



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Rhythmizität der Wahrnehmung: Die Auswirkungen von
auditiver und visueller rhythmischer Stimulation auf die
Wahrnehmung von auditiven und visuellen Reizen an
der Wahrnehmungsschwelle.“

verfasst von / submitted by
Simon Dominique Pfister, BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Science (Msc)

Wien, 2021 / Vienna, 2021

Studienkennzahl lt. Studienblatt / degree programme code as it appears on the student record sheet: UA 066840

Studienrichtung lt. Studienblatt / degree programme as it appears on the student record sheet: Masterstudium Psychologie

Betreut von / Supervisor: Univ.-Prof. Dr. Ulrich Ansorge

Mitbetreut von / Co-Supervisor: Mag. Dr. Ulrich Pomper

Danksagung

Meinem Betreuer Prof. Dr. Ulrich Ansorge danke ich für die freundliche und fundierte Unterstützung bei der Fertigstellung meiner Masterarbeit. Weiters möchte ich mich bei Dr. Ulrich Pomper für die Möglichkeit an seinem Projekt mitzuarbeiten und seine herzliche, engagierte Unterstützung bedanken. Außerdem bei meiner Familie, die mich über die Jahre meines Studiums immer unterstützt hat, in schwierigen Zeiten für mich da war und mir stets Freiheit bei meinen Entscheidungen gewährt hat. Ich weiß dass dies keine Selbstverständlichkeit ist. Zu guter Letzt möchte ich meiner Lebensgefährtin, Janina, danken. Dafür dass ich bei ihr immer ein offenes Ohr finde und ich so akzeptiert werde wie ich bin.

Simon Pfister, 2021

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
1. Einleitung	1
2. Methode	9
2.1. Teilnehmer*innen	9
2.2. Geräte und Reize	10
2.3. Aufgabe und Ablauf	11
2.4. Datenanalyse	17
3. Ergebnisse	19
3.1. Reaktionszeiten	19
3.2. Trefferraten	22
3.2.1. Catch-Trial-Performance	25
4. Diskussion	27
4.1. Phase	28
4.2. Entrainment-Modalität	29
4.3. Zielreiz-Modalität	30
4.4. Limitationen	30
4.5. Implikationen und zukünftige Forschung	31
4.6. Konklusion	32
Literatur	33
A. Anhang	43
A.1. Kurzfassung	43
A.2. Abstract	44

1. Einleitung

Die Frage, wie Informationen im Gehirn repräsentiert, verarbeitet und weitergeleitet werden, ist eine der grundlegendsten der kognitiven Neurowissenschaften. Die Umwelt konfrontiert den Menschen jeden Tag mit neuen Sinneseindrücken, die sich nie exakt gleich wiederholen. Wie ist das menschliche Gehirn dazu in der Lage, diesen, sich ständig verändernden, komplexen Informationsfluss suffizient zu verarbeiten? Eine über lange Zeit sehr populäre Idee ist die der Großmutterneuronen, bei der jede Information aus der Umwelt durch ein Neuron repräsentiert wird, welches genau dann feuert, wenn das für das Neuron spezifische Objekt wahrgenommen wird (Bowers, 2009). Dieses Paradigma konnte sich aber, aufgrund der Vielzahl an alltäglichen Sinneseindrücken, nicht als hinreichende Erklärung halten. Daraufhin entwickelte im Jahr 1949 Donald Olding Hebb das Theorem der Hebbschen-Ensembles, der Strukturellen-Netzwerke. Der Merksatz "Neurons that fire together, wire together" wurde bekannt (Hebb, 2005). Hebb versuchte in seiner Theorie die Arbeitsweise des Gehirns durch die Ausbildung von neuronalen Ensembles, durch Synapsenbildung, zu erklären. Seine Idee war die, dass bestimmte Neuronen, durch die gebildeten synaptischen Verbindungen, strukturelle Netzwerke darstellten, die ein Objekt in der Umwelt repräsentieren können. Jedoch stellte sich auch dieses Theorem als unzulänglich heraus, um der Vielseitigkeit und Komplexität der zu verarbeitenden Sinneseindrücke gerecht zu werden.

Das Paradigma der neuronalen Oszillationen ist das aktuellste und dazu in der Lage, die Verarbeitung der Mannigfaltigkeit an Wahrnehmungsprozessen im Gehirn zu erklären (Fries, 2005). Hierbei wird angenommen, dass jedes Neuron dazu fähig ist, eine Vielzahl an Rhythmen zu repräsentieren. Mit neuronalen Rhythmen ist hier der wechselnde Zustand des Neurons zwischen Aktionspotential (Feuern) und Ruhepotential (nicht Feuern) gemeint. Der kurze Zeitraum in dem das Neuron nicht in der Lage ist auf ankommende Reize zu reagieren wird als Refraktärphase bezeichnet. So wechseln sich für jedes Neuron Zeitfenster ab, in denen es einmal leicht erregbar, empfänglich für Reize, und einmal nicht oder nur schwer erregbar und weniger empfänglich für die Verarbeitung von ankommenden Reizen ist (Schroeder et al., 2008). Aber auch im Ruhezustand, wenn keine ankommenden Reize wahrgenommen werden, sind unsere sensorischen Systeme aktiv und ein

1. Einleitung

bestimmtes Muster neuronaler Oszillation ist im Gehirn präsent (Lakatos et al., 2005). Ganze Ensembles von Neuronen sind dazu in der Lage, gemeinsam ein rhythmisches Aktivitätsmuster zu verfolgen. Man spricht deshalb nicht mehr von strukturellen, sondern von funktionellen Netzwerken. Ein beliebiges Ensemble von Neuronen unterliegt einem gemeinsamen, synchronen Feuer-Rhythmus, einer gemeinsamen Funktion. Die Zeitfenster in denen die einzelnen Neuronen eines solchen Ensembles leicht erregbar sind, öffnen und schließen sich also synchron. Durch die nahezu unlimitierte Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten von Neuronenkonstellation und Aktivitätsrhythmus kann dieses Theorem einer neuronalen Repräsentation der Umwelt durch das Gehirn gerecht werden.

Neuronale Oszillationen wurden oft mit der Wahrnehmung in Verbindung gebracht (Busch et al., 2009; Busch & VanRullen, 2010; Drewes & VanRullen, 2011; Henry & Obleser, 2012; Neuling et al., 2012). Die Geschwindigkeit von Alpha-Band Oszillationen (8 - 13 Hz) im Gehirn, beeinflusst beispielsweise die zeitliche Auflösung der Wahrnehmung von visuellen Reizen an der Wahrnehmungsschwelle (Dugue et al., 2011; Mathewson et al., 2009; Nunn & Osselton, 1974; Samaha et al., 2015; Samaha & Postle, 2015). Treten zwei visuelle Reize innerhalb eines einzelnen Alpha-Zyklus auf, werden diese mit hoher Wahrscheinlichkeit als ein einzelner Reiz wahrgenommen (Samaha & Postle, 2015). Die langsameren Reaktionszeiten bei alten Menschen könnten auf die langsamere Frequenz der Alpha-Band Oszillationen zurückzuführen sein (Surwillo, 1961). Neuronale Oszillationen stellen also eine Art der Kommunikation über die Areale des Gehirns hinweg dar. Die Rolle von neuronalen Oszillationen scheint vielseitig und noch nicht vollständig erklärbar zu sein. So konnte gezeigt werden, dass eine Zunahme von neuronalen Oszillationen im Alpha-Band und niedrigeren Beta-Band (12 - 30 Hz) Bereich mit einer Art von Leerlauf und eine Abnahme mit Reizverarbeitung und Aufmerksamkeit zusammenhängt (Pfurtscheller et al., 1996).

Nicht nur auf neuronaler Ebene, sondern auch in der Wahrnehmung und im Verhalten bei Mensch und Tier, sind Rhythmen allgegenwärtig (Klump & Langemann, 1992; Kotz et al., 2018; Lamminmäki et al., 2014; Landau & Fries, 2012; Peelle & Davis, 2012). Die sakkadischen Augenbewegungen, der Atem- und Herzrhythmus oder der zirkadiane Rhythmus von Schlaf und Wachen sind nur einige Beispiele (Kotz et al., 2018; Landau & Fries, 2012). Das Gleiche gilt für Reize aus der Umwelt. Es gibt zahlreiche Beispiele für Rhythmik in alltäglichen Situationen die sich durch bestimmte Frequenzen auszeichnen. Der Rhythmus von Sprache oder Musik, von Schritten oder der Wechsel von Tag und Nacht. Das Beispiel für auditive Rhythmen schlechthin ist die Sprache, deren syllabischer Rhythmus sich meist im Theta-Band Bereich (4 - 8 Hz) bewegt (Ding & Simon, 2014; Pellegrino et al., 2011). Alle diese Rhythmen werden von den Sinnesorganen wahrgenommen, im Gehirn

repräsentiert und verarbeitet.

Diese ubiquitären Rhythmen können entweder extern, also aus der Umwelt, oder intern, also aus dem Körper der wahrnehmenden Person selbst stammen (Lakatos et al., 2019). Ein interner Rhythmus kann zum Beispiel der eigene Herzschlag oder die Atmung sein. Bei diesen internen Rhythmen sind solche zu unterscheiden, die willentlich beeinflussbar sind, wie die Atmung, und solche, die nicht willentlich beeinflussbar sind, wie Verdauungsprozesse. Die Bedeutung solcher interner Rhythmen zeigt sich, wenn man die Wirkung von Meditation auf die Aufmerksamkeit (Lutz et al., 2009), die Rolle der Herzfrequenzvariabilität auf die Emotionsregulation (Mather & Thayer, 2018) oder den Einfluss des Herzschlags auf die visuelle Aufmerksamkeit (Park et al., 2014) betrachtet. Der Effekt von internen, volitional beeinflussbaren Rhythmen, wie der Atmung, wird sich in therapeutischen Methoden, durch Achtsamkeit, Meditation oder Atemtechniken, zunutze gemacht (Herrero et al., 2018). Die willentliche Beeinflussung des Atemrhythmus scheint eine übergeordnete Instanz für die oszillatorische Struktur des Gehirns einnehmen zu können (Herrero et al., 2018). Ein externer Rhythmus kann beispielsweise die Sprache sein, die immer einen individuellen, vom Sprecher und der gesprochenen Sprache abhängigen Rhythmus aufweist (Peelle & Davis, 2012; Zion Golumbic et al., 2013).

Der direkte Einfluss von periodischen Reizen auf unser Gehirn wird als neuronales Entrainment (NE) bezeichnet (Lakatos et al., 2019). NE ist ein unidirektionaler Prozess, bei dem Wellenlänge und Amplitude der intrinsischen neuronalen Schwingungen von einem externen periodischen Reiz bestimmt werden, also ein Mitschwingen neuronaler Aktivität mit der zeitlichen Struktur von externen Reizen. NE konnte sowohl für auditive als auch visuelle Rhythmen demonstriert werden. So führt beispielsweise das Hören eines rhythmischen Musikstücks zu NE von auditorischen und anderen Hirnarealen (Ding et al., 2017). Diese Synchronisation ist möglicherweise dazu dienlich, die Wahrnehmung zu verbessern (Busch & VanRullen, 2010; Lakatos et al., 2013). Es wird vermutet, dass durch die Angleichung der neuronalen Oszillationen an einen relevanten externen Reiz die Zeitpunkte hoher neuronaler Erregbarkeit so angepasst werden, dass der Zielreiz optimal wahrgenommen werden kann. Das Gehirn lernt dabei Regelmäßigkeiten in der Umwelt zu erkennen und auf deren Basis Vorhersagen über die Umgebung zu machen. Ein anschauliches Beispiel dafür ist das Tennisspiel, bei dem der*die Spieler*in Vorhersagen darüber machen muss, wo und wann der Ball, der rhythmisch hin und her gespielt wird, zu ihm*ihr zurück gespielt wird. Genauso gleichen auch bestimmte Hirnareale ihre Oszillationen an die sakkadischen Augenbewegungen an (Bartlett et al., 2011; Hoffman et al., 2013; Rajkai et al., 2007). Es konnte gezeigt werden, dass nach Entrainment mit einem visuellen,

1. Einleitung

rhythmischen Reiz, die Wahrnehmung von visuellen Zielreizen sich zu bestimmten Zeitpunkten verbesserte (Mathewson et al., 2009; Mathewson et al., 2010). NE ist also stark mit Aufmerksamkeit verbunden und setzt einen rhythmischen Reiz aus der Umwelt voraus (Lakatos et al., 2008). Es findet eine zeitliche Orientierung der Aufmerksamkeit statt. Durch diese Rhythmizität bekommt die Wahrnehmung einen prädiktiven Charakter (Pickering & Garrod, 2013). Das Resultat von NE könnte als eine Art Erwartungshaltung des Gehirns an die Umwelt verstanden werden.

Möglicherweise kann durch diesen Prozess jedoch nicht nur die Wahrnehmung eines Signals verbessert werden, sondern auch dessen Wahrnehmung ausgeblendet werden (Zion Golumbic et al., 2013). Ein Beispiel hierzu wäre das rhythmische Geräusch eines tropfenden Wasserhahnes, das ignoriert werden kann, um die Aufmerksamkeit auf eine relevante Tätigkeit zu richten. Auch dem bekannten "Cocktail-Party-Effekt", bei dem der Hörer dazu in der Lage ist, in Situationen mit mehreren Sprechern oder Geräuschquellen, die Aufmerksamkeit selektiv auf eine einzelne zu richten und alle anderen auszublenden könnten Prozesse des NE zugrunde liegen.

Wenn man sich den aktuellen Stand der Aufmerksamkeitsforschung ansieht, fällt auf, dass sich der größte Teil auf die räumliche Aufmerksamkeit richtet. Ein relevanter Parameter der Aufmerksamkeit, neben Orten, Objekten, Sinnesmodalitäten oder Merkmalen, ist der Verlauf der Aufmerksamkeit über die Zeit. Diese zeitliche Aufmerksamkeit spielt eine große Rolle für das Verständnis der Wahrnehmung. Insbesondere seit der Entdeckung des Paradigmas der neuronalen Oszillationen in den Neurowissenschaften ist klar, dass die Aufmerksamkeit über die Zeit nicht linear ist, sondern Schwankungen unterliegt (Landau & Fries, 2012; Miniussi et al., 1999). Um dieses Schwingen der Wahrnehmungsleistung über die Zeit und den Zusammenhang von neuronalen Oszillationen und Aufmerksamkeit besser verstehen und untersuchen zu können, bietet sich das Phänomen des NE an. Es wird vermutet, dass es durch rhythmische Stimulation möglich ist, nicht invasiv einen bestimmten Rhythmus auf neuronaler Ebene zu induzieren, der sich gezielt auf die Wahrnehmung auswirken und eine Schwankung dieser hervorrufen kann. Wiederholt konnte gezeigt werden, dass rhythmischer Input die Wahrnehmungsleistung verbesserte (Henry & Obleser, 2012; Jones et al., 2006; Jones et al., 2002; Rohenkohl & Nobre, 2011; Rohenkohl et al., 2011). Diese Studien konzentrierten sich aber auf Reize, welche während dem rhythmischen Entrainmentreiz dargeboten wurden. Es wäre jedoch auch von Relevanz Reize nach Ende der rhythmischen Stimulation zu betrachten, um der Frage nachzugehen ob das Gehirn solche Rhythmen aktiv aufgreift und weiterführt oder ob NE lediglich einen passiven Resonanzmechanismus darstellt. Während viele Studien die Zielreize während der rhythmischen Stimulation präsentieren, sind solche, bei denen die Zielreize nach dem Ende des Entrainmentreizes präsentiert wurden dagegen wenige

und nutzten, mit wenigen Ausnahmen, meist kleine Stichproben (Farahbod et al., 2020; Hickok et al., 2015; Lin et al., 2021; Mathewson et al., 2010; Mathewson et al., 2012; Simon & Wallace, 2017).

Hickok et al. (2015) untersuchten eben diese prädiktive Komponente von NE. Sie konnten zeigen, dass vorhergehende auditive rhythmische Stimulation einen Einfluss auf die nachfolgende auditive Wahrnehmung hat. Auditive rhythmische Stimulation in Form von rhythmischem weißem Rauschen führte zu einer nachfolgenden Oszillation in der Wahrnehmungsleistung von auditiven Zielreizen. Zur Beobachtung der auditiven Wahrnehmungsschwankung wurden neun Zeitintervalle, zu vier Phasenlagen, der Zielreizpräsentation verwendet. Als Phase wird der Abstand vom Ursprung der Periode der Schwingung bezeichnet. Meist ist das der Schnittpunkt mit der x-Achse (vgl. Abbildung 1). Drei der Zielreiz-Zeitpunkte waren In-Phase (IP) und die übrigen sechs Zielreiz-Zeitpunkte waren Off-Phase (OP) mit der vorangegangenen rhythmischen Stimulation. Diese vier Phasenbedingungen repräsentieren die Fenster von hoher oder niedriger Erregbarkeit der neuronalen Ensembles. Die Idee ist, dass Zielreize, welche In-Phase mit der vorhergehenden rhythmischen Stimulation präsentiert werden, aufgrund der Schwankung der auditiven Wahrnehmungsmodalität besser wahrgenommen werden, als Zielreize die Off-Phase gezeigt werden. Als rhythmische Stimulation wurde ein periodisches weißes Rauschen bei einer Frequenz von 3 Hz und einer Dauer von 3,000 ms gewählt. Bei den Zielreizen handelte es sich um kurze Töne, die in ein kontinuierliches weißes Rauschen von 1,000 ms Dauer eingebettet waren. Mittels Tastendruck musste signalisiert werden, ob ein Ton wahrgenommen wurde oder nicht. Bemerkenswert ist, dass nur die Frequenz, aber nicht die Phase der Aufmerksamkeitsschwankung mit der vorangehenden rhythmischen Stimulation übereinstimmte. Diese zeitliche Verschiebung konnte auch von Bauer et al. (2021) sowie Farahbod et al. (2020) in einer kreuzmodalen Bedingung beobachtet werden. Ein rhythmischer auditiver Reiz bewirkte nachfolgend eine rhythmische Schwankung der auditiven Wahrnehmungsleistung, die zeitlich versetzt war aber die gleiche Frequenz repräsentierte. Weiter replizierten Farahbod et al. (2020) das Experiment von Hickok et al. (2015), und betrachteten zusätzlich mehrere Frequenzbänder (2 - 32 Hz) des Entrainmentreizes. Sie konnten in diesem Experiment feststellen, dass die Phasenlage nur bei Frequenzen bis 5 Hz einen Effekt zeigte. Die Erkenntnislage zum Effekt der Phasenlage bei rhythmischer Stimulation auf die Wahrnehmungsleistung ist jedoch alles andere als eindeutig, da auch Studien mit Null-Findings existieren (Benwell et al., 2017; Ruzzoli et al., 2019; Vigué-Guix et al., 2020).

Hickok et al. (2015) konzentrierten sich in ihrer Forschung ausschließlich auf die auditive Wahrnehmungsmodalität. Es blieb die Frage offen, ob sich auch durch einen visuellen rhythmischen Reiz eine rhythmische Schwankung der visuellen

1. Einleitung

beziehungsweise auditiven Wahrnehmungsleistung erzeugen lässt. Zudem war die Stichprobengröße von fünf Teilnehmer*innen nicht ideal. Daher entschieden wir uns, in einem ähnlichen Experiment zusätzlich die visuelle und somit auch die kreuzmodale Aufmerksamkeit zu untersuchen. Kreuzmodale Aufmerksamkeit spielt beispielsweise sowohl bei der Sprachakquirierung bei Kindern als auch beim Sprachverständnis eine wichtige Rolle. Dabei müssen sowohl akustische als auch visuelle Informationen der Sprache integriert werden (Munhall et al., 2004; Power et al., 2012). Diese kreuzmodale Verbindung von akustischer und visueller Information wird auch beim sogenannten McGurk-Effekt deutlich, der zeigt, dass die auditive Information beim Sprachverständnis durch die visuelle Information der Lippenbewegungen beeinflusst wird (Brochard et al., 2013; McGurk & MacDonald, 1976). Bauer et al. (2021) konnten zeigen, dass auditive rhythmische Stimulation zu Schwankungen der Wahrnehmung von visuellen Zielreizen führen kann, was für eine kreuzmodale Wirkweise von rhythmischer Stimulation spricht. Rhythmen scheinen aber in der auditiven Modalität häufiger vertreten zu sein als in der visuellen Modalität, was dafür sprechen könnte, dass in der auditiven Sinnesmodalität die Stimulation effektiver und häufiger sein könnte als in der visuellen Sinnesmodalität. Bendixen et al. (2012) legen dem die evolutionsbiologische Hypothese zugrunde, dass sich auditive Information immer über die Zeit entfaltet, während das für visuelle Information weniger der Fall ist.

Erstens stellte sich uns die Frage, ob nach auditivem, beziehungsweise visuellem Entrainment, die Aufmerksamkeit global, für alle Sinnesmodalitäten synchron, schwankt. Zweitens könnte auditives, beziehungsweise visuelles Entrainment, dazu führen, dass die Aufmerksamkeitsschwankung selektiv nur die auditive, beziehungsweise nur die visuelle Wahrnehmung, betrifft, oder sogar die Aufmerksamkeit in den beiden Modalitäten asynchron zu schwanken beginnt. Drittens mussten wir auch in Erwägung ziehen, dass die rhythmische Stimulation keinen Einfluss auf die Aufmerksamkeit haben könnte. Es ergaben sich aus diesen Fragestellungen drei Hypothesen für jede Entrainment-Modalität (EM). Drei zur auditiven Entrainment-Modalität (EMa) und drei zur visuellen Entrainment-Modalität (EMv).

H0/EMa: Es besteht kein systematischer Zusammenhang zwischen der Wahrnehmungsleistung in der auditiven und der visuellen Modalität nach rhythmischer auditiver Stimulation.

H1/EMa: Eventuell erzeugte Aufmerksamkeitsschwankungen sind global, d.h. auditive und visuelle Wahrnehmungsleistung schwanken parallel.

H2/EMa: Eventuell erzeugte Aufmerksamkeitsschwankungen sind modalitätsspezifisch und führen zu wechselseitiger Inhibition in der visuellen

Modalität. Die auditive und die visuelle Wahrnehmungsleistung schwankt also asynchron.

H0/EMv: Es besteht kein systematischer Zusammenhang zwischen der Wahrnehmungsleistung in der auditiven und der visuellen Modalität nach rhythmischer visueller Stimulation.

H1/EMv: Eventuell erzeugte Aufmerksamkeitsschwankungen sind global, d.h. auditive und visuelle Wahrnehmungsleistung schwanken parallel.

H2/EMv: Eventuell erzeugte Aufmerksamkeitsschwankungen sind modalitätsspezifisch und führen zu wechselseitiger Inhibition in der auditiven Modalität. Die auditive und die visuelle Wahrnehmungsleistung schwankt also asynchron.

2. Methode

2.1. Teilnehmer*innen

Im Vorfeld zur vorliegenden Studie wurde eine Pilotstudie durchgeführt, welche fünfundzwanzig Teilnehmer*innen umfasste. Diese konnte aufgrund der Pandemie (COVID-19) nicht im Labor unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt werden, sondern nur mit Kursteilnehmer*innen zu Hause am eigenen Computer. Anders als in der vorliegenden Studie nahmen die Teilnehmer*innen nur an jeweils einer Hälfte des Experiments teil, wodurch die EM einen Zwischensubjektfaktor darstellte. Daher waren die Ergebnisse dieser Pilotstudie nur bedingt aussagekräftig. Es wurden dennoch einige interessante Effekte, wie beispielsweise ein signifikanter Effekt des Faktors Phase bei auditiver rhythmischer Stimulation mit auditiven Zielreizen, gefunden. Die vorliegende Studie möchte diese Effekte unter kontrollierten Bedingungen im Labor erneut betrachten. Dabei wurde wieder auf eine Stichprobengröße von fünfundzwanzig Teilnehmer*innen abgezielt.

Neunundzwanzig gesunde Personen meldeten sich für das Experiment an. Sie wurden über das *Labs-System* der Universität Wien und persönlich rekrutiert. Sie erhielten eine Entschädigung von je 10 Euro oder Kurs-Credits für jede der zwei Sitzungen des Experiments. Alle verfügten über normales oder korrigiert-normales Seh- und Hörvermögen. Die Teilnehmer*innen wurden gemäß den etablierten ethischen Standards behandelt. Vor Beginn wurden Instruktionen gegeben und die Zustimmung zur Teilnahme in schriftlicher Form eingeholt. Den Teilnehmer*innen wurde vermittelt, dass sie das Experiment jederzeit ohne Angabe von Gründen abbrechen können. Zwei Versuchspersonen erschienen nur zum ersten Teil des Experiments, was zu unvollständigen Datensätzen führte, die ausgeschlossen wurden. Ein weiterer Datensatz wurde nicht korrekt abgespeichert und musste aufgrund mangelnder Daten exkludiert werden. Weiterhin gab es fünf Teilnehmer*innen, deren Catch-Trial-Performance in mindestens einem Teil des Experiments den festgelegten Cut-Off von 75% unterschritt. Dies bedeutet, dass weniger als 75% der Durchgänge, welche keinen Zielreiz enthielten, korrekt als solche erkannt wurden und wurde bereits in der Pilotstudie so gehandhabt. Die kompletten Datensätze dieser fünf Teilnehmer*innen wurden von der Analyse ausgeschlossen. Nach Ausschluss dieser insgesamt acht Fälle ergab sich eine finale Stichprobengröße von N

2. Methode

= 21 mit einem Alter zwischen 20 und 30 Jahren ($M_{age} = 24.10$ Jahre; $SD_{age} = 3.13$ Jahre). Acht dieser Teilnehmer*innen bezeichneten sich als männlich und dreizehn als weiblich. Sechs führten zuerst die experimentelle Bedingung mit visueller Entrainment-Modalität durch und fünfzehn begannen mit dem auditiven Teil.

2.2. Geräte und Reize

Geräte. Das Experiment wurde in Open Sesame Vers. 3.1 programmiert und durchgeführt (Mathôt et al., 2012). Es lief auf Lenovo Think Centre (Intel i5 Chip 3GHz, 8GB Ram) Computern mit AOC 27 Zoll LCD Monitoren mit einer Bildwiederholrate von 60 Hz auf einem Windows 10/ 64 Bit System. Für die auditiven Reize wurden Panasonic RP-HT 265 Kopfhörer verwendet. Die Lautstärke war auf ein subjektiv angenehmes Niveau eingestellt, das über alle Durchläufe und Versuchspersonen konstant gehalten wurde (Andreou et al., 2015; Auksztulewicz et al., 2017; Pomper et al., 2020; Sohoglu & Chait, 2016). An jedem Computer war eine Kinnstütze installiert, um einen standardisierten Abstand von 57 cm zwischen Auge und Display und eine einheitliche Höhe zu gewährleisten. In der Mitte des Bildschirms wurde in jedem Durchgang ein schwarzer Fixationspunkt (0.3° visual angle) präsentiert.

Reize. *Entrainment-Modalität.* Es wurde sowohl die auditive als auch die visuelle Entrainment-Modalität betrachtet. Als auditiver Entrainmentreiz wurde, basierend auf dem Experiment von Hickok et al. (2015), ein rhythmisches weißes Rauschen, welches bei 3 Hz amplitudenmoduliert war, mit 100% Modulationstiefe verwendet. Die Frequenz von 3 Hz wurde bewusst gewählt, da sie langsamen Frequenzen aus dem Alltag, wie der Sprache, ähnelt. Die auditive rhythmische Stimulation dauerte insgesamt 3,000 ms. Die Dauer von 3,000 ms, mit 10 ms Anschwellen und 10 ms Abklingen, entspricht neun Phasenzyklen von je 333 ms. Als visueller Entrainmentreiz wurde in der Mitte des Bildschirms ein Quadrat (Größe: 6.0256° visual angle) gezeigt, welches rhythmisch in weiß (Luminanz: 17.3 cd/m²) und dunkelgrau (10.2 cd/m²) auf hellgrauem Hintergrund (14.7 cd/m²) periodisch flackerte. Das Flackern hatte eine Frequenz von 3 Hz und eine Gesamtdauer von 3,000 ms, was neun Phasenzyklen bei 3 Hz entspricht. Die visuellen Entrainmentreize waren nicht verrauscht und schwollen weder an noch ab.

Zielreiz-Modalität (engl. Targetstimulus-modality, TM). Die Zielreize wurden mit Open Sesame Vers. 3.1 erstellt (Mathôt et al., 2012). Sie folgten auf die rhythmische Stimulation und waren in ein kontinuierliches, nicht rhythmisches weißes Rauschen, mit einer Dauer von 1,200 ms, eingebettet. Es wurden drei Zielreizbedingungen verwendet. Durchgänge mit auditivem Zielreiz (TMa), Durchgänge mit visuellem Zielreiz (TMv) und Durchgänge in denen kein Zielreiz (Catch-Trials) dargeboten

wurde. Die auditiven Zielreize bestanden aus einem hohen (660 Hz) oder einem tiefen (880 Hz) Sinuston, mit einer Dauer von 50 ms. Sie wurden über Kopfhörer präsentiert. Die Intensität der auditiven Zielreize wurde vor dem eigentlichen Experiment individuell auf die individuelle Wahrnehmungsschwelle (50% Trefferrate) durch eine einfache Up-and-Down Schwellenwert Bestimmung festgelegt. Der visuelle Zielreiz war ein zentrales weißes Quadrat (1.0052° visual angle) auf einem hellgrauen Hintergrund (14.7 cd/m^2), das in der Mitte des Bildschirms präsentiert wurde. Das Quadrat flackerte entweder in der oberen oder der unteren Hälfte kurz (50 ms) dunkelgrau auf. Die Intensität der visuellen Zielreize wurde ebenfalls vor dem Experiment auf eine 50% Wahrnehmungsschwelle durch eine simple Up-and-Down Schwellenwert Bestimmung festgelegt. Während beiden Teilen des Experiments wurde diese Schwelle kontinuierlich, nach jedem vierten Durchgang mit auditivem beziehungsweise mit visuellem Zielreiz, korrigiert, um einem Lerneffekt entgegen zu wirken. Wurden zwei von vier Durchgängen korrekt beantwortet, blieb die Lautstärke bzw. der Kontrast unverändert. Bei null oder einem korrekten Durchgang wurde die Lautstärke bzw. der Kontrast erhöht, bei drei oder vier richtigen Durchgängen reduziert.

Phase. Die Zielreize wurden zu sechs unterschiedlichen Zeitpunkten im Anschluss an den Entrainmentreiz präsentiert. Drei davon waren In-Phase mit dem Entrainmentstimulus (417 ms / 25 Frames; 750 ms / 45 Frames; 1083 ms / 65 Frames) und drei in Gegenphase (25 ms / 15 Frames; 583 ms / 25 Frames; 917 ms / 55 Frames). Durch die Verwendung von jeweils drei statt nur eines Zeitpunktes In-Phase und in Gegenphase war es uns möglich zu untersuchen, wie lange die erwarteten Entrainmenteffekte nach Ende der Stimulation anhalten. Die Zeitangaben beziehungsweise Frames stellen die Latenz des Reizbeginns zum Ende der vorhergegangenen rhythmischen Stimulation dar. Die zeitliche Genauigkeit und Synchronität der Reizbeginne von visuellen beziehungsweise auditiven Zielreizen mit der vorangehenden rhythmischen Stimulation wurde vorab mit einem Oszilloskop in Verbindung mit einem Mikrofon und einer Photodiode gemessen und dementsprechend korrigiert. Aufgrund der Dauer der Zielreize von 50 ms liegt es in der Natur der Sache, dass bei der Präsentation der Zielreize nicht Zeitpunkte sondern Zeiträume resultieren. Die vorher angegebenen Zeitpunkte beziehen sich daher auf den Reizbeginn der Zielreize.

2.3. Aufgabe und Ablauf

Aufgabe. Das Experiment bestand aus zwei Entrainmentbedingungen (EMa, EMv), zwei Zielreizbedingungen (TMa, TMv) und zwei Phasenbedingungen (IP, OP), woraus sich ein $2 \times 2 \times 2$ Design ergibt. Die Aufgabe bestand darin, auf

2. Methode

Zielreize, falls solche auftraten, möglichst schnell und akkurat zu reagieren. Vor dem Beginn jedes Blocks bekamen die Teilnehmer*innen Instruktionen in schriftlicher Form. Während jedem Durchgang wurde ein schwarzer Fixationspunkt in der Mitte des Bildschirms angezeigt, den die Teilnehmer*innen über die gesamte Sitzung kontinuierlich fixieren sollten. Es wurde darauf hingewiesen, nur dann eine Taste zu drücken, wenn tatsächlich ein Reiz gehört oder gesehen wurde. Wenn ein*e Teilnehmer*in einen Reiz signalisierte, wo keiner war, wurde auf dem Bildschirm die Rückmeldung *FALSCHER ALARM* (Schriftgröße 31, Rot) angezeigt. Diese Catch-Trials wurden verwendet, um falsch-positive Alarme zu kontrollieren und um zu erkennen, wie häufig Versuchsteilnehmer*innen zufällig die Tasten drückten. Die auditiven Zielreize bestanden aus einem hohen oder tiefen Sinuston. Die Teilnehmer*innen wurden angewiesen, den hohen Ton mit der *Pfeil-nach-oben*-Taste und den tiefen Ton mit der *Pfeil-nach-unten*-Taste anzuzeigen. Visuelle Zielreize bestanden aus einem Flackern eines kleinen weißen Quadrats in der Mitte des Bildschirms. Das Flackern trat entweder in der oberen oder der unteren Hälfte des Quadrats auf. Hier wurden die Teilnehmer*innen aufgefordert, das obere Flackern mit der *Pfeil-nach-oben*- und das untere Flackern mit der *Pfeil-nach-unten*-Taste anzugeben. Fünfzehn Prozent aller Durchgänge, vier aus 28 in jedem Block, fungierten als Catch-Trials und enthielten keinen Zielreiz. Jeder Block umfasste 12 auditive und 12 visuelle Zielreize. In jedem Durchgang wurde entweder ein visueller, ein auditiver oder gar kein Reiz gezeigt. Wenn ein*e Teilnehmer*in einen gegebenen Reiz nicht erkannte oder zu spät die Taste drückte, wurde die Rückmeldung *Nicht erkannt* (Schriftgröße 31, Rot) angezeigt. Das Zeitfenster zum Drücken der Taste betrug 1,000 ms. Wenn der*die Teilnehmer*in einen gegebenen Reiz richtig erkannte, wurde die Rückmeldung *Richtig!* (Schriftgröße 31, Grün) auf dem Bildschirm angezeigt. Erkannte ein*e Teilnehmer*in korrekt, dass kein Zielreiz präsentiert wurde und drückte darum auch nicht die Taste, wurde das gleiche grüne *Richtig!* auf dem Bildschirm angezeigt. Jeder Block endete mit einer kurzen Statistik, welche die mittlere Reaktionszeit, die Trefferrate sowie die Falschalarmrate in Prozent beinhaltete. Jeder der zwei Teile des Experiments umfasste 15 Blöcke mit jeweils 28 Durchgängen. Dies ergibt insgesamt 420 Durchgänge sowohl im auditiven Teil des Experiments als auch im visuellen Teil des Experiments. Für jede der 2 x 2 x 2 Bedingungen resultieren insgesamt 90 Durchgänge. Zusätzlich ergeben sich 60 Durchgänge ohne Zielreiz für jede der 2 x 2 x 2 Bedingungen.

Abbildung 1 zeigt den Aufbau der zwei experimentellen Bedingungen mit auditiver (EMa) beziehungsweise visueller (EMv) EM. In der Bedingung mit auditiver rhythmischer Stimulation (EMa) begann jeder Durchgang mit einer Fixationsperiode (1,000 ms) gefolgt von rhythmischem weißen Rauschen von 3,000 ms Dauer. Dieses ging in ein kontinuierliches weißes Rauschen von 1,200 ms Dauer

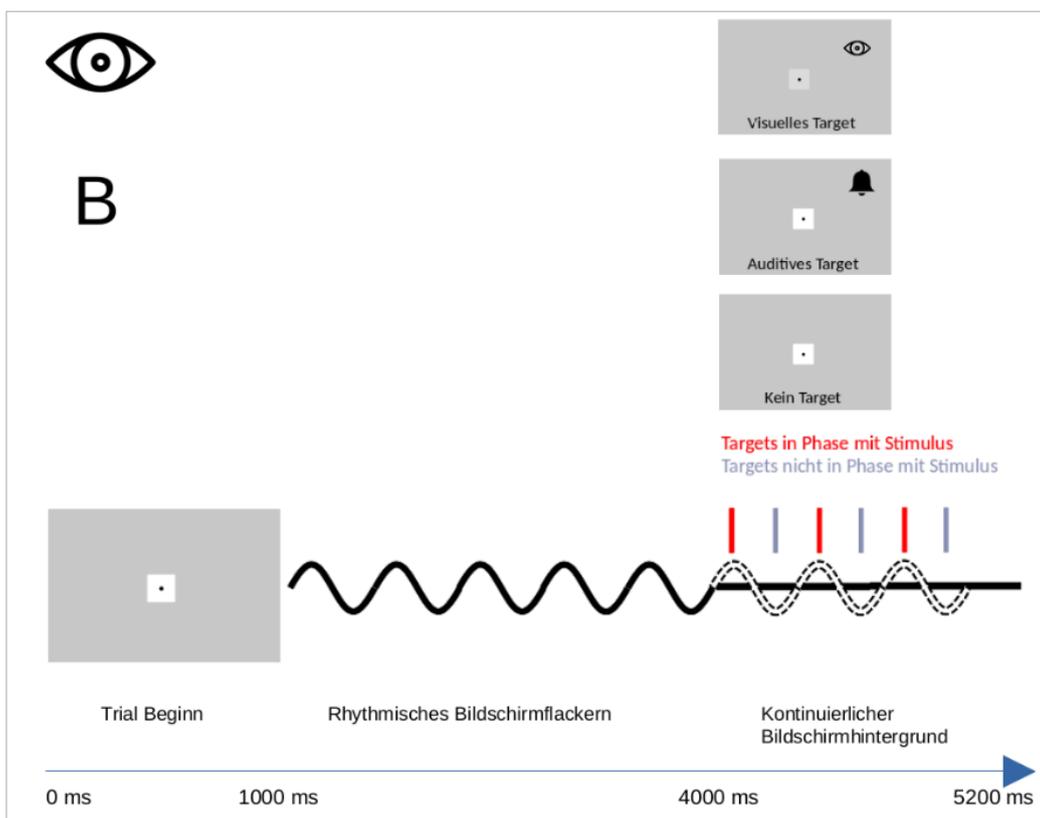
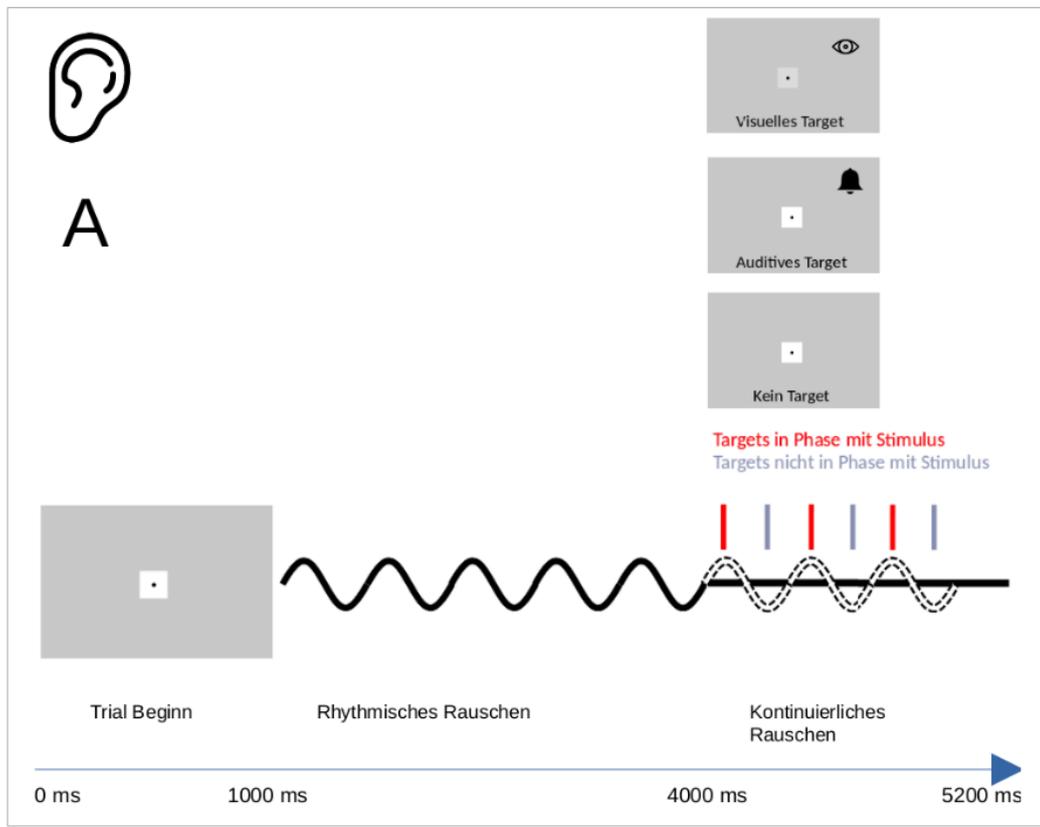
über, in dem auditive oder visuelle Zielreize erscheinen konnten. Das kleine Quadrat wurde nach Ende der Fixationsperiode eingeblendet und veränderte sich nur dann, wenn ein visueller Reiz gegeben wurde.

Die experimentelle Bedingung mit visueller rhythmischer Stimulation (EMv) begann ebenso mit einer Fixationsperiode (1,000 ms). Dann wurde in der Mitte des Bildschirms ein großes Quadrat gezeigt, das rhythmisch für 3,000 ms flackerte. Gleichzeitig wurde ein kontinuierliches, nicht-rhythmisches weißes Rauschen für die gesamte restliche Dauer jedes Durchgangs nach der Fixationsperiode (4,200 ms) abgespielt. Nach 4,000 ms, zu dem Zeitpunkt, ab dem die rhythmische Stimulation endete und Zielreize auftreten konnten, verwandelte sich das große flackernde Quadrat in ein kleines weißes Quadrat, identisch dem in der auditiven Bedingung. In den nun folgenden 1,200 ms war ein weißes Rauschen zu hören und es konnten auditive oder visuelle Zielreize präsentiert werden.

2. Methode

Abbildung 1

Aufbau der auditiven und visuellen Bedingung



2.3. Aufgabe und Ablauf

Anmerkung. **A.** Die auditive Bedingung begann mit einer Fixationsperiode von 1,000 ms. Es folgte auditive rhythmische Stimulation mit 3 Hz für eine Dauer von 3,000 ms. Danach war ein nicht rhythmisches weißes Rauschen (Dauer: 1,200 ms) zu hören, in welchem die Zielreize (Dauer: 50 ms) versteckt waren. Es gab sechs mögliche Zeitpunkte für die Zielreize. Rote Striche stehen für eine Zielreizpräsentation In-Phase (417 ms, 750 ms, 1,083 ms) und graue Striche für eine Präsentation Off-Phase (25 ms, 583 ms, 917 ms) mit der vorangehenden rhythmischen Stimulation. Der Pfeil stellt die verstrichene Zeit ab Beginn eines Durchgangs dar. **B.** Wie **A**, für die visuelle Bedingung. Es wurde jedoch rhythmische visuelle Stimulation mit 3 Hz für eine Dauer von 3,000 ms dargeboten. Außerdem war ab 1,000 ms ein kontinuierliches weißes Rauschen für den gesamten restlichen Durchgang zu hören.

2. Methode

Ablauf. Die Datenerhebung wurde im Institut für Psychologie der Universität Wien, in der Liebiggasse 5, durchgeführt. Das Labor befand sich im Keller. Die Fenster waren verdeckt, um irritierende Lichteinstrahlung von außen zu vermeiden. Die Tür war geschlossen und ein Schild, welches auf das laufende Experiment hinwies, war an der Außenseite angebracht. Aufgrund der herrschenden Pandemie musste ein Mund-Nasen-Schutz getragen werden und es durften sich nur maximal drei Personen gleichzeitig im Raum aufhalten. So waren bei jeder Sitzung neben dem*der Versuchsleiter*in maximal zwei Teilnehmer*innen anwesend. Die zwei Teile des Experiments absolvierten die Teilnehmer*innen in zwei getrennten Sitzungen an unterschiedlichen Tagen, um einen Leistungsabfall aufgrund von Erschöpfung zu vermeiden.

Nach einer kurzen Begrüßungsphase wurden die Teilnehmer*innen aufgefordert, die Einverständniserklärung für das Experiment gründlich zu lesen und auszufüllen. Diese informierte über Rechte sowie Datenschutz und erhob demografische Daten. Es wurde nur eine allgemeine Information zum Zweck des Experiments im Voraus gegeben, um Erwartungseffekte zu vermeiden. Der Zweck des Experiments sei es, kognitive Prozesse besser zu verstehen. Die Aufgabe wurde kurz verbal erklärt und es wurde betont, dass es wichtig sei, die Instruktionen gründlich zu lesen und keine Taste zu drücken, wenn kein Zielreiz zu sehen sei. Des Weiteren sei es notwendig, auf die Fehleralarmrate in der Statistik zu achten und diese so niedrig wie möglich zu halten. Eine Fehleralarmrate von maximal 25 Prozent diene dabei als Richtwert. Es wurde deutlich gemacht, dass, wenn irgendwelche Fragen oder Probleme auftauchen sollten, ein Handzeichen gegeben und leise gesprochen werden sollte, um die anderen Teilnehmer*innen möglichst nicht zu stören. Danach wurde das Licht ausgeschaltet und das Experiment begann. Damit der Raum nicht zu dunkel war, lief immer ein zusätzlicher Ersatzcomputer, auf den auch bei technischen Problemen ausgewichen wurde. Sobald alle anwesenden Teilnehmer*innen das Experiment beendet hatten, wurden gegebenenfalls die Bestätigungsformulare für das erhaltene Geld ausgefüllt. Falls Interesse bestand, wurde verbal über die Ziele der Studie informiert. Der gesamte Prozess dauerte etwa 55 Minuten für jede der zwei Bedingungen.

Das Experiment begann mit den bereits geschilderten Instruktionen. Es folgte ein Bildschirm, auf dem erklärt wurde, wie die *Pfeil-nach-oben-* und *Pfeil-nach-unten-*Tasten in Bezug auf die visuellen Zielreize zu verwenden sind. Erschien kein Zielreiz, sollte keine Taste gedrückt werden. Danach gab es einen Block mit den visuellen Zielreizen, um die Schwelle der visuellen Wahrnehmung zu bestimmen und die Teilnehmer*innen mit den Zielreizen vertraut zu machen. Dieser Block enthielt 12 Durchgänge. Diese bestanden aus einem Intervall von 1,200 ms Dauer mit kontinuierlichem, auditivem, weißem Rauschen, in dem die visuellen Zielreize präsentiert wurden. Die Teilnehmer*innen wurden gebeten anzugeben, ob

das Quadrat in der unteren oder der oberen Hälfte flackerte. Als nächstes wurde ein Bildschirm eingeblendet, welcher erläuterte, dass nun die auditiven Zielreize gezeigt werden. Der hohe und der tiefe Ton wurden im Wechsel je acht mal abgespielt, um die Teilnehmer*innen mit ihnen vertraut zu machen. Dies war wichtig, da es sich als schwierig erwies, die beiden Töne zu differenzieren, wenn man sie nicht richtig im Gedächtnis hatte. Die Töne wurden simultan als *hoher Ton* oder *tiefer Ton* (Schriftgröße 31) auf dem Bildschirm beschrieben. Es folgte ein Display, in dem erklärt wurde, wie die *Pfeil-nach-oben*-Taste und die *Pfeil-nach-unten*-Taste bezüglich der auditiven Zielreize zu verwenden sind. Als nächstes folgten 14 Durchgänge, um die auditiven Reize auf die individuelle Wahrnehmungsschwelle abzustimmen. Sie bestanden aus einem Intervall von 1,200 ms Dauer mit kontinuierlichem weißem Rauschen, in dem der hohe oder der tiefe Sinuston erklang. Die Teilnehmer*innen wurden gebeten anzugeben, welcher der beiden Töne gehört wurde.

Nach Anpassung der individuellen visuellen und auditiven Wahrnehmungsschwelle wurde ein Bildschirm gezeigt, der den gesamten Ablauf des Experiments erklärte und mehrere Übungsdurchläufe ankündigte. Dann folgten 14 Übungsdurchgänge mit allen drei Zielreizbedingungen. Die rhythmische Stimulation war entweder auditiv oder visuell, je nachdem um welchen Teil des Experimentes es sich handelte. Dieser Übungsblock endete mit der oben genannten Statistik.

Im Anschluss an den Übungsblock wurde ein Bildschirm eingeblendet, der das Ende des Trainings und ein weiterer, der den Beginn des Hauptexperiments ankündigte. Auf dem Bildschirm, der das Hauptexperiment ankündigte, wurde die geschätzte Dauer der Sitzung angezeigt, sowie über die Möglichkeit informiert, zwischen den Blöcken eine Pause einzulegen. Die Schwierigkeit des Erkennens der Reize wurde nochmals hervorgehoben und eine kurze Zusammenfassung der geforderten Aufgaben wurde angezeigt. Danach begann das eigentliche Experiment.

2.4. Datenanalyse

Um die Analyse im Rahmen der Masterarbeit zu vereinfachen, wurden die drei In-Phase Phasenlagen sowie die drei Off-Phase Phasenlagen zu jeweils einer Bedingung zusammengefasst. Vor der Durchführung der statistischen Analyse wurden alle Datensätze mit einer Catch-Trial-Performance von unter 75% in mindestens einem Teil des Experiments (fünf Datensätze) sowie unvollständige Datensätze (drei Datensätze) exkludiert. Um Ausreißer zu entfernen, wurden innerhalb jeder Versuchsperson und Bedingung Durchgänge mit Reaktionszeiten, die mehr oder weniger als 2.5 *SDs* vom Mittelwert entfernt waren, ausgeschlossen. Weiters wurden nur Reaktionszeiten von korrekten Durchgängen ausgewertet.

2. Methode

Es wurden zwei dreifaktorielle Varianzanalysen mit Messwertwiederholung (ANOVA) gerechnet. Die erste ANOVA wurde für die abhängige Variable Trefferrate (*perf*) gerechnet und die zweite ANOVA für die abhängige Variable Reaktionszeit (*RT*). Unsere drei unabhängigen Variablen waren EM (EMa oder EMv, Innersubjektfaktor), Zielreiz-Modalität (TMa oder TMv, Innersubjektfaktor) und Phase (IP oder OP, Innersubjektfaktor). Zusätzlich wurden die beiden EM hinsichtlich der Catch-Trial-Performance mittels eines *T*-Tests für abhängige Stichproben verglichen. Die Catch-Trial-Performance stellt den Anteil an Catch-Trials dar, in denen korrekterweise nicht geantwortet wurde. Sie betrifft also nur solche Durchgänge, in denen kein Zielreiz dargeboten wurde. Je höher der Wert, desto weniger Fehler wurden in solchen Durchgängen gemacht, die keinen Zielreiz darboten. Die Trefferraten stellen den prozentualen Anteil an korrekt erkannten Zielreizen von allen Durchgängen mit Zielreiz dar. Je höher der Wert, desto mehr Treffer wurden erzielt. Auftretende Interaktionen mussten, um die Effekte interpretieren zu können, mit Post-hoc-Verfahren aufgebrochen werden. Dazu wurden ANOVAs und paarweise *T*-Tests verwendet. Um die Ergebnisse bezüglich des Faktors Phase sinnvoll interpretieren zu können, wurden sowohl für die Reaktionszeit als auch für die Trefferrate paarweise *T*-Tests gerechnet, welche den Faktor Phase über alle Bedingungen verglichen. Alle Analysen wurden mit JAMOVI (Version 1.8.0.0) und JASP (Version 0.11) durchgeführt. Um die Hypothesen auf Signifikanz zu testen, wurde ein Signifikanzniveau von $p < .05$ verwendet.

3. Ergebnisse

3.1. Reaktionszeiten

Abbildung 2 stellt die mittleren Reaktionszeiten als eine Funktion der Entrainment-Modalität, der Zielreiz-Modalität und der Phasenlage dar. Zu erkennen sind allgemein kürzere Reaktionszeiten für visuelle im Vergleich zu auditiven Zielreizen, sowie kürzere Reaktionszeiten nach auditiver im Vergleich zu visueller rhythmischer Stimulation. Die Reaktionszeiten bei Phasenlage IP scheinen in allen Bedingungen nur minimal kürzer zu sein als bei einer Phasenlage OP.

Die ANOVA der Reaktionszeit zeigt für alle drei Faktoren signifikante Effekte (Tabelle 1). Für die Faktoren EM, $F = 11.831, p = .003, \eta^2 = .012$, Phase, $F = 14.199, p = .001, \eta^2 = .002$, und TM, $F = 197.491, p < .001, \eta^2 = .613$, wurden die Reaktionszeiten signifikant. Zudem trat eine signifikante Dreifachinteraktion von EM, Phase und TM auf, $F = 6.226, p = .021, \eta^2 = .000$, die mittels Post-Hoc-Tests aufgebrochen werden musste. Die grafische Analyse der Reaktionszeiten (Abbildung 2) spiegelt die signifikanten Effekte von EM, TM und Phase wider.

Zum Aufbrechen der Dreifachinteraktion wurden zwei ANOVAs gerechnet, für die der Datensatz nach der unabhängigen Variable EM aufgeteilt wurde. Es wurde eine ANOVA für EMa und eine für EMv mit den unabhängigen Variablen TM und Phase gerechnet. Für die zwei Post-Hoc ANOVAs ergab sich ein einheitliches Bild. Die ANOVA der EMa zeigt einen signifikanten Effekt von TM, $F = 125.566, p < .001, \eta^2 = .610$, der sich auch in der ANOVA der EMv widerspiegelt, $F = 138.417, p < .001, \eta^2 = .632$. Für den Faktor Phase sowie die Interaktion von TM und Phase zeigt sich kein weiterer signifikanter Effekt.

Um die Dreifachinteraktion in den Reaktionszeiten bezüglich unserer Hypothesen und der Phasenlage interpretieren zu können, wurden zusätzlich Post-Hoc T -Tests für abhängige Stichproben gerechnet. Diese paarweisen T -Tests verglichen die Zielreiz-Zeitpunkte, IP und OP, getrennt nach EM und TM (Tabelle 2). Dabei zeigen sich signifikante Effekte im Faktor Phase für EMa/TMa, $t = -3.098, p = .006, \text{Cohen's } d = -0.676$, sowie EMv/TMv, $t = -3.755, p = .001, \text{Cohen's } d = -0.819$, nicht jedoch für EMa/TMv, $t = -1.268, p = .220, \text{Cohen's } d = -0.277$, und EMv/TMa, $t = -0.853, p = .404, \text{Cohen's } d = -0.186$. Die signifikanten Ergebnisse spiegeln

3. Ergebnisse

kürzere Reaktionszeiten für Zielreiz-Zeitpunkte IP als für OP wider.

Tabelle 1

Messwiederholungs-ANOVA der Reaktionszeit: Innersubjekteffekte

Faktoren	df	F	p	η ²
EM	20	11.831	.003 **	.012
Phase	20	14.199	.001 ***	.002
TM	20	197.491	< .001 ***	.613
EM * Phase	20	0.070	.794	.000
EM * TM	20	0.209	0.653	.000
Phase * TM	20	0.115	0.738	.000
EM * Phase * TM	20	6.226	0.021 *	.000

Anmerkung. * $p < .05$. ** $p < .01$. *** $p < .001$.

Tabelle 2

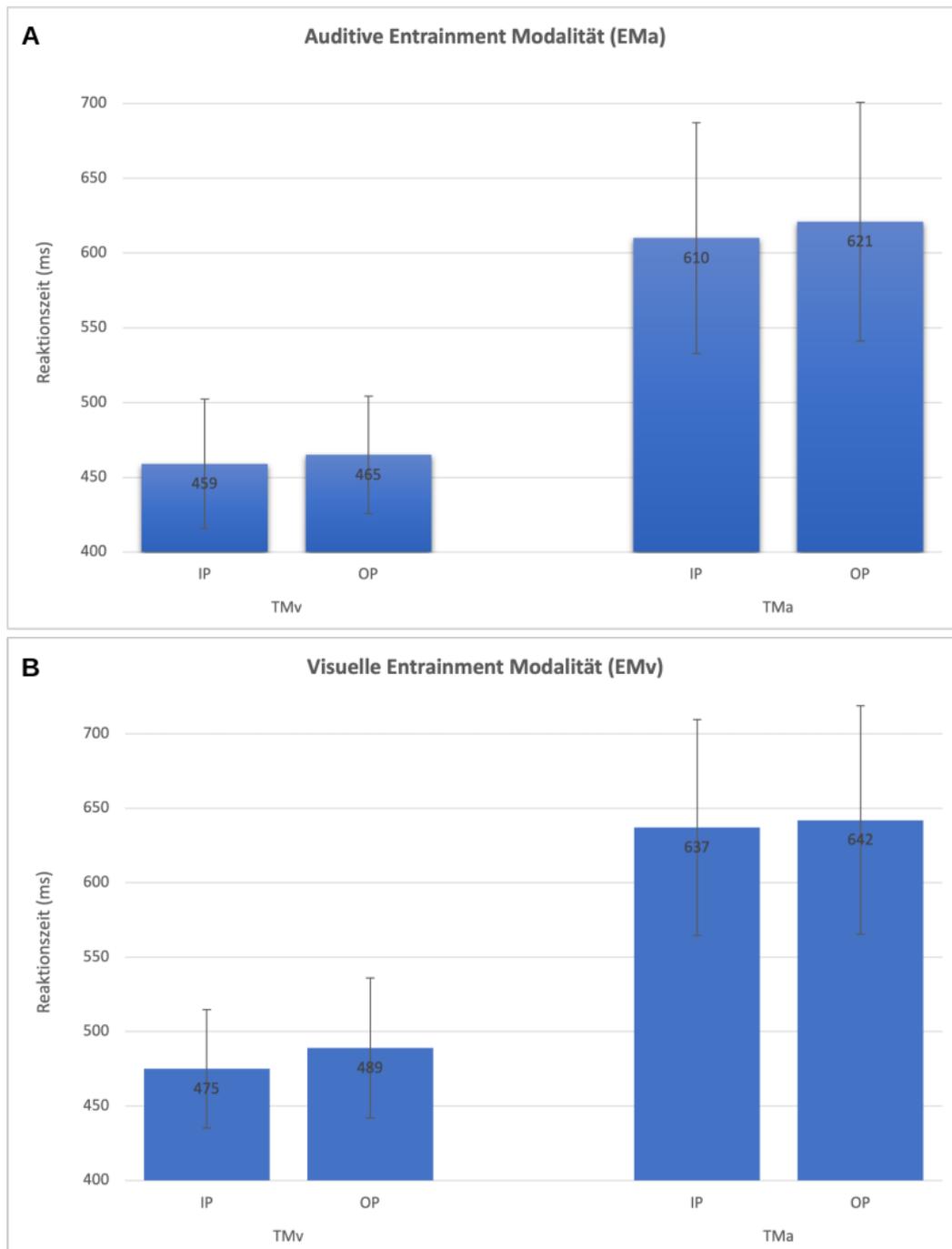
Paarweise T-Tests der mittleren Reaktionszeiten: Vergleich von IP und OP

Vergleich	df	t	p	Cohens' d
EMa * TMa * IP EMa * TMa * OP	20	-3.098	.006 **	-0.676
EMa * TMv * IP EMa * TMv * OP	20	-1.268	.220	-0.227
EMv * TMa * IP EMv * TMa * OP	20	-0.853	.404	-0.186
EMv * TMv * IP EMv * TMv * OP	20	-3.755	.001 ***	-0.819

Anmerkung. * $p < .05$. ** $p < .01$. *** $p < .001$.

Abbildung 2

Mittlere Reaktionszeiten als Funktion der Entrainment-Modalität, der Zielreiz-Modalität und der Phasenlage



Anmerkung. **A.** Abgebildet sind mittlere Reaktionszeiten für die auditive Entrainment Modalität (EMa), getrennt für visuelle (linker Teil, TMv) und auditive (rechter Teil, TMa) Zielreize, sowie für Zielreize In-Phase (IP) und in Gegenphase (OP). Die Fehlerbalken visualisieren die SDs. **B.** Wie **A**, für die visuelle Entrainment-Modalität (EMv).

3.2. Trefferraten

Abbildung 3 stellt die mittleren Trefferraten als Funktion der Entrainment-Modalität, der Zielreiz-Modalität und der Phasenlage dar. Es zeigen sich höhere Trefferraten für die auditive Entrainment-Modalität im Vergleich zur visuellen Entrainment-Modalität. Außerdem scheinen visuelle Zielreize häufiger erkannt zu werden als auditive Zielreize. Für den Faktor Phase lässt sich eine Interaktion mit der Entrainment-Modalität vermuten.

Tabelle 3 stellt die Ergebnisse der Trefferraten dar. Es wurde eine dreifaktorielle ANOVA gerechnet. Die ANOVA zeigt einen Haupteffekt des Faktors EM, $F = 10.857, p = .004, \eta^2 = .102$, sowie eine signifikante Zweifachinteraktion zwischen den Faktoren EM und TM, $F = 4.688, p = .043, \eta^2 = .010$. Die Faktoren TM und Phase zeigen keine signifikanten Effekte. Die grafische Analyse der mittleren Trefferraten spiegelt den signifikanten Effekt von EM wider (Abbildung 3).

Tabelle 3

Messwiederholungs-ANOVA der Trefferrate: Innersubjekteffekte

Faktoren	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2
EM	20	10.857	.004 **	.102
Phase	20	0.719	.406	.001
TM	20	3.223	.088	.024
EM*Phase	20	3.099	.094	.005
EM*TM	20	4.688	.043 *	.010
Phase*TM	20	1.013	.326	.003
EM*Phase*TM	20	1.043	.319	.002

Anmerkung. * $p < .05$. ** $p < .01$. *** $p < .001$.

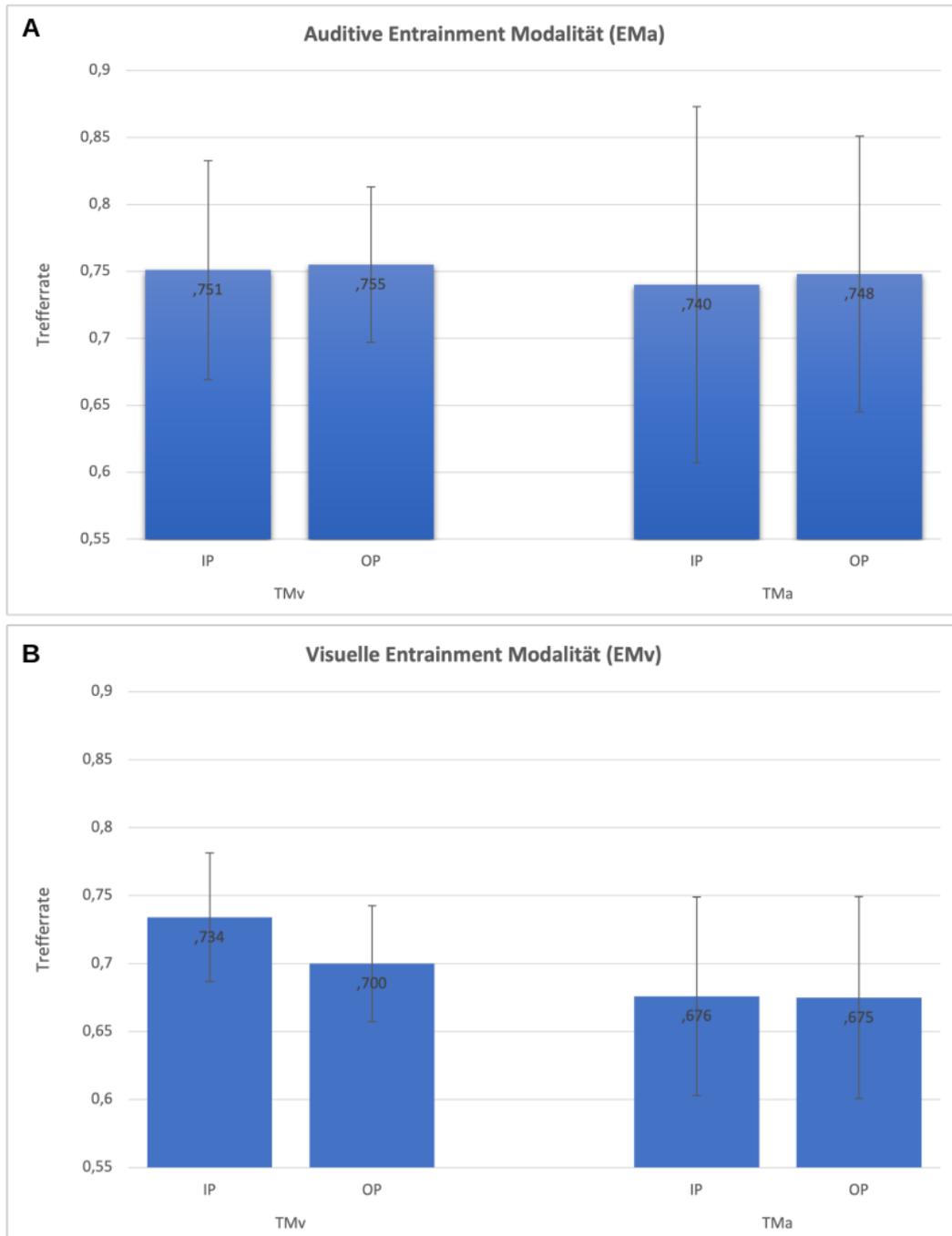
Um die Trefferraten trotz der Zweifachinteraktion interpretieren zu können, wurden die Daten über den Faktor Phase gemittelt. Dann wurden zwei paarweise *T*-Tests gerechnet, welche EMa und EMv verglichen, ein *T*-Test für die visuellen und einer für die auditiven Zielreize. Der paarweise *T*-Test zwischen EMa und EMv innerhalb der TMa zeigt ein signifikantes Ergebnis, $t(20) = 3.33, p = .003$, aufgrund einer höheren Trefferate in EMa im Vergleich zu EMv. Der paarweise *T*-Tests zwischen EMa und EMv innerhalb der TMv zeigt ebenso ein signifikantes Ergebnis, $t(20) = 2.56, p = .019$, aufgrund einer höheren Trefferrate in EMa im Vergleich zu EMv. Es zeigt sich ein signifikanter Unterschied zwischen auditiver und visueller

EM, bei konstanter TM und Phase, zugunsten von EMa. Die T -Tests unterstreichen somit die Ergebnisse der mittleren Trefferraten, wie sie in Abbildung 3 dargestellt sind. Weiters wurden zwei neue Variablen berechnet welche den Leistungseinbruch in den Trefferraten zwischen EMa und EMv innerhalb der TMa beziehungsweise der TMv darstellen. Diese Differenzwerte wurden dann durch einen weiteren T -Test verglichen, um zu betrachten ob sich der Leistungseinbruch zwischen den TM signifikant unterscheidet. Es zeigten sich signifikant größere Differenzen (Einbruch der Trefferrate) zwischen EMa und EMv für auditive Zielreize (TMa) als für visuelle Zielreize (TMv), $t(20) = 2.17, p = .043$.

3. Ergebnisse

Abbildung 3

Mittlere Trefferraten als Funktion der Entrainment-Modalität, der Zielreiz-Modalität und der Phasenlage



Anmerkung. A. Abgebildet sind mittlere Trefferraten für die auditive Entrainment Modalität (EMa), getrennt für visuelle (linker Teil, TMv) und auditive (rechter Teil, TMa) Zielreize, sowie für Zeilreize In-Phase (IP) und in Gegenphase (OP). Die Fehlerbalken visualisieren die SDs. *B.* Wie *A.*, für die visuelle Entrainment-Modalität (EMv).

Obwohl in der Analyse der Trefferraten die Dreifachinteraktion nicht signifikant war, wurde die Phasenlage, wie in den Reaktionszeiten, getrennt nach EM und TM ausgewertet. Dies geschah, um zu prüfen, ob die Leistungssteigerungen in den Reaktionszeiten, die durch rhythmische Stimulation bedingt waren, auf einen Speed-Accuracy-Trade-Off zurückzuführen sind und um den Effekt der Phasenlage besser interpretieren zu können (Tabelle 4). Es zeigt sich ein signifikanter Effekt des Faktors Phase ausschließlich in der Bedingung mit EMv/TMv, $t = 2.240, p = .037, Cohen's d = 0.489$, aufgrund von höheren Trefferraten bei Zielreiz-Zeitpunkten IP. Bei EMa/TMa, $t = -0.501, p = .622, Cohen's d = -0.109$, EMa/TMv, $t = -0.218, p = .830, Cohen's d = -0.048$, und EMv/TMa, $t = 0.097, p = .923, Cohen's d = 0.021$, traten keine signifikanten Ergebnisse auf.

Tabelle 4

Paarweise T-Tests der mittleren Trefferraten: Vergleich von IP und OP

Vergleich	<i>df</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>Cohens' d</i>
EMa * TMa * IP EMa * TMa * OP	20	-0.501	.622	-0.109
EMa * TMv * IP EMa * TMv * OP	20	-0.218	.830	-0.048
EMv * TMa * IP EMv * TMa * OP	20	0.097	.923	0.021
EMv * TMv * IP EMv * TMv * OP	20	2.240	.037 *	0.489

Anmerkung. * $p < .05$. ** $p < .01$. *** $p < .001$.

3.2.1. Catch-Trial-Performance

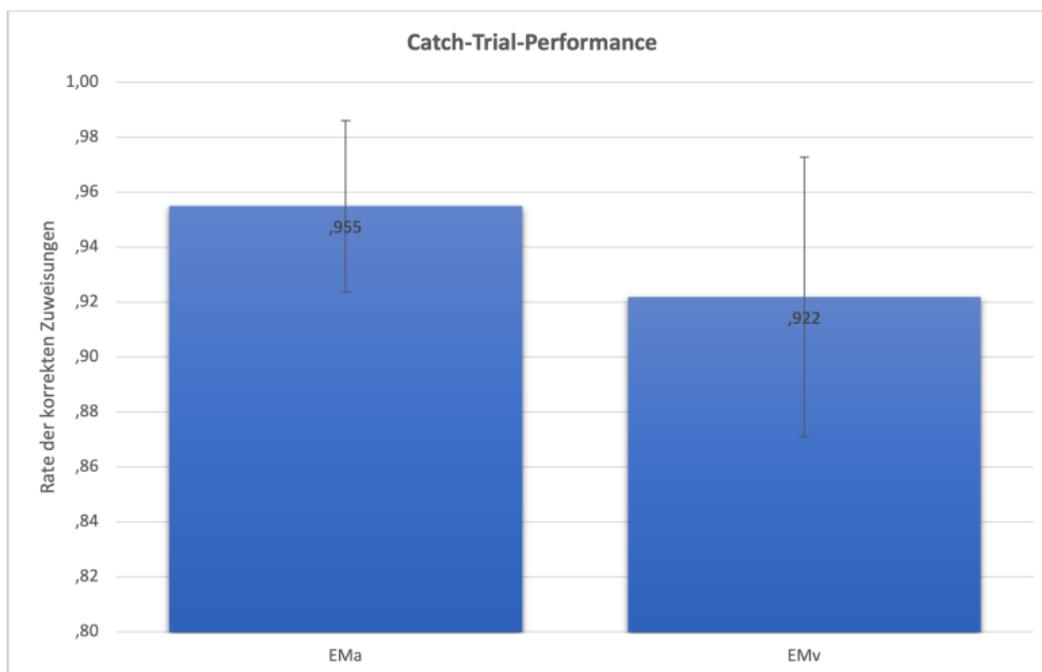
Abbildung 4 stellt die mittlere Catch-Trial-Performance als Funktion der Entrainment-Modalität dar. Es wird eine höhere Catch-Trial-Performance von EMa im Vergleich zu EMv ersichtlich.

Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse des *T*-Tests der Catch-Trial-Performance. Dieser vergleicht die Catch-Trial-Performance zwischen EMa und EMv. Auch hier zeigt sich ein signifikanter Unterschied zwischen EMa und EMv zugunsten der auditiven EM, $t = 2.44, p = .024, Cohen's d = .532$. Die auditive EM geht mit signifikant weniger falschen Alarmen einher als die visuelle EM.

3. Ergebnisse

Abbildung 4

Mittlere Catch-Trial-Performance als Funktion der Entrainment-Modalität



Anmerkung. Abgebildet ist die mittlere Catch-Trial-Performance für Durchgänge mit auditiver Entrainment-Modalität (linke Seite, EMa) im Vergleich zu Durchgängen mit visueller Entrainment-Modalität (rechte Seite, EMv). Die Fehlerbalken visualisieren die SDs.

Tabelle 5

Paarweiser T-Test der Catch-Trial-Performance

Vergleich		<i>df</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>Cohens' d</i>
EMa	EMv	20	2.44	.024 *	0.532

Anmerkung. * $p < .05$. ** $p < .01$. *** $p < .001$.

4. Diskussion

Bisherige Studien untersuchten meist den Effekt von rhythmischer Stimulation auf die Wahrnehmungsleistung von Reizen einerseits nur während der Stimulation und nicht danach, und andererseits nur innerhalb einer Sinnesmodalität (Henry & Obleser, 2012; Jones et al., 2006; Jones et al., 2002; Rohenkohl & Nobre, 2011; Rohenkohl et al., 2011). Es existiert jedoch wenig Forschung dazu, wie sich rhythmische Stimulation auf die Wahrnehmung von Reizen nach Ende der Stimulation auswirkt. Die vorliegende Studie setzte sich zudem als Ziel, sowohl die auditive als auch die visuelle Sinnesmodalität simultan zu betrachten. Nach unserem Wissen wurde im Rahmen der vorliegenden Studie erstmals ein Experiment durchgeführt, welches zugleich mit Zielreizen nach dem Ende der rhythmischen Stimulation als auch einer kreuzmodalen Perspektive arbeitet.

Aufgrund der Pilotstudie und den Ergebnissen von Hickok et al. (2015) vermuteten wir auf einen Effekt von Phase (i.e. der Auftrittszeitpunkt der Zielreize in Bezug auf die vorhergehende rhythmische Stimulation) zu stoßen. Diese Erwartung konnte auf Basis der vorliegenden Daten teilweise unterstützt werden. Jedoch stellte sich das Zusammenspiel von EM, TM und Phase als komplexer heraus, als wir vermutet hatten. Ob die Phasenlage einen Effekt auf die Wahrnehmung hatte, war davon abhängig, ob EM und TM die gleiche Wahrnehmungsmodalität ansprachen. Stimmt EM und TM überein, war überwiegend eine verbesserte Wahrnehmungsleistung für solche Zielreize zu beobachten, die In-Phase präsentiert wurden. Das bedeutet, dass die Phasenlage bei auditiver rhythmischer Stimulation nur einen Effekt auf die Wahrnehmung von auditiven, nicht aber von visuellen, Zielreizen an der Wahrnehmungsschwelle hatte. Genauso hatte die Phasenlage bei visueller rhythmischer Stimulation nur einen Effekt auf die Wahrnehmung von visuellen, nicht aber von auditiven, Zielreizen an der Wahrnehmungsschwelle. Wir gehen auf Basis der vorliegenden Daten davon aus, dass eine kreuzmodale Wirkweise von NE nicht unterstützt werden kann. Es kann somit keine unserer Hypothesen angenommen werden. Die Daten deuten zwar auf einen modalitätsspezifischen Effekt hin, jedoch konnten wir keine wechselseitige Inhibition beobachten (H2/EMa, H2/EMv). Daher muss jeweils eine neue Hypothese formuliert werden um die Daten suffizient zu beschreiben: H4/EMa: Erzeugte Aufmerksamkeitsschwankungen sind modalitätsspezifisch. Die

4. Diskussion

Wahrnehmungsleistung von TMa, nicht aber von TMv, schwankt nach EMa.

H4/EMv: Erzeugte Aufmerksamkeitsschwankungen sind modalitätsspezifisch. Die Wahrnehmungsleistung von TMv, nicht aber von TMa, schwankt nach EMv.

Des Weiteren fanden wir einen Effekt der EM sowohl in den Trefferraten, den Reaktionszeiten als auch der Catch-Trial-Performance. Es zeigte sich ein deutlicher Unterschied in der nachfolgenden globalen Wahrnehmungsleistung zwischen EMa und EMv mit einer höheren Wahrnehmungsleistung bei EMa, als bei EMv. In der TM zeigte sich ein signifikanter Effekt nur in den Reaktionszeiten mit kürzeren Reaktionszeiten bei TMv als bei TMa.

4.1. Phase

Es zeigte sich in der Analyse der Reaktionszeiten ein hoch signifikanter Effekt von Phase, der sich aber nicht in den Trefferraten widerspiegelte. Dieser Effekt ist für solche Bedingungen zu beobachten, in denen die Modalität von Entrainmentreiz und Zielreiz konform ist. So zeigen die *T*-Tests der Reaktionszeit signifikante Effekte von Phase sowohl für EMa/TMa als auch für EMv/TMv, nicht aber für EMa/TMv und EMv/TMa. Die paarweisen *T*-Tests der Trefferraten konnten diese signifikanten modalitätskonformen Effekte von Phase nur für die Bedingung EMv/TMv, jedoch nicht für EMa/TMa, EMa/TMv und EMv/TMa unterstreichen. Hier vermuten wir, dass sich dieses Muster deutlicher in den Reaktionszeiten, als in den Trefferraten, zeigen könnte, weil im Experiment Catch-Trials verwendet wurden. Es ist bekannt, dass die Verwendung von Catch-Trials zu einem vorsichtigeren Verhalten der Teilnehmer*innen führen kann, was sich in erster Linie auf die Reaktionszeiten auswirkt. Dies könnte eine mögliche Erklärung dafür sein, warum sich für uns, im Gegensatz zu den Daten von Hickok et al. (2015), keine eindeutige Ergebnislage in den Trefferraten zeigte. Des Weiteren konnten Hickok et al. (2015) und Farahbod et al. (2020) beobachten, dass die Wahrnehmungsleistung im Gegensatz zu unseren Ergebnissen zu jenen Zeitpunkten besser war, die in Gegenphase (und nicht In-Phase) zum vorhergehenden rhythmischen Stimulus waren. Die Schwankung der Wahrnehmungsleistung repräsentierte zwar die selbe Frequenz wie der Entrainmentreiz, jedoch war diese Schwankung zeitlich versetzt. Möglicherweise rührt dieser Unterschied daher, dass bei Hickok et al. (2015) und Farahbod et al. (2020) die Zielreize nur eine, statt zwei, Sinnesmodalitäten sowohl in der rhythmischen Stimulation als auch in den Zielreizen ansprachen. Daraus, dass in der vorliegenden Studie zwei Sinnesmodalitäten für die Aufgabe relevant waren, könnte sich die Verarbeitungsgeschwindigkeit um eine halbe Phase verlängert haben.

Zusammenfassend lassen diese Ergebnisse vermuten, dass die gefundenen Effekte der Phasenlage modalitätsspezifisch sind, sich also vorzugsweise innerhalb einer

Sinnesmodalität beobachten lassen. Darüber, was genau das nun für die Verarbeitung von Informationen aus der Umwelt bedeutet, kann nur spekuliert werden. Möglicherweise deuten die Ergebnisse darauf hin, dass das Gehirn bei der Verarbeitung von auditiven und visuellen Reizen auf zwei unterschiedliche Ressourcen zugreift. Zumindest bezüglich der zeitlichen Dimension der Reize schien es zwischen der visuellen und auditiven Modalität keinen großen Austausch sondern eine unabhängige Verarbeitung zu geben. Diese Annahme stimmt mit den Ergebnissen der EEG Studie von Comstock et al. (2021) überein. In dieser bildgebenden Studie wurden die Mechanismen bei der Vorhersage von auditiven und visuellen Rhythmen betrachtet. Es zeigten sich dabei separate kortikale Netzwerke von auditiver und visueller Verarbeitung rhythmischer Ereignisse. Statt einem globalen Bild der Aufmerksamkeit könnte also das Bild einer modalitätsspezifisch segmentierten Aufmerksamkeit gezeichnet werden.

Der Erkenntnisstand bezüglich NE bleibt jedoch weiterhin kontrovers. So konnten Lin et al. (2021) in einem umfangreichen Experiment, welches sich mit dem prädiktiven Charakter von rhythmischer Stimulation innerhalb der auditiven Wahrnehmungsmodalität befasste, trotz einer großen Stichprobe, keinen Effekt der Phasenlage beobachten. Dagegen zeigte sich jedoch ein Effekt der Frequenz der Stimulation so, dass höhere Frequenzen zu kürzeren Reaktionszeiten führten. Diese Ergebnisse stehen sowohl denen aus der vorliegenden Studie als auch denen von Hickok et al. (2015) entgegen. Farahbod et al. (2020) konnten zeigen, dass NE möglicherweise nur für niederfrequente Rhythmen vorhanden sein könnte. Die Rolle von NE und neuronalen Oszillationen bleibt somit nach wie vor umstritten und es bedarf, besonders bezüglich der prädiktiven Komponente von NE, weiterer Forschung.

4.2. Entrainment-Modalität

Für EMA konnten sowohl geringere Reaktionszeiten als auch höhere Trefferraten beobachtet werden als für EMv. Die Teilnehmer*innen waren also besser und schneller in der Bedingung mit auditiver rhythmischer Stimulation als in der mit visueller rhythmischer Stimulation. Es konnte somit ein Speed-Accuracy-Tradeoff ausgeschlossen werden. Zudem zeigte die Analyse der Catch-Trial-Performance, dass bei EMA weniger Fehler gemacht wurden, als bei EMv. Die Daten deuten also darauf hin, dass EMA einen aufmerksamkeitssteigernden Effekt haben könnte.

Die Post-Hoc *T*-Tests zum Aufbrechen der Zweifachinteraktion in den Trefferraten zeigten nochmals den Haupteffekt von EM. Dies deutet darauf hin, dass EMA im Vergleich zu EMv die Wahrnehmungsleistung steigert. Die Zweifachinteraktion von EM und TM kann so interpretiert werden, dass der

4. Diskussion

Unterschied beziehungsweise der Leistungseinbruch in den Trefferraten zwischen EMa zu EMv bei TMa signifikant größer ist als bei TMv.

Eine mögliche Erklärung für diesen wahrnehmungssteigernden Effekt von EMa im Vergleich zu EMv könnte sein, dass Rhythmen in der auditiven Modalität häufiger vertreten sind als in der visuellen Modalität. So sind Bendixen et al. (2012) der Meinung, dass sich auditive Informationen eher über die Zeit entfalten als visuelle Informationen. Während beim Hören die fehlende Information in der Zukunft liegt, ist beim Sehen die visuelle Informationen meist bereits vorhanden oder von anderen Objekten verdeckt. Der zeitliche Bezug, welcher für NE wichtig ist, könnte also der auditiven Sinnesmodalität inhärent sein und eine größere Rolle spielen als in der visuellen Modalität.

4.3. Zielreiz-Modalität

Der Faktor TM zeigte einen hoch signifikanten Effekt in den Reaktionszeiten, da visuelle Zielreize schneller erkannt wurden als auditive. Dieser Effekt überraschte uns, da aufgrund der Schwellenwertbestimmung die beiden TM ähnlich in ihrer Schwierigkeit hätten sein sollen. Es ist bekannt, dass bei simplen Reaktionszeit-Aufgaben immer (um ca.100 ms) schneller auf auditive als auf visuelle Reize geantwortet wird (Jain et al., 2015; Shelton & Kumar, 2010). Dieser Unterschied zwischen TMa und TMv in den Reaktionszeiten könnte möglicherweise durch einen Gedächtniseffekt konfundiert sein. Die Bewertung der Töne musste aus dem Gedächtnis erfolgen. Im Gegensatz zu den visuellen Zielreizen, bei denen immer beide Referenzwerte, oben und unten, sichtbar waren, musste der hohe oder tiefe Ton immer mit der Gedächtnisrepräsentation des anderen Tones abgeglichen werden. Es war hier also nötig, sich die Töne präzise vor dem eigentlichen Experiment einzuprägen. Da sich nur in den Reaktionszeiten, nicht aber in den Trefferraten, signifikante Effekte zwischen TMa und TMv zeigten, lässt sich vermuten, dass der gefundene Effekt von TM aus diesem Gedächtniseffekt herrührt. Visuelle Zielreize sind also nicht per se salienter, sondern die Unterschiede sind der Natur und der ungleichen Komplexität der Zielreize geschuldet.

4.4. Limitationen

Die angestrebte Stichprobengröße von 25 wurde im Rahmen dieser Studie aufgrund von technischen Problemen und gesundheitlichen Ausfällen leider nicht erreicht. Zudem handelte es sich ausschließlich um westliche Studierende. Aus diesem Grund kann die Repräsentativität der genutzten Stichprobe in Frage gestellt werden (Henrich et al., 2010). Weiters ergab sich ungünstiger Weise ein Ungleichgewicht in

der Reihenfolge der EM nach Exkludieren der ungültigen Datensätze. Sechs Teilnehmer*innen führten zuerst die experimentelle Bedingung mit visueller Entrainment-Modalität durch und fünfzehn begannen mit dem auditiven Teil.

Es wurde im Rahmen der vorliegenden Studie keine Kontrollgruppe als Vergleich herangezogen. Hier wäre es interessant gewesen, Daten von weiteren Teilnehmern zu erheben, bei welchen, bei gleichen Zielreizbedingungen, keine Stimulation oder eine nicht rhythmische Stimulation vorherging. Eine Replikation der Studie mit größerer Power sowie einer Kontrollgruppe wäre willkommen.

Es konnte gezeigt werden, dass sich die Bildschirmfrequenz eines Monitors, sowohl bei Makaken als auch beim Menschen, als NE auf die visuellen Areale auswirkt (Williams et al., 2004). Das könnte auch für die hier genutzte Bildschirm-Wiederholrate von 60 Hz gelten. Da die Frequenz aber über alle Bedingungen und alle Teilnehmer*innen konstant gehalten wurde, kann angenommen werden, dass diese Konfundierung gleichförmig über die Bedingungen gewirkt hätte.

4.5. Implikationen und zukünftige Forschung

Der Effekt, den rhythmische Stimulation auf die Wahrnehmung hat, könnte viel Potential in sich tragen. Bei rhythmischer transkranieller Magnetstimulation (TMS) zeigt sich ein direkter Einfluss auf die nachfolgende visuelle Wahrnehmung in Abhängigkeit der Phasenbedingung der Zielreizpräsentation (Helfrich et al., 2014; Thut et al., 2011). Genauso scheint craniale Elektrostimulation (CES, englisch: transcranial Alternating Current Stimulation, tACS) einen Effekt auf das Verhalten (Feurra et al., 2012) und die Wahrnehmung (Kanai et al., 2008; Kanai et al., 2010) zu haben.

Praktische Anwendung kann dieses Wissen zu neuronalen Oszillationen beispielsweise im Feld der Brain-Machine-Interfaces finden. Insbesondere die sogenannten Closed-Loop-Systeme können sich die Schwingungen des Gehirns zunutze machen. So fanden Zion Golumbic et al. (2013) elektrische Aktivierungsmuster im Gehirn ihrer Proband*innen die dazu genutzt werden könnten, ein Hörgerät zu steuern, welches jene Geräuschquellen akustisch verstärkt, auf die der*die Hörer*in gerade seine*ihre Aufmerksamkeit richtet. Auch an neuen Interventionen für Parkinson Patient*innen wird geforscht (Swann et al., 2018). Selbst in der Schmerztherapie könnten sich neuartige Therapien entwickeln lassen. Guo et al. (2020) nutzten erstmals rhythmische Stimulation über Ultraniedrig-Frequenzen in Form von kinästhetischen Reizen. Diese bisher unbeforschte Art von rhythmischer Stimulation führte zu einer Schwankung der Nozizeption der Teilnehmer*innen.

4. Diskussion

Die heilsame Wirkung von Achtsamkeit, Meditation und Atemtechniken auf Körper und Geist, besonders bei Stress und Angst (Weible et al., 2017), hat sich mittlerweile im klinischen Kontext stark etabliert und könnte auf Mechanismen neuronaler Oszillationen beruhen. Es wurde gezeigt, dass Meditation oft mit Theta-Frequenzbändern (4 - 8 Hz) einhergeht (Aftanas & Golocheikine, 2001; Baijal & Srinivasan, 2009; Kubota et al., 2001; Lagopoulos et al., 2009). An der Idee, einen mit der Meditation vergleichbaren Zustand neuronaler Schwingung durch tACS, auditorische Stimulation oder Lichtimpulse zu induzieren, wird mittlerweile geforscht (Chaieb et al., 2015; Voelker et al., 2020; Weible et al., 2017). Es scheint so als hätte Meditation, und die damit einhergehenden Theta-Frequenzbänder, einen aufmerksamkeitsfördernden Einfluss auf die Wahrnehmung (Hasenkamp et al., 2012; Tang et al., 2015) und würde die synaptische Plastizität erhöhen (Piscopo et al., 2018; Tang et al., 2019). Diese Erkenntnisse und die Ergebnisse der vorliegenden Studie können dazu beitragen, den Zusammenhang von neuronalen Oszillationen und Wahrnehmung besser zu verstehen sowie therapeutische Methoden zur Behandlung von psychischen und neurologischen Erkrankungen zu entwickeln.

4.6. Konklusion

Die Frage, welchen Einfluss rhythmische Stimulation auf die Wahrnehmung hat, ist viel diskutiert. Der bisherige Forschungsstand dazu ist oft kontrovers und lässt Fragen offen. Besonders selten sind dabei Studien, welche den Effekt von rhythmischer Stimulation auf die Verarbeitung von Reizen, welche erst nach der Stimulation präsentiert werden, untersuchen. Weiters sind auch solche Studien selten, welche dabei mehr als nur eine Sinnesmodalität betrachten.

Die vorliegende Studie integriert diese beiden Merkmale. Es konnte dabei eine Schwankung der Wahrnehmungsleistung von visuellen oder auditiven Zielreizen an der Wahrnehmungsschwelle nach vorangehender auditiver oder visueller rhythmischer Stimulation gefunden werden. Dies war jedoch nur dann der Fall, wenn die rhythmische Stimulation und der Zielreiz dieselbe Sinnesmodalität ansprachen. Unsere Daten sprechen somit teilweise für eine modalitätsspezifische Wirkweise von rhythmischer Stimulation. Diese Ergebnisse stehen im Widerspruch zu vorherigen Studien bei denen keine nachfolgende Schwankung der Wahrnehmung beobachtet werden konnte. Andere Studien lassen vermuten, dass ein Effekt von rhythmischer Stimulation auf die Wahrnehmungsleistung nur bei niedrigen Frequenzbändern zu beobachten ist. Der Stand der Forschung zu dem Effekt von rhythmischer Stimulation auf die Wahrnehmung bleibt also nach wie vor kontrovers. Anwendung könnte diese Forschung bei Stimulationstherapien im klinischen Kontext sowie als Grundlagenforschung für achtsamkeitsbasierte Therapieformen finden.

Literatur

- Aftanas, L. & Golocheikine, S. (2001). Human anterior and frontal midline theta and lower alpha reflect emotionally positive state and internalized attention: High-resolution EEG investigation of meditation. *Neuroscience Letters*, *310*(1), 57–60. [https://doi.org/10.1016/s0304-3940\(01\)02094-8](https://doi.org/10.1016/s0304-3940(01)02094-8)
- Andreou, L.-V., Griffiths, T. D. & Chait, M. (2015). Sensitivity to the temporal structure of rapid sound sequences—an MEG study. *Neuroimage*, *110*, 194–204. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.01.052>
- Auksztlewicz, R., Barascud, N., Cooray, G., Nobre, A. C., Chait, M. & Friston, K. (2017). The cumulative effects of predictability on synaptic gain in the auditory processing stream. *Journal of Neuroscience*, *37*(28), 6751–6760. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.0291-17.2017>
- Baijal, S. & Srinivasan, N. (2009). Theta activity and meditative states: Spectral changes during concentrative meditation. *Cognitive Processing*, *11*(1), 31–38. <https://doi.org/10.1007/s10339-009-0272-0>
- Bartlett, A. M., Ovaysikia, S., Logothetis, N. K. & Hoffman, K. L. (2011). Saccades during object viewing modulate oscillatory phase in the superior temporal sulcus. *Journal of Neuroscience*, *31*(50), 18423–18432. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.4102-11.2011>
- Bauer, A.-K. R., van Ede, F., Quinn, A. J. & Nobre, A. C. (2021). Rhythmic modulation of visual perception by continuous rhythmic auditory stimulation. *Journal of Neuroscience*, *41*(33), 7065–7075. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2980-20.2021>
- Bendixen, A., SanMiguel, I. & Schröger, E. (2012). Early electrophysiological indicators for predictive processing in audition: A review. *International Journal of Psychophysiology*, *83*(2), 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.08.003>
- Benwell, C. S. Y., Tagliabue, C. F., Veniero, D., Cecere, R., Savazzi, S. & Thut, G. (2017). Prestimulus EEG power predicts conscious awareness but not objective visual performance. *eNeuro*, *4*(6). <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0182-17.2017>

- Bowers, J. S. (2009). On the biological plausibility of grandmother cells: Implications for neural network theories in psychology and neuroscience. *Psychological Review*, *116*(1), 220–251. <https://doi.org/10.1037/a0014462>
- Brochard, R., Tassin, M. & Zagar, D. (2013). Got rhythm... for better and for worse. Cross-modal effects of auditory rhythm on visual word recognition. *Cognition*, *127*(2), 214–219. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2013.01.007>
- Busch, N. A., Dubois, J. & VanRullen, R. (2009). The phase of ongoing EEG oscillations predicts visual perception. *Journal of Neuroscience*, *29*(24), 7869–7876. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.0113-09.2009>
- Busch, N. A. & VanRullen, R. (2010). Spontaneous EEG oscillations reveal periodic sampling of visual attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *107*(37), 16048–16053. <https://doi.org/10.1073/pnas.1004801107>
- Chaieb, L., Wilpert, E. C., Reber, T. P. & Fell, J. (2015). Auditory beat stimulation and its effects on cognition and mood states. *Frontiers in Psychiatry*, *6*, Article 70. <https://doi.org/10.3389/fpsyt.2015.00070>
- Comstock, D. C., Ross, J. M. & Balasubramaniam, R. (2021). Modality-specific frequency band activity during neural entrainment to auditory and visual rhythms. *European Journal of Neuroscience*, *54*(2), 4649–4669. <https://doi.org/10.1111/ejn.15314>
- Ding, N., Patel, A. D., Chen, L., Butler, H., Luo, C. & Poeppel, D. (2017). Temporal modulations in speech and music. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *81*, 181–187. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.02.011>
- Ding, N. & Simon, J. Z. (2014). Cortical entrainment to continuous speech: Functional roles and interpretations. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, Article 311. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00311>
- Drewes, J. & VanRullen, R. (2011). This is the rhythm of your eyes: The phase of ongoing electroencephalogram oscillations modulates saccadic reaction time. *Journal of Neuroscience*, *31*(12), 4698–4708. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.4795-10.2011>
- Dugue, L., Marque, P. & VanRullen, R. (2011). The phase of ongoing oscillations mediates the causal relation between brain excitation and visual perception. *Journal of Neuroscience*, *31*(33), 11889–11893. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.1161-11.2011>
- Farahbod, H., Saberi, K. & Hickok, G. (2020). The rhythm of attention: Perceptual modulation via rhythmic entrainment is lowpass and attention mediated. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *82*(7), 3558–3570. <https://doi.org/10.3758/s13414-020-02095-y>

- Feurra, M., Galli, G. & Rossi, S. (2012). Transcranial Alternating Current Stimulation affects decision making. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 6, Article 39. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2012.00039>
- Fries, P. (2005). A mechanism for cognitive dynamics: Neuronal communication through neuronal coherence. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(10), 474–480. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.08.011>
- Guo, Y., Bufacchi, R. J., Novembre, G., Kilintari, M., Moayedi, M., Hu, L. & Iannetti, G. D. (2020). Ultralow-frequency neural entrainment to pain. *PLOS Biology*, 18(4), 1–27. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000491>
- Hasenkamp, W., Wilson-Mendenhall, C. D., Duncan, E. & Barsalou, L. W. (2012). Mind wandering and attention during focused meditation: A fine-grained temporal analysis of fluctuating cognitive states. *NeuroImage*, 59(1), 750–760. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.07.008>
- Hebb, D. (2005). *The organization of behavior*. Psychology Press. <https://doi.org/10.4324/9781410612403>
- Helfrich, R. F., Schneider, T. R., Rach, S., Trautmann-Lengsfeld, S. A., Engel, A. K. & Herrmann, C. S. (2014). Entrainment of brain oscillations by Transcranial Alternating Current Stimulation. *Current Biology*, 24(3), 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.12.041>
- Henrich, J., Heine, S. J. & Norenzayan, A. (2010). The weirdest people in the world? *Behavioral and Brain Sciences*, 33(2-3), 61–83. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1601785>
- Henry, M. J. & Obleser, J. (2012). Frequency modulation entrains slow neural oscillations and optimizes human listening behavior. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(49), 20095–20100. <https://doi.org/10.1073/pnas.1213390109>
- Herrero, J. L., Khuvis, S., Yeagle, E., Cerf, M. & Mehta, A. D. (2018). Breathing above the brain stem: Volitional control and attentional modulation in humans. *Journal of Neurophysiology*, 119(1), 145–159. <https://doi.org/10.1152/jn.00551.2017>
- Hickok, G., Farahbod, H. & Saberi, K. (2015). The rhythm of perception: Entrainment to acoustic rhythms induces subsequent perceptual oscillation. *Psychological Science*, 26(7), 1006–1013. <https://doi.org/10.1177/0956797615576533>
- Hoffman, K. L., Dragan, M. C., Leonard, T. K., Micheli, C., Montefusco-Siegmund, R. & Valiante, T. A. (2013). Saccades during visual exploration align hippocampal 3–8 Hz rhythms in human and non-human primates. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 7, Article 43. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2013.00043>

Literatur

- Jain, A., Bansal, R., Kumar, A. & Singh, K. (2015). A comparative study of visual and auditory reaction times on the basis of gender and physical activity levels of medical first year students. *International Journal of Applied and Basic Medical Research*, 5(2), 124–127. <https://doi.org/10.4103/2229-516x.157168>
- Jones, M. R., Johnston, H. M. & Puente, J. (2006). Effects of auditory pattern structure on anticipatory and reactive attending. *Cognitive Psychology*, 53(1), 59–96. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2006.01.003>
- Jones, M. R., Moynihan, H., MacKenzie, N. & Puente, J. (2002). Temporal aspects of stimulus-driven attending in dynamic arrays. *Psychological Science*, 13(4), 313–319. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00458>
- Kanai, R., Chaieb, L., Antal, A., Walsh, V. & Paulus, W. (2008). Frequency-dependent electrical stimulation of the visual cortex. *Current Biology*, 18(23), 1839–1843. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.10.027>
- Kanai, R., Paulus, W. & Walsh, V. (2010). Transcranial alternating current stimulation (tACS) modulates cortical excitability as assessed by TMS-induced phosphene thresholds. *Clinical Neurophysiology*, 121(9), 1551–1554. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2010.03.022>
- Klump, G. & Langemann, U. (1992). The detection of frequency and amplitude modulation in the european starling (*Sturnus vulgaris*): Psychoacoustics and neurophysiology. *Auditory physiology and perception* (S. 353–359). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-041847-6.50046-0>
- Kotz, S., Ravignani, A. & Fitch, W. (2018). The evolution of rhythm processing. *Trends in Cognitive Sciences*, 22(10), 896–910. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.08.002>
- Kubota, Y., Sato, W., Toichi, M., Murai, T., Okada, T., Hayashi, A. & Sengoku, A. (2001). Frontal midline theta rhythm is correlated with cardiac autonomic activities during the performance of an attention demanding meditation procedure. *Cognitive Brain Research*, 11(2), 281–287. [https://doi.org/10.1016/s0926-6410\(00\)00086-0](https://doi.org/10.1016/s0926-6410(00)00086-0)
- Lagopoulos, J., Xu, J., Rasmussen, I., Vik, A., Malhi, G. S., Eliassen, C. F., Arntsen, I. E., Sæther, J. G., Hollup, S., Holen, A., Davanger, S. & Ellingsen, Ø. (2009). Increased theta and alpha EEG activity during nondirective meditation. *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*, 15(11), 1187–1192. <https://doi.org/10.1089/acm.2009.0113>
- Lakatos, P., Karmos, G., Mehta, A. D., Ulbert, I. & Schroeder, C. E. (2008). Entrainment of neuronal oscillations as a mechanism of attentional selection. *Science*, 320(5872), 110–113. <https://doi.org/10.1126/science.1154735>

- Lakatos, P., Gross, J. & Thut, G. (2019). A new unifying account of the roles of neuronal entrainment. *Current Biology*, *29*(18), R890–R905.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.07.075>
- Lakatos, P., Musacchia, G., O’Connel, M. N., Falchier, A. Y., Javitt, D. C. & Schroeder, C. E. (2013). The spectrotemporal filter mechanism of auditory selective attention. *Neuron*, *77*(4), 750–761.
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.11.034>
- Lakatos, P., Shah, A. S., Knuth, K. H., Ulbert, I., Karmos, G. & Schroeder, C. E. (2005). An oscillatory hierarchy controlling neuronal excitability and stimulus processing in the auditory cortex. *Journal of Neurophysiology*, *94*(3), 1904–1911. <https://doi.org/10.1152/jn.00263.2005>
- Lamminmäki, S., Parkkonen, L. & Hari, R. (2014). Human neuromagnetic steady-state responses to amplitude-modulated tones, speech, and music. *Ear & Hearing*, *35*(4), 461–467. <https://doi.org/10.1097/aud.0000000000000033>
- Landau, A. N. & Fries, P. (2012). Attention samples stimuli rhythmically. *Current Biology*, *22*(11), 1000–1004. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.03.054>
- Lin, W. M., Oetringler, D. A., Bakker-Marshall, I., Emmerzaal, J., Wilsch, A., ElShafei, H. A., Rassi, E. & Haegens, S. (2021). No behavioural evidence for rhythmic facilitation of perceptual discrimination [Advance online publication]. *European Journal of Neuroscience*.
<https://doi.org/10.1111/ejn.15208>
- Lutz, A., Slagter, H. A., Rawlings, N. B., Francis, A. D., Greischar, L. L. & Davidson, R. J. (2009). Mental training enhances attentional stability: Neural and behavioral evidence. *Journal of Neuroscience*, *29*(42), 13418–13427. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.1614-09.2009>
- Mather, M. & Thayer, J. F. (2018). How heart rate variability affects emotion regulation brain networks. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *19*, 98–104. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2017.12.017>
- Mathewson, K. E., Gratton, G., Fabiani, M., Beck, D. M. & Ro, T. (2009). To see or not to see: Prestimulus phase predicts visual awareness. *Journal of Neuroscience*, *29*(9), 2725–2732.
<https://doi.org/10.1523/jneurosci.3963-08.2009>
- Mathewson, K. E., Fabiani, M., Gratton, G., Beck, D. M. & Lleras, A. (2010). Rescuing stimuli from invisibility: Inducing a momentary release from visual masking with pre-target entrainment. *Cognition*, *115*(1), 186–191.
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2009.11.010>
- Mathewson, K. E., Prudhomme, C., Fabiani, M., Beck, D. M., Lleras, A. & Gratton, G. (2012). Making waves in the stream of consciousness: Entraining oscillations in EEG alpha and fluctuations in visual awareness with rhythmic

- visual stimulation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *24* (12), 2321–2333.
https://doi.org/10.1162/jocn_a_00288
- Mathôt, S., Schreij, D. & Theeuwes, J. (2012). OpenSesame: An open-source, graphical experiment builder for the social sciences. *Behavior Research Methods*, *44* (2), 314–324. <https://doi.org/10.3758/s13428-011-0168-7>
- McGurk, H. & MacDonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature*, *264* (5588), 746–748. <https://doi.org/10.1038/264746a0>
- Miniussi, C., Wilding, E. L., Coull, J. T. & Nobre, A. C. (1999). Orienting attention in time. *Brain*, *122* (8), 1507–1518. <https://doi.org/10.1093/brain/122.8.1507>
- Munhall, K., Jones, J. A., Callan, D. E., Kuratate, T. & Vatikiotis-Bateson, E. (2004). Visual prosody and speech intelligibility. *Psychological Science*, *15* (2), 133–137. <https://doi.org/10.1111/j.0963-7214.2004.01502010.x>
- Neuling, T., Rach, S., Wagner, S., Wolters, C. & Herrmann, C. (2012). Good vibrations: Oscillatory phase shapes perception. *NeuroImage*, *63* (2), 771–778. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.07.024>
- Nunn, C. M. H. & Osselson, J. W. (1974). The influence of the EEG alpha rhythm on the perception of visual stimuli. *Psychophysiology*, *11* (3), 294–303. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1974.tb00547.x>
- Park, H.-D., Correia, S., Ducorps, A. & Tallon-Baudry, C. (2014). Spontaneous fluctuations in neural responses to heartbeats predict visual detection. *Nature Neuroscience*, *17* (4), 612–618. <https://doi.org/10.1038/nn.3671>
- Peelle, J. E. & Davis, M. H. (2012). Neural oscillations carry speech rhythm through to comprehension. *Frontiers in Psychology*, *3*, Article 320. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00320>
- Pellegrino, F., Coupé, C. & Marsico, E. (2011). Across-language perspective on speech information rate. *Language*, *87* (3), 539–558. <https://doi.org/10.1353/lan.2011.0057>
- Pfurtscheller, G., Stancák, A. & Neuper, C. (1996). Event-related synchronization (ERS) in the alpha band — an electrophysiological correlate of cortical idling: A review. *International Journal of Psychophysiology*, *24* (1-2), 39–46. [https://doi.org/10.1016/s0167-8760\(96\)00066-9](https://doi.org/10.1016/s0167-8760(96)00066-9)
- Pickering, M. J. & Garrod, S. (2013). An integrated theory of language production and comprehension. *Behavioral and Brain Sciences*, *36* (4), 329–347. <https://doi.org/10.1017/s0140525x12001495>
- Piscopo, D. M., Weible, A. P., Rothbart, M. K., Posner, M. I. & Niell, C. M. (2018). Changes in white matter in mice resulting from low-frequency brain stimulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *115* (27), E6339–E6346. <https://doi.org/10.1073/pnas.1802160115>

- Pomper, U., Schmid, R. & Ansorge, U. (2020). Continuous, lateralized auditory stimulation biases visual spatial processing. *Frontiers in Psychology, 11*, Article 1183. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01183>
- Power, A. J., Mead, N., Barnes, L. & Goswami, U. (2012). Neural entrainment to rhythmically presented auditory, visual, and audio-visual speech in children. *Frontiers in Psychology, 3*, Article 216. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00216>
- Rajkai, C., Lakatos, P., Chen, C.-M., Pincze, Z., Karmos, G. & Schroeder, C. E. (2007). Transient cortical excitation at the onset of visual fixation. *Cerebral Cortex, 18*(1), 200–209. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhm046>
- Rohenkohl, G. & Nobre, A. C. (2011). Alpha oscillations related to anticipatory attention follow temporal expectations. *Journal of Neuroscience, 31*(40), 14076–14084. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.3387-11.2011>
- Rohenkohl, G., Coull, J. T. & Nobre, A. C. (2011). Behavioural dissociation between exogenous and endogenous temporal orienting of attention. *PLOS ONE, 6*(1), 1–5. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0014620>
- Ruzzoli, M., Torralba, M., Fernández, L. M. & Soto-Faraco, S. (2019). The relevance of alpha phase in human perception. *Cortex, 120*, 249–268. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2019.05.012>
- Samaha, J., Bauer, P., Cimaroli, S. & Postle, B. R. (2015). Top-down control of the phase of alpha-band oscillations as a mechanism for temporal prediction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 112*(27), 8439–8444. <https://doi.org/10.1073/pnas.1503686112>
- Samaha, J. & Postle, B. R. (2015). The speed of alpha-band oscillations predicts the temporal resolution of visual perception. *Current Biology, 25*(22), 2985–2990. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.10.007>
- Schroeder, C. E., Lakatos, P., Kajikawa, Y., Partan, S. & Puce, A. (2008). Neuronal oscillations and visual amplification of speech. *Trends in Cognitive Sciences, 12*(3), 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.01.002>
- Shelton, J. & Kumar, G. P. (2010). Comparison between auditory and visual simple reaction times. *Neuroscience and Medicine, 01*(01), 30–32. <https://doi.org/10.4236/nm.2010.11004>
- Simon, D. M. & Wallace, M. T. (2017). Rhythmic modulation of entrained auditory oscillations by visual inputs. *Brain Topography, 30*(5), 565–578. <https://doi.org/10.1007/s10548-017-0560-4>
- Sohoglu, E. & Chait, M. (2016). Detecting and representing predictable structure during auditory scene analysis. *eLife, 5*, Article e19113. <https://doi.org/10.7554/elife.19113>

- Surwillo, W. W. (1961). Frequency of the ‘alpha’ rhythm, reaction time and age. *Nature*, *191*(4790), 823–824. <https://doi.org/10.1038/191823a0>
- Swann, N. C., de Hemptinne, C., Thompson, M. C., Miocinovic, S., Miller, A. M., Gilron, R., Ostrem, J. L., Chizeck, H. J. & Starr, P. A. (2018). Adaptive deep brain stimulation for Parkinson’s disease using motor cortex sensing. *Journal of Neural Engineering*, *15*(4), Article 046006. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aabc9b>
- Tang, Y.-Y., Hölzel, B. K. & Posner, M. I. (2015). The neuroscience of mindfulness meditation. *Nature Reviews Neuroscience*, *16*(4), 213–225. <https://doi.org/10.1038/nrn3916>
- Tang, Y.-Y., Tang, R., Rothbart, M. K. & Posner, M. I. (2019). Frontal theta activity and white matter plasticity following mindfulness meditation. *Current Opinion in Psychology*, *28*, 294–297. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2019.04.004>
- Thut, G., Veniero, D., Romei, V., Miniussi, C., Schyns, P. & Gross, J. (2011). Rhythmic TMS causes local entrainment of natural oscillatory signatures. *Current Biology*, *21*(14), 1176–1185. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.05.049>
- Vigué-Guix, I., Fernández, L. M., Cuello, M. T., Ruzzoli, M. & Soto-Faraco, S. (2020). Can the occipital alpha-phase speed up visual detection through a real-time EEG-based brain–computer interface (BCI)? [Advance online publication]. *European Journal of Neuroscience*. <https://doi.org/10.1111/ejn.14931>
- Voelker, P., Parker, A. N., Luu, P., Davey, C., Rothbart, M. K. & Posner, M. I. (2020). Increasing the amplitude of intrinsic theta in the human brain. *AIMS Neuroscience*, *7*(4), 418–437. <https://doi.org/10.3934/neuroscience.2020026>
- Weible, A. P., Piscopo, D. M., Rothbart, M. K., Posner, M. I. & Niell, C. M. (2017). Rhythmic brain stimulation reduces anxiety-related behavior in a mouse model based on meditation training. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *114*(10), 2532–2537. <https://doi.org/10.1073/pnas.1700756114>
- Williams, P. E., Mechler, F., Gordon, J., Shapley, R. & Hawken, M. J. (2004). Entrainment to video displays in primary visual cortex of macaque and humans. *Journal of Neuroscience*, *24*(38), 8278–8288. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.2716-04.2004>
- Zion Golumbic, E. M., Ding, N., Bickel, S., Lakatos, P., Schevon, C. A., McKhann, G. M., Goodman, R. R., Emerson, R., Mehta, A. D., Simon, J. Z., Poeppel, D. & Schroeder, C. E. (2013). Mechanisms underlying selective

neuronal tracking of attended speech at a “Cocktail Party”. *Neuron*, 77(5), 980–991. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.12.037>

A. Anhang

A.1. Kurzfassung

Die Sprache oder die sakkadischen Augenbewegungen sind Rhythmen die im Alltag auftreten. Es wird oft angenommen, dass diese Rhythmen auf neuronaler Ebene resonieren, was der Grund für einen Effekt auf die Wahrnehmung sein könnte. Unter neuronalem Entrainment versteht man das rhythmische Mitschwingen neuronaler Aktivität in Folge von externer rhythmischer Stimulation. Es zeigte sich, dass die Güte des Wahrnehmungseindrucks mit der rhythmischen Stimulation schwingt. Jedoch sind auch Studien vorhanden, die diesen Effekt nicht finden können. Bisherige Studien untersuchten meist den Effekt von rhythmischer Stimulation auf die Wahrnehmungsleistung innerhalb einer Sinnesmodalität, sowie bei Zielreizpräsentation während der rhythmischen Stimulation. Forschung, bei der zum einen der Effekt einer solchen rhythmischen Stimulation auf die Wahrnehmungsleistung kreuzmodal betrachtet wird und zum anderen die Zielreizpräsentation nach Ende der Stimulation erfolgt, ist dagegen selten. Die vorliegende Studie ($N = 21$) integriert diese Merkmale basierend auf dem Experiment von Hickok et al. (2015).

Wir nutzten dazu ein $2 \times 2 \times 2$ Design, welches sich aus zwei Entrainmentmodalitäten (auditiv und visuell), zwei Zielreizmodalitäten (auditiv und visuell) sowie zwei Phasenbedingungen (In-Phase und Off-Phase) der Zielreizpräsentation ergab. Die Zielreize wurden entweder in Phase oder in Gegenphase zur vorangehenden rhythmischen Stimulation präsentiert. Wir nahmen an, bei einem Schwingen der Wahrnehmungsleistung nach rhythmischer Stimulation, einen Effekt der Phasenbedingung beobachten zu können. Die Teilnehmer*innen sollten möglichst schnell und korrekt durch Tastendruck einen auditiven beziehungsweise einen visuellen Zielreiz diskriminieren, wenn ein Zielreiz auftrat.

Es zeigte sich ein Effekt der rhythmischen Stimulation auf die Wahrnehmung nur für modalitätsspezifische Bedingungen. Zielreize welche in Phase zur vorangehenden Stimulation auftraten wurden dann meistens besser erkannt, wenn die Stimulation und der Zielreiz die selbe Sinnesmodalität ansprachen. Diese Ergebnisse unterstützen den heterogenen Erkenntnisstand zum Effekt von rhythmischer Stimulation auf die Wahrnehmung.

A.2. Abstract

Speech or saccadic eye movements are rhythms that occur in everyday life. It is often assumed that these rhythms resonate at the neuronal level, which could be the reason for an effect on perception. Neuronal entrainment is the rhythmic resonance of neuronal activity as a result of external rhythmic stimulation. It has been shown that the quality of the perceptual impression oscillates with the rhythmic stimulation. However, there have also been studies that failed to find this effect. Previous studies mostly investigated the effect of rhythmic stimulation on perceptual performance within one sensory modality, as well as at target stimulus presentation during rhythmic stimulation. In contrast, research in which, first, the effect of such rhythmic stimulation on perceptual performance is considered cross-modally and, second, target stimulus presentation occurs after the stimulation has ended is rare. The present study ($N = 21$) integrates these features based on the method used by Hickok et al. (2015).

A $2 \times 2 \times 2$ design was used for this purpose, which consisted of two entrainment modalities (auditory and visual), two target stimulus modalities (auditory and visual), and two phase conditions (in-phase and off-phase) of target stimulus presentation. The target stimuli were presented either in phase or in counterphase to the preceding rhythmic stimulation. We assumed that we would be able to observe an effect of the phase condition when perceptual performance oscillated after rhythmic stimulation. Participants were asked to discriminate an auditory or a visual target stimulus as quickly and correctly as possible by pressing a key when a target stimulus occurred.

An effect of rhythmic stimulation on perception was found only for modality-specific conditions. Target stimuli that occurred in phase with the preceding stimulation were usually better recognized when the stimulation and the target stimulus addressed the same sensory modality. These results support the heterogeneous body of knowledge on the effect of rhythmic stimulation on perception.