mehreren Sekunden zuständig sein sollen, wird diskutiert. Die Befunde sind trotz der zahlreichen Studien widersprüchlich und lassen sich bis jetzt auch allein durch Unterschiede in den verwendeten Aufgaben nicht vereinheitlichen oder erklären. Die Frage ist, ob man durch eine weitere Aufteilung und Differenzierung der Aufgaben, z.B. in weitere Zeitdauerbereiche (etwa einer weiteren Unterscheidung des Millisekunden-Timings bei 500 ms; Drake & Botte, 1993; Gibbon, et al., 1997; Michon, 1985; Rammsayer, 1999) und einer feineren Unterscheidung zwischen verschiedenen Aufgabentypen eine weitere Vereinheitlichung der derzeit noch z.T. widersprüchlichen Befunde erreichen wird. U.U. werden dadurch noch viel spezialisiertere und voneinander unabhängige innere Uhren zu erkennen sein. Insgesamt lassen sich die bisherigen Befunde aus Studien mit bildgebenden Verfahren aufgrund ihrer Diversität (aber auch ihrer Gemeinsamkeiten in ihren Ergebnissen hinsichtlich gleicher wie verschiedener Aufgaben) sowohl als Hinweis auf verschiedene Uhren als auch eine einzeln verteilte Uhrenstruktur hin interpretieren. Um die Frage nach der Lokalisation einer oder mehrerer innerer Uhren klären zu können, wird es erforderlich sein, eine ganze Reihe von weiteren Untersuchungen durchzuführen. Dabei scheint eine weitere Systematisierung der jeweils zeitlichen Aufgabe(n) sowie einer passenden Vergleichsaufgabe unerlässlich zu sein. Ein großes Problem der Erforschung von Zeitverarbeitungsmechanismen im Millisekunden- und Sekundenbereich ist meiner



Meinung nach, dass man noch viel zu wenig über Effekte, die unterschiedliche Zeitwahrnehmungsaufgaben auslösen, versteht. Auf der Suche nach der steuernden Uhr werden oft Gedächtnis und Entscheidungsprozesse, die ebenfalls beteiligt sind, außer Acht gelassen oder zuwenig berücksichtigt (Wearden, 1999; 2004). Dies macht die Interpretation der Aufgaben, gerade auch in Bezug auf die Ergebnisse aus bildgebenden Verfahren, schwierig. Zudem gilt es bei der Interpretation der Ergebnisse aus bildgebenden Verfahren die jeweilige technische Limitation zu berücksichtigen. Zwar verfügen fMRI-Scanner inzwischen über eine sehr hohe räumliche Auflösung (Voxelgrößen  $\leq 1 \text{ mm}^3$ ), jedoch ist die zeitliche Auflösung sehr gering, da ein Scan größerer Areale z.T. mehrere Sekunden andauern kann (Hinton, 2003; Vul, Harris, Winkielman, & Pashler, im Druck). Für die Analyse von Zeitdauern ist die zeitliche Auflösung allerdings sehr wichtig, da sich Unterschiede in der Zeitdauer auch in den neuronalen Prozessen widerspiegeln. Wenn kurze Dauern eine geringere neuronale Erregung verursachen als lange Dauern, was z.B. EEG Analysen nahelegen (Bendixen, Grimm, & Schröger, 2005; Macar & Vidal, 2003; Pouthas, 2000), dann sind diese bei einer zu groben Auflösung schwerer zu erfassen als längere Dauern (siehe hierzu auch Heeger & Rees, 2002). Nicht nur die zeitliche Auflösung des fMRIs ist begrenzt, die physiologischen Reaktionen erfolgen zeitverzögert (ein messtechnisch geringes Problem) und sind nicht konstant. D.h. es kommt z.T. zu einer zeitlichen Variabilität von ca. 2 sec beim Anstieg und Abfall des BOLD-Signals (Hinton, 2003). Das kann für die Messung und Mittelung über verschiedene Versuchspersonen zu weiteren Ungenauigkeiten führen. MEG-Studien, die über eine zeitlich deutlich exaktere Auflösung verfügen, sind bislang jedoch noch selten (N'Diaye, Ragot, Garnero, & Pouthas, 2004; Hairston & Nagarajan, 2006) und teilen sich mit den fMRI-Studien ebenfalls das Problem, dass der Ort, an dem Zeitverarbeitung sich ereignet, nicht auch gleichzeitig die Funktionsweise der Uhr verrät. Die Funktionsweise dieser Region muss durch andere Methoden und Aufgaben erschlossen werden. Wie schwierig allerdings z.B. auch ein Vergleich zwischen Ergebnissen aus Einzelzelleableitungen und Ergebnissen des fMRIs ist, zeigen Studien von Maier, Wilke, Aura, Zhu, Ye und Leopold (2008). Sie untersuchten die Aktivität von Neuronen im Areal V1 des visuellen Kortex und konnten keine Übereinstimmung zwischen Änderungen des BOLD-Signals finden, gemessen mit dem fMRI, und der Feuerrate dieser Neuronen, gemessen durch Einzelzelleableitungen. Dementsprechend empfiehlt es sich, physiologische Befunde

vorsichtig zu interpretieren und auch auf anderem Wege zu versuchen, sich der Frage nach der oder den für die Zeitverarbeitung verantwortlichen Uhren bzw. der Uhr zu nähern.

#### 1.4. Psychophysische Ansätze

Bevor man sich konkret darum bemüht, eine Uhr im Gehirn zu lokalisieren, kann man sich auch zunächst einmal Gedanken über ihre konkrete Funktionsweise unabhängig vom Ort machen. Zwar kann es hilfreich sein, wenn man die Strukturen der beteiligten Gehirnregionen kennt und dann darüber versucht, die Funktionsweise der Uhr zu bestimmen. Aber die genaue Lokalisation der Uhr und somit auch der biologischen Strukturen erweisen sich im Bereich der Verarbeitung von Zeitdauern von Millisekunden und Sekunden als schwierig. Daher könnte es hilfreich sein, den Weg andersherum zu gehen und über eine Bestimmung der Funktionsweise der inneren Uhr oder der Uhren bestimmte Strukturen des Gehirns auszuschließen und andere als mögliche Kandidaten als Sitz der Uhr zu favorisieren.

Mit der Kognitiven Wende (als Datum wird oft die Veröffentlichung des Buches „Cognitive Psychology“ von Ulric Neisser, 1967, genannt) innerhalb der Psychologie begann man vor mehr als 50 Jahren sehr erfolgreich, sich verstärkt darum zu bemühen, Wahrnehmung und Denken zu verstehen und die „Black Box“ zu öffnen, um die die behaviorale Forschung einen Bogen machte. Die sich etablierende Kognitive Psychologie übertrug Modelle der Informationsverarbeitung aus dem technischen Bereich auf den Menschen (Broadbent, 1965). Es entstanden immer ausgefeiltere Techniken, um Funktion und Strukturen der Informationsverarbeitung, z.B. mit Sternbergs Additiver-Faktoren-Methode (Sternberg, 1969), zu untersuchen.

Im Gegensatz zu Ansätzen, die bei den biologischen Strukturen ihren Forschungsanfang nehmen, versuchen psychophysische Methoden, durch Verhaltensbeobachtungen Informationen über die Prozesse der Zeitwahrnehmung zu gewinnen. Vereinfacht gesagt: So wie man z.B. durch unterschiedliche Geräusche, eines Otto- oder Dieselmotors, zwischen zwei Motorentypen unterscheiden kann, ohne die Motorhaube zu öffnen, versuchen Psychologen unterschiedliche Strukturen und Informationsverarbeitungsprozesse zu erkennen, ohne „die Schädeldecke öffnen“ zu müssen. Um dies zu bewerkstelligen, testet man Versuchspersonen unter verschiedenen Bedingungen und misst, wie gut die jeweilige Aufgabe bewältigt

wurde. Auf diese Weise lässt sich ein Leistungsprofil erstellen, über das man versuchen kann, Rückschlüsse auf die zugrunde liegenden Prozesse zu ziehen. Ausgehend von verschiedenen Modellannahmen sind unterschiedliche Leistungsprofile zu erwarten, genauso, wie man das aus dem technischen Bereich kennt, wo sich ein Benzin- und Dieselmotor hinsichtlich ihrer Leistungswerte deutlich unterscheiden. Sind es im Bereich der Antriebstechnik Werte wie Beschleunigung oder Effizienz, so findet man im Bereich psychophysischer Forschung vor allem Maße der Wahrnehmungsgenauigkeit als Leistungsindikatoren wieder. Zwei Maße sind hierbei von besonderer Bedeutung:

Zum einen die Genauigkeit der Wahrnehmung. In der Zeitwahrnehmung würde man anhand der Übereinstimmung zwischen physikalischer und psychischer Dauer eine Ableitung über die Genauigkeit vornehmen können. Wenn man ein Intervall mit einer Dauer präsentiert bekommt und angeben soll, wie lange es gedauert hat, dann wird man, wenn man ein 500 ms langes Intervall bekommt, es vielleicht auf 550 ms schätzen. Fragt man etwas später nach einer erneuten Präsentation nochmals nach der Dauer des gehörten Intervalls, bekommt man möglicherweise die Antwort: 450 ms. Schwankungen in der Wahrnehmung sind normal und daher wiederholt man eine Messung mehrfach, um dann durch eine Mittelung über alle Antworten diese zufälligen Schwankungen auszugleichen. Der Mittelwert der Antworten stellt in diesem Fall dann einen guten Schätzer der subjektiv wahrgenommen Dauer dar und wird als PSE (point of subjective equality) bezeichnet. Je näher dieser Wert an der physikalischen Dauer, dem point of objektive equality (POE), liegt, desto genauer ist die Wahrnehmungsleistung.

Neben der Bestimmung des Mittelwerts ist aber auch zum anderen die Ermittlung der Streuung der Antworten von Interesse. Angenommen die Versuchsperson würde nicht wie in dem Beispiel oben 550 und 450 ms als Antwort geben, sondern 600 und 400 ms, so wäre bei gleichem PSE die Streuung der Antworten um den PSE deutlich größer und die Wahrnehmungsleistung also deutlich schlechter. Denn die Werte liegen weniger nah am POE, obwohl sie durch eine Mittelung ebenfalls den POE treffen würden, wie bei der Person, die 550 und 450 ms geantwortet hat. Als Wert für die Variabilität der Urteile gibt man in der Regel eine Unterschiedschwelle bzw. das Difference limen (DL) an. Je niedriger dieser Wert ist, desto besser ist die Wahrnehmungsleistung, da die Urteile weniger breit streuen.

## 1.5. Psychologische Uhrmodelle

Da wir keine genaue Vorstellung haben, wie die Uhr aussieht, die wir suchen, sollte man zunächst einmal eine Theorie erstellen, wie die zu suchende Uhr aufgebaut sein könnte. Aus diesem Uhrprinzip lassen sich dann Vorhersagen ableiten, z.B. unter welchen Bedingungen zu erwarten ist, dass diese postulierte Uhr optimal oder vielleicht auch weniger optimal funktionieren wird.

Innerhalb der psychologischen Forschung werden verschiedene Gruppen von Uhren diskutiert, über die wir Zeit wahrnehmen könnten. Matell und Meck (2000) unterscheiden im Wesentlichen zwischen drei verschiedenen Uhrentypen: Den Impulsgeber-Zähler- („Pacemaker-Accumulator“) Modellen (für den Humanbereich Creelman, 1962, für tierexperimentelle Überlegungen Gibbon, 1977, und Killeen & Fetterman, 1988), den Zerfalls- („Process-Decay“) Modellen (Staddon & Higa, 1999) und oszillatorbasierten („Oscillator/Coincidence-Detection“) Modellen (wie z.B. Barnes & Jones, 2000, siehe auch die funktionell ähnlichen „beat-based“ Modelle, z.B. Povel, 1981; Povel & Essens, 2001). Die Modelle unterscheiden sich dabei in der Form, wie Zeit enkodiert (Übersetzung der Zeitdauer in einen neuronalen Kode) und repräsentiert (Speicherformat der Zeitdauer) wird. Da die Zerfalls-Modelle innerhalb der psychologischen Forschung weniger diskutiert werden und wurden, konzentriert sich diese Arbeit im Wesentlichen auf die Gruppe der Impulsgeber-Zähler und der oszillatorbasierten Modelle.

### 1.5.1. Impulsgeber-Zähler-Modell (Creelman, 1962)

Als Erster hat Creelman (1962) ein Modell zur Verarbeitung von Zeitinformationen vorgestellt. Dies besteht aus drei Verarbeitungsstufen (siehe Abbildung 1). Creelman (1962) nimmt an, dass ein sogenannter Impulsgeber laufend Impulse ausschüttet und eine andere Einheit diese zählt. Der Zähler startet seine Zählung, wenn ein Zeitintervall beginnt und beendet seine Arbeit, sobald das Intervall zu Ende ist. Auf diese Art und Weise wird Zeit in eine Anzahl von Impulsen übersetzt, ähnlich wie man bei einer mechanischen Uhr Pendelschwingungen zählt, um die vergangene Zeit zu messen. Auch wenn Creelman davon ausging, dass die Ausschüttung der Impulse nach einer Poisson-Verteilung und somit nicht gleichmäßig, wie bei einer mechanischen Uhr, erfolgt, so verweisen Rammsayer und Ulrich (2001) darauf, dass bei einer hohen

Impulsfrequenz die Annahmen hinsichtlich der Verteilungsfunktion für die Ausschüttung der Impulse keine Unterschiede hinsichtlich der Wahrnehmungsgenauigkeit bewirken. Letztlich müssen auch die Impulse nicht sehr regelmäßig erzeugt werden, um Zeit zu messen. Sie sollten sich lediglich hinsichtlich ihres Mittelwerts während der Präsentation der Intervalle nicht gravierend unterscheiden und der Impulsabstand generell nicht zu gering sein. Wichtig ist für die Creelmansche Uhr in jedem Fall, dass während eines langen Zeitintervalls mehr Impulse gezählt werden als bei einem kurzen Intervall. Neben dieser ersten Stufe nimmt Creelman eine zweite Stufe an. Creelman zufolge können die Impulse ( $n_1$ ) eines Intervalls ( $T_1$ ) aus der ersten Stufe in einem Gedächtnissystem (Stufe 2) gespeichert werden.

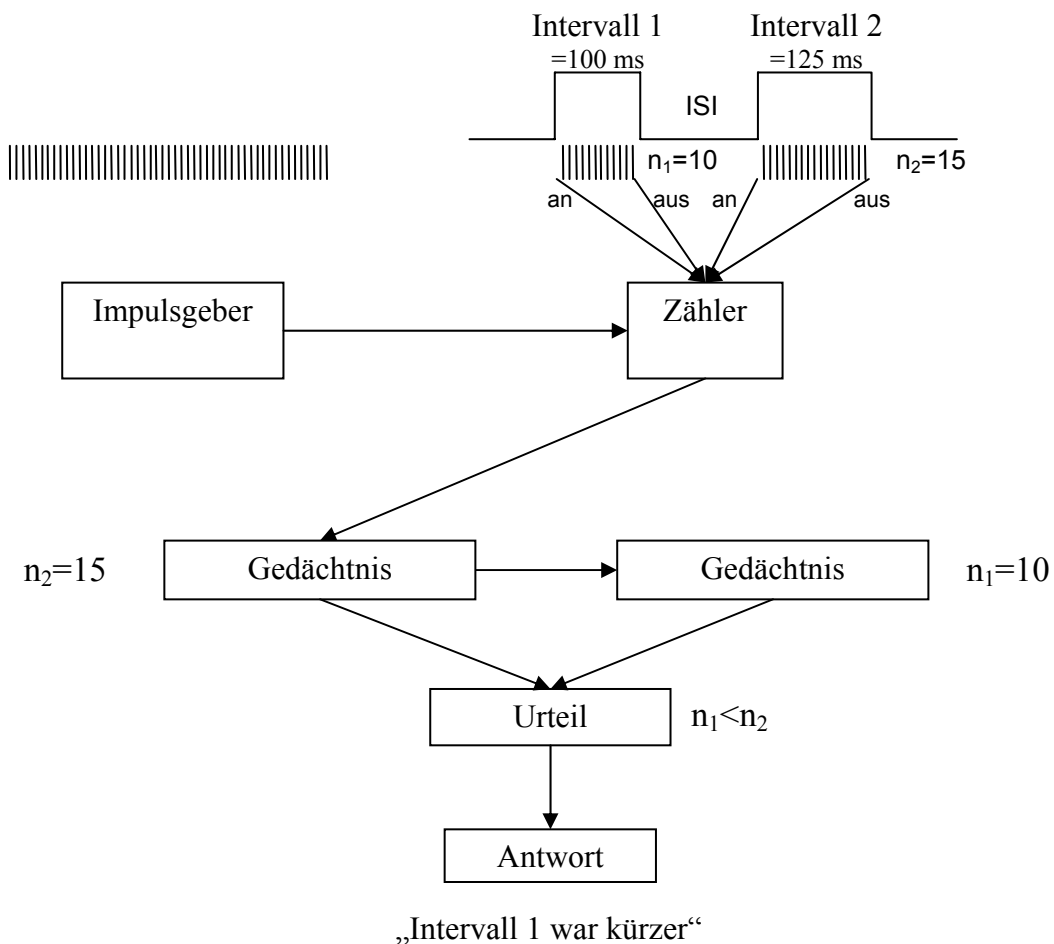
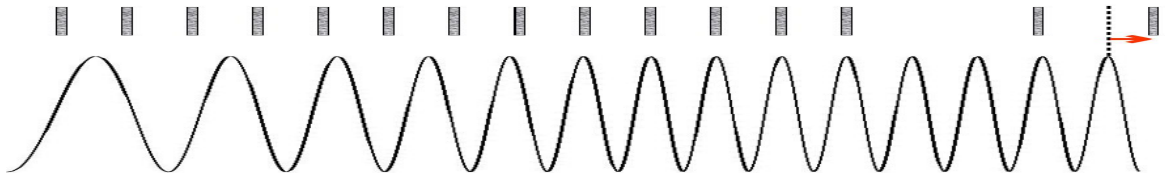


Abbildung 1: Impulsgeber-Zähler-Modell nach Creelman (1962)

Die gespeicherten Impulse ( $n_1$ ) können mit der Anzahl während der Dauer eines anderen Intervalls ( $T_2$ ) aufakkumulierten Impulse ( $n_2$ ) auf Stufe drei des Modells miteinander verglichen werden ( $n_1 - n_2$ ), um einen Unterschied zwischen den Intervalldauern  $T_1$  und  $T_2$  feststellen zu können. Auf Grund dieses Vergleichs kann dann entschieden werden, welches der Intervalle länger war und eine entsprechende Antwort gegeben werden. Creelman legt für den Vergleich der Intervalle Überlegungen aus der Signalentdeckungstheorie zugrunde (Green, 1960; Sweets, 1961). Die Entdeckungsleistung von Unterschieden zwischen zwei Reizdauern wird dementsprechend als ein stochastischer Prozess zur Optimierung von Urteilen beschrieben. Eine Optimierung der Entscheidung ist notwendig, da das beschriebene System Creelman zufolge störanfällig ist und sich Fehler bei der Enkodierung und Speicherung der Intervalldauern ergeben können. Creelman geht davon aus, dass der Beginn oder das Ende der Akkumulation von Impulsen verzögert oder verfrüht erfolgen kann, wenn der Intervallanfang oder das Intervallende nicht richtig wahrgenommen werden. Ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis würde so eine entsprechende Fehlerquelle für das Zeitwahrnehmungssystem darstellen. Sie ist unabhängig von der Dauer des Intervalls selbst. Eine weitere Fehlerquelle im System beschreibt Creelman als von der Intervalldauer abhängig. So geht Creelman davon aus, dass das Gedächtnissystem die Dauer eines Intervalls nicht beliebig lang genau speichern kann, sondern dass mit der Zeit die Zeitdauerrepräsentation verblasst. Je mehr Zeit vergeht, desto größer wird der Fehler. Dies sehr einfach anmutende Modell wird auch heute immer noch vielfach in der psychologischen Forschung verwendet und diskutiert, zumal es im Bereich menschlicher (Ferrara, Lejeune, & Wearden, 1997; Ulrich, Nitschke, & Rammsayer, 2006; Wearden, 1991) wie tierischer Zeitforschung (Gibbon, 1977; Gibbon, Church, & Meck, 1984; Fetterman & Killeen, 1991; Russell & Kirkpatrick, 2007) zahlreiche experimentelle Bestätigung gefunden hat. Das Modell wurde im Laufe der Zeit erweitert, um Aufmerksamkeitsprozesse berücksichtigen zu können (siehe hierzu Zakay & Block, 1994 oder auch Brown, 1998) und genutzt, um Modalitäts- und Reihenfolgeeffekte (Ulrich, et al., 2006, Lapid, Ulrich, & Rammsayer, 2008) zu erklären. Auch hinsichtlich neuronaler Systeme gibt es eine Evidenz für Nervensysteme, die Eigenschaften eines Impulsgeber-Zähler-Mechanismus aufweisen (Oshio, Chiba, & Inase, 2008). Computersimulationen von Durstewitz (2003) zeigen darüber hinaus, dass mit einem solchen Mechanismus Effekte der Zeitwahrnehmung gut abzubilden sind.

### 1.5.2. Dynamic-Attending-Theorie (Barnes & Jones, 2000)

Oszillatorbasierte Modelle wie die Dynamic-Attending-Theorie gehen davon aus, dass Zeitdauern nicht wie beim Impulsgeber-Zähler-Modell durch eine Anzahl von Impulsen abgebildet werden, sondern durch die Periodendauer eines oszillierenden Prozesses. Die Periode des Oszillators passt sich der Dauer eines Reizes an. Eine folgende Reizdauer kann dann mit der Dauer der Periode des oszillierenden Prozesses verglichen werden. Ist der Vergleichsreiz kürzer oder länger als die Periode des Oszillators, kommt es zu einer Asynchronie zwischen Reiz und Prozessabschnitt/Periode des Oszillators. Das Ende des Intervalls koinzidiert z.B. nicht mit dem Maximum des oszillatorischen Prozesses (siehe Abbildung 2). Diese sogenannten Entrainment-Modelle gehen davon aus, dass sich die Periode des Oszillators erst an die Dauer der präsentierten Reize anpassen muss und diese Adaptation nach der Präsentation eines Intervalls nicht perfekt erfolgen kann. Die Synchronisation der Periode an die Dauer der präsentierten Reize gelingt erst richtig gut, wenn mehrere Reize mit gleicher Dauer präsentiert wurden.



**Abbildung 2:** Oszillator adaptiert seine Periode an die Zeitdauer zwischen auditiv dargebotenen Klicks (graue Rechtecke). Die Intervalldauer eines leeren Intervalls (Zeit zwischen zwei Klicks) nach der Induktionssequenz ist länger als die der Intervalle der Induktionssequenz und daher sind Intervallende und Maximum des oszillierenden Prozesses nicht mehr synchron (Phasenverschiebung durch Pfeil gekennzeichnet)

Barnes und Jones (2000) präsentierten ihren Versuchspersonen in Experiment 1 eine Sequenz, bestehend aus sieben isochronen, leeren Intervallen (Induktionssequenz) mit einer Dauer von je 600 ms. Darauf folgte unmittelbar ein weiteres Intervall, das Standardintervall. Dessen Dauer wurde variiert und konnte kürzer, länger oder gleichlang im Vergleich zu den Intervallen der Induktionssequenz sein. Nach einer Pause und einem Warnton wurde ein weiteres Intervall präsentiert, das Vergleichsintervall. Dessen Dauer wurde ebenfalls systematisch variiert, um die Diskriminationsleistung der Versuchspersonen messen zu können. Aufgabe der Versuchspersonen war es zu entscheiden, ob das Vergleichsintervall länger, kürzer

oder gleichlang wie das Standardintervall war. Die Versuchspersonen wurden instruiert, die Intervalle der Induktionssequenz zu ignorieren. Barnes und Jones (2000) fanden heraus, dass die Diskriminationsleistung für den Vergleich der Standard- und Vergleichsreizdauer am besten war, wenn die Standarddauer der Dauer der Intervalle aus der Induktionssequenz entsprach. In Experiment 2 wurde die Dauer der Intervalle der Induktionssequenz variiert und dafür nur eine Standarddauer getestet. Erneut zeigte sich eine optimale Leistung, wenn die Dauer der Intervalle aus der Induktionssequenz mit der Dauer des Standardintervalls übereinstimmte. Dies stützt die Theorie eines oszillatorbasierten Mechanismus, demzufolge sich durch die Präsentation einer Reihe von Intervallen (wie in der Induktionssequenz) die Periode des Oszillators auf diese Dauer einstellt. Hat eine Adaptation der Periode erfolgen können und entspricht die Dauer der Periode der für die Entdeckung eines Unterschieds zwischen einem Standard und Vergleichsreiz entscheidenden Standarddauer, so ist die Leistung besser im Vergleich zu einer Bedingung, in der die Periode nicht optimal auf die Standarddauer eingestellt ist. In ihrem vierten und fünften Experiment konnten Barnes und Jones (2000) zudem zeigen, dass die Diskriminationsleistung in einer Aufgabe ohne Induktionssequenz gegenüber einer mit Induktionssequenz schlechter ist. Bei einem einfachen Vergleich von Standard- und Vergleichsreiz kommen positive Adaptationseffekte der Periode durch eine Induktionssequenz nicht zum Tragen.

### **1.5.3. Vergleich des Impulsgeber-Zähler-Modells mit der Dynamic-Attending-Theorie**

Das Impulsgeber-Zähler-Modell und die Dynamic-Attending-Theorie unterscheiden sich nicht nur in der Form, wie Zeitdauern enkodiert und repräsentiert werden (Anzahl an Impulsen vs. Periode), sondern auch darin, inwieweit sich die Enkodierung eines Intervalls auf das nächste Intervall auswirkt. Barnes und Jones (2000) gehen mit der Dynamic-Attending-Theorie explizit davon aus, dass sich die Enkodierung vorheriger Dauern auf die Wahrnehmung folgender Intervalle auswirkt. Denn die Periode des Oszillators passt sich laufend an die Dauer der dargebotenen Intervalle an, um sich mit der äußeren zeitlichen Reizstruktur zu synchronisieren, man spricht daher wie auch bei den Beat-based Modellen von z.B. Povel und Essens (2001) auch von einem sogenannten Entrainment-Modell. Creelman äußerte sich nicht dazu, inwieweit die Enkodierung eines Intervalls die Wahrnehmung des



folgenden Intervalls beeinflusst. Das Impulsgeber-Zähler-Modell ist von Creelman vielmehr so konzipiert worden, dass es zunächst einmal einen Versuch darstellt, überhaupt die Entdeckung von zeitlichen Unterschieden zwischen zwei Intervallen erklären zu können. Untersuchungen in Laboren bringen es mit sich, dass man sich auf einzelne konkrete Punkte des jeweiligen Forschungsgegenstands fokussiert. Experimente zeichnen sich dementsprechend dadurch aus, dass sie versuchen, Störgrößen auszuschalten und den Untersuchungsbereich möglichst eng zu fassen (Kingstone, Smilek, & Eastwood, 2009; Lockhead, 2004). Aufgaben werden, so gut es geht, vereinfacht, um zunächst einmal einfache und fundamentale wissenschaftliche Fragen damit beantworten zu können. Ein solches Vorgehen ist grundsätzlich gut, denn es ist nahezu unmöglich, mit einem Schlag ein komplettes System systematisch erforschen zu können. Dementsprechend berücksichtigte Creelman (1962) nicht, welchen Einfluss andere Intervalle auf die Wahrnehmung der aktuell präsentierten Dauer haben könnten. Das Impulsgeber-Zähler-Modell erweist sich insofern als ein kontextinsensitives Modell, weil es nicht davon ausgeht, dass ein zeitlicher Kontext (wie z.B. eine Induktionssequenz) die Wahrnehmung nachfolgender Intervalle beeinflusst, man spricht daher auch von einem intervallbasierten Modell, weil es eben Intervall für Intervall enkodiert und z.B. die zeitlichen Strukturen der Präsentation keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsleistung ausüben. Gleichsam wie eine mechanische Uhr, die sich durch nichts beeinflussen lässt, enkodiert das Impulsgeber-Zähler-Modell Zeitintervall für Zeitintervall völlig unabhängig voneinander in eine Anzahl von Impulsen. Die Enkodierung von Intervall N wird nicht beeinflusst durch das Intervall N-1 oder N+1. Erweist sich diese Unbeeinflussbarkeit der Enkodierung von Zeit bei einer mechanischen Uhr als absolutes Gütekriterium, muss man sich fragen, ob dies genauso für eine natürliche Umgebung gilt. Auch wenn wir durch die uns zur Verfügung stehenden Uhren sehr genau Zeit messen können, so muss man sich jedoch fragen, ob diese Art von Zeitmessung auch in einer nicht technischen Umgebung sinnvoll ist. So kritisieren Jones und Boltz (1989) oder McAuley und Kidd (1998) Untersuchungen zur Zeitwahrnehmung wie die von Creelman, die Paarvergleichsaufgaben nutzen. Die Paarvergleichsmethode hat sich in vielen Studien bewährt (Lapid, et al., 2008) und interessante Effekte im Zusammenhang mit den Mechanismen der Zeitwahrnehmung zu Tage gefördert. Doch muss man sich fragen, ob diese Art von Zeitwahrnehmung nicht zu artifiziell ist. Ist es realistisch

anzunehmen, dass wir Zeitdauern miteinander vergleichen, in dem wir für jedes Intervall die jeweils absolute Dauer bestimmen und dann die Anzahl gezählter Impulse miteinander vergleichen? Wenn man nur zwei Dauern miteinander vergleichen muss, dann mag dieses System sehr gut funktionieren. Handelt es sich allerdings bei dem Paarvergleich um eine typische Aufgabe, die Menschen und Tiere in ihrem Alltag anwenden müssen? Oder ist das nicht vielmehr eine artifizielle Aufgabe, wie sie mehr oder weniger nur in den Laboren psychologischer Forschung vorkommt? Kann man wie Creelman mit einem solchen Paradigma wie der Paarvergleichsaufgabe die innere Uhr erforschen, die vielmehr kontextabhängige Informationen berücksichtigen sollte, anstatt kontextlos zu agieren? Dementsprechend wird die ökologische Validität des Impulsgeber-Zähler-Modells in Frage gestellt und kontextsensitiven Modellen wie oszillatorbasierten Modellen der Vorzug gegeben (Jones & Boltz, 1989; McAuley & Kidd, 1998). Denn es erscheint sinnvoll anzunehmen, dass, wenn man ein Musikstück wie das Magnifikat von Johann Sebastian Bach hört, die Dauer einzelner Noten nicht Note für Note enkodiert wird und dadurch Tempounterschiede erkannt werden, wovon das Impulsgeber-Zähler-Modell ausgehen würde, sondern sich Tempounterschiede vielmehr durch adaptive Mechanismen wie einen Oszillator erkennen lassen. Denn bei zeitlichen Diskriminationsaufgaben wie Musik oder Sprache zählt nicht die absolute Dauer eines Intervalls sondern vielmehr die relative Dauer einzelner Noten. Die Alltagserfahrung zeigt uns, dass wir ein Musikstück auch dann noch erkennen, wenn das Stück von einem anderen Dirigenten in einem anderen Tempo gespielt wird. Die zeitlichen Eigenschaften ändern sich somit absolut, weil er das Stück anders interpretiert. Die relativen Unterschiede zwischen den Noten bleiben in der Regel unverändert und daher gelingt es, das Musikstück auch bei ungewohnter Spielweise wieder zu erkennen. Ähnliches gilt auch für die Sprachwahrnehmung. Wenige Millisekunden Unterschiede in Pausendauern können die Bedeutung eines Satzes verändern. Aber auch hier zählen nicht absolute Unterschiede, sondern relative Unterschiede. Es kommt auf das allgemeine Sprechtempo des Redners an und nicht, ob eine Pause 500 oder 700 ms lang war.

Das Impulsgeber-Zähler-Modell wurde bis heute nicht gezielt verändert, um zeitliche Kontexteffekte berücksichtigen zu können. Nichtzeitliche Kontexteffekte wie die Umgebungswärme (Wearden & Penton-Voak, 1995), die Lautstärke von Reizen (Burle & Casini, 2001) wurden in das Impulsgeber-Zähler-Modell integriert,

indem man annahm, dass diese das Arousal beeinflussen und dieses sich auf die Impulsfrequenz auswirkt. Auch wenn von Treisman, Faulkner, Naish und Brogan (1990) und Penton-Voak, Edwards, Percival und Wearden (1996) eine Sequenz von Klicks eingesetzt wurde, um den Impulsgeber zu beschleunigen, so dienten diese Klicksequenzen nicht dazu, einen expliziten zeitlichen Kontext zu erstellen, auf den hin das System adaptieren könnte. Es ging vielmehr darum, den Impulsgeber in seiner zeitlichen Auflösung zu beeinflussen. Ähnliches gilt für eine Studie von Rammsayer und Ulrich (2001), die davon ausgehen, dass die Impulsfrequenz des Impulsgebers sich an die Dauer der dargebotenen Intervalle anpasst. Sie ermittelten mathematisch bei unterschiedlich langen Reizdauern Unterschiede in der Impulsrate des Impulsgebers. Kürzere Intervalle wurden ihren Berechnungen nach mit einer höheren Frequenz enkodiert als längere Intervalle. Die Frequenz, mit der der Impulsgeber die Impulse ausschüttet, sollte von einer theoretischen Perspektive aus betrachtet höher bei der Diskrimination von kurzen im Vergleich zu langen Intervallen sein, da eine erhöhte zeitliche Auflösung für Dauern im Millisekundenbereich wichtiger ist als im Sekundenbereich. Insofern beeinflussen vorausgegangene Intervalldauern die Verarbeitung nachfolgender Intervalle, da sie die Auflösung des Systems verändern. Die Verarbeitung eines Intervalls nimmt aber keinen direkten Einfluss auf das folgende Intervall, wie das oszillatorbasierte Modelle annehmen. Zudem stehen bislang eindeutige empirische Ergebnisse zu einer Anpassung der Impulsfrequenz durch unterschiedlich lange Dauern, wie es Rammsayer und Ulrich (2001) annehmen, noch aus.

Auch wenn also bis heute von Vertretern des Impulsgeber-Zähler-Modells bislang keine direkten Versuche unternommen wurden, das Impulsgeber-Zähler-Modell hinsichtlich seiner Kontextsensitivität anzupassen, so bieten Überlegungen von Drake und Botte (1993) einen guten Ansatzpunkt, diese Sensitivität über ein dynamisches Gedächtnismodell in das Impulsgeber-Zähler-Modell zu integrieren.

#### **1.5.4. Alternativmodell: Multiple-Look-Modell (Drake & Botte, 1993)**

Drake und Botte (1993) gehen in ihrem Multiple-Look-Modell davon aus, dass die Repräsentation eines Reizes fehlerbehaftet ist. Eine Intervalldauer kann unterschätzt werden, weil man abgelenkt war, aber auch genauso gut überschätzt werden, wenn man aufgeregt war. Die Schätzungen streuen dementsprechend um die eigentlich präsentierte Dauer. Um solche Messfehler zu minimieren, präsentiert man

den Probanden mehrfach eine bestimmte Dauer und bildet einen Mittelwert über die von ihnen abgegebenen Urteile. Möglicherweise macht das aber nicht nur der Versuchsleiter, sondern auch das Gedächtnis des Probanden. Um eine möglichst gute Leistung zu erzielen, sollte der Messfehler reduziert werden und eine akkurate Repräsentation der Reizdauer aufgebaut werden. Wenn das Gedächtnis für Zeitdauern die Intervalldauern nicht nur statisch speichert, sondern es sich vielmehr um ein dynamisches Gedächtnis handelt, das die eingehenden Zeitdauern miteinander verrechnet, so kann eine Leistungsverbesserung durch mehrfache Präsentationen eines Intervalls erzielt werden. Das Gedächtnis muss die neu eingehenden Intervalldauern nur mit den bisherigen Dauern verrechnen, indem es einen Mittelwert aus der neuen und alten Dauer bildet. Durch die wiederholte Präsentation eines Intervalls („multiple look“) bekommt das System die Gelegenheit, sich die Dauer des Intervalls besser als bei nur einer Präsentation einzuprägen. Auf diese Weise reduziert sich der Messfehler einer einzelnen Messung und eine exaktere Repräsentation der Dauer kann sich ausbilden. Ein solches Gedächtnissystem erweist sich ähnlich wie ein oszillatorbasiertes Modell als beeinflussbar durch die Enkodierung vorheriger Intervalldauern und kann in diesem Sinne auch als kontextsensitiv angesehen werden. Diese Kontextsensitivität auf der Ebene des Gedächtnisses zu lokalisieren, hat den Vorteil, dass es mit verschiedenen Uhrsystemen verbunden werden kann. Die Enkodierung von Intervallen kann somit auch durch ein Impulsgeber-Zähler-Modell erfolgen, das die Intervalle unabhängig voneinander enkodiert. Dementsprechend kann das Multiple-Look-Modell Eigenschaften des Impulsgeber-Zähler-Modells und der Dynamic-Attending-Theorie in sich vereinigen und stellt dementsprechend nochmals eine interessante Alternative für die beiden Modelle dar.

#### **1.5.5. Überblick: empirische Ergebnisse zur Bedeutung vorausgehender Intervalle für die Verarbeitung von nachfolgenden Zeitintervallen**

Inwieweit sich die Wahrnehmung eines Intervalls  $N$  als abhängig von der Enkodierung eines vorausgehenden Intervalls  $N-1$  erweist, war schon Untersuchungsgegenstand zahlreicher Studien. Mit unterschiedlichen Paradigmen versuchte man der Frage nachzugehen, inwieweit sich eher die Vorhersagen kontextsensitiver Oszillator- oder kontextinsensitiver Impulsgeber-Zähler-Modelle empirisch bestätigen lassen. So verwendeten Drake und Botte (1993) eine

sogenannte Tempowechsel-Diskriminationsaufgabe (tempo-change-task). In einer solchen Aufgabe hören die Versuchspersonen zwei Sequenzen, die aus einer bestimmten Anzahl an Intervallen bestehen, und müssen entscheiden, ob das Tempo der ersten Sequenz schneller war als das der zweiten oder andersherum. Tempo-Unterschiede entstehen dadurch, dass die Dauer der Intervalle in den Sequenzen variiert wird. So kann die Intervalldauer der ersten Sequenz 400 ms betragen, während die zweite Sequenz aus Intervallen mit einer Dauer von 500 ms besteht. Dementsprechend sollte die Versuchsperson in dem genannten Beispiel antworten, dass die erste Sequenz (Standardsequenz) ein höheres Tempo aufweist als die zweite Sequenz (Vergleichssequenz). Um zu überprüfen, inwieweit es vorteilhaft ist, wenn man mehrere Intervalle präsentiert bekommt, variiert man die Anzahl der Intervalle in der Standard- und Vergleichssequenz. Drake und Botte (1993) verwendeten für die Standard- und Vergleichsreizsequenz entweder eins, zwei, vier oder sechs Intervalle pro Sequenz. Sollte sich die mehrfache Präsentation von Intervallen vorteilhaft auf die Wahrnehmung auswirken, so müssten sich Unterschiede im Tempo zwischen den Sequenzen schlechter feststellen lassen bei Sequenzen, die aus nur einem Intervall bestehen (also vergleichbar mit einer Paarvergleichsaufgabe wären) und denen, die zwei, vier oder sechs Intervalle enthalten. Drake und Botte (1993) fanden genau dies. Je länger die Sequenzen sind, desto leichter fällt es den Versuchspersonen, Unterschiede hinsichtlich des Tempos der beiden Sequenzen zu erkennen. Dabei ist vor allem zwischen den Sequenzen aus einem und zwei Intervallen und zwischen zwei und vier Intervallen eine Wahrnehmungsverbesserung zu beobachten.

Ähnliche Ergebnisse fanden Ivry und Hazeltine (1995), die eine sogenannte Verlängerungs-Diskriminationsaufgabe (lengthening-task) verwendeten. Diese Aufgabe ähnelte der von Barnes und Jones (2000), da zunächst Intervalle mit einer bestimmten Standarddauer präsentiert werden und darauf ein Vergleichsintervall folgt, das in Relation zur Standarddauer von den Versuchspersonen als länger oder kürzer im Vergleich zu den Standarddauern beurteilt werden soll. Um zu überprüfen, ob eine mehrfache Präsentation von Standardintervallen die Wahrnehmung einer abweichenden Dauer des Vergleichsintervalls verbessert, variierten Ivry und Hazeltine (1995) die Anzahl der präsentierten Standarddauern. Auch sie fanden eine verbesserte Leistung, wenn es darum ging, eine Abweichung des Vergleichsreizes von der Standarddauer zu entdecken, wenn anstelle von nur einer Standarddauer

gleich vier Standardintervalle vor dem Vergleichsreiz präsentiert werden. Und das unabhängig davon, ob der Vergleichsreiz direkt im Anschluss an die Standarddauern präsentiert wurde oder ob der Vergleichsreiz zeitlich von den Standarddauern abgetrennt war.

Neben diesen Hinweisen auf einen Einfluss des Kontexts auf die Wahrnehmungsleistung muss man allerdings auch erwähnen, dass die empirischen Ergebnisse insgesamt ein uneinheitliches Bild zeigen. Eine ganze Reihe von Studien brachte Ergebnisse wie die von Drake und Botte (1993) oder Ivry und Hazeltine (1995) zu Tage, die eindeutig dafür sprechen, dass sich die Leistung beim Entdecken eines zeitlich abweichenden Intervalls verbessert, wenn zuvor Intervalle dargeboten wurden, die der Standarddauer entsprachen (Barnes & Jones, 2000; Berens & Pastore, 2005; McAuley & Jones, 2003; McAuley & Kidd, 1998; Miller & McAuley, 2005; Pfeuty, Ragot, & Pouthas, 2003; Rousseau & Rousseau, 1996; ten Hoopen & Akerboom, 1983). Jedoch berichteten andere Forschergruppen, dass sie keine Verbesserung der Leistung beobachten konnten (Brandler, 2002, Pashler, 2001; ten Hoopen et al., 1994; ten Hoopen et al., 1995). Wiederum andere berichteten gemischte Ergebnisse (Grondin, 2001b; Hirsh, Monahan, Grant, & Singh, 1990; Jones & Wearden, 2003; Schulze, 1978; 1989).

#### **1.5.6. Probleme bisheriger Untersuchungen und Paradigmen**

Wie kann es sein, dass eine ganze Reihe von Studien keinen positiven Effekt mehrfacher Standarddauern auf die Erkennungsleistung eines nachfolgenden abweichenden Intervalls finden kann? Generell sind Nulleffekte schwierig zu interpretieren und können verschiedene Ursachen haben. Zum einen ist es möglich, dass das Modell nicht stimmt, das einen Effekt vorhersagt. Denkbar ist aber ebenso, dass die experimentelle Manipulation nicht erfolgreich war oder aber nur einen geringen Effekt erzielt hat, der statistisch nicht bedeutsam ist. Bevor man das Modell verwirft, empfiehlt es sich zu prüfen, ob vielleicht nur einzelne Aspekte des Modells nicht richtig berücksichtigt wurden und ob hinsichtlich des Designs und der Art der Manipulation der Experimente Schwachstellen zu erkennen sind.

#### *1.5.6.1. Konfundierung der Anzahl präsentierter Standard- und der Vergleichsreizintervalle*

Miller und McAuley (2005) stellten fest, dass in einigen Studien, die eine Tempowechsel-Diskriminationsaufgabe verwenden (Drake & Botte, 1993; Grondin, 2001b; McAuley & Kidd, 1998), die Anzahl der präsentierten Intervalle der Standardsequenz mit denen der Vergleichssequenz kovariert und dies zu einer Konfundierung führen könnte. Das würde bedeuten, dass es möglicherweise nicht die Anzahl an Intervallen in der Standardsequenz ist, sondern die Anzahl an Intervallen in der Vergleichssequenz, die die Leistungsverbesserung bewirkt. Wenn also manche Studien keinen positiven Effekt der Mehrfachpräsentation gefunden haben, könnte das daran gelegen haben, dass diese nicht die Anzahl der Vergleichsreize veränderten. In ihrer eigenen Studie variierten Miller und McAuley (2005) daher unabhängig voneinander die Anzahl an Standard- und Vergleichsreizen und konnten zeigen, dass sowohl eine mehrfache Präsentation von Standard- wie auch von Vergleichsreizen die Leistung verbessert.

#### *1.5.6.2. Randomisierte vs. geblockte Darbietung von Standarddauern*

Miller und McAuley (2005) stellten zum anderen in ihrer eigenen Studie fest, dass ein positiver Effekt mehrfacher Standardpräsentationen nur dann zu beobachten ist, wenn nicht immer dieselbe Standarddauer in einem Experiment verwendet wird. Nur wenn sich mehrere Standarddauern abwechseln, konnten Miller und McAuley (2005) einen Effekt beobachten. Sie führten dies darauf zurück, dass der Effekt nur zu beobachten ist, wenn sich der Oszillator immer neu in jedem Durchgang auf die aktuelle Standarddauer einstellen muss. Die Leistungsverbesserung in einem Experiment, in dem immer nur eine Standarddauer verwendet wird, kann Miller und McAuley (2005) zufolge nicht beobachtet werden, weil der Oszillator sich nach wenigen Intervallen bzw. spätestens nach ein paar Durchgängen an die Standarddauer angepasst hat. Eine weitere Verbesserung der Leistung ist nach einigen Durchgängen dementsprechend nicht mehr zu erwarten, es sei denn, das System muss sich immer wieder neu auf andere Dauern hin einstellen, wenn z.B. verschiedene Standarddauern in einem Block zufällig abwechseln.

#### *1.5.6.3. Sehr schneller Adaptationsprozess des Oszillators*

Wenn Miller und McAuley (2005) davon ausgehen, dass keine weitere Verbesserung der Wahrnehmungsleistung zu beobachten ist, wenn immer nur eine Standarddauer in einem Experiment verwendet wird und sich der Oszillator nach ein paar Trials bereits vollständig an diese Dauer adaptiert hat, dann kann dies auch bereits bei Sequenzen mit vielen Intervallen erfolgen. Geht man davon aus, dass sich die Periode sehr schnell an die Dauer der Intervalle adaptiert, dann könnte es passieren, dass diese sich nach fünf Intervallen bereits nicht mehr weiter anpassen kann und man dementsprechend keinen Leistungsgewinn im Vergleich zu einer Sequenz aus 6 Intervallen finden kann. Untersuchungen von Berens und Pastore (2005) unterstützen eine solche Annahme, da sie nur Unterschiede zwischen Sequenzen mit ein und fünf Intervallen finden, aber keinen Unterschied mehr zwischen Sequenzen mit drei und fünf Intervallen beobachten können. Dementsprechend können Nulleffekte auch durch eine sehr schnelle Adaptation des Oszillators erklärt werden, die nur zu beobachten ist, wenn man die Leistung in einer kurzen Sequenz (z.B. ein Intervall) mit der in einer langen Sequenz (z.B. fünf Intervalle) vergleicht, nicht aber, wenn man die Leistung in einer mittellangen (z.B. drei Intervalle) mit einer langen Sequenz (z.B. fünf Intervalle) vergleicht.

#### *1.5.6.4. Konfundierung der Anzahl präsentierter Standardintervalle und der Gesamtsequenzlänge*

Eine weitere Ursache für die gefundenen Nulleffekte könnte sein, dass es neben positiven Effekten durch mehrfache Standardpräsentation auch parallel zu negativen Effekten kommen kann. Wenn sich die Leistung mit zunehmender Anzahl an Intervallen in der Sequenz verbessert, dann könnten ebenso auch allgemeine Ermüdungseffekte die Leistung verschlechtern, wenn die Sequenz verlängert wird. Grondin (2001b) diskutiert eine weitere Möglichkeit und nimmt an, dass die Verarbeitung vorausgehender Intervalle eine sensorische Spur („sensory noise“) hinterlässt. Diese könnten die Enkodierung nachfolgender Intervalle beeinträchtigen. Dieser Fehler könnte sich mit zunehmender Anzahl an Intervallen akkumulieren. Möglicherweise sind es aber auch höhere kognitive Funktionen, die eine Leistungsverschlechterung bewirken. Denkbar ist, dass die Konzentration über mehrere Intervalle hinweg mehr und mehr nachlässt und positive Effekte, die durch eine Adaptation eines oszillierenden Prozesses entstehen könnten, gar nicht oder nur



weniger deutlich zu Tage treten. Ähnlich wie Ermüdungseffekte dürften Habituationseffekte wirken: Intervalle am Anfang einer Sequenz könnten noch mehr Beachtung finden als Intervalle, die erst später präsentiert werden. Dementsprechend erreicht man möglicherweise durch eine Variation der Anzahl an Intervallen in der Sequenz nicht nur positive, sondern ebenfalls auch negative Effekte. Ebenso ist es denkbar, dass Gedächtniskapazitäten (siehe Cowan, 2000; Miller, 1956) überschritten werden und aufgrund dessen die Wahrnehmungsleistung durch eine Reihe zu verarbeitender Zeitintervalle reduziert wird. Ist der Speicher gefüllt, dann müssen früher gespeicherte Zeitdauerintervalle den neuen Intervallen Platz machen. Ansonsten aber können die neuen Intervalle selbst nicht gespeichert werden. Dies könnte somit zu negativen Effekten auf die Wahrnehmungsleistung in Abhängigkeit von der Anzahl der Intervalle der Sequenz als solcher und nicht durch die Anzahl an Möglichkeiten zur Synchronisierung einer Periode führen. Die Konfundierung der Anzahl der präsentierten Intervalle vor einem abweichenden Intervall und der Gesamtsequenzlänge (Anzahl der Intervalle pro Sequenz) erschwert daher die Interpretation bisheriger Ergebnisse, da die Anzahl der Intervalle in den verwendeten Sequenzen in keiner der bisherigen Studien konstant gehalten wurde. Eine Ausnahme bildet hier nur die Studie von Brandler (2002). Den Versuchspersonen wurde eine Sequenz von sieben Intervallen vorgespielt und die Versuchspersonen sollten am Ende entscheiden, ob sie die Sequenz als regelmäßig oder unregelmäßig wahrgenommen hatten. Brandler (2002) verlängerte die Dauer des Intervalls an der dritten oder vierten Position, um zu ermitteln, ab wann eine Versuchsperson in 75% der Fälle die Sequenz als unregelmäßig einstuft. Dadurch, dass das dritte oder vierte Intervall verlängert wurde, wird die Anzahl der präsentierten Reize vor dem variablen Intervall manipuliert und man kann untersuchen, ob die Leistung nach zuvor zwei präsentierten Intervallen sich von der Leistung nach drei präsentierten Intervallen unterscheidet. Brandler (2002) fand keinen Unterschied in der Leistung. Allerdings verwendete Brandler auch nur 150-ms Intervalle als Standardintervalle. Dementsprechend ist es schwierig einzuschätzen, ob sich kein Effekt einer Leistungsverbesserung einstellt, weil die Anzahl an Intervallen innerhalb der Sequenz konstant gehalten wurde. Oder es war keine Leistungsverbesserung mehr möglich, da der Oszillator bereits nach ein paar Trials sehr gut seine Periode an die 150-ms Standarddauern angepasst hat.

#### *1.5.6.5. Positionierung des variablen Intervalls innerhalb der Sequenz*

Als Erklärung für gefundene Nulleffekte kommt weiterhin in Betracht, dass nicht nur die Anzahl der Intervalle, die vor dem abweichenden Intervall präsentiert werden, von entscheidender Bedeutung für die Wahrnehmungsleistung ist, sondern auch die Position des abweichenden Intervalls innerhalb der Sequenz. Werden Intervalle in der Mitte einer Sequenz genauso verarbeitet wie die, die am Ende einer Sequenz präsentiert wurden, obwohl ihnen die gleiche Anzahl an Intervallen vorausging? Geht man davon aus, dass nicht nur vorausgehende sondern auch nachfolgende Intervalle die Leistung beeinflussen, so nehmen das erste und letzte Intervall einer Sequenz eine besondere Rolle ein, da ihnen kein weiteres Intervall folgt oder ihnen eines vorausgeht. Dementsprechend ist nicht unbedingt mit denselben Ergebnissen für ein abweichendes Intervall an einer der Randpositionen im Vergleich zu einem Intervall in der Sequenzmitte zu rechnen. Eine Reihe von Studien (z.B. Barnes & Jones, 2000; Berens & Pastore, 2005) variiert nur das letzte Intervall einer Sequenz und entsprechende Nulleffekte oder Effekte im Bezug auf die Wahrnehmungsleistung könnten durch diese besondere Rolle des letzten Intervalls der Sequenz erzielt worden sein.

### 1.6. Übersicht über die Experimente und Ziele dieser Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, bisherige Befunde zu einer Verbesserung der Wahrnehmungsleistung durch mehrfache Präsentationen von Intervallen zu überprüfen, um grundsätzlich Erkenntnisse über die der Zeitwahrnehmung zugrundeliegenden Mechanismen zu erhalten. Hierbei werden die Vorhersagen dreier Modelle, nämlich die Dynamic-Attending-Theorie als Vertreter kontextsensitiver Oszillator basierter Systeme, das klassische Impulsgeber-Zähler-Modell von Creelman (1962) als ein Vertreter kontextinsensitiver Systeme, sowie das Multiple-Look-Modell von Drake und Botte (1993) miteinander verglichen. Um eine bisherige Konfundierung zwischen Gesamtsequenzlänge und Anzahl der Intervalle zu vermeiden, werden in dieser Studie vor allem Sequenzen mit einer konstanten Anzahl an Intervallen verwendet, um Ermüdungs-, Habituations- oder Gedächtniskapazitäts- Effekte ausschließen zu können (Experimente 1-2 und 5-6). In den Experimenten 3 und 4 wird hingegen die Anzahl an Intervallen gezielt variiert, um diese Effekte gezielt zu provozieren. Zudem ist es ein Ziel der Studie, die

Geschwindigkeit der Anpassung an den Kontext sowie besondere Positionen innerhalb einer Sequenz von Intervallen ausfindig zu machen. Hierzu entwickelte ich ein neues Untersuchungsparadigma auf Basis bereits vorhandener Aufgaben, um eine Veränderung der Leistung bei verschiedenen Standarddauern an unterschiedlichen Positionen der Sequenz mit einer variierenden Anzahl an Intervallen, unterschiedlichen Interstimulus-Intervallen und mit verschiedenen Präsentationsformen der Standarddauern detaillierter beobachten zu können.

Die Ergebnisse von Experiment 1 bestätigen die Vorhersagen der kontextsensitiven Modelle wie der Dynamic-Attending-Theorie und des Multiple-Look-Modells und stellen kontextinsensitive Modelle wie das Impulsgeber-Zähler-Modell in Frage. Ziel von Experiment 2 war es, die unterschiedlichen Vorhersagen der verbleibenden Modelle, die Dynamic-Attending-Theorie und das Multiple-Look-Modell, miteinander zu vergleichen, die sich in ihrer Vorhersage bezüglich des Einflusses verschiedener Interstimulus-Intervalle unterscheiden. Es wurde kein Unterschied gefunden zwischen den Leistungen mit Sequenzen, deren Interstimulus-Intervalle der Standarddauer (50, 150 oder 250 ms) entsprachen und denen, die 125 ms lang waren, und sich damit von den Standarddauern unterscheiden. Damit bestätigen die Ergebnisse die Vorhersage des Multiple-Look-Modells und lassen Zweifel an der Gültigkeit der Dynamic-Attending-Theorie aufkommen. In Experiment 3 und 4 wurde der Einfluss der Gesamtsequenzlänge auf die Wahrnehmungsleistung untersucht und verschiedene Gedächtnismodelle (Experiment 3) und Vergleichsmodelle (Experiment 4) diskutiert, um die in den ersten beiden Experimenten gefundenen Leistungsunterschiede, speziell den deutlichen Leistungsabfall für Intervalle an der letzten Position in der Sequenz zu erklären. Überraschenderweise kam es zu keinerlei Leistungsunterschieden zwischen Sequenzen, die aus 150-ms Standardintervallen bestanden und in Experiment 2 zusammen mit Sequenzen, die aus 50- und 250-ms Standardintervallen in zufälligem Wechsel präsentiert (randomisierte Darbietung) und denen die in Experiment 3 allein, d.h. ohne Sequenzen bestehend aus 50- und 250-ms Standardintervallen präsentiert wurden. Die Ergebnisse von Experiment 5 und 6 zeigen, dass dies eine Besonderheit der Sequenzen, bestehend aus 150-ms Standardintervallen, war. Die Sequenzen, bestehend aus 50- und 250-ms Standardintervallen, zeigten eine verbesserte Leistung, wenn sie allein dargeboten wurden (geblockte Darbietung) und es keinen Wechsel zwischen Sequenzen, bestehend aus 50-, 150- und 250-ms

Standardintervallen, gab. Mit Experiment 6 gelang es, die gefundenen Nulleffekte für den Einfluss der Interstimulus-Intervall-Dauer auf die Wahrnehmungsleistung, wie zwischen Experiment 1 und 2 beobachtet, im Wesentlichen nochmals zu bestätigen. Auch ergaben sich weitere Hinweise darauf, dass es sich um keinen zufälligen Effekt gehandelt hat, dass sich kein Unterschied zwischen den Sequenzen bestehend aus 150-ms Standardintervallen bei geblockter und randomisierter Darbietung beobachten ließ. Bedingt durch die in den Experimenten 1-6 verwendete Messmethode war es nicht möglich, den Einfluss möglicher PSE-Verschiebungen zu untersuchen. Da dies auch in Hinblick auf die der Zeitwahrnehmung zugrunde liegenden Mechanismen von Bedeutung ist, wurde in Experiment 7 die Messmethodik erweitert und darüber hinaus versucht, die bisherigen Ergebnisse in Bezug auf die ISI-Effekte durch ein Innersubjekt-Design zu erhärten, was auch gelang. Die Ergebnisse aus Experiment 7 belegen darüber hinaus die Gültigkeit der Befunde über längere Standardintervall-Dauern und Interstimulus-Intervall-Dauern.

## 2. Experimentelle Prüfung der Fragestellung

### 2.1. Experiment 1: Einfluss der Anzahl präsentierter Standarddauern auf die Wahrnehmungsleistung eines folgenden Vergleichsreizes

Sowohl die Dynamic-Attending-Theorie als auch das Multiple-Look-Modell sagen vorher, dass bei einer mehrfachen Präsentation ein folgender abweichender Reiz besser erkannt wird, je mehr gleiche Reize (Standarddauern) zuvor präsentiert wurden. Im Gegensatz dazu steht die Vorhersage des Impulsgeber-Zähler-Modells, das davon ausgeht, dass jeder Reiz für sich, d.h. unabhängig von vorher präsentierten Reizdauern, verarbeitet wird und durch mehrfache Präsentationen derselben Dauer keine Verbesserung der Erkennungsleistung zu erwarten ist. Ziel dieses Experiments war es, die unterschiedlichen Vorhersagen der Modelle empirisch zu überprüfen, um die Modelle auf ihre Plausibilität zu testen.

Um eine Konfundierung der Anzahl an Intervallen in einer Sequenz und der Anzahl präsentierter Intervalle vor einem zeitlich abweichenden Intervall zu vermeiden, wurde eine konstante Anzahl von sieben Intervallen in jeder Sequenz verwendet. Dies sollte, wie in der Einleitung bereits ausgeführt, Ermüdungs-, Habituations- oder Gedächtniseffekten entgegenwirken, die nicht durch eine Variation der Anzahl an präsentierten Intervallen, sondern durch Veränderungen der Gesamtsequenzlänge entstehen könnten. Sechs dieser Intervalle haben die gleiche Dauer und können mit Standardreizdauern verglichen werden. Sie werden im Folgenden daher als SIs bezeichnet. Ein weiteres Intervall ist variabel in seiner Dauer und kann von seiner Funktion her mit einem Vergleichsreiz verglichen werden. Es wird mit dem Kürzel VI abgekürzt. Die Dauer des VI wird den Regeln der weigthed-up-down Methode Kaernbachs (1991) folgend verändert, um die Diskriminationsleistung der Versuchsperson für dieses Intervall zu ermitteln. Neben der Dauer des VI wurde auch seine Position innerhalb der Sequenz von Durchgang zu Durchgang zufällig variiert. Befindet sich das VI an erster Position in der Sequenz aus sieben Intervallen, so geht ihm kein SI voraus. Wird das VI hingegen an der Position 7 innerhalb der Sequenz präsentiert, so wurden zuvor sechs SIs präsentiert, die dem System Gelegenheit geben könnten, eine genauere Repräsentation der SI-Dauer im Gedächtnis aufzubauen (Multiple-Look-Modell) oder eine verbesserte

Anpassung der Periode (Dynamic-Attending-Theorie) zu erlauben. Indem das VI an allen sieben Positionen variiert wurde, ist es möglich, den Verlauf der Adaptation über verschiedene Positionen zu ermitteln. Auf diese Weise sollte es möglich sein, auch qualitative Aussagen zur Geschwindigkeit des Adaptationsprozesses zu machen und Saturierungseffekte zu beobachten, wenn ein solcher adaptiver Prozess, wie ihn die Dynamic-Attending-Theorie oder das Multiple-Look-Modell beschreiben, zugrunde gelegt werden kann. Hingegen sollten sich keine Leistungsunterschiede zwischen den verschiedenen Positionen, an denen das VI präsentiert wird, ergeben, wenn die Vorhersagen des Impulsgeber-Zähler-Modells zutreffen.

Im folgenden Experiment wechselten sich zudem in zufälliger Reihenfolge drei verschiedene SI-Dauern (50, 150 und 250 ms) von Durchgang zu Durchgang ab. Denn den theoretischen Überlegungen des Multiple-Look-Modells oder auch der Dynamic-Attending-Theorie, wie auch der Untersuchung von Miller and McAuley (2005) zufolge, muss gewährleistet sein, dass sich das Zeitverarbeitungs-System in jedem Durchgang neu an die präsentierte SI-Dauer anpasst. Wenn sich bereits nach der Präsentation einiger Intervalle der Oszillator an die Dauer der SI-Dauern angepasst oder aber sich bereits eine genaue Repräsentation im Gedächtnis ausgebildet hat, so würden auch die Dynamic-Attending-Theorie oder das Multiple-Look-Modell vorhersagen, dass es zu keiner weiteren Verbesserung der Leistung mehr kommen kann, da bereits eine optimale Repräsentation der SI-Dauer besteht. Durch die Verwendung verschiedener SI-Dauern kann gewährleistet werden, dass eine Anpassung der Gedächtnisrepräsentation oder Periodendauer über das ganze Experiment hinweg stattfinden müsste, wenn die Vorhersagen des Multiple-Look-Modells oder der Dynamic-Attending-Theorie korrekt sind.

### **2.1.1. Methode**

#### *Versuchspersonen*

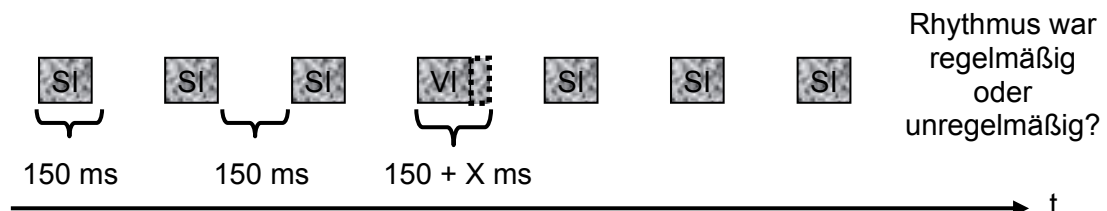
18 Studierende (16 weiblich, 2 männlich) der Universität Göttingen im Alter von 19-31 Jahren ( $M = 22.0$ ;  $SD = 4.4$ ) nahmen am Experiment teil. Sie waren naiv hinsichtlich der Fragestellung des Experiments. Für ihre Teilnahme wurde ihnen eine Versuchspersonenstunde attestiert.

### Apparatur und Stimuli

Das Experiment wurde in Turbo Pascal programmiert und PC gesteuert durchgeführt. Das Weiße Rauschen wurde mit einem externen Tongenerator erzeugt und über Kopfhörer (Technics RP-FT30) den Versuchspersonen mit einer Lautstärke von 65 dB vorgespielt.

### Prozedur

Ein Trial bestand jeweils aus sieben, mit weißem Rauschen gefüllten Intervallen. Sechs dieser Intervalle hatten dieselbe Dauer (SIs) von entweder 50, 150 oder 250 ms. Ein weiteres Intervall (VI) war variabel in seiner Dauer. Die Zeit zwischen den Intervallen (ISI) entsprach jeweils der Dauer der SIs. Die Zeit zwischen Antwortabgabe und dem nächsten Intervall betrug 1000 ms. Es gab kein Feedback. Aufgabe der Versuchspersonen war es, am Ende der Sequenz zu entscheiden, ob sie einen regelmäßigen oder aber unregelmäßigen Rhythmus gehört hatten. Es wurde ihnen anhand eines Schaubilds erklärt, dass ein regelmäßiger Rhythmus bedeuten würde, dass alle Intervalle gleich lang waren. Hingegen zeichnet sich ein unregelmäßiger Rhythmus dadurch aus, dass eines der Intervalle eine abweichende Dauer hat (zur Illustration verwendete Abbildung entspricht Abbildung 3).



**Abbildung 3:** Trialablauf Experiment 1, z.B. sechs gefüllte Intervalle mit einer Standarddauer (SI) von 150 ms und ein variables verlängertes Intervall (VI) an der vierten Position in der Sequenz

Wenn die Versuchspersonen einen regelmäßigen Rhythmus wahrgenommen hatten, so sollten sie die „Enter“-Taste auf der vor ihnen liegenden Tastatur drücken. Die „+“ Taste über der „Enter“-Taste auf dem Ziffernblock diente zur Eingabe der Antwort „unregelmäßiger Rhythmus“. Die Versuchspersonen wurden instruiert, dass es nicht darauf ankommt, möglichst schnell ihre Antwort abzugeben, sondern sie sollten sich für ihr Urteil so viel Zeit lassen, wie sie benötigten. Sie wurden instruiert, dass an allen möglichen Positionen innerhalb der Sequenz ein Intervall in seiner Dauer verändert sein kann und dass immer nur einziges Intervall verändert wird.

Die Dauer des zu entdeckenden VI variierte nach den Regeln von Kaernbach's (1991) weighted-up-down Methode, um das .75 Perzentil der psychometrischen Funktion der Versuchsperson zu ermitteln. D.h. das Verfahren adaptiert die Dauer des VI so, dass die Versuchsperson in 75% aller Durchgänge eine Verlängerung des VI gegenüber den SIs entdeckt. Hatte die Versuchsperson in derselben experimentellen Bedingung das VI als länger angesehen und die „+“ Taste gedrückt, so wurde im folgenden Durchgang die Dauer des VI um einen kleinen Betrag reduziert (kleine Schrittweite). Hingegen wurde das VI durch die Betätigung der „Enter“-Taste im nächsten Durchgang derselben Bedingung deutlich verlängert (große Schrittweite). Die anfängliche Dauer des VI in der 50 ms Standardbedingung betrug 70 ms und wurde in den folgenden Durchgängen um jeweils 5 ms verkürzt (kleine Schrittweite) oder aber um 15 ms verlängert (große Schrittweite). Das VI in der 150 ms Standardbedingung wies einen Startwert von 220 ms auf. Die kleine Schrittweite betrug 6 ms und die große Schrittweite 18 ms. In der 250 ms SI-Dauer-Bedingung wurde die Dauer des VI ausgehend von 340 ms um 7 ms verkürzt bzw. um 21 ms verlängert, um das .75 Perzentil der psychometrischen Funktion nach dem adaptiven Verfahren Kaernbachs (1991) ermitteln zu können.

Vor Beginn des eigentlichen Experiments wurde den Versuchspersonen in einem Übungsblock mit 21 Durchgängen die Möglichkeit gegeben, sich mit der Aufgabe vertraut zu machen. Die Übungsdurchgänge enthielten alle möglichen Kombinationen aus den drei SI-Dauern mit den sieben VI Positionen. Nach dem Übungsblock wurden die Versuchspersonen gefragt, ob sie noch irgendwelche Fragen hätten. Ihnen wurde gesagt, dass nun das Experiment beginnen würde und sie am Ende anhand ihrer eigenen Daten über die Zielsetzung des Experimentes und die dahinter liegenden Theorien aufgeklärt werden würden. Es gab drei Experimentalblöcke, die aus jeweils 224 Durchgängen bestanden. Zwischen den Blöcken mussten die Versuchspersonen mindestens eine Minute pausieren. Diese Zeit sollte ihnen die Möglichkeit geben, sich etwas zu erholen. Den jeweiligen experimentellen Block starteten sie selbstständig durch Drücken der Leertaste.

### *Design*

Der Faktor SI-Dauer ist dreistufig angelegt worden (50, 150 und 250 ms SIs). Der Faktor Position des VI besteht aus sieben Stufen (Position 1-7). Durch die vollständige Kombination der beiden Faktoren erhält man 21 Bedingungen, in der



jede Versuchsperson getestet wird. Um die Erkennungsleistung der Versuchsperson in jeder der 21 Bedingungen zu ermitteln, wurde sie 32-mal in derselben Bedingung getestet, was zu einer Anzahl von 672 experimentellen Durchgängen führt.

#### *Generelle Kommentare zur Datenanalyse der Experimente 1-6*

Versuchspersonen, deren Erkennungsleistung mehr als zwei Standardabweichungen vom Median der gesamten Versuchspersonengruppe in mehr als einem Viertel der Bedingungen abwich, wurden nicht in die Analyse mit aufgenommen und durch andere Versuchspersonen ersetzt, bis 18 Versuchspersonen das Kriterium erfüllten. Dazu mussten in Experiment 1 drei, in Experiment 2 zwei, in Experiment 3 drei, in Experiment 4 sieben, in Experiment 5 zwei und in Experiment 6 sieben Versuchspersonen ersetzt werden.

Alle folgenden Analysen basieren auf den letzten 20 Durchgängen jeder Bedingung. Die jeweils ersten 12 Durchgänge wurden nicht in die Auswertung einbezogen. Durch die Messung des .75-Perzentils allein ist es nicht möglich, eine Unterschiedsschwelle vergleichbar zum Difference limen (.75-Perzentil – Punkt subjektiver Gleichheit) zu bestimmen. Um eine gewisse Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungen zu erzielen, die dieses Maß nutzen, wird im Folgenden die .75-Unterschiedsschwelle (.75-Perzentil – Punkt objektiver Gleichheit) angegeben.

Die statistischen Analysen wurden mit dem Programm Statistica 8.0 (StatSoft, Tulsa, USA) durchgeführt. Effekte der Faktoren SI-Dauer und Position des VI auf die Wahrnehmungsleistung wurden bedingt durch das experimentelle Design zunächst mit Hilfe zweifaktorieller ANOVAs mit Messwiederholung überprüft. In einem weiteren Schritt wurde der Zusammenhang der Position des VI in Bezug auf die Wahrnehmungsleistung detaillierter analysiert. Da es sich zeigte, dass der Effekt der Position des VI sowie die Präsentationsmodi unterschiedliche Effekte bei den SI-Dauern aufwiesen, wurde diese Analyse getrennt für jede der getesteten SI-Dauern durchgeführt. Das geschah zunächst mittels einfaktorieller ANOVAs mit Messwiederholung und anschließend nochmals mit Hilfe von Bonferroni Post-hoc-Tests, um den Einfluss der einzelnen Positionen genau zu ermitteln. Eine solche getrennte Auswertung (vor allem bei den Post-hoc-Tests) hat den Nachteil, dass z.B. die Effekte die Position des VI betreffend weniger deutlich ausfallen im Vergleich dazu, wenn man die Effekte unabhängig von der SI-Dauer betrachtet und analysiert. Um der Frage nachzugehen, inwieweit sich die einzelnen Positionen des VI

hinsichtlich ihrer Leistung unterscheiden, könnte man auch gleich den Haupteffekt der Position des VI durch Post-hoc-Tests näher analysieren, ohne die SI-Dauer zu berücksichtigen. Eine solche Analyse würde den Unterschieden zwischen den SI-Dauern jedoch nicht gerecht werden, die theoretisch jedoch von Bedeutung sind. Dementsprechend führte ich Post-hoc-Tests zur Ermittlung von Positionsunterschieden erst auf Ebene der einfaktoriellen ANOVAs durch und nahm in Kauf, dass die Positionseffekte mit weniger statistischer Power analysiert werden. Auch wenn sich dadurch z.T. die Leistungsverbesserung über die ersten Positionen hinweg auf der Ebene der einzelnen SI-Dauern in den individuellen Experimenten mittels Post-hoc-Tests statistisch nicht immer so zuverlässig nachweisen lassen, so akkumuliert sich die schwache Evidenz eines einzelnen Experimentes für einen Positionseffekt über mehrere Experimente hinweg zu einem einheitlichen Bild.

Eine detaillierte Auswertung des Effektes der SI-Dauern selbst z.B. durch eine gezielte Prüfung, ob sich Leistungsunterschiede zwischen den 150- und 250-ms SI-Sequenzen nachweisen lassen, wurde nicht vorgenommen. Die drei SI-Dauern wurden nur eingeführt, um in jedem Durchgang eine Adaptation der Periode (Dynamic-Attending-Theorie) bzw. Anpassung der Gedächtnisrepräsentation (Multiple-Look-Modell) zu erzwingen. Unterschiede zwischen den SI-Dauern werden zudem vom Weberschen Gesetz her erwartet, sie stehen aber nicht in direktem Bezug zur Fragestellung dieser Arbeit und dementsprechend werden Ergebnisse hierzu nicht im Detail berichtet.

Der Einfluss des Faktors ISI-Dauer und des Präsentationsmodus wurde durch einen Vergleich der Experimente 1-2(-3) und 5-6 überprüft. Da ein Vergleich zwischen unterschiedlichen Versuchspersonengruppen durchgeführt werden musste, wurde eine ANOVA ohne Messwiederholung zur Analyse der Ergebnisse verwendet. In Experiment 7 war aufgrund des Designs jedoch auch für den Faktor ISI-Dauer eine Überprüfung mittels ANOVA mit Messwiederholung möglich und wurde dementsprechend durchgeführt.

Wenn nicht anders erwähnt, wurde bei der Interpretation der Analysen immer ein Signifikanzniveau von  $\alpha = .05$  zugrunde gelegt. Die berichteten p- und  $\epsilon$ -Werte der ANOVAs für Innersubjekt-Faktoren sowie deren Interaktionen mit Zwischensubjekt-Faktoren sind nach Greenhouse-Geisser korrigiert worden.

### 2.1.2. Ergebnisse

Abbildung 4 zeigt die Wahrnehmungsleistung für die Erkennung eines abweichenden Intervalls der Sequenz in Abhängigkeit der SI-Dauer sowie der Position des VI in Experiment 1. Wie nach dem Weberschen Gesetz zu erwarten verschlechterte sich die Wahrnehmungsleistung mit zunehmender SI-Dauer. Die Unterschiedsschwellen für die 50-ms SI-Sequenzen fallen gegenüber den 150-ms SI-Sequenzen geringer aus und die 250-ms SI-Sequenzen weisen die höchsten Werte auf. Eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung für die Faktoren SI-Dauer und Position des VI für die relativierten .75-Unterschiedsschwellen (.75-Unterschiedsschwelle/SI-Dauer) zeigte einen signifikanten Effekt für den Faktor SI-Dauer,  $F(2, 34) = 17.03, p < .001, \eta^2_p = .64, \varepsilon = .51$ , und ebenso für den Faktor Position des VI,  $F(6, 102) = 18.61, p < .001, \eta^2_p = .52, \varepsilon = .32$ . Auch die Interaktion der beiden Faktoren wurde signifikant,  $F(12, 204) = 8.46, p < .001, \eta^2_p = .33, \varepsilon = .23$ . Eine nähere Analyse des Haupteffektes SI-Dauer mittels Bonferroni Post-hoc-Tests zeigte, dass sich nur die 50-ms SI-Sequenz von den 150- und 250-ms SI-Sequenzen unterschied, während kein signifikanter Unterschied zwischen den 150- und 250-ms SI-Sequenzen zeigte.

Eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung auf Basis der absoluten .75 Unterschiedsschwellenwerte belegt einen signifikanten Einfluss des Faktors SI-Dauer,  $F(2, 34) = 56.44, p < .001, \eta^2_p = .77, \varepsilon = .64$ . Des Weiteren erwies sich Wahrnehmungsleistung als abhängig von der Position des VI, wie der signifikante Haupteffekt des Faktors Position des VI zeigt,  $F(6, 102) = 21.19, p < .001, \eta^2_p = .55, \varepsilon = .34$ . Abbildung 4 zufolge verbessert sich die Wahrnehmungsleistung von Position 1 an bis hin zu Position 6, um an Position 7 wieder eine deutlich schlechtere Leistung aufzuweisen. Das Ausmaß der Leistungsverbesserung scheint dabei von der SI-Dauer abzuhängen. Bei den 50-ms SI-Sequenzen zeigt sich die Leistungsverbesserung nur geringfügig (Differenz Position 1-6: 12.39 ms). Bei den 150-ms SI-Sequenzen hingegen ist sie schon deutlicher ausgeprägt (Differenz Position 1-6: 42.00 ms) und am stärksten bei den 250-ms SI-Sequenzen (Differenz Position 1-6: 82.33 ms). Diese Interaktion der Innersubjekt-Faktoren SI-Dauer und Position des VI erweist sich auch als statistisch signifikant,  $F(12, 204) = 10.37, p < .001, \eta^2_p = .38, \varepsilon = .29$ .

Um den Effekt der Position auf die Wahrnehmungsleistung genauer zu untersuchen, wurden einfaktorielle ANOVAs und Bonferroni Post-hoc-Tests für jede

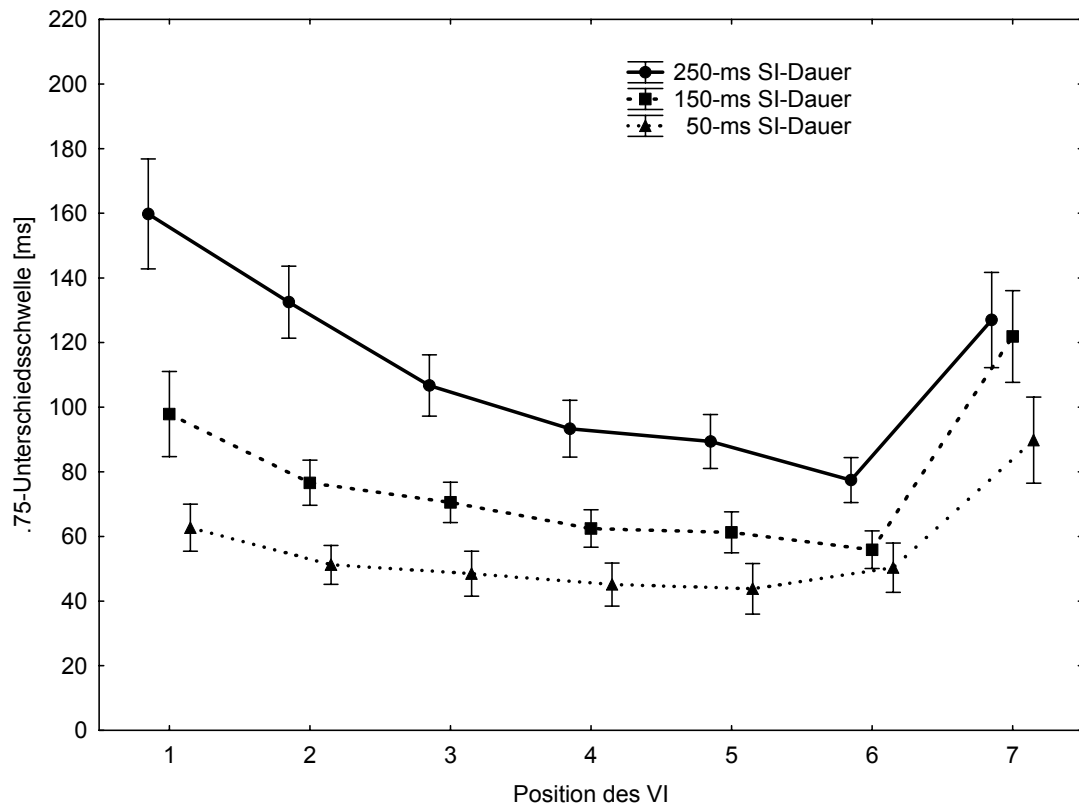
der drei SI-Dauern separat durchgeführt, um zu prüfen, ob der Faktor Position des VI in allen SI-Dauern signifikante Unterschiede evoziert hat, so wie es die Dynamic-Attending-Theorie und das Multiple-Look-Modell vorhersagen. Der Einfluss des Faktors Position des VI auf die Wahrnehmungsleistung erwies sich als signifikant,  $F(6, 102) = 12.78, p < .001, \eta^2_p = .43, \varepsilon = .34$ . Bonferroni Post-hoc -Tests zeigen, dass sich jedoch nur die Position 7 von allen anderen Positionen in der Diskriminationsleistung signifikant unterscheidet (Position 7 > 1-6). Auch für die 150-ms SI-Sequenzen konnte ein signifikanter Einfluss der Position des VI auf die Diskriminationsleistung nachgewiesen werden,  $F(6, 102) = 17.02, p < .001, \eta^2_p = .50, \varepsilon = .40$ . Post-hoc-Vergleiche zwischen den verschiedenen Positionen zeigten signifikante Unterschiede zwischen den Positionen 1 und 3-6 sowie zwischen Positionen 2-6 und Position 7 (Position 1 > 3-6; Position 7 > 2-6). Die Analyse der 250-ms SI-Sequenzen mittels einfaktorieller ANOVA mit Messwiederholung zeigte ebenfalls einen signifikanten Einfluss der Position des VI auf die Diskriminationsleistung,  $F(6, 102) = 19.52, p < .001, \eta^2_p = .53, \varepsilon = .41$ . Bonferroni Post-hoc-Tests zeigten, dass sich Position 1 von den Positionen 3-7, Position 2 von den Positionen 4-6, Position 3 von Position 1 und 6, Positionen 4 und 5 von Positionen 1-2 und 7, Position 6 von Positionen 1-3 und 7, als auch Position 7 sich signifikant von den Positionen 1 und 4-6 unterscheiden (Position 1 > 3-7; Position 2 > 4-6; Position 3 > 6; Position 7 > 1 & 4-6).

Die Ergebnisse der einfaktoriellen ANOVAs belegen somit einen Effekt der Position des VI auf die Wahrnehmungsleistung, wonach sich für jede der SI-Dauern Unterschiede insbesondere vor allem zwischen den ersten Intervallen und Intervallen in der Mitte der Sequenz, sowie zwischen dem letzten Intervall und den übrigen Positionen ergeben. Dieser Effekt fällt unterschiedlich stark für die unterschiedlichen SI-Dauern aus und zeigt sich am deutlichsten für die 250-ms SI-Sequenz und unterstreicht somit die Beobachtungen der zweifaktoriellen ANOVA.

### 2.1.3. Diskussion

Ziel des ersten Experimentes war es zu überprüfen, ob sich die Diskriminationsleistung für einen in seiner Dauer abweichenden Reiz (VI) durch die Präsentation mehrerer SI-Dauern vor ihm verbessern lässt. Während kontextinsensitive Zeitwahrnehmungsmechanismen, wie z.B. das Impulsgeber-Zähler-Modell, davon ausgehen, dass die Position des VI keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsleistung hat, sagen kontextsensitive Mechanismen, wie das Multiple-

Look-Modell oder die Dynamic-Attending-Theorie eine Verbesserung der Leistung vorher. Die unterschiedlichen Vorhersagen lassen sich experimentell überprüfen und können somit helfen, den für die Verarbeitung der Sequenzen zugrundeliegenden Mechanismus näher zu bestimmen.



**Abbildung 4:** .75-Unterschiedsschwelle und Standardfehler des Mittelwerts in Abhängigkeit von der Dauer der Standardintervalle (SI-Dauer) und der Position des variablen Intervalls (Position des VI) in Experiment 1.

Wie das Webersche Gesetz es vorhersagt, ergaben sich signifikante Unterschiede zwischen den drei SI-Dauern. Die absoluten Werte der Unterschiedsschwellen erhöhen sich mit Zunahme der SI-Dauer, während die relativen Werte (.75-Unterschiedsschwelle/SI-Dauer) nahezu konstant bleiben. Wobei der Weberbruch der 50-ms SI-Sequenz sich von den 150- und 250-ms SI-Sequenzen unterscheidet, die 150- und 250-ms SI-Sequenzen sich aber nicht mehr voneinander unterscheiden. Dieses Ergebnis steht in Einklang mit dem verallgemeinerten Weberschen Gesetz und mit vorherigen Untersuchungen zur Rhythmuswahrnehmung (Drake & Botte, 1993; Hirsh et al., 1990; McAuley & Kidd, 1998; Schulze, 1989; ten Hoopen et al.,

1994; Übersichtsartikel: Friberg & Sundberg, 1995) und findet sich auch bei Paarvergleichsaufgaben (z.B. Getty, 1975).

Hinsichtlich des Einflusses der Position des VI zeigten die durchgeführten Varianzanalysen einen Effekt der Position auf die Wahrnehmungsleistung durchgehend für alle SI-Dauern. Dieser Effekt ist besonders bei den 250 ms SI-Sequenzen ausgeprägt. Er wird mit kürzeren SI-Dauern geringer, was die Anzahl der signifikanten Post-hoc-Tests als auch die Interaktion der Faktoren SI-Dauer und Position des VI belegen. Während vor allem zwischen den Intervallen an den Positionen 1-3 Verbesserungen der Diskriminationsleistung festzustellen sind, scheint der Effekt mit oder nach dem dritten Intervall der Sequenz bereits zu saturieren. Eine weitere Verbesserung der Leistung ist nicht mehr zu beobachten, vor allem bei kürzeren SI-Dauern. Dieses Leistungsprofil befindet sich in Einklang mit der Dynamic-Attending-Theorie und dem Multiple-Look-Modell, die beide vorhersagen, dass sich mit einer steigenden Anzahl an SI-Dauern die Erkennungsleistung eines folgenden abweichenden Intervalls durch eine akkuratere interne Repräsentation verbessern sollte. Dieser Effekt sollte nach einer bestimmten Anzahl an Intervallen geringer werden, sobald die interne Repräsentation der SI-Dauer eine gewisse Exaktheit erreicht hat. Das Impulsgeber-Zähler-Modell hingegen sagt voraus, dass die Position des VI keinen Einfluss auf die Diskriminationsleistung haben sollte und keinerlei Unterschiede zwischen den Positionen feststellbar sein sollten. Dementsprechend sprechen die Daten aus Experiment 1 gegen statische Impulsgeber-Zähler-Modelle und für dynamische Modelle wie die Dynamic-Attending-Theorie oder das Multiple-Look-Modell.

Die beobachtete Interaktion der Faktoren SI-Dauer und Position des VI kann inhaltlich dadurch erklärt werden, dass sich eine Leistungsverbesserung immer dann gut beobachten lassen sollte, wenn die Wahrnehmung generell schlecht ist, weil ein Optimierungsprozess viel besser größere als kleinere Defizite optimieren kann. Ist eine Zeitdauerrepräsentation bereits gut, so kann sie nur wenig verbessert werden. Wie die Analyse der SI-Dauern ergab, sind zwischen den SI-Dauern deutliche Leistungsunterschiede hinsichtlich ihrer absoluten Werte zu beobachten gewesen. Es werden dabei von verschiedenen Theorien zur Zeitwahrnehmung unterschiedliche Ursachen für diese Unterschiede zwischen den SI-Dauern, die dem verallgemeinerten Weberschen Gesetz entsprechen, diskutiert (Bizo, Chu, Sanabira, & Killeen, 2006; Gibbon & Church, 1990; Hass, Blaschke, Rammsayer, &

Herrmann, 2008; Killeen & Weiss, 1987; Staddon & Higa, 1999). Letztlich gehen alle Modelle davon aus, dass lange Dauern weniger genau repräsentiert werden als kurze Dauern. Dementsprechend sollte sich also eine Leistungsverbesserung eher bei langen als bei kurzen SI-Dauern finden lassen, so wie es letztlich auch die Ergebnisse des ersten Experiments zeigten.

Keines der Modelle sagt allerdings den plötzlichen Leistungsabfall an der siebten Position der Sequenz vorher, der in allen drei SI-Sequenzen zu beobachten ist. Dass es sich hierbei um einen zufälligen Effekt handelt, ist unwahrscheinlich, zumal auch Repp (1992) in seinen Experimenten einen solchen Effekt beobachten konnte. Er untersuchte zwar Musikstücke, fand aber ebenfalls heraus, dass am Ende einer Sequenz Abweichungen in der Dauer von Tönen schwerer zu erkennen sind als in der Mitte des Stücks. Repp erklärt diesen Effekt durch musikalische Erwartungen. In der westlichen Musik ist es üblich, den letzten Ton eines Stücks zu verlängern. Durch diese Gewöhnung muss der letzte Ton einer Sequenz sehr stark verlängert werden, damit auffällt, dass dieser verlängert worden ist. Wenn der letzte Ton einer Sequenz anders verarbeitet wird als Töne innerhalb der Sequenz, so könnte dies auch erklären, warum z.B. Schulze (1989) oder ten Hoopen et al. (1995) keinen Effekt mehrfacher SI-Dauer-Präsentationen auf die Diskriminationsleistung gefunden haben. Sie variierten die Anzahl der Intervalle in der Sequenz und präsentierten das abweichende Intervall immer nur an der letzten Position in der Sequenz. Mit der Erhebung der Diskriminationsleistung aller Positionen wie in dieser Studie ist es im Gegensatz zu den Studien von Schulze (1989) oder ten Hoopen et al. (1995) möglich, ein komplettes Leistungsprofil zu erstellen und Besonderheiten wie die Verarbeitung des letzten Intervalls zu erkennen.

Durch die Konstanthaltung der Sequenzlänge ist es außerdem möglich, auch etwaige Ermüdungs- oder Gedächtniseffekte auszuschließen, die die Erkennungsleistung reduzieren und somit den positiven Effekt mehrfacher SI-Dauer-Präsentationen überlagern könnten. Die Ergebnisse belegen deutlich, dass sich eine Leistungsverbesserung mit steigender Anzahl an SI-Dauer-Präsentationen auch bei Sequenzen nachweisen lässt, in denen eine konstante Anzahl an Intervallen verwendet wird. Bisher wurde das nur für Sequenzen, in denen die Anzahl an Intervallen variierte, belegt.

Die Ergebnisse des ersten Experiments zeigen darüber hinaus auch auf, dass der Effekt mehrfacher SI-Dauer-Präsentationen nicht allein für den Bereich leerer

Intervalle gültig zu sein scheint, sondern ebenfalls für gefüllte Intervalle gilt. Wurden in vorherigen Studien (Barnes & Jones, 2000; Berens & Pastore, 2005; Drake & Botte, 1993; Ivry & Hazeltine, 1995; McAuley & Jones, 2003; McAuley & Kidd, 1998; Miller & McAuley, 2005; Rousseau & Rousseau, 1996; ten Hoopen & Akerboom, 1983) leere Intervalle verwendet, so generalisieren die Ergebnisse dieses Experimentes den positiven Effekt mehrfacher SI-Dauer-Präsentationen auf die Wahrnehmungsleistung auf gefüllte Intervalle.

Anstatt das Leistungsprofil von Experiment 1 mit Hilfe der Dynamic-Attending-Theorie oder des Multiple-Look-Modells zu erklären, kann man auch andere Alternativen diskutieren. Eine Möglichkeit wäre es, eine Verbesserung der Leistung von Position 1-3 über allgemeine Effekte aus der Aufmerksamkeitsforschung zu erklären. Geht man davon aus, dass Aufmerksamkeit eine bestimmte Zeit benötigt, um die Wahrnehmungsleistung zu verbessern (Cheal & Lyon, 1991; Müller & Rabbitt, 1989), so könnte dies auf den ersten Blick die schlechte Leistung am Anfang der Sequenzen erklären. Angenommen, Aufmerksamkeit müsste erst auf die Sequenz gelenkt werden und es würde 150 ms dauern, damit es zu Leistungsverbesserungen kommt, dann wäre erklärlich, warum sich die Leistung bei den 50-ms SI-Sequenzen über die ersten Intervalle hinweg verbessert. Denn bis 150 ms vergangen sind, sind bereits zwei Intervalle erklingen, die damit ohne volle Aufmerksamkeitszuwendung verarbeitet wurden. Dies sollte sich negativ auf die Wahrnehmungsleistung im Vergleich zu folgenden Intervallen auswirken, was mit den Daten konsistent ist. Allerdings sollte sich dieser Effekt für Intervallsequenzen mit längeren SI-Dauern verringern. Gerade bei den 250-ms SI-Sequenzen sollte nur noch das erste Intervall teilweise betroffen sein, aber die folgenden Intervalle sollten bereits die volle Aufmerksamkeit erhalten und schon eine sehr gute Leistung feststellbar sein. Doch es zeigte sich, dass gerade bei den 250-ms SI-Sequenzen sich die Leistung bis hin zum dritten Intervall noch deutlich verbesserte. Eine Zeitspanne von mehr als 500 ms (SI-Dauer und ISI-Dauer sind zu addieren) bis zur Entfaltung der vollen Wirkung der Aufmerksamkeit anzunehmen, widerspricht Befunden aus anderen Untersuchungen (Cheal & Lyon, 1991; Müller & Rabbitt, 1989). Zudem ist unter der Annahme, dass Aufmerksamkeit Zeit benötigt, um ihre Wirksamkeit zu erzielen, nicht ersichtlich, weswegen bei den 50-ms SI-Sequenzen die Leistung zu Beginn nicht deutlich schlechter ist und sich nicht noch über das dritte Intervall hinaus verbessert.



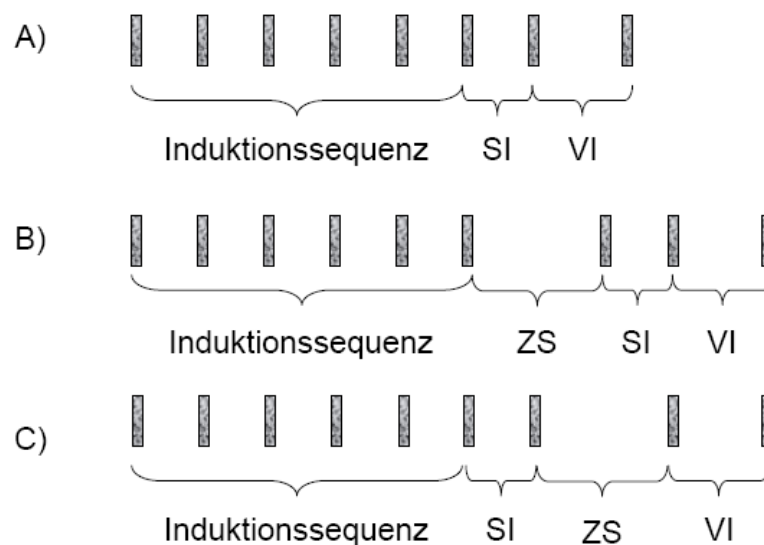
Wenn man sich das Leistungsprofil anschaut, wird man möglicherweise auch an Leistungsprofile aus der Gedächtnispsychologie, wie die der seriellen Wortlernaufgabe (serial-recall-task) erinnert. In diesem Test wird den Versuchspersonen eine Liste von Wörtern, die ihnen nacheinander genannt oder gezeigt werden, präsentiert. Die Versuchspersonen müssen sich während der Präsentation die einzelnen Wörter merken und am Ende des Experiments korrekt wiedergeben. Was man typischerweise bei einer solchen Aufgabe findet, sind Unterschiede in der Leistung zwischen Wörtern vom Anfang und Ende der Serie im Vergleich zu Wörtern aus der Listenmitte. Allerdings werden die zu Anfang und am Ende einer Liste befindlichen Wörter akkurater wiedergegeben (man spricht von einem Primacy- und Recency-Effekt) als die in der Mitte präsentierten Wörter (Atkinson & Shiffrin, 1968; Wiswede, Rüsseler & Münte, 2007). Das Leistungsprofil des ersten Experimentes steht also in direktem Widerspruch zu dem, was man aus der seriellen Wortlernaufgabe kennt, denn im Paradigma von Experiment 1 werden die ersten Intervalle und das letzte Intervall der Sequenz am schlechtesten und die in der Mitte präsentierten Intervalle am besten verarbeitet.

## 2.2. Experiment 2: Einfluss der ISI-Dauer auf die Wahrnehmungsleistung

Die Ergebnisse von Experiment 1 legen nahe, das nicht kontextsensitive Impulsgeber-Zähler-Modell als der Zeitwahrnehmung zugrunde liegenden Mechanismus auszuschließen und kontextsensitiven Modellen wie der Dynamic-Attending-Theorie und dem Multiple-Look-Modell den Vorzug zu geben. In einem weiteren Schritt sollen in diesem Experiment die Vorhersagen der Dynamic-Attending-Theorie und des Multiple-Look-Modells in Bezug auf den Einfluss der ISI-Dauer auf die Wahrnehmungsleistung miteinander verglichen und empirisch überprüft werden. Denn beide Modelle unterscheiden sich in ihren Vorhersagen, inwieweit sich die ISI-Dauer auf die Diskriminationsleistung auswirkt. Das Multiple-Look-Modell geht davon aus, dass die einzelnen Intervalle voneinander unabhängig enkodiert werden und die ISI-Dauer ebenso separat, wenn überhaupt, enkodiert werden. Die ISI-Dauern haben daher dem Multiple-Look-Modell zufolge keinen Einfluss auf die Erkennungsleistung der gefüllten Intervalle. Im Gegensatz dazu geht

die Dynamic-Attending-Theorie davon aus, dass die ISI-Dauern einen entscheidenden Einfluss auf die Erkennungsleistung ausüben. Wenn der Oszillator der Dynamic-Attending-Theorie genutzt wird, um die zeitliche Struktur äußerer Vorgänge intern abzubilden, so können die ISI-Dauern nicht ignoriert werden. Ihnen kommt vielmehr eine tragende Bedeutung zu. Wenn es um die Genauigkeit einer Zeitschätzung mittels Oszillatoren geht, dann kommt es nicht nur darauf an, dass die Periode des Oszillators sich an die präsentierten Reizdauern angepasst hat. Entscheidend ist vielmehr auch, dass der Vergleichsreiz synchron (d.h. in Phase) mit dem inneren oszillatorischen Prozess startet. Der Dynamic-Attending-Theorie zufolge wird ein Unterschied zwischen zwei Dauern dann entdeckt, wenn ein Unterschied in der Phase zwischen Oszillator und präsentiertem Reiz bemerkt wird (siehe Abbildung 2). Endet ein Reiz früher, als man es basierend auf dem aktuellen Stand des oszillatorischen Prozesses erwarten würde, so kann man davon ausgehen, dass die präsentierte Dauer kürzer war. Man würde in diesem Fall von einer negativen Phasenverschiebung sprechen. Zu einer positiven Phasenverschiebung kommt es, wenn der präsentierte Reiz länger als die Periode des oszillierenden Prozesses war und somit das Ende des präsentierten Intervalls zeitlich nach dem Ablauf der Periodendauer des Oszillators zu verorten ist. Zeitliche Unterschiede werden dementsprechend über Differenzen der Phase, über die Asynchronizität zwischen Reizdauer und Periode, entdeckt. Vergleichsreiz und Oszillator verlieren aber ihre Synchronizität nicht nur durch Unterschiede zwischen der Vergleichsreizdauer und Periode, sondern auch, sobald die Zeit zwischen dem Standard- und Vergleichsreiz (ZS) nicht der Standarddauer bzw. der Periode des Oszillators entspricht. Berens und Pastore (2005) untersuchten diesen Zusammenhang mit einem ähnlichen Paradigma wie Barnes und Jones (2000). Sie präsentierten ihren Versuchspersonen eine Induktionssequenz aus fünf isochronen leeren Intervallen. Darauf folgte ein weiteres Standardintervall, das mit dem folgenden Vergleichsreizintervall (VI) hinsichtlich seiner Länge verglichen werden sollte. Dieses Intervallpaar konnte unmittelbar an die Sequenz anschließen (Abbildung 5A). In diesem Fall würde der Oszillator synchron mit dem Klick, der den Anfang des Vergleichsreizes markiert, starten. Wäre der Vergleichsreiz länger oder kürzer, würde sich eine Asynchronizität zwischen dem Klick, der das Ende des Vergleichsreiz-Intervalls markiert, und dem Ende der Periode des Oszillators ergeben. Wird jedoch der Standard- und der Vergleichsreiz (Abbildung 5B) oder

auch nur der Vergleichsreiz (Abbildung 5C) nicht mehr unmittelbar nach der Induktionssequenz präsentiert und die Zeit zwischen der Induktionssequenz oder zwischen Standard und Vergleichsreiz variiert, dann kann es passieren, dass die Periode und der Klick, der den Anfang des Vergleichsreizes markiert, nicht mehr synchron erfolgen. Nur wenn die Dauer des ZS der Periodendauer entspricht, starten Vergleichsreiz und Periode synchron und Unterschiede zwischen Standarddauer und Vergleichsreiz werden durch eine Asynchronizität zwischen Periode und Klick, der das Ende des Vergleichsreiz-Intervalls markiert, erkennbar.



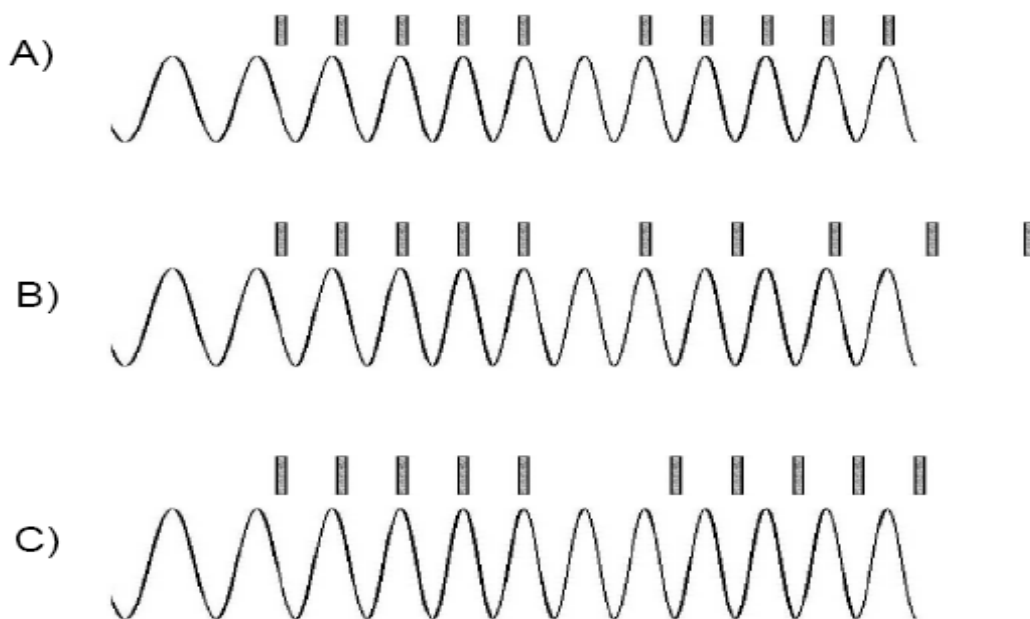
**Abbildung 5:** Versuchsdesign von Berens und Pastore (2005). Um eine Asynchronizität zwischen oszillierendem Prozess und den auditiv dargebotenen Klicks (graue Rechtecke) zu erreichen, variierten Berens und Pastore (2005) die Zeit (ZS) zwischen dem Standardintervall (SI) und dem Vergleichsreizintervall (VI): A) Kontrollbedingung ohne ZS B) ZS-Dauer zwischen Induktions und SI wird variiert C) ZS-Dauer zwischen SI und VI wird variiert.

Wenn jedoch bereits zu Beginn des Vergleichsreizes eine Asynchronizität zwischen Klick und Oszillator besteht und diese auch noch am Ende des Intervalls vorhanden besteht, dann ist unklar, ob diese Asynchronizität aufgrund einer abweichenden Intervall- bzw. Periodendauer oder aber aufgrund eines nicht synchronen Starts entstanden ist. Die Asynchronizität am Anfang des Vergleichsreiz-Intervalls müsste durch eine Phasenverschiebung des oszillierenden Prozesses ausgeglichen werden, um einen guten Vergleich zwischen Periodendauer und Vergleichsreizdauer möglich zu machen. Berens und Pastore (2005) konnten in ihren

Experimenten nachweisen, dass bei ZS-Dauern, die der Standarddauer entsprachen, die Diskriminationsleistung im Vergleich zu Bedingungen, bei denen die Standarddauern nicht der ZS-Dauer entsprachen, deutlich verbessert war. Dementsprechend stehen die experimentellen Befunde in Einklang mit Oszillatorbasierten Zeitwahrnehmungs-Mechanismen. Diese sagen einen negativen Einfluss abweichender ZS-Dauern und einen positiven Einfluss von ZS-Dauern die der Standarddauer entsprechen, auf die Diskriminationsleistung vorher.

Einen ähnlichen Untersuchungsansatz wie den von Berens und Pastore (2005) verwendeten auch bereits McAuley und Kidd (1998), um die Vorhersagen eines oszillatorbasierten Zeitwahrnehmungs-Mechanismus zu überprüfen. Die Autoren präsentieren den Versuchspersonen zwei Sequenzen mit leeren Intervallen, die sich in ihrer Dauer unterschieden. Aufgabe der Versuchspersonen war es zu entscheiden, ob z.B. die zweite Sequenz schneller oder langsamer war als die erste (Tempowechsel-Diskriminationsaufgabe). In Abhängigkeit von der Anzahl an Standardreizen in der ersten Sequenz sollte sich die Periode des Oszillators während der ersten Sequenz auf diese Dauer mehr oder weniger gut einstellen. McAuley und Kidd (1998) variierten allerdings nicht nur die Anzahl der Intervalle in den Sequenzen, sondern auch die ZS-Dauer. Wenn die ZS-Dauer der Dauer der Standardintervalle oder Vielfachen dieser Dauer aus der ersten Sequenz entspricht, dann sollten zu Beginn der zweiten Sequenz die Intervalle und der Oszillator synchron (Abbildung 6A) sein. Wenn die Intervalle in der zweiten Sequenz kürzer oder länger sind als die der ersten Sequenz, dann sollte sich eine Asynchronizität zwischen Klicks und Oszillator ergeben. Diese Phasenverschiebung wäre als eine Veränderung in der zeitlichen Struktur der Intervalle der zweiten Sequenz gegenüber der ersten zu deuten (Abbildung 6B). Wenn die ZS-Dauer jedoch nicht der Standarddauer oder Vielfachen dieser entspricht (Abbildung 6C), so sollten Reiz und Periode des Oszillators bereits mit dem ersten Intervall nicht mehr synchronisiert sein. Selbst bei identischer Dauer der Intervalle aus der ersten und zweiten Sequenz sollte es zu einer Asynchronizität zwischen den Klicks und dem oszillatorischen Prozess kommen. Dementsprechend sollte es in einer solchen Situation schwer zu entscheiden sein, ob sich die Intervalle der zweiten Sequenz hinsichtlich ihrer Dauer von denen der ersten Sequenz unterscheiden. Dementsprechend wäre es für den oszillatorbasierten Mechanismus wichtig, synchron mit den Intervallen der zweiten Sequenz zu starten, ohne dabei die Periode zu verändern. Würde sich die Periode

des Oszillators durch die ZS-Dauer verändern, würde dies die exakte Repräsentation der durch die in der ersten Sequenz präsentierten Intervalle stören und einen Vergleich der Dauern der Intervalle der ersten und zweiten Sequenz erschweren. Dementsprechend müsste das System erst über eine Phasenverschiebung die Synchronizität von Periode und Beginn der zweiten Sequenz wiederherstellen, damit ein Vergleich der Periodendauer mit der Dauer der Intervalle der zweiten Sequenz zu guten Resultaten führen kann. Bis die Synchronizität durch Phasenverschiebung der Periode des Oszillators wiederhergestellt ist, sollte jedoch die Diskriminationsfähigkeit des Systems deutlich eingeschränkt sein.



**Abbildung 6:** A) Intervalle der Standard- und Vergleichssequenz haben dieselbe Dauer und die ZS-Dauer stellt ein Vielfaches der Standarddauer dar, d.h. der Beginn der zweiten Sequenz erfolgt synchron mit dem Beginn des oszillatorischen Prozesses. B) Dauer der Intervalle aus Standard- und Vergleichssequenz unterscheiden sich. Die Vergleichssequenz startet synchron mit dem Beginn des oszillatorischen Prozesses und Unterschiede zwischen den Dauern werden durch eine Asynchronizität von Periode und Vergleichssequenz erkennbar. C) Intervalle der Standard- und Vergleichssequenz haben dieselbe Dauer, die ZS-Dauer entspricht nicht der Standarddauer und dementsprechend kommt es zu einer Asynchronizität zwischen oszillierendem Prozess und Vergleichssequenz, obwohl die Dauern identisch sind.

Die Befunde von McAuley und Kidd (1998) stützen die These eines Einflusses der ZS-Dauer auf die Wahrnehmungsleistung nur bedingt (Effekte finden sich nur

auf Ebene des PSE, nicht aber auf Ebene der Variabilität der Urteile). Auch die Befunde von Berens und Pastore (2005) stützen die These von Oszillatormodellen nur teilweise (es wurde keine verbesserte Leistung für Vielfache der Standarddauer gefunden). Andere Studien, die ähnliche Untersuchungen durchführten, wie die von Schulze (1978), Keele, Nicolletti, Ivry, und Pokorny (1989), Ivry and Hazeltine (1995) oder Pashler (2001) finden ebenfalls keinen Effekt der ZS-Dauer auf die Diskriminationsleistung. Dementsprechend ist nach wie vor die Frage offen, ob die ZS-Dauer einen Effekt auf die Diskriminationsleistung hat, wie es oszillatorbasierte Modelle wie die Dynamic-Attending-Theorie vorhersagen oder eben nicht, wie es das Multiple-Look-Modell annimmt. Allen zuvor genannten Studien ist gemeinsam, dass sie leere Intervalle verwendeten. Dies stellt meiner Meinung nach einen Nachteil im Vergleich zur Verwendung von gefüllten Intervallen dar, da in einem solchen Paradigma nicht unterschieden werden kann, wodurch eine Leistungsver schlechterung entsteht. Denn das ZS ist in den Studien mit leeren Intervallen auch ein leeres Intervall und somit ist eigentlich unklar, ob Leistungsver schlechterungen durch eine Periodenadaptation an die ZS und/oder aufgrund von Phasenverschiebungen zu Beginn des/der Vergleichsreize(s) entsteht. Die Daten von McAuley und Jones (2003) legen zudem nahe, dass in der Regel sowohl Perioden- als auch Phasenadaptationen gleichzeitig erfolgen. Eine Adaptation der Periode (Dynamic-Attending-Theorie) unterscheidet sich nicht funktional von der Verbesserung eines Gedächtnisinhalts (Multiple-Look-Modell). Oszillatorbasierte Modelle unterscheiden sich aber vom Multiple-Look-Modell in Bezug auf die Annahme von Phasenverschiebungen. Wenn man zur Überprüfung des Einflusses von Phasenverschiebungen auf die Leistung ein leeres ZS-Intervall bei sonst auch leeren Standard- und Vergleichsintervallen nutzt, dann testet man womöglich nur eine Periodenadaptation und keine Phasenverschiebung, da sich die Periode an die Dauer des ZS anpasst, weil sich das ZS-Intervall nicht von den anderen Intervallen abhebt. Für eine einwandfreie experimentelle Überprüfung des Einflusses von Phasenverschiebungen darf das ZS-Intervall nicht zu einer Adaptation der Periode führen. Um den Einfluss der ZS-Dauer auf die Diskriminationsleistung besser testen zu können, empfiehlt es sich meiner Meinung nach, Sequenzen mit gefüllten Intervallen zu nutzen. Das erste Experiment hat ja bereits gezeigt, dass auch hier dieselben Prozesse wie bei leeren Intervallen stattzufinden scheinen. Gefüllte Intervalle haben gegenüber leeren Intervallen den Vorteil, dass sie durch leere

Intervalle voneinander getrennt werden müssen. Wenn die Aufgabe darin besteht, in den gefüllten Intervallen ein abweichendes Intervall zu entdecken, dann muss die Periode des Oszillators auf deren Dauer eingestellt werden. Sie sollte sich nur durch deren Dauer beeinflussen lassen, da die leeren Intervalle für die Aufgabe irrelevant sind. Die leeren Intervalle, die die gefüllten Intervalle separieren, lassen sich nutzen, um Phasenverschiebungen zwischen Intervallen und Periode des Oszillators zu erzeugen, ganz ähnlich wie bei den Überlegungen zur ZS. In Experiment 1 wurde die Dauer dieser ZS der Standarddauer der Intervalle angepasst (z.B. bei 50-ms SI-Sequenzen betragen die ISIs ebenfalls 50 ms). Dies sollte für ein Oszillatormodell eine optimale Situation darstellen, da keine Phasen oder Periodenadaptation für die ISIs, die in meinem Paradigma dem ZS-Intervall entsprechen, erfolgen müssen. In dem folgenden Experiment jedoch wurde durchgängig eine ISI-Dauer von 125 ms verwendet, unabhängig von der jeweiligen Standarddauer. 125-ms ISIs sollten Asynchronizitäten zwischen dem Oszillator und den Intervalldauern von Sequenzen mit 50-, 150- und 250-ms SI-Dauer evozieren, die vom System ausgeglichen werden müssen, um einen direkten Vergleich zwischen der Periodendauer und der Intervalldauer zu ermöglichen. Wurde in bisherigen Studien immer nur ein ZS-Intervall verwendet, sind es in dem in dieser Arbeit verwendeten Paradigma gleich sechs ZS-Intervalle, bedingt durch die Sequenz aus sieben gefüllten Intervallen, die durch die sechs ISIs getrennt werden. In einem solchen Fall gibt es für Oszillatormodelle zwei Möglichkeiten, die zeitlichen Eigenschaften einer solchen Sequenz abzubilden und zeitliche Abweichungen zu identifizieren.

1. Der Oszillator passt seine Periode an die Dauer der gefüllten Intervalle an, konkret an die Zeit von deren Anfang (Onset) bis zu deren Ende (Offset). Entspricht die ISI-Dauer der SI-Dauer, lässt sich die Abweichung eines VI dadurch erkennen, dass der Offset des VI nicht mehr synchron mit z.B. dem Maximum der Amplitude der Periode erfolgt (siehe Abbildung 7A). Bedingung hierfür ist allerdings, wie schon erwähnt, dass Phasenverschiebungen für jedes Intervall vorgenommen werden, damit Periode und Intervall gemeinsam starten. Entsprechen die ISIs hingegen nicht der SI-Dauer, entstehen Asynchronizitäten auch bei gleichen SI- und VI-Dauern (siehe Abbildung 7B). Wenn in einem solchen Fall für jedes Intervall erst eine Phasenkorrektur notwendig ist, um eine Synchronizität zwischen

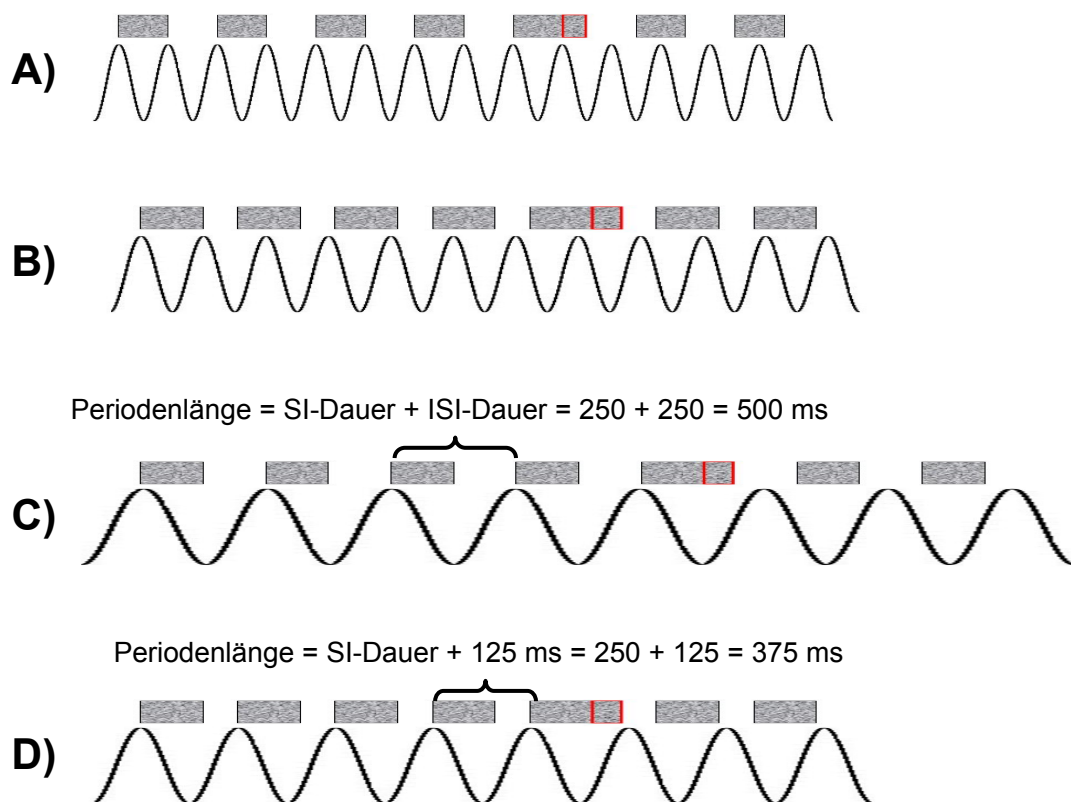
Intervallanfang und oszillierendem Prozess herzustellen, dann sollte sich dies negativ auf die Erkennungsleistung auswirken, da die notwendige Korrektur sicherlich nicht sofort und ohne Aufwand perfekt erfolgen kann.

2. Der Oszillator passt seine Periode an die Zeit zwischen den Onsets (oder Offsets) der gefüllten Intervalle an (siehe Abbildung 7C). Ein abweichendes Intervall würde in diesem Fall dadurch erkannt werden, dass der Onset des folgenden Intervalls verfrüht oder verspätet gegenüber dem oszillierenden Prozess erfolgt und so eine Asynchronizität von Reiz und Periodenbeginn entsteht. In diesem Fall müssen keine Phasenadaptationen vorgenommen werden, da die ISIs mit in die Periodendauer integriert werden. Einen Einfluss auf die Diskriminationsleistung sollte jedoch auch diese Variante der Enkodierung zeitlicher Informationen haben, da sich die Periodendauer auf diese Art und Weise zwischen Experiment 1 und 2 verändert (Vergleich Abbildung 7C und 7D). Die Ergebnisse von Experiment 1 zeigten einen deutlichen Einfluss der SI-Dauer auf die Diskriminationsleistung. Je länger die SI-Dauer, desto schlechter auch die Diskriminationsleistung, so wie es das Webersche Gesetz vorhersagt. Wenn man nun annimmt, dass der Oszillator seine Periode an die Dauer vom Onset des einen Intervalls bis zum Onset des folgenden Intervalls anpasst, so verlängert sich die Periode des Oszillators für die 50-ms SI-Sequenz zwischen Experiment 1 ( $50 + 50 = 100$  ms) und 2 ( $50 + 125 = 175$  ms). Die Dauer der Periode für die 250-ms SI-Sequenz hingegen würde reduziert, da sie im ersten Experiment  $250 + 250 = 500$  ms betrug und im zweiten Experiment  $250 + 125 = 375$  ms lang sein würde. Die Periodendauer für die Zeitschätzung der 150-ms SI-Sequenz würde in Experiment 2 ( $150 + 125 = 275$  ms) gegenüber Experiment 1 ( $150 + 150 = 300$  ms) etwas verkürzt werden. Diese Verkürzungen bzw. Verlängerungen sollten sich wie die Manipulation der SI-Dauer in der Diskriminationsleistung niederschlagen.

Dementsprechend sind für Oszillatormodelle, sowohl für die, die eine Onset-zu-Offset als auch die, die eine Onset-zu-Onset-Adaptation der Periode vornehmen, Unterschiede zwischen den Diskriminationsleistungen in Experiment 1 und 2 zu erwarten. Das Multiple-Look-Modell hingegen sagt voraus, dass es keinen



Unterschied macht, ob die ISI-Dauer der Dauer der SI-Dauer (wie in Experiment 1) angepasst wird oder aber konstant 125 ms in allen drei SI-Sequenzen beträgt. Die gefüllten Intervalle werden unabhängig voneinander enkodiert und die ISI-Dauern sollten dementsprechend auch keinen Einfluss auf die Diskriminationsleistung der gefüllten Intervalle haben. Damit bietet sich eine Möglichkeit, die Dynamic-Attending-Theorie und das Multiple-Look-Modell hinsichtlich ihrer unterschiedlichen Vorhersagen mit empirischen Ergebnissen zu vergleichen.



**Abbildung 7:** A) Onset-zu-Offset-Adaptation bei Interstimulusintervallen (ISIs), die der Standarddauer (SI) entsprechen B) Onset-zu-Offset-Adaptation bei ISIs von 125 ms, die nicht der SI-Dauer entsprechen C) Onset-zu-Onset-Adaptation bei ISIs, die der SI-Dauer D) Onset-zu-Onset-Adaptation bei ISIs von 125 ms, die nicht der SI-Dauer entsprechen

### 2.2.1. Methode

#### *Versuchspersonen*

18 Studierende (15 weiblich, 3 männlich) der Universität Göttingen im Alter von 19-45 Jahren ( $M = 24.5$ ;  $SD = 7.0$ ) nahmen am Experiment teil. Sie waren naiv

hinsichtlich der Fragestellung des Experiments. Für ihre Teilnahme wurde ihnen eine Versuchspersonenstunde attestiert.

### *Apparatur und Stimuli*

Wie in Experiment 1

### *Prozedur*

Die Prozedur entspricht der von Experiment 1 mit einer Ausnahme: Während die ISI-Dauern in Experiment 1 an die SI-Dauer angepasst wurden, wurden für alle drei SI-Dauern in diesem Experiment einheitlich 125 ms verwendet.

### *Design*

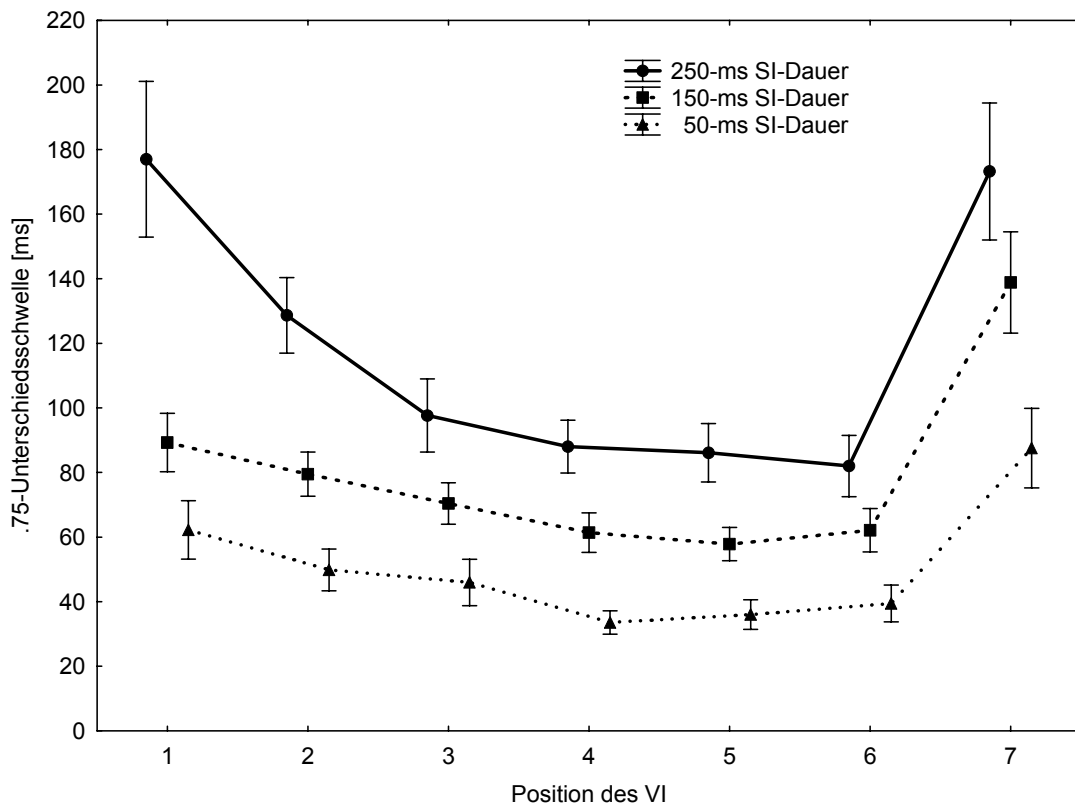
Wie in Experiment 1

## **2.2.2. Ergebnisse**

Abbildung 8 zeigt die Wahrnehmungsleistung für die Erkennung eines abweichenden Intervalls der Sequenz in Abhängigkeit der SI-Dauer sowie der Position des VI in Experiment 2. Wie zuvor auch schon in Experiment 1 verschlechterte sich die Wahrnehmungsleistung mit zunehmender SI-Dauer. So wurden die höchsten absoluten Wahrnehmungsschwellen für die 250-ms SI-Sequenzen, die niedrigsten für die 50-ms SI-Sequenzen ermittelt. Die Werte der 150-ms SI-Sequenzen lagen zwischen denen der 50- und 250-ms SI-Sequenzen. Die statistische Analyse der Ergebnisse mittels zweifaktorieller ANOVA mit Messwiederholung zeigte einen signifikanten Effekt des Faktors SI-Dauer auf die Wahrnehmungsleistung,  $F(2, 34) = 61.60, p < .001, \eta^2_p = .78, \varepsilon = .61$ . Dies steht in Einklang mit den Vorhersagen des Weberschen Gesetzes.

Der Haupteffekt des Faktors Position des VI erwies sich als ebenfalls signifikant,  $F(6, 102) = 24.47, p < .001, \eta^2_p = .59, \varepsilon = .35$ . Wie aus Abbildung 8 zu entnehmen ist und auch in Experiment 1 beobachtet wurde, verbesserte sich die Leistung über die ersten Intervalle hinweg. Für das letzte Intervall der SI-Sequenzen zeigte sich erneut eine reduzierte Wahrnehmungsleistung. Die Diskriminationsleistung der 50-ms SI-Sequenz verbesserte sich von Position 1 zu Position 6 um 22.78 ms, die der 150-ms SI-Sequenz um 27.17 ms und die der 250-ms SI-Sequenz gar um 95.00 ms. Die Verbesserung der Wahrnehmungsleistung über die ersten Intervalle der Sequenzen scheint dementsprechend deutlicher bei Sequenzen mit längeren als mit kürzeren SI-

Dauern auszufallen. Diese Beobachtung wurde durch die signifikante Interaktion der Faktoren SI-Dauer und Position des VI bestätigt,  $F(12, 204) = 9.67$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .36$ ,  $\varepsilon = .30$ .



**Abbildung 8:** .75-Unterschiedsschwelle und Standardfehler des Mittelwerts in Abhängigkeit von der Standarddauer (SI) und von der Position des variablen Intervalls (VI) in Experiment 2.

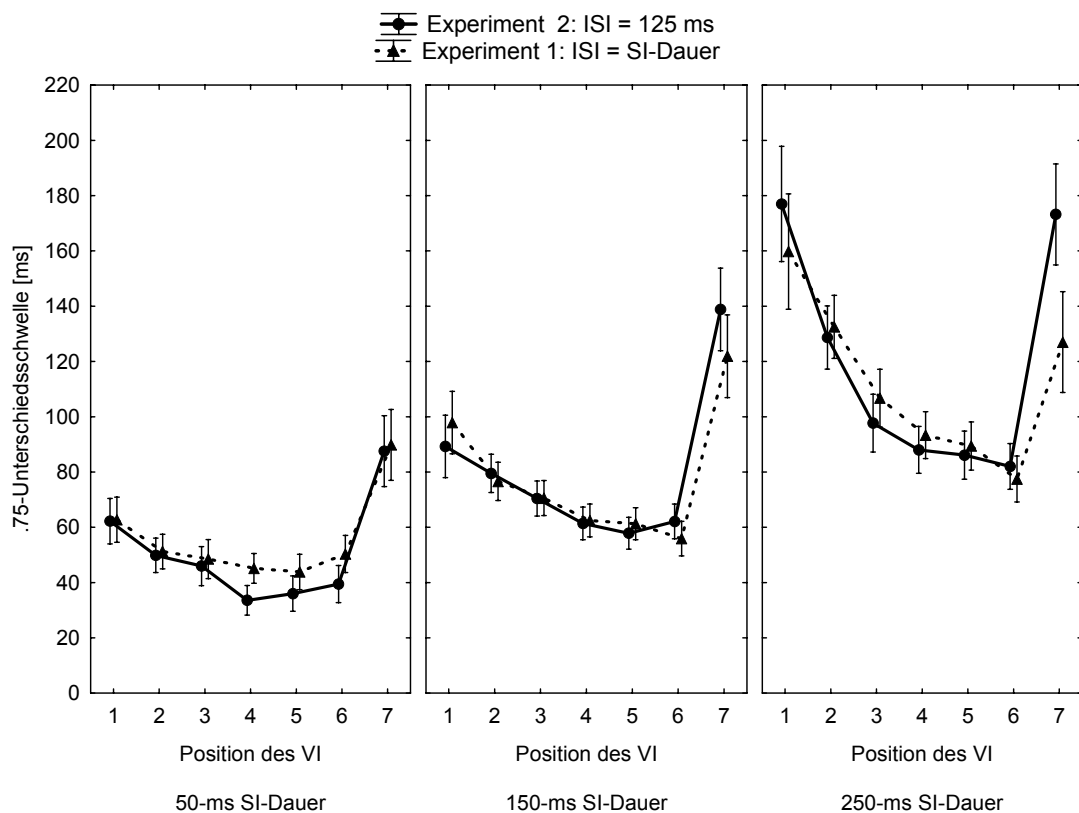
Um den Effekt der Position auf die Wahrnehmungsleistung näher zu untersuchen, wurden einfaktorielle ANOVAs für die drei SI-Dauern separat durchgeführt. Die Analyse der 50-ms SI-Sequenz bestätigte einen signifikanten Effekt der Position des VI auf die Wahrnehmungsleistung,  $F(6, 102) = 14.48$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .46$ ,  $\varepsilon = .38$ . Post-hoc-Tests zeigten zudem die folgenden signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Positionen: Position 1 > 4-7; Position 7 > 1-6. Ein signifikanter Einfluss der Position des VI auf die Wahrnehmungsleistung konnte auch für die 150-ms SI-Sequenz nachgewiesen werden,  $F(6, 102) = 26.78$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .61$ ,  $\varepsilon = .38$ . Bonferroni Post-hoc-Tests ergaben signifikante Unterschiede zwischen den folgenden Positionen: Position 1 > 4-7; Position 7 > 1-6. Eine weitere einfaktorielle

ANOVA mit Messwiederholung wurde auch für die 250-ms SI-Sequenz durchgeführt und bestätigte wiederum einen Einfluss der Position des VI auf die Wahrnehmungsleistung,  $F(6, 102) = 18.99, p < .001, \eta^2_p = .53, \varepsilon = .38$ . Innerhalb der 250-ms SI-Sequenz unterschieden sich die folgenden Positionen signifikant voneinander: Position 1 > 2-6; Position 2 > 5-6; Position 7 > 2-6. Dementsprechend bestätigen die einfaktoriellen ANOVAs sowie die Post-hoc-Tests einen Einfluss der Position des VI auf die Wahrnehmungsleistung für alle drei SI-Dauern. Dieser Positionseffekt resultiert aus einer Verbesserung der Leistung über die ersten Positionen der Sequenz hinweg und einem deutlichen Leistungsabfall für das jeweils letzte Intervall der Sequenz. Der Effekt der Leistungsverbesserung ist bei längeren SI-Dauern deutlicher ausgeprägt als bei kurzen SI-Dauern.

Ziel von Experiment 2 war es, nicht nur die Ergebnisse von Experiment 1 zu replizieren, sondern vor allem auch die Bedeutung der ISIs, die in unserem Paradigma der ZS-Dauer anderer Untersuchungen (Berens & Pastore, 2005; McAuley & Kidd, 1998) entsprechen, auf die Diskriminationsleistung zu untersuchen. Abbildung 9 zeigt die Wahrnehmungsleistung für die Erkennung eines abweichenden Intervalls der Sequenz in Abhängigkeit der SI-Dauer, der Position des VI sowie der ISI-Dauer in den Experimenten 1 und 2. Aus Abbildung 9 wird ersichtlich, dass es keine nennenswerten Leistungsunterschiede zwischen beiden Versuchen gibt. Um dieses statistisch zu prüfen, wurde zunächst eine dreifaktorielle ANOVA über die Faktoren SI-Dauer (50, 150 und 250 ms), Position des VI (Position 1-7) und ISI-Dauer (Experiment 1 = SI-Dauer; Experiment 2 = 125 ms) durchgeführt. Wie erwartet zeigte sich ein signifikanter Einfluss der Faktoren SI-Dauer und Position des VI auf die Wahrnehmungsleistung,  $F(2, 68) = 117.69, p < .001, \eta^2_p = .78, \varepsilon = .66$  und  $F(6, 204) = 44.92, p < .001, \eta^2_p = .57, \varepsilon = .35$ . Die Interaktion zwischen den Faktoren SI-Dauer und Position des VI, die auf eine deutlichere Leistungsverbesserung bei längeren im Vergleich zu kürzeren SI-Dauern hinweist, erwies sich ebenfalls als signifikant,  $F(12, 408) = 17.17, p < .001, \eta^2_p = .34, \varepsilon = .35$

Im Gegensatz dazu wurde der Zwischensubjekt-Faktor ISI-Dauer nicht signifikant,  $F(1, 34) = .009, p = .92, \eta^2_p = .0003$ . Dies belegt statistisch die Beobachtung, dass sich die Leistungen in den Experimenten 1 (ISI = SI-Dauer) und 2 (ISI = 125 ms) nicht unterscheiden und die vorgenommene Manipulation der ISI-Dauer keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsleistung ausgeübt hat (siehe Abbildung

9). Ebenso erreichten die Interaktionen ISI-Dauer und SI-Dauer sowie ISI-Dauer und Position des VI nicht das Signifikanzniveau,  $F(2, 68) = 1.08, p = .32, \eta^2_p = .03, \epsilon = .66$  und  $F(6, 204) = 1.52, p = .22, \eta^2_p = .04, \epsilon = .35$ . Die Dreifachinteraktion SI-Dauer, Position des VI und ISI-Dauer hingegen wurde signifikant,  $F(12, 408) = 2.79, p < .05, \eta^2_p = .08, \epsilon = .35$ . Die separate Analyse der einzelnen SI-Dauern und Positionen in Bezug auf die ISI-Dauer zeigten keinerlei signifikante Unterschiede bei den durchgeführten einfaktoriellen ANOVAs oder Bonferroni Post-hoc-Tests. Die Leistung in Experiment 1 unterschied sich an keiner Position bei allen drei SI-Dauern signifikant von der Leistung in Experiment 2.



**Abbildung 9:** Vergleich der Ergebnisse aus Experiment 1 und 2: .75-Unterschiedsschwelle und Standardfehler des Mittelwerts in Abhängigkeit von der Standarddauer (SI), der Position des variablen Intervalls (VI) und der Interstimulusintervall-Dauer (ISI).

### 2.2.3. Diskussion

Die Ergebnisse aus Experiment 2 ähneln denen von Experiment 1 und unterstützen deren Bedeutung. Erneut bestätigten sie sowohl die Gültigkeit des

verallgemeinerten Weberschen Gesetzes, denn mit längeren SI-Dauern kam es zu einer Erhöhung der Unterschiedsschwellen-Werte. Zudem konnte wiederum eine Verbesserung der Diskriminationsleistung mit einer zunehmenden Anzahl an SI-Präsentationen über die ersten Intervalle der Sequenz bis zur Saturation des Effekts nach spätestens dem dritten Intervall beobachtet werden. Dieser Effekt der Verbesserung der Leistung über die Positionen hinweg war deutlicher zu beobachten bei längeren SI-Dauern. Dies kann wiederum dadurch erklärt werden, dass bei einer schlechteren Repräsentation der längeren SI-Dauern Verbesserungen durch einen Optimierungsprozess deutlicher hervortreten können als bei einer bereits genaueren Repräsentation kurzer SI-Dauern. Auch der enorme Leistungsabfall an der jeweils letzten Position der Sequenz war, wie zuvor schon in Experiment 1, auch in Experiment 2 zu beobachten. Die Daten aus beiden Experimenten unterstützen somit kontextsensitive Modelle wie die Dynamic-Attending-Theorie als auch das Multiple-Look-Modell. Sie sprechen gegen Modelle, wie das klassische Impulsgeber-Zähler-Modell, die von einer unabhängigen Verarbeitung der einzelnen Intervalle ausgehen.

Ziel von Experiment 2 war es vor allem, der Frage nachzugehen, inwieweit das ISI einen Einfluss auf die Wahrnehmungsleistung hat. Während dem Multiple-Look-Modell zufolge das ISI keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsleistung haben sollte, sollte der Dynamic-Attending-Theorie zufolge die ISI-Dauer die Wahrnehmung beeinflussen. Sollte es sich um einen oszillatorbasierten Verarbeitungsmechanismus handeln und dieser seine Periode an die Zeitdauer zwischen dem Onset und dem Offset eines Intervalls anpassen, so wäre zu erwarten, dass die Diskriminationsleistung der 50-, 150-, und 250-ms SI-Sequenzen in Experiment 1 im Vergleich zu Experiment 2 besser ausfällt. Passt hingegen der Oszillator seine Periode an die Zeit zwischen den Onsets der Intervalle an, sollten die 50-ms SI-Sequenz in Experiment 1 besser diskriminierbar sein als in Experiment 2. Die Leistung der 150-ms SI-Sequenz sollte gegenüber Experiment 1 geringfügig verbessert sein, während sich die Diskriminationsleistung der 250-ms SI-Sequenz im Vergleich zu Experiment 1 und 2 verschlechtern sollte. Der Vergleich der Ergebnisse von Experiment 1 und 2 sollte es dementsprechend erlauben zu klären, ob eher von einem oszillatorbasierten Mechanismus oder einem Multiple-Look-Modell als dem Zeitwahrnehmung zugrundeliegendem Prozess auszugehen ist. Die Ergebnisse der beiden Versuche stehen in Einklang mit der Vorhersage des Multiple-Look-Modells, da sich die Dauer der ISIs, die in bisherigen Untersuchungen mit leeren Intervallen,

wie denen von Berens und Pastore (2005) oder auch McAuley und Kidd (1998) der ZS-Dauer entsprechen, nicht auf die Wahrnehmungsleistung auswirkt. Auch wenn der Vergleich der Leistung der Experimente keine signifikanten Unterschiede zeigt und somit das Multiple-Look-Modell diese korrekt vorhersagt, so handelt es sich dennoch um einen Nulleffekt, der schwer zu interpretieren ist, vor allem weil es sich um ein Zwischensubjekt-Vergleich handelt. Diesen Nulleffekt auf unterschiedliche Stichproben zurückzuführen, die sich möglicherweise in ihrem Leistungsniveau grundsätzlich unterscheiden, erscheint angesichts der Ergebnisse der 150-ms SI-Sequenzen als unwahrscheinlich. Denn die 150-ms SI-Sequenzen unterschieden sich nur wenig hinsichtlich des ISIs (150 ms in Experiment 1 und 125 ms in Experiment 2) und grundsätzliche Leistungsunterschiede zwischen beiden Gruppen, die nicht auf den Faktor ISI-Dauer zurückzuführen sind, sollten sich in den 150-ms SI-Sequenzen zeigen. Auch wenn die Ergebnisse nicht direkt das Multiple-Look-Modell bestätigen, so widersprechen die Ergebnisse jedoch den Vorhersagen der oszillatorbasierten Modelle. Weder passen die Daten zu einem Oszillatormodell, das seine Periode vom Onset zum Offset eines Intervalls anpasst, noch zu einem, das seine Periode an die Zeit zwischen dem Onset eines Intervalls zum Onset des nächsten Intervalls anpasst. Im ersten Fall wäre zu erwarten gewesen, dass ISIs, die nicht der SI-Dauer entsprechen, sich generell negativ auf die Wahrnehmungsleistung auswirken, da zusätzliche Phasenkorrekturen notwendig wären. Die Leistung verschlechterte sich allerdings in Experiment 2 (ISI = 125 ms) im Vergleich zu Experiment 1 (ISI = SI-Dauer) nicht signifikant. Während McAuley und Kidd (1998) sowie Berens und Pastore (2005) lediglich ein ZS veränderten, um ihre These eines oszillatorbasierten Verarbeitungsmechanismus durch Phasenverschiebungseffekte zu testen, wurden in diesem Experiment gleich sechs ZS-Intervalle/ISIs bei drei verschiedenen SI-Dauern verändert, um Phasenkorrekturen zu evozieren. Doch trotz dieser Verschärfung der Bedingung in durch das Paradigma der Experimente 1 und 2 konnte in keiner einzigen Messung eine Leistungsverschlechterung beobachtet werden, wie sie zuvor McAuley und Kidd (1998) sowie Berens und Pastore (2005) fanden. Dieses Ergebnis ist nicht mit den Vorhersagen der Dynamic-Attending-Theorie in Einklang zu bringen.

Im Fall einer Onset-zu-Onset-Adaptation der Periode wäre aufgrund des Weberschen Gesetzes zu erwarten gewesen, dass die Leistung der 50-ms SI-Sequenz in Experiment 1 besser als in Experiment 2 ausfällt, da die Dauer der Periode im

ersten Experiment 100 ms betragen sollte, während sie im zweiten Experiment 175 ms lang sein sollte. Hingegen sollte sich die Leistung der 250-ms SI-Sequenz in Experiment 2 gegenüber der von Experiment 1 verbessern, da die Periode im zweiten Experiment 375 ms und im ersten Experiment 500 ms hätte betragen müssen. So wie die drei SI-Dauern sich in ihrer Wahrnehmungsleistung unterscheiden, sollten die ISIs zu ähnlichen Effekten führen, da die Unterschiede in der Dauer der SI- und ISI-Intervalle in derselben Größenordnung liegen und sich somit nicht durch eine zu geringe Manipulation der ISI-Dauer erklären lassen. Da keinerlei signifikante Veränderung der Wahrnehmungsleistung zwischen Experiment 1 und 2 gefunden werden konnte, spricht das Ergebnis gegen die Annahme eines Oszillators als Zeitwahrnehmungs-Mechanismus für die in den Experimenten 1 und 2 präsentierten Sequenzen mit gefüllten Intervallen. Die Ergebnisse der Experimente befinden sich statt dessen im Einklang mit den Studien von Schulze (1978), Keele et al. (1989), Ivry und Hazeltine (1995) und Pashler (2001), die mit verschiedenen Untersuchungsparadigmen mit leeren Intervallen ebenfalls keine Leistungsver schlechterung durch verschiedene ZS-Dauern feststellen konnten und deshalb ebenfalls zu dem Schluss kamen, die Annahme einer oszillatorbasierten Verarbeitung von Zeitinformationen abzulehnen.

### 2.3. Experiment 3: Einfluss der Anzahl an Intervallen in der Sequenz auf die Wahrnehmungsleistung

Ich hatte andere Studien kritisiert, die die Anzahl der Intervalle in einer Sequenz nicht konstant hielten, sondern unterschiedlich viele Intervalle in einer Sequenz präsentierten, um die Anzahl an SIs zu manipulieren. Unterschiedlich lange Sequenzen könnten allerdings Konfundierungen wie Gedächtnislimitationen, Habituation oder Ermüdung mit sich bringen und den Effekt stören, der durch unterschiedlich viele SI-Präsentationen entsteht. Die ersten zwei Experimente dieser Arbeit konnten zeigen, dass die Anzahl an SI-Präsentationen einen signifikanten Einfluss auf die Wahrnehmungsleistung hat, auch wenn die Anzahl der Intervalle konstant gehalten wurde. Unklar ist allerdings, inwieweit tatsächlich die Verwendung unterschiedlich vieler Intervalle die Wahrnehmungsleistung zusätzlich verändert. Vor allem ist auch der deutliche Abfall der Wahrnehmungsleistung am



Ende der Sequenz bislang ungeklärt und könnte mit einer Gedächtnislimitation erklärt werden. Es existieren unterschiedliche Theorien, um Gedächtniseffekte zu erklären (für einen Überblick siehe Cowan, 2000). Im Wesentlichen handelt es sich um zwei Erklärungsansätze, die für das in dieser Arbeit verwendete Paradigma von Interesse sein könnten: Während der eine Erklärungsansatz ein Kapazitätsproblem als Ursache für Veränderungen der Gedächtnisleistung ansieht (Lisman & Idiart, 1995; Miller, 1956), geht der andere hingegen davon aus, dass die Zeit bis zum Wiederabruf von Informationen als Ursache für eingeschränkte Gedächtnisleistungen anzusehen ist (Baddeley, 1986, 2007). So geht z.B. Miller (1956) in seinem kapazitätslimitierten Ansatz davon aus, dass nur eine bestimmte Anzahl an Informationen gespeichert werden kann, weil nur eine bestimmte Anzahl an Speicherplätzen zur Verfügung steht (ca. sieben Speicherplätze). Ähnlich diesem vom Miller (1956) postulierten magical-number-seven Phänomen könnten möglicherweise dem Zeitverarbeitungs-Mechanismus nur ca. sechs Speicherplätze zur Verfügung stehen. Ein weiteres siebtes Intervall könnte dementsprechend nicht mehr gespeichert werden. Dies würde erklären, warum die Leistung für das siebte Intervall in den ersten beiden Experimenten so schlecht ausfällt. Ähnliches könnte auch bei einem zeitlimitierten Gedächtnis passieren, das man mit einem Tonband vergleichen könnte. Ein Tonband für die Aufzeichnung von Tönen ist nicht unendlich, sondern hat eine bestimmte Länge. Ist das Tonband abgelaufen, so können neue Informationen nicht mehr gespeichert werden oder aber andere Informationen werden wieder überschrieben, ein zeitliches „Gedächtnislimit“. Insbesondere bei einem solchen Gedächtnis ist hervorzuheben, dass erst alle Intervalle einer Sequenz abgespeichert und die Dauern der Intervalle erst am Ende der Sequenz miteinander verglichen werden, also offline analysiert werden, indem sozusagen das gesamte „Tonband“ dem Entscheidungsprozess übergeben wird. Beide Ansätze gehen davon aus, dass die Wahrnehmungsleistung bei Sequenzen mit weniger Intervallen besser ausfallen sollte, als wenn Sequenzen mit mehr Intervallen präsentiert werden. Dem kapazitätslimitierten Ansatz und den bisherigen Ergebnissen zufolge sollte dies vor allem bei Sequenzen mit mehr als sechs Intervallen zutreffen, da die Leistung für das siebte Intervall bereits deutlich reduziert war.

Wenn die Gedächtnisleistung von der Zeit zwischen der Präsentation eines Items und seinem Abruf abhängt, so wie das Baddeley (1986, 2007) annimmt, und es

schwieriger ist, sich an Items zu erinnern, die vor längerer Zeit präsentiert wurden, da in der Zwischenzeit die Informationen im Gedächtnis verblassen, so sagt ein solches Gedächtnissystem eine Verbesserung der Wahrnehmungsleistung auch über eine Reihe von Intervallen vorher und das in Abhängigkeit von der Dauer der Intervalle. Wenn man eine 250-ms SI-Sequenz mit sieben Intervallen hört, vergeht mehr Zeit zwischen der Präsentation des ersten Intervalls und seinem Abruf am Ende der Sequenz als im Vergleich zu einer 50-ms SI-Sequenz. Dementsprechend könnte man erklären, warum sich gerade die Leistung der 250-ms SI-Sequenz über die ersten Intervalle verbessert, denn bei dieser Sequenz ist die Zeit zwischen der Präsentation des ersten Intervalls besonders lang. Die Dauer des ersten Intervalls kann damit schwieriger wieder abgerufen werden als im Vergleich zu einer 50-ms SI-Sequenz, in der zwischen der Präsentation des ersten Intervalls und dem Ende der Sequenz weniger Zeit vergangen ist. Die Ergebnisse der ersten beiden Experimente zeigen genau ein solches Bild, die Wahrnehmungsleistung der ersten Intervalle einer Sequenz sind schlechter als die späterer Intervalle und dieser Effekt verstärkt sich mit der SI-Dauer. Allerdings passt der Leistungsabfall am Ende einer Sequenz nicht zu diesem Modell, da das letzte Intervall ja erst kurz vor dem Ende der Sequenz präsentiert wurde, also am wenigsten Zeit zwischen der Präsentation und dem Abruf vergangen ist. Hervorzuheben ist bei einem solchen Erklärungsansatz, dass immer erst nach der Präsentation der ganzen Sequenz eine Entscheidung gefällt wird, ob ein Intervall der Sequenz von den anderen Intervallen abgewichen ist.

Als Alternative zu diesen Gedächtnis-Ansätzen kann man eine Onlineverarbeitung der Intervalle sehen, wonach die Aufgabe dadurch gelöst wird, dass schon während der Präsentation der Sequenz unmittelbar nach der Präsentation eines Intervalls dessen Dauer mit der Dauer eines zuvor oder danach präsentierten Intervalls verglichen wird. Diese Annahme steht im Gegensatz zu den vorherigen Gedächtnismodellen, wo erst alle Intervalle gespeichert werden und dann eine Offline-Analyse am Ende der Sequenz einsetzt. Die existierenden Zeitwahrnehmungsmodelle erklären die absolut höheren Werte für Unterschiedsschwellen für die verschiedenen SI-Dauern unterschiedlich (siehe hierzu Bizo, et al., 2006; Gibbon & Church, 1990; Killeen & Fetterman, 1988; Hass, et al., 2008). Durch die Annahme unterschiedlicher Fehler auf verschiedenen Verarbeitungsstufen entsteht bei allen Modellen letztlich eine schlechtere Repräsentation von längeren Dauern. Geht man davon aus, dass der Fehler mit

zunehmender Enkodierungsdauer zunimmt, so kann man sich fragen, ob die Leistung bei einer insgesamt längeren Sequenz schlechter ausfällt als bei einer kürzeren Sequenz. Geht man davon aus, dass die gesamte Sequenz in ihrer Länge als Ganzes (holistisch) verarbeitet wird, wie in der Tonbandmetapher angedeutet, so akkumuliert sich der Fehler den verschiedenen Modellen zufolge über diese Gesamtsequenzlänge. Wird die Sequenz jedoch Intervall für Intervall verarbeitet (analytisch), so akkumuliert der Fehler den Modellen zufolge immer nur während einer Intervalldauer. Bei einer Online-Verarbeitung würde man davon ausgehen, dass die Anzahl der Intervalle innerhalb einer Sequenz keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsleistung hat, da die Sequenz nicht als Ganzes sondern in Paaren verarbeitet wird.

In den Experimenten 1 und 2 wurde die Gesamtsequenzlänge durch die verwendeten SI-Dauern variiert. Um zu prüfen, welchen Einfluss die Gesamtsequenzlänge auf die Wahrnehmungsleistung hat, wurde in einem weiteren Experiment die SI-Dauer konstant gehalten und die Gesamtsequenzlänge über die Anzahl der Intervalle in der Sequenz variiert. Geht man davon aus, dass das Gedächtnis kapazitäts- und/oder zeitlimitiert ist, sollte durch Verwendung einer geringeren Anzahl an Intervallen die Leistung besser sein als im Vergleich zu einer Sequenz mit vielen Intervallen. Hat das Gedächtnis z.B. nur 6 Speicherplätze zur Verfügung, sollte es zu keinen Problemen kommen, wenn fünf Intervalle verarbeitet werden. Wird durch eine Sequenz aus neun Intervallen das Kapazitäts- oder Zeitlimit hingegen überschritten, sollte es zu Problemen bei der Speicherung von Intervallen kommen. Ein solches Problem sollte nicht entstehen, wenn die Intervalle online bzw. analytisch miteinander verglichen werden. Intervalle müssen einem solchen Verarbeitungsmodus zufolge nur kurz gespeichert werden und können gleich wieder überschrieben werden. Somit sollte kein Kapazitäts- oder Zeitlimitproblem entstehen. Auch sollten sich bei einer Online-Verarbeitung Fehler, die bei der Enkodierung der Intervalle auftreten können, nur in Abhängigkeit der SI-Dauer zeigen. D.h. wenn nur eine SI-Dauer verwendet wird, dann sollte sich eine Sequenz aus fünf oder neun Intervallen auch nicht grundsätzlich in ihrem allgemeinen Leistungsniveau unterscheiden. Bei einer holistischen Verarbeitung hingegen sollten sich Enkodierungsfehler über die ganze Sequenz hinweg akkumulieren und sich somit die Leistung zwischen Sequenzen mit unterschiedlich vielen Intervallen unterscheiden, auch wenn nur eine SI-Dauer verwendet wird.

### 2.3.1. Methode

#### *Versuchspersonen*

18 Studierende (17 weiblich, 1 männlich) der Universität Göttingen im Alter von 19-32 Jahren ( $M = 22.72$ ;  $SD = 3.32$ ) nahmen am Experiment teil. Sie waren naiv hinsichtlich der Fragestellung des Experiments. Für ihre Teilnahme wurde ihnen eine Versuchspersonenstunde attestiert.

#### *Apparatur und Stimuli*

Wie in Experiment 1-2

#### *Prozedur*

Die Prozedur entspricht der von Experiment 2 mit zwei Ausnahmen: Anstelle von sieben Intervallen verwendeten wir nun auch Sequenzen mit fünf und neun Intervallen. Die Anzahl an Intervallen wechselte von Durchgang zu Durchgang zufällig. Die Dauer der SI betrug immer nur 150 ms (50- und 250-ms SI-Sequenzen wurden nicht mehr getestet), um den Versuchspersonen den Abschluss des Experiments innerhalb einer Stunde zu ermöglichen.

#### *Design*

Der Faktor Position des VI bestand je nach Anzahl an Intervallen pro Sequenz (5, 7 oder 9 Intervalle) aus entweder 5 Stufen (Positionen 1-5 = 5 Intervall-Sequenz), 7 Stufen (Positionen 1-7 = 7 Intervall-Sequenz) oder 9 Stufen (Positionen 1-9 = 9 Intervall-Sequenz). Dadurch ergeben sich 21 Bedingungen, in denen jede Versuchsperson getestet wurde. Um die Erkennungsleistung der Versuchsperson in jeder der 21 Bedingungen zu ermitteln, wurde sie 32-mal in derselben Bedingung getestet, was zu einer Anzahl von 672 experimentellen Durchgängen führt.

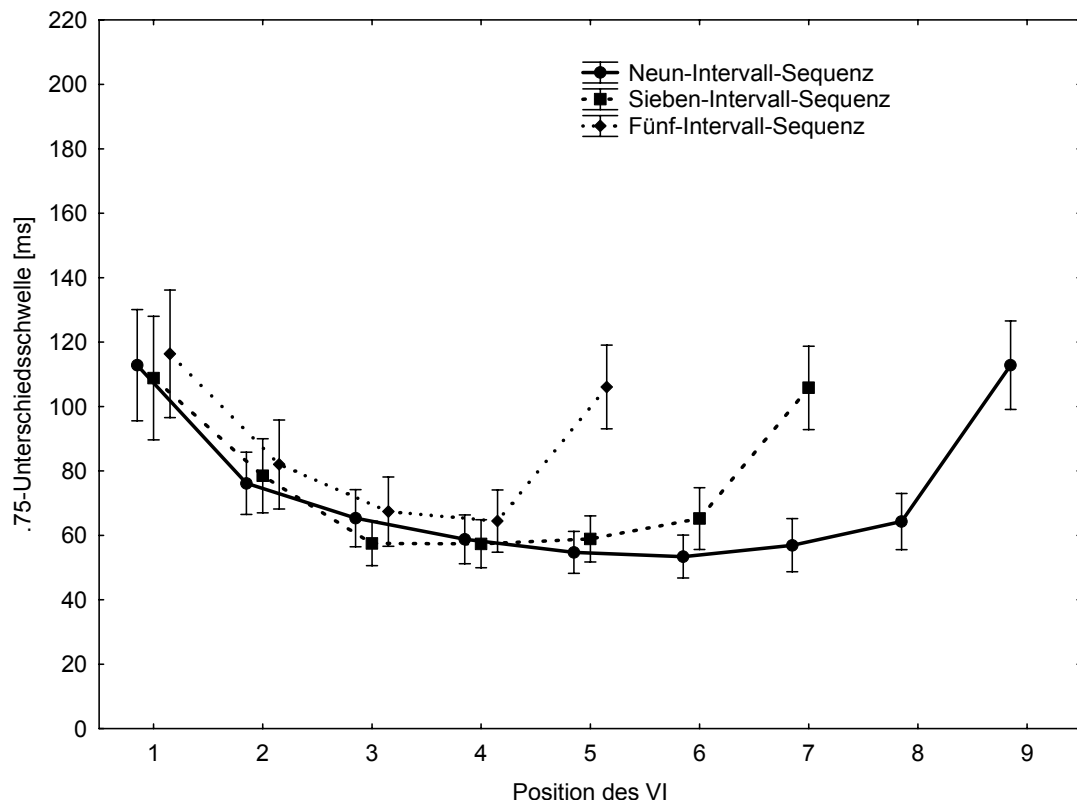
### 2.3.2. Ergebnisse

Abbildung 10 veranschaulicht die durchschnittliche Wahrnehmungsleistung eines abweichenden Intervalls in Abhängigkeit von der Position des VI und der Anzahl der Intervalle in der Sequenz in Experiment 3. Wie aus der Abbildung ersichtlich ähnelt das Leistungsprofil der Sequenzen mit fünf, sieben und neun Intervallen stark dem aus den vorherigen zwei Versuchen. Die Diskriminationsleistung scheint sich für jede der Intervallsequenzen mit zunehmender Anzahl an präsentierten SI-Dauern über die ersten Intervalle hinweg zu verbessern und an der jeweils letzten Position

wieder zu verschlechtern. Dass die Wahrnehmungsleistung tatsächlich von der Position des VI abhängt, belegen einfaktorische ANOVAs mit Messwiederholung, die für die Fünf-, Sieben- und Neun-Intervallsequenzen separat durchgeführt wurden. Für die Fünf-Intervall-Sequenz ergab sich ein signifikanter Effekt der Position des VI,  $F(4, 68) = 9.33, p < .001, \eta^2_p = .35, \varepsilon = .47$ . Die Analyse mittels Bonferroni Post-hoc-Tests ergab folgende signifikante Unterschiede zwischen den Positionen: Position 1 > 2-4, Position 5 > 3-4. Auch für die Sequenz mit sieben Intervallen zeigte sich ein signifikanter Einfluss der Position des VI auf die Wahrnehmungsleistung,  $F(6, 102) = 11.64, p < .001, \eta^2_p = .41, \varepsilon = .37$ . Bonferroni Post-hoc-Tests bestätigten signifikante Unterschiede zwischen den folgenden Positionen: Position 1 > 2-6; Position 7 > 3-6. Ähnliche Ergebnisse wurden auch für die Sequenz mit neun Intervallen beobachtet,  $F(8, 136) = 16.62, p < .001, \eta^2_p = .49, \varepsilon = .33$ . Es ergaben sich Bonferroni Post-hoc-Tests zufolge signifikante Unterschiede zwischen den folgenden Positionen: Position 1 > 2-8; Position 7 > 2-8. Die Analysen bestätigten somit, dass sich die Wahrnehmungsleistung zwischen den Positionen unterschieden, was vor allem auf die erste und letzte Position der Sequenzen zurückzuführen war. Ein starker Leistungsabfall wie in den Experimenten zuvor konnte auch in diesem Experiment bei dem jeweils letzten Intervall der Sequenz gefunden werden. Dies galt für alle drei Sequenzen, unabhängig von der Anzahl der präsentierten Intervalle.

Das allgemeine Leistungsniveau der unterschiedlich langen Sequenzen unterschied sich, wie aus Abbildung 10 erkennbar, nahezu überhaupt nicht. Für alle drei Sequenzen ergaben sich ähnlich hohe Wahrnehmungsschwellen. Um diese Beobachtung statistisch zu prüfen, wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit den Faktoren Anzahl der Intervalle in der Sequenz und Position des VI durchgeführt. Da erneut für alle Sequenzen der Endeffekt auftrat und sich diese Position als besonders herausstellte, wurde eine Analyse nur auf Basis der ersten vier Intervalle der Sequenzen durchgeführt, da diese Positionen in allen Sequenzen vergleichbar sind (unter Einbeziehung der Position 5 wäre z.B. bereits der Endeffekt der Fünf-Intervall-Sequenz mit in die Analyse aufgenommen werden, jedoch nicht der Endeffekt in den anderen Intervall-Sequenzen). Der Faktor Anzahl der Intervalle in der Sequenz wurde nicht signifikant,  $F(2, 34) = 1.37, p = .26, \eta^2_p = .07, \varepsilon = .57$ . Dies steht in Einklang mit der Beobachtung, dass sich die drei Sequenzen in ihrer Wahrnehmungsleistung an den ersten vier vergleichbaren Positionen nicht unterscheiden. Das der Faktor Position des VI signifikant wurde,  $F(3, 51) = 13.41,$

$p < .01$ ,  $\eta_p^2 = .44$ ,  $\varepsilon = .37$ , zeigt dass die beobachtete Leistungsverbesserung statistisch bedeutsam ist. Die Interaktion zwischen den beiden Faktoren erwies sich hingegen als nicht signifikant,  $F(6, 102) = .34$ ,  $p = .81$ ,  $\eta_p^2 = .02$ ,  $\varepsilon = .54$ . Die Leistungsverbesserung über die ersten vier Positionen hinweg erfolgt dementsprechend nicht unterschiedlich bei einer unterschiedlichen Anzahl an Intervallen in der Sequenz.

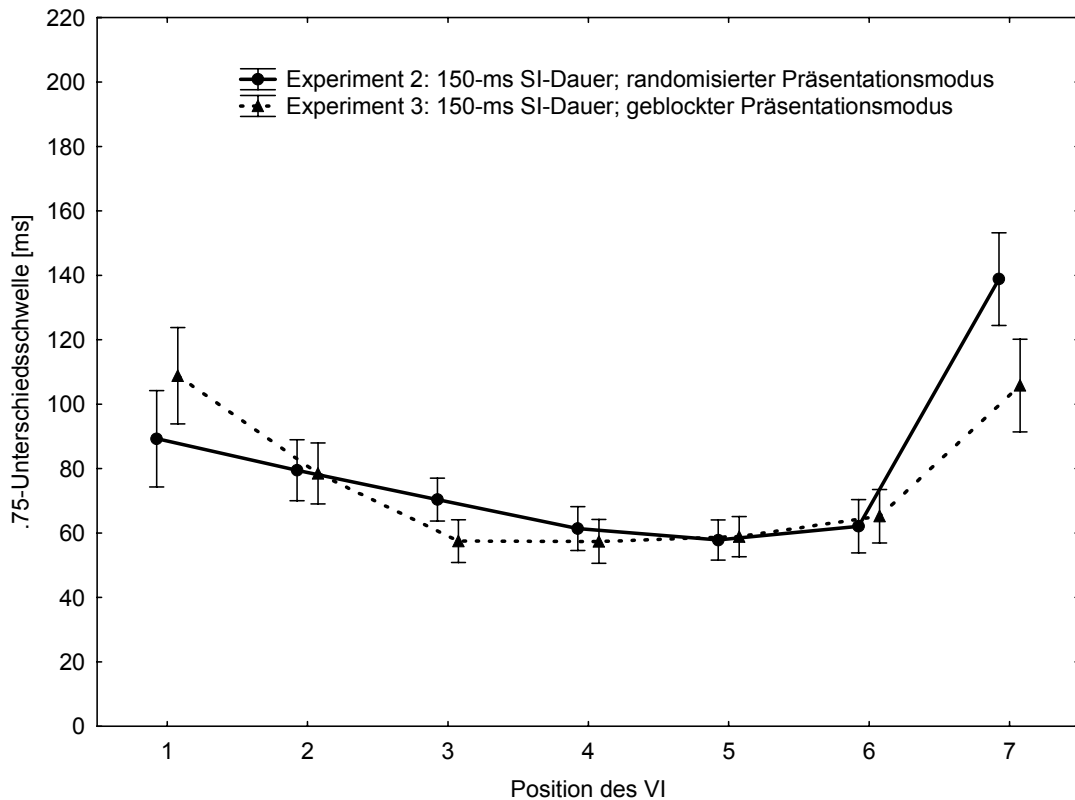


**Abbildung 10:** .75-Unterschiedsschwelle und Standardfehler des Mittelwerts in Abhängigkeit von der Position des variablen Intervalls (VI) und von der Anzahl der Intervalle in der Sequenz in Experiment 3

Da in diesem Experiment nur 150-ms SI-Sequenzen benutzt wurden, während in den vorherigen Experimenten die SI-Dauer über die Durchgänge hinweg zwischen 50, 150 und 250 ms SI-Dauern wechselten, wurde eine weitere Analyse durchgeführt, um die Ergebnisse aus Experiment 2 mit denen von Experiment 3 zu vergleichen. In beiden Experimenten wurden Sequenzen mit sieben Intervallen, 150 ms SI-Dauer und 125 ms ISIs verwendet. Miller und McAuley (2005) hatten in ihrem ersten Experiment keine Verbesserung der Wahrnehmungsleistung mit einer

zunehmenden Anzahl an Intervallen ausmachen können. Sie führten dies darauf zurück, dass sich bei der Darbietung nur einer Intervalldauer der Oszillator nach wenigen Durchgängen an die präsentierte Dauer angepasst hätte und daher keine Verbesserung der Leistung mehr zu beobachten sei. Um eine fortlaufende Adaptation der Periode des Oszillators beobachten zu können, verwendeten sie in ihrem zweiten Experiment unterschiedliche SI-Dauern, die von Durchgang zu Durchgang wechselten, und konnten daraufhin eine Verbesserung der Wahrnehmungsleistung mit zunehmender Anzahl an Intervallen beobachten. Sie fassen daher zusammen: “that with a fixed standard interval, participants develop a stable long-term referent for the standard tempo that overrides any advantage conferred by multiple presentations of the standard interval, but that with a roving standard, they are less able to form such a stable tempo referent“ (S. 1157). Die Ergebnisse aus Experiment 3 belegen, dass auch mit der Verwendung von nur einer SI-Dauer eine Leistungsverbesserung zu beobachten ist (siehe Abbildung 10) und diese zu sehr ähnlichen Ergebnissen wie mit wechselnden SI-Dauern wie in Experiment 2 führt (siehe Abbildung 11).

Um die Unterschiede zwischen den beiden Experimenten näher zu untersuchen, wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit dem Innersubjekt-Faktor Position des VI (Position 1-7) und dem Zwischensubjekt-Faktor Präsentationsmodus (randomisierte vs. geblockte Präsentation von SI-Dauern) für die 150-ms SI-Sequenz mit sieben Intervallen aus Experiment 2 und 3 durchgeführt. Der Faktor Position des VI wurde signifikant,  $F(6, 204) = 32.00, p < .001, \eta^2_p = .48, \varepsilon = .49$ . Dies bestätigt, dass die Position des VI in beiden Experimenten einen signifikanten Einfluss auf die Wahrnehmungsleistung hatte, wie bereits die Einzelanalysen in den Experimenten für jedes der Experimente getrennt gezeigt hatten und auch aus Abbildung 11 ersichtlich ist. Die Leistungsunterschiede zwischen Experiment 2 and 3 (Präsentationsmodus geblockt vs. randomisiert) hingegen wurden nicht signifikant,  $F(1, 34) = .11, p = .74, \eta^2_p = .003$ . Allerdings erreichte die Interaktion zwischen dem Präsentationsmodus und der Position des VI das Signifikanzniveau,  $F(6, 204) = 3.53, p < .05, \eta^2_p = .09, \varepsilon = .49$ . Insgesamt zeigen die Analysen, dass sich die Wahrnehmungsleistungen der Sequenzen in einem randomisierten (Experiment 2) und geblockten (Experiment 3) Präsentationsmodus extrem ähneln.



**Abbildung 11:** Vergleich der Ergebnisse der Sieben-Intervall-Sequenzen mit einer SI-Dauer von 150 ms und ISIs von 125 ms in den Experiment 2 und 3: .75-Unterschiedsschwelle und Standardfehler des Mittelwerts in Abhängigkeit von der Position des variablen Intervalls (VI) und des Präsentationsmodus (geblockt = Experiment 3 vs. randomisiert = Experiment 2)

### 2.3.3. Diskussion

Die Ergebnisse von Experiment 3 unterstützen die Ergebnisse der bisherigen Experimente, da auch sie zeigten, dass sich mit einer zunehmenden Anzahl präsentierter Standardintervalle die Wahrnehmungsleistung verbessert, dieser Effekt spätestens ab dem dritten Intervall saturiert und beim letzten Intervall der Sequenz wiederum einer schlechteren Wahrnehmungsleistung zu beobachten ist. Diese verschlechterte Wahrnehmung trat dabei unabhängig von der Anzahl der in der Sequenz dargebotenen Intervalle immer nur für das letzte Intervall auf. Damit ist der Endeffekt nicht durch eine Kapazitätsbegrenzung im Gedächtnissystem zu erklären. Wäre so etwas wie ein magical-number-seven Effekt (Miller, 1956) für diese reduzierte Leistung des siebten Intervalls der Sequenz in den vorherigen Experimenten verantwortlich gewesen, so hätte dieser Effekt sich nicht oder nur abgeschwächt bei der Sequenz mit nur fünf Intervallen zeigen dürfen. Er sollte sich



zudem bei einer Sequenz mit neun Intervallen verstärken und auch die Positionen 8 und 7 betreffen. Die Daten zeigten aber einen Abfall in der Wahrnehmungsleistung nur für das jeweils letzte Intervall und der Leistungsabfall war für alle Sequenzlängen identisch. Dementsprechend kann keine Kapazitätsbegrenzung den Leistungsabfall am Ende der Sequenz erklären. Auch der Zeitlimit-Ansatz kann das nicht. Unsere Ergebnisse zeigten eine Leistungsverbesserung für Intervalle, die in der Mitte der Sequenz präsentiert wurden und eine Verschlechterung der Leistung für Intervalle am Anfang und Ende der Sequenz. Bei einer klassischen seriellen Wortlernaufgabe (Atkinson & Shiffrin, 1968; Wiswede, et al., 2007) hingegen werden Wörter, die in der Mitte einer Sequenz präsentiert wurden, am schlechtesten erinnert, während die zu Beginn und am Ende der Sequenz am besten erinnert werden (Primacy- und Recency-Effekt).

Da sich die drei Sequenzen auch in ihrem gesamten Leistungsniveau nicht signifikant voneinander unterschieden (keine Unterschiede zwischen den ersten 4 Positionen), sprechen die Daten gegen eine Offline-Verarbeitung der Intervalle, der zufolge erst alle Intervalle im Gedächtnis gespeichert werden und dann eine Entscheidung fällt, ob ein Intervall abweichend war oder nicht. Der Zeitlimitations-Hypothese zufolge, würde man davon ausgehen, dass später zurückliegende Ereignisse schlechter diskriminierbar sind. Im Falle einer Neun-Intervall-Sequenz liegt die Präsentation des ersten Intervalls zeitlich deutlich länger zurück, als wenn die Sequenz aus nur fünf Intervallen besteht. Dementsprechend sollten also gerade die ersten Intervalle der Neun-Intervall-Sequenz schlechter diskriminiert werden als die der kürzeren Sequenzen. Dies ist aber nicht der Fall. Es ergaben sich keine Unterschiede zwischen den ersten vier vergleichbaren Intervallen der drei Sequenzen. Es konnte auch keine Interaktion zwischen der Leistung der ersten vier Intervalle und der Anzahl der Intervalle in der Sequenz festgestellt werden. Kam es in den Experimenten 1 und 2 zu einer Interaktion zwischen SI-Dauer und Position des VI bleibt diese in Experiment 3 aus obwohl sich die Gesamtsequenzlänge ebenfalls änderte, allerdings nicht durch unterschiedliche SI-Dauern sondern durch unterschiedlich viele Intervalle.

Wenn sich die drei Sequenzen Experiment 3 in ihrem gesamten Leistungsniveau nicht unterscheiden, so spricht dies für eine Online-Verarbeitung der Sequenzen, d.h. es findet ein sofortiger Vergleich zwischen den Intervallen statt. Die Intervalle werden nicht erst alle angehört, enkodiert und abgespeichert, um am Ende der

Sequenz nach der Präsentation aller Intervalle ein Urteil zu fällen, ob der Rhythmus regelmäßig oder unregelmäßig war, sondern es scheint mit dem Ende eines jeden Intervalls bereits eine Beurteilung hinsichtlich der Rhythmizität der Sequenz zu erfolgen. Denn die gesamte Länge der Sequenz, sei es in ihrer zeitlichen Erstreckung oder aber die Anzahl der Intervalle betreffend, hat keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsleistung. Dies ist ersichtlich aus dem Leistungsvergleich von Experiment 3 mit den Ergebnissen aus den Experimenten 1 und 2, bei denen eine veränderte Wahrnehmungsleistung in Abhängigkeit der Standarddauer festzustellen war. Eine Verlängerung der zeitlichen Erstreckung der gesamten Sequenz über die Dauer der Standardintervalle führte dort zu einer allgemeinen Erhöhung der .75 Unterschiedsschwelle mit größer werdender SI-Dauer. Da in Experiment 3 durch eine Verlängerung der Gesamtsequenzlänge durch unterschiedlich viele Intervalle mit einer konstanten SI-Dauer hingegen keine Leistungsver schlechterung zwischen den unterschiedlich langen Sequenzen zu beobachten war, liegt es nahe, dies auf eine Online-Verarbeitung zurückzuführen. Denn werden einzelne Intervallpaare während der Präsentation der Sequenz direkt online miteinander verglichen, so spielt die Anzahl der Intervalle der Sequenz und ihre daraus veränderte Gesamtlänge keine Rolle und es sollten sich keine Leistungsunterschiede zwischen Sequenzen mit unterschiedlich vielen Intervallen ergeben. Wenn man Unterschiede zwischen Sequenzen mit verschiedenen SI-Dauern findet, dann kann dies dementsprechend nicht daran liegen, dass sie insgesamt die Sequenz verlängern und somit eine schlechtere Leistung evozieren. Es ist viel mehr alleine die SI-Dauer der einzelnen Intervalle, die sich auf die Wahrnehmungsleistung auswirkt. Die Verarbeitung der Sequenzen ähnelt damit der von Paarvergleichsaufgaben, bei denen ebenfalls die SI-Dauer der Intervalle die Wahrnehmungsleistung dem Weberschen Gesetz folgend grundsätzlich beeinflusst.

Die Annahme einer Verarbeitung einzelner Intervalle widerspricht in gewisser Weise Untersuchungen wie der von Sussman und Gumenyuk (2005). Den Autoren zufolge kommt es zu einer Gruppierung von Intervallen und einer gemeinsamen Verarbeitung dieser, wenn die ISIs eine gewisse Dauer nicht überschreiten. So fanden sich Hinweise im EEG der Versuchspersonen, die auf eine Gruppierung von Intervallen bei ISIs von 200 ms hindeuten, während bei ISIs von 400 ms und mehr keine Gruppierungseffekte mehr auftraten. Obwohl in Experiment 3 dieser Arbeit deutlich kürzere ISIs benutzt wurden, konnten in den behavioralen Daten keinerlei

Effekte, die auf eine Gruppierung von Intervallen hindeuten würden, wie etwa eine verschlechterte Diskriminationsleistung bei Sequenzen mit mehr Intervallen, ausfindig gemacht werden. Eine mögliche Erklärung wäre, dass die Versuchspersonen instruiert wurden, auf Veränderungen der Dauer eines Tons zu achten, während Sussman und Gummenyuk (2005) ihre Versuchspersonen nicht instruierten, Unterschiede zwischen den Tönen zu entdecken. Die Lenkung von Aufmerksamkeit könnte somit eine entscheidende Rolle dabei spielen, wann eine Gruppierung von Intervallen erfolgt oder wann nicht.

Dass kein Effekt hinsichtlich der Anzahl der Intervalle in der Sequenz gefunden wurde, widerspricht außerdem den oben genannten Überlegungen, dass möglicherweise Gedächtnis-, Habituations- oder Ermüdungseffekte der Grund dafür sind, dass einige Studien keinen positiven Leistungseffekt durch mehrfache Präsentation von Standards finden konnten (Berens & Pastore, 2005; Pashler, 2001; Schulze, 1989; ten Hoopen et al., 1994; 1995). Auch wenn kein allgemeiner Leistungsabfall mit längeren Sequenzen in Experiment 3 beobachtet werden konnte, so können diese Ergebnisse dennoch eine mögliche Erklärung für die gefundenen Nulleffekte anderer Studien geben: Das in den Experimenten 1-3 ermittelte Leistungsprofil zeigt, dass sich Unterschiede nur zwischen den ersten drei Intervallen ergeben und danach der positive Effekt mehrfacher SI-Präsentationen zu saturieren scheint. Wenn also Berens und Pastore (2005) durch Verlängerung einer Drei-Intervall-Sequenz keinen weiteren positiven Effekt mehr finden, so deckt sich dies mit den Ergebnissen dieser Arbeit. Offenbar lässt sich der positive Effekt auch bei anderen Studien nur dann beobachten, wenn Sequenzen mit weniger als drei Intervallen mit Sequenzen mit mehr als drei Intervallen verglichen werden.

Sehr überraschend an den Ergebnissen von Experiment 3 ist, dass keine Leistungsunterschiede der Sieben-Intervall-Sequenz, bestehend aus 150 ms SI-Dauern mit derselben Sequenz aus Experiment 2, gefunden werden konnten. Während in Experiment 2 die Dauer der SI-Dauern von Durchgang zu Durchgang wechselte (randomisierte Präsentation), war die SI-Dauer in Experiment 3 konstant 150 ms in jedem Durchgang (geblockte Präsentation). Miller und McAuley (2005) hatten in ihrem Vergleich einer geblockten und randomisierten Präsentation von SI-Dauern festgestellt, dass sie bei der geblockten Präsentation keinen positiven Effekt mehrfacher SI-Präsentationen auf die Wahrnehmungsleistung nachweisen können, während dies in der randomisierten Präsentation der Fall war. Eigentlich sollten

positive Effekte in einer geblockten Präsentation ausbleiben, zumal sich das System auf die eine SI-Dauer schnell eingestellt haben sollte. Die Anpassung der Periode eines oszillierenden Prozesses an die SI-Dauer oder die Reduzierung des Messfehlers durch einen Mittelungsprozess sollten theoretisch zumindest nach wenigen Präsentationen nahezu abgeschlossen und folglich keine weitere Verbesserung der Leistung mehr möglich sein. Wenn man jedoch auch in der geblockten Präsentation einen Effekt der Position des variablen Intervalls beobachten kann, so deutet dies darauf hin, dass in der Zeit zwischen den Durchgängen offenbar die Anpassung des Systems an die SI-Dauer schnell wieder verloren geht oder gar ein kompletter Reset des Systems erfolgt. Nicht nur, dass in Experiment 3 weiterhin ein Effekt der Position des VI zu finden war, die Leistung in einer geblockten Präsentation im Vergleich zu einer randomisierten ist insgesamt nicht verbessert. Üblicherweise ist die Leistung bei einer randomisierten Präsentation von verschiedenen Reizintensitäten schlechter, als wenn diese separat präsentiert werden. Dieses wurde z.B. von Hellström (2000) sowie von Mori und Ward (1992) für Tonhöhen nachgewiesen, aber auch im Bereich der Zeitwahrnehmung gibt es Befunde, wonach eine bessere Diskriminationsleistung durch eine geblockte Präsentation von Reizintensitäten zu beobachten ist (Rodríguez-Gironés & Kacelnik, 2001).

#### 2.4. Experiment 4: Endeffekt verursacht durch eine ungerade Anzahl an Intervallen?

Ziel von Experiment 4 war es, den in den bisherigen Experimenten beobachteten Leistungsabfall an der letzten Position der Sequenzen (Endeffekt) nochmals näher zu beleuchten. Weiterhin wurde die Möglichkeit eines Vergleichs von sehr kurzen Sequenzen mit längeren Intervallen angestrebt, um anhand der Leistungsunterschiede zwischen den Sequenzen Hinweise auf qualitativ unterschiedliche Verarbeitungsmechanismen zu erhalten.

Die Ergebnisse von Experiment 3 zeigten, dass der Endeffekt sich nicht durch eine Kapazitäts- oder Zeitlimitation des Gedächtnisses erklären lässt. Denn zum einen sollten unterschiedlich lange Sequenzen zu unterschiedlichen Kapazitätsauslastungen führen, die sich nicht nur beim jeweils letzten Intervall der Sequenz bemerkbar machen dürften. Zum anderen sollte einer Zeitlimithypothese

zufolge die Zeit zwischen Intervallpräsentation und Abruf eine kritische Rolle spielen. So wie bei seriellen Wortlernaufgaben Wörter am Ende der Liste mit am besten abrufbar und letztlich auch diskriminierbar sein müssten, sollten zeitliche Unterschiede am Ende einer Sequenz ebenfalls besser diskriminierbar sein, wenn es sich um einen solchen Gedächtniseffekt handelt. Dies ist aber in Experiment 3 nicht zu beobachten gewesen, sondern die Effekte verhielten sich konträr zur Zeitlimithypothese, da sowohl die Intervalle am Anfang als auch am Ende der Sequenz am schlechtesten diskriminierbar waren. Da eine Verlängerung der Sequenz durch längere Standarddauern die Leistung verschlechtert, eine Verlängerung der Sequenz durch mehr Intervalle jedoch nicht, legen die Ergebnisse nahe, dass die Intervalle einzeln verarbeitet werden und somit nur ihre grundsätzliche Diskriminierbarkeit durch ihre eigene Dauer bestimmt wird, wie es das Webersche Gesetz vorhersagt. Geht man davon aus, dass die Intervalle einzeln verarbeitet werden, dann stellt sich die Frage, wie sie miteinander verglichen werden. Zum einen könnte man vermuten, dass jeweils zwei Intervalle paarweise miteinander verglichen werden, z.B. Intervall 1 mit Intervall 2. Intervall 2 könnte dann im nächsten Schritt seinerseits mit Intervall 3 verglichen werden, usw. Ebenso denkbar ist, dass lediglich Intervall 1 mit Intervall 2 verglichen wird und dann sofort Intervall 3 mit Intervall 4, usw. . Die letzte Variante hätte den Vorteil, dass Intervalle nicht doppelt beurteilt werden, z.B. Intervall 2 mit Intervall 1 und 3. Der Vergleich der Intervalle 1 und 2 sowie 3 und 4 wäre deutlich effizienter, da weniger Vergleiche nötig wären. Dieser Vergleichsprozess hätte jedoch den Nachteil, dass es immer am Ende einer Sequenz mit einer ungeraden Anzahl an Intervallen zu Problemen im Vergleich kommt, da am Ende der Sequenz ein Intervall keinen Vergleichspartner hat. Dies Problem des mangelnden Vergleichspartners könnte sich im Endeffekt widerspiegeln, da er auch immer nur beim jeweils letzten Intervall einer Sequenz mit einer ungeraden Anzahl an Intervallen aufgetreten ist, wie die Ergebnisse der vorangegangenen Experimente zeigten. Um dieser Möglichkeit nachzugehen, wurde das folgende Experiment durchgeführt, in dem Sequenzen mit einer geraden Anzahl an Intervallen präsentiert wurden. Um einen Leistungsvergleich zu Paarvergleichsaufgaben herstellen zu können, wurden „Sequenzen“ mit einer geraden Anzahl ab einer Anzahl von 2 Intervallen verwendet. Wenn die Verarbeitung von lediglich zwei Intervallen (Paarvergleichsaufgabe) sich von der Verarbeitung längerer Sequenzen qualitativ unterscheiden sollte (siehe hierzu: Brandler, 2002; Fraise, 1984; Michon & Jackson,

1985), wäre es möglich, dass sich eine solche Veränderung auch in der Diskriminationsleistung zeigt. Dementsprechend wurden auch Sequenzen mit drei und vier Intervallen getestet, um mögliche grundsätzliche Unterschiede der Verarbeitung von Paarvergleichsaufgaben und hin zu Sequenzen von mehr als zwei Intervallen anhand der Veränderung in der Diskriminationsleistung erkennen zu können. Als längste Sequenz wurde eine Sechs-Intervall-Sequenz eingesetzt. Zusammen mit den Ergebnissen aus Experiment 3 würde so eine durchgängige Beobachtung der Leistung von Sequenzen von 2-7 Intervallen möglich sein.

### **2.4.1. Methode**

#### *Versuchspersonen*

18 Studierende (13 weiblich, 5 männlich) der Universität Göttingen im Alter von 19-39 Jahren ( $M = 23.44$ ;  $SD = 4.87$ ) nahmen am Experiment teil. Sie waren naiv hinsichtlich der Fragestellung des Experiments. Für ihre Teilnahme wurde ihnen eine Versuchspersonenstunde attestiert.

#### *Apparatur und Stimuli*

Wie in Experiment 1-3

#### *Prozedur*

Die Prozedur entspricht der von Experiment 3 mit der Ausnahme, dass anstelle von Sequenzen mit fünf, sieben und neun Intervallen, Sequenzen mit zwei, drei, vier und sechs Intervallen verwendet wurden.

#### *Design*

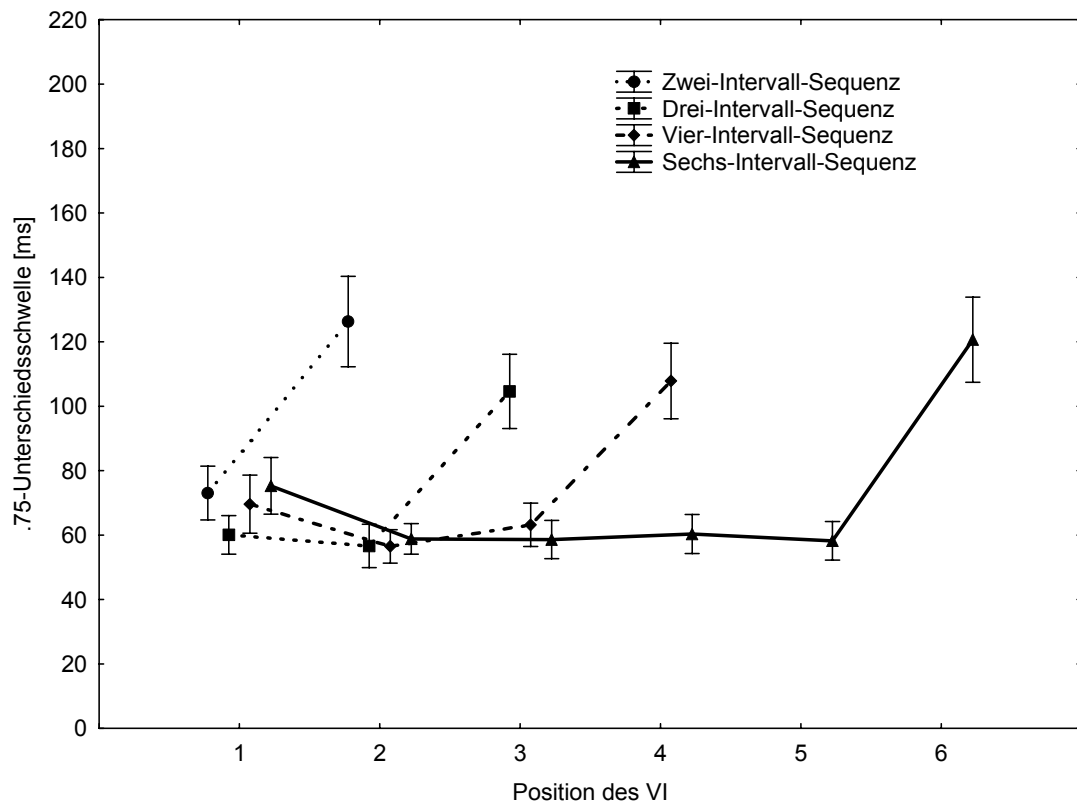
Der Faktor Position des VI bestand je nach Anzahl an Intervallen pro Sequenz (2, 3, 4 oder 6 Intervalle) aus entweder 2 Stufen (Positionen 1-2 = Zwei-Intervall-Sequenz), 3 Stufen (Positionen 1-3 = Drei-Intervall-Sequenz), 4 Stufen (Positionen 1-4 = Vier-Intervall-Sequenz) oder 6 Stufen (Positionen 1-6 = Sechs-Intervall-Sequenz). Dadurch ergeben sich 15 Bedingungen, in denen jede Versuchsperson getestet wurde. Um die Erkennungsleistung der Versuchsperson in jeder der 15 Bedingungen zu ermitteln, wurde sie 32-mal in derselben Bedingung getestet, was zu einer Anzahl von 480 experimentellen Durchgängen führte.

### 2.4.2. Ergebnisse

Abbildung 12 veranschaulicht die durchschnittliche Wahrnehmungsleistung eines abweichenden Intervalls in Abhängigkeit von der Position des VI und der Anzahl der Intervalle in der Sequenz in Experiment 4. Wie der Abbildung zu entnehmen scheint die Position des VI wieder einen Einfluss zu haben, wobei die Wahrnehmungsleistung an der jeweils letzten Position des VI deutlich verschlechtert war. Eine Leistungsverbesserung über die ersten Intervalle hinweg ist kaum noch zuerkennen, so wie das für kurze SI-Dauern auch bereits in den anderen Experimenten der Fall war. Zur Überprüfung des Einflusses der Position des VI auf die Diskriminationsleistung der einzelnen Sequenzen wurden einfaktorielle ANOVAs mit Messwiederholung für den Faktor Position des VI für alle Sequenzen separat durchgeführt (auch wenn man im Falle der Zwei-Intervall-Sequenz normalerweise einen t-Test für gepaarte Stichproben zur statistischen Prüfung der Hypothese nutzen würde). Es ergab sich ein signifikanter Einfluss der Position auf die Wahrnehmungsleistung des abweichenden Intervalls für alle Sequenzen, sowohl für die Sequenz bestehend aus zwei Intervallen,  $F(1, 17) = 29.05, p < .001, \eta^2_p = .63$ , die Sequenz mit drei Intervallen,  $F(2, 34) = 23.24, p < .001, \eta^2_p = .58, \varepsilon = .69$ , die Sequenz mit vier Intervallen,  $F(3, 51) = 17.50, p < .001, \eta^2_p = .51, \varepsilon = .75$ , als auch für die Sequenz bestehend aus sechs Intervallen,  $F(5, 85) = 20.74, p < .001, \eta^2_p = .55, \varepsilon = .41$ . Bonferroni Post-hoc-Tests zeigten, dass sie die Positionen 1 und 2 in der Zwei-Intervall-Sequenz unterschieden, wobei die Leistung an der zweiten Position schlechter im Vergleich zur ersten Position auffällt. In der Drei-Intervall-Sequenz unterschieden sich die Positionen 1 und 2 von der dritten Position signifikant (Position 3 > 1-2). In der Vier-Intervall-Sequenz unterschieden sich die Positionen 1-3 signifikant von der Position 4 (Position 4 > 1-3). Ähnliches war in der Sechs-Intervall-Sequenz zu beobachten, in der sich die Positionen 1-5 signifikant von Position 6 unterschieden (Position 6 > 1-5).

Diese Analysen bestätigten somit, dass ein Endeffekt bei allen getesteten Sequenzlängen auftritt, auch bei denen, die eine gerade Anzahl an Intervallen enthalten. Dies ist sogar der Fall bei der Sequenz aus zwei Intervallen, die als Vergleich zu einer Paarvergleichsaufgabe dienen sollte. Eine Verbesserung der Leistung über die ersten Intervalle hinweg, wie in den vorangegangenen Experimenten, lässt sich jedoch in Experiment 4 nicht mehr statistisch nachweisen, da die Post-hoc-Tests zeigten, dass die leicht verbesserten Wahrnehmungsleistungen

an der ersten Position, die in Abbildung 12 zu beobachten sind, nicht signifikant wurden. Der gefundene Haupteffekt des Faktors Position des VI lässt sich damit vor allem auf den Endeffekt, den Leistungsabfall an der jeweils letzten Position zurückführen.



**Abbildung 12:** .75 Unterschiedsschwelle und Standardfehler des Mittelwerts in Abhängigkeit der von der Position des variablen Intervalls (VI) und von der Anzahl der Intervalle in der Sequenz in Experiment 4

Die Analyse mittels einer zweifaktoriellen ANOVA mit den Faktoren Position des VI und Anzahl der Intervalle in der Sequenz für die ersten Positionen durchzuführen, um Unterschiede im gesamten Leistungsniveau zu ermitteln, erscheint im Gegensatz zu Experiment 3 nicht sinnvoll, da sich zu wenige Positionen zwischen den unterschiedlich langen Sequenzen gleichen. Die visuelle Inspektion der Leistungsprofile der Sequenzen zeigt jedoch deutlich, dass sich die Sequenzen mit unterschiedlich vielen Intervallen grundsätzlich hinsichtlich ihrer Diskriminationsleistung nicht unterscheiden, da sich die weder in ihrer Profilform



unterscheiden, noch Unterschiede hinsichtlich der allgemeinen Höhe der Unterschiedsschwelle festzustellen sind.

### 2.4.3. Diskussion

Ziel dieses Experimentes war es, eine Erklärung für den Endeffekt durch eine besondere Form des Vergleichsmechanismus zu prüfen und einem möglichen qualitativen Wechsel der Verarbeitung von Sequenzen mit nur zwei Intervallen hin zu Sequenzen mit mehr als nur einem Paar von Intervallen nachzugehen. Die Ergebnisse zeigten, dass auch für kurze Intervallsequenzen mit nur zwei Intervallen eine ähnliche Verarbeitung vorlag wie für längere Sequenzen, da sich für alle Sequenzen gleichermaßen ein „Endeffekt“, d.h. eine schlechtere Diskriminationsleistung für das jeweils letzte Intervall in der Sequenz, fand. Als Erklärung für den Endeffekt bisheriger Experimente sollte mit diesem vierten Experiment außerdem geprüft werden, ob eine ungerade Anzahl an Intervallen als Ursache für den Endeffekt verantwortlich sein könnte. Aus Gründen der Effizienz könnte es sinnvoll sein, immer nur zwei Intervalle miteinander zu vergleichen, z.B. Intervall 1 und 2 und dann erst wieder Intervall 3 und 4, anstatt Intervall 1 und 3 jeweils mit Intervall 2 zu vergleichen. Geht man davon aus, dass das System nach der effizienteren Methode arbeitet, würde es zu keinem Vergleichsproblem am Ende einer Sequenz kommen, wenn die Anzahl der Intervalle gerade ist. Bei einer ungeraden Anzahl von Intervallen müsste ein solcher Vergleichsmechanismus jedoch Schwierigkeiten zeigen, da er kein folgendes Intervall mehr zur Verfügung hat, um das letzte Intervall beurteilen zu können. Dieser Wechsel im Vergleichsmodus könnte dafür verantwortlich gewesen sein, dass bei einer ungeraden Anzahl an Intervallen ein Endeffekt entsteht. Mit einer geraden Anzahl an Intervallen hingegen sollte er bei einem solchen Vergleichsmodus gar nicht aufkommen, da immer Paare von Intervallen gebildet werden können. Die Ergebnisse aus diesem Experiment zeigten jedoch, dass auch bei geraden Intervallen ein Endeffekt auftrat und somit diese Erklärung nicht den Endeffekt begründen kann. Die Ergebnisse sprechen eher dafür, dass es möglicherweise zu einem doppelten Vergleich einzelner Intervalle kommt. Der doppelte Vergleich des zweiten Intervalls mit den Intervallen 1 und 3 erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass Intervall 2, wenn es eine abweichende Dauer aufweist, besser erkannt wird. Wird ein Abweichen von Intervall 2 durch den Vergleich mit Intervall 1 nicht registriert, dann kann der Vergleich mit Intervall 3 möglicherweise doch noch zu einer Erkennung der Abweichung von Intervall 2

führen. Dementsprechend würden immer die Intervalle, die nur ein Nachbarintervall haben (Intervall 1 und das jeweils letzte Intervall einer Sequenz) grundsätzlich schlechter diskriminierbar sein. Dies stimmt mit den Daten nur teilweise überein, da der Effekt der Leistungsverbesserung von Position 1 hin zu Position 2 in diesem Experiment nicht zu beobachten war sondern lediglich der Endeffekt. Zudem sollte man im Gegensatz zu den hier gezeigten Ergebnissen bei der Sequenz aus zwei Intervallen keine Unterschiede zwischen den Positionen des VI beobachten, da es sich jeweils um zwei Randintervalle handelt.

Die Ergebnisse der Zwei-Intervall-Sequenz sind sehr erstaunlich, wenn man das Ergebnis mit anderen Studien vergleicht. Lapid, et al. (2008) untersuchten die Diskriminationsleistung von Paarvergleichsaufgaben, indem sie wie in den Experimenten dieser Arbeit die Diskriminationsleistung für beide Positionen innerhalb der „Sequenz“ unabhängig voneinander untersuchten. In der Regel werden bei Paarvergleichsaufgaben die Position des Vergleichsintervalls sowie dessen Dauer variiert, damit keine Reihenfolgeeffekte entstehen können (Hellström, 1985). Das solche Reihenfolgeeffekte auch in Bezug auf die Urteilsvariabilität (DL) bestehen, zeigte die Studie von Lapid, et al. (2008), sowie die Ergebnisse dieses Experiments. Jedoch zeigten die Ergebnisse des vierten Experimentes dieser Arbeit genau den gegenteiligen Effekt in Bezug auf die Diskriminationsleistung für die beiden Positionen. Während Lapid, et al. (2008) eine bessere Leistung an der zweiten Position im Vergleich zur ersten Position feststellen konnten, kam es in Experiment 4 dieser Arbeit zu einer Verschlechterung der Leistung an der zweiten Position durch den für die verwendeten Sequenzaufgaben typischen Endeffekt. Lapid, et al. (2008) argumentieren, dass eine verbesserte Leistung für die zweite Position durch theoretische Modelle wie die Dynamic-Attending-Theorie oder das Multiple-Look-Modell erklärt werden kann, da durch die Präsentation einer Standarddauer die interne Repräsentation der Dauer verbessert wird und davon ein folgendes Intervall profitieren könnte, so wie das auch bei den Sequenzen mit mehr als zwei Intervallen in den bisherigen Experimenten dieser Arbeit zu beobachten war und über dieselben Modelle erklärt wurde. Wenn also bei Sequenz aus zwei Intervallen dieser Arbeit ein Anstieg der Diskriminationsleistung für die zweite Position gefunden wird, so unterscheidet sich das deutlich von dem typischen Bild aus Paarvergleichsaufgaben anderer Studien (z.B. Lapid, et al., 2008) und bedarf einer Erklärung. Eine mögliche

Erklärung wird in Zusammenhang mit weiteren Ergebnissen der noch folgenden Experimente in der Schlussdiskussion dieser Arbeit ausführlicher erörtert werden.

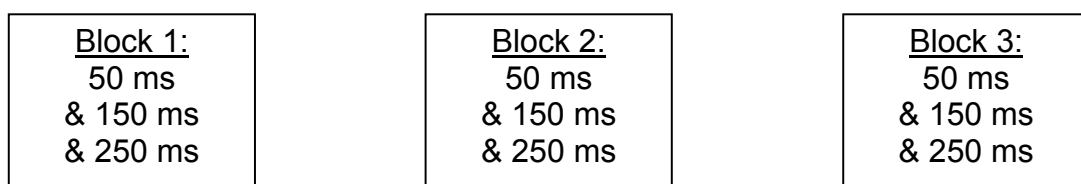
Im Gegensatz zu den vorangegangenen Experimenten fiel in diesem Experiment ebenfalls auf, dass der Einfluss der Position des VI kaum noch für die ersten Intervalle zu beobachten war. Man erkennt zwar noch eine schlechtere Leistung an der ersten Position einiger Sequenzen aus Abbildung 12, aber die Wahrnehmungsleistung unterscheidet sich nicht statistisch von der Position 2. Warum der Effekt bei den Sequenzen von Experiment 4 verloren geht, ist unklar. Möglicherweise führte die besonders hohe Anzahl an Versuchspersonen, die in diesem Experiment ersetzt wurden (sieben Versuchspersonen), zu diesem Ergebnis. Allerdings wurde genau dasselbe Ausschlusskriterium verwendet wie in den anderen Versuchen auch (Abweichung von mehr als zwei Standardabweichungen über dem Median bei mehr als einem Viertel aller Bedingungen). Die geblockte Präsentation als Ursache für das Ausbleiben des Effektes anzuführen, so wie Miller und McAuley (2005) dies für ihre Ergebnisse tun, überzeugt aufgrund der Ergebnisse aus Experiment 3 ebenfalls nicht, da sich dort auch bei einer geblockten Präsentation ein Effekt der Position auf die Wahrnehmungsleistung zeigte. Zudem fanden sich bereits in den ersten zwei Experimenten generell auch nur geringe Effekte für die 150-ms SI-Sequenzen, die auch in Experiment 4 verwendet wurden. Eine deutliche Leistungsverbesserung war erst bei den 250-ms SI-Sequenzen zu erkennen. Der Befund, dass in Experiment 4 keine Leistungsverbesserung über die ersten Positionen mehr statistisch nachgewiesen werden konnte, spricht daher nicht unbedingt gegen die Annahmen des Multiple-Look-Modells oder der Dynamic-Attending-Theorie.

## 2.5. Experiment 5: Geblockte (versus randomisierte) Präsentation von SI-Dauern bei ISIs von 125 ms

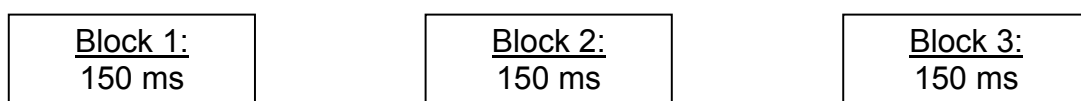
Ziel von Experiment 5 war es, die These von Miller und McAuley (2005) zu überprüfen, wonach nur bei einer randomisierten Darbietung mehrerer SI-Dauern eine Verbesserung der Leistung mit einer zunehmenden Anzahl an Intervallen zu beobachten sein sollte, weil bei der Verwendung von nur einer SI-Dauer pro Block der Oszillator sich bereits nach wenigen Durchgängen angepasst haben und keine

weitere Verbesserung der Leistung mehr zu beobachten sein sollte. Die Ergebnisse aus Experiment 2 und 3 zeigen, dass sowohl in einem randomisierten als auch in einem geblockten Präsentationsmodus für die 150-ms SI-Sequenzen keine Unterschiede in der allgemeinen Leistung als auch, was den Effekt der Position des VI betrifft, zu beobachten sind. Aufgrund vorheriger Studien (Hellström, 2000; Miller & McAuley, 2005; Mori & Ward, 1992; Rodríguez-Gironés & Kacelnik, 2001) ist dies ein überraschendes Ergebnis und auch von einer theoretischen Perspektive sowohl von Seiten der Dynamic-Attending-Theorie als auch des Multiple-Look-Modells nicht zu erwarten gewesen. Ständig wechselnde Reize führen im Allgemeinen zu einer reduzierten Wahrnehmungsleistung (Hellström, 2000; Mori & Ward, 1992; Rodríguez-Gironés & Kacelnik, 2001) und in einem geblockten Design sollte bei einer über mehrere Durchgänge hinweg optimierten Intervalldauer-Repräsentation kein Effekt der Position des VI mehr zu beobachten sein (Miller & McAuley, 2005). Erklärlich wäre der gefundene Nulleffekt durch einen Reset des Systems in der Zeit zwischen den Durchgängen. Da es sich bei diesen Beobachtungen jedoch um einen Nulleffekt handelt, ist dieser Befund schwer zu beurteilen und sollte einer detaillierteren Untersuchung unterzogen werden. Vor allem, weil den 150-ms SI-Sequenzen in dem verwendeten experimentellen Design eine besondere Rolle zukommt: Sie bilden den Mittelwert aus allen dargebotenen Dauern.

## Experimente 1-2



## Experimente 3-4



*Abbildung 13: Überblick über die in den Experimenten 1-4 verwendeten Standarddauern im jeweiligen Block (Ausbalancierung der Blockreihenfolge in den Experimenten 3-4 nicht dargestellt)*

Es ist daher durchaus möglich, dass die Ergebnisse für die 50- und 250-ms SI-Sequenzen in einem geblockten und randomisierten Präsentationsmodus anders ausfallen. Denkbar ist, dass sich das System an die durchschnittliche Dauer aller in einem Block dargebotenen Intervalle anpasst. Bei der randomisierten Präsentation von 50-, 150- und 250-ms SI-Sequenzen würde sich ein Mittelwert von 150 ms in jedem Block ergeben. In einem geblockten Design hingegen würden sich die Mittelwerte unterscheiden. In einem Block mit 150-ms SI-Dauern wäre der Mittelwert aller Dauern ebenfalls 150 ms und in einem solchen Fall sollte es keine Leistungsunterschiede zwischen 150-ms SI-Sequenzen in einem geblockten und randomisierten Präsentationsmodus geben. Der Mittelwert der 50- und 250- ms SI-Sequenzen in einer geblockten Präsentation liegt bei 50 bzw. 250 ms und dies unterscheidet sich von dem Mittelwert aller dargebotenen Dauern in einem randomisierten Design wie in Experiment 1 und 2 (siehe Abbildung 13). Um die besondere Rolle der 150-ms SI-Sequenzen in einem geblockten und randomisierten Design zu untersuchen, wurde im folgenden Experiment dasselbe Design wie in Experiment 2 verwendet mit der Ausnahme, dass die 50-, 150- und 250-ms SI-Sequenzen in separaten Blöcken präsentiert wurden. Für die 150-ms SI-Sequenzen wäre den vorherigen Überlegungen zufolge kein Leistungsunterschied zu erwarten. Die 50- und 250-ms SI-Sequenzen hingegen sollten in Experiment 2 jedoch schlechter diskriminierbar sein als in Experiment 5, da ihre SI-Dauer in Experiment 5 dem Mittelwert aller Dauern entspricht, während dieser in Experiment 2 bei 150 ms lag und somit von ihrer SI-Dauer abwich.

### **2.5.1. Methode**

#### *Versuchspersonen*

18 Studierende (17 weiblich, 1 männlich) der Universität Göttingen im Alter von 19-30 Jahren ( $M = 22.50$ ;  $SD = 4.06$ ) nahmen am Experiment teil. Sie waren naiv hinsichtlich der Fragestellung des Experiments. Für ihre Teilnahme wurde ihnen eine Versuchspersonenstunde attestiert.

#### *Apparatur und Stimuli*

Wie in Experiment 1-4

### *Prozedur*

Die Prozedur entspricht der von Experiment 2 mit zwei Ausnahmen: Anstatt in einem Block die drei SI-Dauern von 50, 150 und 250 ms zufällig von Durchgang zu Durchgang wechseln zu lassen, wurden sie in separaten Blöcken jeweils für sich allein getestet. Die Reihenfolge der Blöcke mit den verschiedenen SI-Dauern wurde über die Versuchspersonen hinweg ausbalanciert. Weiter ergab eine Vorstudie, dass die zu erwartenden Wahrnehmungsschwellen in Experiment 5 niedriger ausfallen würden als in Experiment 2 und daher die Startwerte und Schrittweiten des adaptiven Verfahrens entsprechend angepasst werden mussten. Der Startwert für die 50-ms SI-Sequenz betrug daher nur 65 ms und wurde bei der Antworteingabe „ungleichmäßiger Rhythmus“ um 3 ms reduziert, während er bei der Antwort „gleichmäßiger Rhythmus“ um 9 ms verlängert wurde. Die kleine Schrittweitenveränderung der 150-ms SI-Sequenz betrug 4 ms, die große 12 ms, ausgehend von einem Startwert von 200 ms. Für die 250-ms SI-Sequenzen wurde ein Startwert von 310 ms verwendet und die Dauer des VI wurde nach der entsprechenden Antwort um 5 ms verkürzt oder aber um 15 ms verlängert.

### *Design*

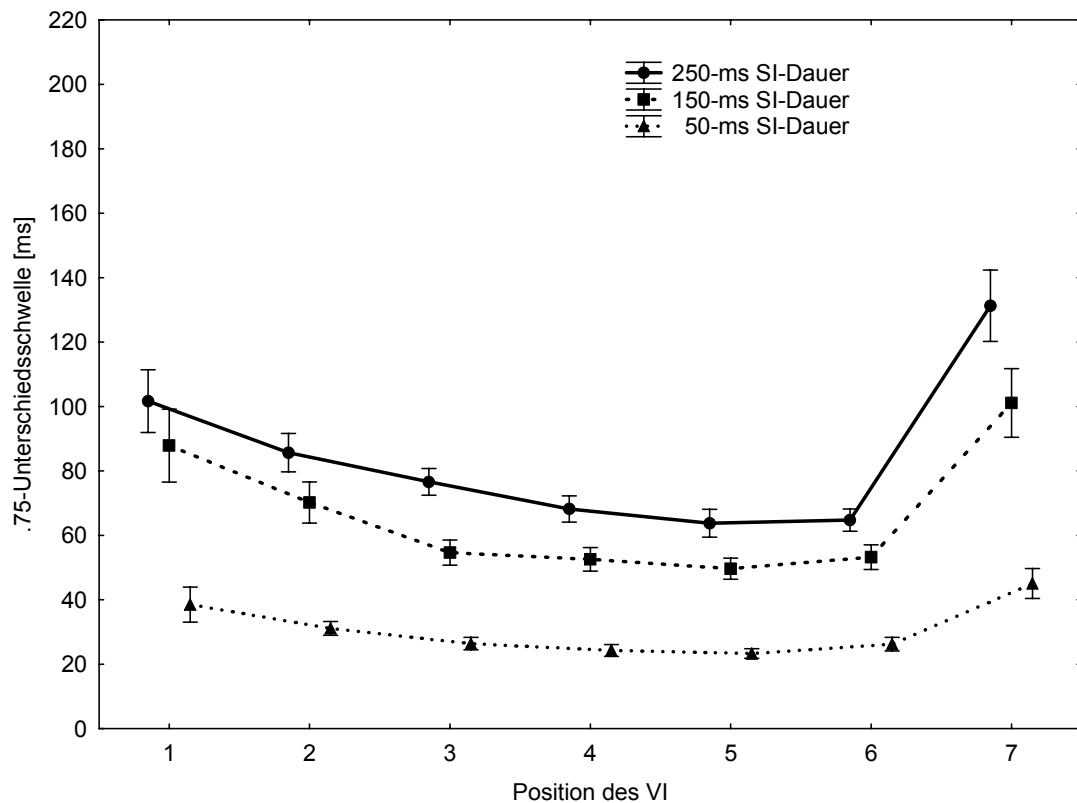
Wie in Experiment 1-2

#### **2.5.2. Ergebnisse**

Abbildung 14 veranschaulicht die durchschnittliche Wahrnehmungsleistung eines abweichenden Intervalls in Abhängigkeit von der SI-Dauer und der Position VI in Experiment 5. Die Wahrnehmungsleistung für die 50-ms SI-Sequenz erwies sich hinsichtlich der absoluten Werte besser als die der 150-ms SI-Sequenz, die nochmals bessere Werte zeigte als die 250-ms SI-Sequenz. Diese Beobachtungen ließen sich mittels zweifaktorieller ANOVA mit Messwiederholung für die Faktoren SI-Dauer und Position des VI bestätigen, da sich der Haupteffekt des Faktors SI-Dauer sich als signifikant,  $F(2, 34) = 87.56, p < .001, \eta^2_p = .84, \varepsilon = .95$  erwies.

Wie Abbildung 14 verdeutlicht, hat die Position des VI, einen Einfluss auf die Wahrnehmungsleistung. Dieser Eindruck konnte durch einen signifikanten Haupteffekt des Faktors Position des VI nachgewiesen werden,  $F(6, 102) = 28.19, p < .001, \eta^2_p = .62, \varepsilon = .31$ . Neben dem beobachteten Endeffekt verbesserte sich zudem die Wahrnehmungsleistung der 50-ms SI-Sequenz um 12.28 ms, die der 150-

ms SI-Sequenz um 34.67 ms und die der 250-ms SI-Sequenz um 36.94 ms jeweils von Position 1 bis 6. Mit zunehmender SI-Dauer trat somit der Effekt der Verbesserung der Leistung über die ersten Intervalle deutlicher hervor. In Übereinstimmung mit diesen Beobachtungen fand sich eine signifikante Interaktion der Faktoren SI-Dauer und Position des VI,  $F(12, 204) = 8.05$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .32$ ,  $\varepsilon = .35$ .



**Abbildung 14:** .75-Unterschiedsschwelle und Standardfehler des Mittelwerts in Abhängigkeit der Position des variablen Intervalls (VI) und der Standarddauer (SI) in Experiment 5

Einfaktorielle ANOVAs, die für jede SI-Dauer getrennt berechnet wurden, bestätigten außerdem, dass der Einfluss der Position des VI auf die Wahrnehmungsleistung sich bei jeder SI-Dauer bemerkbar macht: Es fanden sich signifikante Effekte der Position des VI sowohl für die 50-ms SI-Sequenz,  $F(6, 102) = 16.43$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .49$ ,  $\varepsilon = .26$ , für die 150-ms SI-Sequenz,  $F(6, 102) = 16.43$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .49$ ,  $\varepsilon = .26$ , als auch für die 250-ms SI-Sequenz,  $F(6, 102) = 26.28$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .61$ ,  $\varepsilon = .36$ . Dieses wurde zusätzlich durch die

durchgeführten Bonferroni Post-hoc-Tests nochmals detaillierter belegt. Für die 50-ms SI-Sequenz ergaben sich signifikante Unterschiede zwischen den folgenden Positionen: Position 1 > 3-6; Position 7 > 2-6. Dieselben Unterschiede fanden sich auch in der 150-ms SI-Sequenz. Für die 250-ms SI-Sequenzen konnten folgende signifikanten Unterschiede beobachtet werden: Position 1 > 3-7; Position 2 > 5; Position 7 > 1-6.

Die Ergebnisse aus Experiment 5 zeigen dementsprechend ein sehr ähnliches Muster wie die der Experimente 1-2. Mit längeren SI-Dauern ergeben sich höhere Unterschiedsschwellenwerte. Diese höheren Unterschiedsschwellenwerte führen dazu, dass eine Verbesserung der Leistung über die ersten Positionen hinweg deutlicher zu erkennen ist als bei Sequenzen mit kürzeren SI-Dauern.

Zur Analyse möglicher Unterschiede, die sich zwischen einem geblockten (Experiment 5) und randomisierten (Experiment 2) Präsentationsmodus ergeben könnten, wurde eine dreifaktorielle ANOVA mit den Innersubjekt-Faktoren SI-Dauer und Position des VI, sowie dem Zwischensubjekt-Faktor Präsentationsmodus (geblockt vs. randomisiert) durchgeführt. Betrachtet man Abbildung 15, so zeigt sich das übliche Bild, wonach die SI-Dauer als auch die Position des VI einen Einfluss auf die Wahrnehmungsleistung hatten. Und dies aufgrund einer Leistungsverbesserung über die ersten Intervalle sowie einen Endeffekt an der letzten Position, so wie das schon in der Einzelanalyse der Experimente gezeigt werden konnte. Dies wurde bestätigt durch die signifikanten Haupteffekte des Faktors SI-Dauer,  $F(2, 68) = 135.01, p < .001, \eta^2_p = .80, \varepsilon = .76$ , und des Faktors Position des VI,  $F(6, 204) = 48.08, p < .001, \eta^2_p = .59, \varepsilon = .35$ . Die signifikante Interaktion,  $F(12, 408) = 5.26, p < .001, \eta^2_p = .13$ , repliziert die bisherigen Befunde, wonach die Leistungsverbesserung über die ersten Intervalle deutlicher bei längeren SI-Dauern auftrat.

Bei dem Vergleich der Leistungen zwischen den Experimenten 2 und 5 (siehe Abbildung 15) war zu beobachten, dass die SI-Dauern unterschiedlich durch den Präsentationsmodus beeinflusst werden. Die Leistungen der 150-ms SI-Sequenzen zwischen den Experimenten unterschieden sich nur geringfügig voneinander (die Mittelwerte im geblockten Präsentationsmodus sind etwas niedriger als im randomisierten), während die Leistungen für die 50- und 250-ms SI-Sequenzen in Experiment 2 gegenüber Experiment 5 deutlich verbessert waren. Die statistische Analyse bestätigte diese Beobachtungen durch einen signifikanten Einfluss des

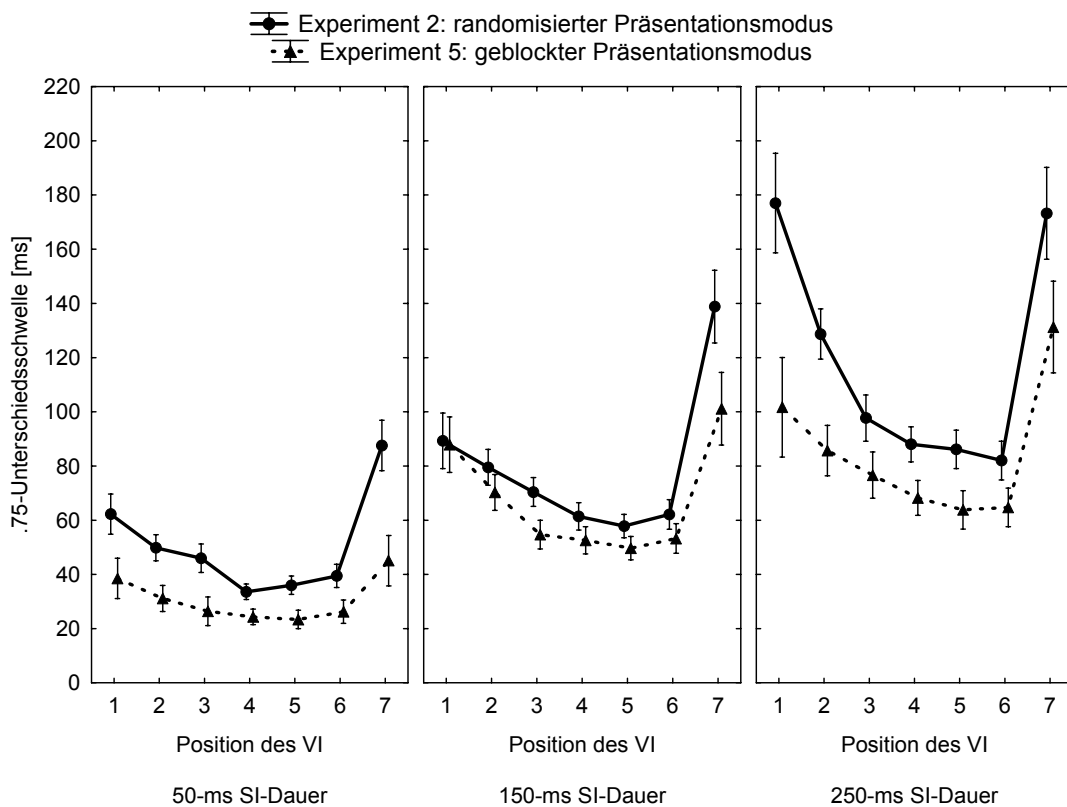


Faktors Präsentationsmodus auf die Wahrnehmungsleistung,  $F(1, 34) = 6.56, p < .05, \eta^2_p = .16$ , sowie einer Interaktion mit dem Faktor SI-Dauer,  $F(2, 68) = 4.35, p < .05, \eta^2_p = .11, \varepsilon = .76$ . Die Interaktion mit dem Faktor Position des VI erwies sich als nicht signifikant, erreicht jedoch das Niveau eines statistischen Trends ( $p < .1$ ),  $F(6, 204) = 2.72, p = .07, \eta^2_p = .07, \varepsilon = .35$ . Außerdem fand sich eine signifikante dreifaktorielle Interaktion von Präsentationsmodus, SI-Dauer und Position des VI,  $F(12, 408) = 5.26, p < .001, \eta^2_p = .13, \varepsilon = .36$ . Diese Interaktionen kommen vermutlich dadurch zustande, dass in Experiment 2 die Leistungsverbesserung über die ersten Intervalle deutlicher ausfällt als in Experiment 5 und dies in Abhängigkeit von der SI-Dauer, da sich der Effekt nur bei den 50- und 250-ms SI-Sequenzen, nicht aber bei den 150-ms SI-Sequenzen zu beobachten ist.

Da die SI-Dauern unterschiedlich durch den Präsentationsmodus beeinflusst wurden, wurden separate ANOVAs für jede der drei SI-Dauern in Bezug auf den Einfluss des Präsentationsmodus auf die Wahrnehmungsleistung durchgeführt. Der Faktor Position des VI wurde für alle drei SI-Sequenzen signifikant: 50-ms SI-Sequenz,  $F(6, 204) = 25.24, p < .001, \eta^2_p = .43, \varepsilon = .40$ , 150-ms SI-Sequenz,  $F(6, 204) = 41.55, p < .001, \eta^2_p = .55, \varepsilon = .40$ , und 250-ms SI-Sequenz,  $F(6, 204) = 37.06, p < .001, \eta^2_p = .52, \varepsilon = .39$ . Im Hinblick auf den Faktor Präsentationsmodus machte die Analyse deutlich, dass sich die 50-ms SI-Sequenzen,  $F(1, 34) = 9.63, p = .01, \eta^2_p = .22$ , und die 250-ms SI-Sequenzen,  $F(1, 34) = 7.05, p < .05, \eta^2_p = .17$ , in ihrer Wahrnehmungsleistung zwischen den Experimenten 2 und 5 signifikant unterscheiden (bessere Leistung in Experiment 5). Bei beiden Dauern kommt es auch zu Interaktionen zwischen den Faktoren Position des VI und Präsentationsmodus,  $F(6, 204) = 4.26, p < .05, \eta^2_p = .11, \varepsilon = .40$  (50-ms SI-Sequenzen) bzw.  $F(6, 204) = 3.89, p < .05, \eta^2_p = .10, \varepsilon = .39$  (250-ms SI-Sequenzen). Diese Interaktionen kamen dadurch zustande, dass in Experiment 2 die Leistungsverbesserung über die ersten Intervalle deutlicher ausfiel als in Experiment 5. Die Analyse der 150-ms SI-Sequenzen hingegen zeigte ein anderes Bild: Die Leistung zwischen Experiment 2 und 5 (randomisierte vs. geblockte Präsentation) unterschied sich nicht signifikant,  $F(1, 34) = 2.18, p = .15, \eta^2_p = .06$ . Auch die Interaktion von Position des VI und Präsentationsmodus erreicht das Signifikanzniveau nicht, es zeigt sich aber ein statistischer Trend ( $p < .01$ ),  $F(6, 204) = 2.50, p < .08, \eta^2_p = .07, \varepsilon = .40$ . Bonferroni Post-hoc-Tests ergeben keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Positionen von Experiment 2 und

5, bis auf einen Unterschied zwischen den Positionen 7 in der 50-ms SI-Sequenz und den Positionen 1 der 250-ms SI-Sequenzen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei den 50- und 250-ms SI-Sequenzen signifikante Unterschiede zwischen den Experimenten und damit zwischen dem geblockten und randomisierten Präsentationsmodus zu beobachten sind, wenn man sich die Ergebnisse der ANOVAs anschaut. Dies trifft jedoch für die 150-ms SI-Sequenzen nicht zu und repliziert damit die Ergebnisse aus dem Vergleich der Experimente 1 und 2, wo kein Unterschied zwischen geblocktem und randomisierten Präsentationsmodus gefunden worden war. Auffällig sind die Unterschiede zwischen den Experimenten vor allem bei den ersten Intervallen der Sequenzen und dies auch wiederum vor allem bei den 50- und 250-ms SI-Sequenzen, wie es auch deren Interaktionen mit den Faktoren Präsentationsmodus und Position des VI andeuten.



**Abbildung 15:** Vergleich der Ergebnisse aus Experiment 2 und 5: .75 Unterschiedsschwelle und Standardfehler des Mittelwerts in Abhängigkeit von der Position des variablen Intervalls (VI), der Standarddauer (SI) und des Präsentationsmodus (geblockte Präsentation der SIs in Experiment 5 vs. randomisiert Präsentation der SIs in Experiment 2)

### 2.5.3. Diskussion

Ziel von Experiment 5 war es, der besonderen Rolle der 150 ms SI-Sequenz im geblockten und randomisierten Design nachzugehen und die Bedeutung des Mittelwertes aller in einem Block verwendeter Dauern auf die Wahrnehmungsleistung zu überprüfen. Die Ergebnisse aus Experiment 5 zeigten erneut Unterschiede zwischen den SI-Dauern und bestätigten damit in Übereinstimmung mit der Literatur das verallgemeinerte Webersche Gesetz. Zudem zeigte sich wieder ein Effekt der Position des VI, der auf eine Abhängigkeit der Wahrnehmungsleistung von vorherigen Enkodierungen hindeutet, so wie es das Multiple-Look-Modell oder auch die Dynamic-Attending-Theorie vorhersagen. Wie auch in den vorangegangenen Experimenten konnte in dem geblockten Design bei allen drei SI-Dauern eine Interaktion mit dem Faktor Position des VI beobachtet werden. Das deutet darauf hin, dass erneut die Leistungsverbesserung über die ersten Intervalle hinweg deutlicher bei längeren SI-Dauern ausfiel. Ebenfalls war zu beobachten, dass erneut ein Endeffekt auftrat, was somit ebenfalls die Ergebnisse der vier Experimente zuvor bestätigt.

Für die Fragestellung dieses Experiments am bedeutsamsten zeigte sich zudem ein Unterschied im Vergleich mit Experiment 2 zwischen geblocktem und randomisiertem Präsentationsmodus sowohl für die 50-ms SI-Sequenzen als auch für 250-ms SI-Sequenzen, jedoch nicht für die 150-ms SI-Sequenzen. Diese Ergebnisse stehen im Widerspruch zu den Befunden von Miller und McAuley (2005). Die Autoren hatten festgestellt, dass nur in einer randomisierten Präsentation verschiedener SI-Dauern ein positiver Effekt mehrfacher SI-Präsentationen zu beobachten war. Bei einer geblockten Präsentation von SI-Dauern fanden sie keinen Effekt und begründeten dies damit, dass, wenn ein Oszillator seine Periode nach wenigen Durchgängen an z.B. 400 ms Intervalle angepasst hat, keine weiteren Leistungsverbesserungen mehr in den folgenden Durchgängen möglich und dementsprechend auch nicht zu beobachten sein sollten. Bei einer randomisierten Präsentation hingegen muss sich die Periode in jedem Durchgang immer wieder neu an die wechselnden Dauern adaptieren und positive Effekte mehrfacher SI-Präsentationen können somit im Vergleich zu einer geblockten Präsentation sichtbar werden. Dass in Experiment 3 und 5, in denen die SI-Dauern geblockt dargeboten wurde, trotzdem ein deutlich positiver Effekt der Position des VI auf die Diskriminationsleistung zu finden war, könnte dadurch erklärt werden, dass in der

Zeit zwischen den Durchgängen so etwas wie ein Reset des Systems stattgefunden hat. Das System behält seine Repräsentation oder Periodendauer nicht dauerhaft bei, sondern startet sich neu, in dem es den Gedächtnisinhalt löscht bzw. er einfach verloren geht oder die Periode auf so etwas wie eine Grundfrequenz zurückgesetzt wird oder aber passiv auf diese zurückfällt. Dies würde erklären, warum trotz geblockter Präsentation noch immer eine Verbesserung der Wahrnehmungsleistung über die ersten Intervalle der Sequenz hinweg beobachtet werden konnte. Allerdings scheint es sich dabei nicht um einen kompletten Reset zu handeln. Schaut man sich der Ergebnisse der 50- und 250-ms SI-Sequenzen an, so fällt auf, dass diese bei einer randomisierten Präsentation deutlich höhere Werte vor allem für die ersten drei Intervalle aufweisen, als das in der geblockten Präsentation der Fall ist. Würde ein kompletter Reset des Systems erfolgen, so sollten sich die Profile überhaupt nicht unterscheiden. Die Leistung in der geblockten Präsentation ist für die 50- und 250-ms SI Sequenzen vom ersten Intervall an aber deutlich besser als in der randomisierten Präsentation. Die verbesserte Leistung in der geblockten Präsentation könnte darauf beruhen, dass es bei einer Präsentation von nur einer SI-Dauer pro Block einen positiven Übertrag vom vorherigen Durchgang auf den Folgenden gibt. Dieser Übertrag, der die Leistung der ersten Intervalle verbessert, führt allerdings nicht zu einer vollständig optimierten Verarbeitung der ersten Intervalle, sodass weitere Leistungsverbesserungen nur noch in geringerem Ausmaß beobachtbar sind. Wieso jedoch zeigt sich dieser Effekt nicht bei den 150-ms SI-Sequenzen? Wenn es sich um einen Übertrag von einem Durchgang zum nächsten handelt, der in einem geblockten Design möglich war, ist das keine Erklärung dafür, warum die 150-ms SI-Sequenz auch in einem randomisierten Design so gute Ergebnisse, auch schon für das erste Intervall der Sequenz, zeigte. Dies ließ sich bereits bei dem Vergleich der Ergebnisse von Experiment 2 und 3 beobachten.

Diese besondere Rolle der 150-ms SI-Sequenz könnte durch ihre Positionierung exakt in der Mitte zwischen den 50- und 250-ms SI-Sequenz begründet liegen. Wenn man davon ausgeht, dass sich durch einen Mittelungsprozess aller dargebotenen Dauern der Messfehler reduziert, so wie es der positive Effekt mehrfacher SI-Präsentationen innerhalb eines Durchgangs nahe legt, so könnte sich über mehrere Durchgänge hinweg Ähnliches ereignen. Geht man davon aus, dass alle in einem Block dargebotenen Dauern miteinander zu einem Mittelwert über mehrere Durchgänge hinweg verrechnet werden und sich so eine Art Langzeitrepräsentation

entwickelt, die sich auf die Wahrnehmungsleistung eines jeden Durchgangs auswirkt, so sind die Effekte der 50- und 250-ms SI-Sequenzen, sowie der Nulleffekt der 150-ms SI-Sequenzen zwischen den Bedingungen erklärbar. In einem randomisierten Design, bei dem 50, 150 und 250 ms SI-Sequenzen dargeboten werden, etabliert sich über mehrere Durchgänge hinweg eine Langzeitrepräsentation in Form einer 150 ms SI-Dauer, da dies dem Mittelwert aller Dauern in dem Block entspricht. Dasselbe passiert auch bei einer geblockten Präsentation von 150-ms SI-Sequenz. Auch hier würde die Langzeitrepräsentation einer Dauer von 150 ms entsprechen. Wenn diese Langzeitrepräsentation sich entscheidend auf die Leistung der in einem Durchgang präsentierten SI-Dauer auswirkt, so sollte es für 150-ms SI-Sequenzen keinen Unterschied machen, ob sie in einem Block allein oder zufällig wechselnd mit 50- und 250-ms SI-Sequenzen präsentiert werden. Hingegen sollten Unterschiede zwischen einer geblockten und randomisierten Präsentation bei den 50- und 250-ms SI-Sequenzen auftreten. Im geblockten Design würde die Langzeitrepräsentation exakt der Dauer der SI-Sequenz entsprechen. Wenn sich diese Langzeitrepräsentation als zusätzliche Information der sich erst allmählich verbessernden SI-Dauer-Repräsentation auf der Ebene eines Durchgangs nutzen lässt (so wie das in ähnlicher Form auch Rodríguez-Gironés & Kacelnik, 2001, annehmen, die davon ausgehen, dass die Dauer eines Intervalls nicht nur mit der Dauer eines anderen Intervalls, die im Kurzzeitgedächtnis gespeichert ist, verglichen wird, sondern mit dem Mittelwert aus allen vorhergehenden Dauern, was einer Langzeitrepräsentation ähnelt), so kann die gute Leistung gleich für die ersten Intervalle in einem geblockten Präsentationsmodus erklärt werden, da der gebildete Mittelwert hier exakt der SI-Dauer entspricht. In einem randomisierten Präsentationsmodus hingegen könnte sich diese Langzeitrepräsentation eher negativ bemerkbar machen und die Wahrnehmungsleistung verschlechtern, wenn die Langzeitrepräsentation nicht der SI-Dauer entspricht. Dies wäre bei den 50- und 250-ms SI-Sequenzen in einem randomisierten Präsentationsmodus der Fall, da der Mittelwert aller Dauern in einem solchen Design bei 150 ms liegen würde. Die 150-ms SI-Sequenzen hingegen würden nicht negativ von der 150-ms Langzeitrepräsentation beeinflusst und können eine gute Leistung wie im geblockten Präsentationsmodus zeigen. Diese Erklärung über eine Ausbildung eines Langzeitgedächtnisses steht auch in Einklang mit den Überlegungen von Miller und McAuley (2005). Sie hatten angenommen, dass die Langzeitrepräsentation die

Positionseffekte zunichte machen würde. Die Ergebnisse der Experimente 3-5 zeigen zwar, dass sie lediglich reduziert sind, aber die Effekte gehen in die vorhergesagte Richtung.

Neben der Ausbildung einer Langzeitrepräsentation bieten sich auch noch weitere Erklärungsmöglichkeiten an. Ulrich und Rammsayer (2001) errechneten z.B. für unterschiedlich lange Intervalle Unterschiede in der Impulsfrequenz des Impulsgebers. Geht man davon aus, dass es eine optimale Impulsfrequenz für unterschiedlich lange Intervalle gibt und sich der Impulsgeber auf eine Impulsfrequenz einstellt, die dem Mittelwert aller Dauern innerhalb eines Blocks entspricht, so wären die Effekte ebenfalls erklärbar. In einem randomisierten Design würde der Mittelwert bei 150 ms liegen und eine optimale Impulsfrequenz für die Enkodierung der 150-ms SI-Sequenzen bieten. Diese Frequenz wäre aber weniger gut geeignet für die Verarbeitung von 50- und 250-ms SI-Sequenzen. Dies würde auch die relativ hohen Werte für die ersten Intervalle bei den 50- und 250-ms SI-Sequenzen im randomisierten Design erklären. Diese schlechte Einstellung des Impulsgebers (Effekt des Präsentationsmodus) könnte zu einer grundsätzlich schlechten Enkodierung der Dauern führen, die sich aber durch die Mittelungseffekte im Gedächtnis über mehrere Positionen hinweg verbessern lassen könnten (Positionseffekt). Ist die Einstellung der Impulsfrequenz z.B. in einem geblockten Präsentationsmodus optimal für die jeweilige SI-Dauer eingestellt, so lässt sich die Genauigkeit der SI-Repräsentation nur noch weniger über weitere Intervalle hin optimieren. Daher kommt es zu der Interaktion von SI-Dauer, Position des VI und Präsentationsmodus. Die Ausbildung eines Mittelwertes aus allen dargebotenen Dauern und die Anpassung der Impulsfrequenz an diesen macht strategisch Sinn; denn, auf diese Impulsfrequenz eingestellt, wird ein optimales Arbeitsniveau des Systems für die zu verarbeitenden Dauern erreicht. 150-ms SI-Sequenzen können optimal verarbeitet werden und eine Verarbeitung von 50- oder 250-ms SI-Sequenzen ist zwar nicht optimal, aber die Leistung würde möglicherweise noch weiter reduziert sein, wenn die Impulsfrequenz in Durchgang N-1 auf 250-ms SI-Dauern eingestellt worden ist und im Durchgang N eine 50-ms SI-Sequenz bearbeitet werden müsste. Die Anpassung der Impulsfrequenz vor einer 50-ms SI-Sequenz hin zu einer 250-ms SI-Sequenz könnte eine größere Schwierigkeit für das System darstellen, als wenn es jeweils nur von einer allgemeinen Ausgangsbasis von 150 ms in Richtung 50 oder 250 ms angepasst werden müsste. Die Anpassung der

Impulsfrequenz des Impulsgebers an den Mittelwert aller Dauern wäre somit eine relativ gute Lösung für die unterschiedlichen Leistungseffekte der SI-Dauern in Abhängigkeit vom Präsentationsmodus. Ob es sich letztlich bei dem Effekt des Präsentationsmodus, der sich unterschiedlich auf die SI-Dauern auswirkt, um eine Ausbildung eines Langzeitgedächtnisses handelt oder um eine optimierte Grundeinstellung einer Impulsfrequenz oder Periode eines Oszillators handelt, ist anhand der vorliegenden Befunde nicht zu entscheiden.

Die Ergebnisse des Experiments 5 mit den unterschiedlichen Befunden der 150-ms SI-Sequenzen auf der einen und denen der 50- und 250-ms SI-Sequenzen auf der anderen Seite, im Vergleich von geblockten und randomisierten Design, stehen in einem gewissen Widerspruch zu Überlegungen von Berens und Pastore (2005). Diese gehen davon aus, dass sich nicht die Periode eines Oszillators an die Dauer von den dargebotenen Intervallen anpasst, sondern dass mehrere voneinander unabhängige Oszillatoren versuchen, ihre Periode an die Dauer der präsentierten Reize anzupassen. Dabei haben die jeweiligen Oszillatoren grundsätzlich verschiedene Perioden und können ihre Periode auch nur in einem bestimmten Bereich ändern. Auf Intervalle, die zu lang oder zu kurz sind, kann die Periode nicht eingestellt werden, sondern nur auf Intervalldauern, die nahe an der Eigenfrequenz des jeweiligen Oszillators liegen. Geht man davon aus, dass mehrere verschiedene Oszillatoren verschiedene Zeitdauern enkodieren und dies unabhängig voneinander geschieht, so wäre es durchaus möglich, dass dadurch die Ergebnisse in Bezug auf das ISI von Experiment 1 und 2 erklärt werden könnten. Theoretisch wäre es möglich, dass sich ein Oszillator auf die Dauer der gefüllten Intervalle eingestellt hätte, während ein anderer sich an die ISI Dauer angepasst hätte. Auf diesem Weg wären keine Phasenverschiebungen (Onset-Offset-Adaptation) oder Verlängerungen bzw. Verkürzungen der Periodendauer (Onset-Onset-Adaptation) und damit Leistungsver schlechterungen zu erwarten gewesen, wenn diese Informationen kombiniert werden könnten. Allerdings passen die Ergebnisse aus Experiment 5 dieser Arbeit nicht in dieses Bild, wo es offenbar zu Unterschieden zwischen den SI-Dauern in verschiedenen Präsentationsmodi gekommen ist. Wenn mehrere Oszillatoren die Dauern unabhängig voneinander enkodieren, dann sollten keine Unterschiede zwischen randomisierter und geblockter Präsentation bei den 50- und 250-ms SI-Sequenzen auf der einen und den 150-ms SI-Sequenzen auf der anderen Seite bestehen. Wenn sich die verschiedenen SI-Dauern in ihrer Repräsentation

dermaßen beeinflussen und sich das System auf einen Mittelwert aus allen Dauern einstellt, dann ist die Annahme mehrerer unabhängiger Oszillatoren für verschiedene SI-Dauern nicht sinnvoll. Am einfachsten lässt sich das in den bisherigen Experimenten dieser Arbeit gefundene Ergebnisprofil dadurch erklären, dass sich das System auf eine Dauer einstellt und sich von dieser Grundeinstellung aus innerhalb eines Durchgangs weiter anpasst, anstatt für alle vorkommenden Dauern separate Oszillatoren zu benutzen, um Zeit zu enkodieren.

## 2.6. Experiment 6: Replizierbarkeit von ISI-Nulleffekten und Effekten des Präsentationsmodus bei ISIs, die der SI-Dauer entsprechen?

Ziel von Experiment 6 war es, bisherige Effekte zur ISI-Dauer (Vergleich der Experimente 1 und 2) und einer geblockten und randomisierten Präsentation auf unterschiedliche SI-Dauern (Vergleich der Experimente 2 und 5) in ähnlicher Form zu replizieren, da bei den Vergleichen der Experimente z. T. Nulleffekte beobachtet wurden, die schwer zu interpretieren sind.

Die Ergebnisse aus Experiment 5 legten nahe, dass entgegen den Ergebnissen von Miller und McAuley (2005) auch in einem geblockten Design eine Verbesserung der Wahrnehmungsleistung zu beobachten ist, ähnlich wie in einem randomisierten Design. Jedoch verbessert sich die Wahrnehmungsleistung in einem geblockten Design gegenüber einem randomisierten Design über die ersten Intervalle hinweg weniger stark. Dies hatte ich in Experiment 5 auf einen positiven Übertragungseffekt von einem Durchgang zum nächsten zurückgeführt. Dieser Effekt betrifft vor allem die 50- und 250-ms SI-Sequenzen und nicht die 150-ms SI-Sequenzen, deren SI-Dauer dem Mittelwert aus allen präsentierten Dauern entspricht. Das allgemeine Leistungsniveau scheint zudem in einem geblockten Design besser zu sein als in einem randomisierten, zumindest wurde dies für die 50- und 250-ms SI-Dauern in Experiment 5 gefunden. Für die Sequenz, bestehend aus 150-ms SIs, konnte jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen den Präsentationsmodi gefunden werden. Wie bereits in der Diskussion zu Experiment 5 erläutert wurde, könnten diese Ergebnisse durch die Ausbildung einer Langzeitrepräsentation aus allen im jeweiligen Block präsentierten Dauern zustande gekommen sein. Sie könnte einen positiven Einfluss auf die Diskriminationsleistung haben, wenn sie der jeweiligen SI-



Dauer der zu diskriminierenden Sequenz entspricht. Da für die 150-ms SI-Sequenzen kein Effekt des Präsentationsmodus nachzuweisen war, also nur Nulleffekte zu beobachten waren, ist dieser Befund schwer zu interpretieren und sollte nochmals repliziert werden, bevor ihm eine tiefere inhaltliche Bedeutung beigemessen wird.

Ebenso ergaben die Ergebnisse aus dem Vergleich von Experiment 1 und 2 einen nicht signifikanten Effekt des Faktors ISI-Dauer. Auch hier konnte nur ein Nulleffekt bei dem Leistungsvergleich zwischen den Experimenten festgestellt werden. Auch wenn gute Gründe dafür angeführt werden können, dass die vorgenommenen Manipulationen des ISI funktioniert haben müssten, da unter der Annahme einer Onset-zu-Offset-Adaptation eines oszillatorbasierten Zeitverarbeitungs-Mechanismus eine Phasenverschiebung für jedes der sieben Intervalle der Sequenz zu erwarten gewesen wäre, während andere Studien mit nur einer Phasenverschiebung arbeiteten und durch diese Einzelmaßnahme z.T. schon einen Effekt nachweisen konnten. Zum anderen konnten die Experimente 1-2 (und 5) durch die Verwendung unterschiedlich langer SI-Dauern einen Effekt der SI-Dauer auf die Leistung nachweisen (eine deutlich schlechtere Leistung für 250-ms SI-Sequenzen gegenüber 150-ms SI-Sequenzen). Dieselbe Manipulation an der ISI-Dauer müsste einer Onset-zu-Onset-Adaptationshypothese zufolge den gleichen Effekt erzielen wie die Manipulation der SI-Dauern der Experimente 1-2 und 5. Gefunden wurde aber kein Effekt und es fällt schwer, dies auf einen Fehler in der Manipulation der Periodendauer zurückzuführen, da ein Effekt der SI-Dauer in den vorherigen Experimenten sehr deutlich beobachtet werden konnte. Zudem sagt ein Multiple-Look-Modell, das einen Impulsgeber-Zähler-Mechanismus zur Enkodierung von Intervalldauern nutzt, die gefundenen Nulleffekte bei Manipulationen der ISI-Dauer vorher.

Um jedoch mehr Gewissheit darüber erhalten zu können, ob die gefundenen Nulleffekte bedeutsam oder doch eher nur zufällig oder aufgrund geringer Teststärke durch das Zwischensubjekt-Design zustande gekommen sind, kann man das betreffende Experiment wiederholen, um dem Befund etwas mehr Aussagekraft zu verleihen. Aufgrund der Konfiguration der Experimente 1, 2 und 5 bietet es sich an, wie die Tabelle 1 zeigt, nicht die Experimente 1 und 2 und Experiment 5 noch einmal exakt zu wiederholen, sondern das Vier-Felder-Schema durch einen Versuch zu vervollständigen, in dem die SI-Dauern geblockt und die ISI-Dauer den SI-Dauern angepasst wird. Die ISI-Nulleffekte, die in den Experimenten 1 und 2

beobachtet wurden, sollten sich bei einem Vergleich der Ergebnisse von Experiment 5 und diesem jetzt folgenden sechsten Experiment replizieren lassen, wenn die Sequenzen durch einen Mechanismus verarbeitet werden, der dem Prinzip des Multiple-Look-Modells entspricht. Sollte sich hingegen die Periode eines Oszillators an die Dauer vom Onset zum Offset der Intervalle anpassen, so ist aufgrund notwendiger Phasenkorrekturen zur Synchronisierung des Oszillators mit der zeitlichen Struktur der Sequenz eine Leistungsreduktion durch Phasenverschiebung für alle drei SI-Dauern von Experiment 6 zu Experiment 5 hin zu erwarten. Adaptiert hingegen ein Oszillator seine Periode an die Zeit zwischen den Onsets der Intervalle, so ist zu erwarten, dass die Diskriminationsleistung in Experiment 5 im Vergleich zu Experiment 6 in Bezug auf die 50-ms SI-Sequenz schlechter ausfällt, während sie für die 250-ms SI-Sequenz besser sein sollte. Die Leistung der 150-ms SI-Sequenz sollte sich der Onset-zu-Onset-Hypothese zufolge nicht unterscheiden.

Ein Vergleich dieses sechsten Experiments mit Experiment 1 sollte zu denselben Ergebnissen führen, wie der Vergleich von Experiment 2 und 5, d.h. es sollte zu keinem Unterschied zwischen einer geblockten und randomisierten Präsentation für die 150-ms SI-Sequenzen, sowie zu einer allgemein verbesserten Leistung der 50- und 250-ms SI-Sequenzen kommen. Kein Unterschied sollte sich für die 150-ms SI-Dauer ergeben, da deren Dauer sowohl in einem randomisierten wie in einem geblockten Design dem Mittelwert aller präsentierten Dauern entspricht. Die Leistungsverbesserung mit zunehmender Position des variablen Intervalls sollte zudem für die 50- und 250-ms SI-Sequenzen in diesem sechsten Experiment weniger stark als in Experiment 1 ausfallen, während sich für die 150-ms SI-Sequenzen nichts ändern sollte. Dies lässt sich aus den Überlegungen zum positiven Übertragungseffekt von einem Durchgang zum nächsten ableiten. Ein positiver Übertrag für die 50- und 250-ms SI-Sequenzen ist in einem randomisierten Design nicht möglich, während die 150-ms SI-Sequenzen die sich ausbildende Langzeitrepräsentation in Form des Mittelwertes aller präsentierten Dauern nutzen können, um bereits eine sehr gute Leistung auch für die ersten Intervalle der Sequenz zu erzielen.

**Tabelle 1:** Übersicht über die Experimente 1-2 und 5-6 hinsichtlich der vorgenommenen Variationen im Präsentationsmodus (geblockte vs. randomisierte Präsentation von SI-Dauern) und der Dauer der ISIs (ISI = SI-Dauer vs. ISI = 125 ms)

SI-Dauer	ISI	
	SI-Dauer	125 ms
randomisiert	Experiment 1	Experiment 2
geblockt	Experiment 6	Experiment 5
Langzeitrepräsentation?		
Dynamic-Attending-Theorie vs. Multiple-Look-Modell		

### 2.6.1. Methode

#### *Versuchspersonen*

18 Studierende (13 weiblich, 5 männlich) der Universität Göttingen im Alter von 19-41 Jahren ( $M = 23.39$ ;  $SD = 5.67$ ) nahmen am Experiment teil. Sie waren naiv hinsichtlich der Fragestellung des Experiments. Für ihre Teilnahme wurde ihnen eine Versuchspersonenstunde attestiert.

#### *Apparatur und Stimuli*

Wie in Experiment 1-5

#### *Prozedur*

Die Prozedur entspricht der von Experiment 5 mit einer Ausnahme. Anstatt eine für alle SI-Dauern gleiche ISI-Dauer von 125 ms zu verwenden, wurde die ISI-Dauer an die jeweilige SI-Dauer, genauso wie in Experiment 1, angepasst.

#### *Design*

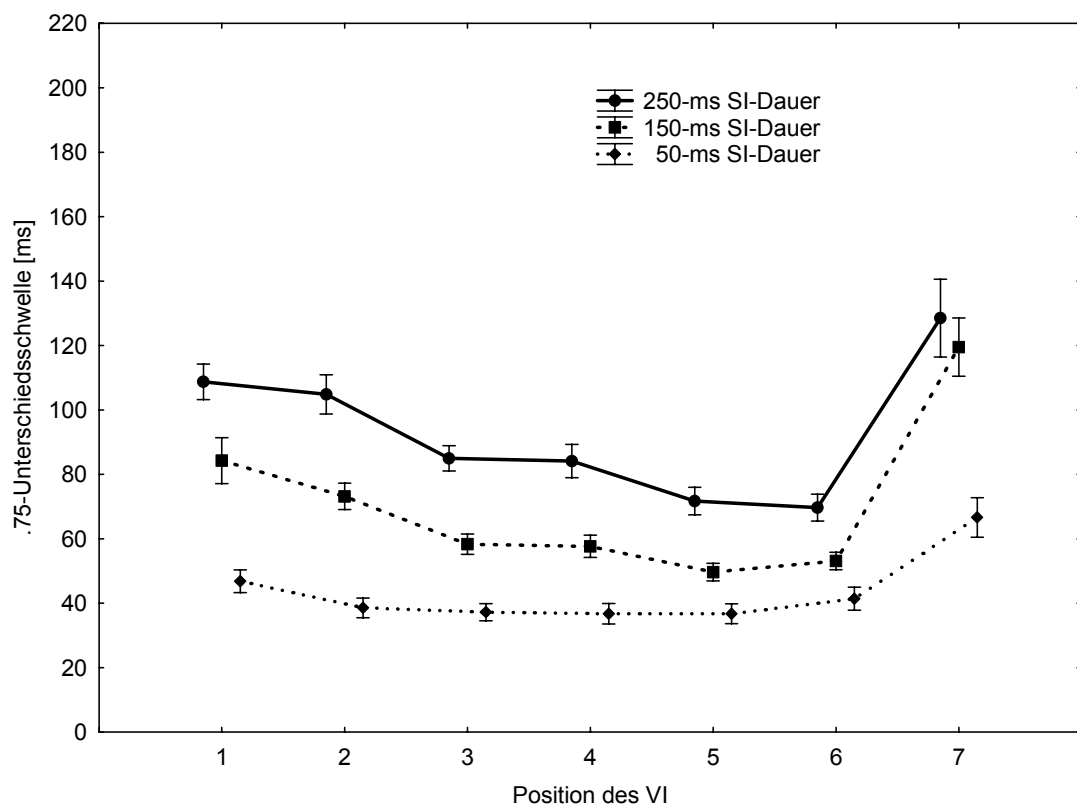
Wie in Experiment 1-2 und 5

### 2.6.2. Ergebnisse

Abbildung 14 veranschaulicht die durchschnittliche Wahrnehmungsleistung eines abweichenden Intervalls in Abhängigkeit von der SI-Dauer und der Position des VI in Experiment 6. Wie in den Experimenten 1-2 und 5 wurden die niedrigsten Wahrnehmungsschwellen für die 50-ms SI-Sequenz und die höchsten Werte für die 250-ms SI-Sequenz ermittelt. Die Wahrnehmungsschwellen für die 150-ms SI-Sequenz lagen zwischen denen der 50- und 250-ms SI-Sequenzen, genauso wie es das Webersche Gesetz vorhersagt. Wie die Analyse mittels zweifaktorieller ANOVA mit Messwiederholung zeigte, erwies sich der Haupteffekt der SI-Dauer als statistisch signifikant,  $F(2, 34) = 91.03, p < .001, \eta^2_p = .84, \varepsilon = .93$ . Ebenso wurde, wie in den bisherigen Experimenten auch, der Faktor Position des VI signifikant,  $F(6, 102) = 40.90, p < .001, \eta^2_p = .71, \varepsilon = .34$ . Wie Abbildung 16 zu entnehmen ist, wurde sowohl eine Verbesserung der Leistung von Position 1-6 als auch ein deutlicher Leistungsabfall für die letzte Position gefunden, die für diesen Haupteffekt verantwortlich sein könnten. Dabei wurde in Experiment 6 auch erneut mit zunehmender SI-Dauer der Effekt der Verbesserung der Leistung über die Positionen hinweg deutlicher erkennbar. So verbessert sich die Leistung der 50-ms SI-Sequenz von Position 1 hin zu Position 6 um 5.44 ms, für die 150-ms SI-Sequenz beträgt die Differenz zwischen erster und sechster Position 31.17 ms und für die 250-ms SI-Sequenz 39.06 ms. Dementsprechend wurde auch die Interaktion der beiden Faktoren SI-Dauer und Position des VI signifikant,  $F(12, 204) = 8.55, p < .001, \eta^2_p = .33, \varepsilon = .33$ , in Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus den vorausgegangenen Experimenten.

Eine einfaktorielle ANOVA für die 50-ms SI-Sequenz zeigte, dass die Position des VI einen signifikanten Einfluss auf die Diskriminationsleistung hat,  $F(6, 102) = 17.09, p < .001, \eta^2_p = .50, \varepsilon = .37$ . Bonferroni Post-hoc-Tests zeigten allerdings, dass es nur zu einem einzigen signifikanten Unterschied zwischen den Positionen kommt: Position 7 > 1-6. Der Faktor Position des VI wurde auch für die 150-ms SI-Sequenz signifikant,  $F(6, 102) = 37.76, p < .001, \eta^2_p = .69, \varepsilon = .42$ . Die Anzahl signifikanter Unterschiede zwischen den Positionen, ermittelt durch Bonferroni Post-hoc-Tests, stieg an im Vergleich zur 50-ms SI-Sequenz, so wie es die Interaktion von SI-Dauer und Position des VI erwarten lässt. Folgende Unterschiede wurden signifikant: Position 1 > 3-6; Position 2 > 5; Position 7 > 1-6. Auch für die 250-ms Intervallsequenz konnte ein signifikanter Effekt der Position

des VI auf die Wahrnehmungsleistung nachgewiesen werden,  $F(2, 34) = 21.92$ ,  $p < .001$ ,  $\eta_p^2 = .56$ ,  $\varepsilon = .33$ . Bonferroni Post-hoc-Tests belegten folgende signifikanten Unterschiede: Position 1 > 3-6; Position 2 > 4-6; Position 7 > 2-6. Insgesamt zeigten die Ergebnisse also einen Effekt der Position des VI auf die Leistung, die über die ersten Positionen besser wird und dann saturiert, um an der letzten Position wiederum schlechter zu werden. Der Effekt der Verbesserung ist dabei bei längeren SI-Sequenzen stärker zu beobachten als bei kurzen, so wie es auch die Interaktion der Faktoren SI-Dauer und Position des VI angedeutet hat.

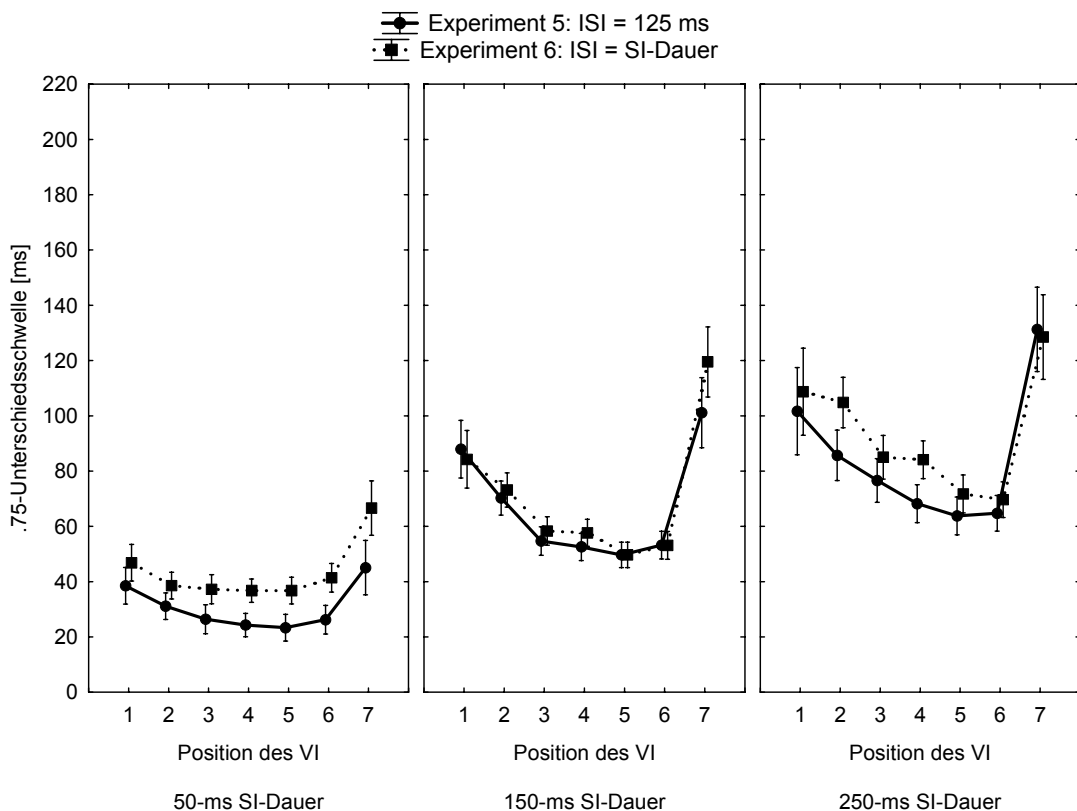


**Abbildung 16:** .75-Unterschiedsschwelle und Standardfehler des Mittelwerts in Abhängigkeit von der Position des variablen Intervalls (VI) und von der Standarddauer (SI) in Experiment 6

#### Analyse der Effekte der ISI-Dauer auf die Wahrnehmungsleistung

Um wie bei den Experimenten 1 und 2 den Einfluss der ISI-Dauer auf die Diskriminationsleistung zu untersuchen, bietet sich dieser Vergleich auch für die Experimente 5 und 6 an. Abbildung 17 veranschaulicht den Zusammenhang der Wahrnehmungsleistung für die Erkennung eines abweichenden Intervalls der

Sequenz in Abhängigkeit der SI-Dauer, der Position des VI sowie der ISI-Dauer in den Experimenten 5 und 6. Man kann erkennen, dass es mit zunehmender SI-Dauer zu einer Erhöhung der absoluten Unterschiedsschwellenwerte kam. Eine dreifaktorielle ANOVA mit den Innersubjekt-Faktoren SI-Dauer und Position des VI, sowie dem Zwischensubjekt-Faktor ISI-Dauer belegt diese Beobachtung, da der Haupteffekt des Faktors SI-Dauer sich als signifikant erwies,  $F(2, 68) = 176.88$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .84$ ,  $\varepsilon = .97$ . Ebenfalls wurde der Haupteffekt des Faktors Position des VI signifikant,  $F(6, 68) = 66.95$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .66$ ,  $\varepsilon = .36$  und verweist damit auf einen statistisch bedeutsamen Einfluss der Position des VI auf die Diskriminationsleistung, wie bereits in den vorausgehenden Einzelanalysen der Experimente gezeigt wurde. Zudem lässt Abbildung 17 auch erkennen, dass die Leistungsverbesserung deutlicher bei längeren SI-Dauern auftrat, was durch die signifikante Interaktion von SI-Dauer und Position des VI,  $F(12,408) = 14.02$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .29$ ,  $\varepsilon = .41$ , bestätigt wurde.



**Abbildung 17:** Vergleich der Ergebnisse aus Experiment 5 und 6. .75 Unterschiedsschwelle und Standardfehler des Mittelwerts in Abhängigkeit von der Standarddauer (SI), der Position des variablen Intervalls (VI) und der Interstimulus-Intervalldauer (ISI)

Bei dem Vergleich der Ergebnisse der beiden Experimente (siehe Abbildung 17) zeigte sich außerdem, dass im Gegensatz zum Vergleich der Experimente 1 und 2 das ISI einen Einfluss auf die Diskriminationsleistung bei den 50- und 250-ms SI-Sequenzen hatte, während bei der 150-ms SI-Sequenz kein Unterschied feststellbar war. So wurde der Zwischensubjekt-Faktor ISI-Dauer (ISI= 125 ms und ISI=SI) auch nicht signifikant. Es konnte aber ein statistischer Trend ( $p < ,1$ ) ermittelt werden,  $F(1, 34) = 2.92, p < .1, \eta^2_p = .08$ . Die Interaktion der Faktoren SI-Dauer und ISI-Dauer erweist sich als nicht signifikant,  $F(2, 68) = 1.30, p = .28, \eta^2_p = .04, \varepsilon = .97$ , ebenso wie die Interaktion von Position des VI mit dem Faktor ISI-Dauer,  $F(6, 68) = .44, p = .66, \eta^2_p = .01, \varepsilon = .36$ . Jedoch wurde die dreifaktorielle Interaktion der Faktoren SI-Dauer, Position des VI und ISI-Dauer signifikant,  $F(12, 408) = 2.58, p < .05, \eta^2_p = .07, \varepsilon = .41$ .

Um den Einfluss des ISI näher im Bezug auf die einzelnen SI-Dauern zu untersuchen, wurde jeweils eine zweifaktorielle ANOVA mit dem Innersubjekt-Faktor Position des VI und dem Zwischensubjekt-Faktor ISI-Dauer für jede der drei SI-Sequenzen separat durchgeführt. Wie bereits Abbildung 17 erkennen ließ, erwies sich der Faktor ISI-Dauer als bedeutsam für die 50-ms SI-Sequenzen,  $F(1, 34) = 11.09, p < .01, \eta^2_p = .25$ . Die Leistung war signifikant besser bei einem ISI von 125 ms im Vergleich zu einem ISI von 50 ms. Der Effekt der Position des VI wurde ebenfalls signifikant,  $F(6, 204) = 31.63, p < .001, \eta^2_p = .48, \varepsilon = .40$ . Die Interaktion der beiden Faktoren wurde nicht signifikant,  $F(6, 204) = 2.06, p = .12, \eta^2_p = .06, \varepsilon = .40$ . Bonferroni Post-hoc-Tests zur Analyse des Haupteffektes ISI-Dauer ergaben nur einen einzigen signifikanten Unterschied in der Leistung zwischen der Position 7 in beiden Experimenten (schlechtere Leistung in Experiment 6). Im Gegensatz zu den 50-ms SI-Sequenzen konnte kein Effekt der ISI-Dauer auf die Diskriminationsleistung bei den 150-ms SI-Sequenzen festgestellt werden,  $F(1, 34) = .36, p = .55, \eta^2_p = .01$ . Der Faktor Position des VI hingegen erwies sich als signifikant,  $F(6, 204) = 48.24, p < .001, \eta^2_p = .59, \varepsilon = .38$ . Die Interaktion der Faktoren ISI-Dauer und Position des VI erreicht das Signifikanzniveau nicht,  $F(6, 204) = 1.21, p = .30, \eta^2_p = .03, \varepsilon = .38$ . Dasselbe Ergebnismuster zeigte sich bei der Analyse der 250 ms SI-Sequenzen: Der Faktor ISI-Dauer wurde nicht signifikant,  $F(1, 34) = 1.53, p = .22, \eta^2_p = .04$ , der Faktor Position des VI wurde signifikant,  $F(6, 204) = 47.22, p < .001, \eta^2_p = .58, \varepsilon = .38$  und die Interaktion der beiden Faktoren erwies sich als nicht signifikant,  $F(6, 204) = 1.17, p = .32, \eta^2_p = .03, \varepsilon = .38$ .

Die Ergebnisse belegen, dass die ISI-Dauer Manipulation nur einen Effekt auf die 50-ms SI-Sequenz hat, was einer schlechteren Leistung bei ISIs die der SI-Dauer entsprechen lag, für die 150- und 250-ms SI-Sequenzen konnten keine Unterschiede ausfindig gemacht werden. Erneut wurden wie bei dem Vergleich von Experiment 1 und 2 auch keine Interaktionen der Faktoren SI-Dauer und Position des VI mit der ISI-Dauer beobachtet.

#### *Analyse der Effekte des Präsentationsmodus auf die Wahrnehmungsleistung*

Um zu überprüfen, inwieweit sich der Einfluss des Präsentationsmodus auf die Diskriminationsleistung auswirkt, wurden die Ergebnisse von Experiment 1 und 6, wie schon zuvor die Experiment 2 und 5 miteinander verglichen. Dazu wurde zunächst eine dreifaktorielle ANOVA mit den Innersubjekt-Faktoren SI-Dauer und Position des VI und dem Zwischensubjekt-Faktor Präsentationsmodus (geblockt vs. randomisiert) durchgeführt. Die SI-Dauer hatte einen signifikanten Einfluss auf die Wahrnehmungsleistung,  $F(2, 68) = 133.59, p < .001, \eta^2_p = .80, \varepsilon = .76$ . Wie in den Experimenten 1-2 und 5 wiesen längere SI-Sequenzen höhere absolute Unterschiedsschwellenwerte auf als kürzere SI-Sequenzen. Wie in den Experimenten zuvor auch wurde der Faktor Position des VI signifikant,  $F(6, 204) = 52.13, p < .001, \eta^2_p = .61, \varepsilon = .36$ . Ursache hierfür dürfte wie in den bereits zuvor durchgeführten Einzelanalysen der Experimente eine Leistungsverbesserung über die ersten Positionen der Sequenzen sowie der Endeffekt verantwortlich sein. Die Leistungsverbesserung zeigte sich zudem erneut deutlicher bei den SI-Sequenzen, die längere SIs verwendeten, was in der signifikanten Interaktion der Faktoren SI-Dauer und Position des VI zum Ausdruck kommt,  $F(12, 408) = 15.79, p < .001, \eta^2_p = .32, \varepsilon = .42$ .

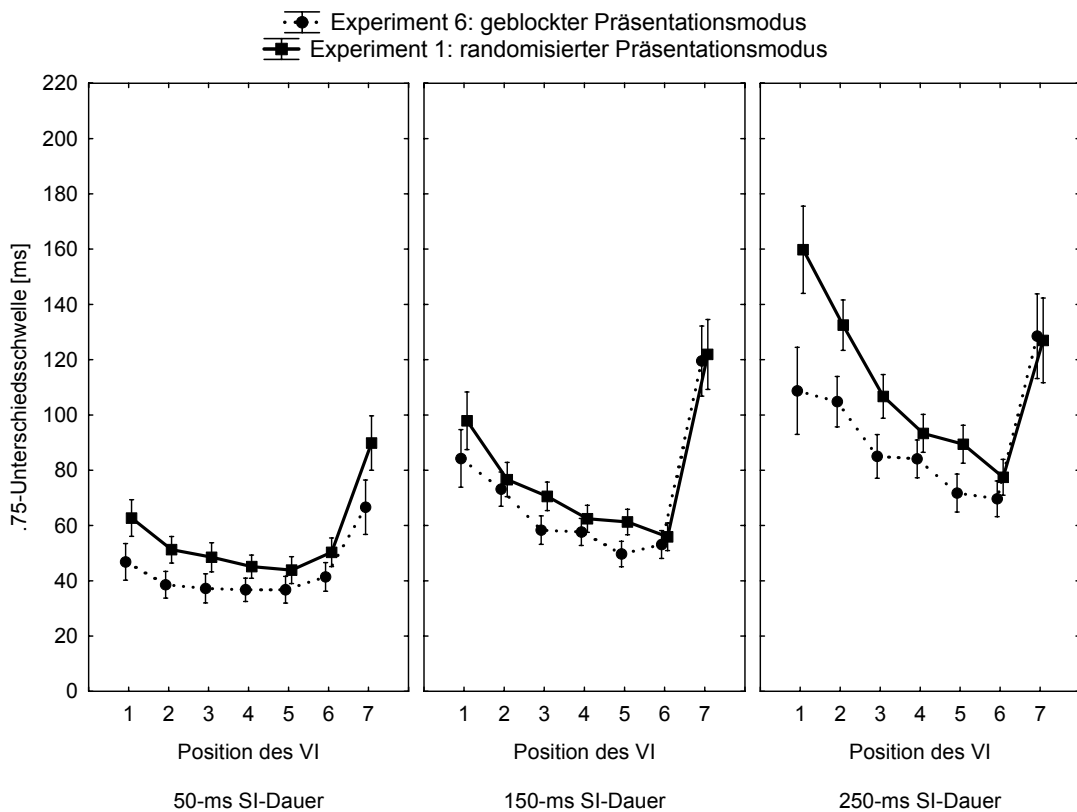
Der Faktor Präsentationsmodus hingegen wird nicht signifikant,  $F(1, 34) = 2.51, p = .12, \eta^2_p = .07$ . Wie Abbildung 18 zu entnehmen ist, ergaben sich, wenn überhaupt, Unterschiede zwischen den Präsentationsmodi nur für die 50- und 250-ms SI-Sequenzen, wobei die Wahrnehmungsleistung in Experiment 1 (randomisierter Präsentationsmodus) geringer als in Experiment 6 (geblockter Präsentationsmodus) ausfiel. Die Unterschiede zwischen den Experimenten 1 und 6 bei den 50- und 250-ms SI-Sequenzen schien, wie den Abbildungen 9 und 18 entnommen werden kann, schwächer ausgeprägt als bei dem Vergleich der Experimente 2 und 5. Erneut schienen aber die 150-ms SI-Sequenzen in einem geblockten wie randomisierten



Präsentationsmodus gleich gut zu verarbeiten zu sein. Da die Effekte zwischen den Experimenten bei den 50- und 250-ms SI-Sequenzen weniger deutlich ausfielen, wurde vermutlich die Interaktion zwischen den Faktoren SI-Dauer und Präsentationsmodus nicht signifikant,  $F(2, 68) = 1.66, p = .20, \eta^2_p = .05, \varepsilon = .76$ . Unter Einbeziehung aller drei Faktoren (SI-Dauer, Position des VI und Präsentationsmodus) wird die Interaktion jedoch signifikant,  $F(12, 408) = 3.67, p < .01, \eta^2_p = .10, \varepsilon = .42$ . Dieser Befund unterstreicht den unterschiedlichen Einfluss des Präsentationsmodus auf die Wahrnehmungsleistung der 50- und 250-ms SI-Sequenzen auf der einen und den 150-ms SI-Sequenzen auf der anderen Seite. Während sich bei den 150-ms keine Interaktion zwischen dem Präsentationsmodus und der Position des VI zeigte, so ergab sich für die 50- und 250-ms SI-Sequenzen diese Interaktion, da der Effekt der Leistungsverbesserung über die ersten Intervalle hinweg deutlicher ausgeprägt ist in Experiment 6 im Vergleich zu Experiment 1 (siehe Abbildung 18). Die Interaktion aus Position des VI und Präsentationsmodus wurde ebenfalls nicht signifikant,  $F(6, 204) = 1.72, p = .18, \eta^2_p = .05, \varepsilon = .36$ .

Da sich der Einfluss des Präsentationsmodus unterschiedlich auf die drei SI-Sequenzen auswirkte, wurde der Einfluss des Präsentationsmodus auf die Diskriminationsleistung mithilfe von zweifaktoriellen ANOVAs mit dem Innersubjekt-Faktor Position des VI und dem Zwischensubjekt-Faktor Präsentationsmodus analysiert. Für die 50-ms SI-Sequenzen ergab sich dabei folgendes Bild: Der Faktor Präsentationsmodus wurde nicht signifikant,  $F(1, 34) = 2.65, p = .11, \eta^2_p = .07$ . Dafür erwies sich aber der Faktor Position des VI als signifikant,  $F(6, 204) = 26.60, p < .001, \eta^2_p = .43, \varepsilon = .36$ . Die Interaktion aus beiden Faktoren hingegen erwies sich als nicht signifikant,  $F(6, 204) = 1.14, p = .33, \eta^2_p = .03, \varepsilon = .36$ . Bei den 150-ms SI-Sequenzen erwies sich der Unterschied zwischen den Experimenten, d.h. zwischen einem geblockten und randomisierten Präsentationsmodus der drei SI-Dauern ebenfalls als nicht signifikant,  $F(1, 34) = .80, p = .38, \eta^2_p = .02$ . Aber wie in allen anderen Experimenten zuvor auch ergab sich ein statistisch signifikanter Einfluss der Position des VI auf die Diskriminationsleistung,  $F(6, 204) = 47.08, p < .001, \eta^2_p = .58, \varepsilon = .42$ . Die Interaktion zwischen den beiden Faktoren wurde hingegen nicht signifikant,  $F(6, 204) = .50, p = .81, \eta^2_p = .01, \varepsilon = .42$ . Bei den 250-ms SI-Sequenzen zeigte sich ein ähnliches Bild wie bei den 50-ms SI-Sequenzen: Der Faktor Präsentationsmodus verfehlt das Signifikanzniveau, jedoch ergibt sich ein statistischer Trend ( $p < .1$ ),  $F(1, 34) = 3.10, p = .09, \eta^2_p = .08$ .

Die Leistung in Experiment 6 erwies sich, wie Abbildung 18 erkennen ließ, als geringfügig schlechter als in Experiment 1. Der Faktor Position des VI hingegen erwies sich als signifikant,  $F(6, 204) = 36.07, p < .001, \eta^2_p = .51, \varepsilon = .44$ . Ebenso wurde die Interaktion der Faktoren Position des VI und Präsentationsmodus signifikant,  $F(6, 204) = 4.57, p < .01, \eta^2_p = .12, \varepsilon = .44$ . Abbildung 18 veranschaulicht, dass dies wohl darauf zurückzuführen ist, dass die Leistungsverbesserung über die ersten Positionen hinweg in Experiment 6 stärker ausgeprägt war als in Experiment 1. Das konnte man auch schon beim Vergleich von Experiment 1 und 2 beobachten, dort allerdings nicht nur für die 250-ms SI-Sequenzen sondern auch für die 50-ms SI-Sequenzen.



**Abbildung 18:** Vergleich der Ergebnisse von Experiment 1 und 6: .75 Unterschiedsschwelle und Standardfehler des Mittelwerts in Abhängigkeit von der Position des variablen Intervalls (VI), der Standarddauer (SI) und des Präsentationsmodus (geblockte Präsentation der SI-Dauern in Experiment 6 vs.

### 2.6.3. Diskussion

Ziel von Experiment 6 war es, die ISI-Effekte aus dem Vergleich von Experiment 1 und 2 sowie den Effekt des Präsentationsmodus, der schon bei dem Vergleich der Leistung von Experiment 2 und 5 zu beobachten war, mit einem leicht abgewandelten Design zu replizieren, da in den vorherigen Vergleichen z.T. Nulleffekte ermittelt wurden, die allgemein schwer zu interpretieren sind.

#### *Diskussion der Effekte der ISI-Dauer auf die Wahrnehmungsleistung*

Der Vergleich von Experiment 1 und 2 bestätigte die Vorhersagen des Multiple-Look-Modells, da keinerlei Unterschiede zwischen den ISI-Bedingungen gefunden wurden. Den Vorhersagen der Dynamic-Attending-Theorie hingegen zufolge hätte es zu einer Verschlechterung der Ergebnisse durch Phasenverschiebungen bei Annahme einer Onset-zu-Offset-Adaptation bzw. eine Verbesserung der Leistung für die 50-ms und eine Verschlechterung der Leistung der 250-ms SI-Sequenzen bei einer Onset-zu-Onset-Adaptation kommen sollen. Beide Adaptationsvarianten fanden somit durch die empirischen Ergebnisse der Experimente 1 und 2 keine Bestätigung, allerdings beruhte diese Schlussfolgerung auf der Interpretation eines Nulleffektes. Dieselben Erwartungen galten auch für den Vergleich von Experiment 5 und 6, wo erneut der Einfluss der ISI-Dauer auf die Wahrnehmungsleistung überprüft wurde. Die Ergebnisse dieses Vergleichs fielen allerdings nicht so deutlich aus wie bei dem Vergleich von Experiment 1 und 2, da hier ein signifikanter Einfluss der ISI-Dauer auf die 50-ms SI-Sequenzen gefunden wurde. Da die Leistung der 50-ms SI-Sequenz bei ISIs von 50 ms in Experiment 6 schlechter ausfiel als bei ISIs von 125 ms in Experiment 5, widerspricht das Ergebnis dem Multiple-Look-Modell, da dies keinen Unterschied vorhergesagt hat. Der Vergleich widerspricht allerdings auch und sogar in stärkerem Maße den Vorhersagen der Dynamic-Attending-Theorie. Denn die Vorhersage der Dynamic-Attending-Theorie war, dass es zu einer besseren Leistung in Experiment 6 im Vergleich zu Experiment 5 sowohl unter Annahme einer Onset-zu-Offset als auch einer Onset-zu-Onset Adaptation der Periode hätte kommen müssen. Hingegen wurde genau der gegenteilige Effekt gefunden. Die Leistung in Experiment 6 ist signifikant niedriger als in Experiment 5. Für die 150-ms SI-Sequenzen sind für beide Modelle keine größeren Unterschiede zwischen den ISI-Bedingungen zu erwarten gewesen, da sich die ISI-Dauern nur geringfügig unterschieden haben (ISI = 125 ms vs. ISI = 150 ms) und die Ergebnisse zeigen auch

tatsächlich, dass kein signifikanter Unterschied zwischen den ISI-Bedingungen bestand. Bei den 250-ms SI-Sequenzen schließlich wäre aufgrund einer Onset-zu-Offset-Adaptation der Dynamic-Attending-Theorie eine Verbesserung der Diskriminationsleistung mit ISIs von 250 ms gegenüber einem ISI von 125 ms zu erwarten gewesen. Dies tritt in Experiment 6 aber nicht auf, vielmehr scheint das Gegenteil der Fall zu sein, da die Werte für die ISIs mit 250 ms über denen mit ISIs von 125 ms liegen. Der Unterschied wurde allerdings nicht signifikant. Wäre dieser Unterschied signifikant, würde das Ergebnis für eine Onset-zu-Onset-Adaptation eines Oszillators sprechen, da sich die Periodenlänge bei einem ISI von 250 ms gegenüber einem ISI von 125 ms verlängern würde. Eine Verlängerung der Periode sollte mit einer schlechteren Wahrnehmungsleistung einhergehen, so wie wir das auch für die unterschiedlichen Standarddauern gefunden haben. Da wir keinen signifikanten Unterschied in den ISI-Bedingungen fanden, findet die Onset-zu-Onset-Adaptationshypothese eines sich einschwingenden Oszillators keine Unterstützung. Vielmehr entsprechen die Ergebnisse den Vorhersagen des Multiple-Look-Modells, da es keinen Einfluss des ISI auf die Leistung vorhergesagt hat. Diese Vorhersage wurde nur bei einem Vergleich der 50-ms SI-Sequenzen zwischen Experiment 5 und 6 verletzt, während alle restlichen fünf Vergleiche die Vorhersage bestätigten (auch wenn Vorsicht bei der Interpretation geboten ist, da es sich hierbei um Nulleffekte handelt). Die Vorhersagen der Dynamic-Attending-Theorie hingegen konnten in den Vergleichen mehrfach nicht bestätigt werden, da in drei Vergleichen kein signifikanter Effekt zu beobachten war (50-ms SI-Sequenzen in den Experimenten 1 & 2 und 250-ms SI-Sequenzen in den Experimenten 1 & 2 und 5 & 6). In zwei weiteren Vergleichen wurde ein Nulleffekt vorausgesagt, der eingetreten ist (150-ms SI-Sequenzen bei dem Vergleich der Experimente 1 & 2 und 5 & 6). Aber es wurde auch eine bessere Leistung für die 50-ms SI-Sequenzen für die 50-ms ISI Bedingung im Vergleich zur 125-ms Bedingung in Experiment 6 vorhergesagt, gefunden wurde aber ein diametral entgegengesetzter Effekt, eine signifikante Leistungsverschlechterung und dies widerspricht deutlich den Vorhersagen der Dynamic-Attending-Theorie.

#### *Diskussion der Effekte des Präsentationsmodus auf die Wahrnehmungsleistung*

Die Ergebnisse von Experiment 6 bestätigten erneut die Gültigkeit des Weberschen Gesetzes, da die Wahrnehmungsschwellen mit zunehmender SI-Dauer

größer wurden, so wie das bereits in den Experimenten 1, 2 und 5 der Fall war. Hinsichtlich der Frage, ob die Position des VI einen Einfluss auf die Diskriminationsleistung hat, wurde auch dies wie in den Experimenten 1 bis 5 durch Experiment 6 positiv bestätigt. Dementsprechend bestätigt Experiment 6 erneut die Vorhersagen der Dynamic-Attending-Theorie und des Multiple-Look-Modells und widerlegt die Annahme, dass Intervalle einer Sequenz unabhängig voneinander verarbeitet werden, so wie es das klassische Impulsgeber-Zähler-Modell nahelegt. Da es sich bei dem Design von Experiment 6 um eine geblockte Präsentation der SI-Dauern handelt, bestätigt dies die Befunde aus den Experimenten 3-5, wo ebenfalls ein signifikanter Einfluss der Position des VI auf die Diskriminationsleistung zu beobachten war, obwohl innerhalb eines Blocks oder Experiments immer nur eine SI-Dauer verwendet wurde. Dies spricht erneut gegen die Befunde von Miller und McAuley (2005), die keinen Effekt multipler SI-Präsentationen auf die Diskriminationsleistung in einem geblockten Präsentationsmodus fanden, sondern nur in einem randomisierten Design. Die Ergebnisse der bisherigen Experimente lassen vermuten, dass die Repräsentation der Standarddauer aus einem Durchgang bis zu Beginn des nächsten Durchgangs teilweise verblasst und dementsprechend auch in einem geblockten Design noch eine reduzierte Leistung für die ersten Intervalle der Sequenz gefunden werden kann. Das System muss sich mit jedem Durchgang jeweils noch mal neu adaptieren, auch wenn schon in vorhergehenden Durchgängen eine optimale Repräsentation der SI-Dauer ausgebildet worden war. Vergleicht man die Ergebnisse aus Experiment 6, in dem pro Block nur eine SI-Dauer verwendet wurde, mit denen aus Experiment 1, in dem die drei SI-Dauern zufällig von Durchgang zu Durchgang wechselten, so wird die Annahme eines Verblässens der Repräsentation über einen Durchgang hinweg, sowie eines positiven Übertrags der Repräsentation in einem geblockten Design, erneut durch das sechste Experiment teilweise bestätigt. Denn es kam zwar zu einer Interaktion zwischen Präsentationsmodus und Position des VI für die 250-ms SI-Sequenzen. Aber das sollte, wie bei dem Vergleich von Experiment 2 und 5, auch für die 50-ms SI-Sequenzen für die Experimente 1 und 6 zu finden sein. Allerdings wird die Interaktion der beiden Faktoren nicht signifikant. Dabei kann man aufgrund von Abbildung 18 den Eindruck bekommen, dass wie bei den 250-ms SI-Sequenzen auch die ersten Intervalle der 50-ms SI-Sequenz bei der randomisierten Präsentation in Experiment 1 im Vergleich zur geblockten Präsentation in Experiment 6 weitaus

höhere Werte aufwiesen als an späteren Positionen. Dass in einem geblockten Design die Werte für die ersten Intervalle der Sequenz gleich niedriger ausfallen, könnte an Übertragungseffekten aus dem vorherigen Durchgang liegen. Wenn sich dort schon eine Repräsentation für die 50-ms SI-Sequenz ausgebildet hat und eine eben solche Sequenz folgt, dann sollte die Leistung zu Beginn der folgenden Sequenz besser sein. In einem randomisierten Design ging der 50-ms SI-Sequenz aber möglicherweise eine 250-ms SI-Sequenz voraus und das System hat eine 250-ms Repräsentation noch gespeichert. Diese 250-ms Repräsentation würde der Erkennung von Unterschieden in einer 50-ms SI-Sequenz nicht helfen, sondern ihr womöglich eher schaden und würde somit die höheren Werte für die ersten Intervalle im randomisierten Präsentationsmodus erklären können. Geht man von einer schnellen Adaptation des Systems auf die neuen Zeitdauern aus, so fällt der Unterschied zwischen dem randomisierten und geblockten Präsentationsmodus für Intervalle an den hinteren Positionen der Sequenz geringer aus. Dies sollte dann zu einer Interaktion zwischen Darbietungsmodus und Position des VI führen. Wenn man diesen Effekt nur für die 50- und 250-ms SI-Sequenzen findet, so deutet das darauf hin, dass es neben einem Übertrag von Durchgang zu Durchgang auch noch einen Übertrag vom Mittelwert aus allen Dauern im jeweiligen Block geben könnte, wie bereits in der Diskussion von Experiment 5 erläutert wurde. Da in einem randomisierten Design mit 50-, 150- und 250-ms SI-Sequenzen derselbe Blockmittelwert wie in einem geblockten Design mit 150-ms SI-Sequenzen entsteht, ist zu erwarten, dass sich keine Unterschiede zwischen den Präsentationsmodi für die 150-ms SI-Sequenzen ergeben. Diesen prognostizierten Nulleffekt bestätigten die Ergebnisse aus dem Vergleich von Experiment 1 und 6 sowie die aus Experiment 2 und 5. Auffällig ist, dass die Effekte zwischen Experiment 2 und 5 eindeutiger waren als zwischen Experiment 1 und 6. Zum einen könnte dies daran gelegen haben, dass in Experiment 6 außergewöhnlich viele Versuchspersonen ersetzt werden mussten. Während in den Experimenten 1-2 und 5 jeweils zwei oder drei Versuchspersonen ersetzt werden mussten, waren es in Experiment 6 sieben Versuchspersonen. Auch wenn immer dasselbe Ausschlusskriterium (zwei Standardabweichungen über dem Median an mehr als fünf Positionen) verwendet wurde, so könnte dies möglicherweise doch eine Verzerrung der Ergebnisse darstellen. Möglicherweise ist das Experiment 6 durch sein Design deutlich schwieriger gewesen und deswegen mussten mehr Versuchspersonen ersetzt werden. Es ist aber auch genauso gut

möglich, dass es sich hierbei um einen zufälligen Stichprobeneffekt und somit einen Zwischensubjekt-Effekt gehandelt hat. Ebenso denkbar und inhaltlich interessanter wäre es aber auch, den geringeren Effekt zwischen Experiment 1 und 6 auf einen Effekt der ISI-Dauer zurückzuführen. In den Experimenten 1 und 6 wurde die ISI-Dauer an die SI-Dauer angepasst. In den Experimenten 2 und 5 hingegen betrug das ISI für alle Dauern 125 ms. Es scheint so, als ob die Anpassung der ISI-Dauern an die SI-Dauer die Leistung gerade im geblockten Präsentationsmodus eher verschlechtert hat, was auch die statistische Analyse bestätigte. So wurde insgesamt ein statistischer Trend für den Faktor ISI-Dauer bei der dreifaktoriellen Analyse über alle drei SI-Dauern und ein signifikanter Unterschied für die 50-ms SI-Sequenz bei der zweifaktoriellen Analyse vorgefunden. Betrachtet man die Ergebnisse der 250-ms SI-Sequenz in Abbildung 18, so fällt auf, dass auch hier die Werte tendenziell bei einer an die SI-Dauer angepassten ISI-Dauer höher sind als bei der einheitlichen Verwendung von 125-ms ISI-Dauern. Diese generell schlechtere Leistung verringert den Unterschied zwischen dem geblockten und randomisierten Präsentationsmodus und lässt die Effekte dementsprechend geringer werden. Auf eine Diskussion dieses Befundes soll an dieser Stelle zunächst verzichtet werden. Sie wird aber in der generellen Diskussion nochmals thematisiert werden.

## 2.7. Zusammenfassung der Effekte von SI-Dauer, Position des VI, ISI-Dauer und Präsentationsmodus über die Experimente 1-2 und 5-6:

Da die Daten aus Experiment 6 im Vergleich mit den Experimenten 1 und 5 z.T. nur einen statistischen Trend aufwiesen und in anderen Bedingungen von theoretischer Seite Nulleffekte zu erwarten waren und gefunden wurden, wofür es mehrfache Ursachen geben kann, empfiehlt es sich, die Faktoren ISI-Dauer und Präsentationsmodus einer weiteren Analyse zu unterziehen. Um zufällige Effekte eher ausschließen zu können, ist es möglich, um ISI-Effekte zu analysieren, die Resultate aus Experiment 1 und 6 sowie die der Experimente 2 und 5 zu kombinieren, d.h. im ersten Fall den Faktor Präsentationsmodus zu ignorieren, um allein die ISI-Effekte miteinander zu vergleichen, und im zweiten Fall die unterschiedlichen ISI-Dauern zu vernachlässigen, um auf Effekte, die auf den Präsentationsmodus zurückgehen, näher analysieren zu können. Dementsprechend

wurde auf Basis der Experimente 1 und 2 sowie 5 und 6 eine vierfaktorielle ANOVA mit den Innersubjekt-Faktoren SI-Dauer und Position des VI sowie den Zwischensubjekt-Faktoren ISI-Dauer und Präsentationsmodus durchgeführt.

Der Faktor SI-Dauer erwies sich als signifikant,  $F(2, 136) = 267.03$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .80$ ,  $\varepsilon = .79$ . Die längeren SI-Dauern wiesen höhere absolute Unterschiedsschwellenwerte auf als kürzere SI-Dauern, was aufgrund des Weberschen Gesetzes zu erwarten war, wonach mit einer höheren Reizintensität, in unserem Fall die SI-Dauer, höhere Unterschiedsschwellen zu erwarten sind.

Der Faktor Position des VI erwies sich ebenfalls als signifikant,  $F(6, 408) = 98.40$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .59$ ,  $\varepsilon = .36$ , und dies dürfte den bisherigen Einzelanalysen folgend darauf zurückzuführen sein, dass sich die Leistung über die ersten Positionen hinweg verbesserte, nach dem dritten Intervall die Verbesserung ihr Maximum erreicht hatte und dann bis zur jeweils vorletzten Position konstant blieb. An Position 7 wurde dann wieder ein starker Leistungsabfall gefunden. Dieser Effekt (mit Ausnahme der Leistung der Position 7) wurde durch das Multiple-Look-Modell und die Dynamic-Attending-Theorie vorhergesagt, während er dem Impulsgeber-Zähler-Modell widerspricht.

Im Einklang mit diesen Beobachtungen fand sich eine signifikante Interaktion der Faktoren SI-Dauer und Position des VI,  $F(12, 816) = 24.37$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .26$ ,  $\varepsilon = .44$ . Dem Weberschen Gesetz zufolge ist bei einer längeren SI-Dauer generell auch eine höhere Variabilität der Urteile im Vergleich zu kürzeren SI-Dauern zu erwarten. Geht man davon aus, dass längere Zeitdauern schlechter enkodiert/repräsentiert werden als kurze (Bizo, et al., 2005; Gibbon & Church, 1990; Hass, et al., 2008; Killeen & Weiss, 1987), und mit der Präsentation mehrerer SIs eine Optimierung der Repräsentation erreicht wird (Barnes & Jones, 2000; Drake & Botte, 1993), so kann bei langen SI-Dauern die Repräsentation der Dauer im Gedächtnis mehr optimiert werden als bei kurzen SI-Dauern. Wenn die Repräsentation von kurzen Dauern generell recht gut ist, weil kurze SI-Dauern besser enkodiert werden, dann kann der Optimierungsprozess im Laufe des Durchgangs auch nur noch weniger die Leistung verbessern im Vergleich zu längeren SI-Dauern, bei denen die Repräsentation generell dem Weberschen Gesetz zufolge schlechter ist.

Der Faktor ISI-Dauer wurde jedoch nicht signifikant,  $F(1, 68) = .37$ ,  $p = .54$ ,  $\eta^2_p = .005$ , so wie es das Multiple-Look-Modell vorhergesagt hatte. Diese Ergebnisse sprechen damit gegen verschiedene Varianten der Periodenadaptation der Dynamic-



Attending-Theorie, die einen signifikanten Einfluss der ISI-Dauer auf die Leistung vorausgesagt hatten.

Der Faktor Präsentationsmodus hatte einen Einfluss auf die Diskriminationsleistung,  $F(1, 68) = 8.72, p < .01, \eta^2_p = .11$ , da allgemein bessere Diskriminationsleistungen in einem geblockten gegenüber einem randomisierten Design gefunden wurden. Dieser Befund passt zu Überlegungen, wonach wechselnde SI-Dauern in einem randomisierten Design, verglichen mit einem geblockten Design, eine Optimierung des Systems auf eine bestimmte Zeitdauer erschweren sollten.

Eine Interaktion von ISI-Dauer und Präsentationsmodus wurde weder aufgrund des Impulsgeber-Zähler-Modells oder des Multiple-Look-Modells, noch aufgrund von Überlegungen der Dynamic-Attending-Theorie heraus erwartet. Genau dies wurde auch durch die statistische Analyse bestätigt,  $F(1, 68) = .62, p = .43, \eta^2_p = .009$ . Ein ähnliches Resultat war für die Interaktion von SI-Dauer und ISI-Dauer zu erwarten und wurde beobachtet,  $F(2, 136) = 1.76, p = .18, \eta^2_p = .03, \varepsilon = .79$ . Auch für die Interaktion der Faktoren Position des VI und ISI-Dauer sollte sich allen drei Modellen und theoretischen Vorüberlegungen zufolge kein Effekt bemerkbar machen und dies trat auch ein,  $F(6, 408) = .95, p = .39, \eta^2_p = .01, \varepsilon = .36$ .

Schließlich wurde eine signifikante Interaktion zwischen SI-Dauer und Präsentationsmodus gefunden,  $F(2, 136) = 5.83, p < .01, \eta^2_p = .08, \varepsilon = .79$ , die sich durch den unterschiedlichen Effekt des Präsentationsmodus auf die SI-Dauern erklären lässt. Auf der einen Seite zeigte sich ein Effekt des Präsentationsmodus auf die 50-ms und 250-ms SI-Sequenzen (bessere Diskriminationsleistung im geblockten, verglichen mit einem randomisierten Design), auf der anderen Seite zeigte sich kein signifikanter Einfluss des Präsentationsmodus auf die 150-ms SI-Sequenzen.

Außerdem wurde auch die Interaktion der Faktoren Position des VI und Präsentationsmodus signifikant,  $F(6, 408) = 3.14, p < .05, \eta^2_p = .04, \varepsilon = .36$ , die sich dadurch erklären lässt, dass die Diskriminationsleistung für die ersten Intervalle einer Sequenz in einem randomisierten gegenüber einem geblockten Präsentationsmodus schlechter ausfällt, da bei der randomisierten Präsentation weniger positive Übertragungseffekte aus dem vorherigen Durchgang auf den Folgenden möglich sind. Wenn man im Durchgang N eine Abweichung von Intervallen mit einer Dauer von 250 ms entdecken soll, ist es hilfreich, im Durchgang N-1 bereits Intervalle von 250 ms beurteilt zu haben, während die Beurteilung einer Sequenz mit 50 ms

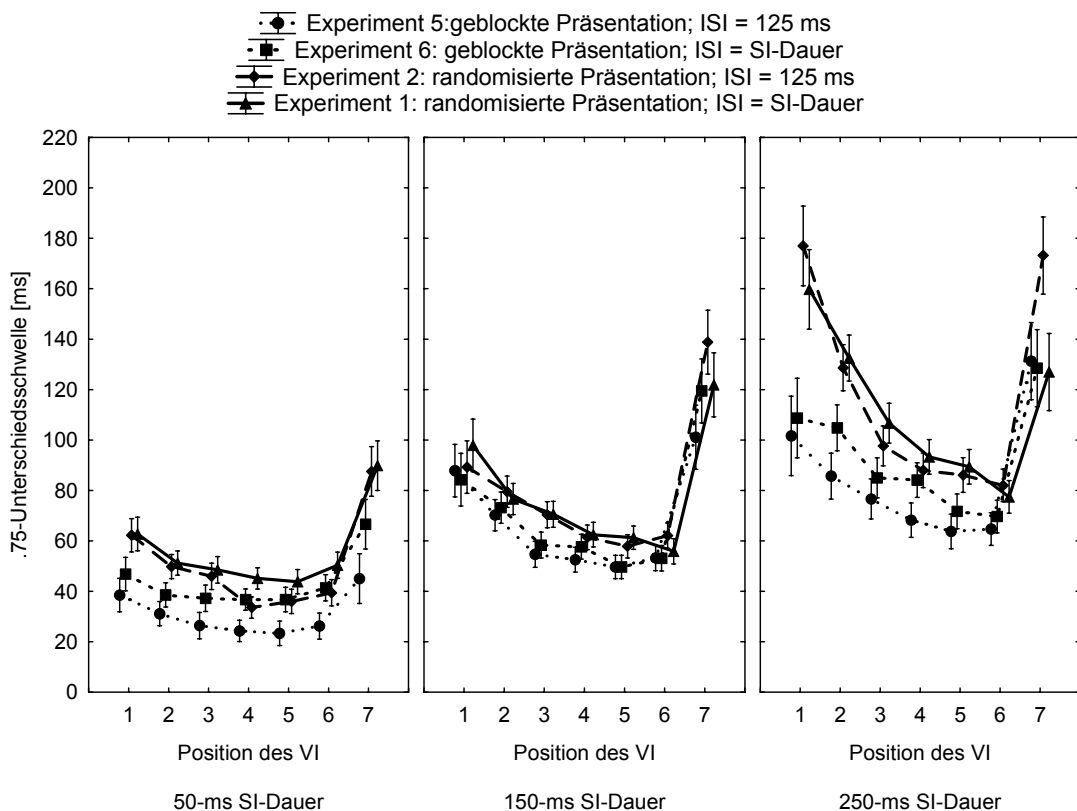
Intervallen im Durchgang N-1 das System auf diese nicht optimale Dauer für die 250 ms SI-Sequenz hin optimiert hat und somit positive Übertragungseffekte unwahrscheinlich sind. Wenn der Effekt zwischen dem geblockten und randomisierten Design mit der Anzahl an bereits präsentierten SI-Dauern geringer wird, dann könnte das daran liegen, dass sich das System sehr schnell innerhalb des Durchgangs an die SI-Dauer hin adaptiert.

Auf Ebene der dreifaktoriellen Interaktionen war eine Interaktion der Faktoren SI-Dauer, Position des VI und Präsentationsmodus nach vorherigen Überlegungen zu erwarten und wurde auch gefunden,  $F(12, 816) = 7.94, p < .001, \eta_p^2 = .10, \varepsilon = .44$ . Da sowohl SI-Dauer und Position des VI miteinander interagieren als auch SI-Dauer und Präsentationsmodus sowie Position des VI und Präsentationsmodus, ist es durchaus nicht überraschend, dass auch die dreifaktorielle Interaktion der Faktoren signifikante Ergebnisse zeigte. Inhaltlich ist sie zum einen aus der Adaption innerhalb eines Durchgangs zu erklären, wonach eine deutlichere Leistungsverbesserung bei langen als bei kurzen Intervallen über mehrere Positionen hinweg zu beobachten ist, da die längeren Intervalle schlechter repräsentiert werden können als die kurzen Intervalle, wie ich das im vorherigen Absatz bereits ausgeführt hatte. Der Optimierungsprozess auf Ebene eines Durchgangs kann somit stärker bei längeren Dauern zum Tragen kommen. Zu diesem Prozess innerhalb eines Durchgangs kommt der Effekt eines positiven Übertrags von einem Durchgang auf den nächsten im geblockten Design, der ebenfalls einen Einfluss auf die Wahrnehmungsleistung der ersten Intervalle ausübt. Durch eine geblockte Präsentation profitieren die ersten Intervalle einer Sequenz, während die ersten Intervalle in einer randomisierten Präsentation quasi durch die vorherige SI-Sequenz leiden. Dieser Effekt tritt speziell bei den 50- und 250-ms SI-Sequenzen auf, nicht bei den 150-ms SI-Sequenzen, wodurch die Interaktion von SI-Dauer und Präsentationsmodus erklärt wird.

Überraschenderweise wurde auch die Interaktion von SI-Dauer, Position des VI und ISI-Dauer signifikant  $F(12, 816) = 4.30, p < .001, \eta_p^2 = .06, \varepsilon = .44$ . Interaktionen irgendeines Faktors mit dem Faktor ISI-Dauer sind nicht zu erwarten gewesen. Die Interaktion resultiert nach Inspektion von Abbildung 18 vermutlich daher, dass ein ISI, das der SI-Dauer entspricht, bei den 50- und 250-ms SI-Sequenzen zu schlechteren Ergebnissen führt als bei einem ISI von konstant 125 ms. Da bei den 150-ms SI-Sequenzen kein Unterschied zwischen ISIs mit einer Dauer

von 125 und 150 ms gefunden wurde, könnte die Interaktion zustande gekommen sein. Dies war aber im Rahmen der Modelle und bisherigen Überlegungen nicht zu erwarten, da vor allem das Multiple-Look-Modell keinen Effekt des ISI vorhergesagt hat. Inwieweit jetzt noch die Position des VI eine Rolle spielt, ist schwerlich aus der Abbildung 19 zu erkennen. Es könnte sein, dass der Effekt bei den mittleren Positionen der Sequenz stärker ausgeprägt ist als bei den Randpositionen. Inwieweit sich der Effekt dadurch erklären ließe, ist zudem innerhalb der Modelle unklar, die alle keine Interaktion mit der ISI-Dauer vorhersagen.

So werden die verbleibenden dreifaktoriellen Interaktionen mit dem Faktor ISI-Dauer wie erwartet auch nicht signifikant: SI-Dauer, ISI-Dauer und Präsentationsmodus:  $F(2, 136) = .54, p = .54, \eta^2_p = .008, \varepsilon = .79$ ; Position des VI, ISI-Dauer und Präsentationsmodus:  $F(6, 408) = 1.51, p = .22, \eta^2_p = .02, \varepsilon = .36$ . Auch die vierfaktorielle Interaktion SI-Dauer, Position des VI, ISI-Dauer und Präsentationsmodus,  $F(12, 816) = 1.13, p = .34, \eta^2_p = .16, \varepsilon = .44$ , erweist sich als nicht signifikant.



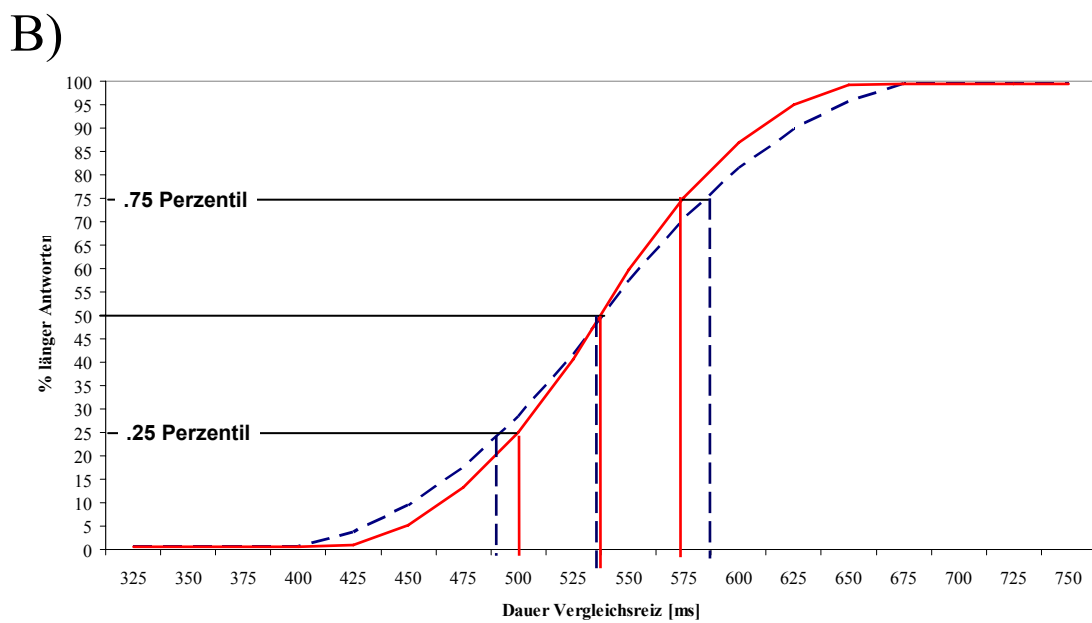
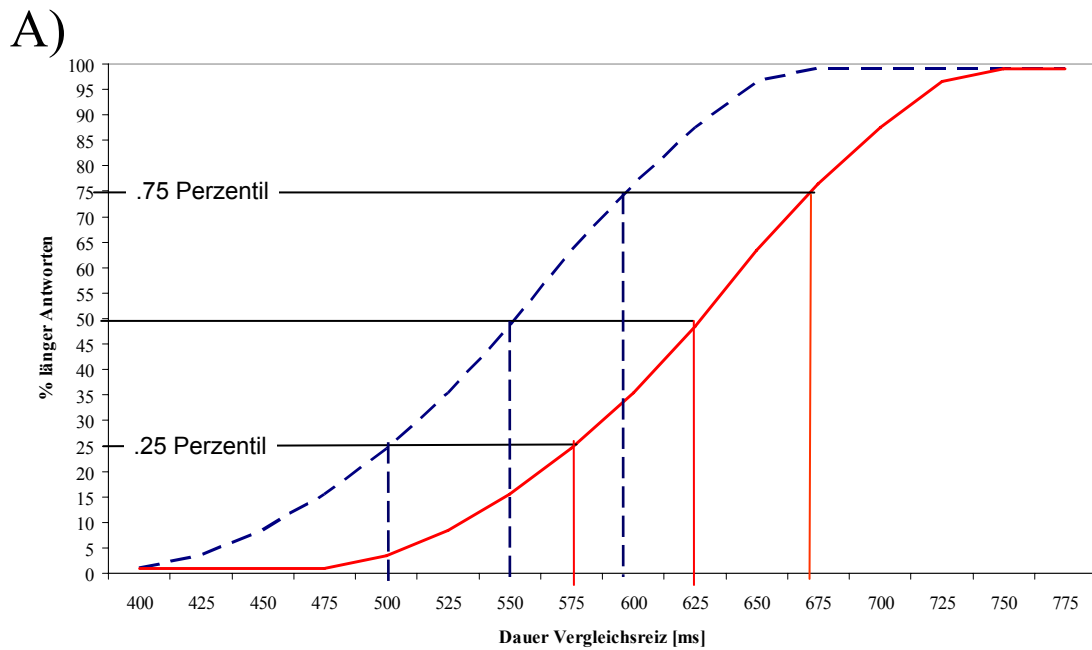
**Abbildung 19:** Vergleich der Ergebnisse der Experimente 1-2 und 5-6: .75-Unterschiedsschwelle und Standardfehler des Mittelwertes in Abhängigkeit von der Position des variablen Intervalls (VI), der Standarddauer (SI), des Präsentationsmodus (geblockte Präsentation der SI-Dauern in Experiment 5 vs. randomisierte Präsentation der SI-Dauern in Experiment 2) und der ISI-Dauer (ISI = 125 ms vs. ISI = SI-Dauer)

## 2.8. Experiment 7: Erklärung der beobachteten Effekte durch Veränderungen des PSE oder/und DL?

Ziel dieses Experiments war es, durch eine differenziertere Betrachtung der Genauigkeitsmessung den Effekt der Verbesserung über mehrere Positionen näher zu analysieren. Das abweichende Intervall, das in den Experimenten 1-6 verwendet wurde, war immer länger als die SI-Dauer. Aufgrund dieser längeren Vergleichsreiz-Intervalle konnte als Genauigkeitsmaß der Wahrnehmung einer zeitlichen Abweichung in der Sequenz nur das .75 Perzentil der psychometrischen Funktion ermittelt werden. Dementsprechend lassen die Ergebnisse keine Rückschlüsse darüber zu, ob sich die Wahrnehmungsleistung hinsichtlich ihrer Genauigkeit (PSE) und/oder aber hinsichtlich der Urteilsvariabilität (DL) verändert hat. Es ist gut möglich, dass die Ergebnisse in den vorherigen Experimenten sowohl durch Verschiebungen im PSE als auch durch Veränderungen der Urteilsvariabilität zustande gekommen sind. Weil immer nur das .75 Perzentil der psychometrischen Funktion ermittelt wurde, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Veränderungen zwischen den Positionen in der .75 Unterschiedsschwelle, die zuvor berechnet wurde (.75 Perzentil- SI-Dauer), allein durch Veränderungen in der Urteilsvariabilität, erkennbar durch die Stärke der Steigung der psychometrischen Funktion, (Abbildung 20A) zustande gekommen sind. Veränderungen können nämlich im Gegensatz dazu auch durchaus allein durch eine Verschiebung der psychometrischen Funktion entstehen (siehe Abbildung 20B). Um Verschiebungen des PSE untersuchen zu können, muss man zwei Punkte der psychometrischen Funktion ermitteln (und nicht nur einen wie in den vorherigen Experimenten), d.h., um die Steigung und die Verschiebung der Funktion ermitteln zu können, müssen nicht nur längere, sondern auch kürzere Vergleichsreiz-Intervalle präsentiert und von den Versuchspersonen beurteilt werden.

Wenn man davon ausgeht, dass die Repräsentation der SI-Dauer am Anfang einer Sequenz noch nicht perfekt ist, so könnten die Ergebnisse der bisherigen Experimente durch eine Anpassung des PSE an den POE erklärt werden, ohne dass man Unterschiede in der Urteilsvariabilität annehmen müsste. Denn wie Abbildung 20B veranschaulicht, verändern sich die ermittelten Werte des .75 Perzentiles der beiden eingezeichneten Funktionen, ohne dass sich die Steigung der Funktionen

ändert. Verschiebungen des PSE können durch verschiedene Effekte ausgelöst werden.



**Abbildung 20:** A) Veränderung der Steigung der psychometrischen Funktion und damit des Difference limens (DL) bei unverändertem Punkt-subjektiver-Gleichheit (PSE) B) Verschiebung der psychometrischen Funktion und damit des PSE bei unverändertem DL

Ein bekanntes Phänomen ist der Zeitfehler (Time-Order-Error). Eine gute Übersicht dazu findet sich bei Hellström (1985), der auf verschiedene Formen und Erklärungsmöglichkeiten des Zeitfehlers hinweist. Bereits Fechner (1860, 1882) berichtet über einen so genannten positiven Zeitfehler, wonach ein präsentierter Reiz im Vergleich zu einem vorausgehenden hinsichtlich seiner Intensität überschätzt wird. Fechner erklärt diesen Befund dadurch, dass es zu einer Art sensorischer Akkumulation kommt und der erste Reiz einen Nacheffekt erzeugt, der zur Wahrnehmung des zweiten Reizes addiert wird und somit den zweiten Reiz intensiver als den ersten Reiz erscheinen lässt. Allerdings gibt es auch Belege für einen genau gegenteiligen Effekt. Boas (1882) erklärt den Befund, dass der erste Reiz im Vergleich zum zweiten Reiz unterschätzt wird, einen so genannten negativen Zeitfehler, dadurch, dass der erste Reiz im Gedächtnis verblasst und dementsprechend zum Zeitpunkt des Vergleiches kürzer eingeschätzt wird als der zweite, der weniger verblasst ist. Ob ein negativer oder positiver Zeitfehler zu beobachten ist, hängt Hellström (1978) zufolge von der Stimulusintensität ab, wonach bei einer niedrigen Intensität positive Zeitfehler und bei hohen Intensitäten negative Zeitfehler auftreten. Hellström und Rammsayer (2004) zufolge moduliert das ISI zudem die Stärke des Effekts. So finden sie bei kurzen ISIs (100 ms) größere Effekte als bei langen ISIs (2700 ms). Neben der Erklärung des Zeitfehlers durch sensorische Akkumulation oder Gedächtnisprozesse diskutiert Allan (1977) eher kognitive Verarbeitungsprozesse als Ursache für die gefundenen Unterschiede. Allan (1977) nimmt basierend auf Überlegungen der Signal-Entdeckungs-Theorie (Green & Swets, 1966) an, dass die Zeitfehler-Effekte durch Verschiebungen des Entscheidungskriteriums ausgelöst werden könnten.

Woodrow (1935) analysierte die Entwicklung des Zeitfehlers in einer Reihe von Durchgängen und konnte zeigen, dass der Zeitfehler mit zunehmender Übung immer geringer wird. Wenn der Zeitfehler über mehrere Durchgänge hinweg abnimmt, dann könnte Ähnliches auch in den Sequenzen dieser Arbeit passieren. Der PSE könnte während der ersten Intervalle deutlich vom POE abweichen (einheitlich größer oder kleiner als der POE sein oder auch unsystematisch mal kleiner und dann wieder größer sein), mit zunehmender Anzahl an präsentierter SI-Dauern dann sich aber immer mehr dem POE nähern.

Um diese Hypothese zu prüfen, wurde das folgende Experiment durchgeführt, um den PSE und das DL ermitteln zu können. Dabei wurden nur noch Sequenzen mit

fünf Intervallen verwendet, da sich durch die Ermittlung des .25 und .75 Perzentils die Anzahl an Durchgängen verdoppelte. Zudem wurden auch längere SI-Dauern und ISI-Dauern getestet, da bisherige Untersuchungen gerade in Bezug auf Oszillatormodelle oftmals längere Dauern verwendeten (Barnes & Jones, 2000, 600 ms; Miller & McAuley, 2005, 400, 500 und 600 ms). Möglich wäre, dass die bisher in dieser Arbeit ermittelten Effekte allein durch die Verwendung kurzer Dauern zustande gekommen sind. Um die Ergebnisse vergleichbarer zu machen, wurden daher im folgenden Experiment ebenfalls 600 ms SI-Dauern verwendet. Zudem wurde die ISI-Dauer so variiert (250 ms vs. 600 ms), dass sie in einer Bedingung der SI-Dauer entsprachen und in der anderen differierte. In den bisherigen Experimenten wurde die Leistung zwischen verschiedenen Gruppen von Versuchspersonen verglichen, um den Einfluss der ISI-Dauer auf die Diskriminationsleistung zu überprüfen. Zufällige Stichprobeneffekte könnten die Ergebnisse beeinflusst haben und daher wurde im folgenden Experiment immer dieselben Versuchspersonen in den verschiedenen Bedingungen getestet. Wie in den vorangegangenen Experimenten sollte den Vorhersagen der Dynamic-Attending-Theorie zufolge bei einer Onset-zu-Offset-Adaptation der Periode die Leistung unter Verwendung von Sequenzen, deren ISIs nicht der SI-Dauer entsprechen, im Vergleich zu solchen mit identischen SI- und ISI-Dauern schlechter ausfallen. Bei einer Onset-zu-Onset-Adaptation der Periode hingegen wäre zu erwarten, dass die Leistung bei den 250-ms SI-Sequenzen mit ISIs von 600 ms schlechter ausfällt als bei ISIs von 250 ms. Bei den 600-ms SI-Sequenzen mit 600-ms ISIs sollte ebenfalls eine Verschlechterung der Leistung im Vergleich zu der 250-ms ISIs Bedingung zu beobachten sein, da sich die Periodendauer erhöht und dies wie bei einer Verlängerung der SI-Dauern zu einer schlechteren Leistung führen sollte. Das Multiple-Look-Modell würde hingegen erneut vorhersagen, dass das ISI keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsleistung der gefüllten Intervalle hat.

Geht man davon aus, dass der PSE der subjektiv wahrgenommenen Dauer und somit der Periode eines oszillierenden Prozesses oder einer internen Gedächtnisrepräsentation entspricht und diese durch mehrfache Präsentation von Standarddauern optimiert werden kann, so wäre zu erwarten, dass sich der PSE immer mehr dem POE anpasst. Ausgehend von einer schlechten Repräsentation am Anfang der Sequenzen (große Abweichung zwischen POE und PSE) sollte mit mehrfacher SI-Dauerpräsentation sich der PSE immer mehr dem POE angleichen.

### 2.8.1. Methode

#### *Versuchspersonen*

18 Studierende (17 weiblich, 1 männlich) der Universität Göttingen im Alter von 19-33 Jahren ( $M = 23.1$ ;  $SD = 3.7$ ) nahmen am Experiment teil. Sie waren naiv hinsichtlich der Fragestellung des Experiments. Für ihre Teilnahme wurde ihnen 3.5 Versuchspersonenstunden attestiert.

#### *Apparatur und Stimuli*

Wie in Experiment 1-6

#### *Prozedur*

Die Prozedur ist im Wesentlichen sehr ähnlich mit der aus den vorherigen Experimenten. Folgende Veränderung wurden vorgenommen: Anstelle von sieben Intervallen wurden in jeder Sequenz nur fünf Intervalle verwendet, deren SI-Dauer entweder 250 oder 600 ms betrug. Die ISI-Dauer konnte ebenfalls 250 oder 600 ms betragen. Aufgabe der Versuchspersonen war es, am Ende der Sequenz zu entscheiden, ob in der Sequenz ein kürzeres oder längeres Intervall enthalten war. Wenn sie ein Intervall gehört hatten, das kürzer war als die anderen Intervalle der Sequenz, dann sollten sie die „+“-Taste auf der vor ihnen liegenden Tastatur drücken. Die „Enter“-Taste unterhalb der „+“-Taste auf dem Ziffernblock diente zur Eingabe der Antwort „Die Sequenz enthielt ein längeres Intervall“. Die Dauer des zu entdeckenden VI variierte den Regeln von Kaernbach's (1991) weighted-up-down Methode, um das .75 und .25 Perzentil der psychometrischen Funktion der Versuchsperson unabhängig voneinander zu ermitteln, d.h., das Verfahren adaptiert die Dauer des VI, so dass die Versuchsperson in 75% aller Trials korrekt eine Verlängerung bzw. Verkürzung des VI gegenüber den SI-Dauern entdeckt. Wurde in einem Durchgang versucht, das .25 Perzentil zu bestimmen und hatte die Versuchsperson das VI als kürzer erkannt und die „+“ Taste gedrückt, so wurde im folgenden Durchgang zur Ermittlung des .25 Perzentils die Dauer des VI um einen kleinen Betrag verlängert (kleine Schrittweite). Hingegen wurde das VI durch die Betätigung der „Enter“-Taste im nächsten Durchgang derselben Bedingung deutlich verkürzt (große Schrittweite). Die Reaktionen innerhalb einer Bedingung zur Messung des .75 Perzentils glichen den vorherigen Experimenten. Die anfängliche Dauer des VI bei den 250-ms SI-Sequenzen betrug 304 ms für die Berechnung des



.75 Perzentils und 196 ms zur Berechnung des .25 Perzentils. Die Veränderung des VI für die kleine Schrittweite betrug 9 ms, während es für die große Schrittweite 27 ms betrug. Zur Ermittlung der .75 Perzentils für die 600 ms SI-Sequenzen wurde ein Startwert von 720 ms verwendet, während für das .25 Perzentil der Startwert 480 ms betrug. Die kleine Schrittweite betrug im Fall der 600-ms SI-Sequenzen 20 ms und die große Schrittweite 60 ms. Ob in einem Durchgang das .25 oder .75 Perzentil bestimmt werden sollte, wurde zufällig variiert. Die Bestimmung des .25 und .75 Perzentils erfolgte unabhängig voneinander für jede Position des VI in der Sequenz. Die Position des VI wechselte zufällig von Durchgang zu Durchgang. Die Dauer des SI und ISI blieb in jeder Sitzung konstant. Die Versuchspersonen absolvierten insgesamt vier Sitzungen an verschiedenen Tagen. In jeder dieser Sitzungen wurden entweder SIs mit einer Dauer von 250 ms und ISIs von 250 ms, SIs von 250 ms und ISIs von 600 ms, SIs von 600 ms und ISIs von 250 ms oder aber SIs mit einer Dauer von 600 ms und ISIs von 600 ms getestet. Zu Beginn einer jeden Sitzung wurde den Versuchspersonen die Möglichkeit gegeben, sich in einem Übungsblock von 14 Durchgängen mit der Aufgabe vertraut zu machen. Während dieses Übungsblocks wurde ihnen unmittelbar nach der Antworteingabe zurückgemeldet, ob die Antwort richtig oder falsch war. Dazu erschien für 1000 ms auf dem Bildschirm in roter Schrift das Wort „falsch!“ bei einer falschen Antwort und in grüner Schrift das Wort „richtig!“ bei einer korrekten Antwort. Nach dem Übungsblock folgten drei Experimentalblöcke, die aus insgesamt 320 Durchgängen bestanden.

### *Design*

Der Faktor SI-Dauer wurde zweistufig angelegt (250 und 600 ms SIs) ebenso wie der Faktor ISI (250 und 600 ms). Der Faktor Position des VI bestand aus fünf Stufen (Position 1-5). Durch die vollständige Kombination der drei Faktoren erhält man 20 Bedingungen, in der jede Versuchsperson getestet wurde, und das jeweils zur Bestimmung des .25- und .75-Perzentils. Um die Erkennungsleistung der Versuchsperson in jeder dieser 40 Bedingungen zu ermitteln, wurde sie jeweils 32-mal in derselben Bedingung getestet, was zu einer Anzahl von insgesamt 1280 experimentellen Durchgängen führte.

### *Datenanalyse Experiment 7*

Wie in den Versuchen zuvor wurden Versuchspersonen, deren Erkennungsleistung mehr als zwei Standardabweichungen vom Median der gesamten Versuchspersonengruppe in mehr als fünf Bedingungen abwich, ersetzt. Dieser Fall trat bei einer Versuchsperson ein.

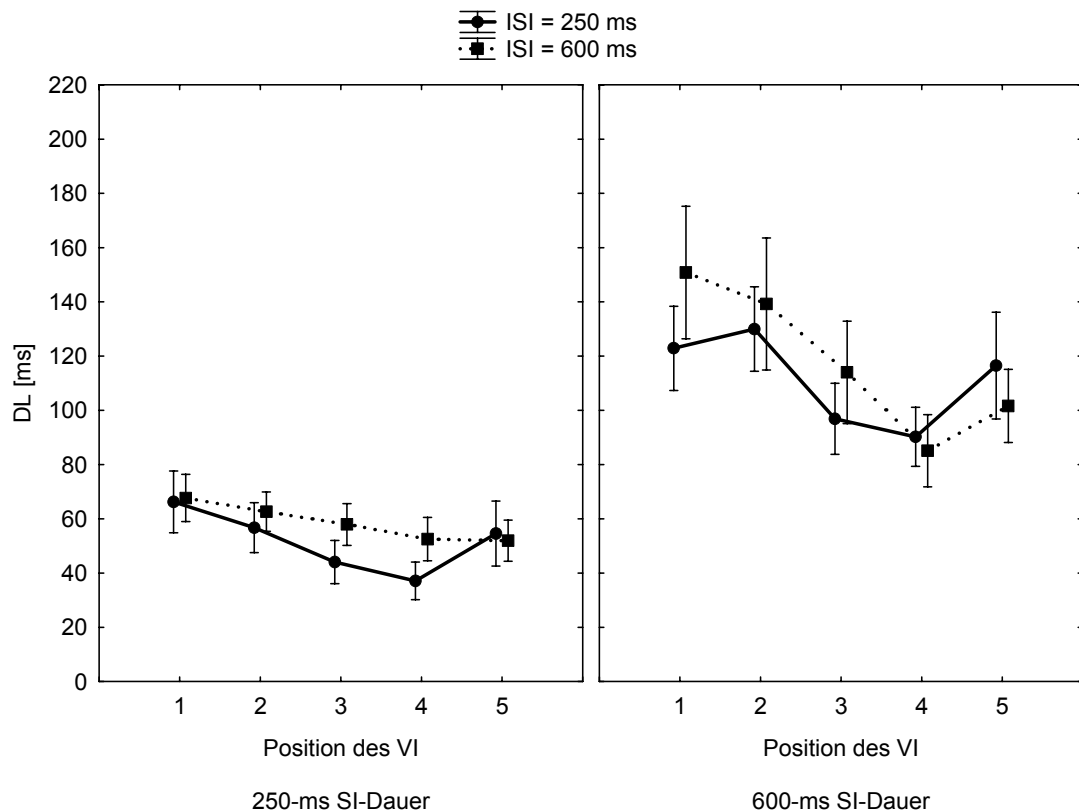
Alle folgenden Analysen basieren wiederum auf den letzten 20 Durchgängen jeder Bedingung. Der PSE wurde nach der Formel  $(.75\text{-Perzentil} + .25\text{-Perzentil})/2$  berechnet. Das Difference Limen (DL) wurde über die Formel  $(.75\text{-Perzentil} - .25\text{-Perzentil})/2$  bestimmt.

### **2.8.2. Ergebnisse**

#### *Auswertung der DL-Analyse*

Die Abbildung 21 zeigt das Difference-limen (DL) für die Wahrnehmung eines abweichenden Intervalls in Abhängigkeit von der SI-Dauer, der Position des VI und den ISI-Dauern in Experiment 7. Um den Einfluss dieser Faktoren statistisch zu überprüfen, wurde eine dreifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung durchgeführt. Der Faktor SI-Dauer erwies sich als signifikant,  $F(1, 17) = 47.71$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .74$ ,  $\epsilon = 1.0$ . Wie aus Abbildung 21 ersichtlich zeigten sich höhere Unterschiedsschwellenwerte für die 600-ms SI-Sequenzen gegenüber den 250-ms SI-Sequenzen, so wie es das Webersche Gesetz erwarten lassen würde.

Auch der Faktor Position des VI hatte einen signifikanten Einfluss auf das DL,  $F(4, 68) = 13.25$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .44$ ,  $\epsilon = .67$ . Abbildung 21 zufolge könnte dieser Effekt auf der Leistungsverbesserung von Position 1-4 beruhen. Denn lediglich die erste Position der Sequenz mit 600-ms SI-Dauern und 250-ms ISIs scheint vom sonst üblichen Befund der bisherigen Experimente abzuweichen, da die Leistung an der ersten Position besser zu sein scheint als an der zweiten. Die Leistung an der letzten Position der Sequenz fiel erneut ab, mit Ausnahme der Sequenz mit 250-ms SI-Dauern und ISIs von 600 ms Dauer. Bei dieser Sequenz verbesserte sich die Leistung anscheinend nochmals gegenüber der vierten Position. Wie in den vorherigen Experimenten auch wurde eine signifikante Interaktion von SI-Dauer und Position des VI,  $F(4, 68) = 4.17$ ,  $p < .05$ ,  $\eta^2_p = .20$ ,  $\epsilon = .74$  beobachtet. Die Leistungsverbesserung über die ersten Intervalle fiel nach Abbildung 21 deutlicher in den 600-ms SI-Sequenzen aus als in den 250-ms SI-Sequenzen.



**Abbildung 21:** *Difference-limen (DL) und Standardfehler des Mittelwerts in Abhängigkeit von der Standarddauer (SI), der Position des variablen Intervalls (VI) und den Interstimulus-Intervallen (ISIs) in Experiment 7*

Der Faktor ISI-Dauer hingegen wurde nicht signifikant,  $F(1, 17) = 1.66, p = .22, \eta^2_p = .09, \varepsilon = 1.0$ , ebenso wie die Interaktionen der anderen Faktoren mit Faktor ISI-Dauer: SI-Dauer und ISI-Dauer  $F(1, 17) = .38, p = .55, \eta^2_p = .02, \varepsilon = 1.0$ , ISI-Dauer und Position des VI,  $F(4, 68) = .68, p = .55, \eta^2_p = .04, \varepsilon = .64$ . Auch die dreifaktorielle Interaktion von SI-Dauer, ISI-Dauer und Position des VI erwies sich als nicht signifikant,  $F(1, 68) = .61, p = .59, \eta^2_p = .03, \varepsilon = .64$ .

Um die Ergebnisse näher zu analysieren, wurde der Einfluss der Faktoren ISI-Dauer und Position des VI für die beiden SI-Dauern separat untersucht. Für die 250-ms SI-Sequenzen konnte mittels zweifaktorieller ANOVA ein statistischer Trend für den Einfluss des ISI auf das DL ausfindig gemacht werden,  $F(1, 17) = 3.29, p = .09, \eta^2_p = .16, \varepsilon = 1.0$ . Die Leistung für die Sequenz mit 250 ms ISIs scheint Abbildung 21 zufolge gegenüber der Sequenz mit 600 ms ISIs leicht verbessert zu sein. Zudem erwies sich erneut der Faktor Position des VI als signifikant,  $F(4, 68) = 6.77, p < .001, \eta^2_p = .28, \varepsilon = .72$ . Die Interaktion der beiden Faktoren erwies sich jedoch als nicht signifikant,  $F(4, 68) = .77, p = .51, \eta^2_p = .04, \varepsilon = .70$ . Für die 600-ms SI-

Sequenzen ergab sich folgendes Bild: Auch wenn, wie aus Abbildung 21 zu erkennen, erneut die Sequenz mit 600 ms ISIs leicht höhere Unterschiedsschwellenwerte gegenüber der 250-ms SI-Sequenz aufwies, so wurde der Faktor ISI-Dauer nicht signifikant,  $F(1, 17) = .28, p = .60, \eta^2_p = .02, \varepsilon = 1.0$ . Der Faktor Position des VI hingegen wurde signifikant,  $F(4, 68) = 10.75, p < .001, \eta^2_p = .39, \varepsilon = .62$ . Die Interaktion von ISI-Dauer und Position des VI jedoch wurde nicht signifikant,  $F(4, 68) = .61, p = .58, \eta^2_p = .03, \varepsilon = .62$ .

Analysiert man die vier Bedingungen mittels einfaktorieller ANOVAs mit Messwiederholung und Bonferroni Post-hoc-Tests für sich, um den Einfluss der Position des VI auf das DL detaillierter zu überprüfen, zeigt sich ein signifikanter Effekt der Position des VI auf die Wahrnehmungsleistung für die 250-ms SI-Sequenz mit 250 ms ISIs,  $F(4, 68) = 4.52, p < .05, \eta^2_p = .21, \varepsilon = .59$ . Die Analyse mittels Bonferroni Post-hoc-Tests ergab signifikante Unterschiede zwischen den folgenden Positionen: Position 1 > 4; Position 2 > 4. Die einfaktorielle ANOVA für die 250-ms SI-Sequenz mit 600 ms ISIs wurde ebenfalls signifikant,  $F(4, 68) = 3.42, p < .05, \eta^2_p = .17, \varepsilon = .86$ . Folgende signifikante Unterschiede wurden durch Post-hoc-Tests bestätigt: Position 1 > 4-5. Auch die Analyse der 600-ms SI-Sequenz mit 250 ms ISIs zeigte einen signifikanten Effekt der Position des VI auf die Wahrnehmungsleistung an,  $F(4, 68) = 5.11, p < .01, \eta^2_p = .23, \varepsilon = .76$ . Signifikante Unterschiede wurden mittels Post-hoc-Tests für die folgenden Positionen gefunden: Position 1 > 4; Position 2 > 3-4. Hinsichtlich der 600-ms SI-Sequenz mit 600 ms ISIs war Folgendes festzustellen: Die einfaktorielle ANOVA verweist auf einen signifikanten Effekt der Position des VI auf die Wahrnehmungsleistung,  $F(4, 68) = 7.15, p < .001, \eta^2_p = .30, \varepsilon = .62$ . Die Analyse mit Hilfe von Bonferroni Post-hoc-Tests ergab signifikante Unterschiede zwischen den folgenden Positionen: Position 1 > 4-5; Position 2 > 4.

Insgesamt zeigten die Ergebnisse also, dass sich für die DL-Effekte in diesem Experiment ein ähnliches Leistungsprofil ergab wie für die .75-Unterschiedsschwellen in den vorangegangenen Experimenten. Die Wahrnehmungsleistung verbesserte sich mit zunehmender Position des VI. Jedoch konnte die Verschlechterung an der letzten Position in Experiment 7 nicht mehr statistisch nachgewiesen werden, auch wenn sie vor allem noch für die Sequenzen mit 250-ms ISIs gut zu erkennen ist. Es zeigte sich außerdem ein erhöhtes DL für längere SI-Dauern im Vergleich mit kürzeren SI-Dauern für beide ISI-Dauern und die Faktoren SI-Dauer und Position des VI

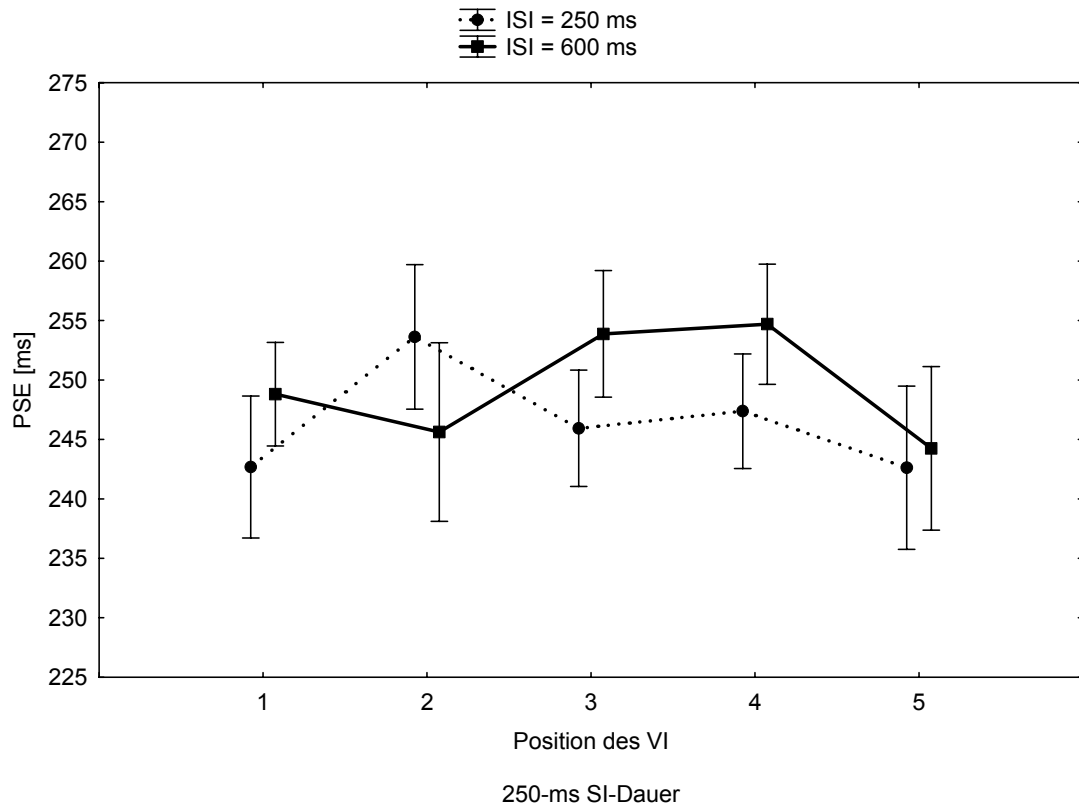
interagierten wie in den Experimenten zuvor auch. Zusätzlich fand sich erneut kein Einfluss des ISI auf das DL.

#### *Auswertung der PSE-Analyse*

Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigen den Punkt-Subjektiver-Gleichheit (PSE) in Abhängigkeit von der Position des VI und des ISIs bei Sequenzen mit 250 ms SI-Dauern und 600 ms SI-Dauern in Experiment 7. Wie die Abbildung 22 verdeutlicht, liegen die ermittelten PSE-Werte für die 250-ms SI-Sequenzen mit den ISIs von 250 und 600 ms in der Nähe des POE (250 ms). Hinsichtlich der Position des VI ist auf den ersten Blick ebenfalls kein großer systematischer Einfluss auf den PSE zu beobachten. Schaut man sich jedoch auch die Ergebnisse für die 600-ms SI-Sequenzen an (Abbildung 23), fällt auf, dass der Leistungsverlauf über die Positionen des VI hinweg für die Sequenzen mit einer SI-Dauer von 250 ms und einem ISI von 250 ms dem der 600-ms ISI-Sequenz ähnelt. Fiele der PSE für das zweite Intervall in der Sequenz mit den 250 ms SI-Dauern und den 600 ms ISIs höher aus, dann würde sich auch für diese Bedingung ein sehr ähnliches Muster ergeben wie in den anderen Bedingungen. Die Leistungsdifferenzen zwischen den Positionen des VI bei den 250-ms SI-Sequenzen könnten dementsprechend möglicherweise nur nicht so extrem ausgeprägt sein wie bei den 600-ms SI-Sequenzen, so wie das in den vorherigen Experimenten bei dem Vergleich unterschiedlicher langer SI-Dauern, wo der Positionseffekt bei längeren SI-Dauern stärker ausgeprägt war als bei kürzeren SI-Dauern, zu beobachten war.

In den 600-ms SI-Sequenzen zeigte sich, dass der PSE an der ersten Position deutlich geringer war als an der zweiten Position. Zudem war der PSE weiter vom POE entfernt. Ein t-Test für eine einzelne Stichprobe zeigte einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den PSE Werten der beiden 600-ms SI-Sequenzen gegenüber dem POE an (250 ms ISIs:  $t(17) = 3.01$ ,  $p < .01$ ; 600 ms ISIs:  $t(17) = 2.93$ ,  $p < .01$ ). Der PSE der zweiten Position des VI entsprach hingegen nahezu exakt dem POE von 600 ms, die Unterschiede erwiesen sich auch nicht als signifikant. Mit den darauf folgenden Intervallen verringerte sich der PSE jedoch wieder und wich mehr und mehr vom POE ab. Während sich für die 250-ms ISI Sequenz ein signifikanter Unterschied der fünften Position gegenüber dem POE ergab,  $t(17) = 4.68$ ,  $p < .001$ , konnte für die 600-ms ISI Sequenz für die vierte und fünfte Position eine signifikante Abweichung des PSE vom POE nachgewiesen

werden,  $t(17) = 2.68$ ,  $p < .05$  und  $t(17) = 2.18$ ,  $p < .05$ . Für die 250-ms SI-Sequenzen mit 250 oder auch 600 ms ISIs konnten keine statistischen Abweichungen des PSE gegenüber dem POE gefunden werden.

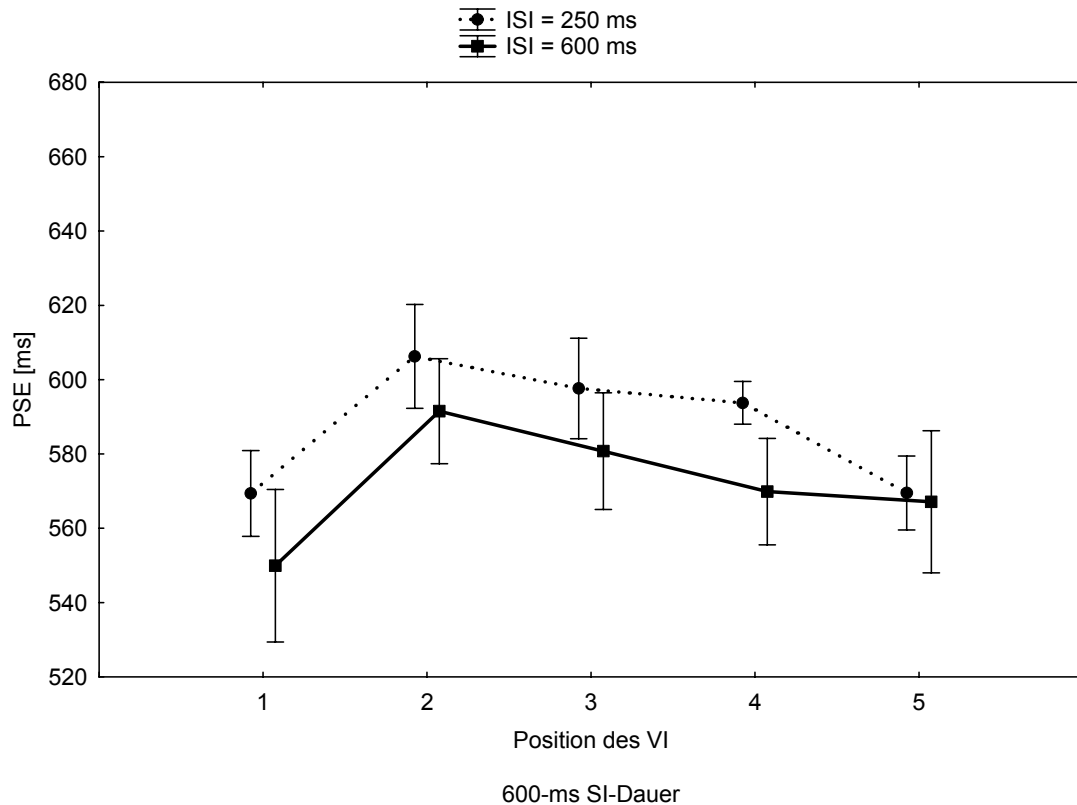


**Abbildung 22:** Punkt-Subjektiver-Gleichheit (PSE) und Standardfehler des Mittelwertes in Abhängigkeit von der Position des variablen Intervalls (VI) und Interstimulus-Intervallen (ISIs) bei Sequenzen mit 250 ms SI-Dauern in Experiment 7

Die ISI-Bedingungen (ISI = SI-Dauer vs. ISI  $\neq$  SI-Dauer) scheinen sich bei 250-ms SI-Dauern mit Ausnahme des PSEs der zweiten Position systematisch zu unterscheiden, wobei der PSE bei ISIs von 600 ms höher lagen als bei ISIs von 250 ms Dauer. Bei den 600-ms SI-Sequenzen hingegen lagen die PSEs der Bedingung mit 600-ms ISIs durchgehend unter denen der Bedingung mit 250-ms ISIs.

Um den Einfluss der Faktoren SI-Dauer, Position des VI und ISI-Dauer auf den PSE statistisch zu prüfen, wurde eine dreifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung durchgeführt. Der Faktor SI-Dauer erwies sich als signifikant,  $F(1, 17) = 1520.38$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2_p = .99$ ,  $\epsilon = 10$ . Wie Abbildung 22 und 23 veranschaulichen, ist dieser Effekt darauf zurückzuführen, dass der PSE für die 250-ms SI-Sequenzen niedriger

lag als für die 600-ms SI-Sequenzen, was zu erwarten war, da die POEs sich deutlich unterscheiden. Ebenso wurde der Faktor Position des VI signifikant,  $F(4, 68) = 17.34, p < .001, \eta^2_p = .50, \varepsilon = .70$ . Wie aus den Abbildungen 22 und 23 ersichtlich ist, der Positionseffekt vermutlich darauf zurückzuführen, dass der PSE an der ersten Position niedriger als an der zweiten Position ausfiel und dann erneut sich bis zur letzten Position verringerte.



**Abbildung 23:** Punkt-Subjektiver-Gleichheit (PSE) und Standardfehler des Mittelwerts in Abhängigkeit von der Position des variablen Intervalls (VI) und Interstimulus-Intervallen (ISIs) bei Sequenzen mit 600-ms SI-Dauern in Experiment 7

Für die ISI-Dauer konnte kein signifikanter Einfluss auf die Wahrnehmungsleistung nachgewiesen werden,  $F(1, 17) = .85, p = .37, \eta^2_p = .05, \varepsilon = 1.0$ . Auch die Interaktion von SI-Dauer und ISI-Dauer wurden nicht signifikant,  $F(1, 17) = 2.12, p = .16, \eta^2_p = .11, \varepsilon = 1.0$ . Ähnliches zeigte sich auch für die Interaktion von ISI-Dauer und Position des VI,  $F(4, 68) = .50, p = .68, \eta^2_p = .03, \varepsilon = .74$ . Hingegen wurde die Interaktion von SI-Dauer und Position des VI signifikant,  $F(4, 68) = 7.10, p < .001, \eta^2_p = .29, \varepsilon = .65$ . Wie die Abbildungen 22 und 23 veranschaulichen waren die Veränderungen der PSE-Werte über die Positionen

hinweg stärker bei den 600-ms als bei den 250-ms SI-Sequenzen ausgeprägt. Die dreifaktorielle Interaktion der Faktoren SI-Dauer, ISI-Dauer und Position des VI wurde nicht signifikant,  $F(1, 68) = 1.40, p = .25, \eta^2_p = .08, \varepsilon = .75$ .

Da sich Unterschiede zwischen den PSEs für SI-Dauern von 250 und 600 ms ergeben müssen, weil der PSE eigentlich normalerweise nicht stark vom POE abweicht, wurde eine zweifaktorielle ANOVA für die Faktoren ISI-Dauer und Position des VI getrennt für die beiden SI-Dauern berechnet. Für die 250-ms SI-Sequenzen konnte kein signifikanter Effekt des Faktors ISI-Dauer auf den PSE festgestellt werden,  $F(1, 17) = .12, p = .73, \eta^2_p = .007, \varepsilon = 1.0$ . Auch der Faktor Position des VI wurde nicht signifikant,  $F(4, 68) = 1.78, p = .18, \eta^2_p = .09, \varepsilon = .56$ , ebenso wie die Interaktion von ISI-Dauer und Position des VI,  $F(4, 68) = 1.83, p = .16, \eta^2_p = .10, \varepsilon = .69$ . Das Bild für die 600-ms SI-Sequenzen sah ähnlich aus, denn es ergab sich kein signifikanter Effekt des ISI auf den PSE,  $F(1, 17) = 1.69, p = .21, \eta^2_p = .09, \varepsilon = 1.0$ . Auch die Interaktion von ISI-Dauer und Position des VI wurde nicht signifikant,  $F(4, 68) = .84, p = .48, \eta^2_p = .05, \varepsilon = .75$ . Im Gegensatz zu den 250-ms SI-Sequenzen wurde allerdings der Faktor Position des VI signifikant,  $F(4, 68) = 13.82, p < .001, \eta^2_p = .45, \varepsilon = .71$ . Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass der PSE an der ersten Position niedriger als an der zweiten Position ausfiel und dann bis zur letzten Position immer kleiner wurde.

Um die Ergebnisse noch mal näher detaillierter hinsichtlich des Einflusses der Position des VIs zu analysieren (Anfangseffekt und Verringerung des PSE von Position 2-5), wurden einfaktorielle ANOVAs für alle vier Bedingungen separat durchgeführt. Die Sequenz mit 250-ms SI-Dauern und ISIs von 250 ms zeigte keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Position des VI und dem PSE,  $F(4, 68) = 1.96, p = .15, \eta^2_p = .10, \varepsilon = .59$ , ebenso die Sequenz, bestehend aus 250-ms SI-Dauern und ISIs von 600 ms,  $F(4, 68) = 1.68, p = .19, \eta^2_p = .09, \varepsilon = .62$ . Für alle beiden Sequenzen mit 600-ms SI-Dauern wurde ein signifikanter Effekt der Position des VI auf den PSE nachgewiesen,  $F(4, 68) = 9.07, p < .001, \eta^2_p = .35, \varepsilon = .83$ , und  $F(4, 68) = 5.34, p < .01, \eta^2_p = .24, \varepsilon = .71$ . Da sich kein Effekt der Position des VI auf den PSE für die 250-ms SI-Sequenzen nachweisen lies, wurden mit Hilfe von Bonferroni Post-hoc-Tests nur Unterschiede zwischen den Positionen für die 600-ms SI-Sequenzen untersucht. Innerhalb der 600-ms SI-Sequenz mit 250 ms ISIs kam es zu folgenden signifikanten Unterschieden: Position 1 < 2-3; Position



2-4 > 5. Für die Sequenz mit 600 ms ISIs wurden die folgenden Unterschiede signifikant: Position 1 < 2-3; Position 2 > 5.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der PSE-Effekt sowohl durch die SI-Dauer, was grundsätzlich zu erwarten war, als auch durch die Position des VI beeinflusst wird. Das PSE-Profil ähnelt dem des DL insofern, dass von Position 2 an immer geringere Werte beobachtet werden können. Allerdings gibt es bei dem PSE-Profil keine Anzeichen auf einen Endeffekt hin und auch die hohen Werte für das DL an der jeweils ersten Position sind für den PSE nicht zu beobachten. Allerdings zeigt sich wie beim DL auch beim PSE eine Interaktion von SI-Dauer und Position des VI. Mit längeren SI-Dauern treten die Positionseffekte bei beiden Maßen deutlicher hervor als bei kurzen SI-Dauern.

### 2.8.3. Diskussion

Ziel von Experiment 7 war es, durch eine differenzierte Messung der Wahrnehmungsleistungen gegenüber den vorherigen Experimenten mehr über die Hintergründe der beobachteten Leistungsverbesserung innerhalb der präsentierten Sequenzen zu erfahren. Weiterhin sollten mögliche Stichprobeneffekte durch ein Innersubjekt-Design ausgeschlossen und der Gültigkeitsbereich der Aussagen in Bezug auf die Positionsverbesserung und die Bedeutung der ISI-Dauer auf die Leistung durch längere SI- und ISI-Dauern erweitert werden.

#### *Diskussion der DL-Effekte*

Hinsichtlich der das DL betreffenden Effekte, zeigte Experiment 7 im Vergleich zu den vorausgehenden Experimenten große Ähnlichkeiten. Das Webersche Gesetz wurde erneut bestätigt, da die Wahrnehmungsschwellen für die 600-ms SI-Sequenzen über denen der 250-ms SI-Sequenz lagen. Eine Verbesserung der Leistung mit der Position des VI ist ebenso wie in den anderen Experimenten zu beobachten und widerspricht somit den Annahme des Impulsgeber-Zähler-Modells und liefert Evidenz für die Annahme eines eher kontextsensitiven Mechanismus wie des Multiple-Look-Modells oder der Dynamic-Attending-Theorie. Auch die Interaktion von Position des VI und SI-Dauer konnte in Experiment 7 erneut beobachtet werden. Dies steht in Einklang mit bisherigen Überlegungen, wonach eine Verbesserung der Wahrnehmungsleistung sich eher bemerkbar machen sollte, wenn eine schlechtere Repräsentation vorliegt, wie das bei längeren Intervallen im

Vergleich zu kürzeren Intervallen dem Weberschen Gesetz folgend der Fall zu sein scheint. In Einklang mit den bisherigen Ergebnissen in Bezug auf den Einfluss der ISI-Dauer auf die Wahrnehmungsleistung konnte erneut kein signifikanter Einfluss festgestellt werden. Dieser Befund stimmt mit den Vorhersagen des Multiple-Look-Modell überein und spricht gegen die Annahmen der Dynamic-Attending-Theorie. Auch wenn bei der Analyse der 250-ms SI-Sequenz allein mittels zweifaktorieller ANOVA ein Trend für einen Unterschied zwischen den ISI-Dauern beobachtet werden konnte und die Ergebnisse somit sowohl einer Onset-zu-Onset als auch einer Onset-zu-Offset-Adaptation entsprechen würden, so gibt es keinerlei Anzeichen dafür bei den 600-ms SI-Sequenzen, was im Widerspruch zu den Vorhersagen der Dyanmic-Attending-Theorie steht. Der Befund steht zudem im Widerspruch mit dem einzig wirklich signifikanten Effekt der ISI-Dauer auf die Wahrnehmungsleistung bei den 50-ms SI-Sequenzen mit 125- und 50-ms ISIs: Bei dem Vergleich der 50-ms SI-Sequenzen zwischen Experiment 5 und 6 hatte war festzustellen, dass die Wahrnehmungsleistung bei einem ISI von 125 ms besser war als bei einem an die SI-Dauer angepasstem ISI. In Experiment 7 hingegen schnitt das der SI-Dauer angepasste ISI besser ab als das nicht passende ISI von 600 ms. Den Vorhersagen einer Onset-zu-Onset-Adaptation widersprechen zudem die Ergebnisse bezüglich des PSE. Wenn der PSE die Periodendauer widerspiegelt und sich die Periodendauer an die Dauer zwischen dem Onset eines Intervalls und dem des nächsten Intervalls anpasst, dann sollte durch eine Verlängerung des ISIs sich auch die Periodendauer und somit der PSE verändern. Bei einer 250-ms SI-Sequenz mit 250-ms ISIs sollte die Periode auf 500 ms eingestellt sein. Bei einem ISI von 600 ms hingegen müsste sie 850 ms betragen, da SI-Dauer und ISI-Dauer zu addieren sind. Veränderungen im PSE durch unterschiedliche ISI-Dauern wurden aber nicht beobachtet. Somit bestätigen die Ergebnisse daher vielmehr, dass sich die gefundenen Nulleffekte der vorherigen Experimente bezüglich des ISI auch in einem Innersubjekt-Design finden lassen. Dies spricht gegen einen Stichprobeneffekt als Ursache für die Nulleffekte, die bei den Vergleichen zwischen verschiedenen Versuchspersonen in den ersten Experimenten gefunden wurden. Zudem wird der Gültigkeitsbereich der Effekte durch die Verwendung längerer ISI-Dauern und SI-Dauern ausgeweitet.

Im Gegensatz zu den bisherigen Experimenten ließ sich in diesem Experiment interessanterweise kein Endeffekt für die Sequenz nachweisen. Auch wenn Abbildung 21 zufolge vor allem für die Sequenzen mit 250 ms ISIs ein erhöhtes DL

an der fünften im Vergleich zur 4. Position festzustellen ist, so wird dieser Effekt nicht mehr signifikant. Ein Anstieg des DLs an der fünften Position ist bei 250-ms SI-Sequenz mit 600 ms ISIs zudem nicht einmal mehr visuell auszumachen, sondern es fand sich eher noch eine weitere Reduktion des DL zur fünften Position hin vor. Die Befunde dieses Experiments legen daher nahe, dass die ISI-Dauer einen Einfluss auf den Endeffekt ausüben könnte. Inwieweit dem ISI dementsprechend doch ein Einfluss auf die Wahrnehmungsleistung zukommt, wird in der Schlussdiskussion im Zusammenhang mit anderen Beobachtungen noch näher diskutiert. Als eine weitere Erklärungsmöglichkeit für das Ausbleiben des Endeffektes kommt auch die Verwendung einer anderen Messprozedur in diesem Experiment in Frage. Denn im Gegensatz zu bisherigen Experimenten wurden in Experiment 7 längere und kürzere Vergleichsreize präsentiert. Allerdings ist unklar, wie dies das Ausbleiben des Endeffektes erklären könnte.

#### *Diskussion der PSE-Effekte*

Hinsichtlich der PSE-Effekte war aufgefallen, dass der PSE an der ersten Position deutlich unter dem POE lag. Hingegen kam es an der zweiten Position zu einer nahezu exakten Übereinstimmung von PSE und POE. Mit den folgenden Positionen wurde der PSE jedoch erneut kleiner und lag an der fünften Position wieder deutlich unter dem POE. Dieser Effekt konnte sich für die 600-ms SI-Sequenzen belegen lassen, aber das PSE-Profil der 250-ms SI-Sequenzen ähnelt dem der 600-ms SI-Sequenzen. Wie in den bisherigen Experimenten immer auch ein deutlicherer Effekt für lange SI-Dauern gegenüber kürzeren zu beobachten war, liegt auch hier die Vermutung nahe, dass das, was für die 600-ms Sequenz gilt, sich nicht unbedingt qualitativ von dem der 250-ms Sequenzen unterscheiden muss, auch wenn sich die Effekte für die 250-ms SI-Sequenzen nicht statistisch nachweisen lassen.

Den aus der Einleitung aufgestellten Hypothesen zufolge sollte sich der PSE am Anfang der Sequenzen deutlicher vom POE unterscheiden und sich diesem dann immer mehr annähern, weil sich durch mehrfache Präsentationen der SI-Dauern eine exaktere Repräsentation der Intervalldauer ausbilden kann. Erstaunlich ist, dass entgegen dieser Hypothese eine maximale Übereinstimmung des PSE mit dem POE an der zweiten Position und nicht gegen Ende der Sequenz fand. Vor allem überrascht, dass der PSE mehr und mehr vom POE abweicht, je mehr Standarddauern präsentiert wurden. Nur der erste PSE-Wert entspricht der

Vorhersage, da er deutlich vom POE abweicht. Interessant ist auch, dass ein größerer Effekt an Abweichungen des PSE vom POE bei den Sequenzen mit SI-Dauern von 600 ms im Vergleich zu den 250-ms SI-Dauern zu finden war. Vierordts Gesetz (1868; siehe auch Woodrow, 1934; Woodworth & Schlosberg, 1954) zufolge sollte bei kurzen Dauern der PSE über dem POE liegen (in diesem Fall wird auch von einem positive constant-error/CE gesprochen, da sich dieser konstante Fehler nach der Formel  $CE = PSE - POE$  berechnet) und bei langen Dauern unter dem POE (negative CEs). Für mittlere Intervalldauern hingegen sollten keine PSE-Abweichungen zu beobachten sein. Fraise (1963) zufolge handelt es sich bei diesem Intervall, in dem weder ein positiver noch ein negativer CE zu beobachten ist und das dementsprechend als Indifferenz-Intervall (Indifference Interval) bezeichnet wird, um eine biologische Konstante, eine präferierte Periodendauer. Abweichungen von dieser Grundeinstellung des Systems führen bei kurzen Intervallen zu einer Verzerrung hin zu dieser Grundeinstellung, somit zu positiven CEs. Lange Dauern werden ebenfalls von der Grundeinstellung des Systems quasi angezogen und die wahrgenommene Dauer dieser langen Intervalle erscheint dadurch kürzer, da die Repräsentation durch das Indifferenz-Intervall beeinflusst wird und einen negativen CE erzeugt. Die Studie von Jones und McAuley (2005) zeigte jedoch, dass dieses Indifferenz-Intervall vom Kontext abhängig ist, sich als variabel und nicht fix erweist. Sie präsentierten ihren Versuchspersonen eine Induktionssequenz von leeren Intervallen, gefolgt von einem Standard- und Vergleichsreiz, die hinsichtlich ihrer Dauer zu beurteilen waren. Die verwendeten Standarddauern innerhalb eines Blocks wechselten dabei zufällig von Durchgang zu Durchgang. Die verwendeten Standarddauern stellten jeweils ein bestimmtes Set dar, das sich hinsichtlich der Verteilung der Dauern unterschied. So verwendeten Jones und McAuley (2005) Dauern, die zusammen unterschiedliche Mittelwerte des jeweiligen Sets hervorriefen. Zudem variierten sie Verteilung der Dauern und stellten fest, dass sowohl die Spanne und die Dichte der Dauern als auch der Mittelwert des Sets die Wahrnehmungsleistung beeinflussten. Dauern, die nahe dem jeweiligen arithmetischen Mittelwert des Sets lagen, zeigten keine Abweichungen im PSE, während Werte unterhalb dieses Mittelwertes positive CEs und Dauern oberhalb negative CEs erzeugten. Dieses Indifferenz-Intervall, das Jones und McAuley (2005) beobachteten, interpretierten sie als eine Art grundsätzliche Adaptation der Periode an den Mittelwert aller präsentierter Dauern, der für die im Set vorkommenden

Dauern insofern eine optimale Grundeinstellung der Periode darstellt, da sie am wenigsten von allen vorkommenden Dauern abweicht. Die von Jones und McAuley (2005) beobachtete Adaptation der Periode eines oszillierenden Prozesses zur Verbesserung der Wahrnehmungsleistung in Abhängigkeit vom globalen und lokalen Kontext der präsentierten Reize erweist sich als kritisch in Bezug auf die Ergebnisse des Experimentes 7 dieser Arbeit. Denn den Versuchspersonen hier wurde kein Set verschiedener Dauern dargeboten. Dementsprechend wären also keine PSE-Verschiebungen zu erwarten gewesen. Während dies für die 250 ms auch noch im Wesentlichen zu stimmen scheint, trifft die Vorhersage für die 600 ms SI-Dauern nicht zu. Wenn eine Adaptation der Periode und somit des PSE an den Mittelwert aller präsentierten Dauern nicht nur auf der Ebene eines globalen Kontextes sondern auch innerhalb eines Durchgangs anzunehmen ist, dann sollte unabhängig von der SI-Dauer ein Effekt der Position des VI auf den PSE zu beobachten sein und zwar in der Form, dass der CE immer geringer wird. Aber genau der gegenteilige Effekt wurde in Experiment 7 beobachtet, da der PSE mit einer zunehmenden Anzahl an SI-Dauern immer mehr vom POE abwich. Auch lassen sich die Ergebnisse nicht mit den Überlegungen Fraisses (1963) in Verbindung bringen, der das Indifferenz-Intervall unabhängig von einem Set aus Dauern (bei Dauern um die 500-600 ms) verortet. Die in Experiment 7 präsentierten 600-ms SI-Dauern hätten demnach ebenfalls keine PSE-Effekte zeigen sollen, dafür aber die 250-ms SI-Sequenzen.

Wenn der PSE tatsächlich die Periodendauer des Oszillators abbilden würde, dann sollten bei einer Onset-zu-Onset-Adaptation des Oszillators deutliche Unterschiede zwischen den Bedingungen mit unterschiedlichen ISI-Dauern auftreten. Die Periodendauer bei einer Sequenz mit 250-ms SI-Dauern und 250-ms ISIs sollte sich von einer Sequenz von 250 ms SI-Dauern und 600-ms ISIs deutlich unterscheiden. Gefunden wurden aber keine signifikanten Unterschiede zwischen den ISI-Bedingungen, weder was die 250- noch die 600-ms SI-Sequenzen anbelangt. Mit der Dynamic-Attending-Theorie zufolge ist der Befund nicht erklärbar, dass PSEs von ungefähr 250 oder 600 ms gefunden wurden, wenn die ISI-Dauer mit in die Periode integriert wird, da die Periodendauer z.B. 250 ms SI-Dauer und 250 ms ISI-Dauer lang sein müsste. Folglich sprechen die gefundenen PSE-Effekte gegen eine Onset-zu-Onset-Adaptation der Periode eines oszillierenden Prozesses.

Das Profil der PSE-Veränderungen lässt sich allerdings sehr gut im Rahmen des Impulsgeber-Zähler-Modells unter Hinzunahme von Aufmerksamkeitseffekten

erklären. Zakay und Block (1995) erweiterten das klassische Impulsgeber-Zähler-Modell durch einen Regler (Gate), der den Fluss der Impulse vom Impulsgeber zum Zähler beeinflusst. Dieser Regler ist aufmerksamkeitsgesteuert. Wird einer Aufgabe viel Aufmerksamkeit geschenkt, so ist der Regler weiter geöffnet und mehr Impulse pro Zeiteinheit erreichen den Zähler im Vergleich zu einer Aufgabe, in der weniger Aufmerksamkeit der Zeitwahrnehmungsaufgabe gewidmet wird. Wenn man mit Beginn einer Sequenz für die erste Position einen gegenüber der zweiten Position niedrigeren PSE findet, so kann das dadurch erklärt werden, dass das erste Intervall mehr Aufmerksamkeit erhalten hat, somit mehr Impulse pro Zeiteinheit den Zähler erreichten als beim entsprechenden Vergleichsintervall. Diese erhöhte Aufmerksamkeitszuwendung für das erste Intervall könnte darin begründet liegen, dass neue Reize mehr Aufmerksamkeit auf sich ziehen (Mattes & Ulrich, 1998; Ulrich, et al., 2006; Seifried & Ulrich, im Druck) als Reize, die sich wiederholen, bzw. durch eine einfache Orientierungsreaktion eine erhöhte Aufmerksamkeitszuwendung erfolgt (Cycowicz & Friedman, 1998). Dieser Aufmerksamkeitsseffekt wirkt sich auf längere Dauern gravierender aus als auf kurze Dauern, da, je länger mit einer unterschiedlichen Impulsfrequenz akkumuliert wird, die Effekte größer werden. Während eines langen Intervalls kann sich die Wirkung des Aufmerksamkeitsseffekts besser oder überhaupt erst entfalten, da bis zur weiteren Öffnung des Reglers sicherlich auch erst einige Zeit vergehen muss. Auf der anderen Seite vergeht bei langen Intervallen mehr Zeit zwischen dem Onset des ersten Intervalls und des zweiten Intervalls, so dass der Aufmerksamkeitsseffekt bis zum zweiten Intervall schon eher verklungen sein kann, als es bei einer Sequenz mit eher kurzen Intervallen möglich ist. Bei kurzen Intervallen könnte der Neuigkeitseffekt des ersten Intervalls bis zum nächsten oder übernächsten Intervall noch etwas nachwirken und somit den Effekt zwischen dem ersten und den folgenden Intervallen schmälern. Bei langen Intervallen hingegen sollte ein solcher Übertrag auf weitere Intervalle ausbleiben.

Wenn der PSE von Position 2 bis 5 immer geringer wird, wie die Ergebnisse des siebten Experimentes zeigten, dann kann dies nicht über einen weiteren Neuigkeitseffekt erklärt werden, aber durch eine Veränderung in der Erwartung eines abweichenden Intervalls. Wenn man noch keine Abweichung an den ersten Positionen wahrgenommen hat, dann steigt die Wahrscheinlichkeit mit jeder SI-Präsentation, dass das abweichende Intervall an einer der folgenden Positionen

auftreten wird. Diese gesteigerte Erwartung könnte sich wiederum auf die Öffnung des Reglers zwischen Impulsgeber und Zähler auswirken oder aber auch das Arousal der Versuchsperson erhöhen. Ein erhöhtes Arousal sollte sich dem Attentional-Gate-Modell von Zakay und Block (1995) direkt auf die Frequenz, mit der der Impulsgeber seine Impulse ausgibt, auswirken. Bei einer Erhöhung des Arousals sollten mehr Impulse pro Zeiteinheit beim Zähler ankommen als in einer vergleichbaren Situation, in der das Arousal geringer ist. Studien von Burle und Casini (2001) belegen eine solche Annahme. Wenn PSE-Verschiebungen auch bei kurzen Zeitdauern zu beobachten sind, so spricht das eher für einen Effekt der Aufmerksamkeit auf den Regler, der sich dem Attentional-Gate-Modell zufolge wesentlich schneller öffnen oder schließen sollte und gegen einen Effekt des Arousals, dessen Wirkung sich langsamer entfalten sollte. Die Ergebnisse des Experimentes zeigten aber, dass sich nur ein Effekt der Position des VI auf den PSE bei den 600-ms SI-Sequenzen ausfindig machen lässt und nicht bei den 250-ms SI-Sequenzen. Dementsprechend passt der Befund eher zu den Untersuchungen von Ulrich et al. (2006), die einen Effekt des Arousals annehmen, der langsamer wirkt.

Die Ergebnisse dieses Experiments lassen Untersuchungen zur Wirkung eines Reizes, der von anderen abweicht, (Oddball) auf die Zeitwahrnehmung (Mattes & Ulrich, 1998; Seifried & Ulrich, im Druck; Tse, Intrilligator, Rivest, & Cavanagh, 2004; Ulrich, et al. 2006) in einem etwas anderen Licht erscheinen. Tse, et al. (2004) als auch Ulrich, et al. (2006) präsentierten ihren Versuchspersonen auf einem Bildschirm eine Sequenz von schwarzen Punkten. Diese schwarzen Punkte hatten eine bestimmte (Standard-) Dauer. Nach mehrfacher Präsentation solcher Punkte wurde ein etwas größerer Punkt angezeigt, der sich in seiner Darbietungsdauer von der der kleineren Punkte unterschied. Die Dauer des größeren Punktes (Vergleichsreiz) sollte mit der Dauer der kleinen Punkte (Standardreiz) verglichen werden. Beide Autorengruppen fanden heraus, dass der PSE des größeren Punktes kleiner war als der POE. Während die Gruppe um Ulrich dies nur für längere Dauern fand und daher auf eine Veränderung des Arousals schloss, fanden Tse et al. (2004) auch für kurze Dauern einen Einfluss auf den PSE und argumentierten, dass die Abweichung des PSE vom POE durch eine unterschiedliche Öffnung des Reglers zwischen Impulsgeber und Zähler zustande gekommen sein musste, da dieser Regler sich schneller regeln lässt als die Impulsfrequenz des Impulsgebers über das Arousal. Beide Gruppen gehen in jedem Fall davon aus, dass es die Andersartigkeit - die

größere Fläche des einen größeren Punktes gegenüber den zuvor präsentierten gleichartigen kleinen Punkten - ist, die den Effekt auf den PSE auslöste. Dadurch, dass sich die Punkte physikalisch in ihrer Größe unterschieden, sollten die Versuchspersonen bei dem großen Punkt im Vergleich zu physikalisch identischen, kleineren Punkten mehr Impulse pro Zeiteinheit registriert haben. In Experiment 7 dieser Arbeit unterscheiden sich die Intervalle allerdings nicht in ihrer Größe, sondern einzig und allein in ihrer Dauer und es wurde trotzdem derselbe PSE-Effekt gefunden. Mit dem Onset eines Intervalls ist den Versuchspersonen in dem Paradigma von Experiment 7 noch nicht klar, ob dies von den anderen Intervallen abweichen wird oder nicht. Dementsprechend kann der Anfang des Intervalls nicht dazu führen, dass während des Intervalls mehr Impulse akkumuliert werden als in einem anderen Intervall. Erst nachdem das abweichende Intervall als abweichend erkannt worden ist, wäre es möglich, dass diese Abweichung eine physiologische Reaktion bewirkt, die sich dann wiederum auf die Akkumulation von Impulsen auswirken könnte. Dementsprechend sollte in unserem Experiment also das dem variablen Intervall folgende Intervall von einer PSE-Veränderung betroffen sein. Wenn jedoch das abweichende Intervall bereits erkannt wurde, dann sollte sich eine veränderte Impuls-Akkumulations-Rate in einem nachfolgenden Intervall nicht mehr auf die Wahrnehmung der Abweichung auswirken können, es sei denn, die Urteilsbildung erfolgt in verschiedenen Stufen. Nach einer ersten internen Urteilsbildung könnte eine weitere Validierung des bereits gefällten Urteils anhand des folgenden Intervalls erfolgen und somit die sich entwickelnde motorische Urteilsabgabe nochmals beeinflussen. Jedoch wäre in einem solchen Fall ein positiver Zeitfehler zu erwarten, da das eigentlich abweichende Intervall sehr viel länger sein müsste als das folgende Intervall, weil während des folgenden Intervalls mehr Impulse pro Zeiteinheit gezählt werden würden. Dementsprechend erscheint es als wahrscheinlicher, dass es sich bei den Effekten von beiden Forschergruppen um Tse und Ulrich herum nicht um einen Effekt der Andersartigkeit des variablen größeren Punktes gegenüber den kleinen Punkten mit einer fixen Standarddauer handelt, sondern dass es sich um einen Effekt der Erwartung handelt, der generell bei Sequenzen auftritt, eben auch, wenn das kritische Intervall sich nicht von anderen Intervallen außer durch seine Dauer unterscheidet.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Ergebnisse im Bezug auf das DL die Resultate vorheriger Experimente, in denen nur das .75-Perzentil gemessen wurde,



bestätigen. So wurde in Experiment 7 ebenfalls ein Effekt der Position des VI auf die Variabilität der Urteile beobachtet. Die Positionseffekte der ersten Experimente können somit nicht allein durch Verschiebungen des PSE entstanden sein. Da in diesem siebten Experiment in einem Innersubjekt-Design ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen den ISI-Bedingungen gefunden werden konnten, stellen sie die Vorhersagen der Dynamic-Attending-Theorie stark in Frage und befinden sich in Einklang mit den Vorhersagen des Multiple-Look-Modells. Zudem lassen die Befunde in Bezug auf den PSE starke Zweifel darüber aufkommen, ob der Verarbeitung der Sequenzen ein oszillatorbasierter Mechanismus zugrunde liegt. Denn der PSE wich ab der zweiten Position immer mehr vom POE ab, anstatt sich diesem immer mehr anzunähern, wie man das von einer Periodenadaptation erwarten würde. Die PSE-Effekte sind viel eher mit den Annahmen eines Multiple-Look-Modells zu vereinbaren, das einen Impulsgeber-Zähler-Mechanismus zur Enkodierung der Intervalldauern nutzt. Denn dieser kann die Veränderung des PSE über Aufmerksamkeitseffekte gut vorhersagen. Da das erste Intervall vermutlich so etwas wie eine Orientierungsreaktion auslöst, erreichen mehr Impulse pro Zeiteinheit den Zähler und die Zeitdauer des ersten Intervalls wird überschätzt. Ähnliches könnte bei den folgenden Intervallen passieren, jedoch nicht aufgrund einer Orientierungsreaktion, sondern durch die sich steigende Erwartung einer Abweichung gegen Ende der Sequenz. Denn ist noch kein abweichendes Intervall wahrgenommen worden, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein solches noch kommen wird, was die Erwartung und Aufmerksamkeit der Versuchsperson erhöhen sollte. Dementsprechend lassen sich die Effekte des PSE gut durch das Impulsgeber-Zähler-Modell erklären, während die Effekte das DL betreffend sehr gut durch das Multiple-Look-Modell erklärt werden können. In der allgemeinen Diskussion wird darauf noch näher eingegangen werden.

### 3. Allgemeine Diskussion

Ziel dieser Arbeit war es, die der Zeitwahrnehmung zugrunde liegenden Mechanismen näher zu untersuchen. Im Vordergrund stand die Frage, welches der drei Modelle (Impulsgeber-Zähler-Modell, Creelman, 1962; Multiple-Look-Modell, Drake & Botte, 1993; Dynamic-Attending-Theorie, Barnes & Jones, 2000) am ehesten in der Lage ist, die Verarbeitung zeitlicher Informationen in Sequenzen zu erklären. Das Impulsgeber-Zähler-Modell, das Multiple-Look-Modell und die Dynamic-Attending-Theorie machen unterschiedliche Vorhersagen zur Erkennungsleistung von temporalen Abweichungen eines Intervalls in einer ansonsten isochronen Sequenz von Intervallen. Während das Impulsgeber-Zähler-Modell davon ausgeht, dass die Enkodierung der Dauer eines vorhergehenden Intervalls die Verarbeitung folgender Intervalle nicht beeinflusst, so postulieren Multiple-Look-Modell und Dynamic-Attending-Theorie einen Einfluss vorausgegangener Intervalle. Das Multiple-Look-Modell sowie die Dynamic-Attending-Theorie unterscheiden sich wiederum in ihren Vorhersagen, welchen Einfluss die Zeitintervalle zwischen zwei zu diskriminierenden Intervallen bzw. Sequenzen auf die Wahrnehmung haben. So geht das Multiple-Look-Modell davon aus, dass unterschiedliche Zeiten zwischen Sequenzen(ZS)/Interstimulus-Intervalle(ISIs) keinen Einfluss haben, während die Dynamic-Attending-Theorie in ihren verschiedenen Varianten in jedem Fall einen nicht unbedeutenden Effekt erwartet. Die Ergebnisse der sieben Experimente stehen nicht in Einklang mit den Vorhersagen des klassischen Impulsgeber-Zähler-Modells (Creelman, 1962) und denen der Dynamic-Attending-Theorie (Barnes & Jones, 2000). Hingegen sagt das Multiple-Look-Modell (Drake & Botte, 1993), wenn es den Mechanismus eines Impulsgeber-Zähler-Modells nutzt, die Ergebnisse der Experimente dieser Arbeit korrekt vorher.

### 3.1. Diskussion einzelner zentraler Effekte dieser Arbeit

#### **3.1.1. Einfluss mehrfacher Standarddauerpräsentationen: Impulsgeber-Zähler-Modell vs. Dynamic-Attending-Theorie und Multiple-Look-Modell (Experimente 1-7)**

Zur Klärung der ersten Frage, inwieweit die Enkodierung vorheriger Intervalldauern Auswirkungen auf die Wahrnehmungsleistung folgender Intervalldauern hat, wurde der Effekt der Position des VI auf die Wahrnehmungsleistung untersucht. Hierzu wurde systematisch die Position eines abweichenden Intervalls in einer sonst isochronen Sequenz mit gefüllten Intervallen variiert. Alle sieben Experimente zeigten einheitlich, dass die Intervalldauern der Sequenzen nicht unabhängig voneinander verarbeitet werden. Bei allen Standarddauern (50, 150, 250 und 600 ms Intervallen) und auch bei unterschiedlich langen Sequenzen (Experimente 3 und 4) war festzustellen, dass eine Leistungsverbesserung mit einer zunehmenden Anzahl präsentierter Standarddauern einhergeht (mit Ausnahme der jeweils letzten Position innerhalb der Sequenz). Dieser Effekt ist bis zur dritten Position innerhalb der Sequenzen (und in Abhängigkeit der jeweiligen SI-Dauer) am deutlichsten zu sehen. Nach spätestens dem dritten Intervall saturiert der Effekt. Experiment 7 hat zudem gezeigt, dass die Verringerung der .75 Unterschiedsschwelle nicht allein auf eine Verschiebung des PSE zurückgeführt werden kann, da auch mit der Messung des DLs derselbe Einfluss der Position auf die Wahrnehmungsleistung gefunden werden konnte. Diese Ergebnisse widersprechen den Vorhersagen des Impulsgeber-Zähler-Modells, da es keinen Einfluss vorheriger Intervallpräsentationen auf die Wahrnehmungsleistung der nachfolgenden Intervalle vorhersagt, und unterstützen die Vorhersagen des Multiple-Look-Modells und der Dynamic-Attending-Theorie. Die sieben Experimente replizieren und erweitern somit Befunde vorheriger Untersuchungen (Barnes & Jones, 2000; Drake & Botte, 1993; Ivry & Hazeltine, 1995; McAuley & Jones, 2003; McAuley & Kidd, 1998; Miller & McAuley, 2005; Rousseau & Rousseau, 1996; ten Hoopen & Akerboom, 1983), die eine Leistungsverbesserung mit einer zunehmenden Anzahl an präsentierten Standarddauern bereits für Sequenzen mit leeren Intervallen zeigten.

### **3.1.2. Einfluss der ISI-Dauer auf die Wahrnehmungsleistung: Dynamic-Attending-Theorie vs. Multiple-Look-Modell (Experiment 1 vs. 2 & 5 vs. 6; 7)**

Zur Klärung der Frage nach dem Einfluss verschiedener ZS/ISIs auf die Wahrnehmungsleistung wurde die Leistung der Ergebnisse von Experiment 1 (ISI=SI-Dauer, randomisierte Darbietung) und 2 (ISI=125 ms, randomisierte Darbietung) sowie Experiment 5 (ISI= 125 ms, geblockte Darbietung) und 6 (ISI=SI-Dauer, geblockte Darbietung) miteinander verglichen. Um sicher zu gehen, dass die Effekte nicht durch Stichprobenunterschiede durch das Zwischensubjekt-Design verursacht wurden, wurden außerdem zur Validierung der Ergebnisse ISI-Effekte im Innersubjekt-Design in Experiment 7 untersucht. Die Leistung in den unterschiedlichen ISI-Bedingungen (ISI=125 ms vs. ISI=SI bzw. ISI=250/600 ms vs. ISI=SI) unterschied sich nicht signifikant, mit einer Ausnahme (Vergleich der 50-ms SI-Sequenzen bei Experiment 5 und 6). Abgesehen von dieser Ausnahme entsprechen diese Resultate den Vorhersagen des Multiple-Look-Modells mit einem Impulsgeber-Zähler-Mechanismus für die Enkodierung der Intervalle, da der Zähler die Intervalle sowie die ISIs unabhängig voneinander verarbeitet und somit das ISI keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsleistung ausüben sollte. Die Ergebnisse sind hingegen nicht in Einklang mit den Vorhersagen von verschiedenen Varianten der Dynamic-Attending-Theorie zu bringen:

Bei einer Adaptation der Periodendauer vom Onset zum Offset der gefüllten Intervalle wäre zu erwarten gewesen, dass Phasenkorrekturen zu Beginn eines jeden Intervalls in der Sequenz notwendig sind, um in Experiment 2 und 5 den inneren oszillatorischen Prozess mit der zeitlichen Struktur der präsentierten Intervalle zu synchronisieren. Die Beobachtung, dass die Leistung der 50-ms SI-Sequenz in Experiment 5 besser als in Experiment 6 ausfiel, spricht gegen die Annahme einer Onset-zu-Offset-Adaptation. Wenn Phasenkorrekturen hätten vorgenommen werden müssen, hätte die Leistung gerade in Experiment 5 schlechter sein müssen als in Experiment 6. Aber genau das Gegenteil trat ein. Die Leistung in Experiment 6 war besser als in Experiment 5, in dem keine Phasenkorrekturen notwendig waren. Dies ist insbesondere interessant, wenn man bedenkt, dass die Manipulation des ISIs in den Experimenten dieser Arbeit sehr viel größer war als in bisherigen Untersuchungen, da nicht nur durch ein einziges ZS-Intervall variiert wurde, um Periode und Intervallsequenz zu desynchronisieren, sondern gleich sechsmal in der

Sequenz eine Phasenkorrektur erforderlich war (nach jedem ISI) und daher der Effekt noch deutlicher hätte auftreten müssen.

Durch die Annahme einer Adaptation der Periode vom Onset des einen Intervalls zum Onset des nächsten Intervalls ist es ebenfalls nicht möglich zu erklären, warum wir keine Leistungsunterschiede zwischen den Experimenten 1 & 2 und 5 & 6 gefunden haben. Würde die Periode sich an die Zeit zwischen den Onsets anpassen, so würde sich die Periode von Experiment 1 zu Experiment 2 für die 50-ms Intervallsequenzen verkürzen, wohingegen sie sich für die 250-ms Intervallsequenzen verlängern würde. Im ersteren Fall sollte sich die Wahrnehmungsleistung dem Weberschen Gesetz zufolge verbessern. Gefunden wurde aber entweder ein Nulleffekt (beim Vergleich zwischen Experiment 1 und 2) oder gar der gegenteilige Effekt (eine Verschlechterung der Leistung beim Vergleich von Experiment 5 und 6). Durch die 50-ms ISIs sollte sich die Periode im Vergleich zu den 125 ms verkürzen und eine bessere Leistung erreicht werden. Bei den 250-ms Intervallen hingegen sollte sich die Leistung verschlechtern, da die Periode bei den 250-ms ISIs länger ausfallen sollte als bei ISIs von 125 ms. Beim Vergleich der 250-ms SI-Sequenzen von Experiment 1 und 2 war kein Einfluss des ISIs auf die Leistung erkennbar und bei den Experimenten 5 und 6 stellte sich ebenfalls kein signifikanter Unterschied zwischen den ISI-Bedingungen ein. Somit stimmen die Ergebnisse insgesamt mit den Vorhersagen des Multiple-Look-Modells überein, das keinen Einfluss des ISI auf die Diskriminationsleistung vorhersagt. Diese Nulleffekte auf eine mangelhafte Manipulation der ISI-Dauer zurückzuführen erweist sich als schwierig. Die Dauermanipulation, die sich in der Periodenlänge niederschlagen sollte, liegt in derselben Größenordnung wie die SI-Dauer-Manipulation. Bei den unterschiedlichen SI-Sequenzen erzeugen dieselben Dauerunterschiede in allen Experimenten deutliche Leistungsunterschiede und dementsprechend fällt es schwer, die Nulleffekte dadurch erklären zu wollen. Erschwerend kommen außerdem die Ergebnisse aus Experiment 7 hinzu, da sie nicht nur hinsichtlich der Effekte des ISIs in Bezug auf das DL die vorherigen Nulleffekte bestätigten, sondern auch hinsichtlich des PSEs ein Positionseffekt zu beobachten ist, der nicht durch die Dynamic-Attending-Theorie vorausgesagt wird. Der PSE kann als ein Äquivalent der Periodendauer angesehen werden und sollte sich der Dynamic-Attending-Theorie zufolge mit einer zunehmenden Anzahl an präsentierten SI-Dauern mehr und mehr dem POE anpassen. Die Ergebnisse von Experiment 7 zeigten allerdings, dass der

PSE ab Intervall 2 immer mehr vom POE abweicht und dies steht im diametralen Widerspruch zu einer verbesserten Periodenadaptation eines Oszillators. Die Ergebnisse des Vergleichs von Experiment 1 und 2 sowie von Experiment 5 und 6 als auch die aus Experiment 7 bestätigen somit vielmehr vorherige Untersuchungen (Ivry & Hazeltine, 1995; Keele et al., 1989; Pashler, 2001; Schulze, 1978), die ebenfalls keinen Effekt der ZS/ISIs auf die Wahrnehmungsleistung haben feststellen können. Da es sich jeweils um einen Nulleffekt handelt, unterstützen die Ergebnisse nicht direkt das Multiple-Look-Modell, sie lassen jedoch Zweifel an der Korrektheit der Vorhersagen der Dynamic-Attending-Theorie aufkommen.

### **3.1.3. Effekt der Anzahl an Intervallen in der Sequenz auf die Wahrnehmungsleistung: Endeffekt Kapazitäts- oder Zeitlimitationseffekt? (Experimente 3-4)**

Die Ergebnisse aus den ersten zwei Experimenten, vor allem der beobachtete Endeffekt (die Verschlechterung der Wahrnehmungsleistung an der letzten Position der Sequenz), könnten theoretisch durch Gedächtniseffekte hervorgerufen worden sein. Betrachtet man unsere Sequenzaufgabe auch als eine Gedächtnisaufgabe und durchdenkt sie in der Tradition von Miller (1956) als Test für die Gedächtnisspanne in Form eines Kapazitätsproblems, so könnte man den Endeffekt durch ein Gedächtniskapazitätsproblem erklären. Die Gedächtnisspanne könnte sechs Intervalle betragen und dementsprechend könnten Probleme bei der Verarbeitung des siebten Intervalls in Experiment 1 und 2 durch Kapazitätslimitationen verursacht worden sein. Ebenso sollte man aber auch mögliche Effekte durch eine zeitliche Begrenzung des Gedächtnisses in Betracht ziehen, so wie es Baddeley (1986; 2007) annimmt. Baddeley zufolge hängt die Wiedergabeleistung von Wörtern von der Zeit zwischen deren Präsentation und ihrem Abruf ab. Je länger der Abruf von Informationen sich verzögert, desto schwieriger ist ein exakter Abruf aus dem Gedächtnis. Die beiden Gedächtnismodelle könnten somit womöglich das in dieser Arbeit ermittelte Leistungsprofil teilweise erklären. Um dieses zu prüfen, wurden Sequenzen mit unterschiedlich vielen Intervallen (Sequenzen mit fünf, sieben oder neun Intervallen) getestet, um den Einfluss der Gesamtanzahl an Intervallen einer Sequenz auf die Wahrnehmungsleistung zu prüfen. Es stellte sich heraus, dass der Endeffekt unabhängig von der Gesamtzahl der Intervalle einer Sequenz auftritt, da, egal bei welcher Länge, immer nur das letzte Intervall der Sequenz betroffen war

(Experimente 3 und 4). Dies macht deutlich, dass der Endeffekt nicht durch ein Gedächtnislimit im Sinne einer Kapazitätsbegrenzung erklärt werden kann. Die Wahrnehmungsleistung verbesserte oder verschlechterte sich insgesamt, d.h. vom Gesamtniveau her, in den verschiedenen Sequenzen nicht, sondern zeigte ein einheitliches Niveau. Dies spricht auch gegen eine zeitliche Begrenzung des Gedächtnisses (Baddeley, 1986; 2007), da der Abruf der ersten Intervalle bei Sequenzen mit einer größeren Anzahl an Intervallen später erfolgt als bei kürzeren Sequenzen. Die Intervalle wurden aber bei langen und kurzen Sequenzen gleich gut diskriminiert. Dasselbe gilt auch für Sequenzen mit einer geraden Anzahl an Intervallen, wie sie in Experiment 4 getestet wurden. Auch hier wurde ein Endeffekt vorgefunden, unabhängig von der Anzahl der verwendeten Intervalle. Selbst bei einer Anzahl von nur zwei Intervallen konnte der Endeffekt beobachtet werden.

#### **3.1.4. Effekt der Standarddauer und Anzahl an Intervallen auf die Sequenzlänge: holistische vs. analytische Verarbeitung (Experimente 1-2 vs. 3-4)**

Die Leistungsunterschiede, die dem Weberschen Gesetz entsprechend zwischen den Standarddauern in Experiment 1 und 2 oder aber den Experimenten 5 und 6 gefunden wurden, könnten entweder durch die Zunahme der Gesamtsequenzdauer oder aber durch Unterschiede in den SI-Dauern der einzelnen Intervalle selbst erklärt werden. Die Ergebnisse aus Experiment 3 und 4, in denen die Anzahl der Intervalle der Sequenz variiert und die SI-Dauer konstant gehalten wurde, zeigen jedoch deutlich, dass nicht die Gesamtsequenzdauer für den Effekt verantwortlich gemacht werden kann, sondern der Effekt nur durch Unterschiede der SI-Dauer der einzelnen Intervalle erklärt werden kann. Denn die Manipulation der Sequenzlänge durch unterschiedlich viele Intervalle (2, 3, 4, 5, 6, 7 oder 9 Intervalle) führte zu keinen Unterschieden in der Diskriminationsleistung (Experimente 3 und 4). Dieses Ergebnis spricht gegen eine holistische Verarbeitung (Verarbeitung der Sequenz als ein Ganzes) der Sequenzen, da die Sequenzlänge keinen Einfluss auf die Diskriminationsleistung hat, sondern nur die Intervalldauer der einzelnen Intervalle die Diskriminationsleistung beeinflusst, so wie es eine analytische Verarbeitung (Verarbeitung einzelner Intervalle) der Sequenzen vorhersagen würde. Das ermittelte Leistungsprofil durch Gruppierung von Intervallen zu größeren Einheiten oder zu einer ganzen Einheit erklären zu wollen erweist sich somit als schwierig, auch wenn

Gruppierungseffekte für ähnliche Aufgaben z.B. mit Hilfe des EEG bereits nachgewiesen wurden (Sussman & Gumenyuk, 2005).

### **3.1.5. Effekt einer geraden Anzahl an Intervallen auf die Wahrnehmungsleistung: Endeffekt Problem eines paarweisen Vergleichs? (Experiment 4)**

In den Experimenten 1-3 wurde immer nur eine ungerade Anzahl an Intervallen verwendet. Dies könnte einen Endeffekt hervorgerufen haben, wenn man annimmt, dass aus Gründen der Effizienz immer zwei Intervalle miteinander verglichen, z.B. Intervall 1 und 2 und dann das nächste Intervallpaar, Intervall 3 und 4, und auf Unterschiede hin untersucht würden. Denn bei einer ungeraden Anzahl an Intervallen in der Sequenz sollte bei einem solchen Vergleich am Ende ein unvollständiges Paar entstehen und es zu Schwierigkeiten bei der Beurteilung des letzten Intervalls kommen. Bei einer geraden Anzahl an Intervallen kann jedoch immer ein Paar gebildet werden und dementsprechend sollte der Endeffekt verschwinden. Die Ergebnisse von Experiment 4 zeigen, dass der Endeffekt auch bei Sequenzen mit einer geraden Anzahl an Intervallen bestehen bleibt und anders erklärt werden muss. Ein doppelter Vergleich von Intervallen (z.B. Intervall 2 wird mit Intervall 1 und dann noch mal mit Intervall 3 verglichen) kann erklären, warum das erste und letzte Intervall einer Sequenz schlechter diskriminierbar sein sollten als die in der Mitte präsentierten Intervalle, weil das erste und letzte Intervall nur einen Vergleichspartner haben, während die in der Mitte doppelt verglichen werden können. Dieser Anfangs- und Endeffekt sollte aber auch in Experiment 7, bei den Sequenzen mit 600-ms ISIs auftreten. Doch dort wurde kein Endeffekt mehr vorgefunden.

### **3.1.6. Einfluss einer geblockten und einer randomisierten Präsentation von SI-Dauern auf die Wahrnehmungsleistung: Übertragungseffekt zwischen Durchgängen und Etablierung einer Langzeitrepräsentation über mehrere Durchgänge hinweg (Experimente 1 vs. 6 und 2 vs. 5)**

Die Ergebnisse aus Experiment 3 und 4 zeigten keinen Unterschied der Wahrnehmungsleistung einer randomisierten verglichen mit einer geblockten Darbietungsweise. Diese Ergebnisse widersprechen den Befunden von Miller und McAuley (2005). Diese hatten in ihren Experimenten keinen positiven Effekt mehrfacher SI-Dauer-Präsentationen auf die Wahrnehmungsleistung in einem geblockten Design finden können, während sie dies unter randomisierten



Bedingungen belegen konnten. Ihre Daten stehen trotzdem in Einklang sowohl mit den Vorhersagen des Multiple-Look-Modells als auch der Dynamic-Attending-Theorie. Nach der Präsentation ein und derselben Dauer sollte eine optimale Repräsentation der Dauer nach spätestens einigen Durchgängen erreicht worden und danach keine weitere Leistungsverbesserung mehr zu beobachten sein. Die Daten aus den Experimenten 1-7 dieser Arbeit zeigen, dass eine Optimierung der Repräsentation der Standarddauer bereits nach spätestens drei Intervallen abgeschlossen ist und danach kaum eine weitere Verbesserung zu beobachten ist. Überraschenderweise zeigte sich im dritten Experiment trotz geblockter Darbietung von ausschließlich 150-ms SI-Sequenzen eine Verbesserung der Wahrnehmungsleistung der ersten Intervalle und diese unterschied sich nicht signifikant von derjenigen bei einem randomisierten Präsentationsmodus (Experiment 2). Wenn eine Verbesserung der Leistung während der ersten Intervalle auch im geblockten Design noch zu beobachten ist, so spricht das dafür, dass sich die Reizrepräsentation während der Zeit zwischen den Durchgängen deutlich verschlechtert hat bzw. ein kompletter Reset des Systems erfolgt ist. Dies widerspricht nicht direkt den Vorhersagen des Multiple-Look-Modells oder der Dynamic-Attending-Theorie, stellt aber einen bislang noch nicht beobachteten Sachverhalt dar. Da sich beim Vergleich der Wahrnehmungsleistung bei einer randomisierten Präsentation mehrerer SI-Dauern innerhalb eines Blocks (Experiment 2) kein Unterschied im Vergleich zu nur einer SI-Dauer (Experiment 3) ergab, wurde in Experiment 5 diesen Überlegungen zu einem möglichen Reset des Systems weiter nachgegangen. Da der 150-ms SI-Sequenz in dem Design der Experimente 1 und 2 eine besondere Rolle zukommt (Mittelwert aller präsentierten SI-Dauern), wurden in Experiment 5 neben den 150- ms auch 50- und 250-ms SI-Sequenzen in einem geblockten Präsentationsmodus getestet, um die Sonderrolle der 150-ms SI-Sequenz herausarbeiten zu können. Die Ergebnisse aus Experiment 5 zeigen erneut, dass sich die Leistungen der 150-ms SI-Sequenzen in einem geblockten und randomisierten Präsentationsmodus nicht signifikant unterscheiden. Hingegen zeigten die 50 und 250-ms SI-Sequenzen eine signifikante Verbesserung der Leistung bei einer geblockten Präsentation der SI-Dauern im Vergleich zu einer randomisierten Präsentation. Dies steht in Einklang mit anderen Studien, die ebenfalls bei einer geblockten Darbietung eine allgemein verbesserte Leistung beobachtet haben (Hellström, 2000; Mori & Ward, 1992; Rodríguez-Gironés & Kacelnik, 2001). Dies

spricht dafür, dass die 150-ms SI-Sequenzen eine besondere Rolle in unserem Design einnehmen, da sie sich nicht entsprechend bisheriger Studien bezüglich ihrer Leistung in einem geblockten und randomisierten Präsentationsmodus unterscheiden. Neben den allgemeinen Leistungsunterschieden ist vor allem die Leistung für die ersten Intervalle der Sequenzen von Bedeutung, die Auskunft darüber geben kann, inwieweit die SI-Dauer-Repräsentation über zwei Durchgänge hinweg erhalten bleibt. Deutliche Unterschiede zwischen der randomisierten und geblockten Präsentation sind in Bezug auf die ersten Intervalle bei den 50- und 250-ms SI-Sequenzen zu beobachten, während keine Unterschiede zwischen den 150-ms SI-Sequenzen zu beobachten sind. Diese Unterschiede sind erklärbar, wenn man eine Langzeitrepräsentation annimmt, die sich als Mittelwert aus allen präsentierten Dauern ausbildet. Diese Langzeitrepräsentation verbessert die Leistung generell, wenn die Durchschnittsdauer der dargebotenen Dauern der aktuellen Dauer entspricht. Eine schlechtere Leistung sowohl im Allgemeinen als auch besonders für die ersten Intervalle ist dann zu beobachten, wenn die aktuelle Dauer nicht dem Durchschnitt der präsentierten Dauern entspricht. Eine solche Annahme könnte erklären, warum die Leistung der 150-ms SI-Dauern in einer randomisierten wie geblockten Präsentation konstant gut bleibt, da die gebildete Langzeitrepräsentation in beiden Präsentationsformen genau der SI-Dauer entspricht, während die Leistung sich für die 50- und 250-ms SI-Sequenzen in einer geblockten Darbietung verbessert, da in diesem Fall nur in einer geblockten Präsentation die gebildete Langzeitrepräsentation der SI-Dauer entspricht. Die SI-Dauer-Repräsentation im Gedächtnis könnte zudem zwischen den Durchgängen an Exaktheit verlieren. Dies wird durch wechselnde SI-Dauern verstärkt. Ein System aus multiplen Oszillatoren (Berens & Pastore, 2005) hingegen kann die Effekte nur dann erklären, wenn es neben der Einzelrepräsentation verschiedener Dauern ebenfalls eine zusätzliche Langzeitrepräsentation als Mittelwert aller präsentierten Dauern annimmt, was jedoch keine sparsame Lösung darstellt.

## 3.2. Offene Fragen und Probleme

### 3.2.1. Extrem schlechte Wahrnehmungsleistung

Obwohl in allen Experimenten eine Verbesserung der Diskriminationsleistung durch die Präsentation mehrerer Standardintervalle zu beobachten war, muss man jedoch zur Kenntnis nehmen, dass die Ergebnisse der Sequenzaufgaben, die hier verwendet wurden, eine deutlich schlechtere Leistung zeigen, als die, die man aus Paarvergleichsaufgaben (Grondin, et al., 1998; Lapid, et al., 2008) kennt. Während im Paarvergleich bei akustischer Intervalldarbietung allgemein eine Webersche Konstante von .09 (Grondin, et al., 2001; Mattes & Ulrich, 1998) erreicht wird, liegt dieser Wert für die in den vorherigen Experimenten präsentierten Sequenzen bei z.T. 1.25 (50-ms SI-Sequenzen mit einem ISI von 50 ms an Position 1, Experiment 1) oder bestenfalls bei 0.12 (600-ms SI-Sequenz mit einem ISI von 600 ms an Position 4, Experiment 7). Zu beobachten war also eine relative Verbesserung der Leistung innerhalb der Sequenz. Die Leistung unterscheidet sich aber z.T. extrem von der Leistung aus den Paarvergleichen (Grondin, et al., 2001; Mattes & Ulrich, 1998). Diese Unterschiede sind bedeutsam und bedürfen einer Erklärung. Vor allem auch, weil in anderen Studien zur Rhythmusverarbeitung z.T. nochmals deutlich bessere Leistungen als im Paarvergleich zu beobachten sind. Friberg und Sundberg (1995) zeigen in ihrem Übersichtsartikel für eine ganze Reihe von Studien, dass sich bei Rhythmusexperimenten durchaus auch Webersche Konstanten von weniger als .06 (Hibi, 1983) bei einer sogenannten „lengthening“-Aufgabe, bei der ein Intervall einer sonst isochronen Sequenz verlängert wird und die somit den in dieser Arbeit verwendeten Aufgaben recht ähnlich ist, finden lassen. In tempo-change-tasks werden sogar Weberbrüche von .01 erreicht (Nordmark, 1986). Dementsprechend stellt sich die Frage, wodurch in den hier vorgestellten Experimenten so hohe Werte zustande gekommen sind und wodurch sich die Leistungsunterschiede zwischen dem hier verwendeten Sequenzparadigma und Paarvergleichsaufgaben bzw. Sequenzaufgaben früherer Studien erklären lassen.

Eine naheliegende Lösung wäre es, verschiedene Verarbeitungssysteme mit einer unterschiedlichen Genauigkeit anzunehmen. So wie es möglicherweise eine Uhr für das Millisekunden- und das Intervalltiming gibt (siehe Lewis & Miall, 2003a; Buhusi & Meck, 2005), so könnte es durchaus auch für Sequenz und Paarvergleichsaufgaben eigenständige Uhrmechanismen geben. Eine Eigenständigkeit der

Rhythmusaufgaben von Zeitdauerdiskriminations-Aufgaben wird z.B. von Fraise (1984), Michon und Jackson (1985) und auch Brandler (2002) diskutiert. Brandler (2002) verglich in ihrer Untersuchung die Leistung von verschiedenen Aufgaben, in denen Zeit verarbeitet werden musste (Paarvergleichsaufgaben mit leeren und gefüllten Intervallen im Sekunden und Millisekundenbereich, Reihenfolgeurteil, auditive Verschmelzungsfrequenz, Rhythmusaufgabe). Die Korrelation der Leistung der von ihr verwendeten Rhythmusaufgabe mit denen aus Paarvergleichsaufgaben war nur gering. Die gemeinsame Korrelation führte sie eher auf ein „allgemeines Fähigkeitspotential“ (Brandler, 2002, S. 134) zurück und wertete die geringe Korrelation als Hinweis auf zwei verschiedene Systeme. Die Annahme von zwei verschiedenen Mechanismen sollte jedoch erst dann gemacht werden, wenn sich die gefundenen Effekte nicht anders erklären lassen. Im Sinne der Sparsamkeit und Einfachheit von Modellannahmen ist grundsätzlich eher die Annahme eines Modells im Vergleich zu mehreren Modellen zu befürworten. Dementsprechend soll im Folgenden ein Versuch unternommen werden, die deutlichen Leistungsunterschiede zwischen dem in dieser Arbeit verwendeten Sequenzparadigma und den Paarvergleichs- und Sequenzaufgaben aus anderen Studien innerhalb eines Modells zu erklären. Dies macht insofern auch Sinn, da es deutliche Hinweise gibt, dass beide Aufgaben grundsätzliche Gemeinsamkeiten aufweisen, wie im Folgenden dargestellt werden soll.

Zunächst einmal sei hier die Gültigkeit des verallgemeinerten Weberschen Gesetzes zu nennen. Bei Paarvergleichsaufgaben wird zwar immer wieder die Gültigkeit des Weberschen Gesetzes für Dauern von mehr als ein bis zwei Sekunden kontrovers diskutiert (Bizo, et al., 2006; Getty, 1975; Hass, et al., 2008), jedoch erweist es sich für Zeitdauerbereiche unter einer Sekunde als ein zuverlässig replizierbares Wahrnehmungsphänomen (siehe Getty, 1975; Grondin, et al., 2001; Grondin, 2003). Die Wahrnehmungsleistung ist für sehr kurze Dauern reduziert, bleibt dann aber konstant, wenn man die Wahrnehmungsleistung (Variabilität der Urteile) an der Standarddauer relativiert. Ähnliches gilt auch für die Sequenzaufgaben (Friberg & Sundberg, 1995), in denen sich ebenfalls -wie bei den Paarvergleichsaufgaben- die Gültigkeit des Weberschen Gesetzes z.B. auch für visuelle Reizdarbietungen bestätigen lässt (Grondin, 2001b). Die Ergebnisse dieser Arbeit ergänzen die Befunde durch Sequenzaufgaben mit gefüllten Intervallen, da in allen Experimenten mit unterschiedlichen SI-Dauern das verallgemeinerte

Webersche Gesetz repliziert werden konnte. Dies gilt sowohl für die reduzierte Wahrnehmungsleistung sehr kurzer Intervalle (50 ms) als auch die konstante Diskriminationsleistung für Sequenzen mit SIs von 150-600 ms, die getestet wurden. Dementsprechend gilt für Paarvergleichsaufgaben wie auch für Sequenzaufgaben das verallgemeinerte Webersche Gesetz. Diese Gemeinsamkeit spricht für einen grundsätzlich ähnlichen Mechanismus. Allerdings gilt das Webersche Gesetz nicht nur im Bereich der Zeitwahrnehmung, sondern auch darüber hinaus. Wenn sowohl bei einer Gewichts-Diskriminations-Aufgabe (Rinkenauer, Mattes & Ulrich, 1999) oder vibro-taktile Amplituden-Diskrimination (Francisco, Tannan, Zhang, Holden & Thommerdal, 2008) sowie bei einer Zeitdauerdiskriminations-Aufgabe das Webersche Gesetz zu beobachten ist, muss dies noch nicht bedeuten, dass hier dasselbe System verantwortlich ist, d.h., obwohl eine grundsätzliche Übereinstimmung gewährleistet ist, muss dies nicht unbedingt auf dieselben Mechanismen zurückgeführt werden.

Neben dem Weberschen Gesetz kann als eine weitere Gemeinsamkeit angeführt werden, dass sich in beiden Paradigmen, sowohl im Sequenzparadigma als auch im Paarvergleich, ein Effekt der Position des VI bemerkbar macht. Neben den schon genannten Studien, die ein Sequenzparadigma verwenden (Barnes & Jones, 2000; Berens & Pastore, 2005; Drake & Botte, 1993; Ivry & Hazeltine, 1995; McAuley & Jones, 2003; McAuley & Kidd, 1998; Miller & McAuley, 2005; Pfeuty, et al., 2003; Rousseau & Rousseau, 1996; ten Hoopen & Akerboom, 1983), gibt es auch Studien, die bei Paarvergleichsaufgaben einen solchen Positionseffekt gefunden haben (Lapid, et al., 2008; Marchman, 1969; McGavren, 1965; Rammsayer & Wittkowski, 1990; Ulrich et al., 2006; Van Allen, Benton, & Gordon, 1966). Aber auch hier muss man erwähnen, dass es sich um keinen spezifischen Effekt der Zeitdauerverarbeitung handelt, sondern vielmehr um einen womöglich viel allgemeineren Effekt, da z.B. auch Nachmias (2006) Ähnliches für eine visuelle Vergleichsaufgabe findet, in der die Versuchspersonen die Größe zweier aufeinanderfolgender Objekte miteinander vergleichen mussten.

Ähnlichkeiten zwischen Paarvergleichsaufgaben und Sequenzaufgaben finden sich auch in Bezug auf Leistungsunterschiede zwischen einer visuellen und auditiven Reizdarbietung. Sowohl im Paarvergleich (siehe Grondin, et al., 1998; Grondin, et al., 2001; Grondin, 2005; Lapid, et al., 2008) als auch bei Sequenzaufgaben (siehe Friberg & Sundberg, 1995; Grondin, 2001b) findet man eine reduzierte

Wahrnehmungsleistung bei visueller Reizdarbietung verglichen mit einer auditiven Darbietung.

Auf der Suche nach Erklärungen für Leistungsunterschiede zwischen den Experimenten dieser Arbeit auf der einen Seite und der von Paarvergleichsaufgaben (Grondin, et al., 2001; Mattes & Ulrich, 1998) aber auch Sequenzaufgaben anderer Studien (Friberg & Sundberg, 1995) auf der anderen Seite lohnt es sich, auf Unterschiede zwischen den Paradigmen zu achten, bevor man getrennte Systeme als Erklärung für die Leistungsdifferenzen annimmt. Es kommen dabei eine ganze Reihe Aspekte zu Tage, die im Folgenden diskutiert werden.

### *3.2.1.1. Randomisierte vs. geblockte Darbietung von Standarddauern*

Die meisten bisherigen Studien im Rahmen von Sequenz- oder Paarvergleichsaufgaben (Friberg & Sundberg, 1995; Lapid, et al., 2008) verwendeten nur eine Standarddauer pro Block oder Experiment. Wie die Experimente (1 vs. 6 und 2 vs. 5) dieser Arbeit selbst zeigten, verbessert eine geblockte Darbietung die Wahrnehmungsleistung. Somit könnten Unterschiede zwischen den Präsentationsmodi für die großen Unterschiede zwischen bisherigen Studien und den Ergebnissen aus den ersten beiden Experimenten, in denen ein randomisiertes Design verwendet wurde, als Erklärung herangezogen werden. Aber das allgemeine Leistungsniveau aus den Experimenten 3-7, in denen ein geblockter Präsentationsmodus verwendet wurde, wie das bei Paarvergleichsaufgaben und anderen Sequenzparadigmen bisher üblich war, fällt immer noch deutlich schlechter aus als in vergleichbaren Sequenz- oder Paarvergleichsaufgaben. Der Darbietungsmodus kann somit nur begrenzt Leistungsunterschiede erklären, d.h. die Ergebnisse der ersten zwei Experimente dürfen nicht direkt mit der Leistung aus anderen Aufgaben, die eine geblockte Präsentation von Standarddauern verwenden, verglichen werden.

### *3.2.1.2. Anzahl an Vergleichsreizen/abweichenden Intervallen*

Viele der schon diskutierten Studien zum Thema Einfluss des Kontexts auf die Zeitwahrnehmung wurden mit einer Tempowechsel-Diskriminationsaufgabe durchgeführt (Drake & Botte, 1993; Grondin, 2001b; McAuley & Kidd, 1998; McAuley & Miller, 2007; Miller & McAuley, 2005). Neben der Manipulation der Anzahl an Standardintervallen in der ersten Sequenz wurde parallel dazu auch die Anzahl an Vergleichsintervallen in der zweiten Sequenz variiert. Die Chance, einen

Unterschied zwischen einem Standard- und einem Vergleichsreiz zu entdecken, verbessert sich somit. Miller und McAuley (2005) oder auch McAuley und Miller (2007) variierten die Anzahl der Vergleichsreize und der Standardreize unabhängig voneinander und konnten feststellen, dass es zu einer Erhöhung der Wahrnehmungsleistung allein durch eine Erhöhung der Anzahl an Vergleichsreizen bei einer fixen Anzahl an Standardintervallen kommen kann. Dementsprechend müssen sich die hier präsentierten Ergebnisse nicht direkt mit den Werten aus Experimenten, in denen mehr als ein Vergleichsintervall präsentiert wird, messen lassen. Dies sind neben der Tempowechsel-Diskriminationsaufgabe auch Aufgaben wie einer Einfach-Versatz-Diskriminationsaufgabe (displacement-task) oder einer Zyklischen-Versatz-Diskriminationsaufgabe (cyclic-displacement-task), in dem ebenfalls mehrere Intervalle einer Sequenz hinsichtlich ihrer Dauer verändert werden (siehe hierzu Friberg & Sundberg, 1995).

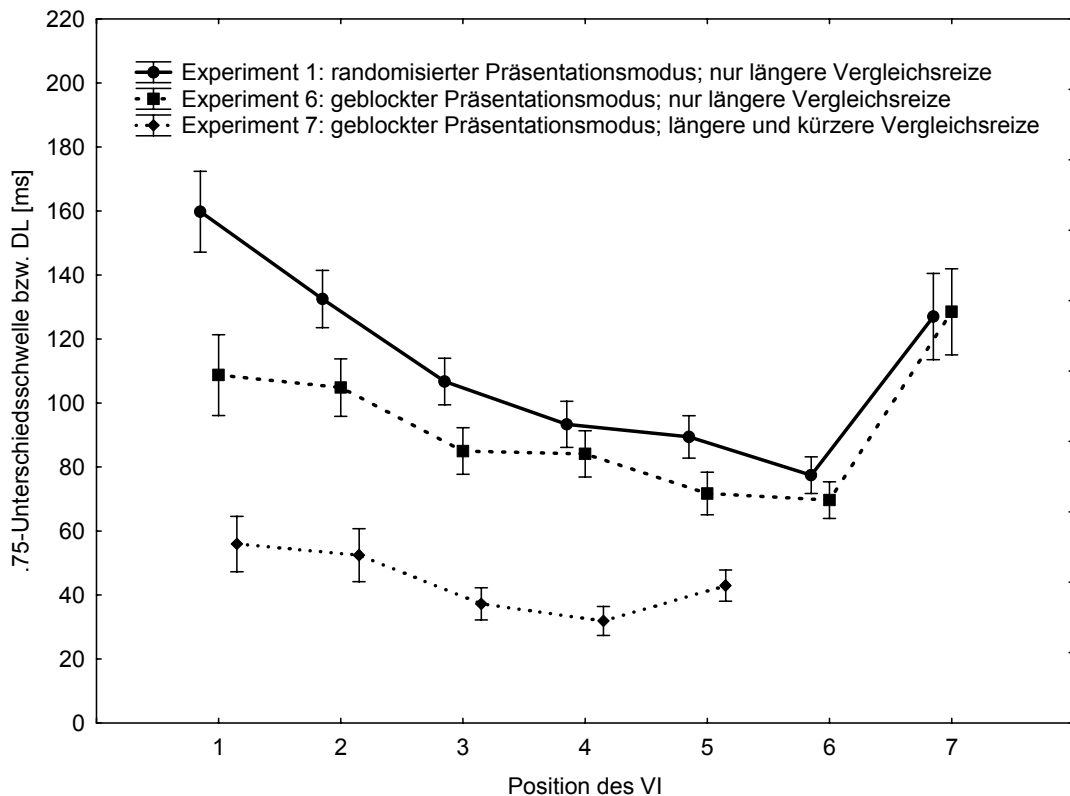
### *3.2.1.3. Verteilung der Vergleichsreize (Positionierung der VI relativ zur SI-Dauer, Spanne und Dichte der verwendeten Dauern)*

In den Experimenten 1-6 wurden immer nur längere Vergleichsreiz-Dauern getestet. In diesen Experimenten wurden schlechtere Diskriminationsleistungen gefunden als in Experiment 7, in dem sowohl längere als auch kürzere Vergleichsreize verwendet wurden. Vergleicht man die Ergebnisse für unterschiedliche Bedingungen, in denen 250-ms SI-Dauern getestet wurden (siehe Abbildung 24), so fällt auf, dass, neben einer Verbesserung durch den geblockten Präsentationsmodus, vor allem die gleichzeitige Verwendung längerer und kürzerer Vergleichsreize zu einer verbesserten Wahrnehmungsleistung führt. In Experiment 7 wurde ein Weberbruch von .13 an der vierten Position erzielt, während in Experiment 6 einen Weberbruch von .33 an der vierten Position ermittelt wurde. Damit wurde in Experiment 7 schon einmal eine deutliche Annäherung an Leistungswerte erreicht, wie man sie aus Paarvergleichsaufgaben kennt, die einen Weberbruch von .09 ermittelten. Dass die Verwendung von langen Vergleichsreizen auf der einen und langen und kurzen Vergleichsreizen auf der anderen Seite zu solch großen Unterschieden in der Wahrnehmungsleistung führt, verwundert etwas, wurde aber auch in anderen Studien bereits beobachtet. So stellen Grondin, et al. (2001) fest, dass es zu deutlichen Unterschieden bei der Verwendung von längeren oder kürzeren Vergleichsreizen kommt (bessere Diskriminationsleistung für kurze

Intervalle). Dies gilt sowohl für visuell als auch für auditiv dargebotene Reize. Lapid, et al. (2008) vermuteten, dass Leistungsunterschiede zwischen einer so genannten reminder-Aufgabe und der two-alternative forced-choice (2-AFC)-Prozedur durch die unterschiedliche Verwendung von Vergleichsreizen erklärbar sein könnten. Während bei der reminder-task längere und kürzere Vergleichsreize verwendet werden, so werden in der 2-AFC-Aufgabe nur längere Dauern verwendet. In der 2-AFC-Aufgabe waren die ermittelten Wahrnehmungsschwellen fast doppelt so hoch wie in dem reminder-task. Die in dieser Arbeit ermittelten Unterschiede zwischen Experimenten mit nur längeren (Experiment 1-6) und längeren und kürzeren Vergleichsreizen (Experiment 7) liegen damit in derselben Größenordnung wie die von Lapid, et al. (2008). Dementsprechend könnte der Range der Vergleichsreize eine Erklärung für die hohen Werte in einigen Aufgaben sein. Auch Jones und McAuley (2005) berichten, dass die Verteilung der in einem Block präsentierten Dauern einen Einfluss auf die Wahrnehmungsleistung ausübt. Während Jones und McAuley (2005) die Verteilung der Standarddauern innerhalb eines Blocks veränderten, indem sie z.B. die Anzahl der präsentierten Dauern (Dichte) oder und die Spanne der Dauern (Differenz zwischen der minimalen und maximalen Dauer) variierten, so könnte Ähnliches auch für Vergleichsreize gelten. So zeigten auch Ferrara, et al. (1997) oder auch Wearden und Grindrod (2003), dass, wenn die Auswahl an Vergleichsreizen, die in einem Experiment verwendet wird, groß ist, sich die Leistung im Vergleich zu einer Bedingung mit geringer Spanne und Dichte reduziert. Allerdings stellt sich in den hier präsentierten Experimenten ein gegenteiliger Effekt ein: Die größere Spanne an Vergleichsreizen (längere und kürzere Vergleichsreize) führt zu einer verbesserten Leistung gegenüber den Experimenten, in denen nur längere Dauern getestet wurden, also eine eingeschränktere Spanne an Vergleichsreizen genutzt wurde. Jones und McAuley (2005) hingegen hatten bessere Leistungen erzielt, wenn die Spanne der Standarddauern geringer war. Dies könnte dafür sprechen, dass nicht die Spanne oder Dichte allein entscheidend für die Wahrnehmungsleistung ist, sondern möglicherweise die Verteilung der Vergleichsreize um die Standarddauer. Sind die Vergleichsreize gleichmäßig um die zu testende Dauer verteilt, erhöht sich die Leistung. So konnte ja auch eine erstaunlich gute Leistung für die 150-ms SI-Sequenzen in einem randomisierten Darbietungsmodus beobachtet werden, während die Leistung von 50- und 250-ms SI-Sequenzen in einem randomisierten



Darbietungsmodus gegenüber einer geblockten Darbietung schlechter ausfiel (Experimente 1 vs. 6 und 2 vs. 5). Letztlich kann dieser Verteilungseffekt jedoch immer noch nicht vollständig die Differenz in den Leistungswerten von einem Weberbruch von .09 für Paarvergleichsaufgaben oder .06 in Sequenzaufgaben anderer Untersuchungen (Friberg & Sundberg, 1995) und dem Weberbruch von minimal .13 in den in dieser Arbeit präsentierten Sequenzen erklären, in denen wie in Paarvergleichsaufgaben längere und kürzere Vergleichsreize verwendet wurden.



**Abbildung 24:** .75.-Unterschiedsschwelle (Experimente 1 und 6) und DL (Experiment 7) und Standardfehler des Mittelwerts in Abhängigkeit von der Position des variablen Intervalls (VI), Präsentationsmodus (geblockt vs. randomisiert) und Range der Vergleichsreize (nur längere VIs oder längere und kürzere VIs) Sequenzen mit 250 ms Standardintervallen (SI) der Experimente 1, 6 und 7

### 3.2.1.4. Reizmaterial gefüllte vs. leere Intervalle

Im Gegensatz zu bisherigen Studien (Barnes & Jones, 2000; Friberg & Sundberg, 1995; Miller & McAuley, 2005), in denen ein Sequenzparadigma verwendet wurde, wurden in den Experimenten dieser Arbeit gefüllte Intervalle genutzt, während alle anderen Studien leere Intervalle als Stimulusmaterial verwendet hatten. Unterschiede

zwischen leeren und gefüllten Intervallen hinsichtlich ihrer Leistung sind in der Literatur bereits vielfach berichtet worden. Die Frage, ob gefüllte oder leere Intervalle leichter zu verarbeiten sind, ist jedoch auch durch die vielen Untersuchungen zu diesem Thema bis jetzt noch nicht vollständig geklärt worden. So finden viele Studien (beispielsweise Grondin, 1993; Grondin et al., 1998; Miki & Santi, 2005; Pfeuty, Ragot & Pouthas, 2008) eine verbesserte Wahrnehmungsleistung für leere Intervalle, während andere Studien (Abel, 1972a, 1972b; Rammsayer & Lima, 1991; Santi, Miki, Hornyak & Eidse, 2006) eine verbesserte Wahrnehmungsleistung für gefüllte Intervalle nachweisen konnten. Grondin (1993) verweist darauf, dass eine generelle Aussage schwierig ist. Offenbar hat die Art, mit der der Anfang und das Ende eines leeren Intervalls markiert werden, einen Einfluss auf die Leistung (Grondin, 1993; Rammsayer & Leutner, 1996). Auch scheint die Intervalldauer selbst eine wichtige Rolle zu spielen. Je länger die Standarddauer, desto geringer werden die Belege für eine bessere Leistung bei leeren gegenüber gefüllten Intervallen (Grondin, 1993). Grondin (1993) sieht dabei eine kritische Grenze bei 500-ms Standarddauern. Dementsprechend könnten vergleichsweise erhöhte Werte in dem in dieser Arbeit verwendeten Paradigma auch auf die Verwendung von relativ kurzen gefüllten Intervallen zurückzuführen sein, während die Sequenzstudien anderer Untersuchungen leere Intervalle nutzten.

### *3.2.1.5. Einfluss der ISI-Dauer auf die Wahrnehmungsleistung*

Durch die Verwendung von gefüllten Intervallen mussten gegenüber anderen Paradigmen (Barnes & Jones, 2000; Grondin, 2001b; Miller & McAuley, 2005) ISIs zur Separierung der einzelnen Intervalle, die aus weißem Rauschen bestanden, eingesetzt werden. Wie bereits dargestellt, sollten den Vorhersagen der Dynamic-Attending-Theorie zufolge die ISIs einen signifikanten Einfluss auf die Wahrnehmungsleistung ausüben, während ein Impulsgeber-Zähler-Modell davon ausgehen würde, dass die ISIs keine Rolle spielen und keinen Einfluss auf die Leistung haben sollten. Die Ergebnisse der hier präsentierten Experimente haben dieses Muster im Wesentlichen bestätigen können, jedoch gab es einzelne Abweichungen. So wurde beim Vergleich der 50-ms Intervallsequenzen von Experiment 1 (ISI = 50 ms) und 6 (ISI = 125 ms) ein signifikanter Unterschied in der Diskriminationsleistung gefunden. Die Leistung der 50-ms SI-Sequenzen bei 50-ms ISIs war gegenüber der Bedingung mit 125-ms ISIs signifikant reduziert. Für den

Vergleich der 250-ms SI-Sequenzen in Experiment 7 konnte ein statistischer Trend nachgewiesen werden, wonach die 250-ms SI-Sequenz mit 600-ms ISIs schlechter diskriminierbar ist als mit 250-ms ISIs. Eine signifikante Interaktion von SI-Dauer, Position des VI und ISI-Dauer wurde ebenfalls beobachtet, wenn als die Ergebnisse der Experimente 1 mit 2 bzw. Experimente 5 und 6 miteinander verglichen wurden. Auch wenn dies nur vereinzelte Befunde sind und z.T. der Dynamic-Attending-Theorie mehr widersprechen als sie zu unterstützen (bessere Leistung für 50-ms SI-Sequenzen bei 125-ms anstatt bei 50-ms ISIs), so sind sie auch nicht mit den bisherigen Überlegungen zum klassischen Impulsgeber-Zähler-Mechanismus vereinbar, welcher dem Multiple-Look-Modell in dieser Arbeit als Enkodierungsmechanismus zugrunde gelegt wurde. Die zentrale Annahme des Modells ist, dass das ISI keinen Einfluss auf die Leistung hat, weil der Zähler mit dem Beginn eines Intervalls anfängt, Impulse zu zählen und mit dem Ende des Intervalls aufhört. Während der Zeit zwischen zwei Intervallen sollte er inaktiv sein und diese Dauer ausblenden können, da sie nicht von Belang ist. Es könnte allerdings sein, dass die leeren ISI-Intervalle ebenfalls enkodiert und abgespeichert werden und somit einen Einfluss auf die Wahrnehmung der gefüllten Dauern ausüben. Dementsprechend wäre aber im Modell die Annahme einer unabhängigen Enkodierung von Intervallen auf dieser Stufe hinfällig. Möglicherweise stellt das ISI auf Ebene der zeitlichen Enkodierung auch kein Problem dar, sondern wirkt erst auf spätere Verarbeitungsprozesse. Und dies auch nicht direkt, indem die Dauer des ISI die Repräsentation der gefüllten Intervalle beeinflusst, sondern eher indirekt: Die ISIs könnten ein kritisches Moment für die Verarbeitungsgeschwindigkeit der gefüllten Intervalle darstellen.

Geht man davon aus, dass die Verarbeitung von Informationen Zeit benötigt und die Verarbeitungsschritte in Serie und nicht parallel erfolgen können, so könnten theoretisch kurze ISIs zu einem Flaschenhalseffekt im verarbeitenden System führen. So wie im Paradigma der psychologischen Refraktärperiode (psychological-refractory-period/PRP, Kahnemann, 1973; Pashler & Johnston, 1989; Ulrich & Miller, 2008) zwei Stimuli in kurzem Zeitabstand nacheinander präsentiert werden und die Zeit zwischen den zwei Stimuli (Stimulus-Onset-Asynchronie/SOA) als Erklärung für Reaktionszeiteinbußen bei sehr kurzen SOAs genutzt wird, so könnte Ähnliches auch für die Zeitwahrnehmung gelten. Schaut man sich die graphische Darstellung von Impulsgeber-Zähler-Modellen an (z.B. Grondin, 2001a, McAuley &

Jones, 2003; Wearden, 2004), so fällt auf, dass das Modell (siehe auch Abbildung 1) immer als ein seriell Arbeitendes gezeichnet wird. Impulse fließen vom Impulsgeber zum Zähler und von dort in das Gedächtnis, das oft als Arbeitsgedächtnis (working memory oder short-term memory) bezeichnet wird. Die Informationen fließen vom Arbeitsgedächtnis aus weiter in ein weiteres Gedächtnissystem, das als Referenz- oder Langzeitgedächtnis (reference memory oder long-term memory) bezeichnet wird. Im Folgenden wird dann auf einer Entscheidungsebene der Inhalt des Arbeitsgedächtnisses und des Langzeitgedächtnisses miteinander verglichen und eine Antwort vorbereitet. Wenn nun die Entscheidungsfindung nicht innerhalb sehr kurzer Zeit, z.B. 1 ms erfolgt, sondern mehr Zeit (z.B. 100 ms) benötigt, neue Informationen aber schnell nachströmen, da die verwendeten ISIs kurz sind, so kann es zu einer Überlastung des Systems kommen. Wird eine Sequenz online verarbeitet, so wie das der Vergleich aus den Experimenten 1-4 mit unterschiedlichen SI-Dauern und einer unterschiedlichen Anzahl an Intervallen nahe legte, dann muss der Vergleich von Intervallen sehr rasch erfolgen, um auch die nachdrängenden Intervalle zumindest noch grob miteinander vergleichen zu können. Leistungseinbußen würden dementsprechend für sehr kurze ISIs zu erwarten sein. Dergleichen lässt sich auch in Paarvergleichsaufgaben wie in Sequenzaufgaben zeigen. So variierten Hellström und Rammsayer (2004) systematisch das ISI zwischen zwei Intervallen. Es zeigte sich, dass unter der Verwendung von 50-ms Standardintervallen und 100-ms ISIs ein Weberbruch von .37 erreicht wurde. Bei 1000-ms Standardintervallen fielen auch bei kurzen ISIs die Werte geringer aus. Geht man davon aus, dass das SOA wie beim PRP-Paradigma von entscheidender Bedeutung ist und nicht das ISI, dann könnten die Ergebnisse von Hellström und Rammsayer (2004) als ein Hinweis auf einen möglichen Flaschenhals gewertet werden.

Neben der Theorie der psychologischen Refraktärperiode werden unabhängig davon auch von Seiten der Computational-Neuroscience Forschung eine Verarbeitungsgeschwindigkeits-Limitation diskutiert. Karmarkar und Buonomano (2007) nennen als eine zeitlich kritische Dauer 250 ms, die ihr zustandsabhängiges neuronales Netzwerk (state-dependent neuronal network) benötigt, um nach einer Aktivierung durch ein Intervall in seinen Ausgangszustand zurückzukehren. Hat sich die Aktivität im Netzwerk vor dem Eintreffen des nächsten Intervalls nicht gelegt, so beeinflusst diese Restaktivität die Enkodierung des folgenden Intervalls negativ. Karmarkar und Buonomano (2007) argumentierten dementsprechend ähnlich wie

Fechner (1860, 1882) bei seiner Erklärung für den positiven Zeitfehler, der von Nacheffekten sprach, die die Dauer nachfolgender Intervalle beeinflussen. Geht man davon aus, dass es sich nicht nur um eine Restaktivität handelt, so könnte man den Effekt auch im Sinne einer Maske interpretieren. Bei sehr kurzen SI-Dauern von 50 ms und ISIs von 50 ms jagt ein Intervall das nächste. Ähnlich wie bei der Verwendung einer Maske im visuellen System könnte in einem Paradigma wie in den in dieser Arbeit präsentierten Experimenten das folgende Intervall auch wie eine Maske die Dauer zuvor präsentierter Intervalle überschreiben und so maskieren. Eine Leistungsreduktion wäre somit ebenfalls zu erwarten.

Von einer kritischen ISI-Dauer von 200 ms als minimale zeitliche Grenze für eine ungestörte Verarbeitung zeitlicher Informationen gingen auch schon Small und Campbell (1962) und Carbotte (1973) aus. Auch für die Verarbeitung von Tonhöhen nennen Massaro und Loftus (1996) ein Minimum von 250 ms Dauer zwischen zwei Tönen, damit es zu keiner Beeinträchtigung in der Diskriminationsleistung kommt. Massaro und Loftus (1996) gehen dabei von einem Prä-Perzeptuellen Gedächtnis (preperceptual-memory-storage-System/PPAS) aus. Töne werden in diesem Gedächtnis gespeichert und können miteinander verglichen werden. Der Abschluss dieses Vergleichsprozesses ist etwa nach 250 ms erreicht. Trifft ein neuer Ton früher ein, so überschreibt er den noch nicht vollständig analysierten Ton im Gedächtnis, was zu einer reduzierten Wahrnehmungsleistung führt. Grondin (2001b) findet bei seinen Sequenzen, bestehend aus leeren Intervallen mit einer Standarddauer von 150 ms, ebenfalls verhältnismäßig hohe Weberbrüche (bis zu Werten von .37) und argumentiert: "efficiency in processing the sensory signals themselves is time related, with not having enough time decreasing efficiency" (Grondin, 2001b, S. 1226).

Ebenfalls auf eine zu geringe Zeit zur Verarbeitung von Intervalldauern wird der Effekt des Time-Shrinkings zurückgeführt (Nakajima, ten Hoopen, Hilkuysen & Sasaki, 1992; Nakajima, ten Hoopen & van der Wilk, 1991; Sasaki, Nakajima & ten Hoopen, 2002; ten Hoopen & al., 1995). Werden zwei leere Intervalle unmittelbar hintereinander präsentiert und beträgt die Dauer des ersten weniger als 200 ms und ist kürzer als die Dauer des zweiten Intervalls, so verkürzt sich die wahrgenommene Dauer des zweiten Intervalls. Nakajima, ten Hoopen, Sasaki, Yamamoto, Kadota, Simons und Suetomi (2004) erklären dies dadurch, dass durch die Verarbeitung der ersten Reizdauer, die parallel zur Enkodierung des zweiten Intervalls verlaufen muss,

diese Enkodierung beeinträchtigt ist und es zu einer Verkürzung der Wahrnehmung dieses Intervalls kommt. Die Autoren ermittelten allerdings nur eine Verarbeitungszeit von ungefähr 80 ms. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass allgemein eine schnelle Abfolge von Reizen zu deutlichen Leistungseinbußen führen kann und es durchaus Sinn macht, Überlegungen zur psychologischen oder neuronalen Refraktärperiode auf die Zeitwahrnehmung zu übertragen. Das Impulsgeber-Zähler-Modell ist seriell aufgebaut und muss nicht weiter modifiziert werden, um Effekte einer schnellen seriellen Reizdarbietung erklären zu können. Untersuchungen aus dem Bereich von PRP-Paradigmen zur SOA oder auch Maskierungseffekte kommen neben neuronalen Refraktärperioden als Erklärung für die hohen Werte in den Sequenzen mit einer schnellen Reizdarbietung in Betracht. Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich allerdings leider nicht direkt nutzen, um diese These der Verarbeitungszeit zu überprüfen, da die SOA-Dauern nicht systematisch genug variiert wurden. Die Verwendung verschiedener SI-Dauern und Anpassung der SIs an diese Dauer, wie in den Experimenten 1 und 6, führt zu einer Konfundierung zwischen SI-Dauer und ISI-Dauer. Um die These der Verarbeitungszeit prüfen zu können, wäre es günstiger gewesen, die SI-Dauer konstant zu halten und die ISI-Dauern systematisch zu variieren. Die Fragestellung dieser Arbeit war jedoch eine andere und verlangte die vorgenommene ISI-Manipulation. Vor allem wurden auch zu wenige Messungen im kritischen Bereich von 250-ms SOAs und darunter verwendet. Lediglich die 50-ms SI-Sequenzen könnten mit ISIs von 50 und 125 ms eine zu schnelle Abfolge von Intervallen evozieren und dementsprechend eine Leistungsverschlechterung erfahren haben. Die 150 ms Intervalle mit ISIs von 125 und 150 ms liegen bereits über der kritischen SOA-Grenze von 250 ms, wie sie im Rahmen des PPAS von Massaro und Loftus (1996) oder dem zustandsabhängigen neuronalen-Netzwerk von Karmakrar und Buonomano (2007) diskutiert wurde. Aus diesen Gründen können die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse keinen eindeutigen Befund zur These der „benötigten Zeit für die Verarbeitung von Zeitdauern“ liefern. Die schlechtere Leistung der 50-ms SI-Sequenzen mit ISIs von 50 ms im Vergleich zu ISI von 125 ms Dauer kann als ein Hinweis auf die These zur Verarbeitungszeit angesehen werden. Das in dieser Arbeit verwendete Paradigma lässt sich in jedem Fall sehr gut dazu benutzen, den Effekt der Verarbeitungszeit gezielter zu prüfen.

### 3.2.1.6. Einfluss der Aufmerksamkeit

Wenn es um die Erforschung der Wahrnehmung geht, dann spielt in den meisten Aufgaben Aufmerksamkeit eine große Rolle. Wird Aufmerksamkeit auf etwas gelenkt, so hat dies im Allgemeinen zur Folge, dass sich die Wahrnehmungsleistung verbessert (Downing, 1988; Hawkins, et al., 1990; Kinchla, 1980; Shaw, 1984; Shiu & Pashler, 1994). Je besser diese Lenkung der Aufmerksamkeit funktioniert (z.B. durch einen Hinweis-Reiz auf eine bestimmte Stelle auf einem Bildschirm), desto besser wird die Erkennungsleistung des dort erscheinenden Objektes (Hoffman, 1975; Posner, 1980). Ein ähnlicher Effekt räumlicher Aufmerksamkeitslenkung könnte auch in der Zeit stattfinden. Lapid, et al. (2008) randomisierten in ihrem vierten Experiment die Dauer der ISIs und verglichen die Leistung in dieser Paarvergleichsaufgabe mit einer Bedingung, in der die ISI-Dauer konstant 500 ms betrug. Sie stellten fest, dass die Leistung in einer randomisierten Bedingung schlechter ist als in einer, in der die ISI-Dauer konstant 500 ms betrug. Sie erklärten diesen Leistungsabfall im Rahmen des Impulsgeber-Zähler-Modells durch Effekte zeitlicher Unsicherheit. Die Versuchspersonen können sich bei wechselnden ISI-Dauern weniger gut vorbereiten und ihre Aufmerksamkeit dementsprechend nicht so gut in der Zeit auf den Zeitpunkt lenken, zu dem der zu diskriminierende Reiz erscheinen wird. So kommt es zu einer reduzierten Wahrnehmungsleistung im Vergleich zu einer Darbietung, in der die ISI-Dauer konstant ist. Ähnliche Beobachtungen machten Grondin und Rammsayer (1993), Rolke und Hofmann (2007) oder aber auch Bausenhardt, et al. (2007). Sie zeigten, dass die Leistung von der gewählten Vorperiodendauer abhängig ist. Eine Vorbereitung auf einen Stimulus funktioniert besser mit kurzen als mit langen Vorperiodendauern. Dabei scheint auch hier der Präsentationsmodus (geblockte oder randomisierte Präsentation) einen Einfluss darauf zu haben, inwieweit man sich auf den Start eines Intervalls vorbereiten kann (Grondin & Rammsayer, 2003). Bei einer variablen Vorperiodendauer (wenn für die Versuchsperson unklar ist, wann genau ein Reiz präsentiert wird) kann Aufmerksamkeit nicht auf den Zeitpunkt gelenkt werden, an dem der Reiz erscheinen wird. Ähnlich wie bei der Lenkung der Aufmerksamkeit im Raum (z.B. Bressler, Tang, Sylvester, Corbetta & Shulman, 2008; Posner, Snyder & Davidson, 1980) scheint Aufmerksamkeit somit auch in der Zeit gelenkt werden zu können. Bei einer konstanten Vorperiodendauer oder einem konstanten ISI kann die Versuchsperson lernen, wann der Reiz, auf den sie achten muss, präsentiert wird. Sie

ist dementsprechend auf sein Auftreten vorbereitet und kann daher den Reiz auch besser verarbeiten. Im Rahmen des Impulsgeber-Zähler-Modells könnte es so zu einer Verbesserung der Erfassung des Onsets der Intervalle kommen. Eine mangelhafte Aufmerksamkeitslenkung könnte auch in den Experimenten dieser Arbeit eine Rolle gespielt haben. Zwar wurde in jedem Durchgang eine konstante ISI-Dauer verwendet, doch die Versuchspersonen wussten nicht, wann das abweichende Intervall auftreten würde. Im Gegensatz zu bisherigen Studien (Barnes & Jones, 2000; Berens & Pastore, 2005; Friberg & Sundberg, 1995) wurde in allen Experimenten dieser Arbeit die Leistung in Abhängigkeit von allen möglichen Positionen einer Sequenz getestet. Durch die Randomisierung der Position des VI wussten die Versuchspersonen nie, wann das abweichende Intervall präsentiert werden würde. Dies unterscheidet sich deutlich von bisherigen Untersuchungen (Barnes & Jones, 2000; Berens & Pastore, 2005; Friberg & Sundberg, 1995), bei denen nicht für jede Position innerhalb der Sequenz die Wahrnehmungsleistung bestimmt wurde, sondern immer nur ein Intervall innerhalb der Sequenz verändert wurde. In einem Verlängerungs-Diskriminationsaufgabe, in dem nur ein Intervall verändert wird, kann die Versuchsperson nach ein paar Durchgängen herausbekommen, dass z.B. immer das fünfte Intervall verändert wird, wenn sie nicht schon im Voraus explizit instruiert wurde, auf bestimmte Intervalle zu achten (Barnes & Jones, 2000). Diese Information kann die Versuchsperson nutzen, um ihre Aufmerksamkeit besonders auf dieses eine Intervall zu richten. In Aufgaben wie dem Tempowechsel-Diskriminationsaufgabe (Miller & McAuley, 2005) oder der Paarvergleichsaufgabe (Lapid, et al., 2008) ist klar, dass eine von den zwei Sequenzen oder eines der beiden Intervalle abweichen wird. Die Aufmerksamkeitsfokussierung kann dementsprechend möglicherweise auch ohne konkretes Vorwissen bei einer geringen Anzahl an möglichen Positionen für Abweichungen besser erfolgen, als wenn, wie in dem in dieser Arbeit verwendeten Paradigma, durch verschiedene Möglichkeiten der Positionierung des VI die Unsicherheit so groß ist, dass keine maximale Aufrechterhaltung der Aufmerksamkeit über die gesamte Sequenz möglich ist. Die Unsicherheit, wann das variable Intervall kommen wird, ist demnach ungleich höher in dem Paradigma dieser Arbeit im Vergleich zu den bisherigen Untersuchungsmethoden (Barnes & Jones, 2000; Lapid, et al., 2008; Miller & McAuley, 2005). Wenn in dieser Arbeit also erhöhte Wahrnehmungsschwellen gefunden werden, so könnte dies daran liegen,



dass die Versuchspersonen in dem hier verwendeten Paradigma ihre Aufmerksamkeit weniger gut auf das kritische Intervall lenken können. Wenn Aufmerksamkeitslenkung im Raum die Wahrnehmungsleistung verbessern kann, wie im Cueing-Paradigma (Bressler, et al., 2008; Posner, et al., 1980) und Ähnliches nicht nur im Raum, sondern auch in der Zeit gilt (Bausenhart et al., 2007; Rolke & Hoffmann, 2007), dann wird erklärbar, warum in den vorherigen sieben Experimenten Weberbrüche von bis zu 1.25 gemessen wurden, während in der Regel Weberbrüche von ca. .06 (siehe Friberg & Sundberg, 1995) in sonst vergleichbaren Verlängerungs-Diskriminationsaufgabe erreicht werden. Blaschke, Ritzkowski und Stahl (in Vorbereitung) verwendeten dieselbe Aufgabe wie in Experiment 7, informierten darüber hinaus aber die Versuchspersonen visuell darüber, welches Intervall der Sequenz im aktuellen Durchgang abweichen wird. Auf dem Bildschirm erschienen zu Beginn eines jeden Durchgangs in der Horizontalen gleichmäßig verteilt fünf leere Rechtecke. Vier von diesen, die für Intervalle mit derselben Dauer standen, wiesen einen grünen Linienzug auf. Die Position des abweichenden Intervalls wurde durch ein rotes Rechteck angezeigt. Die Wahrnehmungsleistung der Versuchspersonen betrug in diesem Paradigma bei Sequenzen von 250-ms SI-Dauer und einem ISI von 250 ms anstelle des in Experiment 7 gemessenen Weberbruches von .13 nur noch .05. Dementsprechend lassen sich die erstaunlich hohen Unterschiedsschwellenwerte sehr gut durch einen Effekt der Aufmerksamkeitslenkung in der Zeit erklären. Während in den hier präsentierten Experimenten Aufmerksamkeit nicht direkt auf das abweichende Intervall gelenkt werden konnte, ließ sich durch die visuelle Information im Paradigma von Blaschke et al. (in Vorbereitung) Aufmerksamkeit direkt auf das abweichende Intervall lenken und sich dadurch vermutlich die Diskriminationsleistung deutlich verbessern.

Der Effekt zeitlicher Aufmerksamkeitslenkung könnte auch die Befunde von McAuley und Kidd (1998) erklären. Diese hatten die ZS-Dauer manipuliert und fanden keinen Effekt auf die Urteilsvariabilität, wenn die ZS-Dauer innerhalb eines Blocks konstant war. Egal, ob das ZS von der Dauer der Standardintervalle abwich oder dem Doppelten der Dauer entsprach: Die Urteilsvariabilität blieb konstant. Dies widerspricht der Dynamic-Attending-Theorie, kann aber gut durch eine flexible Lenkung der Aufmerksamkeit erklärt werden. Wichtig ist nicht, wie lang das ZS war, sondern ob sein Ende vorhersehbar ist. Randomisierten McAuley und Kidd (1998) in einem weiteren Experiment die ZS-Dauer, so fanden sie Unterschiede in der

Urteilsvariabilität für ZS-Dauern, die kürzer als das Doppelte der Standarddauern war. Für längere ZS-Dauern verschwand der Effekt. Geht man davon aus, dass sich die Versuchspersonen bei einer randomisierten Darbietung der ZS-Dauern auf den Mittelwert aller ZS-Dauern einstellen, so wie dies bei der randomisierten Präsentation der SI-Dauern in den präsentierten Experimenten dieser Arbeit der Fall gewesen zu sein scheint, und Aufmerksamkeit auch noch nach der einmaligen Lenkung eine gewisse Zeit erhalten werden kann, dann lassen sich die Unterschiede erklären: Aufmerksamkeit wird in der Zeit auf den mittleren Wert aller ZS-Dauern gelenkt und bleibt dann auf einem hohen Niveau. Beginnt die zweite Sequenz früher als der Mittelwert der ZS-Dauern, kann die Aufmerksamkeit noch nicht auf diesen Onset wirken. Erst für Intervalle nach der mittleren ZS-Dauer wirkt sie und die Urteilsvariabilität wird geringer. Dementsprechend muss man den Effekt des ZS auf die Wahrnehmungsleistung nicht unbedingt als einen Hinweis auf einen oszillatorischen Mechanismus ansehen, sondern kann die Befunde auch durch Lenkung der Aufmerksamkeit in der Zeit in einem globaleren Sinn erklären.

### **3.2.2. Endeffekt**

In den Experimenten 1-6 wurde in allen Bedingungen ein deutlich ausgeprägter Endeffekt beobachtet, d.h. die Leistung an der jeweils letzten Position war gegenüber der vorletzten Position deutlich verschlechtert. Dieser Endeffekt erwies sich als unabhängig von der Anzahl der Intervalle, die in der Sequenz verwendet wurden (Experiment 3 und 4), und auch als unabhängig davon, ob eine gerade oder ungerade Anzahl an Intervallen Verwendung fand (Experiment 4). Wie bereits ausgeführt können sowohl Gedächtniseffekte als auch der Effekt paarweiser Vergleiche als Ursache für diesen Effekt ausgeschlossen werden. In Experiment 7 konnte beobachtet werden, dass vor allem unter der Verwendung von ISI-Dauern von 600 ms der Endeffekt verschwindet und keinerlei Leistungsverschlechterung für die letzte Position auftrat. Im Folgenden soll versucht werden, die Bedeutung der ISIs auch in Bezug auf den Endeffekt weiter zu erklären.

Bei sehr schnellem Tempo bzw. kurzen ISIs, mit dem die Intervalle präsentiert werden, ist es kaum möglich mitzuzählen, wie viele Intervalle bereits präsentiert wurden. Man muss sich auf die einzelnen Töne konzentrieren und hat keine Ressourcen mehr frei, um auf etwas Anderes zu achten. Wird die Sequenz wie in Experiment 7 mit ISIs von 600 ms Dauer langsam präsentiert, kommt das Ende der

Sequenz etwas weniger überraschend, da man eher mitverfolgen kann, wie viele Intervalle bereits präsentiert wurden. Ein eher plötzlicher Abbruch bleibt damit aus und es entsteht kein Endeffekt mehr. Eine solche Sichtweise wird auch durch die Studie von Blaschke, et al. (in Vorbereitung) unterstützt. Denn auch bei ihnen findet sich kein Endeffekt mehr in den Daten und das, obwohl sie 250-ms SI-Dauern und 250-ms ISIs verwendeten, die in den Experimenten 1-2, 5-6 und 7 dieser Arbeit noch zu einem Endeffekt führten. Den Versuchspersonen wurde nicht nur angezeigt, welches Intervall abweichen wird, sondern auch bereits präsentierte Intervalle wurden auf dem Bildschirm markiert. Die leeren Rechtecke wurden gefüllt, sobald das entsprechende Intervall erklang. Diese Information wurde nicht für das abweichende und die darauf folgenden Intervalle gegeben, half aber vermutlich dennoch den Versuchspersonen, sich innerhalb der auch mit erhöhtem Tempo präsentierten Sequenz zu orientieren. Dementsprechend kommt für sie das Ende der Sequenz durch die visuelle Information auf dem Bildschirm nicht so überraschend. Das Ausbleiben eines Endeffekts ist damit erklärlich.

### **3.2.3. „Paarvergleichsaufgabe“ in Experiment 4 nicht vergleichbar mit klassischer Paarvergleichsaufgabe?**

Fraisse (1984), Michon und Jackson (1985), sowie Brandler (2002) gehen von unterschiedlichen Mechanismen für die Wahrnehmung von Intervall-Paaren auf der einen Seite und einer Reihe von Intervallen in Sequenzen auf der anderen Seite aus. So verweist z.B. Brandler (2002) in ihrer Untersuchung auf die nur geringe Korrelation hinsichtlich der Wahrnehmungsleistung zwischen beiden Aufgabentypen. Auffällig an dem Experiment 4 in dieser Arbeit war u.a., dass sich die Sequenz aus zwei Intervallen hinsichtlich ihrer Leistung deutlich von einer klassischen Paarvergleichsaufgabe (Grondin, et al., 1998; Lapid, et al, 2008) unterschieden hat. Zwar wurden wie bei einer klassischen Paarvergleichsaufgabe nur zwei Intervalle präsentiert, aber die Leistung fiel in Experiment 4 sehr schlechter aus. So wurde für die erste Position ein „Weberbruch“ (.75-Unterschiedsschwelle/SI-Dauer) von .50 und die zweite Position ein Wert von .77 ermittelt, während in einer klassischen Paarvergleichsaufgabe (Getty, 1975; Grondin, et al., 1998; Mattes & Ulrich, 1998) Weberbrüche von .09 zu beobachten sind. Selbst unter Berücksichtigung von Effekten der Verteilung der Vergleichsreize und kurzer ISI-Dauern ist die Leistung in dem in dieser Arbeit präsentierten Experiment 7, bei dem

solche Effekte berücksichtigt wurden, noch deutlich zu schlecht, um mit einer Paarvergleichsaufgabe mithalten zu können. Zudem war in Experiment 4 festzustellen gewesen, dass die Leistung an der zweiten Position im Vergleich zur ersten Position reduziert ist, während Lapid, et al. (2008) genau den gegenteiligen Effekt fanden. Wieso also wurde auch bei einer Präsentation von nur zwei Intervallen eine so schlechte Leistung und ein Endeffekt wie in den anderen Sequenzaufgaben dieser Arbeit gefunden? Es ist offenbar nicht allein die Anzahl an Intervallen, die die Wahrnehmungsleistung bestimmt, sondern es muss weitere Faktoren geben, die diese beeinflussen. Im Gegensatz zu der klassischen Paarvergleichsaufgabe wurde die in Experiment 4 verwendete „Paarvergleichsaufgabe“ im Wechsel mit anderen Sequenzen, in denen mehrere Intervalle präsentiert werden, dargeboten. Bei der klassischen Paarvergleichsaufgabe hingegen werden den Versuchspersonen immer nur zwei Intervalle dargeboten. Die Versuchspersonen der Experimente 3 und 4 dieser Arbeit wussten zu Anfang eines Durchgangs nicht, wie viele Intervalle in der kommenden Sequenz präsentiert würden, hingegen können sich Versuchspersonen bei der klassischen Paarvergleichsaufgabe (Getty, 1975; Grondin, et al., 1998; Lapid, et al., 2008) darauf einstellen, dass sie immer nur zwei Intervalle präsentiert bekommen. Da in Experiment 4 die ISIs mit 125 ms recht kurz sind, ist es für die Versuchspersonen erforderlich, dass sie sich darauf einstellen, die eingehenden Informationen sehr schnell zu verarbeiten, um im System sozusagen wieder schnell Platz für die Verarbeitung weiterer Intervalle zu machen. Dieser Druck, der von einer Serie von Intervallen ausgelöst wird, trifft wahrscheinlich auch auf die Sequenz aus nur zwei Intervallen zu und könnte so zu einer verschlechterten Gesamtleistung und auch zu dem Endeffekt führen, der bei der klassischen Paarvergleichsaufgabe nicht zu beobachten ist; denn das Ende der „Sequenz“ nach zwei Intervallen kommt für die Versuchspersonen in Experiment 4 überraschend, während dies für Versuchspersonen in der klassischen Paarvergleichsaufgabe nicht zutrifft. Wäre das Gedächtnis in der Lage, einmal eine Reihe von Intervallen aufzunehmen, um sie dann nachträglich zu verarbeiten, dann sollte die Geschwindigkeit der Präsentation nicht ganz so wichtig sein. Am Ende einer Sequenz könnten die Intervalle in Ruhe verglichen werden. Dass aber die Verarbeitung der Intervalle nicht offline sondern online erfolgt, legen die Ergebnisse der ersten vier Experimente nahe. Die Intervalle einer Sequenz werden vermutlich direkt miteinander verglichen und nicht erst länger gespeichert, um dann miteinander verglichen zu werden. Die Befunde von Wearden

(1993) deuten dies ebenfalls an. Er präsentierte seinen Versuchspersonen zwei oder drei Intervalle nacheinander, die sich in ihrer Dauer unterschieden (ca. 100 ms). Fünf Sekunden später präsentierte er eines dieser Intervalle erneut und die Versuchsperson sollte angeben, an welcher Position sich dieser Ton befand. Die Leistung der Versuchspersonen in dieser Aufgabe befand sich nahezu auf Zufallsniveau und Wearden kommentierte diesen Befund als Hinweis auf die offenbar stark beschränkten Möglichkeiten, mehrere Dauern gleichzeitig speichern zu können „the storage of short tones seems much more limited, possibly to as few as 2 items“ (Wearden, 1993, S. 250). Ähnlich argumentieren auch Yabe, et al. (2001) innerhalb ihres Gedächtnis-Entscheidungs-Modells, um Nichtlinearitäten in der Entdeckungsleistung zu erklären. Wenn also auch die Speicherung von mehr als zwei Intervallen bereits so schwierig ist, dann ist es wahrscheinlich, dass sich bei einem zeitlichen Verarbeitungsdruck, wie ihn eine Sequenz von Intervallen mit kurzen ISIs auslösen kann, die Verarbeitungsqualität von auch nur zwei Intervallen im Vergleich zu einer Aufgabe, bei der dieser Druck nicht besteht, deutlich unterscheiden muss.

Allein die hohen Werte der Experimente dieser Arbeit gegenüber den niedrigeren Werten aus dem klassischen Paarvergleich als Hinweis auf unterschiedliche Zeitverarbeitungsmechanismen zu interpretieren, ist zudem nicht schlüssig, da auch Untersuchungen anderer Autoren (siehe hierzu Friberg & Sundberg, 1995) sehr viel geringere Werte für ihre Sequenzaufgaben im Vergleich zu der klassischen Paarvergleichsaufgaben zeigen. Dementsprechend müssten drei unterschiedliche Zeitverarbeitungssysteme angenommen werden: eins für die Verarbeitung der Intervalle der in dieser Arbeit verwendeten Sequenzen, eins für die klassischen Paarvergleichsaufgaben (Grondin, et al., 1998; Lapid, et al., 2008) und ein weiteres zur Erklärung der besonders guten Werte in den Studien anderer Autoren (siehe hierzu Friberg & Sundberg, 1995) mit Sequenzaufgaben. Eine solche Dreiteilung oder auch nur eine Zweiteilung (Sequenzverarbeitung vs. Paarvergleichsaufgabe) ist zur Erklärung der Unterschiede zwischen der Zweier-Sequenz im Paradigma dieser Arbeit und der klassischen Paarvergleichsaufgabe (Grondin, et al., 1998; Lapid, et al., 2008) nicht notwendig. Im Gegenteil, es wäre eher sehr erstaunlich, wenn sich in den Experimenten dieser Arbeit ähnlich gute Leistungen zeigen würden wie in Paarvergleichsaufgaben (Grondin, et al., 1998; Mattes & Ulrich, 1998), da es deutliche Unterschiede hinsichtlich des Stimulusmaterials, der Messmethodik und der Aufmerksamkeitslenkung zwischen den Untersuchungen gibt.

### 3.3. Tatsächlich die innere Uhr erforscht oder nicht?

Angesichts der Gedächtnis- und Aufmerksamkeitseffekte, die in dieser Arbeit beobachtet wurden, stellt sich die Frage, inwieweit diese Untersuchung geholfen hat, mehr über die innere Uhr zu erfahren, die für die Verarbeitung von Intervallen, wie sie in dieser Arbeit verwendet wurden, zuständig ist. Hat diese Arbeit sehr viel über die Uhr als solche herausfinden können? Welche neuen Erkenntnisse brachten die Experimente im Bezug auf genuine Uhrfunktionen?

#### 3.3.1. Erzählen die Gedächtniseffekte etwas über die innere Uhr?

Eines der auffälligsten und deutlichsten Resultate dieser Arbeit war, dass sich die Wahrnehmungsleistung mit einer zunehmenden Anzahl an präsentierten Standardintervallen verbesserte. Insgesamt waren die Ergebnisse der sieben Experimente weder vereinbar mit den Vorhersagen des klassischen Impulsgeber-Zähler-Mechanismus noch denen der Dynamic-Attending-Theorie. Das Multiple-Look-Modell erwies sich insgesamt am besten geeignet, die Ergebnisse vorherzusagen. Dabei handelt es sich allerdings nicht um ein spezifisches Uhrmodell, sondern viel eher um ein Gedächtnismodell. Der Effekt der Kontextsensitivität wird im Multiple-Look-Modell in gewisser Weise aus der Uhr ausgelagert und dem Gedächtnis zugeschrieben. Hat man dementsprechend die Uhr als solche untersucht oder vielmehr nur eine Gedächtnisfunktion? Im Rahmen der Dynamic-Attending-Theorie sind Uhr und Gedächtnis nicht voneinander zu trennen, da die Dauer eines Intervalls durch die Periode des oszillierenden Prozesses zugleich enkodiert und gespeichert wird. Inwieweit man im Rahmen des Multiple-Look-Modells bei dem Gedächtnis noch von einem Element der Uhr reden kann, ist unklar. Handelt es sich bei dem Gedächtnis für die Speicherung von Zeitintervallen um ein allgemeines Gedächtnissystem oder aber ein zeitspezifisches? Es gibt eine ganze Reihe von Studien, die dieser Frage nachgegangen sind, indem sie z.B. Doppelaufgaben verwendeten (Brown, 1997; Fortin & Breton, 1995; Rammsayer & Lima, 1991; Rammsayer & Ulrich, 2005). Durch Doppelaufgaben, in denen eine Zeitwahrnehmungsaufgabe und eine weitere Aufgabe mehr oder weniger zeitgleich ausgeführt werden, kann man Hinweise darauf erhalten, inwieweit beide Aufgaben dieselben Ressourcen nutzen oder nicht. Geht man davon aus, dass es sich um ein universelles Gedächtnis mit einer limitierten Kapazität handelt, so wäre es denkbar,

dass, wenn das Gedächtnis eine Zeitdauer und ein Wort gleichzeitig speichern (Doppelaufgabe) muss, die Kapazität des Gedächtnisses überschritten wird. Das System könnte somit möglicherweise entweder nur das Wort oder nur die Zeitdauer speichern oder es versucht, beides zu speichern, was aber aufgrund des Kapazitätslimits dazu führen würde, dass Wort und Zeitdauer weniger akkurat gespeichert werden, als wenn nur eins der beiden gespeichert werden müsste. Stellt man fest, dass es bei einer Doppelaufgabe zu einer Leistungsreduktion für eine der beiden Aufgaben kommt, spricht man von einer einfachen Interferenz, da nur eine Aufgabe durch eine konkurrierende Aufgabe beeinträchtigt wird. Werden hingegen beide Aufgaben beeinträchtigt, so spricht man von einer doppelten Interferenz. Zu einer Interferenz sollte es in jedem Fall immer dann kommen, wenn zwei Aufgaben auf ein und dasselbe System zurückgreifen und dieses ein Kapazitätslimit hat. Geht man hingegen davon aus, dass es zwei verschiedene Gedächtnissysteme gibt, eins, das speziell nur für die Speicherung von Zeitdauern zuständig ist, und ein anderes, das nur Wörter speichert, dann sollten Zeitdauer und Wort genauso akkurat gespeichert werden, egal, ob sie zeitgleich oder zu verschiedenen Zeitpunkten dargeboten wurden. In diesem Fall würde man erwarten, dass es zu keinen Interferenzeffekten zwischen den beiden Aufgaben kommt. Empirische Untersuchungen wie die von Rammsayer und Lima (1991) oder auch Rammsayer und Ulrich (2005) liefern kein einheitliches Bild. Während Rammsayer und Lima (1991) eine Beeinflussung einer Wortlernaufgabe auf die Verarbeitung von 1000-ms Intervallen, aber nicht für 50-ms Intervalle feststellen können, finden Rammsayer und Ulrich (2005) keinen Effekt auf eine der beiden Dauern bei einer Buchstabenlernaufgabe oder einer visuellen Wiedererkennungsaufgabe. Hingegen zeigte sich bei einer Additionsaufgabe, die parallel zu einer Paarvergleichsaufgabe durchgeführt werden musste, eine Beeinflussung der Zeitwahrnehmung für 100 ms und 1000 ms in gleichem Umfang. Dies spricht dafür, dass beide Aufgaben auf dieselben Strukturen zurückgreifen. Es handelt sich dieser Studie zufolge also bei dem Gedächtnis für Zeitdauern um kein rein Zeitdauerspezifisches. Angesichts dessen, dass aber auch andere Aufgaben, wie z.B. sensorisch-motorische Aufgaben (Brown, 1985) oder Korrekturlesen (Brown & Stubbs, 1992) mit Zeitdauerverarbeitung interferieren, stellt sich die Frage, ob es sich um Interferenzen auf der Ebene des Gedächtnisses oder doch eher um allgemeine Aufmerksamkeits-Kapazitäts-Probleme handelt, wovon z.B. Brown (1998) ausgeht. Wenn es sich um

ein Aufmerksamkeits-Kapazitätsproblem handelt, dann stellt sich aber auch hier die Frage, ob die Ergebnisse der Experimente dieser Arbeit uns etwas über die Uhr verraten oder doch „nur“ etwas über allgemeine Aufmerksamkeitsprozesse bzw. Limitationen dieser Prozesse.

Kritisch ist weiterhin auch, dass sich Positioneffekte nicht nur in Sequenzaufgaben mit akustischen Reizen, die in ihrer Dauer beurteilt werden sollen, zeigen, sondern auch bei visuellen Diskriminationsaufgaben einstellen (Nachmias, 2006). Dementsprechend handelt es sich wohl auch bei dem Positionseffekt, der in dieser Arbeit und auch von anderen Autoren (Barnes & Jones, 2000; Drake & Botte, 1993; Lapid, et al., 2008) nachgewiesen werden konnte, nicht um einen zeitspezifischen Mechanismus.

Interpretiert man die Ergebnisse der Experimente 1-2 und 5-6 als Hinweise auf die Ausbildung einer möglichen Langzeitrepräsentation, die sich aus dem Mittelwert aller präsentierten Dauern bildet, so ist auch dieser Effekt ein Gedächtniseffekt und es stellt sich die Frage, ob man bei der Beobachtung dieses Effekts auch etwas über die Funktionsweise der inneren Uhr in Erfahrung gebracht hat oder doch „nur“ ein eher allgemeines psychologisches Phänomen beobachtet hat.

### **3.3.2. Erzählen die Aufmerksamkeitseffekte etwas über die innere Uhr?**

Ebenfalls von großer Bedeutung auf die Wahrnehmungsleistung in dem in dieser Arbeit untersuchten Sequenzparadigma waren nicht nur der Effekt des Gedächtnisses, der sich in der Verbesserung der Leistung über die Positionen hinweg im DL zeigte und mit den Vorhersagen des Multiple-Look-Modell übereinstimmt, sondern auch Aufmerksamkeitseffekte, wie die Lenkung der Aufmerksamkeit in der Zeit. Die deutlichen Leistungsunterschiede zwischen dem in Experiment 7 ermittelten DL auf der einen Seite und dem sehr viel geringeren DL in der Studie von Blaschke, et al. (in Vorbereitung) lassen sich durch die Lenkung der Aufmerksamkeit in der Zeit, ermöglicht durch die Vorinformation darüber, welches der Intervalle abweichen wird, erklären. In Experiment 7 dieser Studie wussten die Versuchspersonen nicht, welches Intervall abweichen würde und konnten ihre Aufmerksamkeit nicht gezielt auf dieses Intervall lenken. Ein solcher Mechanismus der Aufmerksamkeitslenkung in der Zeit weist große Ähnlichkeiten zur Aufmerksamkeitslenkung im Raum auf. Auch wenn möglicherweise ein anderer Mechanismus für die Lenkung der Aufmerksamkeit im Raum zuständig ist, findet



man doch auch ähnliche Effekte der Aufmerksamkeitslenkung in der Zeit für die Diskriminationsleistung nicht zeitlicher visueller Stimuli, wie die Studien von Rolke und Hoffmann (2007) oder Bausenhardt et al. (2007) zeigen. Dementsprechend muss man sich auch bei diesen Beobachtungen fragen, ob man in dieser Studie mehr über die innere Uhr hat erfahren können oder eher über Aufmerksamkeitslenkung in der Zeit.

### **3.3.3. Genuin zeitspezifische Entdeckungen**

Auch wenn das Gedächtnis des postulierten Multiple-Look-Modells möglicherweise kein Zeitspezifisches ist und man dementsprechend die Verbesserung der Leistung über mehrere SI-Dauern hinweg nicht der Uhr zuschreiben kann, so handelt es sich doch um einen sehr interessanten Befund für die Gedächtnisforschung. Gerade auch die Tatsache, dass in dieser Arbeit ein Leistungsprofil gefunden wurde, das einem Primacy- und Recency-Effekt diametral entgegensteht, deutet vielleicht darauf hin, dass das Gedächtnis für die Speicherung von Zeitdauern sich doch deutlich von dem für eine Wortliste unterscheidet. Zudem konnten die Vorhersagen der Dynamic-Attending-Theorie nicht empirisch bestätigt werden. Dies stellt zwar keine direkte Bestimmung der Funktionalität der Uhr dar, jedoch stellt der Ausschluss eines oszillatorbasierten Systems einen nicht unerheblichen Informationswert dar, da auf diese Weise deutlich wird, wie die innere Uhr wohl nicht funktioniert.

Die Ergebnisse aus Experiment 7 im Bezug auf den PSE sind zudem auch vermutlich als genuin zeitspezifisch anzusehen. Wenn z.B. das erste Intervall der Sequenzen aus Experiment 7 einen geringeren PSE an der ersten gegenüber der zweiten Position aufwies, so ist das durch Aufmerksamkeitseffekte wie eine Orientierungsreaktion erklärbar, ebenso wie die nach der zweiten Position einsetzende Reduzierung des PSE durch eine sich steigende Erwartung eines abweichenden Intervalls erklärt werden kann und eine erhöhte Aufmerksamkeit bewirkt haben könnte. Sowohl Effekte einer Orientierungsreaktion als auch die einer gesteigerten Erwartung sind zwar ein eher allgemeinspsychologischer Befund der Aufmerksamkeitslenkung. Allerdings sollten sich diese auf die Urteilsvariabilität auswirken und nicht unbedingt die wahrgenommene Dauer beeinflussen. Die Wirkung der Aufmerksamkeit auf die Öffnung des Reglers in dem von Zakay und Block (1995) postulierten Attentional-Gate-Modell ist als ein zeitspezifischer

Mechanismus anzusehen. In einer Tonhöhendiskriminations-Aufgabe, die ähnlich wie unser Sequenzparadigma aufgebaut ist, sollten ähnliche DL-Effekte zu erwarten sein, jedoch sollten sich keine PSE-Verschiebungen einstellen, da die Tonhöhendiskrimination nicht mit einer veränderten Impulsrate oder Ähnlichem in Verbindung zu bringen ist. Würden sich ähnliche Effekte auch dort zeigen, so würde die in dieser Arbeit gelieferte Erklärung für den Positionseffekt als widerlegt angesehen werden müssen. Der Vergleich verschiedener Sinnesmodalitäten unter Anwendung des in dieser Arbeit genutzten Sequenzparadigmas verspricht dementsprechend weitere wichtige Informationen zu liefern, um zwischen allgemeinen und zeitspezifischen Effekten des Sequenzparadigmas unterscheiden zu können und die Funktionsweise der inneren Uhr oder aber auch allgemeinere psychologische Gedächtnis- und Aufmerksamkeitsprozesse näher untersuchen zu können.

### 3.4. Bedeutung der behavioralen Befunde für die Erforschung der biologischen Prozesse der Zeitwahrnehmung

#### 3.4.1. Bedeutung für biologische Untersuchungsmethoden

Auch wenn die Effekte, die in den Sequenzaufgaben beobachtet wurden, z.T. eine hohe Ähnlichkeit mit allgemeineren psychologischen Phänomenen zu haben scheinen und damit vielleicht weniger über die Uhr selbst erzählen, so sind diese Befunde an sich trotzdem sehr interessant, im Besonderen auch für die Lokalisierung der inneren Uhr. Denn wenn allgemeine Gedächtnis- und Aufmerksamkeitseffekte eine so zentrale Rolle spielen, dann muss man zum einen mit einer Beteiligung sehr vieler neuronaler Strukturen rechnen und Vergleichsaufgaben sehr gut auswählen hinsichtlich ihrer Anforderungen an das Gedächtnis und die Aufmerksamkeitslenkung. Ansonsten untersucht man anstelle der Uhr eher solch allgemeine Prozesse anstatt genuin zeitspezifische. Wenn z.B. die Ergebnisse einer fMRI-Studie die Aktivität während einer Tonhöhen-Diskriminationsaufgabe mit der Aktivität während einer Zeitwahrnehmungsaufgabe vergleicht, um gemeinsame und/oder unterschiedliche Areale der Informationsverarbeitung ausfindig zu machen, so kann sich das aufgrund der in dieser Arbeit beobachteten Aufmerksamkeitseffekte als problematisch erweisen. Bei einer Tonhöhen-Diskriminationsaufgabe muss z.B.

keine besondere Aufmerksamkeitslenkung auf den Beginn eines Tones erfolgen, da dieser für die Tonhöhen-Diskrimination nicht von entscheidender Bedeutung ist. Inwieweit also in der Frequenz- und Zeit-Diskriminationsaufgabe eine ähnliche Aufmerksamkeitslenkung erfolgt, ist unklar und verhindert somit eindeutige Aussagen. Zudem hatte Experiment 7 gezeigt, dass PSE-Unterscheide zwischen den Positionen bei kurzen SI-Dauern (250 ms) weniger deutlich zu Tage treten als bei langen SI-Dauern (600 ms). Die PSE-Profile ähnelten sich, jedoch wurde der Positionseffekt nur bei den 600-ms SI-Sequenzen signifikant. Demnach sind die Effekte unterschiedlich stark ausgeprägt, obwohl es Anzeichen für denselben Effekt gibt und dies auch durch theoretische Überlegungen zu erwarten ist. Denn bis sich eine Beeinflussung der Impulsfrequenz durch das Arousal oder Aufmerksamkeit bemerkbar machen kann, vergeht Zeit und für kurze Intervalldauern lassen sich die Effekte dementsprechend weniger gut beobachten, obwohl sie vermutlich genauso vorhanden sind. Wenn sich diese Effekte auf der behavioralen Ebene so unterschiedlich gut nachweisen lassen, gilt dies möglicherweise auch für die physiologische Ebene. Findet man in den physiologischen Daten Unterschiede zwischen Zeitdauern (z.B. keine Aktivierung des Striatums bei kurzen, sondern nur bei langen Intervallen) muss dies nicht bedeuten, dass unterschiedliche Systeme beteiligt sind.

Möglicherweise werden auch bei einer reinen Tonhöhen-Diskriminationsaufgabe die Tondauern mit-encodiert, auch wenn dies nicht direkt zur Aufgabe gehört. Wenn jedoch die Lenkung von Aufmerksamkeit in der Zeit wichtig ist, dann analysiert die innere Uhr möglicherweise die Intervalldauern der Reizpräsentation, um besser Aufmerksamkeit in der Zeit lenken zu können. Ist die Uhr in beiden Paradigmen aktiv, sei es durch explizite Anforderungen der Aufgabe oder weil es für die Bearbeitung einer anderen Aufgabe hilfreich sein könnte, deren zeitliche Struktur zu erfassen, so kann ein Vergleich beider Bedingungen mit bildgebenden Verfahren mittels einer Subtraktion von Aktivierungsmustern beider Aufgaben niemals zu einer Lokalisierung der Uhr beitragen.

### **3.4.2. Eine oder mehrere Uhren?**

Da die Diskussion in der Literatur der Zeitwahrnehmungsforschung um eine oder mehrere Uhren für verschiedene Zeitdauerbereiche und Aufgaben sehr intensiv ist (siehe Lewis & Miall, 2003a; Buhusi & Meck, 2005), soll am Ende dieser Arbeit

nochmals auf diesen Punkt im Hinblick auf die Ergebnisse der präsentierten Experimente eingegangen werden. Eine direkte Auskunft darüber, ob sich die Unterscheidung von Mechanismen für die Enkodierung von Intervallen im Sekunden- und Millisekunden-Bereich durch diese Studie eher bewahrheitet oder in Frage zu stellen ist, kann nicht gegeben werden, da die in dieser Arbeit verwendeten Zeitdauern eine maximale Dauer von 600 ms nicht überschritten haben. Allerdings konnte gezeigt werden, dass man innerhalb eines Modells, das die Eigenschaften eines Impulsgeber-Zähler-Modells mit denen des Multiple-Look-Gedächtnismodells verbindet, sowohl einen Zeitwahrnehmungsmechanismus für eher diskrete Zeitdauern als auch einen für kontinuierliche vereinbaren kann. Während bisherige Modelle oft zwei Mechanismen annahmen (siehe z.B. auch Barnes & Jones, 2000, *future-oriented-attending* und *analytic-attending mode*), gelingt es, mit einer Kombination aus Impulsgeber-Zähler-Modell und Multiple-Look-Modell, alle Effekte in einem Modell zu erklären. Die Annahme von zwei verschiedenen Zeitdauersystemen ist eine einfache, aber nicht unbedingt sparsame Annahme. Sparsamkeit ist nicht nur ein Kriterium der Forschung für die Beurteilung von Theorien („Occam’s razor“), sondern auch der Natur. Ein adaptives System, das durch seine adaptiven Möglichkeiten seine Leistung über einen weiten Bereich optimieren kann, ist effizienter als zwei Systeme, die jeweils nur einen geringeren Bereich abdecken. Dementsprechend muss man sich angesichts der Befunde, die auf einen adaptiven Mechanismus auf Ebene eines Durchgangs, aber auch über mehrere Durchgänge hinweg deuten, fragen, weswegen man zwei verschiedene Systeme annehmen sollte, wenn die Adaptationsfähigkeit eines Mechanismus groß genug ist? Ein adaptiver Mechanismus kann zwar auch immer bei einem kleinen Zuständigkeitsbereich, z.B. für nur kurze Dauern, wertvoll sein. Seine eigentlichen Vorteile entfaltet er aber quasi erst dadurch, dass er sich über einen größeren Bereich anpassen kann. Die Frage, ob der Bereich von wenigen Millisekunden bis zu einer Sekunde bereits einen adaptiven Mechanismus erforderlich macht und ob Befunde dieser Arbeit auch bei Intervalldauern von mehr als 1000-ms Dauer replizierbar sind oder nicht, kann zu diesem Zeitpunkt nicht entschieden werden. Aber die vorgefundene Adaptivität könnte durchaus als Hinweis auf einen einzigen Mechanismus gewertet werden.

### **3.4.3. Beteiligung oszillatorischer Prozesse bei der Verarbeitung zeitlicher Informationen grundsätzlich ausgeschlossen?**

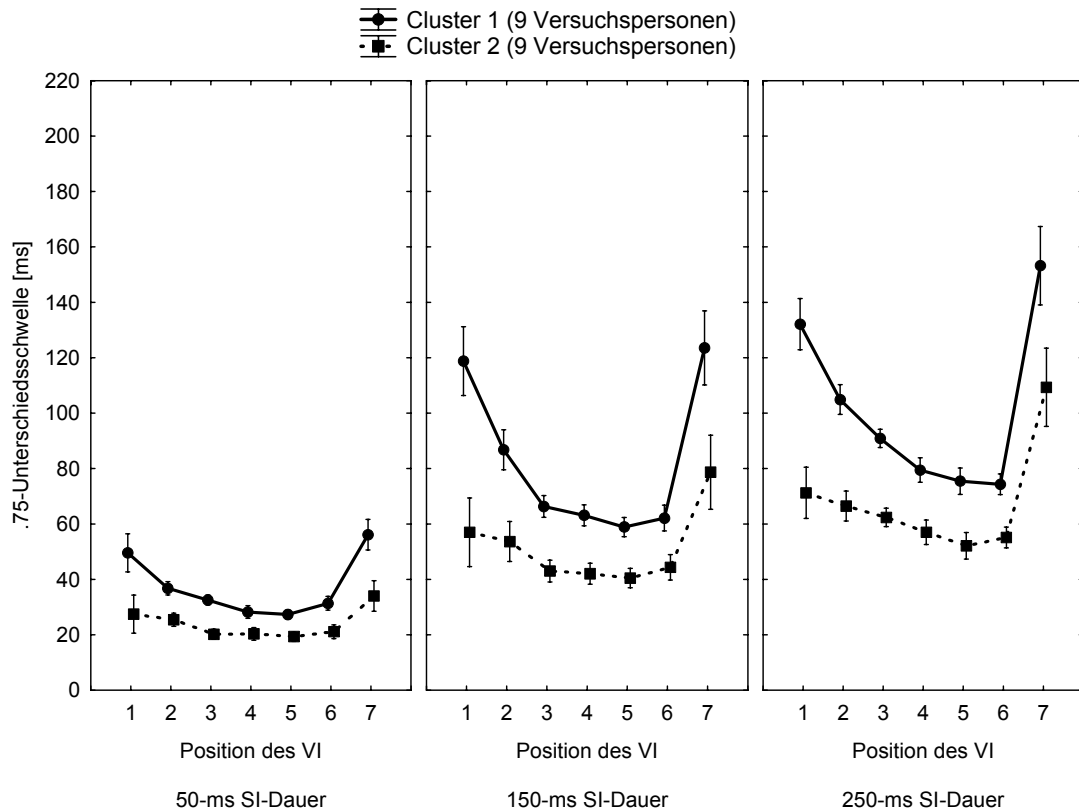
Wenn die Dynamic-Attending-Theorie als Mechanismus zur Enkodierung von Zeitdauern aufgrund der Ergebnisse in Bezug auf die ISI-Effekte oder PSE-Werte ausgeschlossen worden war, so bedeutet dies nicht, dass generell oszillatorische Prozesse für die Enkodierung von Zeitdauern nicht in Frage kommen. Die in dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse schließen lediglich aus, dass Zeit in Form von Veränderungen einer bestimmten Periode enkodiert und gespeichert wird. Wenn Buhusi und Meck (2005) oder auch Jacobson, et al. (2008) oszillatorische Prozesse zur Enkodierung von Zeiteinheiten heranziehen, so geschieht dies auf einem anderen Weg, als es die Dynamic-Attending-Theorie annimmt, nämlich, dass ein bestimmtes Muster von Oszillatorzuständen für eine bestimmte Zeitdauer als Äquivalent gesehen wird und nicht deren Periodendauer als solche, wie bei der Dynamic-Attending-Theorie. Die genannten Modelle sind somit zwar oszillatorbasiert, aber sie bilden mit ihren Oszillatoren Zeitdauern nicht direkt ab, wie das bei der Dynamic-Attending-Theorie der Fall ist, sondern eine Reihe von Oszillatoren erzeugt ein bestimmtes Muster, ähnlich wie beim zustandsabhängigen neuronalen Netzwerk (Karmarkar & Buonomano, 2007). Die Ergebnisse der hier präsentierten Experimente sind mit verschiedenen Enkodierungsmechanismen zu vereinbaren, wenn sie die Eigenschaft aufweisen, dass die Enkodierung weitestgehend unabhängig von der ISI-Dauer ist, die Repräsentation von Intervallen mit zunehmender Dauer schlechter wird, Positionseffekte im Hinblick auf die Variabilität integriert werden können und das besondere Profil der Veränderungen im PSE über die Positionen hinweg sich durch diesen Prozess mit abbilden lässt.

### **3.4.4. Ist die „CNV“ von Pfeuty, et al. (2003) ein neurophysiologisches Korrelat für das ermittelte Leistungsprofil der Experimente 1-7 dieser Arbeit?**

Das in den Experimenten 1-7 ermittelte behaviorale Leistungsprofil stellt möglicherweise ein Äquivalent zum elektrophysiologischen Verlauf der Amplitude der contingent negative variation (CNV) dar und kann als eine Interpretationshilfe dienen. Pfeuty, et al. (2003) präsentierten ihren Versuchspersonen einen tempo-change-task mit leeren Intervallen mit einer Standarddauer von 600 ms und fanden während der Darbietung der ersten (Standard-) Sequenz der Aufgabe einen Anstieg der CNV bis zur Präsentation des dritten Intervalls. Anschließend war kein weiterer

Anstieg der Amplitude der CNV zu beobachten. Die Analogie der behavioralen Daten der Experimente 1-7 dieser Arbeit zu den neurophysiologischen Daten von Pfeuty et al. (2003) besteht darin, dass beide Studien Veränderungen bis zum dritten Intervall und dann eine Saturierung des Effekts feststellen. Pfeuty et al. (2003) argumentierten u.a. auch mit dem Hinweis auf die Vorhersagen des Multiple-Look-Modells, um ihre Ergebnisse zu erklären. Die zunehmende Negativierung der CNV könnte mit der Ausbildung einer Gedächtnisrepräsentation zusammenhängen. Pfeuty et al. (2003) hatten beobachtet, dass Versuchspersonen, die gute Leistungen zeigten, bereits nach einem Intervall keinen weiteren Anstieg der CNV zeigten, während bei schlechten Diskriminierern die CNV auch noch nach mehreren Intervallpräsentationen anstieg. Die CNV wies zudem bei diesen Versuchspersonen eine generell niedrigere Amplitude auf. Ähnliches hatten bereits Ladanyi und Dubrovsky (1985) beobachtet. In der ersten Sequenz des tempo-change-task würden Pfeuty et al. (2003) zufolge eine Repräsentation der Dauer der Intervalle aufgebaut werden, während in der zweiten Sequenz diese Repräsentation mit den dort präsentierten Dauern verglichen wird. Dementsprechend sollten Pfeuty et al. (2003) zufolge auch die CNV in der zweiten Sequenz des tempo-change-tasks keinen weiteren Anstieg mehr zeigen. Allerdings zeigen neuere Ergebnisse der Gruppe (Pfeuty, Ragot & Pouthas, 2005), dass sich die Anstiegsrate der CNV proportional zur Dauer der einzelnen präsentierten Intervalle verhält. Dies steht in Einklang mit Überlegungen, wonach die CNV eine Akkumulation von Impulsen reflektieren könnte, wie es das Impulsgeber-Zähler-Modell beschreibt. Je länger ein Intervall andauert, desto mehr Impulse werden ausgeschüttet und desto steiler sollte die Amplitude der CNV ansteigen (siehe auch Macar & Vidal, 2004). Kurze Intervalle erreichen dementsprechend schneller eine bestimmte Amplitudenhöhe als lange Intervalle. Dies trifft für die Sequenzaufgabe von Pfeuty et al. (2003) offenbar aber nicht zu, denn der Anstieg erfolgt nur bis zum dritten Intervall und die CNV entwickelt sich nicht auf die Dauer der einzelnen Intervalle, sondern auf die Sequenz als ganze hin. Dementsprechend muss der „CNV“-Befund aus der Studie von (2003) anders gedeutet werden. Geht man davon aus, dass in der „CNV“ der Studie von (2003) nicht Zeit abgebildet wird, sondern sich darin adaptive Prozesse im Gedächtnis widerspiegeln, so wird das Profil verständlich. Nach drei Intervallen kommt es zu keinem weiteren „CNV“-Anstieg mehr, weil, wie in dem Paradigma dieser Arbeit in den Experimenten 1-7 beobachtet, auch keine weitere

Leistungsverbesserung zu beobachten ist. „Gute Diskriminierer“ zeigen eine generell niedrigere CNV-Amplitude, so wie die „guten“ Diskriminierer in dem in dieser Arbeit verwendeten Paradigma auch eine geringere Leistungsverbesserung über die ersten Intervalle zeigen und weniger adaptieren müssen als die „weniger guten“, weil sie von vornherein eine bessere Diskriminationsleistung an der ersten Position aufweisen (siehe Abbildung 25).



**Abbildung 25:** .75-Unterschiedsschwelle und Standardfehler des Mittelwerts in Abhängigkeit der Position des VI, der SI-Dauer und gute (Cluster 1) und weniger gute (Cluster 2) Diskriminierer (Aufteilung durch Cluster-Zentren-Analyse nach dem K-means-Verfahren) in Experiment 3

Aus der Abbildung wird deutlich, dass „gute“ und „weniger gute“ Versuchspersonen sich nicht nur im allgemeinen Leistungsniveau unterscheiden, sondern sich die Leistung auch gleich bei den ersten Intervallen einer Sequenz deutlich unterscheidet, und die Präsentation weiterer SI-Dauern die Leistungsverbesserung über die Positionen hinweg unterschiedlich beeinflusst (weitaus deutlichere Verbesserung bei den „weniger guten“ Diskriminierern). Damit zeigt sich nicht nur eine Ähnlichkeit zwischen den behavioralen Ergebnissen dieser Arbeit und den physiologischen Effekten der Studie von Pfeuty et al. (2003) in

Bezug auf den Saturierungseffekt nach dem dritten Intervall, sondern darüber hinaus auch Ähnlichkeiten für „gute“ und „weniger gute“ Diskriminierer. Dies zeigt, dass diese Arbeit für die Interpretation des etwas merkwürdigen „CNV“-Befunds der Studie von Pfeuty et al. (2003) hilfreich sein kann. Ein konkreterer Zusammenhang zwischen den behavioralen und elektrophysiologischen Ergebnissen muss allerdings erst in weiteren Studien direkt geprüft werden.

### 3.5. Abschließende Beurteilung des Sequenzparadigmas

#### 3.5.1. Vorteile des Sequenzparadigmas gegenüber der Paarvergleichsaufgabe

Die Verwendung von Sequenzen im Vergleich zu Paarvergleichsaufgaben bietet eine sehr gute Möglichkeit, die innere Uhr näher zu erforschen. Durch die Verwendung mehrerer Intervalle werden Eigenschaften der Uhr deutlich, die mit einer Paarvergleichsaufgabe nur ansatzweise nachzuweisen sind. Eine ganze Reihe von Fragen dürfte sicherlich auch unter Verwendung von Paarvergleichsaufgaben zu beantworten sein. So zeigt sich bei dieser Methode ja bereits auch schon ein Positionseffekt (Lapid, et al., 2008; Marchman, 1969; McGavren, 1965; Rammsayer & Wittkowski, 1990; Ulrich et al., 2006; Van Allen et al., 1966). Allerdings stellt der Paarvergleich nur einen Ausschnitt dessen dar, was man mit einer Sequenzaufgabe nachweisen kann. Das neu entwickelte Untersuchungsparadigma dieser Arbeit erlaubt es, Positionseffekte viel besser zu erfassen, da mit einer Paarvergleichsaufgabe z.B. nicht zu erfassen wäre, inwieweit sich die beobachtete Verbesserung der Leistung fortsetzt und schließlich saturiert. Auch das interessante Phänomen des Endeffekts konnte durch das verwendete Sequenzparadigma erst systematisch erforscht werden. Darüber hinaus sind auch Kontexteffekte auf der Ebene eines Durchgangs oder auch über mehrere Durchgänge hinweg durch Veränderungen des Leistungsverlaufs über die Positionen hinweg besser beobachtbar. Inwieweit sich ein globaler Kontext auf die Wahrnehmung auswirkt, wurde sehr deutlich in Experiment 4, wo sich zeigte, wie sehr sich die Wahrnehmung einer Zwei-Intervall-Sequenz, die im Wechsel mit längeren Sequenzen dargeboten wird, im Vergleich zu einer Paarvergleichsaufgabe unterscheidet. Obwohl in beiden Paradigmen jeweils zwei Intervalle präsentiert wurden, so unterscheiden sie sich deutlich im allgemeinen Leistungsniveau (Paarvergleich zeigt deutlich bessere



Leistung) und auch hinsichtlich des Positionseffekts (Paarvergleich zeigt bessere Leistung an zweiter Position) und das vermutlich nur deshalb, weil in Experiment 4 dieser Arbeit den Versuchspersonen nicht bekannt war, ob weitere Intervalle auf die ersten zwei Intervalle folgen werden oder nicht. Solche Effekte der Vorinformation, aber auch die Aufmerksamkeitslenkung in der Zeit, lassen sich besser in einem Sequenzparadigma untersuchen als in einer Paarvergleichsaufgabe. Dementsprechend bietet die Analyse von Sequenzen deutlich mehr Möglichkeiten zur Erforschung der Mechanismen, die der Zeitwahrnehmung zugrunde liegen. Jedoch sollte man im Einzelfall abwägen, ob für bestimmte Fragestellungen nicht auch Paarvergleichsaufgaben durchaus ausreichend sind; denn die Bestimmung der Wahrnehmungsleistung an mehreren Positionen führt zu einem nicht unerheblichen Mehraufwand.

### **3.5.2. Ökologische Validität des Sequenzparadigmas**

Die Paarvergleichsaufgabe wurde z.B. von Jones und Boltz (1989) oder auch McAuley und Kidd (1998) kritisiert, weil sie sich sehr von alltäglichen Aufgaben unterscheidet. Wenn man Musik hört oder eine Rede verfolgt, könnte dies eine andere Zeitwahrnehmung darstellen bzw. einen ganz anderen Verarbeitungsmechanismus erfordern als der Vergleich von zwei Zeitintervallen. Um möglichen zusätzlichen oder grundsätzlich anderen Effekten, die bei der Wahrnehmung einer Reihe von Intervallen auftreten könnten, nachzugehen, wurden verschiedene Sequenzparadigmen eingesetzt (siehe hierzu vor allem Friberg & Sundberg, 1995). Grundsätzliche Unterschiede zwischen Sequenz- und Paarvergleichsaufgaben außer im Leistungsniveau, die aber durch Unterschiede in der Aufmerksamkeitslenkung (Position des abweichenden Intervalls bekannt oder nicht), dem Stimulusmaterial (gefüllte vs. leere Intervalle), der Messmethodik (längere und kürzere oder nur längere Vergleichsreize) etc. erklärt werden können, sind allerdings nicht beobachtet worden. Hinzu kommt, dass auch bei den Paarvergleichsaufgaben bereits ähnliche Effekte wie in den Sequenzparadigmen, wie z.B. Positionseffekte, zu beobachten sind.

Man sollte außerdem bedenken, dass, auch wenn die in den verschiedenen Studien verwendeten Sequenzen sich zwar in gewisser Weise eher mit alltäglichen Zeitwahrnehmungsaufgaben in Verbindung bringen lassen, weil sie eine Reihe von Intervallen benutzen, es sich jedoch auch bei diesen Aufgaben immer noch um eine

starke Vereinfachung alltäglicher Aufgaben handelt, wie z.B. der Analyse zeitlicher Aspekte eines Gespräches. Klicksequenzen oder Sequenzen mit Intervallen aus weißem Rauschen ähneln noch immer eher einer typischen Laboruntersuchung als einer Alltagsaufgabe. Die Verwendung von Intervallen mit weißem Rauschen wird kaum vergleichbar sein mit Studien, in denen neben der Dauer auch Aspekte wie die Tonhohle von Intervallen variiert werden, was dem Hören von Musik z.B. viel eher entsprechen würde (siehe jedoch auch Grondin & Laforest, 2004). Auch die Betonung einzelner Silben in einer Rede wird vermutlich einen entscheidenden Einfluss auf die Wahrnehmung von Pausendauern haben. So würde ich erwarten, dass, wenn z.B. über die Änderung in der Stimmhohle das Ende eines Satzes vorzeitig angekündigt wird, diese Vorinformation die Wahrnehmung einer anschließenden Pause durch Aufmerksamkeitseffekte beeinflussen wird. Die in dieser Arbeit durchgeführten sieben Experimente liefern mit ihrem noch recht einfachen und überschaubarem Design aber trotzdem gute Anhaltspunkte für komplexer angelegte Studien, da sie grundsätzliche Mechanismen, wie die der Aufmerksamkeitslenkung bereits mit den hier präsentierten Sequenzen, nachweisen konnte. Die Arbeit stellt auf dem Weg hin zu einer ökologisch validierten Prüfung einen, von vielen noch weiteren notwendigen Schritten dar.

### 3.6. Fazit:

Ziel dieser Arbeit war es, die der Zeitwahrnehmung zugrundeliegenden Mechanismen besser zu verstehen. Dazu habe ich zwei grundsätzlich verschiedene Systeme zur Enkodierung zeitlicher Intervalle miteinander verglichen. Das kontextinsensitive Impulsgeber-Zähler-Modell und die kontextsensitive Dynamic-Attending-Theorie sind beide nicht in der Lage, die ermittelten empirischen Ergebnisse vorherzusagen. Das Impulsgeber-Zähler-Modell überzeugte nicht aufgrund seiner mangelnden Kontextsensitivtat und die Dynamic-Attending-Theorie nicht, weil sie nicht in Einklang mit den beobachteten ISI- und PSE-Effekten zu bringen war. Eine gute Möglichkeit, alle Ergebnisse mit einem Mechanismus zu erklären, stellt das Multiple-Look-Modell dar, denn es kann durch Gedächtniseffekte die Kontextabhängigkeit der Leistung und durch ein dem dynamisch agierenden Gedächtnis vorgeschalteten Impulsgeber-Zähler die ISI-Effekte erklären. Es vereint

somit die Vorteile der beiden anderen Modelle, die aufgrund der Ergebnisse für sich alleine ausgeschlossen werden mussten. Die Kombination des Impulsgeber-Zähler-Modells mit dem Multiple-Look-Modell ermöglicht es, die Vielzahl empirischer Befunde, die das Impulsgeber-Zähler-Modell bisher stützten und verschiedene Effekte der Zeitwahrnehmung erklärten, mit dem bisher eher wenig beachteten Aspekt der Kontextabhängigkeit der Leistung, auf den besonders Modelle wie die Dynamic-Attending-Theorie aufmerksam gemacht haben, in einem Modell zu verbinden. Die Mixtur aus Impulsgeber-Zähler und einem dynamischen Gedächtnis, wie es das Multiple-Look-Modell annimmt, ermöglicht zudem, sowohl Effekte dynamischer Sequenzen als auch einzelner Intervalle abzubilden.

Die psychologische Erforschung der Mechanismen der Zeitwahrnehmung ist ein spannendes Forschungsfeld. Nach wie vor stehen auf diesem Gebiet mehr Fragen offen, als dass es Antworten geben würde. Mit der hier präsentierten Reihe von Experimenten ist das Thema „Einfluss des Kontexts auf die Zeitwahrnehmung“ in jedem Fall noch lange nicht abgeschlossen, da auch diese Arbeit noch Konfundierungen (z.B. SI-Dauer und ISI-Manipulation in den Experimenten 1 und 6; ISI-Manipulation und Messmethodik in Experiment 7, wenn die Ergebnisse mit den vorherigen Experimenten 1 und 6 verglichen werden) enthält, denen in weiteren Untersuchungen nachgegangen werden sollte, um z.B. mögliche ISI-Effekte noch genauer untersuchen zu können. Diese Arbeit konnte aber aufzeigen, dass die Wahrnehmung von Zeitdauern z.T. extrem kontextabhängig ist. Durch ihre dynamischen Mechanismen unterscheidet sie sich damit deutlich von einer mechanischen Uhr. Dass die Adaptation an Zeitdauern -wie man sie beim Vergleich von einer randomisierten und geblockten Darbietung beobachten konnte, oder auch die außerordentlich guten Zeitwahrnehmungsleistungen aus der Studie von Blaschke, et al. (in Vorbereitung)- jedoch sehr vorteilhaft gegenüber einer nicht adaptiven Uhr sein kann, zeigen die Ergebnisse deutlich. Es bleibt spannend, diesen Prozessen durch behaviorale und biologische Forschungsmethoden sowie Simulationen im Rahmen der Computational Neuroscience weiter nachzugehen, um die Mechanismen der Zeitwahrnehmung im Bereich von wenigen Millisekunden zu identifizieren, auf die wir womöglich laufend in unserem alltäglichen Leben zurückgreifen, wenn wir reden oder zuhören, motorisch reagieren oder agieren, Dinge betrachten oder fühlen. Wenige Millisekunden können das Leben ebenso prägen wie ganze Tage, je nachdem, wie wir sie wahrnehmen.

## 4. Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden die Vorhersagen von drei Modellen, das Impulsgeber-Zähler-Modell von Creelman (1962), die Dynamic-Attending-Theorie von Barnes und Jones (2000) und das Multiple-Look-Modell von Drake und Botte (1993) mit den Ergebnissen aus 7 Experimenten verglichen. Den Versuchspersonen wurde eine Sequenz, bestehend aus gefüllten Intervallen vorgespielt, und sie mussten ein zeitlich abweichendes in der sonst isochronen Sequenz entdecken. Es wurden die Standarddauer der Intervalle, die Position des abweichenden Intervalls in der Sequenz, die Gesamtanzahl der Intervalle in der Sequenz, die Dauer der Interstimulus-Intervalle und die Präsentationsweise mehrere Standarddauern innerhalb eines Blocks variiert. Zudem wurden unterschiedliche Maße zur Bestimmung der Wahrnehmungsleistung eingesetzt. Die Manipulation der Standarddauer führte zu niedrigeren Wahrnehmungsschwellen bei kurzen im Vergleich zu langen Standarddauern, so wie es das verallgemeinerte Webersche Gesetz vorhersagt. Die Gesamtsequenzlänge hat keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsleistung und spricht für eine analytische und gegen eine holistische Verarbeitung der Sequenzen. Die Manipulation der Position des abweichenden Intervalls in der Sequenz führt zu einer Verbesserung der Wahrnehmungsleistung über die ersten Intervalle der Sequenz hinweg, so wie es die Dynamic-Attending-Theorie oder auch das Multiple-Look-Modell vorhersagen. Eine geblockte Präsentation von verschiedenen Standarddauern erweist sich gegenüber einer randomisierten Präsentation mehrerer Standarddauern innerhalb eines Blocks als vorteilhafter für die Erkennung eines abweichenden Intervalls, wenn die Standarddauer der Sequenz dem Mittelwert aller Dauern entspricht. Entspricht sie nicht dem Mittelwert aus den präsentierten Dauern, kommt es zu Leistungseinbußen. Die Ergebnisse zur Manipulation der Dauer der Interstimulus-Intervalle widersprechen den Vorhersagen der Dynamic-Attending-Theorie und befinden sich in Einklang mit den Überlegungen des Multiple-Look-Modells, das keinen Effekt der Interstimulus-Intervall-Dauer auf die Wahrnehmungsleistung vorhersagt. Die Verwendung längerer und kürzerer, abweichender Intervalle hat gegenüber der Verwendung nur längerer Intervalle den Vorteil, dass die Genauigkeit der Wahrnehmungsleistung und die Urteilsvariabilität getrennt voneinander untersucht

---

werden können und darüber hinaus auch die Wahrnehmungsleistung allgemein verbessert wird. Die detailliertere Analyse von Urteilsvariabilität und Genauigkeit der wahrgenommenen Dauer offenbarte, dass möglicherweise durch Erwartungseffekte die Wahrnehmungsleistung beeinflusst wird. Zudem konnte ein deutlicher Effekt der Lenkung der Aufmerksamkeit in der Zeit auf das abweichende Intervall nachgewiesen werden und repliziert somit allgemein gültige psychologische Effekte der Wahrnehmung.

## 5. Literaturverzeichnis

- Abel, S. M. (1972a). Discrimination of temporal gaps. *Journal of the Acoustical Society of America*, 52, 519-524.
- Abel, S. M. (1972b). Duration discrimination of noise and tone bursts. *Journal of the Acoustical Society of America*, 51, 1219-1223.
- Allan, L. G. (1977). The time-order error in judgments of duration. *Canadian Journal of Psychology*, 31, 24-31.
- Aparicio, P., Diedrichsen, J., & Ivry, R. B. (2005). Effects of focal basal ganglia lesions on timing and force control. *Brain and Cognition*, 58, 62-74.
- Aschoff, J. (1984). Circadian timing. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 423, 442-468.
- Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In K. W. Spence & J. T. Spence, *The psychology of learning and motivation* (S. 89–195). New York: Academic Press.
- Augustinus, A. (2000). *Was ist Zeit? (Confessiones XI)*. Eingeleitet und übersetzt von Norbert Fischer. Hamburg: Meiner.
- Baddeley, A. (1986). *Working memory*. Oxford: Oxford University Press.
- Baddeley, A. (2007). *Working memory, thought, and action*. New York: Oxford University Press.
- Barnes, R., & Jones, M. R. (2000). Expectancy, attention, and time. *Cognitive Psychology*, 41, 254-311.

- Bausenhart, K. M., Rolke, B., & Ulrich, R. (2007). Knowing when to hear aids what to hear. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *60*, 1610-1615
- Bendixen, A., Grimm, S., & Schröger, E. (2005). Human auditory event-related potentials predict duration judgments. *Neuroscience Letters*, *383*, 284–288.
- Berens, M. S., & Pastore, R. E. (2005). Contextual relative temporal duration judgment: An investigation of sequence interruptions. *Perception & Psychophysics*, *67*, 102-119.
- Bizo, L. A., Chu, J. Y.M., Sanabria, F., & Killeen, P. R. (2006). The failure of Weber's law in time perception and production. *Behavioural Processes*, *71*, 201–210.
- Blaschke, S., Ritzkowski, S., & Stahl, J. (in Vorbereitung). Shifting attention in time to temporally deviating time intervals presented in isochronous sequences.
- Boas, F. (1882). Über die verschiedenen Formen des Unterschiedsschwellenwertes. *Pfliiger's Archiv für Physiologie*, *27*, 214-222.
- Brancucci, A., D'Anselmo, A., Martello, F., & Tommasi, L. (2008). Left hemisphere specialization for duration discrimination of musical and speech sounds. *Neuropsychologia*, *46*, 2013–2019.
- Brandler, S. (2002). *Zeitverarbeitung und Intelligenz*. Aachen: Shaker Verlag.
- Bressler, S. L., Tang, W., Sylvester, C. M., Shulman, G. L., & Corbetta, M. (2008). Top-down control of human visual cortex by frontal and parietal cortex in anticipatory visual spatial attention. *Preview Journal of Neuroscience*, *28*, 10056-10061.
- Broadbent, D. E. (1965). Information theory and perception. *Anthropology & Medicine*, *13*, 369-379.

- Brown, S. W. (1985). Time perception and attention: The effects of prospective versus retrospective paradigms and task demands on perceived duration. *Perception & Psychophysics*, *38*, 115-124.
- Brown, S. W. (1997). Attention resources in timing: Interference effects in concurrent temporal and nontemporal working memory tasks. *Perception & Psychophysics*, *59*, 1118–1140.
- Brown, S. W. (1998). Automaticity versus timesharing in timing and tracking dual-task performance. *Psychological Research*, *61*, 71-81.
- Brown, S. W., & Stubbs, D. A. (1992). Attention and interference in prospective and retrospective timing. *Perception*, *21*, 545-557.
- Buhusi, C. V., & Meck, W. H. (2005). What makes us tick? Functional and neural mechanisms of interval timing. *Nature Reviews Neuroscience*, *6*, 755-765.
- Burle, B., & Casini, L. (2001). Dissociation between activation and attention effects in time estimation: Implications for internal clock models. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *27*, 195-205.
- Carbotte, R. M. (1973). Retention of time information in forced-choice duration discrimination. *Perception & Psychophysics*, *14*, 440-444.
- Carr, C. E., & Konishi, M. (1990). A circuit for detection of interaural time differences in the brain stem of the Barn Owl. *Journal of Neuroscience*, *70*, 3227-3246.
- Cevik, M. Ö., (2003). Effects of methamphetamine on duration discrimination. *Behavioral Neuroscience*, *117*, 774-784.
- Cheal, M. L., & Lyon, D. R. (1991). Central and peripheral precuing of forced-choice discrimination. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology A: Human Experimental Psychology*, *43*, 859-880.



- Chiba, A., Oshio, K., & Inase, M. (2008). Striatal neurons encoded temporal information in duration discrimination task. *Experimental Brain Research*, *186*, 671–676.
- Cowan, N. (2000). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*, 87-185.
- Creelman, C. D. (1962). Human discrimination of auditory duration. *Journal of the Acoustical Society of America*, *34*, 582-593.
- Cycowicz, Y. M., & Friedman, D. (1998). Effect of sound familiarity on the event-related potentials elicited by novel environmental sounds. *Brain & Cognition*, *36*, 30-51.
- Darlington, T. K., Wager-Smith, K., Ceriani, M. F., Staknis, D., Gekakis, N., Steeves, T. D., Weitz, C. J., Takaahsi, J. S., & Kay, S. A. (1998). Closing the circadian loop: CLOCK-induced transcription of its own inhibitors per and tim. *Science*, *280*, 1599-1603.
- Downing, C. J. (1988). Expectancy and visual-spatial attention: Effects on perceptual quality. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, *14*, 188-202.
- Drake, C., & Botte, M.-C. (1993). Tempo sensitivity in auditory sequences: Evidence for a multiple-look model. *Perception & Psychophysics*, *54*, 277-286.
- Durstewitz, D. (2003). Self-organizing neural integrator predicts interval times through climbing activity. *The Journal of Neuroscience*, *23*, 5342-5353.
- Einstein, A. (1938). On the Effects of External Sensory Input on Time Dilation. *Journal of Exothermic Science and Technology*, *1*. Das im Text erwähnte Zitat stammt aus diesem Journal, aber Mangels Erreichbarkeit zitiere ich Einstein nach folgender Quelle: <http://www.eruditiononline.com/04.05/einstein-time.htm>

- Fechner, G. T. (1860). *Elemente der Psychophysik*. Leipzig: Breitkopf & Härtel.
- Fechner, G. T. (1882). *Revision der Hauptpunkte der Psychophysik*. Leipzig: Breitkopf & Härtel.
- Ferrara, A., Lejeune, H., & Wearden, J. H. (1997). Changing sensitivity to duration in human scalar timing: An experiment, a review, and some possible explanations. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *50*, 217- 237.
- Fetterman, J. G., & Killeen, P. R. (1991). Adjusting the pacemaker. *Learning & Motivation*, *22*, 226-252.
- Fitzpatrick, D. C., Batra, R., Stanford, T. R., & Kuwada, S. (1997). A neuronal population code for sound localization. *Nature*, *388*, 871-873.
- Fortin, C., & Breton, R. (1995). Temporal interval production and processing in working memory. *Perception & Psychophysics*, *57*, 203–215.
- Fraisse, P. (1963). *The psychology of time*. New York: Harper & Row.
- Fraisse, P. (1984). Perception and estimation of time. *Annual Review of Psychology*, *35*, 1–36.
- Francisco, E., Tannan, V., Zhang, Z., Holden, J., & Tommerdahl, M. (2008). Vibrotactile amplitude discrimination capacity parallels magnitude changes in somatosensory cortex and follows Weber's Law. *Experimental Brain Research*, *191*, 49-56.
- Friberg, A., & Sundberg, J. (1995). Time discrimination in a monotonic, isochronous sequence. *Journal of the Acoustical Society of America*, *98*, 2524-2531.
- Getty, D. J. (1975). Discrimination of short temporal intervals: A comparison of two models. *Perception & Psychophysics*, *18*, 1-8.

- Gibbon, J. (1977). Scalar expectancy theory and Weber's law in animal timing. *Psychological Review*, 84, 279-325.
- Gibbon, J., & Church, R. M. (1990). Representation of time. *Cognition*, 37, 23-54.
- Gibbon, J., Church, R. M., & Meck, W. (1984). Scalar timing in memory. In J. Gibbon & L. Allan (Hrsg.), *Annals of the New York Academy of Sciences: Timing and time perception* (S. 52-77). New York: New York Academy of Sciences.
- Gibbon, J., Malapani, C., Dale, C. L., & Gallistel, C. R. (1997). Toward a neurobiology of temporal cognition: advances and challenges. *Current Opinion in Neurobiology*, 7, 170-184.
- Gilbert, F. S., Dillbeck, M. C., Curran, J. P., Little, L. M. (1977). The perception of time following stress. *Motivation and Emotion*, 1, 151-163.
- Green, D. M. (1960). Psychoacoustics and Detection Theory. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 32, 1189-1203.
- Green, D. M., & Swets, J. A. (1966). *Signal detection theory and psychophysics*. New York: Wiley.
- Grondin, S. (1993). Duration discrimination of empty and filled intervals marked by auditory and visual signals. *Perception & Psychophysics*, 54, 383-394.
- Grondin, S. (2001a). From physical time to the first and second moments of psychological time. *Psychological Bulletin*, 127, 22-44.
- Grondin, S. (2001b). Discriminating time intervals presented in sequences marked by visual signals. *Perception & Psychophysics*, 63, 1214-1228.
- Grondin, S. (2003). Processing time between visual events. *Brazilian Archives of Ophthalmology*, 66, 96-104.

- Grondin, S. (2005). Contemporary issues related to psychological time. In S. P. Shohov (Hrsg.), *Advances in Psychology Research – 33* (S. 65-88). Hauppauge: NOVA Publisher.
- Grondin, S., & Laforest, M. (2004). Discriminating the tempo variations of a musical excerpt. *Acoustical Science & Technology*, *25*, 159-162.
- Grondin, S., & Rammsayer, T. H. (2003). Variable foreperiods and temporal discrimination. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *56*, 1-35.
- Grondin, S., Meilleur-Wells, G., Ouellette, C., & Macar, F. (1998). Sensory effects on judgments of short time-intervals. *Psychological Research*, *61*, 261-268.
- Grondin, S., Oullet, B., & Roussel, M.-E. (2001). About optimal timing and stability of Weber fraction for duration diskrimination. *Acoustical Science & Technology*, *22*, 370-372.
- Haarington, D. L., Haaland, K. Y., & Knight, R. T. (1998). Cortical networks underlying mechanisms of time perception. *The Journal of Neuroscience*, *18*, 1085–1095.
- Hairston, I. S., & Nagarajan, S. S. (2006). Neural mechanisms of the Time-order Error: An MEG Study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *19*, 1163–1174.
- Hass, J., Blaschke, S., Rammsayer, T., & Herrmann, J. M. (2008). A neurocomputational model for optimal temporal processing. *Journal of Computational Neuroscience*, *25*, 449–464.
- Hawkins, H. L., Hillyard, S. A., Luck, S. J., Mouloua, M., Downing, C. J., & Woodward, D. P. (1990). Visual attention modulates signal detectability. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *16*, 802-811.
- Heeger, D. J., & Rees, D. (2002). What does fMRI tell us about neuronal activity? *Nature Reviews Neuroscience*, *3*, 142-151.

- Hellström, A. (1978). Factors producing and factors not producing time errors: An experiment with loudness comparisons. *Perception & Psychophysics*, 23, 433-444.
- Hellström, A. (1985). The Time-order Error and its relatives: Mirrors of cognitive processes in comparing. *Psychological Bulletin*, 97, 35-61.
- Hellström, A. (2000). Sensation weighting in comparison and discrimination of heaviness. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26, 6–17.
- Hellström, A., & Rammsayer, T. H. (2004). Effects of time-order, interstimulus interval, and feedback in duration discrimination of noise bursts in the 50- and 1000-ms ranges. *Acta Psychologica*, 116, 1-20.
- Hibi, S. (1983). Rhythm perception in repetitive sound sequence. *Journal of the Acoustical Society of Japan*, 4, 83–95.
- Hinton, S. C. (2003). Neuroimaging approaches to the study of interval timing. In W. H. Meck (Hrsg.), *Functional and Neural Mechanisms of Interval Timing* (S. 419-438). Boca Raton: CRC Press.
- Hirsh, I. J., Monahan, C. B., Grant, K. W., & Singh, P. G. (1990). Studies in auditory timing: 1. Simple patterns. *Perception & Psychophysics*, 47, 215-226.
- Hoffman, J. E. (1975). Hierarchical stages in the processing of visual information. *Perception & Psychophysics*, 18, 348-354.
- Höring, A. (1864). *Versuche über das Unterscheidungsvermögen des Hörsinns für Zeitgrößen*. Tübingen: Heinrich Laupp.
- Ivry, R. B. (1996). The representation of temporal information in perception and motor control. *Current Opinion in Neurobiology*, 6, 851-857.

- Ivry, R. B., & Hazeltine, R. E. (1995). Perception and production of temporal intervals across a range of durations: Evidence for a common timing mechanism. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *21*, 3-18.
- Ivry, R. B., & Keele, S. W. (1989). Timing functions of the cerebellum. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *1*, 136–152.
- Ivry, R. B., & Spencer, R. M. C. (2004). The neural representation of time. *Current Opinion in Neurobiology*, *14*, 225-232.
- Jacobson, G. A., Rokni, D., & Yarom, Y. (2008). A model of the olivo-cerebellar system as a temporal pattern generator. *Trends in Neurosciences*, *31*, 617-625.
- Jeffress, L. A. (1948). A place theory of sound localization. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, *41*, 35-39.
- Jones, L. A., & Wearden, J. H. (2003). More is not necessarily better: Examining the nature of the temporal reference memory component in timing. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *56*, 321-343.
- Jones, M. R., & Boltz, M. (1989). Dynamic attending and responses to time. *Psychological Review*, *96*, 459-491.
- Jones, M. R., & McAuley, J. D. (2005). Time judgments in global temporal contexts. *Perception & Psychophysics*, *67*, 398-417.
- Kaernbach, C. (1991). Simple adaptive testing with the weighted up-down method. *Perception & Psychophysics*, *49*, 227-229.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Kant, I. (1781). *Kritik der reinen Vernunft*. Riga: Hartknoch.

- Karmarkar, U. R., & Buonomano, D. V. (2007). Timing in the absence of clocks: Encoding time in neural network states. *Neuron*, *53*, 1-12.
- Keele, S. W., Nicolletti, R., Ivry, R. I., & Pokorny, R. A. (1989). Mechanisms of perceptual timing: Beat-based or interval-based judgements? *Psychological Research*, *50*, 251-256.
- Killeen P. R., & Fetterman, J. G. (1988). A behavioral theory of timing. *Psychological Review*, *95*, 274-295.
- Killeen, P. R., & Weiss, N. (1987). Optimal timing and the Weber function. *Psychological Review*, *94*, 455–468.
- Kinchla, R. A. (1980). The measurement of attention. In R. S. Nickerson (Hrsg.), *Attention and performance VIII* (S. 213-238). Hillsdale: Erlbaum.
- Kingstone, A., Smilek, D., & Eastwood, J. D. (2009). Cognitive Ethology: A new approach for studying human cognition. *British Journal of Psychology*, *99*, 317–340.
- Koekkoek, S. K. E., Hulscher, H. C., Dortland, B. R., Hensbroek, R. A., Elgersma, Y., Ruigrok, T. J. H., und De Zeeuw, C. I. (2008). Cerebellar LTD and learning-dependent timing of conditioned eyelid responses. *Science*, *301*, 1736-1739.
- Ladanyi, M., & Dubrovsky, B. (1985). CNV and time estimation. *International Journal of Neuroscience*, *26*, 253–357.
- Lapid, E. D., Ulrich, R., & Rammsayer, T. (2008). On estimating the Difference Limen in duration discrimination tasks: A comparison of the 2AFC and the reminder task. *Perception & Psychophysics*, *70*, 291-305.
- Lejeune, H., & Wearden, J. H. (1991). The comparative psychology of fixed-interval responding: Some quantitative analyses. *Learning & Motivation*, *22*, 84-111.

- Levine, J. D., Funes, P., Dowse, H. B., & Hall, J. C. (2002). Resetting the circadian clock by social experience in *Drosophila melanogaster*. *Science*, *298*, 2010-2012.
- Lewis, P. A., & Miall, R. C. (2002). Brain activity during non-automatic motor production of discrete multi-second intervals. *Neuroreport*, *13*, 1731–1735.
- 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). Brain activation patterns during measurement of sub- and supra-second intervals. *Neuropsychologia*, *41*, 1583–1592.
- Lisman, J. E., & Idiart, M. A. P. (1995). Storage of  $7 \pm 2$  short-term memories in oscillatory subcycles. *Science*, *267*, 1512–1515.
- Lockhead, G. R. (2004). Absolute Judgements are relative: A reinterpretation of some psychophysical Ideas. *Review of General Psychology*, *8*, 265-272.
- Macar, F., & Vidal, F. (2003). The CNV peak: An index of decision making and temporal memory. *Psychophysiology*, *40*, 950–954.
- Macar, F., & Vidal, F. (2004). Event-related potentials as indices of time processing: A review. *Journal of Psychophysiology*, *18*, 89–104.
- MacDonald, C., & Meck, W. H. (2005). Differential effects of clozapine and haloperidol on interval timing in the supraseconds range. *Psychopharmacology*, *182*, 232–244.
- Mach, E. (1865). *Untersuchungen über den Zeitsinn des Ohres*. Wien: Akademie der Wissenschaften.
- Maier, A., Wilke, M., Aura, C., Zhu, C., Ye, F. Q., & Leopold, D. A. (2008). Divergence of fMRI and neural signals in V1 during perceptual suppression in the awake monkey. *Nature Neuroscience*, *11*, 1193-1200.



- Malapani, C., Dubois, B., Rancurel, G., & Gibbon, J. (1998). Cerebellar dysfunctions of temporal processing in the seconds range in humans. *Neuroreport*, *9*, 3907-3912.
- Marchman, J.N., (1969). Discrimination of brief temporal durations. *Psychological Records*, *19*, 83-92.
- Massaro, D. W., & Loftus, G. R. (1996). Sensory and perceptual storage. In E. L. Bjork & R. A. Bjork (Hrsg.), *Memory* (S. 67-99). San Diego: Academic Press.
- Matell, M. S., & Meck, W. H. (2000). Neuropsychological mechanisms of interval timing behavior. *BioEssays*, *22*, 94-103.
- Matell, M. S., King, G. R., & Meck, W. H. (2004). Differential modulation of clock speed by the administration of intermittent versus continuous cocaine. *Behavioral Neuroscience*, *118*, 150-156.
- Mattes, S., & Ulrich, R. (1998). Directed attention prolongs the perceived duration of a brief stimulus. *Perception & Psychophysics*, *60*, 1305-1317.
- McAuley, J. D., & Jones, M. R. (2003). Modeling effects of rhythmic context on perceived duration: A comparison of interval and entrainment approaches to short-interval timing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *29*, 1102-1125.
- McAuley, J. D., & Kidd, G. R. (1998). Effect of deviations from temporal expectations on tempo-discrimination of isochronous tone sequences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *24*, 1786-1800.
- McAuley, J. D., & Miller, N. S. (2007). Picking up the pace: Effects of global temporal context on sensitivity to the tempo of auditory sequences. *Perception & Psychophysics*, *69*, 709-718.

- McGavren, M. (1965). Memory of brief auditory durations in comparison discriminations. *Psychological Record, 15*, 249-260.
- Meck, W. H. (1996). Neuropharmacology of timing and time perception. *Cognitive Brain Research, 3*, 227-242.
- Meck, W. H., & Benson, A. M. (2002). Dissecting the brain's internal clock: How Frontal–Striatal circuitry keeps time and shifts attention. *Brain & Cognition, 48*, 195-211.
- Michon, J. A. (1985). The compleat time experiencer. In J. A. Michon & J. L. Jackson (Hrsg.), *Time, Mind, and Behavior* (S. 21-52). Berlin: Springer.
- Michon, J. A., & Jackson, J. L. (1985). Introduction: The psychology of time. In J. A. Michon & J. L. Jackson (Hrsg.), *Time, Mind, and Behavior* (S. 2-17). Berlin: Springer.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review, 63*, 81-97.
- Miller, N. S., & McAuley, J. D. (2005). Tempo sensitivity in isochronous tone sequences: The multiple-look model revisited. *Perception & Psychophysics, 67*, 1150-1160.
- Mori, S., & Ward, L. M. (1992). Intensity and frequency resolution: Masking of absolute identification and fixed and roving discrimination. *Journal of the Acoustical Society of America, 91*, 246-255.
- Müller, H. J., & Rabbitt, P. M. (1989). Reflexive and voluntary orienting of visual attention: Time course of activation and resistance to interruption. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 15*, 315-330.

- N'Diaye, K., Ragot, R., Garnero, L., & Pouthas, V. (2004). What is common to brain activity evoked by the perception of visual and auditory filled durations? A study with MEG and EEG co-recordings. *Cognitive Brain Research, 21*, 250–268.
- Nachmias, J. (2006). The role of virtual standards in visual discrimination. *Vision Research, 46*, 2456–2464.
- Nakajima, Y., ten Hoopen, G., Hilkuysen, G., & Sasaki, T. (1992). Time-shrinking: A discontinuity in the perception of auditory temporal patterns. *Perception & Psychophysics, 51*, 504-507.
- Nakajima, Y., ten Hoopen, G., Sasaki, T., Yamamoto, K., Kadota, M., Simons, M., & Suetomi, D. (2004). Time-shrinking: the process of unilateral temporal assimilation. *Perception, 33*, 1061-1079.
- Nakajima, Y., ten Hoopen, G., van der Wilk, R. (1991). A new illusion of time perception. *Music Perception, 8*, 431-448.
- Neisser, U. (1967). *Cognitive psychology*. New York: Appleton-Century-Crofts.
- Nordmark, J. O. (1986). Mechanisms of Frequency Discrimination. *The Journal of the Acoustical Society of America, 44*, 1533-1540.
- Owen, A. M., Doyon, J., Dagher, A., Sadikot, A., & Evans, A. C. (1998). Abnormal basal ganglia outflow in Parkinson's disease identified with PET. Implications for higher cortical functions. *Brain, 121*, 949-965.
- Pashler, H. (2001). Perception and production of brief durations: Beat-based versus interval-based timing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 27*, 485-493.
- Pashler, H. E., & Johnston, J. C. (1989). Chronometric evidence for central postponement in temporally overlapping tasks. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Human Experimental Psychology, 41*, 19–45.

- Pastor, M. A., Artieda, J., Jahanshahi, M., & Obeso, J. A. (1992). Time estimation and reproduction is abnormal in Parkinson's disease. *Brain, 115*, 211-225.
- Pecka, M., Brand, A., Behrend, O., & Grothe, B. (2008). Interaural time difference processing in the mammalian medial superior olive: The role of glycinergic inhibition. *Journal of Neuroscience, 28*, 6914–6925.
- Penton-Voak, I. S., Edwards, H., Percival, A., & Wearden, J. H. (1996). Speeding up an internal clock in humans? Effects of click trains on subjective duration. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes, 22*, 307-320.
- Pfeuty, M., Ragot, R., & Pouthas, V. (2003). Processes involved in tempo perception: A CNV analysis. *Psychophysiology, 40*, 69-76.
- Pfeuty, M., Ragot, R., & Pouthas, V. (2005). Relationship between CNV and timing of an upcoming event. *Neuroscience Letters, 382*, 106–111.
- Pfeuty, M., Ragot, R., & Pouthas, V. (2008). Brain activity during interval timing depends on sensory structure. *Brain Research, 1204*, 112-117.
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 32*, 3-25.
- Posner, M. I., Snyder, C. R., & Davidson, B. J. (1980). Attention and the detection of signals. *Journal of Experimental Psychology: General, 109*, 160-174.
- Pouthas, V., Garnero, L., Ferrandez, A.-M., & Renault, B. (2000). ERPs and PET analysis of time perception: Spatial and temporal brain mapping during visual discrimination tasks. *Human Brain Mapping, 10*, 49–60.
- 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, 3-18.
- Rammsayer, T. H. (1999). Neuropharmacological evidence for different timing mechanisms in humans. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 52, 273-286.
- Rammsayer, T. H., & Classen, W. (1997). Impaired temporal discrimination in Parkinson's disease: Temporal processing of brief durations as an indicator of degeneration of dopaminergic neurons in the basal ganglia. *International Journal of Neuroscience*, 91, 45-55.
- Rammsayer, T. H., & Leutner, D. (1996). Temporal discrimination as a function of marker duration. *Perception & Psychophysics*, 58, 1213-1223.
- Rammsayer, T. H., & Lima, S. D. (1991). Duration discrimination of filled and empty auditory intervals: Cognitive and perceptual factors. *Perception & Psychophysics*, 50, 565-574.
- Rammsayer, T. H., & Ulrich, R. (2001). Counting models of temporal discrimination. *Psychonomic Bulletin & Review*, 8, 270-277.
- Rammsayer, T. H., & Ulrich, R. (2005). No evidence for qualitative differences in the processing of short and long temporal intervals. *Acta Psychologica*, 120, 141-171.
- Rammsayer, T. H., & Wittkowski, K. M. (1990). Zeitfehler und Positionseffekt des Standardreizes bei der Diskrimination kurzer Zeitdauern. *Archiv für Psychologie*, 142, 81-89.
- Raymond, J. L., Lisberger, S. G., & Mauk, M. D. (1996). The cerebellum: A neuronal learning machine? *Science*, 272, 1126-113.
- Repp, B. K. (1992). Probing the cognitive representation of musical time: Structural constraints on the perception of timing perturbations. *Cognition*, 44, 241-281.

- Reppert, S. M., & Weaver, D. R. (2002). Coordination of circadian timing in mammals. *Nature*, *418*, 935-941.
- Rinkenauer, G., Mattes, S., & Ulrich, R. (1999). The surface-weight illusion: On the contribution of grip force to perceived heaviness. *Perception & Psychophysics*, *61*, 23-30.
- Rodríguez-Gironés, M. A., & Kacelnik, A. (2001). Relative importance of perceptual and mnemonic variance in human temporal bisection. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *54A*, 527-546.
- Roitman, M. F., van Dijk, G., Thiele, T. E., & Bernstein, I. L. (2001). Dopamine mediation of the feeding response to violations of spatial and temporal expectancies. *Behavioural Brain Research*, *122*, 193-199.
- Rolke, B., & Hofmann, P. (2007). Temporal uncertainty degrades perceptual processing. *Psychonomic Bulletin & Review*, *14*, 522-526.
- Rousseau, L., & Rousseau, R. (1996). Stop-reaction time and the internal clock. *Perception & Psychophysics*, *58*, 434-448.
- Russell, R., & Kirkpatrick, K. (2007). The role of temporal generalization in a temporal discrimination task. *Behavioural Processes*, *74*, 115-125.
- Santi, A., Miki, A., Hornyak, S., & Eidse, J. (2006). The perception of empty and filled time intervals by rats. *Behavioural Processes*, *71*, 144-156.
- Sasaki, T., Suetomi, D., Nakajima, Y., ten Hoopen, G., (2002). Time-shrinking, its propagation, and Gestalt principles. *Perception & Psychophysics*, *64*, 919-931.
- Schulze, H. H. (1978). The detectability of local and global displacements in regular rhythmic patterns. *Psychological Research*, *40*, 173-181.

- Schulze, H. H. (1989). The perception of temporal deviations in isochronic patterns. *Perception & Psychophysics, 45*, 291-296.
- Seifried, T., & Ulrich, R. (im Druck). Does the asymmetry effect inflate the temporal expansion of odd stimuli? *Psychological Research*.
- Shaw, M. L. (1984). Division of attention among spatial locations: A fundamental difference between detection of letters and detection of luminance increments. In H. Bouma & D. G. Bouwhuis (Hrsg.), *Attention and performance X* (S. 109-121). London: Erlbaum.
- Shiu, L.-P., & Pashler, H. (1994). Negligible effect of spatial precuing on identification of single digits. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 20*, 1037-1054.
- Small, A. M., & Campbell, R. A. (1962). Temporal differential sensitivity for auditory stimuli. *American Journal of Psychology, 75*, 401-410.
- Staddon, J. E. R., & Higa, J. J. (1999). Time and memory: Towards a pacemaker-free theory of interval timing. *Journal of Experimental Analysis of Behavior, 71*, 215-251.
- Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages extensions of Donders' method. *Acta Psychologica, 30*, 276-315.
- Stokkan, K.A., Yamazaki, S., Tei, H., Sakaki, Y., & Menaker, M. (2001). Entrainment of the circadian clock in the liver by feeding. *Science, 291*, 490-493.
- Sussman, E. S., & Gumenyuk, V. (2005). Organization of sequential sounds in auditory memory. *Neuroreport, 19*, 1519-1523.
- Swets, J. A. (1961). Is there a sensory threshold? When the effects of the observer's response criterion are isolated, a sensory limitation is not evident. *Science, 134*, 168-177.

- ten Hoopen, G., & Akerboom, S. (1983). The subjective tempo difference between interaural and monaural sequences as a function of sequence length. *Perception & Psychophysics*, *34*, 465-469.
- ten Hoopen, G., Boelaarts, L., Gruisen, A., Apon, I., Donders, K., Mul, N., & Akerboom, S. (1994). The detection of anisochrony in monaural and interaural sound sequences. *Perception & Psychophysics*, *56*, 110-120.
- ten Hoopen, G., Hartsuiker, R., Sasaki, T., Nakajima, Y., Tanaka, M., & Tsumura, T. (1995). Auditory isochrony: Time-shrinking and temporal patterns. *Perception*, *24*, 577-593.
- Treisman, M., Faulkner, A. Naish, P. L. N., & Brogan, D. (1990). The internal clock: Evidence for a temporal oscillator underlying time perception with some estimates of its characteristic frequency. *Perception*, *19*, 705-743.
- Tse, P. U., Intriligator, J., Rivest, J., & Cavanagh, P. (2004). Attention and the subjective expansion of time. *Perception & Psychophysics*, *66*, 1171-1189.
- Ulrich, R., & Miller, J. (2008). Response grouping in the psychological refractory period (PRP) paradigm: Models and contamination effects. *Cognitive Psychology*, *57*, 75-121.
- Ulrich, R., Nitschke, J., & Rammsayer, T. H. (2006). Crossmodal temporal discrimination: Assessing the predictions of a general pacemaker-counter model. *Perception & Psychophysics*, *68*, 1140-1152.
- Van Allen, M. W., Benton, A. L., & Gordon, M. C. (1966). Temporal discrimination in brain-damaged patients. *Neuropsychologia*, *4*, 159-167.
- Vierordt, K. (1868). *Der Zeitsinn nach Versuchen*. Tübingen: Laupp.
- Vul, E., Harris, C., Winkielman, P., & Pashler, H. (im Druck). Voodoo correlations in social neuroscience. *Perspectives on Psychological Science*.



- Wearden, J. H. (1991). Do humans possess an internal clock with scalar timing properties? *Learning & Motivation*, 22, 59-83.
- Wearden, J. H. (1993). Decisions and memories in human timing. *Psychologia Belgica*, 33, 241-253.
- Wearden, J. H. (1999). "Beyond the fields we know...": exploring and developing scalar timing theory. *Behavioural Processes*, 45, 3-21.
- Wearden, J. H. (2004). Decision processes in models of Timing. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 64, 303-317.
- Wearden, J. H., & Grindrod, R. (2003). Manipulating decision processes in the human scalar timing system. *Behavioural Processes*, 61, 47-56.
- Wearden, J. H., & Penton-Voak, I. S. (1995). Feeling the heat: Body temperature and the rate of subjective time. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Comparative and Psychological Psychology*, 48, 129-141.
- Wiswede, D., Rüsseler, J., & Münte, T. F. (2007). Serial position effects in free memory recall - An ERP-study. *Biological Psychology*, 75, 185-193.
- Woodrow, H. (1934). The temporal indifference interval determined by the method of mean error. *Journal of Experimental Psychology*, 17, 167-188.
- Woodrow, H. (1935). The effect of practice on time-order errors in the comparison of temporal intervals. *Psychological Review*, 42, 127-152.
- Woodworth, R. S., & Schlosberg, H. (1954). *Experimental psychology*. New York: Holt.
- Yabe, H., Koyama, S., Kakigi, R., Gunji, A., Tervaniemi, M., Sato, Y., & Kaneko, S. (2001). Automatic discriminative sensitivity inside temporal window of sensory memory as a function of time. *Cognitive Brain Research*, 12, 39-48.

Zakay, D., & Block, R. A. (1995). An attentional gate model of prospective time estimation. In M. Richelle, V. Keyser, G. d'Ydewalle, & A. Vandierendonck (Hrsg.), *Time and the dynamic control of behaviour* (S. 167-178). Liege: Universite de Liege.

# Lebenslauf

Stefan Blaschke

---

Geboren am: 9. September 1974

Geburtsort: Karlshafen

Anschrift: Rosenwinkel 80  
37081 Göttingen

## Schulbildung

---

1980 – 1985 Grundschule Amelunxen

1985 – 1994 Städtisches Gymnasium Beverungen (Abitur)

## Hochschulstudium

---

### Katholische Theologie (Diplom)

1994 – 1996 (Grundstudium)

Katholisch-Theologische-Fakultät Paderborn

1996 – 2000 (Hauptstudium)

Eberhard – Karls – Universität Tübingen

### Psychologie (Diplom)

2000 – 2005

Eberhard – Karls – Universität Tübingen

### Psychologie (Promotion)

2005 – 2009

Georg-Elias-Müller-Institut für Psychologie  
der Georg-August-Universität Göttingen

Göttingen, im März 2009