Masterarbeit

Neuronale Korrelate der Rhythmuswahrnehmung

Hängen neuronales Entrainment zum Beat und musikalisches Rhythmusverständnis zusammen?

Verfasser: Simjon Radloff

[redacted] [redacted]

Erstprüfer: Prof. Dr. Stefan Weinzierl

Zweitprüferin: Dr. Manon Grube

Abgabedatum: 02.09.2019

Technische Universität Berlin

Audiokommunikation und -technologie (M. Sc.)

Sommersemester 2019

Inhalt

1. Einleitung ... 1
a. Überblick ... 1
b. Wahrnehmung und Erkenntnisgewinn ... 1
2. Musik und Zeit ... 2
a. Musik in Zeit ... 2
b. Zeit in Musik ... 3
i. Beat ... 3
ii. Metrum ... 4
iii.Tactus ... 4
iv. Rhythmus ... 5
3. Entrainment und Groove ... 6
4. Interdisziplinäre Musikwissenschaft ... 8
a. Evolution: Musik als soziale Kommunikation ... 8
b. Grundlagenforschung und klinischer Nutzen ... 9
5. Die innere Uhr: Keeping time ... 10
a. Zeitwahrnehmung ... 10
b. Neuronale Oszillationen ... 11
6. Empirischer Teil ... 13
a. Einleitung ... 13
i. Hintergrund ... 13
ii. Stand der Wissenschaft zum neuronalen Entrainment ... 15
iii. Magnetenzephalographie (MEG) ... 16
iv. Musical Ear Test (MET) ... 18
v. Motivation und Hypothese ... 19
b. Methode ... 19
i. Experiment ... 20
ii. Preprocessing ... 22
iii. Analyse ... 24
c. Ergebnisse ... 28
i. Resultate aus dem MEG ... 29
ii. Resultate aus dem MET ... 38
iii. Statistische Auswertung: Zusammenhang zwischen den Ergebnissen aus MEG und MET ... 38
d. Diskussion der Ergebnisse ... 40
i. Interpretation ... 41
ii. Limitationen ... 43

iii. Perspektiven 45
7. Fazit 47
8. Dank 48
9. Quellen 49
10. Verzeichnisse 55
a. Tabellen 55
b. Abbildungen 55
11. Anhänge 56
12. Eidesstattliche Erklärung 58

Abstract

Timing ist eine der wichtigsten Eigenschaften von Musik: Groove und rhythmische Komplexität beeinflussen Musikgenuss. Rhythmuswahrnehmung wird hier interdisziplinär betrachtet. Entrainment, d. h. kognitives Mitschwingen, gilt als Schnittstelle zwischen dem musikologischen Puls / Beat und neuronalen Schwingungen. Der Zusammenhang zwischen neuronalem Entrainment und Rhythmusverständnis ist bisher jedoch unklar. Daher untersucht diese Arbeit die Korrelation zwischen Hirndaten und musikalischem Timing.
VersuchsteilnehmerInnen hören einen metronom-ähnlichen Stimulus, während ihre Hirnaktivität im Magnetenzephalographen (MEG) aufgezeichnet wird. Danach führen sie den Musical Ear Test (MET) durch, hierin wird Rhythmusverständnis quantifiziert.
In temporalen (v.a. im Alpha-Band: 8-12 Hz) sowie in frontalen (v.a. im Beta-Band: 13 – 30 Hz) MEG-Sensoren wurden klare Patterns beat-basierter neuronaler Oszillationen gefunden. Ein signifikanter Zusammenhang zum Rhythmustest besteht, MET- und MEG-Daten korrelieren mit Effektstärken um 0,4 (Pearson's r).
Mit dem Entrainment in auditorischen und motorischen Hirnregionen liefert die Arbeit weitere neurokognitive Evidenz dafür, wie Rhythmen zur Bewegung anregen. Ein moderater Zusammenhang zum behavioralen Maß konnte gefunden werden. Zwischen beat-basiertem Entrainment und Rhythmusverständnis scheinen noch weitere kognitive Ebenen zu liegen. Limitationen, Ideen und Perspektiven werden diskutiert.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung	Erklärung
Abb.	Abbildung	
BBCI	Berlin Brain-Computer Interface	Gemeinsames Projekt der Fachgebiete Neurotechnologie und Machine Learning der Technischen Universität Berlin sowie der Neurophysics Gruppe der Charité Universitätsmedizin Berlin. Diese Arbeit entstand in Kooperation mit dem BBCI (Kontakt / Supervision durch Dr. Manon Grube)
bpm	Beats per minute (Schläge pro Minute)	Geschwindigkeitsmaß, das vor allem in der Musik verbreitet ist
bspw.	beispielsweise	

dB	Dezibel	Relatives Maß, das vor allem in der Akustik und Audiotechnik zur Beschreibung von Lautstärke respektive Signalstärke verbreitet ist. Hier verkürzt verwendet für dB SPL (soundpressurelevel, Schall-druckmaß).
ebd.	ebenda	Referenzierter Inhalt entstammt vorangegangener Zitation
EEG	Elektroenzephalographie / Elektroenzephalogramm	Elektrisches Verfahren zur Messung von Gehirn-aktivität bzw. daraus resultierende Darstellung
GTTM	Generative Theory of Tonal Music	Theorie aus dem gleichnamigen Buch von Jackendoff und Lerdahl, die beispielsweise metrische Analyse von Musikstücken ermöglicht
Hz	Hertz (1/Sekunde)	Geschwindigkeitsmaß, das vor allem in der Physik und Signalverarbeitung verbreitet ist
ICA	Independent Component Analysis	Verfahren, um aus einem Datensatz Komponenten zu extrahieren, die eine möglichst große Varianz im Vergleich zu den jeweils anderen Komponenten aufweisen. Hier verwendet für Artefaktreduktion im MEG (Blinzeln und Herzschlag).
IOI	Inter-Onset-Interval	Dauer zwischen dem Erscheinen (Onset) von zwei aufeinanderfolgenden Reizen.
JND	Just noticeable difference	Psychophysikalisches Maß für den kleinsten Unterschied zwischen zwei Darbietungen, der gerade noch wahrgenommen wird (z. B. 30 Millisekunden im Timing).
MEG	Magnetenzephalographie / Magnetenzephalogramm	Elektromagnetisches Verfahren zur Messung von Gehirnaktivität bzw. daraus resultierende Darstellung
MiB	Center for Music in the Brain	Forschungszentrum der Universität Aarhus (Dänemark), das sich mit neurologischer Forschung im Bereich der Musik befasst. Diese Arbeit entstand in Kooperation mit dem MiB (Kontakt / Supervision durch Dr. Manon Grube und Prof. Elvira Brattico)
MRT, fMRT, sMRT	Magnetresonanztomographie / Magnetresonanztomogramm	Magnetisches Verfahren zur Messung von Gehirn-aktivität, bzw. daraus resultierende Darstellung. Funktionale MRT (fMRT) wird während eines Tasks aufgenommen, strukturelle MRT (sMRT) ohne Task, um die Anatomie des Gehirns festzustellen.
min	Zeiteinheit Minute	
ms	Zeiteinheit Millisekunde	
µV	Einheit elektrischer Spannung Mikrovolt	
s	Zeiteinheit Sekunde	
TFA	Time Frequency Analysis	Zeit-Frequenz-Analyse. Verfahren, um Aktivität (Signaldichte) in Frequenzbändern über die Zeit betrachten zu können. Hier verwendet für Darstellung und Exploration der gemessenen Hirnaktivität in einzelnen MEG-Kanälen.
u. a.	unter Anderem	
z. B.	zum Beispiel	

1. Einleitung

> *„Der Rhythmus ist für mich der Grund aller Dinge. Mit dem Rhythmus beginnt das Leben, mit dem Herzschlag.“* – Herbert von Karajan (1908-1989) in einem Interview mit dem Spiegel, 1968

Das voran gestellte Zitat soll – am Beispiel eines bedeutenden Dirigenten – verdeutlichen, wie wichtig praktizierenden Musikern der Rhythmus ist. Er ist es, der einem Stück eine bestimmte Anmutung, einen bestimmten Groove gibt. Im Pop- und Jazz-Bandkontext sorgt die *Rhythmsection*, bestehend aus Schlagzeug, Bass und zumeist ein bis zwei Harmonie-Instrumenten (Gitarre, Tasteninstrument), für das Feel, das ein Musikstück hat.

Hier kommen neben den Musizierenden die Hörenden ins Spiel: Empfinden sie ein Stück als belebend flott oder beruhigend entspannt? Sprüht es für sie vor kreativer Coolness oder ist es eher ostinat bis monoton? Regt es dazu an, die Füße hochzulegen oder mit dem Fuß zu tippen? In diesen Fragen stecken verschiedene Aspekte der Zeit in Musik: zunächst das Tempo, dann die Frage, wie komplex Rhythmen sind und zuletzt die schwierig zu fassende Dimension des Grooves, also eines zum Mitmachen animierenden Moments.

Tempo und rhythmische Komplexität haben nach Fernández-Sotos et al. (2016) einen großen Anteil an der anregenden oder beruhigenden Wirkung von Musik. Genau diese stimmungsregulierende Wirkung („regulation of mood and arousal“) wurde von Schäfer et al. (2013) empirisch als eine der Hauptmotivationen zum Musikhören klassifiziert. Die metrisch-rhythmischen Eigenschaften von Musik haben also einen entscheidenden Einfluss auf den Einschaltimpuls – sie sind für das Gros der HörerInnen unumstritten ein Grund, überhaupt Musik zu hören. Doch wie kommt es, dass die Timingeigenschaften der Musik einen so bedeutenden Einfluss haben?

a. Überblick

In der vorliegenden Arbeit geht es einerseits um Timing in Musik und andererseits darum, wie es wahrgenommen wird. Nach einer Einführung wird ein Einblick in interdisziplinäre Musikforschung gegeben. Hiernach folgt ein Kapitel über das neurobiologische Phänomen des Entrainments, das als Erklärung für ein *Mitgrooven* durch Synchronisieren gilt. Nachdem die mit Entrainment assoziierten neuronalen Oszillationen – also periodische Aktivitäten im Gehirn – beleuchtet wurden, geht die Arbeit in den empirischen Teil über. Hier soll einerseits die Hirnaktivität untersucht werden, die durch einen isochronen akustischen Stimulus hervorgerufen wird. Andererseits stellt sich die Frage, ob ein Zusammenhang besteht zwischen den genannten neuronalen Oszillationen – so sie denn induziert und gefunden werden können – und einer eher musikwissenschaftlichen Betrachtung des rhythmischen Verständnisses. Nach der gängigen IMRaD-Struktur (*Introduction, Method, Results, and Discussion*) im empirischen Teil folgt ein kurzes Fazit.

Um Rhythmus, Metrum und Beat, also zeitliche Dimensionen in Musik, zu verstehen, treten wir zunächst einen Schritt zurück und betrachten die Zeit an sich, ihre Rolle in der Musik und die Wahrnehmung als subjektiven Vorgang.

b. Wahrnehmung und Erkenntnisgewinn

Was ist die Welt? Wo lauern Gefahren auf mich, wie kann ich das Plätschern einer Trinkwasserquelle vom Tosen eines möglicherweise bedrohlichen Wasserfalls unterscheiden, welche Frucht ist genießbar? Diese archaischen Fragen verdeutlichen, wie überlebenswichtig Wahrnehmung ist.

Die Subjektivität unserer Sinneseindrücke beschäftigte die Denker ihrer Zeit bereits in der Antike. Während Platon die Ansicht vertrat, die Sinne lieferten nicht das Wahre, sondern nur ein Scheinbild des Wahren, argumentierte Aristoteles, dass nur Erlebbares zu Erkenntnis führen könne (Schröder und Thüring 2019). Immanuel Kant beschreibt in seiner Transzendentalphilosophie den Erkenntnisgewinn in einer Symbiose der Ansichten von Platon und Aristoteles als zweigeteilt: Erkenntnisse, die rational, also aus der reinen Vernunft entstehen, nennt Kant „a priori“ und solche, die empirischen Sinneseindrücken entstammen, nennt er „a posteriori“. Demnach wird Erfahrung möglich, indem die Wirklichkeit, die durch die Sinne vermittelt wird, durch den Verstand anhand angeborener, vorgegebener Anschauungsformen interpretiert wird. Die Anschauungsformen können als Schablonen begriffen werden, anhand derer der menschliche Geist Eindrücke strukturiert und ordnet. Nach Kant ist demnach sowohl die Sinnlichkeit (= Wahrnehmung) als auch der Verstand (= Ratio) notwendig für menschliche Erkenntnis. Ohne die Dinge, von denen die Sinne erzählen, gäbe es für den Verstand nichts, worüber er nachdenken kann (vgl. ebd.).

Dieser kurze Exkurs in die Philosophie soll die Subjektivität unserer Sinneseindrücke und das Spannungsfeld zwischen Wahrheit und Wahrnehmung verdeutlichen. Lange Zeit blieb es Philosophen vorenthalten, über Sinneseindrücke nachzudenken. Mit zunehmenden technischen Möglichkeiten ist in den letzten Jahrzehnten die Wahrnehmung immer mehr in den Fokus von interdisziplinären Fragen der Psychologie, Biologie, Neurowissenschaft und Physik geraten. Insbesondere die Kognitionswissenschaft erforscht Abläufe der Wahrnehmung und Verarbeitung von Sinneseindrücken. Sie versucht, die Blackbox der mentalen Abläufe zu öffnen, die Lücke zwischen Psychologie und Neurophysiologie zu schließen. Auch die vorliegende Arbeit befasst sich mit kognitiven Modellen der Wahrnehmung (mehr dazu unter → 6. Epirischer Teil, S. 13).

2. Musik und Zeit

Zeit ist ein wesentlicher Bestandteil von Musik. Einerseits könnte Musik ohne Zeit nicht klingen. Andererseits sind die zeitlichen Eigenschaften der Musik entscheidend für ihre Wahrnehmung. Diese Beziehung soll hier von zwei Seiten beleuchtet werden.

a. Musik in Zeit

Musik ist unweigerlich an Zeit geknüpft. Wie kann diese These argumentativ untermauert werden?

Musik kann nur in Zeit klingen. Auch wenn mit Notation versucht wird, einen Schnappschuss der musikalischen Idee festzuhalten, ist doch die eigentliche Aufführung mit mehr oder weniger expressiver Interpretation das, was Musik erst zur Existenz bringt.

Ohne Zeit gäbe es keine Musik. Auch wenn es ein etwas abwegiges Gedankenexperiment ist, wollen wir es hier kurz wagen: Was würde aus unserer Welt, würde die Zeit stehen bleiben? Stille. Nichts bewegte sich, nichts würde einen Ton erzeugen. Auch Michael Ende verfällt in seinem Buch „Momo“ der Faszination des in der Realität unmöglichen Zeitstillstands. Nur seine Protagonistin kann sich hier durch die festgefrorene Welt bewegen. Was ihr dabei am meisten auffällt, ist die nie dagewesene Ruhe.

> „Im gleichen Augenblick hörte das vielstimmige Ticken und Schnarren und Klingen und Schlagen der unzähligen Uhren ganz plötzlich auf. […] Nichts, gar nichts regte sich mehr. Und eine Stille breitete sich aus, so vollkommen, wie sie nie und nirgends zuvor auf der Welt geherrscht hatte. Die Zeit hatte aufgehört.“ (Ende 1973, S. 248)

In dem Gedankenexperiment würden viele weitestgehend unveränderliche Kunstprodukte etwa aus der Malerei, Literatur oder Architektur in einem infinitesimalen Zeit-Punkt weiterhin bestehen. Musik dagegen wäre zwar in aufgeschriebener Form noch als Entwurf, als eine Idee existent. In aufgeführter Form wäre sie allerdings, wie alle Geräusche in diesem Gedankenexperiment, schlicht ein bestimmter Luftdruck. Vom Menschen hörbarer Schall im Allgemeinen wird dabei üblicherweise als Änderung von Schalldruck und Schallschnelle über die Zeit beschrieben (Weinzierl 2008, S. 20f). Daher ist Musik als akustisches Phänomen nur im Verlauf der Zeit existent.

In ihr kommen außerdem noch einige Zeitgrößen wie Metrik und Rhythmik hinzu. Zieht man die Abhängigkeit von Schwingungen pro Zeiteinheit in Betracht, sind sogar die tonhöhenabhängigen Größen Melodik und Harmonik *Zeitgeschöpfe*. Daher, und aufgrund ihrer nur in der Zeit möglichen Ausbreitung, muss auch die Niederschrift der Musik, die auf den ersten Blick als zeitunabhängig erscheint, zugeben, nur mit Hilfe der Zeit einen Nutzen zu haben. Die verschiedenen zeitlichen Variablen in der Musik wollen wir später noch genauer betrachten.

Die große Bedeutung vom Verlauf der Zeit für die Musik ist einzigartig. Keine andere Kunstform ist in dem Grad vergänglich. Selbst der Tanz, der ähnlich abhängig vom Fortschreiten der Zeit ist, hat in einem eingefrorenen Moment (beispielsweise einer Fotografie) noch eine bestimmte Ästhetik – für die Tanzenden mit etwas Glück auch eine halbwegs elegante. Dasselbe gilt für Bewegungskünste wie Film, Theater oder auch ein Feuerwerk. Werden diese gestoppt, gibt es immer noch ein Standbild mit künstlerischem Wert. Stoppen Sie einmal eine Audioaufnahme. Was dann übrig bleibt, ist alles, was in Musik unabhängig von der Zeit ist. Nichts.

b. Zeit in Musik

Nachdem vorab herausgearbeitet wurde, wie wichtig Zeit für Musik ist, soll hier nun dargelegt werden, in welchen Dimensionen Zeit bzw. *Timing* (also generell betrachtet temporale Eigenschaften von auftretenden Events) in der Musik verstanden werden kann und welche Größen – vor allem aus der Musikwissenschaft und Musiktheorie stammend – etabliert sind. Um Missverständnissen vorzubeugen, werden hier einige Begriffe definiert, die nachfolgend auf diese Weise verwendet werden.

Timing in der Musik spielt auf verschiedenen Ebenen eine Rolle. Für Jackendoff und Lerdahl ist gar ein ganzes Stück durch *prolongational reduction* und *time span reduction* auf hierarchische Ebenen analysierbar und zeitlich reduzierbar. Die zwei Autoren definieren relevante Größen im Timing westlicher tonaler Musik wie folgt:

- Beat: Grundelement von Timing-Events
- Tactus: mittlerer, gefühlter Schlag, zu dem bspw. dirigiert wird
- Metrum: Hierarchie mit mehreren Betonungs- und Bedeutungsebenen

Zu den Timingmaßen ist zudem der Rhythmus zu zählen. Die vier Begriffe werden im Folgenden näher erklärt.

i. Beat

Eine grundlegende Neuerung der *Generative Theory of Tonal Music* von Jackendoff und Lerdahl (im Folgenden GTTM) im Vergleich zu Vorgängern wie Cooper und Meyer (1960) ist die Einführung des Begriffs *Beat*: „The elements that make up metrical pattern are beats.“ (Jackendoff und Lerdahl 1983, S. 18). Hiermit meinen Jackendoff und Lerdahl das theoretisch-perzeptive Konstrukt, das jedem

rhythmischen Element unterliegt, jede erklingende Note wird kognitiv durch (mindestens) einen Beat repräsentiert. Beats selbst haben keine Dauer und werden daher geometrisch analog durch einen Punkt dargestellt.
Beats sind durch gleiche Abstände (*time-spans*) voneinander separiert. Daher müssen bei natürlicher Musik verschiedene Ebenen von Beats eröffnet werden, da die wenigsten Kompositionen mit nur einer Tonlänge auskommen. Die nächsthöhere Ebene wird in der GTTM im Abstand von 2 oder 3 Beats akzeptiert, was uns zum Metrum bringt.

ii. Metrum

Im Konzept Metrum werden verschiedene rhythmische Elemente in Bezug zueinander gestellt und gruppiert (Levitin 2008, S. 61). Dabei ist das Metrum ein Teil der Wahrnehmung, wie Levitin schreibt: „Generally when we're tapping or clapping along with music, there are some beats that we feel more strongly than others. [...] This louder, heavier beat is perceptually dominant, and other beats that follow it are perceptually weaker until another strong one comes in. Every musical system that we know of has patterns of strong and weak beats" (ebd.). Bei Metrum ist demnach die Gewichtung bestimmter Einzelevents entscheidend – ein Phänomen, das durch seine kulturübergreifende Existenz grundlegend erscheint.

Folgen wir der Definition von Jackendoff und Lerdahl, so etabliert Metrum eine Hierarchie, die mit verschiedenen Beatebenen erklärt werden kann. Dabei wird in der Analyse von der schnellsten Ebene (bspw. Achtel) zur langsamsten Ebene (bspw. vier 4/4 Takte) gearbeitet. Wann immer ein Beat auch auf der höheren Ebene einem Beat zugeordnet wird, gilt er als stark oder akzentuiert, wird er das nicht, gilt er als schwach (Jackendoff und Lerdahl 1983, siehe Abb. 1).

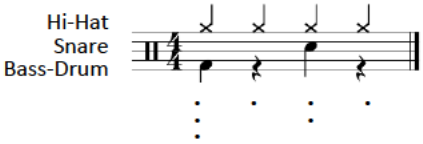


Abbildung 1: Typisches Pop-/Rock-Schlagzeugpattern im 4/4-Takt. *Unter der Notenzeile sind Beats als Punkte auf drei Ebenen eingetragen: Viertel, Halbe und Takt.*

Auch Large und Kolen betonen den Akzent, auf den ein Metrum angewiesen ist: "Meter, as it is traditionally defined, refers to the measurement of the number of beats between more or less regularly recurring accents" (1994, S. 4). Sie machen zwei Kriterien für Metrum aus: erstens ein gefühltes Gewicht bzw. einen Akzent auf einigen der auftretenden Beats und zweitens die Existenz von mindestens zwei separaten Beatlevels.

Abschließend lässt sich zu Puls und Metrum hervorheben, dass diese musikalischen Zeitmerkmale mentale Repräsentationen der Hörenden sind. Fitch und Rosenfeld schreiben in ihrem Paper über die Wahrnehmung von Synkopen (also Betonungen von metrisch schwachen Zählzeiten), „both pulse and meter are abstract concepts, not necessarily present in the auditory signal, but rather inferred by the listener. Thus, even though there is no acoustic event at some pulse locations, a pulse may be perceived. This is also true of the related concept of meter, which allows listeners to group and subdivide pulses into higher order structures" (Fitch und Rosenfeld 2007, S. 44).

Metrum ist also ein Vorgang, bei dem einerseits eine Periodizität isochroner Repräsentationen aus dem gegebenen rhythmischen Muster gezogen wird (die allein auch als Puls bezeichnen wird), und andererseits die Gewichtung dieser Pulse auf verschiedenen Ebenen zu einer Hierarchie der Akzente führt.

iii. Tactus

Während das Metrum sich durch eine vielschichtige Gleichzeitigkeit von Beats verschiedener Tempi auszeichnet, versucht der Tactus, diese Ambiguität zu mindern. Als Tactus wird nach Jackendoff und

Lerdahl nämlich das eine partikuläre Beatlevel bezeichnet, zu dem man, wie Levitin (2008, S. 59) schreibt, klatschen oder mittippen würde und das üblicherweise zwischen 40 und 160 Schlägen pro Minute (*beats per minute*, bpm), zumeist nahe 70 bpm, liege (Jackendoff und Lerdahl 1983). „The listener tends to focus primarily on one (or two) intermediate level(s) in which the beats pass by at a moderate rate. […] Adapting the Renaissance term, we call such a level the tactus" (Jackendoff und Lerdahl 1983).
Der Tactus hat dabei als selektives Instrument, das aus verschiedenen metrischen Ebenen eine herauspickt, ein leichtes Konfliktpotential inne, wie Levitin schreibt: "Sometimes, people tap at half or twice the beat, due to different neural processing mechanisms from one person to another as well as differences in musical background, experience, and interpretation of a piece. Even trained musicians can disagree on what the tapping rate should be. But they always agree on the underlying speed at which the piece is unfolding, also called tempo; the disagreements are simply about subdivisions or superdivisions of that underlying pace" (Levitin 2008, S. 59 f).
Hier nennt Levitin eine wichtige Eigenschaft, die Metrum, Puls, Tactus und im Grunde auch Rhythmus verbindet: *subdivisions*, also Unterteilungen und *superdivisions*, also Zusammenfassungen von Timingelementen der Musik. In Analogie zum hierarchischen Beatlevel-Modell von Jackendoff und Lerdahl können Hörer den Tactus von ertönenden Rhythmen auf verschiedene Art interpretieren.
Dies kann auch zum Stilmittel erkoren werden, besonders reizvoll geschieht das beispielsweise in der elektronischen Musikrichtung *Drum'n'Bass*. Hier wird typischerweise ein sehr schnelles Drumpattern genutzt, dessen Tempo (zumeist 166-176 bpm, Mallinder 2011, S. 38) über der üblichen Tactus-Rate liegt. Rezipienten müssen sich also entscheiden, ob sie beim Tanzen die schnelle Frequenz mithalten oder auf die halb so schnelle Superdivision wechseln und nur noch jeden zweiten Schlag motorisch ausführen. Diese metrische Unklarheit wird von manchen HörerInnen als anstrengend empfunden. Gleichzeitig bietet sie den RezipientInnen aber mehr Interpretationsspielraum und gilt daher gerade in ihrer Offenheit und Mehrdeutigkeit als interessant (vgl. dazu das Konzept der *metrical dissonance* in elektronischer Tanzmusik, bspw. in Mark Butlers *Turning the beat around*, 2001).
Ein weiteres Beispiel für kreativen Umgang mit dem Tactus kommt aus dem Jazz, wenn vor allem in langsamen Stücken wie Balladen Teile im Solospiel in sogenannter *doubletime* interpretiert werden (Szegedi 2012). Für kurze Zeit scheint es so, als würde das Solo im doppelt so schnellen Tempo gespielt, während die Begleitung konstant im alten Tempo bleibt. Diese gewitzte Art, einen Polyrhythmus (bspw. Swingphrasierung über geraden Notenwerten) zu etablieren, lässt die RezipientInnen hier besonders aufhorchen. Auch dieses Phänomen kann der *metrical dissonance* (vgl. Butler 2001) zugerechnet werden und eröffnet den Interpretierenden neue Gestaltungsspielräume.

iv. Rhythmus

Als Rhythmus werden im Allgemeinen Patterns der Bewegung in der Zeit bezeichnet (Large und Kolen 1994, S. 3), typischerweise in der Größenordnung einiger Sekunden (Justus und Bharucha 2002, S. 465). Während Metrum und Tactus ein höheres Abstraktions- und Analyselevel benötigen, beschreibt Rhythmus die erklingenden Events direkt, wenn auch in ihrer relationalen Abhängigkeit. Justus und Bharucha erwähnen zudem, dass Rhythmen zu einem Anteil von 85% bis 95% aus kleinen ganzzahligen Notendauerverhältnissen wie 2:1 oder 3:1 bestehen (ebd., für eine Erklärung dieses Phänomens siehe Ravignani et al. 2018).

Wenngleich Rhythmus zunächst nur die dargebotenen Ereignisse beschreibt, so ist er doch der Ursprung aller zuvor genannten Timinggrößen. Wie Large und Kolen schreiben, kombiniert Rhythmus die Events zu Gruppen oder induziert ein Metrum. Damit sei er keine rein objektive Eigenschaft der Musik, sondern eine gemischte Erfahrung objektiver und subjektiver Komponenten (Large und Kolen 1994, S. 3).

Eine strikte Unterscheidung zwischen Rhythmus und Metrum ist dabei eher traditionell. Aktuellere Forschung zu Timing und seiner Wahrnehmung in Musik (etwa Lidov 2005) geht davon aus, dass die

Konzepte nicht klar unterscheidbar sind, oder sich zumindest gegenseitig bedingen. Der schlagkräftige Buchtitel *Meter as Rhythm* des Musiktheoretikers Christopher Hasty (1997, für eine Besprechung siehe Roeder 1998) soll die Trennung offenbar beenden. Bei Hasty spiele die Projektion eines musikalischen Events eine entscheidende Rolle, seine Neuinterpretation von Metrum habe die gleichen Eigenschaften wie Rhythmus: „emerging, active, creative and perpetually novel“ (Roeder 1998).
In der vorliegenden Arbeit soll der Begriff Rhythmus die Abfolge physikalischer Ereignisse beschreiben, während ein induzierter Puls oder ein gewichtetes Metrum reine mentale Repräsentationen meinen. Die Trennung wird hier also zwischen der kognitiven Wahrnehmung und dem akustisch messbaren, musikalischen Event gezogen.

3. Entrainment und Groove

Paul Fraisse führt in seinem grundlegenden und einflussreichen Buch „Die Psychologie der Zeit“ an, dass Bioorganismen auf bestimmte Zyklen aus ihrer Umwelt reagieren. Sie synchronisieren sich etwa mit Rhythmen von Tag und Nacht, Sommer und Winter etc. „Diese Periodizität kann die Veränderungen der Umwelt in dem Maße antizipieren, daß [sic] die induzierten Rhythmen noch eine bestimmte Zeit anhalten, wenn die Wirkung eines induzierenden Agens ausbleibt. So wird die exogene Periodizität durch Induktion zu einer endogenen“ (Fraisse 1985, S. 24). Wie bei akustischer Resonanz ist die menschliche Wahrnehmung also fähig, sich auf einen äußeren Reiz einzustimmen und hiernach selbstständig weiter zu schwingen. Dieses Phänomen wird heute zumeist Entrainment genannt. Eine generelle Definition gibt Jennifer Judge zunächst unabhängig von Wahrnehmung, Neurophysiologie oder Musik. “Entrainment, however, occurs when two systems, each with their own independent sources of energy and which are already exhibiting rhythmic motion, interact in such a way that the motion of each is affected” (Judge 2016, S. 206). Sie stellt hier den Unterschied zur Resonanz heraus, bei der ein aktives System ein ruhendes System affektiert. Entrainment sei demnach ein herausfordernderer Vorgang („more demanding“, ebd.) als Resonanz.

Stimuli, die Entrainment hervorrufen können, sind dabei sehr verbreitet. Periodische Signale umgeben den Menschen einerseits extern: in der Natur etwa das Wogen einer Brandung oder der Wechsel von Tag und Nacht und in der menschgemachten Umgebung etwa die Taktung von öffentlichen Verkehrsmitteln und das Tropfen eines Wasserhahns. Andererseits sind wir auch intern abhängig von repetitiven Abläufen, deren kausaler Zusammenhang zu Entrainment nicht zwingend gegeben ist: etwa der Stoffwechsel des Herz-Lungen-Kreislaufs, das abwechselnde Voransetzen der Beine und Füße beim Gehen oder der individuelle *circadiane* Schlaf-Wach-Rhythmus (Fraisse 1985).

Man geht davon aus, dass Teile des Gehirns in der Lage sind, sich auf periodischen oder quasiperiodischen Input derart einzustellen, dass die Hirnaktivität sich mit dem Stimulus synchronisiert. Dadurch kann auch motorische Aktivität synchronisiert werden, wenn wir z. B. zu einem Musikstück klatschen oder dem Metronom mit Fingertippen folgen, auch dann noch, wenn das Metronom gestoppt wird. Oliver Sacks schreibt dazu: „The rather mechanical term ‚entrainment’ is sometimes used in regard to the human tendency to keep time, to make motor responses to rhythm. But research has now shown that so-called responses to rhythm actually precede the external beat. We anticipate the beat, we get rhythmic patterns as soon as we hear them, and we establish internal models or templates of them” (Sacks 2011, S. 261). Das Gehirn folgt also nicht nur den externen Reizen, sondern bildet ein Pattern, mit dem es den nächsten Reiz vorhersehen kann und das für eine bestimmte Zeit auch unabhängig vom Stimulus fortlaufen kann (vgl. Fraisse 1985, S. 24).

Dieses neuronale Entrainment kann also als verantwortlich für das Erkennen und Verstehen von isochronen Reizen verstanden werden, also Reizen mit gleichbleibendem zeitlichem Abstand zwischen den Events. Untersucht man das Verarbeiten von Regularität, ermöglicht dies das Verständnis von zweierlei: der Perzeption und der Produktion von wiederkehrenden Abläufen. Damit ergibt sich eine weitreichende Relevanz, die nicht nur auf auditiver Ebene interessant ist. Regularitätsverarbeitung kann als Grundlage für die Wahrnehmung der Umwelt, Sprachverständnis und Sprechen, Planen von Bewegungsabläufen und zu guter Letzt Musik hören und machen gesehen werden (mehr zur Relevanz von Regularitätswahrnehmung in → i. Hintergrund, S. 13).

Takako Fujioka und KollegInnen konnten auf neurophysiologischer Basis zeigen, dass Entrainment zu einem isochronen akustischen Reiz nicht nur anhand von Aktivität in auditorischen Hirnregionen, sondern auch in motorischen Arealen gemessen werden kann. „Auditory cortices showed a periodic beta modulation consisting of an initial rapid beta decrease, immediately following the stimulus onset and the subsequent rebound. […] The brain areas showing temporally correlated beta modulation with that in the auditory cortices included motor-related cortical and subcortical areas even in the absence of movement" (Fujioka et al. 2012, S. 1798). Dies ist einerseits interessant, weil eine solche Beat-abhängige Betamodulation bis dato nicht so klar gefunden werden konnte und andererseits, weil ein rein akustischer Reiz ohne Ausführung einer Bewegung und auch ohne die Intention einer Bewegung als Reaktion in motorischen Arealen wiederzufinden ist. Entrainment scheint also ein Vorgang zu sein, der verschiedene Bereiche des Gehirns vereint, etwa bei Timingaufgaben.

Einerseits ist Entrainment also mit motorischer Teilnahme eng verbunden und andererseits ist es ein robustes, allgegenwärtiges und intuitives Verhalten (Merchant et al. 2015, S. 2). Justin London formuliert es aktiver, wenn er schreibt: "Entrainment leads us to focus our attention to the most salient temporal locations for events" (London 2012, S. 12). Indem wir durch Entrainment Aufmerksamkeits-Peaks herausbilden, sparen wir demnach kognitive Ressourcen. London schlägt zudem die Brücke zwischen Entrainment und dem Eintreten von musikalischem Metrum. „Musical meter is the anticipatory schema that is the result of our inherent abilities to entrain to periodic stimuli in our environment" (London 2012).

Im musikalischen Kontext – der in westlicher tonaler Musik größtenteils auf isochronen Metren binärer oder ternärer Struktur beruht (Justus und Bharucha 2002, S. 465) – kann Entrainment als die Grundlage für Mitgrooven gesehen werden. Sobald ein/e HörerIn mit dem Finger zur Musik tippt, mit dem Kopf nickt oder den Fuß bewegt, ist Entrainment passiert, von willkürlichen Tanzbewegungen ganz zu schweigen. Gleichzeitig wird Groove als derjenige Anteil in gehörter Musik beschrieben, der körperliche Teilnahme induziert, also zur Bewegung anregt. *Groove* ist somit das pop- und jazz-musikwissenschaftliche Äquivalent zum neurokognitiven *Entrainment* (Iyer 2002, S. 398).

Systematische Musikwissenschaft in der Pop- und Jazz-Forschung beschäftigt sich u. a. damit, welche Eigenschaften von Musik erhöhtes Groove-Empfinden hervorrufen. Kilchenmann und Senn (2015) fanden bspw. heraus, dass nicht perfektes Timing, sondern leicht vom metronomischen Gitter abweichende Ausführung das Mitgrooven erhöht. Passend dazu fand Bruno Repp eine Begünstigung von expressivem Timing beim Synchronisieren zu Stimuli (Repp 2002). Er schreibt 2005 in einem Review-Paper darüber: "Synchronization with expressively timed music is easier than synchronization with a monotone sequence that has the same timing pattern or with music that has an atypical or structurally inappropriate (phase-shifted) expressive timing pattern" (Repp 2005, S. 985f). Auch hier wird also die Bedeutung von metrischen Abweichungen hervorgehoben.

Doch expressives Timing oder *participatory discrepancies* sind nach der systematischen Musik-wissenschaft nicht die einzigen Faktoren für erhöhtes Grooveempfinden. Auch Synkopierung (Fitch

2016; Witek et al. 2014), Polyrhythmen/metrische Dissonanzen (Iyer 2002; Szegedi 2012) und schlicht die Lautstärke (Kilchenmann und Senn 2015) gelten als entscheidend für spontane körperliche Ausführung musikalisch induzierter Bewegungen.

Damit zeigt Musik ihren facettenreichen Einfluss auf vergnüglichen Zeitvertreib des Menschen. Doch Musik und spezifischer ihre Timingeigenschaften haben und hatten wohl weitreichendere Folgen auf uns als gut gefüllte Tanzflächen, wie im Folgenden erläutert werden soll.

4. Interdisziplinäre Musikwissenschaft

Musik kann beschrieben werden als Abfolge von Ereignissen, die in Tonhöhe und Zeit strukturiert sind (Tillmann 2012). Sie ist zwar eine Form der Kommunikation, aber in ihrer semantischen Informationsvermittlung der Sprache weit unterlegen. Dafür eröffnet die emotionale (Aussage-) Kraft von Musik Bereiche, die oft mit Sprache nicht erreicht würden. Ganz praktische Beispiele hierfür sind in der Musiktherapie zu finden.

Seit geraumer Zeit ist Musik in den Fokus von interdisziplinärer Forschung und Kognitionswissenschaften gerückt. Jackendoff und Lerdahl schrieben schon 1983, „a piece of music is a mentally constructed entity, of which scores and performances are partial representations by which the piece is transmitted" (Jackendoff und Lerdahl 1983, S. 2). Mit ihrer GTTM gelten sie als prägend für die Musikkognition.
Gerade die Wahrnehmung von Rhythmen gewährt in dieser recht jungen Wissenschaft Einblick in Zeitwahrnehmung, Gestalterfassung sowie motorische und sensorische Abläufe, wie Fitch und Rosenfeld schreiben: „Rhythm perception thus provides an interesting domain in which to explore participants' discovery and processing of abstract generalizations based on concrete, temporally organized acoustic stimuli" (Fitch und Rosenfeld 2007, S. 44). Auch Large und Kolen sehen einen unschätzbaren Wert in Musik für Untersuchungen neuronaler Vorgänge: „Music, unlike natural language, forces us to deal with all aspects of time […]. It may even be that composers and performers shape the temporal structure of music to reflect and to explore natural modes of temporal organization in the human nervous system" (Large und Kolen 1994, S. 29). Der hier hervorgehobene zeitliche Aspekt ist bedeutend in verschiedenen wissenschaftlichen Blickwinkeln, über die Kognitionswissenschaft hinaus.
Im folgenden Abschnitt soll es kurz um die Rolle von Musik im evolutionären, wissenschaftlichen und klinischen Kontext gehen. Dabei ist das Hauptaugenmerk, welchen Einfluss Timing hat und wie Musik Türen öffnet. Oder Fenster, wie Isabelle Peretz es formuliert: „According to most neuroscientists and psychologists, music served as a convenient window to the general functioning of the human brain" (Peretz 2001, S. 435).

a. Evolution: Musik als soziale Kommunikation

Oft wird argumentiert, dass Musik aus evolutionärer Sicht keinen Vorteil bringt – sie helfe beispielsweise nicht bei der Nahrungsbeschaffung, Anpassung an die Umwelt oder Vermehrung. „[Music] is useless […] Music could vanish from our species and the rest of our lifestyle would be virtually unchanged. Music appears to be a pure pleasure technology" (Steven Pinker 1997, S. 528f, zitiert nach Peretz 2001, S. 443). Musik sei also nur ein Nebenprodukt der Evolution, welches nötige Ressourcen, bspw. der Kommunikation, spielerisch und zum reinen Vergnügen verwende.

Trotzdem ist sie kulturübergreifend verbreitet, wie Aniruddh Patel schreibt: "In every culture there is some form of music with a regular beat, a periodic pulse that affords temporal coordination between performers and elicits synchronized motor response from listeners" (Patel 2006, S. 100). Durch die

Omnipräsenz erscheint dieses synchronisierte Musizieren als dem Menschen natürlich eigen. Die Existenz von Musik wird evolutionär gesehen in der Regel mit ihrer sozialen Funktion begründet. Gemeinsames Musizieren oder auch nur gemeinsames Rezipieren von (im evolutionären Zeitmaß immer live dargebotener) Musik fördere soziale Verbundenheit zwischen Individuen (etwa Peretz 2001, S. 442). Und diese wiederum sei gut für die Spezies, denn Zusammenhalt sorge für bessere Chancen im Kampf ums Überleben. Diese theoretischen Überlegungen lassen sich mit empirischen Ergebnissen untermauern.

So sei z. B. ein positiver Effekt von Musik zu beobachten, wenn die Zusammengehörigkeit von zwei in Phase oder außer Phase laufenden Frauen in einem Video beurteilt werden soll (Edelman und Harring 2015). Interpersonell synchronisierte Bewegung verstärke Zugehörigkeit (Hove und Risen 2009) und erhöhe die Kooperation zwischen Individuen (Wiltermuth und Heath 2009) – in Verbindung mit der Evidenz, dass schon Kleinkinder ihre Bewegungen automatisch zum präsentierten musikalischen Beat synchronisieren (Zentner und Eerola 2010), sei Musik von großer sozialer Bedeutung (zit. nach Loersch und Arbuckle 2013, S. 2). Dagegen kamen Demos et al. (2012) zu dem Ergebnis, dass motorische Synchronisierung mit einem menschlichen Gegenüber stärker vom Gegenüber als von der gespielten Musik beeinflusst wird. Musik wirke indes als „sozialer Kleber“, indem sie stark mit emotionaler Verbundenheit korrelierte. Demos et al. schließen ihren Bericht mit den folgenden Worten ab: „The power of music to unite people may lie more in its ability to provide them with a common experience than in its ability to coordinate their movements” (ebd., S. 4).

Auch Isabelle Peretz (2001, S. 442) schreibt, während Sprache im evolutionären Kontext als Mittel der Kommunikation reüssierte, wird Musik als entscheidend für die Kommunion – also das Etablieren zwischenmenschlicher Bindung – angesehen. Hierbei seien zwei Dimensionen der Musik gemeinschaftsstiftend, die sich von der Sprache unterscheiden. Tonhöhen und Frequenzverhältnisse erlaubten harmonisches Vermischen von Stimmen und rhythmische Regularität begünstige motorische Synchronität. Während beide Mechanismen effektive Mittel zum gemeinsamen Singen und Tanzen seien, lassen sie Freiraum für individuelle Gestaltung – eine Voraussetzung für Verbindung in der Gruppe, die über eigennützige Motivation hinausgeht. Der altruistische Anteil verschafft der ganzen Spezies evolutionäre Vorteile.

b. Grundlagenforschung und klinischer Nutzen

Im Enzyklopädie-Artikel über Musik schreiben Donnelly und Limb: “Music is a complex human phenomenon, the perception of which involves a variety of neural processes. […] Through the systematic examination of musical components, neuroscientists have begun to describe a compelling model of how the auditory brain processes and perceives the complex sounds of music” (Donnelly und Limb 2009). Bei der neurologischen Erforschung von Musik tun sich also zahlreiche Untersuchungsobjekte auf. Gleichzeitig bietet sie allerdings auch viele Lösungsansätze von weitreichender Relevanz. In einem sehr instruktiven und unterhaltsamen Interview mit der New York Times berichtet der Timingforscher Aniruddh Patel (Dreifus 2010) vom direkten Nutzen, den Musik und ihre Erforschung auch im klinisch-pathologischen Kontext haben kann:

> „One example. There’s a neurologist in Boston, Gottfried Schlaug, who uses music therapy to return some language to stroke victims. He has them learn simple phrases by singing them. This has proved more effective than having them repeat spoken phrases, the traditional therapy. Schlaug’s work suggests that when the language part of the brain has been damaged, you can sometimes recruit the part that processes music to take over.
> Music neuroscience is also helping us understand Alzheimer’s. There are Alzheimer’s patients who cannot remember their spouse. But they can remember every word of a song they learned as a kid. By studying this, we’re learning about how memory works.“

Die hier angeführten Fälle sind nur Beispiele für einen offenbaren Trend in Kognitions- und Neurowissenschaft, sowie Therapien und Behandlungen: Musik wird extensiv als Mittler in psychologische und kognitive Bereiche entdeckt. Pearce und Rohrmeier bemerken dazu: "From the perspective of studying the human mind, the cognitive processing of music simultaneously engages most of the perceptual, cognitive, and emotional processes that we (as cognitive scientists and neuroscientists) are interested in […] rendering it an ideal object for the study of domain-general temporal and emotional processing, as well as motor activity and interaction" (Pearce und Rohrmeier 2012, S. 470). Die vorliegende Untersuchung des kognitiven Vorgangs Entrainment im musikalischen Kontext der Rhythmuswahrnehmung reiht sich in diese Tradition der interdisziplinären, systematischen Musikwissenschaft ein.

5. Die innere Uhr: Keeping time

Die Zeit ist wahrscheinlich eine der beeindruckendsten Dimensionen, die Philosophie, Physik, Kunst, Wissenschaft und Kultur vereint, beeinflusst und beschäftigt. In ihrer unumstößlichen Richtung, erbarmungslosen Ausfaltung, der (Nicht-)Existenz von Gegenwart, aber auch der fast schon non-elitär egalisierenden Eigenschaft, dass jeder Mensch pro Tag 24 Stunden zur Verfügung hat, begeistert und inspiriert sie verschiedenste Lebensbereiche.

Doch wie wird sie wahrgenommen? Und was hat das damit zu tun, ob ein Mensch beim Musizieren das Tempo halten kann? Der folgende Abschnitt befasst sich mit der Zeitwahrnehmung und inneren Timekeepern, die – so nimmt man an – unsere Auffassung von Zeit maßgeblich prägen.

a. Zeitwahrnehmung

So faszinierend die Zeit und ihre Wahrnehmung ist, so ist sie gleichzeitig extrem schwierig zu erfassen. Man muss sich nur vor Augen führen, wie lang eine Minute *dauern* kann, wenn man auf eine wichtige Information wartet – oder wie kurz eine Stunde, wenn man sie mit Spaß und lieben Menschen verbringt.

In Bezug auf die Zeitwahrnehmung merkt auch Paul Fraisse in seinem vielzitierten Werk *Psychologie der Zeit* an, dass eine Definition nur schwierig zu geben ist. „Wahrnehmung bezeichnet in der Alltagssprache jeden Bewußtseinszustand, ob nun sensorisch, affektiv, mnestisch oder geistig. Um nur ein in diesem Kontext geeignetes Beispiel zu nennen, Guitton (1941, 19) spricht von der ‚Wahrnehmung der Zukunft', wobei es sich eindeutig nur um eine Metapher handeln kann. Wahrnehmen […] impliziert im Wesentlichen eine Reaktion auf eine *gegenwärtige* Situation" (Fraisse 1985, S. 72f). Fraisse koppelt in der Einführung zum Kapitel *Die psychologische Gegenwart* die Wahrnehmung also generell an die Zeit, an den Moment, in dem sie gemacht wird.
Das Zeitempfinden kann als temporales Integrieren von kontinuierlichem Input verstanden werden (vgl. Wittmann 2014, S. 38). Ähnlich wie bei der Digitalisierung von Audiosignalen wird der Informationsgehalt eines (sehr kurzen) Zeitabschnitts zusammengefasst und dann als diskreter Wert weiterverarbeitet (vgl. Kapitel 4 in Oppenheim, Schafer und Buck 2004). Was innerhalb eines solchen Zeitfensters passiert, kann nicht als einzelne Events distinguiert werden, sondern wird als gleichzeitig interpretiert. In der Forschung wird die zeitliche Integration im Grunde mit demselben Prinzip gemessen. So wird bspw. nach dem Békésy-Verfahren der eben hörbare Unterschied (*just noticeable difference*, JND) ermittelt (Weinzierl 2009) – also ein Unterschied, bei dem etwa zwei Töne in ihrer Höhe, Lautstärke oder in ihrer zeitlichen Abfolge voneinander unterschieden werden können. Die zeitlichen JND, die in verschiedenen Modalitäten gemessen werden können, sind hierbei sehr ähnlich und bewegen sich für junge Menschen in einem Bereich zwischen 20 und 60 Millisekunden (Wittmann 2014, S. 37).
In der Zeitwahrnehmung scheint es eine untere Ordnungsschwelle bei 30 Millisekunden zu geben (ebd. S. 35). Diese bestimmt, wie hochauflösend die Zeitwahrnehmung eines Menschen ist, als wie

schnell er also Reize im Allgemeinen wahrnimmt und sie verarbeitet. Diese Ordnungsschwelle unterscheidet sich zwischen Individuen. Allerdings kann unabhängig von der Modalität die oben genannte Marge von 20 bis 60 ms beobachtet werden, was nahelegt, dass „ein zentraler Gehirnmechanismus existiert, der Umweltinformationen aus den sensorischen Modalitäten – Sehen, Hören und Fühlen – in eine zeitliche Folge bringt“ (ebd., S. 37).

Dieser Mechanismus sorgt einerseits für das zeitliche Integrieren von sensorischen Informationen. Andererseits scheint er auch für motorische Abläufe relevant zu sein (ebd.). Lässt man Probanden in Reaktionstests so schnell wie möglich auf einen Reiz reagieren, bilden sich in der Reaktionszeitverteilung mehrere Gipfel im Abstand von ca. 30 ms (Pöppel 1970). Ernst Pöppel stellt als Interpretation zwei Modelle nebeneinander. Das erste beinhaltet einen festen Takt, bei dem die ankommende Information innerhalb bestehender Zeitfenster verarbeitet wird. Dieses Modell vergleicht Pöppel mit einem Pater Noster, der mit konstanter Geschwindigkeit (Frequenz) fährt und von Personen genutzt wird, die zu zufälligen Zeitpunkten ankommen und deshalb verschieden lang auf den Zustieg in die Kabine warten müssen (Phase). Das andere Modell besagt, dass jeder Stimulus einen solchen Verarbeitungspuls in Gang setzt – bleibt man im Bild, wartet der Fahrstuhl hier auf die Person und fährt los, sobald sie ankommt. Beide Modelle beinhalten aber die 30 ms Dauer, die man in der Fahrstuhlanalogie von Stockwerk zu Stockwerk brauchen würde, und die in der Wahrnehmung zur Verarbeitung des Reizes benötigt würden.

Es wird demnach angenommen, dass ein innerer *Timekeeper*, eine neuronale Oszillation vorliegt, die Sinneseindrücke und auch motorische Aufgaben maßgeblich beeinflusst. Dieser Taktgeber oder Oszillator vereint Zeit- und sensorische Wahrnehmung. Jene Taktung kann in extremen Situationen wie etwa einem drohenden Unfall (vgl. Eagleman 2019, Video der BBC mit Neurowissenschaftler David Eagleman) verändert oder beschleunigt werden (Wittmann 2014, S. 45f). Viele kennen den in beiden Referenzen beschriebenen Zeitlupeneffekt aus Stürzen oder ähnlichen Situationen.

Doch wie kann man diese neuronalen Oszillationen genauer beschreiben und welche Aufgaben übernehmen sie, außer dem sensorischen Input eine Reihenfolge zu geben?

b. Neuronale Oszillationen

Das Gehirn funktioniert als konzentrierte Ansammlung von Nervenzellen vor allem auf elektrischer Basis. Die Gehirnaktivität kann daher als Ansammlung zeitlicher Signale mit einer Spannungsamplitude (in der Größenordnung Mikro- bis Millivolt, Berger 1929) beschrieben werden (vgl. Herrmann et al. 2016, S. 12). Diese Zeitsignale wiederholen sich zumindest teilweise häufig und in verschiedener Ausprägung. Wenn sie also in Summe periodische Anteile aufzeigen, kann man in Analogie zu Schwingungserzeugern in Synthesizern von Oszillatoren sprechen. Da der lokale Ursprung dieser Aktivität aber häufig nicht eindeutig fassbar ist und aus vielen Zehntausend Neuronen in verschiedenen Regionen des Gehirns gleichzeitig bestehen kann, benennt man anstelle des Urhebers eher die repetitive Aktivität an sich – also die Oszillation. Sinn und Zweck der neuronalen Oszillationen werden seit ihrer Entdeckung untersucht.

Der Begründer der heutigen Elektroenzephalographie (EEG) Hans Berger berichtete schon 1929 in seiner ersten Publikation über EEG beim Menschen von zwei verschiedenen oszillierenden Hirnwellen. Er fand Wellen mit höherem Ausschlag (150-200 µV) und einer durchschnittlichen Periodendauer von 90 ms (≙ 11,11 Hz) sowie Wellen mit niedrigerem Ausschlag und einer durchschnittlichen Periodendauer von 35 ms (≙ 28,57 Hz, Berger 1929, S. 567). Erstere nannte er in einer späteren Publikation Alphawellen und zweitere Betawellen (Berger 1930, zitiert nach Herrmann et al. 2016). Diese Bezeichnungen haben sich bis heute gehalten und wurden ergänzt.

Neuronale Oszillationen gelten heute als entscheidend für Kognition und Wahrnehmung im Allgemeinen (Buzsaki und Draguhn 2004). Man unterteilt neuronale Oszillationen in eine Art verschiedene Gattungen aufgrund ihrer zugrunde liegenden Frequenz. Die Frequenzbänder heißen Delta (0 – 3,5 Hz), Theta (4 – 7,5 Hz), Alpha (8–12 Hz), Beta (13–30 Hz) und Gamma (30 – 90 Hz). Die Definitionen für die exakten Grenzfrequenzen unterscheiden sich im Detail je nach Publikation, bleiben aber etwa in dieser Größenordnung (Alpha ist hier bspw. nach Berger gewählt). Der Hirnaktivität in unterschiedlichen Frequenzbändern werden verschiedene kognitive Abläufe, also Aufgaben zugeordnet, sowie ein Einfluss auf Gemütszustände, Aufmerksamkeit (Calderone et al. 2014) und behaviorale Performance (Schnitzler und Gross 2005). Generell geht man zudem davon aus, dass synchronisierte Oszillationen aus teilweise verschiedenen Frequenzbändern u. a. für die Kommunikation zwischen entfernt voneinander gelegenen Gehirnarealen verantwortlich sind: „Functionally, the synchronization of oscillatory neuronal activity has increasingly been recognized as a mechanism for long-range communication“ (ebd.). Die kausale Verknüpfung von verschiedenen Bändern konnte u. a. am Beispiel von externer Gamma-Aktivierung und damit einhergehender Alpha-Inhibition gezeigt werden (Boyle und Fröhlich 2013). Im klinischen Kontext werden Oszillationen z. B. für die Untersuchung von Tremor und Parkinson genauer betrachtet (Schnitzler und Gross 2005).

Oszillationen in den niedrigen Frequenzbändern spielen in der Wahrnehmung wohl eine entscheidende Rolle. Bei neuronalen Schwingungen im Bereich der Stimulusfrequenz scheint die Phase entscheidend für die Wahrnehmung (für Alpha: Neuling et al. 2012, für Delta und Alpha/Beta: B. Herrmann et al. 2016), also ob die Schwingung momentan positiv, null oder negativ ist. Dabei ist umstritten, ob in solch niedrigen Frequenzen wirklich oszillierende Vorgänge gemessen werden (Breska und Deouell 2017). Die wiederkehrende Aktivität könnte auch direkt dem wiederkehrenden Stimulus geschuldet sein. In diesem Fall würden also z. B. *event related potentials* (weitestgehend gleichbleibende Aktivierungskurven sensorischen Ursprungs) fälschlicherweise als Oszillation interpretiert werden (zu *local field potentials* im visuellen Cortex: Burns, Xing, und Shapley 2011). In diesem Zusammenhang wird gerne zwischen *induzierter* und *evozierter* Aktivität unterschieden (etwa Tallon-Baudry und Bertrand 1999). Dabei geht man davon aus, dass evozierte neuronale Potentiale in Zeit und Phase an den Stimulus gebunden sind und induzierte Potentiale, wie sie etwa im neuronalen Entrainment zu periodischen Reizen entstehen, nur in der Zeit an den Stimulus gebunden sind, nicht jedoch in der Phase. Dieser Unterschied müsste in der Analyse vorab bedacht werden, da sonst möglicherweise bedeutsame Aktivität herausgemittelt würde (ebd., vgl. Abb. 2).

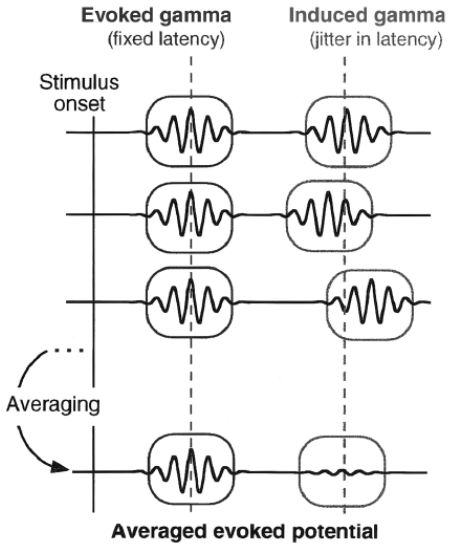


Abbildung 2: Vergleich von evozierter und induzierter Aktivität. *Beim Mitteln werden hier evozierte Potentiale verstärkt gegenüber zufälligem Noise, während induzierte Potentiale durch ihre Verteilung selbst herausgemittelt werden. Abbildung aus Tallon-Baudry und Bertrand (1999, S. 152)*

Wenn die beobachtete Oszillation allerdings in einem weitaus höheren Band liegt, betrachtet man eher ihre Modulation. Im auditorischen und temporalen Kontext ist die Synchronisierung bzw. Desynchronisierung von Beta-Wellen ein oft gefundenes Phänomen. Hierbei zeigen sich im Beta-Band ein Aktivitätsabfall und darauffolgender Wiederanstieg, die beide an den Stimulus gekoppelt zu sein scheinen (mehr dazu in → ii. Stand der Wissenschaft zum neuronalen Entrainment, S. 15).
Tritt man einen Schritt zurück, so können Oszillationen als Basis für Entrainment verstanden werden und Entrainment wiederum als Basis für temporale Prädiktion (vgl. Bispham 2006). John Bispham

bemerkt zudem, „the likely existence of internal oscillatory mechanisms that are shared between different domains of human behavior and cognition strongly suggests that entrainment in music constitutes an evolutionary exaptation of more generally functional mechanisms for future-directed attending to temporally structured events" (ebd.). Er zieht hier also den Zusammenhang zwischen Oszillationen und musikalischer Erwartung in der temporalen Ebene.
Wärend das Beta-Band (13-30 Hz), das hier bspw. auf Grundlage von Fujiokas Ergebnissen (2012) untersucht werden soll, als Indikator für Aufmerksamkeit gilt, deuten neue Ergebnisse aus einer Studie zum Lernen bei Hintergrundmusik darauf hin, dass Beta-Power auch relevant für kognitive Performance ist (Küssner et al. 2016). Küssners Vorschlag, Musik zur Verbesserung kognitiver Leistung nicht während der Aufgabe, sondern davor einzusetzen (Küssner 2017), deckt sich mit Evidenz für einen positiven Effekt von *Pre-Task*-Musik auf neuronale Aktivität im Reaktionstest, die beispielsweise im motorisch relevanten Putamen gefunden wurde (Bishop et al. 2014).

6. Empirischer Teil

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln theoretische Grundlagen dargelegt wurden, soll nun im empirischen Teil der eigene Forschungsanteil der Arbeit dargestellt werden. Dazu werden in der Einleitung konkrete Hintergründe und der Stand der Forschung besprochen, die Hypothese begründet und auf die Relevanz der Thematik eingegangen. Im Methodenteil wird hiernach das Vorgehen in Experiment und Analyse nachgezeichnet. Die Ergebnisse werden zunächst im Ergebnisteil benannt und dargestellt und schließlich in der Diskussion interpretiert und in das Feld eingeordnet.

a. Einleitung

Der empirische Teil der Arbeit wurde in Kooperation mit dem *Center for Music in the Brain* (MiB) der Universität Aarhus in Dänemark sowie dem Berlin Brain-Computer Interface (BBCI, beheimatet an den Fachgebieten *Machine Learning* und *Neurotechnologie* der TU Berlin sowie der Freien Universität und Charité Berlin) durchgeführt. In Aarhus stehen Infrastruktur und Know-How zur Verfügung, die zu neurophysiologischen Untersuchungen benötigt werden, wie beispielsweise ein Magnetenzephalograph (MEG). In den Fachbereichen Machine-Learning- bzw. Neurotechnologie stehen Analysetools zur Verfügung, die MEG-Daten auf verschiedene Arten verarbeiten können. Warum MEG für die vorliegende Arbeit die Hirnscan-Technologie der Wahl ist, wird später näher erläutert. Zunächst soll auf die inhaltlich-wissenschaftlichen Hintergründe der Arbeit eingegangen werden.

i. Hintergrund

Zeitliche Vorhersage (engl. *Temporal prediction*) sollte in der Musik zumindest nach David Hurons Werk *Sweet Anticipation* (2006) als zentrales Element für Musikverständnis und vor allem auch Musikgenuss verstanden werden. Das sogenannte *predictive coding* wird als essentiell für die Wahrnehmung von Musik im Allgemeinen gehandelt (Vuust et al. 2009). Hierbei wird die Wahrnehmung in „prediction units" und „error units" aufgeteilt, also eine bestimmte Vorhersage getroffen und die Abweichung davon zur Korrektur genutzt. Dabei passe die prädizierende Vorgehensweise des Gehirns sehr gut zu den vorhersagbaren Eigenschaften der MusiK: „The dynamic interplay between predictable structures in music and predictive brain processing is a key determinant of perception and cognition of music" (Center for Music in the Brain 2018). Untersuche man die Wahrnehmung nach dem System des predictive coding, so könne man die Lücke zwischen Musikwissenschaft, Psychologie und Neurowissenschaft schließen und grundlegende Erkenntnisse für andere Forschungsbereiche erlangen (ebd.).

Denn Regularitätsverarbeitung, also das Erkennen von wiederkehrenden Mustern ist nicht nur für die Musikwahrnehmung ein entscheidender Mechanismus: Predictive coding stellt auch dann eine wichtige Strömung dar, wenn man die neurologische Kognitionswissenschaft im weiteren Kontext

betrachtet (Hohwy, Roepstorff, und Friston 2008, im Sprachverständnis bspw. Lewis und Bastiaansen 2015, Apps und Tsakiris 2014; siehe auch Huang und Rao 2011). In einem kritischen Review-Paper zu predictive coding im auditorischen Cortex schreiben Heilbron und Chait (2018) allerdings, empirische Evidenz sei nur teilweise gegeben. Nicht überzeugend finden die Autoren die Evidenz zur Trennung zwischen Fehler- und Prädiktionsneuronen. Dass neuronale Aktivität von Erwartung geprägt und hierarchisch organisiert sei und dass diese Erwartungen antizipatorisch bzw. prädizierend seien, sei dagegen mehrfach gezeigt worden.

Das Thema ist hierbei in diversen Bereichen relevant. Mustererkennung in Form von Regularitätsverarbeitung wird nachfolgend exemplarisch an der Umweltwahrnehmung des Menschen und am Sprachverständnis näher gezeigt (zu Relevanz vgl. Grahn 2012; Hickok et al. 2015).

1. Prädiktion in der Umweltwahrnehmung

Will der Mensch sich als biologisches Wesen in seiner Umwelt zurechtfinden, so ist er, wie in der Einleitung zu dieser Arbeit erwähnt, auf seine Sinne angewiesen. Diese nehmen die Umgebung in verschiedenen Modalitäten wahr und müssen auf einer kognitiven Ebene Sinn daraus ziehen. Besonders effizient ist dieser Vorgang, wenn ein Model anhand von Regularitäten aufgestellt wird und dann nur die Änderungen verfolgt werden müssen (ähnlich diesem Vorbild funktioniert auch die medieninformatische Videokompression im Codec*.*mpeg*; Mandau 2002).

Unsere Umgebung ist dabei voll von statistischen Regelmäßigkeiten, die ein solches Vorgehen erlauben (Barlow 2001). Die Relevanz, Bewegungen zu detektieren, liegt im evolutionären Kontext auf der Hand, bedenkt man ihren möglicherweise bedrohlichen Ursprung. In der visuellen Wahrnehmung ist zudem die Gruppierung von Objekten ein entscheidender Mechanismus. Kaiser et al. (2014) schreiben, dass die zahlreichen Objekte in der Umgebung eines Menschen um neuronale Repräsentation und kognitive Verarbeitungsressourcen konkurrieren. In einer fMRT-Studie präsentierten sie TeilnehmerInnen Objekte und fanden reduzierte neuronale Konkurrenz, wenn die Objekte in ihrem gängigen Kontext dargestellt waren (bspw. eine Lampe auf einem Tisch, Messer und Gabel neben einem Teller). Parallelen zu den Theorien der Gestaltpsychologie sind hier nicht von der Hand zu weisen. Die Ergebnisse decken sich im Wesentlichen mit denen von Kok et al. (2012), die einen positiven Effekt von Erwartung auf sensorische Repräsentationen im primären visuellen Cortex fanden. Hier zeigt sich, wie die Kognition auf bestehenden Strukturen und Annahmen aufbaut.

Auch in der auditiven Modalität werden Ordnung und Wiederholung zu Prädiktion. In einem behavioralen Experiment fanden bspw. Andreou et al. (2011) nach dem Modell von Bregmans *Auditory Scene Analysis* (für eine Zusammenfassung siehe Bregman 2001) einen positiven Einfluss von relativ schnellen isochronen Maskierungssignalen (mit den Inter-Onset-Intervallen IOI = 250 ms und IOI = 100 ms) auf das Detektieren von Target-Signalen (im Vergleich zu einer *random*-Kondition und einem isochronen Maskierungssignal von 400 ms). Die Wahrnehmung und vor allem Trennung von auditorischen *streams* scheint also durch temporale Regularität begünstigt.

2. Prädiktion in Perzeption und Produktion von Sprache

Eng verbunden mit der temporalen Abfolge von Information ist neben der Musik auch gesprochene Sprache. Die Grundlage für verbale Kommunikation hängt zu bedeutendem Maß von erkannten Regularitäten im Zeitverlauf ab. So schneiden gelernte Percussionisten in der Spracherkennung im Störgeräusch besser ab, als rhythmisch Ungeschulte (Slater et al. 2018). Zudem fanden Bekius et al. (2016) einen Zusammenhang zwischen dem Erkennen von Regularität und der Sprachproduktion (hier: „Rapid Automized Naming“, das als Maß für Sprachfähigkeit verwendet wird). Die Korrelation (Spearman’s Rho zwischen -0,31 und -0,47) wird als Evidenz für die Theorie interpretiert, dass

temporale Information in Sprache und Musik von einem gemeinsamen Mechanismus („shared resources model“) detektiert wird. Diese Arbeit schließt an Ergebnisse an, in denen die Fähigkeit, temporale Regularitäten in beat- und metrumbasierten Patterns zu erkennen in signifikantem Zusammenhang zu phonologischen Fähigkeiten sowie Lesekompetenz steht (Grube, Cooper, und Griffiths 2013). Diese und weitere Studien (Bohn et al. 2013; Quené und Port 2005, für ein Review siehe Tillmann 2012) legen den Schluss nahe, dass rhythmische Regularitätswahrnehmung eine wichtige Basis für Sprachverständnis und Sprachkompetenz ist.

ii. Stand der Wissenschaft zum neuronalen Entrainment

Beat-basiertes neuronales Entrainment wurde bereits mithilfe verschiedener Technologien und unter Betrachtung verschiedener Frequenzbänder untersucht.

Fujioka und KollegInnen (2012) konnten im MEG Beta-Aktivität finden, deren klare Modulation dem Tempo eines akustischen Stimulus folgte. In der Studie wurde das MEG von 11 TeilnehmerInnen gemessen, während isochrone akustische Stimuli mit IOI von 390 ms, 585 ms und 780 ms sowie ein Stimulus mit zufällig verteilten akustischen Events präsentiert wurden. Die Betaband-Modulation skalierte dabei mit den drei verschiedenen IOI und wurde unkenntlich in der *random*-Kondition. Nachdem in den isochronen Konditionen das jeweilige akustische Event erklingt, sinkt in den berichteten Ergebnissen die Beta-Aktivität ab (*Desynchronisierung*), bis sie bei circa der Hälfte des IOI ihr Minimum erreicht um dann wieder anzusteigen und kurz vor dem Erklingen des nächsten Tones erneut das maximale bzw. initiale Level zu erreichen (*Synchronisierung/Rebound*). Vor allem dieses Wiederansteigen wird interpretiert als Beat-abhängiges und antizipatorisches Modulieren der Beta-Aktivität, welche deshalb als entscheidend für das Prozessieren des Beats angenommen wird. Die Ergebnisse sind hierbei konsistent mit einer vorherigen Arbeit, die Beta-Überschuss beim Auslassen eines Beats fand (Fujioka et al. 2009).

Neben dem Beta-Band (13-30 Hz, van Pelt et al. 2016; B. Herrmann et al. 2016; Fujioka et al. 2012, 2009; Iversen et al. 2009) gelten auch das Delta-Band (1-3 Hz, B. Herrmann et al. 2016), das Theta-Band (4-8 Hz, Lakatos et al. 2008) das direkt unter dem Beta-Band liegende Alpha-Band (8-12 Hz, Jensen und Mazaheri 2010) und das darüber liegende Gamma-Band (>30 Hz, Fujioka et al. 2009; van Pelt et al. 2016) als relevant für Timingaufgaben. Die Lokalisierung der oszillierenden Aktivität wurde auch hier auf den auditorischen und präfrontalen Cortex bestimmt (Iversen et al. 2009; Fujioka et al. 2012). Luc Arnal schreibt zu der offenbaren Verbindung zwischen Beta- und anderen Frequenzbändern, die als Teil eines Top-Down-Mechanismus interpretiert warden: „The origin of such descending signals is unknown, but recent evidence suggests that low-frequency oscillations may interact with higher (beta) ones to control sensory excitability during predictive timing” (Arnal 2012, S. 2). Diese Aussage unterstützt die kommunikative Rolle von (interagierenden) neuronalen Oszillationen. Daher erscheint neben einer Untersuchung der Beta-Desynchronisierung und ihrem Rebound auch interessant, was in den tiefer liegenden Bändern Alpha und Delta oder im höher liegenden Gamma passiert (zu den untersuchten Frequenzbändern siehe → Ergebnisse, S. 34).

Verschiedene Versuche, die Ergebnisse aus Fujioka et al. (2012) im EEG zu replizieren, führten zu weniger eindeutigen Ergebnissen. Cirelli und KollegInnen verglichen beispielsweise die Aktivität im rechten auditorischen Cortex von 17 Erwachsenen und 16 Kindern, unter Verwendung der Stimuli aus Fujioka et al. (2012). Die Zeit-Frequenz-Analysen zeigen hier nach der Interpretation der Autoren einen ähnlichen antizipatorischen Effekt im Beta-Band, doch bleiben die Patterns weit weniger repetitiv und weniger klar als in Fujiokas MEG-Ergebnissen. Vor allem das Timing der Modulationen ist weitaus weniger regelmäßig.

Auch Chang und KollegInnen (2016) untersuchten das Beta-Band bei Darbietung eines isochronen Stimulus, veränderten aber in einem Trial die Tonhöhe, um einen Widerspruch der Prädiktion herbeizuführen. Sie fanden heraus, dass auch die Tonhöhe einen Effekt auf die Beta-Aktivität 200 bis 300 ms nach Stimulus-Onset hat. Dies wurde so interpretiert, dass die induzierte Beta-Power im auditorischen Cortex konsistent ist mit sensorischer Prädiktion von Timing und (bspw. spektralem) Inhalt. Dies heiße womöglich, dass Prädiktionen von Timing und auch Inhalt die Beta-Oszillationen durch Aufmerksamkeit co-modulierten (ebd., Abstract). Auch hier sind die Patterns in der Zeit-Frequenz-Analyse allerdings arbiträrer als bei Fujioka et al. (2012).

Ebenfalls im EEG konnte Stephanie Brandl (in prep., siehe Grube et al. 2018) selbst mit einer ausgeklügelten Analyse-Pipeline inklusive Machine-Learning-Komponenten (Dähne et al. 2014) keine Patterns von der Klarheit finden, die von Fujioka (2012) berichtet werden. Deshalb wird in der vorliegenden Arbeit ebenso das MEG betrachtet. Inwiefern sich die Technologien zur Untersuchung des Gehirns unterscheiden, soll der nächste Abschnitt skizzieren.

iii. Magnetenzephalographie (MEG)

Eines von vielen Verfahren, Gehirnaktivität zu messen und aufzuzeichnen, ist die Magnetenzephalographie (MEG). Die verschiedenen Verfahren haben verschiedene Stärken. Mit Hilfe der Magnetenzephalographie 16arden häufig auditorische und sehr schnelle neuronale Prozesse gemessen, wie Hauk (2013) schreibt: „MEG has therefore been widely used to study early acoustic and phonetic processing, and the plasticity of the somatosensory and auditory system“. Wie wird neuronale Aktivität hierbei erkannt?

1. Physiologische und physikalische Grundlagen der Messung

Neuronen funktionieren auf Basis von elektrischen Potentialunterschieden. Mehrere Tausend parallel aktive Dendriten (jeder verursacht einen minimalen Spannungsgradienten) können als Dipol interpretiert und gemessen werden (Hauk 2013). Dabei wird unterschieden zwischen tangentialen Dipolen, die parallel zum Skalp verlaufen und radialen Dipolen, die rechtwinklig zum Skalp verlaufen und neben der Richtung auch die Stärke des Stromflusses beschreiben können (ebd.). Beim MEG und bei der Elektroenzephalographie (EEG) werden solche Dipole am Skalp gemessen, also non-invasiv, außerhalb des Gehirns. Ähnlich dem EEG, bei dem bspw. 60 Elektroden auf dem Schädel platziert werden, liegen die Stärken des MEG in einer sehr guten zeitlichen Auflösung im Millisekunden-Bereich. Die elektrisch-neuronalen Aktivitäten werden mit üblichen Samplingfrequenzen von 1000 Hz gemessen. MEG und EEG werden als die direktesten Korrelate von on-line Hirnprozessen bezeichnet, die non-invasiv möglich sind (Hauk 2013).

Die räumliche Auflösung des MEG ist dabei höher als im EEG, was sich schon allein an der Menge der zumeist ca. 300 Sensoren im Vergleich zu 60 Sensoren beim EEG zeigt. Auch wenn nur die sogenannten Magnetometer verwendet werden, ist die Zahl von 102 Sensoren höher als die der 60 EEG-Elektroden.
Anders als beim EEG werden die Hirnsignale allerdings nicht durch Elektroden aufgezeichnet, sondern durch elektromagnetische Spulen, die Magnetometer. In der Theorie können diese das Magnetfeld messen, das durch die elektrisch-basierte Aktivität von Neuronen, also einen Potentialfluss in eine bestimmte Richtung, entsteht. Die Amplitude der durch bestimmte Hirnareale entstehenden magnetischen Felder liegt im piko-Teslabereich. Durch extremes Kühlen der Spulen (typischerweise unter -253° C, mithilfe von flüssigem Helium) wird allerdings ihre Leitfähigkeit erhöht, sie werden zum *superconductor* und die Signale werden messbar (Parkkonen 2010). Da die neuronalen Spannunsflüsse minimal sind, können sie allerdings erst gemessen werden, wenn Zehntausende parallel positionierte Neuronen synchron in die gleiche Richtung arbeiten (Hauk 2013). Beachtet man die Tatsache, dass das Gehirn aus schätzungsweise 86 Milliarden Neuronen besteht (Herculano-Houzel 2013), ergibt sich trotzdem eine sehr gute räumliche Auflösung für das MEG. Die

physikalische Funktionsweise bedingt dabei, dass die Richtung der aufgenommenen Signale im MEG perpendikulär zu denen im EEG liegt. Dies hat zur Folge, dass die Orientierung von neuronalen Aktivitäten sie entweder für das EEG (radial) oder das MEG (tangential) besser detektierbar macht.
Trotzdem bleibt das sogenannte *inverse Problem*. Mit diesem Begriff wird die Tatsache beschrieben, dass Signale, die am Schädel gemessen werden, nicht zweifelsfrei auf eine konkrete Quelle im Gehirn zurückgeführt werden können. Je näher ein Dipol dem Zentrum des Gehirns ist, desto niedriger ist die am Skalp gemessene Amplitude und desto breiter die Verteilung des Signals. Wenn ein schwaches und breites Signal gemessen wird, ist also nicht erkennbar, ob es sich um eine tiefe punktuelle Quelle oder eine schwache breite, weiter außen gelegene Quelle handelt. Hauk vergleicht dies damit, aufgrund von Schatten Rückschlüsse auf Objekte schließen zu wollen: „The standard approach to overcome the non-uniqueness of the inverse problem in MEG/EEG is to introduce constraints on the possible solutions, in order to exclude all solutions except the one that is most suitable to describe the data" (Lopes da Silva 2010). Um dem inversen Problem durch genauere Bestimmung der Quelle begegnen zu können, wird neben dem MEG gerne ein sMRT (strukturelles Magnetresonanztomogramm) aufgenommen.

Um Hintergrundrauschen von vornherein zu minimieren, sind die MEG-Scanner in der Regel neben Magnetometern mit sogenannten Gradiometern ausgestattet. Hierbei handelt es sich um eine Kombination aus zwei gegenläufigen Magnetometern, bei denen – wie bei einem Humbucker-Tonabnehmer in der E-Gitarre – die Differenz ermittelt und damit Rauschen minimiert wird (Hauk 2013). Das macht Gradiometer weniger anfällig für Artefakte und entfernte Störungen (Lopes da Silva 2010), begrenzt aber auch beträchtlich den Bereich des Gehirns, den sie abbilden können (ebd.).
Daher hat das MEG, vor allem bei Verwendung der Gradiometer, seine Stärken in der Untersuchung von schädelnahen, kortikalen Hirnregionen. Zu den Anwendungsgebieten von MEG schreibt Hauk: "It has been shown that superficial and tangential sources can be localized with more accuracy than with EEG, particularly in somatosensory and some auditory parts of the brain." Damit ist MEG sehr gut geeignet für die Untersuchung eines neuronalen Vorgangs, der in Regionen nahe der Schädeldecke und mit einer für das MEG günstigen Orientierung erwartet wird.
Wollte man tiefer liegende Hirnregionen untersuchen, wäre das funktionale fMRT wohl die bessere Wahl. Hier werden Unterschiede im Magnetfeld gemessen, die durch Hämoglobinunterschiede (*blood oxygenation level dependent contrast*, BOLD-contrast) im Blut hervorgerufen werden (Ashby 2015). Geht man davon aus, dass aktive Hirnregionen mit besonders sauerstoffreichem Blut versorgt werden müssen, kann man somit Hirnaktivität verbildlichen. Der Vorteil des fMRT ist eine gute dreidimensionale Darstellung (Lopes da Silva 2010) im Millimeterbereich (Mather, Cacioppo, und Kanwisher 2013) und vor allem eine weitestgehende Unabhängigkeit von Schädelnähe oder zentraler Position der untersuchten Regionen. Nachteilig ist allerdings, dass der Blutfluss eine Weile dauert und die zeitliche Dimension demnach nur mit großer Verzögerung im Sekundenbereich und ähnlich niedriger zeitlicher Auflösung (ebd.) darstellbar ist.

2. Warum MEG?

Für die vorliegenden Untersuchungen neuronaler Korrelate der akustischen Rhythmuswahrnehmung ist MEG also aus dreierlei Gründen zu bevorzugen:

1. Die gute zeitliche Auflösung kann sehr schnelle Timingprozesse des Synchronisierens im Millisekundenbereich detailgetreu aufzeichnen.
2. Verglichen mit dem EEG ist das MEG allein aufgrund der Anzahl der Sensoren in der räumlichen Auflösung überlegen. Aufgrund der Orientierung bspw. des auditorischen Cortex und den physikalischen Eigenschaften der MEG-Sensoren wird erwartet, dass neuronale Aktivitäten im MEG besser detektiert werden können als im EEG.
3. Als Trade-Off zwischen hoher zeitlicher und vergleichsweise guter Tiefenauflösung sind die Aufnahmen der einzelnen Magnetometer ein bestmögliches Instrument für die Darstellung von neuronalem Entrainment, das vor allem im auditorischen und (prä-)frontalen Cortex erwartet wird.

iv. Musical Ear Test (MET)

Der Musical Ear Test (MET, Wallentin et al. 2010) wurde designt, um möglichst einfach eine verlässliche Aussage über musikalische Fähigkeiten treffen zu können. Hierbei wird nicht das Musik-Machen, sondern das Musik-Hören untersucht, statt Produktion also die Perzeption. Genauer gesagt wird im MET die Prozessierung von kurzen Melodien und Rhythmen untersucht. Für die vorliegende Arbeit über Rhythmuswahrnehmung erscheint der melodische Test nicht weiter relevant, weshalb nur der rhythmische Test ausgewertet wird. Für etwaige zukünftige Analysen stehen allerdings auch die Ergebnisse des melodischen Tests zur Verfügung.

1. Ablauf des MET

Im Musical Ear Test entscheiden VersuchsteilnehmerInnen, ob ein zweiter dargebotener Stimulus dem ersten dargebotenen Stimulus entspricht oder nicht. Die Materialien des Musical Ear Test bestehen aus einer Audiodatei und einem Papierbogen zum Ankreuzen der Antwort (hier in Dänisch und Englisch). In der Audiodatei (Dauer: insgesamt 20:30 min) wird vor Erklingen der melodischen und ryhthmischen Stimuli eine Erklärung des Testverfahrens mit Beispielen gegeben. Dadurch dass der Versuchsablauf bereits in dem Audiosetup erklärt wird, was sodann auch für die Stimuli verwendet wird, können Versuchsteilnehmende sich einerseits mit dem Setup vertraut machen, evtl. die Lautstärke anpassen und vor allem die Aufmerksamkeit auf auditorischer Ebene schärfen. Die Instruktionen erfolgen in klarem, einfach zu verstehendem und langsam gesprochenem Englisch. Indem die Instruktionen standardisiert sind, können Versuchsleitereffekte auf ein Minimum begrenzt werden, da einerseits allen TeilnehmerInnen dieselbe Instruktion gegeben wird und andererseits keinerlei Bezug zum Sprecher besteht (Musical Ear Test, Audiodatei *MET Melody and Rhythm 2010* im Zusatzmaterial).

Im rhythmischen Teil des MET werden sodann jeweils zwei Stimuli präsentiert. Der erste Stimulus fungiert hier als Vergleichswert für den zweiten Stimulus. Die Frage an die VersuchsteilnehmerInnen ist: War der zweite Stimulus der gleiche wie der erste oder nicht? Wenn sie meinen, die Rhythmen waren identisch, dann kreuzen sie im Antwortbogen Ja an, wenn nicht, dann Nein.

Nachdem der Sprecher mit isochronem Einzählen „one two three four“ ein Metrum etabliert hat, erklingen die eigentlichen Stimuli. Hierbei werden Klänge, die dem Ton eines klassischen mechanischen Metronoms ähneln, in einer bestimmten rhythmischen Abfolge präsentiert. Der vom Sprecher etablierte Puls wird weiter unterstützt durch in Frequenz und Intensität tiefer gelegene Downbeats. Dieser dunkle akustische Puls erklingt durchgehend und die verschiedenen rhythmischen Patterns werden so klarer strukturiert. Dies stellt sicher, dass die Patterns auf rhythmischer Ebene und nicht aufgrund von metrischer Verschiebung (etwa auftaktig vs. volltaktig) unterschieden werden. Zudem wird durch den durchgehenden Beat suggeriert, die Aufmerksamkeit erhöht zu halten. Nach jedem Stimuluspaar gibt der Sprecher die laufende Nummer des Trials an, um eine Verschiebung der Antworten auf dem Bogen zu vermeiden. Nach 52 Stimuluspaaren ist der Test zu Ende. Als Testergebnis wird die Anzahl der korrekt erkannten Stimuluswiederholungen angegeben (Range 0-52).

2. Warum MET?

Das simplifizierte AB forced-choice Design des Musical Ear Tests (MET) macht ihn zu einem gut durchführbaren Experiment, zu dem außer einem Blatt Papier und einem Stift nur ein Wiedergabegerät und Kopfhörer benötigt werden. Experimentbedingte Abweichungen werden damit minimiert und die Reliabilität maximiert. Als Maß für die interne Konsistenz wird Cronbachs Alpha mit $\alpha_C = 0{,}87$ angegeben. Der Musical Ear Test kann nach Untersuchungen der Entwickler zuverlässig zwischen Profimusikern, Amateurmusikern und Nicht-Musikern unterscheiden und somit

musikalische Erfahrung sowie Verständnis von gegebenen musikalischen Hörproben quantifizieren. Er wird als valide Messgröße für musikalische Kompetenz interpretiert.

Der alternative Beat Alingment Test (BAT, Iversen und Patel 2008), wurde desingt, um Synchronisierung mit einem gegebenen Beat zu quantifizieren. Da er aber grundlegend auf *tap-along*-Tests basiert, und damit motorische Aktivität beinhaltet, wird er hier nicht verwendet. Denn die vorliegende Arbeit möchte allein die mentale Repräsentation von Puls untersuchen, also das Prozessieren eines isochronen Stimulus, nicht jedoch motorisches Produzieren. Ziel der vorliegenden Arbeit ist neben dem Auffinden von neuronalem Entrainment die Untersuchung eines möglichen Zusammenhangs zum musikalischen Rhythmusverständnis. Mit dem BAT würde hier wohl die kognitiv niedriger liegende Kompetenz des Synchronisierens untersucht. Der MET dagegen erscheint fähig, musikalisch-rhythmische Kompetenz zu quantifizieren und wird deshalb hier bevorzugt.

v. Motivation und Hypothese

Diese Arbeit befasst sich von zwei Seiten mit Rhythmuswahrnehmung: Von der Seite neurologischer Abläufe im Gehirn, die außerhalb des Schädels physikalisch gemessen werden können und von der Seite musikpsychologischer Fähigkeiten von Hörern, die durch einen performativen Test quantifiziert werden sollen. In der Synthese steht ein möglicher Zusammenhang zwischen physiologischen Mechanismen und (musik-)psychologischem Verständnis durch kognitives Prozessieren.

Wenn eine Beat-abhängige Modulation bspw. der Beta-Band-Aktivität im MEG gefunden werden kann, ist die Frage der vorliegenden Arbeit zudem, ob eine Korrelation zum behavioralen Maß der MET-Scores gefunden werden kann. Hier wird die Fähigkeit, musikalischen Rhythmus zu verstehen, quantifiziert. Ein Zusammenhang ist deshalb naheliegend, da Beat-Prozessierung bzw. neuro-physiologisches Entrainment als Pendant zum musiktheoretischen Puls verstanden werden kann und das Verständnis von Puls als Grundlage für Rhythmusverarbeitung gilt (vgl. dazu Large und Snyder 2009).

Es stellen sich zusammenfassend also zwei Forschungsfragen:

1. Verursacht ein isochroner Stimulus kognitives Entrainment, das anhand neuronaler Untersuchungen im MEG gefunden werden kann?
2. Besteht ein Zusammenhang zwischen der Stärke des Entrainments und dem Abschneiden im behavioralen Test auf Rhythmusverständnis?

Im Folgenden wird detailliert beschrieben, wie diese Fragen beantwortet werden sollen.

b. Methode

Um das Beat-basierte Entrainment messen zu können, soll im Unterschied zu vorherigen Arbeiten ein gleichbleibender Stimulus über eine längere Dauer gegeben werden. Unter Verwendung von nur einem Puls wird dazu die Anzahl der gleichförmig aufeinanderfolgenden Beats erhöht. Würde man Stimuli mit verschiedenen Tempi oder Regularitätsleveln präsentieren, würde dies bei gleicher Experimentdauer die Anzahl der Trials und damit die statistische Power verringern. Es wird also nur ein isochroner Stimulus erstellt, der VersuchsteilnehmerInnen während MEG-Aufnahmen präsentiert werden kann. So lässt sich sowohl das Beat-basierte Entrainment als auch die statistische Operationalisierung optimieren.

Bereits vor Aufnahme der Kondition *Beat* wurde zu Beginn der MEG-Session der sogenannte *Resting State* aufgenommen. Hierbei bekommen die VersuchsteilnehmerInnen lediglich die Aufgabe, ihren

Blick nach Möglichkeit auf ein angezeigtes Fixierungskreuz zu richten. Für eine Dauer von zehn Minuten wird dabei das MEG im Resting State und somit gewissermaßen die Grundaktivität des Gehirns aufgenommen. Diese Kondition soll später als Vergleich zur Kondition Beat dienen, um *within-subject* Maße für die vom Beat verursachte Aktivität zu gewinnen.

Nach den MEG-Aufnahmen durchliefen die TeilnehmerInnen den Musikalitätstest MET, um ihr Rhythmusverständnis quantifizieren zu können. Die Datenakquise fand im Herbst 2018 in den Räumlichkeiten und mithilfe der technischen und personellen Infrastruktur der Universität Aarhus statt. Informatisches Preprocessing, Analysen und Visualisierungen wurden in MathWorks Matlab und mit Hilfe bestehender Skripte und Funktionen aus der FieldTrip Toolbox, von Niels Trusbak Haumann, Stephanie Brandl (und BBCI) und mit eigenen Skripten durchgeführt (zu finden im Zusatzmaterial).

i. Experiment

Normalhörende, gesunde Freiwillige wurden zur Messung des MEG in die Universitätsklinik Aarhus eingeladen. Nach einem Briefing über das Experiment und nachdem die Probanden schriftlich und mündlich darauf hingewiesen wurden, dass sie jederzeit und ohne Nennung von Gründen ihre Teilnahme am Experiment abbrechen können, unterschrieben sie die Einwilligungserklärung.

Um ferromagnetische Störquellen möglichst ausschließen zu können, wechselten die Studienteilnehmerinnen ihre persönliche Garderobe zu von der Klinik bereitgestellter hausinterner Kleidung und legten metallische Gegenstände wie Schmuck, Brillen oder Haarklammern ab. Da das MEG nicht wie das EEG aufsitzt, sondern der Schädel der TeilnehmerInnen in einer Halbsphäre zu platzieren ist, muss die Bewegung des Kopfes nachvollzogen werden. Dafür wurden, wie im MEG üblich, vier kleine Metallspulen mit Tape an der Haut befestigt (an der Stirn links und rechts direkt unter dem Haaransatz und hinter jedem Ohr), deren Position während der MEG Messungen aufgezeichnet wurde. Dadurch kann später im *Preprocessing* der Daten die Kopfbewegung herausgerechnet werden. Die Teilnehmer wurden zudem gebeten, auf einen leichten Kontakt zwischen Schädel und MEG-Helm zu achten, um diese Kopfbewegungen zu minimieren und um den Abstand zwischen Messsensor und Gemessenem stabil und minimal zu halten.

Da muskuläre Aktivität wie die Bewegung der Augen und Blinzeln sowie der Herzschlag zu großen Abweichungen der gemessenen elektromagnetischen Signale führt, aber nicht die Hirnsignale abbildet, wurden auch diese separat aufgezeichnet. Mit Elektroden über (+) und unter (-) dem rechten Auge wurde vertikale Aktivität (Blinzeln) kontrolliert und mit Elektroden am rechten Schlüsselbein (+) und der linken unteren Rippe (-) der Herzschlag aufgezeichnet. Messungen der Kopfbewegungen (Metallspulen), der Herzaktivität (Elektrokardiogramm, EKG) und der Augenbewegung (Elektrookulogramm, EOG) wurden durchgeführt, um die jeweilige Aktivität in der Datenanalyse nachvollziehen und Muskelartefakte zuordnen zu können.

Abbildung 3: Versuchsteilnehmer im MEG-Scanner. *Ein Teilnehmer hat nach Einführung / Vorbereitung Platz genommen und wird vor den Aufnahmen über letzte Details des Experiments aufgeklärt.*

Um die genaue Form des Schädels zu erfassen, wurden zudem mithilfe eines elektronischen Positionssensors Punkte auf der Oberfläche des Kopfes registriert. Durch das grobe digitale 3D-Schädelmodell bestehend aus 200 bis 300 Punkten ist die individuelle Kopfform bekannt.

Derart vorbereitet und mit verschiedenen Elektroden ausgestattet, wurden die Studienteilnehmer*Innen in den abgeschirmten MEG-Raum begleitet. Die Prozedur des Experiments wurde genau erklärt und die Schaumstoffohrstopfen zur akustischen Präsentation der Stimuli wurden im äußeren Gehörgang platziert. Da kleinste elektro-magnetische Aktivität im Gehirn gemessen werden soll, kann die akustische Präsentation nicht durch herkömmliche ferromagnetische Kopfhörer erfolgen. Stattdessen wird hier ein System verwendet, bei dem die akustische Information schon außerhalb des geschirmten Raums in Luftdruckänderungen umgewandelt wird, die dann durch Schläuche zum Ohr der Versuchsperson gelangen. Deshalb ist ein guter Sitz der Ohrstöpsel besonders wichtig. Nachdem die Einweisung beendet war und sichergestellt war, dass die Teilnehmer*Innen sich wohl fühlen, verließen die Versuchsdurchführenden den Raum und schlossen die schwere magnetisch-schirmende Tür. Von außen wurde via Gegensprech-anlage mit den Teilnehmer*Innen kommuniziert. Zudem gewährleistete eine Kamera, dass das Wohlergehen von außen jederzeit sichergestellt werden kann.

Zu Beginn des Experiments wurde die Hörschwelle der Versuchsteilnehmer*Innen mit einem randomisierten JND-Test gemessen. Hier wurden Töne in verschiedenen Lautstärken und mit verschiedenen Positionen im stereophonen Spektrum dargeboten und die Teilnehmer*Innen drückten jedes Mal einen Knopf, wenn sie einen Ton wahrnahmen. Damit die Stimuli allen Teilnehmer*Innen mit der gleichen Lautheit präsentiert werden, wurde der Pegel auf 50 dB SPL (*sound pressure level*, akustisches Maß für Schalldruck, also Lautstärke) über der mit dem Setup ermittelten Hörschwelle eingestellt.

Als erste MEG-Kondition wurde der Resting State aufgenommen. Hierbei ist die einzige Aufgabe, die die Versuchsteilnehmer*Innen bekamen, möglichst ruhig zu sitzen und den Blick auf einem Fixierungskreuz ruhen zu lassen. Die Kondition *Resting* wird in diesem Fall als Vergleichskondition zur Kondition *Beat* verwendet.

Die Versuchsteilnehmer*Innen hörten dann, in der Kondition Beat, den periodischen Stimulus (Schema siehe Abb. 4), der einem Metronom gleicht. 300 Hz Sinustöne mit 100 ms Länge wurden mit einem Inter-Onset-Intervall von 400 ms für eine Gesamtdauer von 5 min präsentiert. Hierbei wurde keine metrische Gewichtung (z. B. der Intensität oder Tonhöhe) gegeben, kein Ton ausgelassen und keine sonstige Variation über die Zeit etabliert.

Um die Teilnehmer*Innen in einen passiven Status zu bringen, sahen sie gleichzeitig zur akustischen Stimulation einen Stummfilm. Dieses im Feld übliche Verfahren soll sicherstellen, dass sie aufmerksambleiben („maintain participants in an alert-state“, Fujioka et al. 2012, S. 1792). Gerade in einem Experiment, das automatische sensorische Funktionen mit passiver Stimulus-Wahrnehmung untersuche, sei dies wichtig (ebd.). Durch den Stummfilm soll also aktives Nachdenken über den akustischen Stimulus eingedämmt werden. Außerdem ist es aus ethischen Gesichtspunkten angenehmer für die Teilnehmer*Innen, denn ein wiederholt piepender Ton wurde in der Pilotphase ohne Stummfilm als wenig angenehm bis alarmierend empfunden. Die Filmausschnitte mit Charlie Chaplin sind dagegen durchaus unterhaltsam.

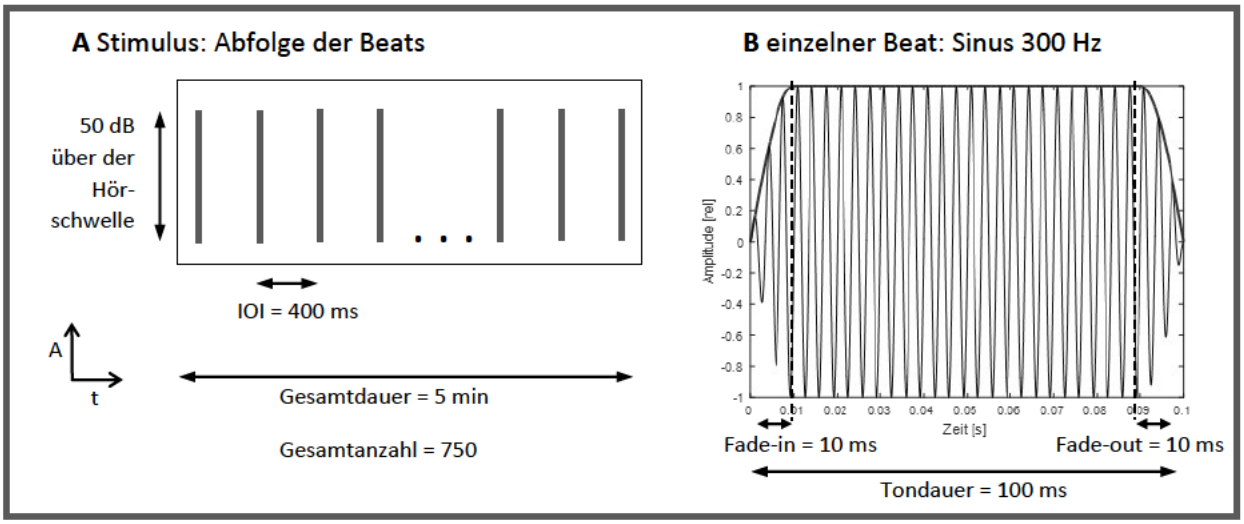


Abbildung 4: Schema des präsentierten Stimulus. A *750 isochrone Töne (Beats) erklingen mit Inter-Onset-Intervall von 400 ms und einer Gesamtdauer von 5 min, der Pegel wird hierbei für jede/n VersuchsteilnehmerIn auf 50 dB (SPL) über der vorab mit demselben Setup ermittelten Hörschwelle eingestellt.* ***B*** *Jeder einzelne Beat besteht aus einem 100 ms langen Sinuston mit Frequenz 300 Hz und mit je 10 ms sinusförmigem Fade-in und Fade-out).*

Nach Durchführung des MEG-Experiments und einer kurzen Pause wurden die TeilnehmerInnen zum Musical Ear Test in einen ruhigen Raum begleitet. Die TeilnehmerInnen hörten nach einer Erklärung des Tests über Kopfhörer (ohrumschließend, Hersteller: AKG) rhythmische Patterns. Im Test sollten sie beurteilen, ob ein zweites präsentiertes Rhythmuspattern dasselbe ist wie das erste oder ob es davon abweicht. Ihre Antwort kreuzten die TeilnehmerInnen auf einem Papierbogen an.

ii. Preprocessing

Mithilfe des MEG-Scanners werden elektromagnetische Aktivitäten im ganzen Gehirn gemessen. Dabei sind neben den relevanten Signalen, die von aktiven Neuronen stammen, verschiedentliches Rauschen und Artefakte im gesamt gemessenen Signal. Beispiele für Rauschen sind tieffrequente Schwingungen, die durch die Schirmung des Raumes dringen, etwa verursacht von der elektrischen Straßenbahn, die nur einige Meter entfernt des Universitätsklinikums Aarhus vorbeifährt. Zudem können im Helm des MEG-Scanners Artefakte auftreten, die einzelne Kanäle unbrauchbar machen. Auch der/die VersuchsteilnehmerIn bringt mit Herzschlag, Augenblinzeln und sonstiger muskulärer Aktivität elektromagnetische Signale mit, die nicht enzephalographisch relevant sind.

Für ein bereinigtes Nutzsignal müssen die Messungen also von Störsignalen getrennt und befreit werden. Dies und die Umwandlung der Rohdaten in bspw. von gängigen Matlab-Packages verarbeitbare Datenformate ist Intention des sogenannten *Preprocessings* (Schema siehe Abb. 5). Es muss abgeschlossen werden, bevor weitere Schritte einer aussagekräftigen Analyse folgen können.

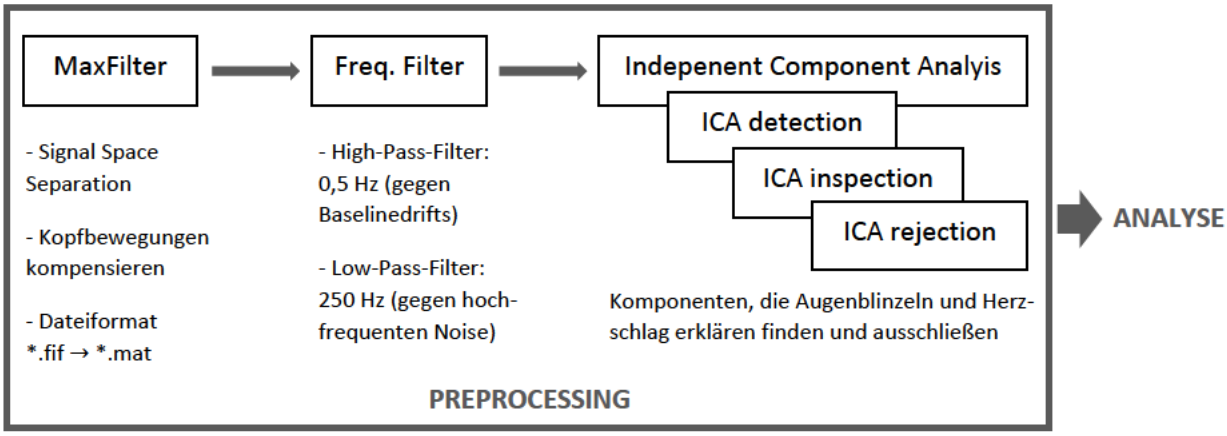


Abbildung 5: Schematischer Ablauf des Preprocessings. *Die hauptsächlichen Schritte sind MaxFilter, Bandpassfilter und Artefaktreduktion durch Independent Component Analysis (ICA).*

Als erster Schritt wird der spatiale Filter *MaxFilter* angewandt. Mithilfe des Software-Packages werden die aufgenommenen Daten durch die sogenannte *Signal Space Separation* verarbeitet. Hiermit können Signale aus dem Inneren des MEG-Helms von denen aus weiter außen liegenden Quellen getrennt werden und korrumpierte Kanäle ausgeschlossen werden (Hauk 2017). In MaxFilter werden auch die Kopfbewegungen kompensiert, die durch die HPI-Spulen an der Stirn und hinter den Ohren aufgezeichnet wurden. Zudem nimmt das Package ein informatisches Umwandeln von dem bei der Akquise geschriebenen Datenformat **.fif* in das in Matlab einfach bearbeitbare Datenformat **.mat* vor.

Den Standards des *Center for Music in the Brain* der Universität Aarhus folgend (Trusbak-Hauman 2017) kann nun eine Bandpassfilterung der Signale im Frequenzbereich folgen. Gängige Werte für den High-Pass-Filter sind hier 0,5 bis 1 Hz und für den Low-Pass-Filter 50 bis 500 Hz, je nach Daten und Intention. So können einerseits niederfrequente sogenannte *Baselinedrifts* sowie hochfrequente (etwa muskulär bedingte) Störungen vorab reduziert werden (ebd.). Für die vorliegende Arbeit wurde ein Bandpassfilter von 0,5 Hz bis 250 Hz gewählt. Die Grenzwerte sind hierbei sehr konservativ, die hauptsächlich relevante Aktivität wird im Bereich zwischen 8 und 30 Hz erwartet.

Als nächster Schritt werden im Preprocessing biologische Artefakte ausgeschlossen. Eine Methode, um die wiederkehrenden Artefakte von Augenblinzeln und Herzschlag zu erkennen, ist die *Independent Component Analysis* (ICA). Dies kann bspw. mit Hilfe der Funktion *runica* (FieldTrip 2019) aus der für die Analyse neuronaler Zeitsignale verbreiteten Toolbox *FieldTrip* geschehen (Oostenfeld und Schoffelen 2019). Hier werden die Daten in einzelne Komponenten unterteilt, die einen Großteil der Varianz im Vergleich zum Rest der Daten erklären. In dieser Methode entfernt man sich vom Sensorlevel, betrachtet also nicht einzelne Kanäle, sondern eher abstrakte Quellen, die für eine bestimmte Art von Signal verantwortlich sind. Genau das soll bei der Detektion von Blinzeln und Puls passieren. Die Matlab-Skripte von Niels Trusbak-Haumann, die dem Autor dieser Arbeit zur Verfügung gestellt wurden, arbeiten mit *runica* und teilen sich auf in *ICA_detection.m*, *ICA_inspection.m* und *ICA_rejection.m*. Im ersten wird die Gruppierung der Daten in 64 Komponenten vorgenommen, im zweiten können die Komponenten über die Zeit visuell inspiziert werden und im dritten die als auszuschließend erkannten Komponenten von den Daten abgezogen werden und diese dann zurück auf das Sensorlevel transformiert werden.

Bei der visuellen Inspektion ergeben sich zumeist recht klare Kurvenverläufe in einer der 64 Komponenten, welche dementsprechend ausgeschlossen werden kann. Für die gesuchte Herzschlag-Komponente ähneln diese Kurvenverläufe mit kurzen, spitzen und regelmäßig auftretenden Peaks einem EKG (siehe. Abb. 6). Die Aktivität der Augen ist einerseits am Kurvenverlauf (vergleichsweise sanfte Hügel oder plateauförmige Anhebungen/Absenkungen im Abstand einiger Sekunden) und andererseits an der Lokalisierung der Aktivität erkennbar. Klare Dipole im vorderen Stirnbereich sprechen für eine örtlich begrenzte Quelle in der Nähe der Augen. Beispiele für solche klaren Patterns sind in Abb. 6 gezeigt. Die Komponenten, in denen Herz- und Augenaktivität erkannt wird, werden im Folgenden von der Datenanalyse ausgeschlossen (mithilfe des Skripts *ICA_rejection.m*). Im Laufe der ICA musste ein Datensatz aufgrund korrumpierter Datenstruktur von der Analyse ausgeschlossen werden. Somit verbleiben die Daten von 28 TeilnehmerInnen.

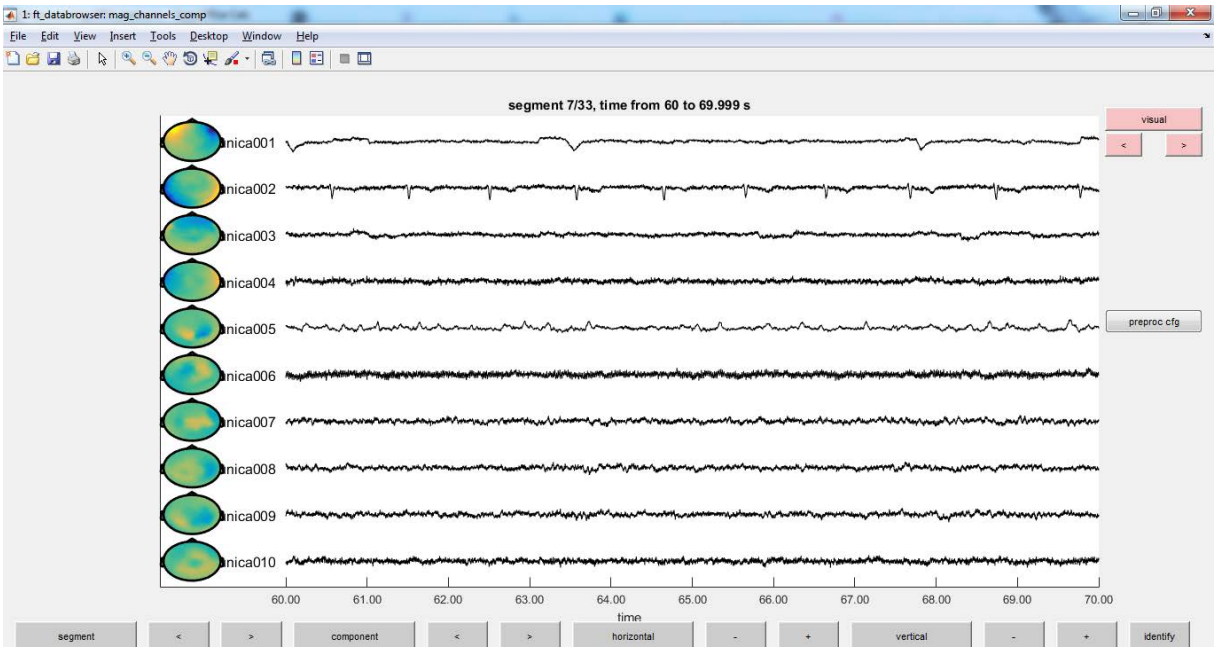


Abbildung 6: Exemplarische Illustration der ersten 10 ICA-Komponenten. *Zeitverlauf der durch ICA ermittelten Komponenten runica1 bis runica10 für eine/n exemplarische/n VersuchsteilnehmerIn. Für jede Komponente ist das gemittelte MEG über die Zeit (in Sekunden)* aufgetragen. Zudem zeigt eine skullmap pro Komponente die Lokalisierung der Aktivität, wobei die blau-gelbe Färbung Dipole und grün neutrale Signale anzeigt. In Komponente runica001 ist ein typisches Pattern für Augenblinzeln und eine frontale Lokalisierung im Stirnbereich zu sehen, während in der occipitalen Verteilung im Nackenbereich und vor allem in den spitzen, quasiperiodisch auftretenden Ausschlägen (in Abständen in der Größenordnung von 1 Hz) der Komponente runica002 Herzaktivität erkannt werden kann.

Als letzter Schritt der Artefaktreduzierung können Muskelartefakte ausgeschlossen werden, die nicht gleichförmig wiederkehren, sondern spontan auftreten. Diese stammen von Bewegungen der VersuchsteilnehmerInnen oder dem reinen Bedürfnis, Schultern oder Nacken zu strecken oder sich anderweitig zu bewegen. Im MEG sorgen diese Bewegungen leider für vergleichsweise hohe Ausschläge im hochfrequenten Bereich. Da diese Artefakte spontan auftreten, ist eine gründliche Bereinigung nur manuell durchführbar, was einen immensen Zeitaufwand bedeutet, da für jede/n VersuchsteilnehmerIn alle Kanäle betrachtet werden müssen. Der Vorteil der spontanen Zeitverteilung ist allerdings, dass die muskulären Artefakte sich über die 750 aufgenommenen Trials verteilen und im Mittel kein allzugroßer Einfluss auf die Daten angenommen wird. Zudem liegt der Großteil der Störungen im hohen Frequenzbereich, der in den weiteren Analysen nicht betrachtet wird. Von einem manuellen Auffinden und Ausschließen der Trials mit spontanen muskulären Artefakten wird hier also aus Gründen des erwarteten Mehrwerts und des Umfangs der vorliegenden Arbeit abgesehen.

iii. Analyse

In der Analyse (Schema siehe Abb. 7) soll zunächst das erwartete neuronale Entrainment gezeigt werden. In einem nächsten Schritt muss ein Maß gefunden werden, das dieses Entrainment quantifizieren kann, damit eine objektive Bewertung des möglichen Effekts möglich ist. Dieser operationalisierte Wert soll dann in den Konditionen Beat und Resting verglichen werden, um interne Validität sicherzustellen. Dann wird die Differenz zwischen den Konditionen gebildet, also die Resting-Daten von den Beat-Daten subtrahiert. Der Gedanke dabei ist, ausschließlich die Beat-Aktivität, gewissermaßen korrigiert zu untersuchen.

Hiernach kann die Korrelation mit dem ebenfalls gemessenen MET-Score untersucht werden. Die MET-Scores für rhythmisches Verständnis quantifizieren, wie gut VersuchsteilnehmerInnen einen

gegebenen Rhythmus wiedererkennen. Der MET-Score liegt für jede/n VersuchsteilnehmerIn als intervallskalierter metrischer Zahlenwert vor. Ein möglicher Zusammenhang des neuronalen Entrainments und des MET-Scores wird dann durch einen Signifikanztest und die Untersuchung der Korrelation betrachtet und dargestellt.

Zunächst werden allerdings die MEG-Daten zur Analyse weiterverarbeitet, wie im folgenden Abschnitt erklärt wird.

1. Analyse der MEG-Daten

Die MEG-Daten liegen als kontinuierliche Zeitsignale vor (im Rahmen einer Abtastfrequenz von 1000 Hz). Um die Aktivität innerhalb einer Beat-Periode untersuchen zu können, muss bekannt sein, wann während des Experiments ein Stimulus zu hören war, also wann die Trials anfangen und aufhören.

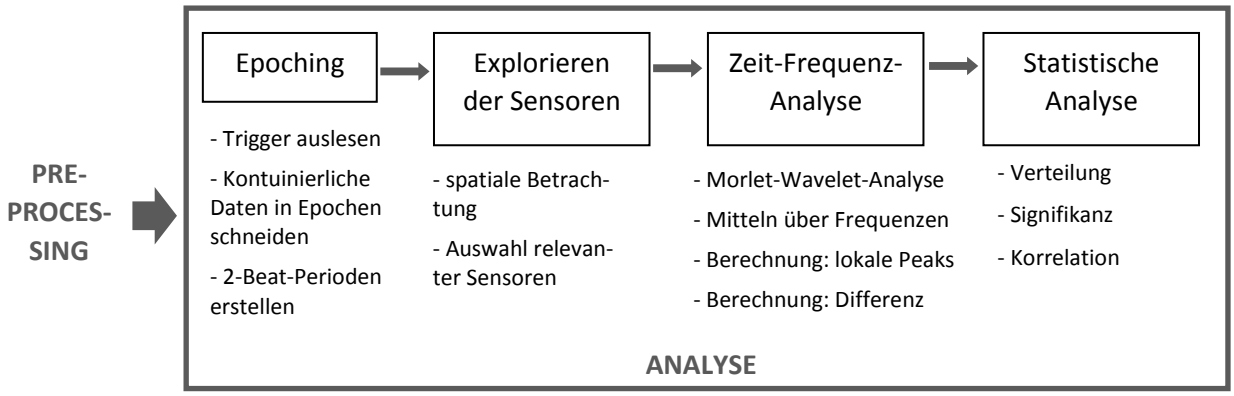


Abbildung 7: Schematischer Ablauf der Analyse. *Die hauptsächlichen Teile sind Epoching, Explorieren der Sensoren, Zeit-Frequenz-Analyse (time frequencyanalysis, TFA) und statistische Analyse. Die Analysen erfolgen auf Sensorlevel und werden dann auf verschiedene Arten (über Trials, über Versuchspersonen, über Frequenzen) gemittelt und in Plots dargestellt.*

Epoching

Dafür wurde bei den Aufnahmen ein sogenanntes Triggersignal mitgesendet, wann immer ein Ton erklang. Dadurch können die Daten nun in 400 ms lange Epochen unterteilt werden, die jeweils einer Stimulusperiode entsprechen. Der Gedanke dahinter ist, dass dann die Aktivität über die erklungenen 750 Stimuli gemittelt werden kann und somit die erwarteten Oszillationsmodulationen (Signal) gegenüber den stochastisch verteilten anderen Signalen (Noise) hervorgehoben werden können, also die Signal-to-Noise-Ratio verbessert wird.

Zeit-Frequenz-Analyse

In einem ersten Schritt werden die Kanäle MEG1041 und MEG1441 exemplarisch untersucht und die gefundene Aktivität über Trials sowie über Teilnehmer gemittelt. Die Wahl fiel auf diese Sensoren, da sie über Regionen liegen, die als an Timingprozessen beteiligt gelten und bekannt sind für Beat-basierte Beta-Aktivität (Iversen, Repp und Patel 2009; Fujioka et al. 2012). Der Sensor MEG1041 liegt dabei in etwa über dem präfrontalen und prämotorischen Cortex bzw. dem supplementär motorischen Areal (SMA). Der Sensor MEG1441 liegt über dem rechten auditorischen Cortex. Da in der vorliegenden Arbeit eine Untersuchung auf Sensorlevel vorgenommen wird, muss die Annahme getroffen werden, dass Aktivität in den betreffenden Bereichen in den jeweiligen Sensoren aufgenommen und nachvollzogen werden kann. Im Folgenden werden die Sensoren daher nach ihrer Lage im jeweiligen Hirnlappen als frontal gelegen (MEG1041 und Umgebung) sowie als temporal gelegen (MEG1441 und Umgebung) bezeichnet.

In der Zeit-Frequenz-Analyse (*time frequency analysis,* TFA) nach den Standards des BBCI (u. a. des Fachgebiets Neurotechnologie der TU Berlin, Blankertz et al. 2016) werden in diesem Fall Hirnfrequenzen zwischen 5 und 45 Hz betrachtet (Brandl, in prep.). Die TFA wird hierbei mit einem Morlet-Wavelet und einem Puffer von 1000 ms durchgeführt (vgl. Cohen 2014, S. 141 ff.), die 32 betrachteten Frequenzbins steigen entsprechend der menschlichen Tonhöhenwahrnehmung logarithmisch an.

In vorläufigen Analysen auf Sensorebene konnte Stephanie Brandl bereits Indizien für Beat-basierte Betaband-Modulationen, sowie auffällige Aktivität im Alpha-Band der auch hier vorliegenden Daten finden. Nachdem die Sensoren MEG1041 und MEG1441 nun nach der Artefaktreduktion erneut vielversprechende Aktivität in Beta- und Alpha-Band aufwiesen, wurden umliegende Sensoren explorativ getestet. Findet sich ähnliche Aktivität in umliegenden Sensoren, so bestärkt das die Annahme, dass im untersuchten Hirnareal tatsächlich die gesuchte Aktivität stattfindet.

Der Zeitraum, über den in zwei Epochen gemittelt wird, wird hier testweise um eine Epoche verschoben, um sicherzustellen, dass die Aktivität nicht nur bei geraden, sondern auch bei ungeraden Trials beobachtet werden kann und keine etwaigen mathematischen Artefakte oder Spezifitäten der Darstellung für die regulären Beat-abhängigen Patterns sorgen. Auch mit verschobenem Betrachtungsfenster zeigten sich ähnliche Muster.

Ausgehend von den Magnetometern MEG1041 und MEG1441 werden nun in einer explorativen Phase benachbarte Kanäle auf auffällige Patterns während der Beat-Kondition untersucht (siehe Abb. 8). Dazu wird für die einzelnen umliegenden Kanäle wie vorab erwähnt eine Zeit-Frequenz-Analyse durchgeführt und visuell inspiziert, ob sich Beat-abhängige Aktivität finden lässt. Kanäle mit auffälligen Patterns werden für darauffolgende Schritte notiert und in der entsprechenden Richtung auf dem Skalp weiter exploriert. Sinken Signalstärke und/oder Periodizität dieser Patterns bis auf ein unkenntliches oder arbiträres Niveau, wird in die entsprechende Richtung nicht weiter exploriert. Da diese subjektive Vorgehensweise einem persönlichen Bias unterliegen kann, wurde die Vorauswahl sehr liberal getroffen, es wurden also zahlreiche Kanäle betrachtet. Ergänzend zum initial betrachteten rechts-temporal gelegenen Sensor MEG1441 über dem rechten auditorischen Cortex wird zudem ausgehend vom äquivalenten links-temporal gelegenen Kanal MEG0131 über dem linken auditorischen Cortex exploriert. Eine Übersicht der betrachteten Kanäle findet sich in → c. Ergebnisse (S. 29).

Nach der Auswahl der Kanäle, die in der Kondition Beat auffällige Aktivität zeigen, kann die Vergleichskondition Resting State betrachtet werden. In den gleichen Kanälen wird hier ebenfalls eine TFA durchgeführt, deren Ergebnisse visualisiert werden können. Da in der Resting-Kondition keine Töne erklangen und demnach auch keine Trigger gesendet werden mussten, werden die Daten erst in der Analyse in gleichlange Epochen unterteilt.

Die Kondition Resting State dauerte bei der Datenakquise zehn Minuten. Um einen vergleichbaren Datensatz zur Kondition Beat zu erreichen, fließen nur die mittleren fünf Minuten der Resting-Daten in die weiteren Analysen ein. Dabei geht man davon aus, dass die mögliche anfängliche Aufregung der TeilnehmerInnen sich gelegt hat und gleichzeitig die Monotonie noch nicht Überhand genommen hat, was zur Ermüdung der TeilnehmerInnen führen kann. Der mittlere Teil wird daher als dahingehend geeignet angenommen, dass er am wenigsten Einflussgrößen aus außerhalb der Kondition beinhaltet. Nach dem Epoching kann auch hier eine Zeit-Frequenz-Analyse durchgeführt werden und die Hirnaktivität demnach quantifiziert werden.

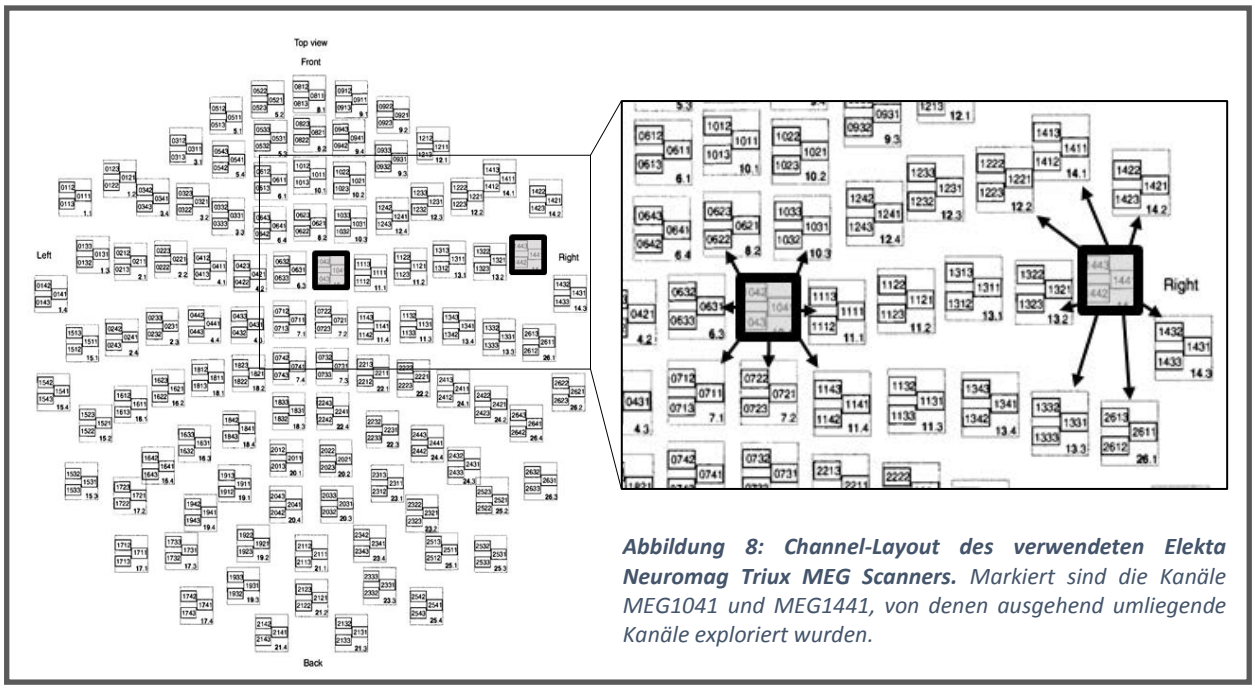


Abbildung 8: Channel-Layout des verwendeten Elekta Neuromag Triux MEG Scanners. *Markiert sind die Kanäle MEG1041 und MEG1441, von denen ausgehend umliegende Kanäle exploriert wurden.*

Statistische Analysen

Um zu prüfen, ob die visuell beobachtete Beta- und Alphaband-Synchronisierung und -Desynchronisierung der Beat-Kondition auch statistisch relevant ist, wurden einige weitere Analyseschritte gegangen. Um ein statistisches Maß zu finden, wird die Aktivität für verschiedene Frequenzbänder jeweils auf eine Dimension zusammengefasst (für die spätere Darstellung eines Line-Plots) und über die Zeit untersucht.

Um die in den Spektrogrammen beobachteten Beat-abhängigen Modulationen weiter zu quantifizieren, wird nun eine Fourrier-Analyse der TF-Ergebnisse durchgeführt. Betrachtet wird hierbei, welche Modulationsfrequenzen in den Frequenzbändern der Hirnaktivität vorliegen. Moduliert die Aktivität in bestimmten Bändern mit dem Tempo des Stimulus, ist dies in der sogenannten *FFTofTF* mit einem verstärkten Auftreten der Stimulusfrequenz nachzuvollziehen. Bei $IOI_{Beat} = 400\,ms$ liegt die Stimulusfrequenz bei $f_{Beat} = 2{,}5\,\mathrm{Hz}$. Die Power innerhalb einzelner Modulationsfrequenzbänder kann hiernach analysiert werden. Dazu wird der Amplitudenwert der Modulationsfrequenz 2,5 Hz verglichen mit den Amplituden der benachbarten Modulationsfrequenzbins 1,25 Hz und 3,75 Hz. Der Wert der benachbarten Modulationsfrequenzbins wird dazu gemittelt, um einen Vergleichswert für die Modulationsfrequenz 2,5 Hz zu erlangen. Die Differenz von diesem Mittelwert (in dB) wird als *localpeak* weiterverwendet. In diesem Fall ist eine lineare Annäherung zwischen den zwei Frequenzbins (in äquidistanten Frequenzbins das Mittel) eine ausreichende Annahme zur Berechnung des Grundwerts.

In einem weiteren Schritt wird *within-subject* der so errechnete lokale Peak der Kondition Resting vom lokalen Peak der Kondition Beat abgezogen. Die dadurch entstehende Differenz $diff(localpeak) = localpeak_{Beat} - localpeak_{Resting}$ stellt so ein rechnerisches Maß für das Beat-basierte Entrainment dar. Es wird also angenommen, dass die durch die wiederkehrenden Beats in der Kondition Beat induzierte repetitive neuronale Aktivität in diesem Maß beschrieben wird. Es beinhaltet eine Mittlung über Trials und wird für jede/n VersuchsteilnehmerIn einzeln betrachtet.

Die MEG-Daten werden in die in Tabelle 1 ersichtlichen Frequenzbänder unterteilt und getrennt von einander betrachtet.

Frequenzband [Hz]	Neuronale Oszillation [Band]	Auswahl nach
5-8	Delta bis Theta	Arnal 2012, Lakatos et al. 2008
8-12	Alpha	Jensen und Mazaheri 2010
9-15	Alpha bis Beta	siehe → c. Ergebnisse (S. 34)
15-20	unteres Beta	Fujioka et al. 2009
20-22	mittleres Beta	Fujioka et al. 2012
22-25	mittleres bis hohes Beta	siehe → c. Ergebnisse (S. 34)
25-30	hohes Beta	siehe → c. Ergebnisse (S. 34)
30-45	Gamma	Van Pelt et al. 2016

Tabelle 1: Untersuchte Frequenzbänder der neuronalen Oszillation. *Angegeben sind Frequenzspannen [Hz], das übliche Label für jedes Band (etwa Beta) und eine Referenz zur Begründung der Auswahl.*

2. Untersuchung der Korrelation zwischen neuronalen und behavioralen Daten

Da sowohl das neuronale Entrainmentmaß, also die Differenz des lokalen Peaks zwischen der Kondition Beat und der Kondition Resting, als auch die Ergebnisse des Musical Ear Test als Zahlenwert für jede/n VersuchsteilnehmerIn vorliegen, kann nun ihre Korrelation untersucht werden.

Für eine statistische Analyse muss bekannt sein, wie die Daten verteilt sind. Für normalverteilte Datensätze werden parametrische Signifikanz- und Korrelations-Tests angewendet, während für anderweitig verteilte (z. B. exponentiell, logarithmisch etc.) non-parametrische, rangbasierte Tests verwendet werden. Um die Verteilung zu überprüfen, kann bspw. der Anderson-Darling-Test angewendet werden. Er hat zur Nullhypothese, dass die Daten normalverteilt vorliegen (MathWorks 2013) und gibt einen p-Wert aus, also die Wahrscheinlichkeit, die Nullhypothese fälschlicherweise zu verwerfen. Die Ergebnisse werden im Abschnitt → c. Ergebnisse (S. 38) zusammengefasst und im Anhang detailliert dargelegt.

Mit dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test wird hiernach zunächst unabhängig von der Normalverteilung überprüft, ob ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Variable *diff(localpeak)* aus den MEG-Daten und den *MET-Scores* besteht.

Ergibt sich im Signifikanztest ein p-Wert von $p < 0{,}05$, gilt der Zusammenhang der Variablen als signifikant und es kann ein Korrelations-Test durchgeführt werden. Hierbei wird mit Pearson's linearem Korrelationskoeffizienten die Effektstärke zwischen den beiden vorliegenden Variablen bestimmt. Die Ergebnisse werden genauer im Abschnitt → c. Ergebnisse (S. 39) dargelegt und im Scatterplot grafisch veranschaulicht.

c. Ergebnisse

An den MEG-Experimenten nahmen 29 ProbandInnen teil (18 weiblich, 11 männlich), deren Alter von 19 bis 50 Jahren reichte (Median: 24, Standardabweichung: 7,37). Keine/r der Freiwilligen brach die Teilnahme während des MEG-Experiments ab. Im Laufe des Preprocessings, das ansonsten problemlos verlief, musste ein Datensatz aufgrund korrumpierter Datenstruktur ausgeschlossen werden. Die weitere Inspektion der Daten lässt keine Rückschlüsse auf missglücktes oder fehlerhaftes Preprocessing zu.

Am Musical Ear Test (MET) nahmen 25 ProbandInnen teil. Die schlussendliche Samplegröße für statistische Untersuchungen eines Zusammenhangs zwischen neuronalem Entrainment und musikalischem Ryhthmusverständnis liegt also bei n = 25.

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse aus dem MEG dargestellt. Es wird also die erste Forschungfrage behandelt: Verursacht ein isochroner Stimulus kognitives Entrainment, das anhand neuronaler Untersuchungen im MEG gefunden werden kann?

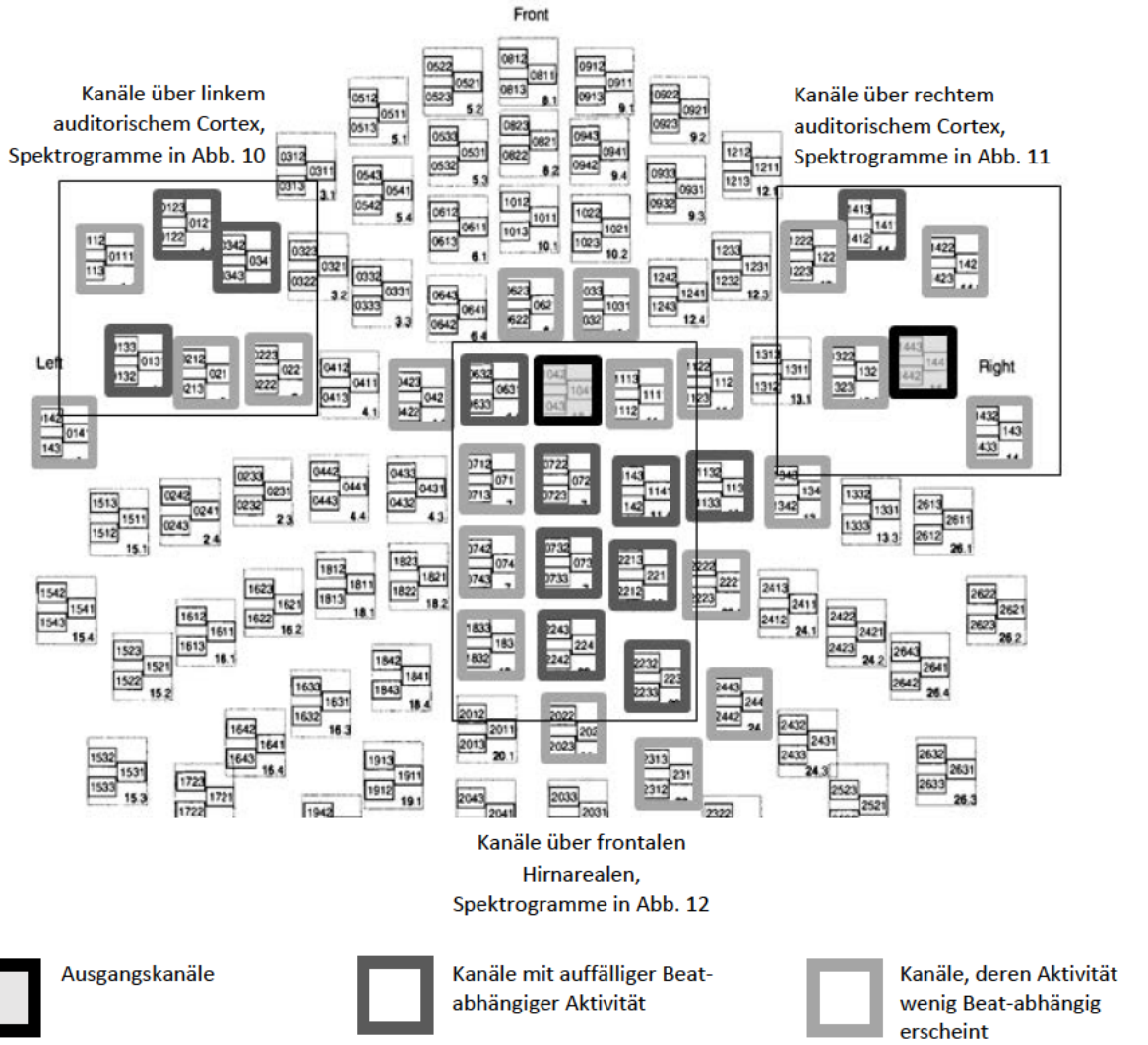


Abbildung 9: MEG-Layout mit farblicher Markierung der explorierten Kanäle. *Schwarz markiert sind die Kanäle MEG1041 (frontal) und MEG1441 (rechts-temporal), von denen die Exploration ausging. Dunkelgrau markiert sind die Kanäle, die nach visueller Inspektion Beat-abhängige Patterns zeigten. Hellgrau markiert sind Kanäle, deren Aktivität wenige Beat-abhängig erscheint und in deren Richtung demenentsprechend nicht weiter exploriert wurde.*

i. Resultate aus dem MEG

Die aufgenommenen MEG-Daten (Beat: ca. 60 GB) bestehen pro Datensatz aus 308 Kanälen über eine Dauer von ca. 5 min für die Kondition Beat und eine ca. 10-minütige Dauer für die Kondition Resting State. Die Kanäle beinhalten Zeitsignale mit einem Amplitudenwert je Zeitindex (ähnlich digitalen Audiosignalen) und teilen sich auf in 102 Kanäle für die Magnetometer und 2 x 102 planare Gradiometer, beide verteilt über den gesamten Schädel (für eine komplette Übersicht über die Kanäle vgl. Abb. 8 in b. Methode, → Zeit-Frequenz-Analyse, S. 27) Dazu kommt je ein Kanal für die gemessene Aktivität von Herzschlag und vertikalen Augenbewegungen. Zeitlich liegen die Daten in einer Auflösung von $f_s = 1000\,Hz$ vor. Nach dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem (vgl. Oppenheim, Schafer und Buck 2004, S. 202) können also Hirnfrequenzen bis zu 500 Hz korrekt und ohne Aliasing dargestellt werden.

In Abb. 9 ist der relevante Ausschnitt aus dem Layout der Kanäle im verwendeten Elekta Neuromag Triux MEG-Scanner dargestellt, mit einer farblichen Markierung der (wie in → b. Methode, S. 26 beschrieben) gesichteten Kanäle, sowie einer Markierung der Kanäle, die im Folgenden genauer verglichen werden.

Generell lässt sich beobachten, dass die Zeit-Frequenz-Analysen auffällige Patterns der Beta-Aktivität in den ausgesuchten Sensoren zeigen, die über temporalen Regionen des rechten und linken auditorischen Cortex sowie über frontalen Regionen liegen, etwa dem supplementären motorischen Areal (SMA), dem präfrontalen und prämotorischen Cortex. Zudem können ähnliche Beat-abhängige Patterns im Alpha-Band, vor allem der Kanäle über dem auditorischen Cortex gefunden werden.

1. Spektrogramme

Aus Gründen der Darstellung werden die Spektrogramme hier zunächst unterschieden in Kanäle über dem linken und rechten auditorischen Cortex sowie Spektrogramme aus Kanälen über frontalen bzw. motorischen Arealen (Sensoren siehe Abb. 9).

Visuelle Inspektion: links-temporal

In Abb. 10 sind dementsprechend die Daten aus den links-temporalen Kanälen dargestellt, die Position der Spektrogramme entspricht hierbei der relativen Position der Sensoren im MEG-Layout (Layout siehe Abb. 8, → S. 27). In den Spektrogrammen zeigen sich Patterns von positiven (rot dargestellt) und negativen (blau dargestellt) Peaks im Verlauf von zwei aufeinander folgenden Beat-Perioden (jeweils 400 ms). Wie in Abb. 10 B besonders klar zu sehen ist, findet sich die alternierende Aktivität im Sensor MEG0121 in einem breiten Frequenzband von ca. 8 bis zu 30 Hz, was dem kompletten Umfang der Bänder Alpha und Beta entspricht. Auch in den benachbarten Kanälen MEG0341 (Abb. 10 C) und zumindest in den höheren Frequenzen (13-26 Hz) auch in MEG0131 (Abb. 10 D) zeigen sich ähnliche Patterns, die allerdings weniger ausgeprägt sind, wenn man die Signalstärke betrachtet. Für weitere Analysen wurde daher stellvertretend für die Region des linken auditorischen Cortex der Kanal MEG0121 (Abb. 10 B) ausgewählt.

Visuelle Inspektion: rechts-temporal

Auf die gleiche Weise wurde mit den rechts-temporalen Kanälen verfahren, deren Spektrogramme in Abb. 11 dargestellt sind. Auch hier zeigen sich repetitive Muster von ansteigender und absteigender Power pro Beat-Periode. Die Patterns, die etwa in Abb. 11 B zu sehen sind, haben dabei eine besonders hohe Signalstärke und eine klare zeitliche Unterscheidung in positive (ca. 500-650 ms) und negative (ca. 300-450 ms) Aktivität. Im Frequenzbereich sind die Patterns vergleichsweise klar begrenzt und finden sich zwischen ca. 9 und 15 Hz. Dabei handelt es sich um den Übergang zwischen Alpha- (8-12 Hz) und Beta-Band (13-30) Hz. Zudem findet sich im hohen Beta-Band (ca. 23-30 Hz, etwa der Kanäle MEG 1411, Abb. 11 B und MEG 1441, Abb. 11 E) Aktivität im Takt des Beats.

Da die Muster aufgrund ihrer Signalstärke und Abgrenzung in Frequenz- und Zeitbereich am klarsten im Spektrogramm des Sensors MEG1411 auftreten, wird dieser nach visueller Inspektion für die weiteren Analysen ausgewählt.

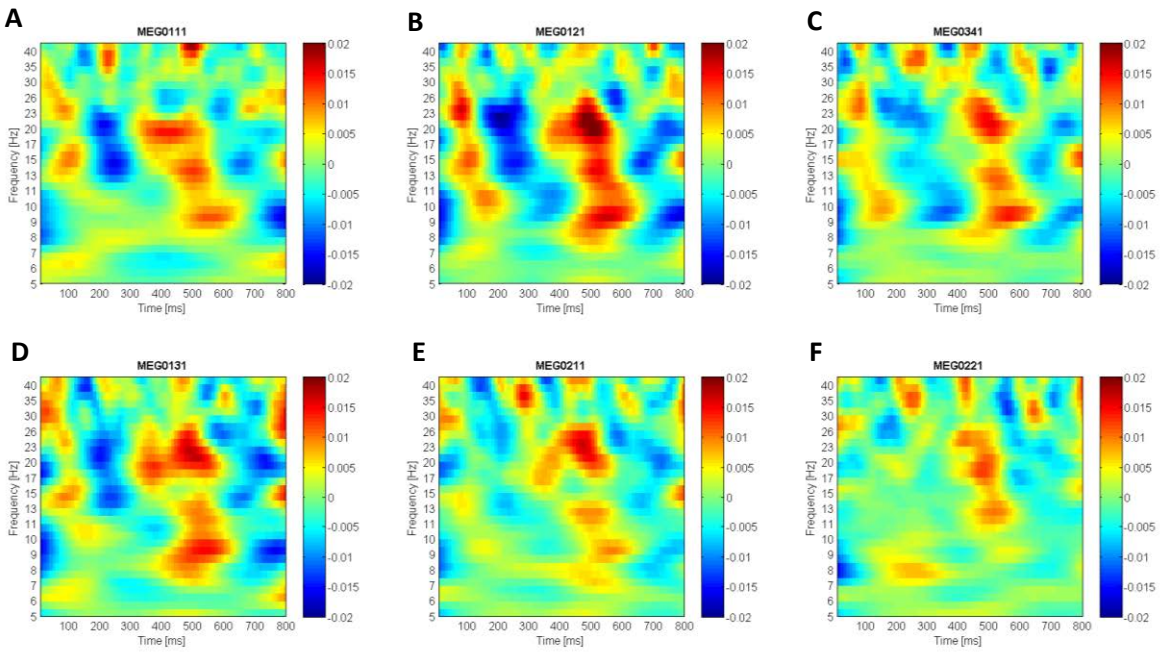


Abbildung 10: Spektrogramme aus den Daten von links-temporalen Kanälen*. Aufgetragen ist die gemessene Hirnaktivität (Farbkodierung: Abweichung der Power vom Mittelwert) in Frequenzbändern (y-Achse: in Hz) über die Zeit (x-Achse: in ms). Gemittelt wurde über VersuchsteilnehmerInnen und Trials. Zur besseren Vergleichbarkeit der Spektrogramme ist die Farbkodierung hier auf +/- 2% begrenzt und fixiert.*

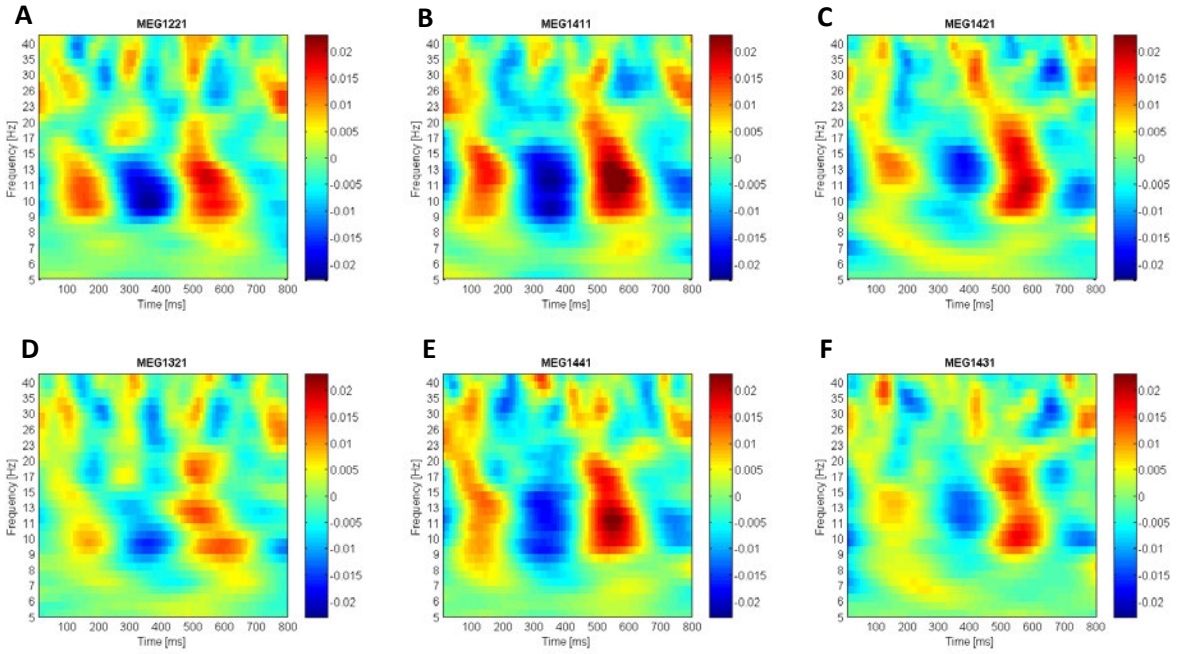


Abbildung 11: Spektrogramme aus den Daten von rechts-temporalen Kanälen. *Aufgetragen ist die gemessene Hirnaktivität (Farbkodierung: Abweichung der Power vom Mittelwert) in Frequenzbändern (y-Achse: in Hz) über die Zeit (x-Achse: in ms). Gemittelt wurde über VersuchsteilnehmerInnen und Trials. Zur besseren Vergleichbarkeit der Spektrogramme ist die Farbkodierung hier auf +/- 2,2% begrenzt und fixiert.*

Visuelle Inspektion: frontal

Als letzte Region der sensorbasierten Exploration wurde vom frontalen Sensor MEG1041 ausgegangen. In Abb. 12 sind zwölf Kanäle dargestellt, die in der Einzelbetrachtung auffällige Patterns zeigten. Die Anordnung in der Darstellung entspricht hierbei der Anordnung im MEG-Scanner. Einerseits lässt sich in dieser Übersicht sehen, dass die Klarheit der Synchronisierungs- und Desynchronisierungspatterns zur linken Seite hin abnimmt, während rechts eindeutigere repetitive Patterns erkennbar sind. Das zeigt sich etwa in den Kanälen MEG0631 (links) vs MEG1111 (rechts) sowie in den Kanälen MEG0741 (links) vs. MEG2211 (rechts).

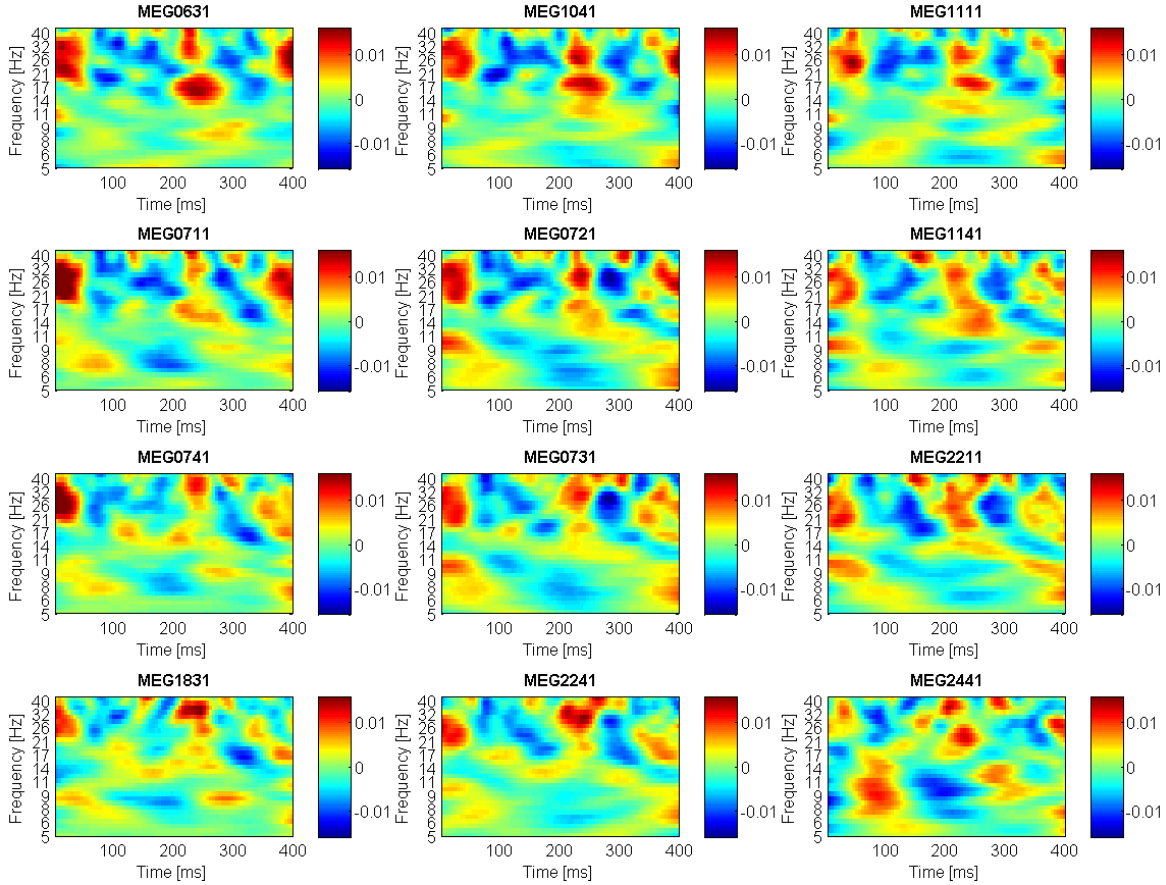


***Abbildung 12: Spektrogramme aus den Daten von frontalen Kanälen**. Aufgetragen ist die gemessene Hirnaktivität (Farbkodierung: Abweichung der Power vom Mittelwert) in Frequenzbändern (y-Achse: in Hz) über die Zeit (x-Achse: in ms). Gemittelt wurde über VersuchsteilnehmerInnen und Trials. Zur besseren Vergleichbarkeit der Spektrogramme ist die Farbkodierung hier auf +/- 1,6% begrenzt und fixiert.*

Andererseits ist auch eine Konzentration der klaren Patterns rund um den Sensor MEG1041 bzw. in frontaleren Regionen zu beobachten. Die parietaler (hier also weiter hinten) gelegenen Sensoren MEG1831 (links), MEG2241 (mittig) und MEG2441 (rechts) zeigen nur noch sehr arbiträre Aktivität.

Im Gegensatz dazu erscheinen die frontal gelegenen Kanäle, wie etwa MEG1041 und MEG1111, aussagekräftiger. Hier zeigen sich hohe Werte (kodiert mit dunkler Färbung) der positiven und negativen Peaks und eine klare Konzentration in den Beta-Frequenzen (ca. 15-30 Hz). Hierbei zeichnet sich die abgebildete Aktivität auch durch eine ermöglichte Umwicklung des Skeptrogramms aus. Damit ist gemeint, dass das Pattern, das am rechten Rand des Zeitfensters endet, am linken Ende fortgeführt wird, als könnte man es um eine Walze wickeln. Dies verdeutlicht die Periodizität der Aktivität. Ist dies nicht der Fall, kann aufgrund der Mittlung über Trials und Teilnehmer nicht von einer konsistenten Aktivität ausgegangen werden, die abhängig vom Beat wäre – fehlende

Umwicklung spricht eher für längere oder kürzere Periodendauern. Unter den genannten Gesichtspunkten zeigen sich die klarsten Patterns von Beat-abhängiger Synchronisierung und Desynchronisierung im Spektrogramm der mit dem Sensor MEG1041 aufgenommenen Daten. Dieser wird daher für die weitere Analyse stellvertretend für die frontalen Kanäle ausgewählt.

Visuelle Inspektion: verschobenes Betrachtungsfenster

Die in der TFA ausgewertete Aktivität über zwei Beat-Perioden zeigt auch mit verschobenem Betrachtungsfenster ähnliche Patterns. Wie in Abb. 13 zu sehen, sind in den Ausgangssensoren MEG1041 (frontal) und MEG1441 (rechts temporal) ähnliche Muster mit einem positiven (rot dargestellt) und einem negativen (blau dargestellt) Peak pro Beatperiode (400 ms) in der Beta- (ca. 20-30 Hz) bzw. Alphaaktivität (ca. 9-15 Hz) zu finden. Die Form der entsprechend gefärbten Cluster ist dabei gleichbleibend, während die Unterschiede in der Farbgebung aufgrund des relativen Maßes und ihrer geringen Ausprägung nicht als beunruhigend zu betrachten sind.

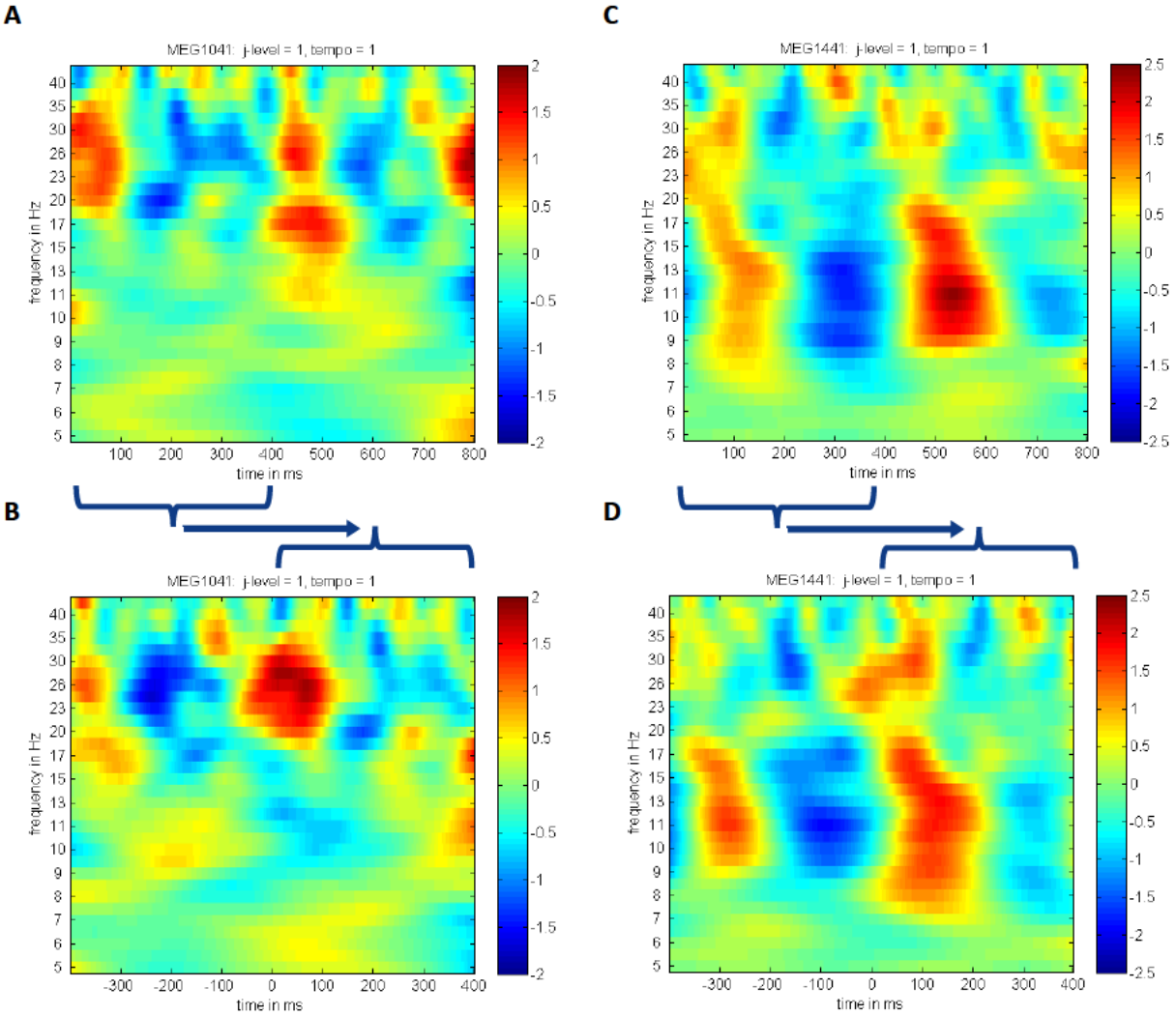


Abbildung 13: Spektrogramme von zwei Beat-Perioden der Kanäle MEG1041 (frontal) und MEG1441 (rechts-temporal). *Aufgetragen ist die gemessene Hirnaktivität (Farbkodierung: Power in % der Abweichung vom Mittelwert) in Frequenzbändern (y-Achse: in Hz) über die Zeit (x-Achse: in ms). Gemittelt wurde über VersuchsteilnehmerInnen und Trials, die Betrachtungsfenster wurden hier um eine Beat-Periode gegeneinander verschoben.* ***A:*** *Kanal 1041, beginnend mit Onset von Trial 1.* ***B:*** *Kanal 1041 zentriert um Onset von Trial 1.* ***C:*** *Kanal 1441, beginnend mit Onset vonTrial1.* ***D:*** *Kanal 1441, zentriert um Onset vonTrial 1.*

Visuelle Inspektion: Auswahl der Kanäle

Es werden also nach visueller Inspektion unter Beachtung der Zeit- und Frequenzeigenschaften der gefundenen Patterns drei exemplarische Kanäle ausgewählt: MEG0121 (links-temporal), MEG1411 (rechts-temporal) und MEG1041 (frontal, Spektrogramme siehe Abb. 14). Als relevante Frequenzbänder werden zusätzlich zu den in → b. Methode (S. 27) aus der Literatur entnommenen Bändern nun nach Begutachtung der ausgewählten Kanäle das Alpha/Beta-Band (9 – 15 Hz, v. a. auf Grund des rechts auditorisch gelegenen MEG1411), das mittlere bis obere Beta-Band (22 – 25 Hz, v. a. auf Grund des links auditorisch gelegenen MEG0121) sowie das obere Beta-Band (25 – 30 Hz, v. a. auf Grund des frontal gelegenen MEG1041) ausgewählt.

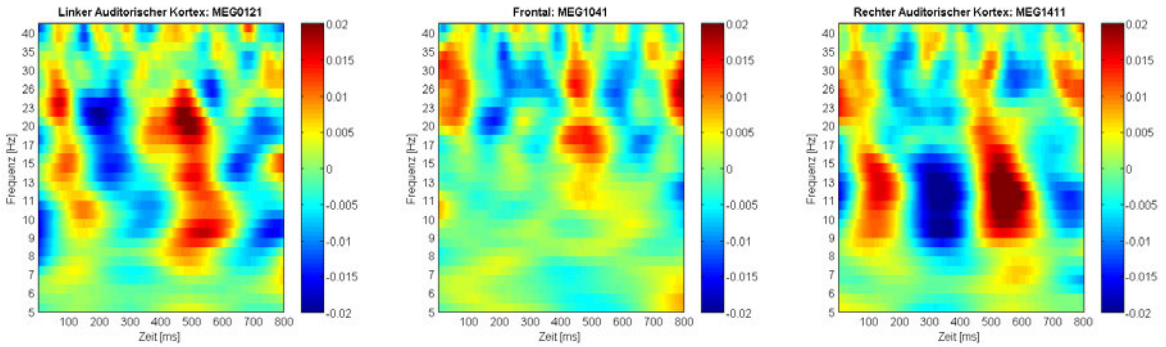


***Abbildung 14: Spektrogramme der ausgewählten MEG-Kanäle für die Kondition Beat**. Aufgetragen ist die gemessene Hirnaktivität (Farbkodierung: Abweichung der Power vom Mittelwert) in Frequenzbändern (y-Achse: in Hz) über die Zeit (x-Achse: in ms) der Kanäle MEG0121 (links-temporal), MEG1041 (frontal) und MEG1411 (rechts-temporal). Gemittelt wurde über VersuchsteilnehmerInnen und Trials. Zur besseren Vergleichbarkeit der Spektrogramme ist die Farbkodierung hier auf +/- 2% begrenzt und fixiert.*

Visuelle Inspektion: Kondition Resting

Die Spektrogramme der Vergleichskondition Resting sind in Abb. 15 für die drei ausgewählten Sensoren visualisiert. Es zeigen sich vergleichsweise zufällige Patterns von positiver und negativer Power. Die entsprechenden roten und blauen Felder lassen weder Rückschlüsse auf ein besonders aktives Frequenzband noch auf eine Modulation, die abhängig von der Beatfrequenz wäre, schließen. Einzige Ausnahme könnte der frontale Kanal MEG1041 (Abb. 15 B) sein, in dem im oberen Alpha-Band (10 – 12 Hz) eine Modulation in der halben Beat-Frequenz vorliegen könnte. Da in diesem Sensor aber in der Beat-Kondition keine besondere Aktivität festgestellt wurde, erscheint ein false-positive-Ergebnis unwahrscheinlich. Da in den anderen Kanälen zudem keine direkt vergleichbaren Patterns auftreten, wird die vermeintliche Alpha-Modulation als unbedenklich interpretiert.

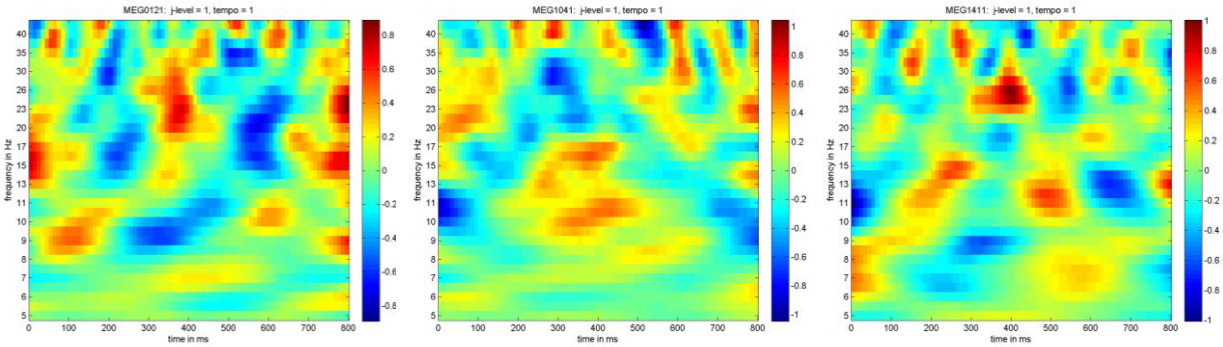


***Abbildung 15: Spektrogramme der ausgewählten MEG-Kanäle für die Kondition Resting State.** Aufgetragen ist die gemessene Hirnaktivität (Farbkodierung: Abweichung der Power vom Mittelwert) in Frequenzbändern (y-Achse: in Hz) über die Zeit (x-Achse: in ms) der Kanäle MEG0121 (**A**, links-temporal), MEG1041 (**B**, frontal) und MEG1411 (**C**, rechts-temporal). Gemittelt wurde über VersuchsteilnehmerInnen und Trials.*

Wäre eine klare und konsistente Modulation oder sonstige Auffälligkeiten in den TF-Spektrogrammen der Kondition Resting zu beobachten, müsste die Analyse-Pipeline vollständig überprüft werden, denn während der Kondition Resting hörten die Probanden keinen Beat, mögliche Patterns wären also wohl informatische Artefakte, die etwa durch Epoching oder Averaging entstanden sein könnten. Da dies nicht der Fall ist, kann davon ausgegangen werden, dass Resting als probate Kontrollkondition im Vergleich zur Beat-Kondition verwendet werden kann. Denn neben der zufälligen Verteilung der Aktivität liegt auch die Signalstärke in den Spektrogrammen der Kondition Resting deutlich unter den in der Beat-Kondition gemessenen.

2. Lineplots

Die Aktivität in den Kanälen kann nach Mitteln über eine bestimmte Frequenzspanne auch als eindimensionaler Verlauf über die Zeit verstanden und visualisiert werden. In Tab. 2 sind die sogenannten *Lineplots* für zwei Beat-Perioden der drei vorab ausgewählten Kanäle in vier ausgewählten Frequenzspannen dargestellt – eine komplette Übersicht der Lineplots findet sich im Anhang.

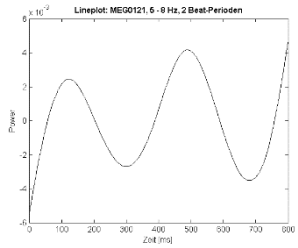
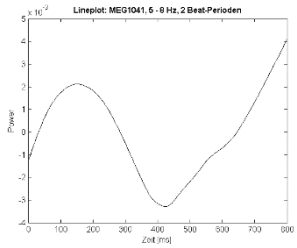
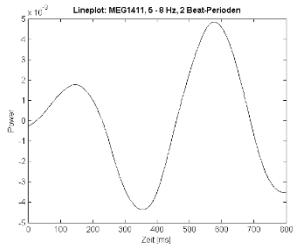
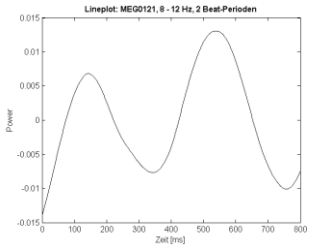
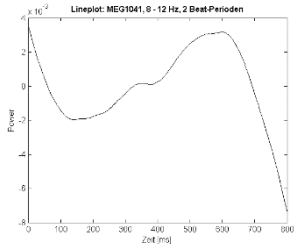
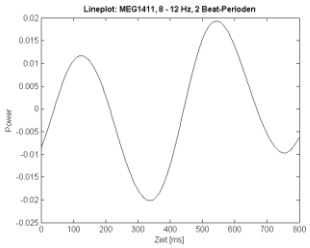
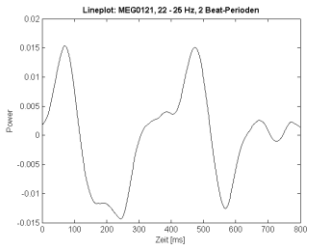
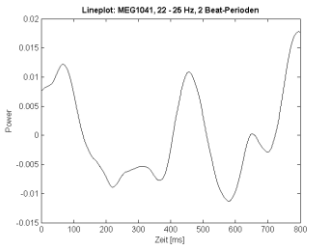
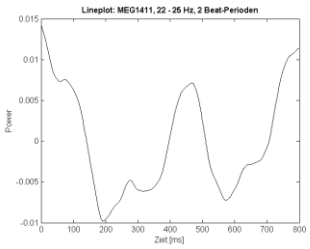
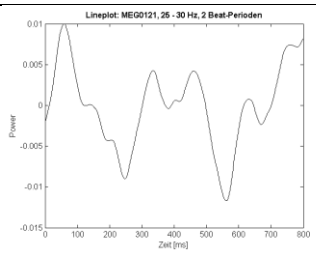
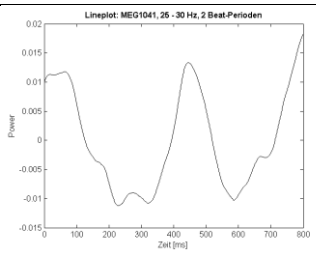
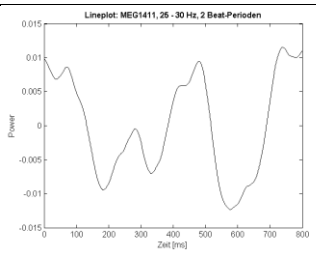
Kanal / Freq.-Band	MEG0121 (links-temp.)	MEG1041 (frontal)	MEG1411 (rechts-temp.)
5 – 8 Hz			
8 – 12 Hz			
22 – 25 Hz			
25 – 30 Hz			

Tabelle 2: Lineplots für zwei Beat-Perioden. *Unterschieden wird hier nach den drei ausgesuchten Kanälen MEG0121 (links-temporal), MEG1041 (frontal) und MEG1411 (rechts-temporal) sowie nach vier ausgewählten Frequenzbändern. Aufgetragen ist die Änderung der der Power (y-Achse) im jeweiligen Frequenzband über die Zeit (x-Achse: in ms).*

Vor allem in den niedrigen Frequenzbändern Theta und Alpha (5 – 12 Hz) zeigen sich in den temporalen Kanälen MEG0121 und MEG1411, wie schon in den Spektrogrammen, besonders klare Modulationen mit einem positiven und negativen Peak pro Beat-Periode. Der frontale Kanal MEG1041 zeigt in diesen Frequenzen eine Aktivität, die in ihrer Repetitivität und vor allem der Umwicklung unklar bleibt. Der frontale Kanal zeigt eher in den oberen Beta-Bereichen (22 – 30 Hz) wiederkehrende Auf- und Ab-Bewegungen. Diese scheinen recht konsistent an die Beat-Periode gekoppelt zu sein. Ähnlich Beat-abhängig sieht der Lineplot der Daten aus dem links-temporalen Kanal MEG0121 in den Frequenzen von 22 bis 25 Hz aus.

3. Fourieranalyse der Modulationen

In der sogenannten *FFTofTF* werden die Modulationsfrequenzen in den gleichen Frequenzbins wie in der TFA untersucht. Dazu wird eine Fourieranalyse der Aktivität in den Frequenzbins durchgeführt. In Abb. 16 zeigen sich verstärkte Amplituden über verschiedene Modulationsfrequenzen in Farbkodierung. Abb. 16 A zeigt exemplarisch die FFTofTF des rechts-temporalen MEG1411 in der Kondition *Beat*. An der Modulationsfrequenz 2,5 Hz (= Stimulusfrequenz, dargestellt als gestrichelte Linie) zeigt sich hier besonders starke, dunkelrot dargestellte Aktivität in den Frequenzen 9 – 17 Hz sowie 26 – 30 Hz. Diese Frequenzen des Alpha- und Beta-Bands wurden auch in vorherigen Schritten als mit Entrainment verbunden beobachtet. Im Vergleich dazu zeigt die Darstellung der FFTofTF aus dem frontalen MEG1041 in der Kondition *Resting* (Abb. 16 B) nur leichte Farbunterschiede in der Modulationsfrequenz 2,5 Hz, also keine besonders abweichende Aktivität in einem bestimmten neuronalen Frequenzband, verglichen mit den anderen. Zu beachten ist zudem, dass die automatisierte Farbskalierung hier niedriger ausfällt, also generell weniger starke Aktivität vorliegt.

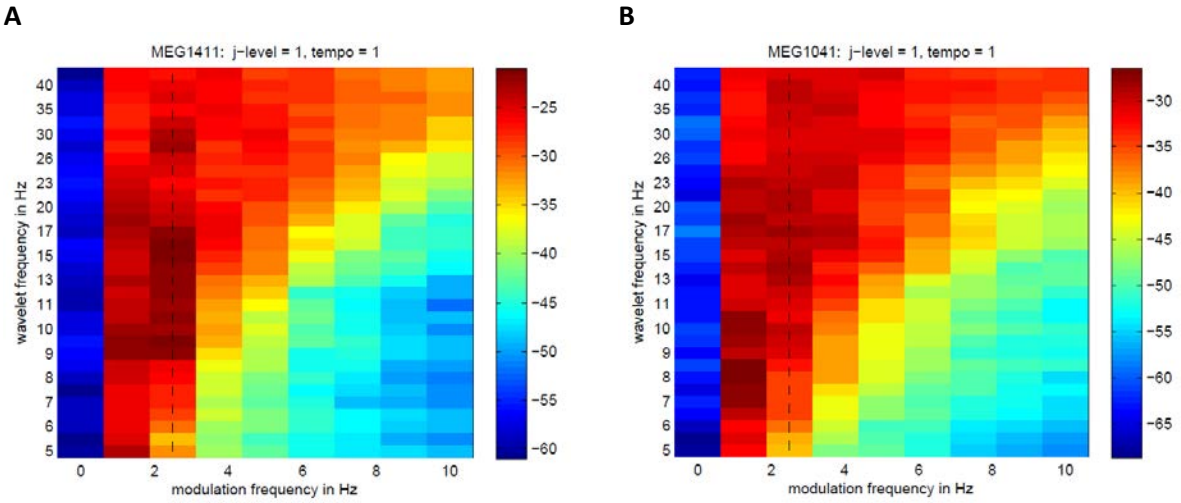


Abbildung 16: Darstellung der Ergebnisse aus der FFTofTF. *Aufgetragen ist hier die Power (Farbkodierung, in dB) in den gemessenen Hirnfrequenz-Bins (y-Achse: in Hz) über die Modulationsfrequenzen (x-Achse: in Hz). Dargestellt sind Beat-Daten aus dem rechts-auditorisch gelegenen MEG1411 (**A**) und Resting-Daten aus dem frontal gelegenen MEG1041 (**B**).*

In einem nächsten Analyseschritt kann nun über die Modulationsfrequenzen gemittelt werden, um das Vorkommen von Modulationen im neuronalen Gesamtsignal zu quantifizieren. Stellt man die gemittelten Amplituden der Modulationsfrequenzen im Abstand von $\frac{2{,}5\ \mathrm{Hz}}{2} = 1{,}25\ \mathrm{Hz}$ dar, so kann die Signalstärke der verschiedenen Modulationsfrequenzen miteinander verglichen werden.

In Abb. 17 ist ein Vergleich zwischen dem Lineplot der FFTofTF in der Kondition Beat und dem in der Kondition Resting für den rechts auditorisch gelegenen Kanal MEG1411 dargestellt. Hier ist einerseits ein klarer lokaler Peak an der Modulationsfrequenz 2,5 Hz der Beat-Kondition zu beobachten (zur Berechnung siehe Visualisierung in Abb. 17 A, sowie → b. Methode, S. 27). In der Kondition Resting (Abb. 17, B) ist der lokale Peak dagegen verschwindend gering. Andererseits zeigt das Skalenniveau (in dB) erhöhte Modulationspower in der Kondition Beat im Vergleich zur Kondition Resting an.

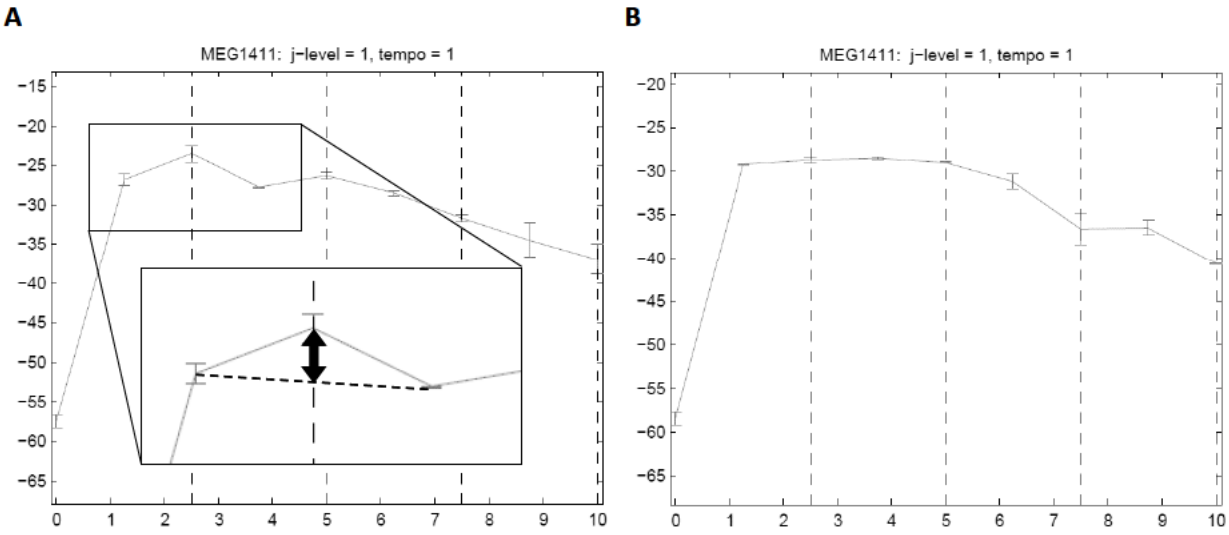


Abbildung 17: Lineplots der Ergebnisse aus der FFTofTF. *Aufgetragen ist die Power (y-Achse: in dB) in den Modulationsfrequenzbändern (x-Achse: in Hz). Hier dargestellt als Lineplot mit Angabe der Streuung sind die Daten des rechts-temporalen MEG1411 in der Kondition Beat (**A**) und Resting (**B**). Zudem ist in **A** visualisiert, wie der lokale Peak an der Modulationsfrequenz 2,5 Hz berechnet wird: Das Mittel der Nachbarfrequenzbins wird vom Wert an der Modulations-frequenz 2,5 Hz subrahiert, die Differenz ist der lokale Peak für die jeweilige Kondition.*

In Tabelle 3 ist ein Überblick über die deskriptive Statistik der Entrainment-Maße *localpeak* gegeben. Die Werte sind statistisch nur mäßig aussagekräftig, da sie das Mittel aus allen Sensoren und Frequenzbändern darstellen. Trotzdem kann man mit ihrer Hilfe ein Gefühl für die Daten bekommen.

Variable / Maß	Localpeak Beat	Localpeak Resting	Differenz
Minimum	-24,82	-16,46	-26,39
Maximum	20,39	16,43	22,77
Spanne	45,21	32,89	49,16
Arithmetisches Mittel	2,50	1,08	1,45
Standardabweichung	5,34	4,89	7,33
Median	2,65	1,58	1,63

Tabelle 3: Deskriptive Statistik der localpeak-Variablen. *Verglichen werden hier die Werte der Kondition Beat und der Kondition Resting sowie ihre Differenz.*

Es zeigt sich beispielsweise, dass die lokalen Peaks der Kondition Beat sowohl in Verteilung als auch im Mittel höhere Werte als die der Kondition Resting aufzeigen. In der letzten Spalte ist die Kombination der beiden Variablen, nämlich ihre Differenz, eingetragen.

ii. Resultate aus dem MET

Der rhythmische Musical Ear Test, an dem 25 Probanden teilgenommen haben, kann Werte von 0 bis 52 annehmen, wobei 52 bedeutet, dass alle Trials korrekt erkannt wurden. Im Sample liegt die Spanne der Ergebnisse zwischen 17 und 46 mit einem Mittelwert von 36,8 (Standardabweichung 6,36). Der recht hoch gelegene Median von 38 kann zunächst als Hinweis auf linksschiefe Verteilung gesehen werden. Abb. 18 zeigt anhand eines Histogramms die Verteilung der MET-Scores.

Hierin ist zu sehen, dass die Verteilung nahezu normal erscheint, während ein Ausreißer am linken Rand (Minimumwert von 17) besteht. Eine verlässliche Aussage über die Normalität lässt sich erst mithilfe eines Tests auf Normalverteilung, wie etwa dem Anderson-Darling-Test, treffen.

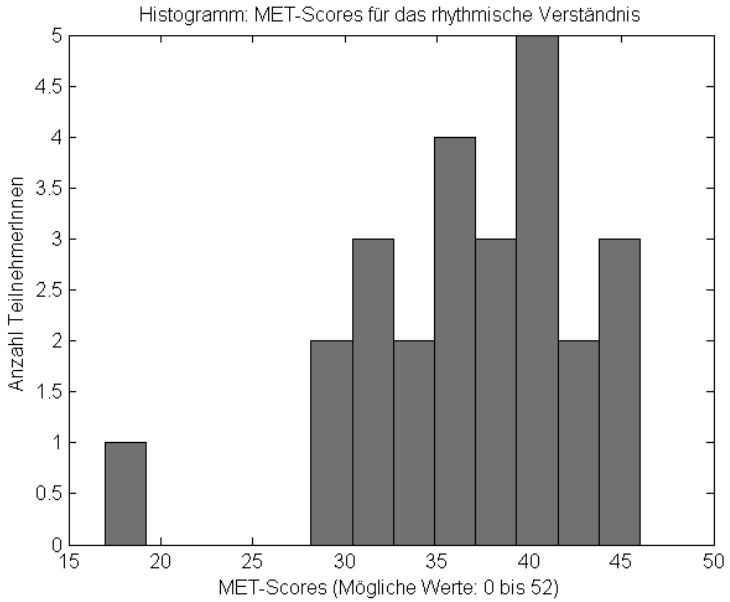


Abbildung 18: Histogramm der MET-Ergebnisse. *Aufgetragen ist die Anzahl der Teilnehmenden (y-Achse), die einen bestimmten MET-Score (x-Achse) erreichen. Die Balkenbreite wurde hier so gewählt, dass sich 13 Bins, also etwa die Hölfte der Samplegröße, ergeben.*

iii. Statistische Auswertung: Zusammenhang zwischen den Ergebnissen aus MEG und MET

Nachdem für die unabhängige Variable *diff(localpeak)* der lokale Peak der Kondition Resting von dem der Kondition Beat abgezogen wurde, kann der statistische Zusammenhang zum behavioralen Maß untersucht werden.

Im Folgenden wird also die zweite Forschungsfrage der vorliegenden Arbeit behandelt: Besteht ein Zusammenhang zwischen der Stärke des Entrainments und dem Abschneiden im behavioralen Test auf Rhythmusverständnis? Nachdem Tests auf Normalverteilung die Auswahl von Signifikanz- und Korrelationstest vorgeben, kann der vermutete Zusammenhang untersucht und dargestellt werden.

1. Statistische Untersuchung des Samples

Dazu muss bekannt sein, ob die Daten normalverteilt vorliegen. Für die Verteilung der MET-Scores gibt der Anderson-Darling-Test $p_{MET} = 0{,}2032$ aus. Auch die Testergebnisse für die Verteilung der lokalen Peaks liegen mit Werten zwischen $p_{diff,\ min} = 0{,}08$ und $p_{diff,\ max} = 0{,}97$ für die drei Sensoren bei $p < 0{,}05$. Die Nullhypothese, dass eine Normalverteilung vorliegt, kann also nicht verworfen werden. Da der Anderson-Darling-Test demnach keine signifikante Abweichung von der

Normalverteilung feststellen konnte, werden im Folgenden parametrische Tests für die statistische Auswertung verwendet.

2. Signifikanz der Korrelation

Der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für zwei gepaarte Stichproben ergibt einen signifikanten Zusammenhang (mit $p = 1{,}229 \cdot 10^{-5}$ und $Z = -4{,}3724$) zwischen der unabhängigen Variable *diff(localpeak)* und der abhängigen Variable *MET-Scores*.

Im nächsten Schritt kann die vermutete Korrelation zwischen MEG- und MET-Daten also mit einem parametrischen Test untersucht werden, da Normalverteilung angenommmen werden kann, und ein signifikanter Zusammenhang zwischen den Variablen festgestellt wurde.

3. Korrelationsstärke

Als Maß für die Korrelationsstärke *within-subject* wurde der parametrische, lineare Korrelationskoeffizient *Pearson's r* berechnet, der Werte zwischen -1 und 1 annehmen kann. Je höher der Korrelationskoeffizient ausfällt, desto stärker ist der Zusammenhang zwischen den untersuchten Variablen nach dem genannten Korrelationstest.

Für die Frequenzspannen 8 – 12 Hz und 9 – 15 Hz im links-temporal gelegenen Kanal MEG0121 sowie für die Frequenzspanne 25 – 30 Hz im rechts-temporal gelegenen Kanal MEG1411 ergibt sich ein positiver Korrelationskoeffizient von $r_P > 0{,}3$. Für die Frequenzspanne 5 – 8 Hz im frontalen Kanal MEG1041 ergibt sich ein negativer Korrelationskoeffizient von $|r_P| > 0{,}4$. Ein Überblick über alle Ergebnisse der Korrelationstests findet sich in Tabelle 4.

Kanal / Freq.-Band	MEG0121 (links-temp.)	MEG1041 (front.)	MEG1411 (rechts-temp.)
5 – 8 Hz	0,009	***-0,429***	0,091
8 – 12 Hz	***0,376***	-0,259	-0,168
9 – 15 Hz	***0,340***	-0,189	-0,060
15 – 20 Hz	-0,234	0,154	-0,071
20 – 22 Hz	-0,095	-0,186	0,112
22 – 25 Hz	-0,066	-0,042	0,173
25 – 30 Hz	-0,123	-0,061	***0,376***
30 – 45 Hz	-0,036	-0,040	-0,109

Tabelle 4: Zusammenhang zwischen MET und localpeak-Daten. Pearson's lineare Korrelationskoeffizienten sortiert nach den drei betrachteten Sensoren und acht Frequenzspannen. Werte von |r| > 0,3 wurden hier markiert.

Um die Datensätze und ihre Korrelation grafisch zu betrachten, eignet sich die Darstellung im Scatterplot, wobei die Daten der einzelnen Versuchspersonen im zweidimensionalen Diagramm dargestellt werden. Abb. 19 zeigt die Scatterplots für die Kombinationen, die einen Korrelationskoeffizienten von |r| > 0,3 erreichen. Hierbei handelt es sich um den Zusammenhang zwischen MET Scores und der Differenz der lokalen Peaks im links-temporalen Sensor MEG0121 (8 – 12 Hz, Abb. 19 A und 9 – 15 Hz, Abb, 19 C), im rechts-temporalen Sensor MEG1411 (5 – 8 Hz, Abb. 19 B) und im frontalen Sensor MEG1041 (25 – 30 Hz, Abb. 19 D).

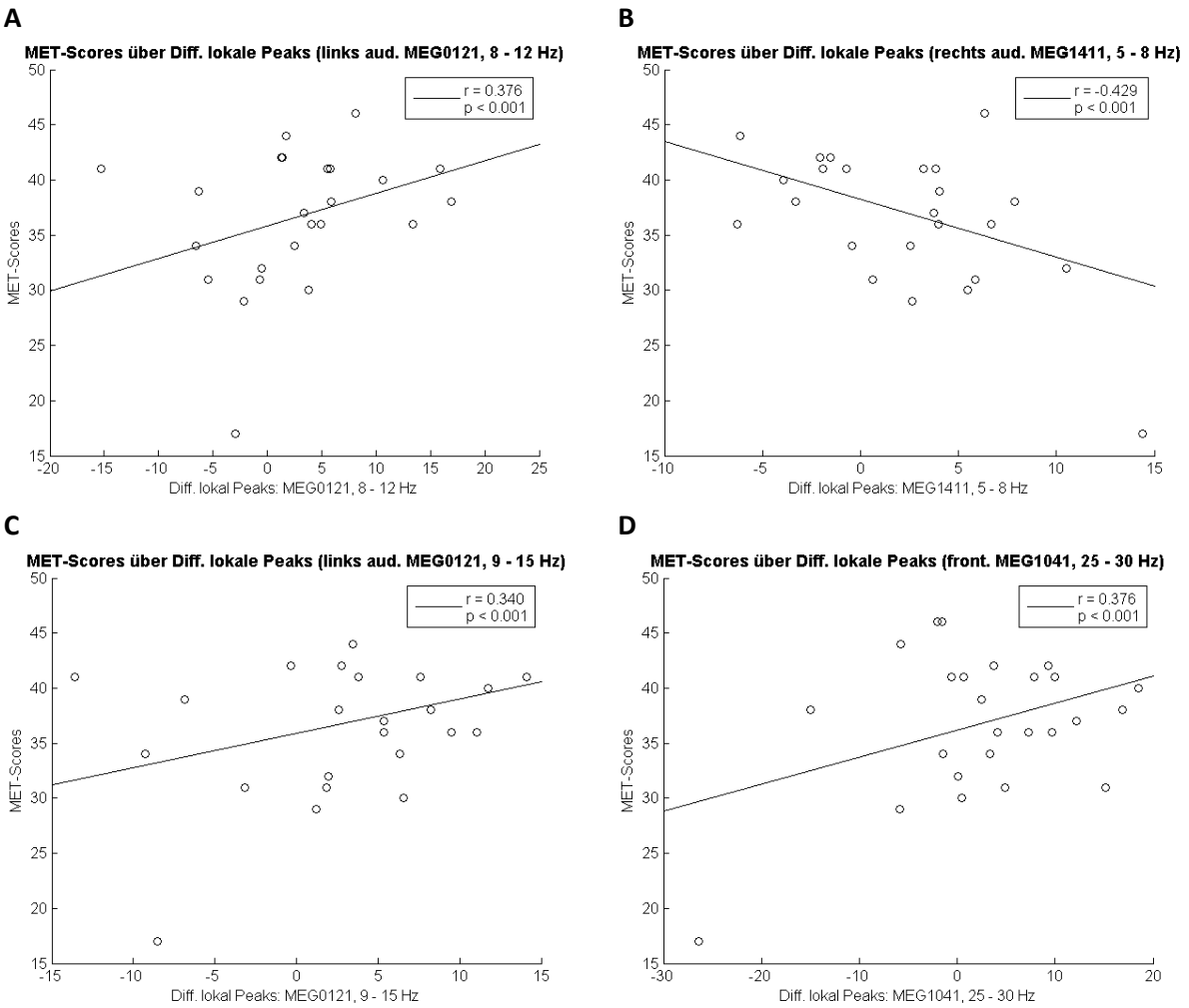


Abbildung 19: Scatterplots der Daten mit Korrelationskoeffizienten von |r| > 0,3. *Aufgetragen sind die Ergebnisse des Musical Ear Tests (y-Achse) und die Differenz der lokalen Peaks in den Konditionen Beat und Resting (x-Achse) für MEG0121, 8 – 12 Hz* ***(A)****, MEG1411, 5 – 8 Hz (****B****), MEG0121, 9 – 15 Hz (****C****) und MEG1041, 25 – 30 Hz (****D****). Zudem angegeben sind jeweils der p-Wert des Signifikanztest sowie der Korrelationskoeffizient Pearson's r. Die Annäherungsgerade wurde mithilfe linearer Regression erstellt.*

d. Diskussion der Ergebnisse

Die Suche nach neuronalem Entrainment zu einem isochronen akustischen Stimulus kann in der vorliegenden Arbeit als erfolgreich bezeichnet werden. Konsistent mit vorherigen Publikationen (Iversen, Repp und Patel 2009; Fujioka et al. 2012) finden sich auch hier auffällige Patterns im Beta-Band in auditorischen wie frontalen Hirnarealen sowie im Alpha-Band (vgl. Jensen und Mazaheri 2010) in auditorischen Arealen. Dabei erscheinen die Ergebnisse klarer als in ebenfalls voran gegangenen EEG-Arbeiten zu Beat-basiertem Entrainment (Cirelli et al. 2014; Chang et al. 2016). Dort könnten physiologische oder physikalische Gegebenheiten der Messung eine große Limitation für die Ergebnisse darstellen. Neuronales Entrainment konnte im MEG in der vorliegenden Arbeit dagegen in besonders klarer Form gefunden werden. Damit wurden Fujiokas Ergebnisse (2012), dass ein isochroner Beat Beta-Entrainment in motorischen und auditorischen Arealen verursacht, hier repliziert.

In der Vergleichskondition Resting State wurden erwartungsgemäß nur arbiträre Strukturen gefunden. Sowohl die geringe Periodizität wie auch die niedrige Signalstärke sprechen hier dafür,

dass der Resting State als Grundlage ohne besondere Aktivität gelten kann, eine Verwendung als Vergleichskondition also geeignet ist.

Nach den hier präsentierten Ergebnissen wurde des Weiteren ein moderater Zusammenhang zwischen neuronalem Entrainment zum isochronen Beat und Rhythmuskompetenz in verschiedenen Hirnregionen und Oszillationsbändern gefunden. So hängen stärkeres Entrainment im Übergang des Alpha und Beta-Bands in über dem linken auditorischen Cortex gemessenen Regionen offenbar mit besserer Performance im Rhythmustest zusammen. Der gleiche Zusammenhang wird im frontal gemessenen höheren Beta-Band beobachtet. Dagegen scheint ein negativer Zusammenhang zwischen der beat-abhängigen Theta-Aktivität in über dem rechten auditorischen Cortex gemessenen Regionen mit dem rhythmischen Verständnis zu bestehen – VersuchsteilnehmerInnen mit höherem Entrainment schnitten hier schlechter im Rhythmustest ab (Kausalität wurde nicht untersucht).

i. Interpretation

Generell lässt sich konstatieren, dass im frontalen Bereich vor allem klare Beat-abhängige Beta-Aktivität gefunden wurde. Im rechten auditorischen Bereich zeigen sich dagegen vor allem Alpha-Oszillationen während im linken auditorischen Bereich die Beat-abhängige Modulation in verschiedenen Frequenzbändern, aber nicht weniger eindeutig, zu finden ist. Die Klarheit des präsentierten neuronalen Entrainments mag an der erhöhten Trialanzahl von 750 Stimulustönen liegen. Denn je mehr Trials gemittelt werden, desto stärker können zeitabhängige Signalanteile im Vergleich zu stochastisch verteilten Signalanteilen verstärkt, also der Signal-Rausch-Abstand verbessert werden. Des Weiteren erscheint die Annahme plausibel, dass ein länger gleichbleibender Stimulus neben dem Erhöhen der statistischen Power auch das pro Trial stattgefundene Entrainment begünstigt – es gab schließlich mehr Gelegenheit zur Synchronisierung als in vorherigen Arbeiten (etwa Fujioka 2012). Um diese Annahme zu überprüfen, wäre beispielsweise denkbar, verschiedene Gruppen mit der gleichen statistischen Power, aber unterschiedlicher Trialanzahl auf ihren Unterschied zu untersuchen.

1. Frequenzband und Ort des Entrainments

Bei der beobachteten neuronalen Aktivität ist zudem eine auffällige Unterteilung in Frequenzbänder und Ort der Beobachtung zu finden. Während die Messungen über dem rechten auditorischen Cortex klar definierte Muster von Beat-abhängigem Alpha-Anstieg und -Abfall zeigen, fehlt Beat-abhängige Beta-Aktivität dort fast gänzlich. Im Gegensatz dazu zeigen die Messungen über frontalen Arealen, in etwa dem prämotorischen Cortex bzw. SMA, deutliche Muster von Beat-abhängiger Beta-Synchronisierung und -Desynchronisierung während hier Beat-abhängige Alpha-Aktivität fast gänzlich ausbleibt. Es ergibt sich also für Entrainment im Alpha- und Beta-Band eine ausschließende Struktur des Entweder-Oder. Auch wenn die hier gefundene Evidenz für eine explizite Aussage nicht ausreicht, könnte diese Verteilung der Aktivität auf einen inhibitorischen Vorgang, zumindest aber auf kommunikative Eigenschaften der verschiedenen Frequenzbänder in den verschiedenen Hirnarealen hindeuten – ein Zusammenhang, den Jensen und Mazaheri (2010) bereits für das Zusammenspiel zwischen Alpha- und Gamma-Band vorschlugen und dessen Kausalität von Boyle und Fröhlich (2013) gezeigt werden konnte.

Derweil scheinen im linken auditorischen Cortex beide Aktivitäten kombiniert aufzutreten. So zeigt sich hier auffällige Aktivität im Takt des Beats sowohl im Alpha- als auch im Beta-Band. Der linke auditorische Cortex könnte nach den vorliegenden Ergebnissen also eine zentrale Rolle in der Verknüpfung von sensorischen und motorischen Bereichen spielen. Folgt man der Annahme von einer bedeutenden kommunikativen Funktion neuronaler Oszillationen (etwa Schnitzler und Gross 2005) und der überwiegenden Rolle des linken verglichen mit dem rechten auditorischen Cortex für

Timingprozesse (Zatorre und Belin 2001), so wäre eine weitere Untersuchung im linken auditorischen Cortex als mögliche Schnittstelle des Entrainments in Alpha- und Beta-Band eine logische und auf den hier präsentierten Ergebnissen aufbauende Konsequenz.

2. Timing des Entrainments

Betrachtet man den Verlauf der beobachteten Modulationen in den Frequenzbändern, zeigt sich in allen drei Kanälen ein auffälliges Phänomen. Die Kurvenverläufe der Lineplots verschieben sich mit steigender Frequenz in der Zeit nach vorne, in höheren Frequenzen tritt die beobachtete Aktivität also früher auf als in tieferen. Einerseits könnte das darauf zurückzuführen sein, dass die tieferen Frequenzen später ansprechen. Aufgrund ihrer längeren Periodendauer können sie daher nur langsamer reagieren, die mögliche Modulationsfrequenz skaliert also mit der Signalfrequenz. Andererseits könnte dieser Trend auch bedeuten, dass die Modulation im Theta- und Alpha-Bereich erst durch kommunikative Interaktion mit dem höher gelegenen Beta-Bereich aktiviert wird (zum Zusammenhang zwischen niederfrequenten Delta- und hochfrequenten Beta- und Gamma-Oszillationen siehe Will und Berg 2007). Auch wenn für eine Aussage über Kausalität hier ausdrücklich keine Evidenz besteht, ist der Trend doch klar zu beobachten. Neuronale Oszillationen von verschiedener Frequenz sind bekannt für die Kommunikation zwischen verschiedenen Hirnbereichen über lange Distanzen, eine besondere Bedeutung kommt hier dem Beta-Band zuteil (Schnitzler und Gross 2005). Die hier beobachtete zeitliche Verzögerung mit sinkender Frequenz könnte bedeuten, dass in auditorischen Timingprozessen die Modulation in höheren Frequenzen den Modulationstakt der niedrigeren Frequenzen diktieren. Künftige Untersuchungen mit genauer Lokalisierung der Beta- und Alpha-Aktivität bei gleichbleibend hoher zeitlicher Auflösung wären für eine Bestätigung dieser Vermutung interessant.

3. *Zusammenhang von Entrainment und Rhythmustest*

Nach bestem Wissen des Autors untersucht die vorliegende Arbeit als erste den Zusammenhang zwischen neuronalem Entrainment zum isochronen Stimulus und einem behavioralen Maß der Rhythmusverarbeitung. Daher kann der moderate Zusammenhang, der gefunden wurde, als neurokognitiv-behaviorale Evidenz bezeichnet werden, die im Forschungsfeld neu ist.

Der Zusammenhang zwischen dem Rhythmustest und den Entrainment-Maßen besteht hierbei positiv ($r = 0{,}376$, $r = 0{,}340$) im Alpha- und Alpha/Beta-Band, das über dem linken auditorischen Cortex gemessen wurde, negativ ($r = -0.429$) im Theta-Band, das über dem rechten auditorischen Cortex gemessen wurde und positiv ($r = 0{,}376$) im hohen Beta-Band, das frontal gemessen wurde. Eine moderate Korrelation bedeutet, dass die Verteilungen der Daten sich in bemerkbarer Weise überschneiden, nicht jedoch, dass in den betreffenden Frequenzbändern und Kanälen besonders starke Aktivität gemessen wurde.

Es lässt sich derweil festhalten, dass erhöhtes Entrainment im linken auditorischen Cortex im untersuchten Sample mit besserem Abschneiden im Rhythmustest zusammenzuhängen scheint. Da der hier verwendete Rhythmustest vor allem die musikalische Expertise abbildet, könnte beim erhöhten Entrainment also ein trainierter Effekt vorliegen. Um die Abhängigkeit des Tests vom Kurzzeitgedächtnis auszuschließen, könnte in zukünftigen Untersuchungen die Gesamtzahl der mit Musik verbrachten Stunden im Leben der VersuchsteilnehmerInnen berücksichtigt werden. Sie gilt als reliables Maß für musikalische Erfahrung.

Die gleiche moderate Tendenz von erhöhtem Entrainment, das mit besserem Rhythmusverständnis einher geht, ist im frontalen Bereich, etwa dem prämotorischen Cortex zu beobachten. Dies deckt sich mit Ergebnissen von erhöhter Aktivität in motorischen Arealen während des Musikhörens (Chen et al. 2008). Musikalisches Verständnis von Rhythmen hängt also nicht unerheblich mit einer möglichen Verbindung von hoher Beta-Modulation im prämotorischen und Alpha/Beta-Modulation

im linken auditorischen Cortex zusammen. Entrainment im Beta-Band frontaler Regionen wie dem präfrontalen, prämotorischen Cortex oder dem SMA ist also möglicherweise einerseits der Ursprung von cortico-cortikaler Kommunikation mit dem auditorischen Cortex oder cortico-dienzephalischer Kommunikation mit dem Thalamus und andererseits maßgeblich an Pulsverarbeitung von musikalischem Input beteiligt. Eine genauere Untersuchung der hier stattfindenen Prozesse auf Quelllevel und die Richtung der möglichen Kommunikation zwischen den Arealen kann zukünftig feststellen, ob tatsächlich Beta-Band-Entrainment im prämotorischen Cortex oder SMA eine Steuerung der auditorischen Alpha-Band-Aktivität verursacht. Eine Untersuchung kausaler Zusammenhänge zum Rhyhtmusverständnis wird in → Perspektiven (S. 47) diskutiert.

Die negative Korrelation zwischen dem Abschneiden im Rhythmustest und dem Theta-Entrainment im rechten auditorischen Cortex erscheint dabei zunächst weniger intuitiv. Neurokognitive Strukturen, die sich hier mit dem Beat synchronisieren, könnten also das Rhythmusverständnis erschweren. Tieffrequente Oszillationen (Theta, 2-6 Hz) wurden als entscheidend für das Erkennen eines akustischen Stimulus im Geräusch gefunden (Ng, Schroeder und Kayser 2012). Hier zeigte sich die gleiche Tendenz: schwaches Entrainment hing mit verbesserter Performance im behavioralen Hörtest (höhere Detektionsrate sowie kürzere benötigte Zeit) zusammen. Ng et al. diskutieren dazu vor allem die Lage der Phase, die eine inhibitorische Rolle für die Detektion spiele. Da tieffrequente Oszillationen bei sensorischer Verarbeitung als entscheidend für die Aufmerksamkeit gelten (etwa Lakatos et al. 2008), wird daraus geschlossen, dass Stimuli im Experiment abhängig von der Theta-Phase schlicht verpasst wurden: „Stimuli may be systematically missed when inappropriately timed relative to sensory-entrained and attention-enhanced oscillations“ (ebd. S. 12273). Der Zusammenhang zur vorliegenden Arbeit dürfte darin liegen, dass Versuchspersonen mit verstärktem Theta-Entrainment auch komplexere Rhythmen wie im MET-Test aufgrund der inhibitorischen Wirkung auf die Aufmerksamkeit verpasst haben könnten.

ii. Limitationen

In der vorliegenden Arbeit konnten klare Patterns Beat-basierten Entrainments gefunden werden, die im auditorischen sowie im präfrontalen Cortex oder in tiefer liegenden Regionen wie dem Thalamus vermutet werden.

1. Validität

Die Klarheit der hier gefundenen Patterns, die vorherige EEG-Arbeiten übersteigt, legt nahe, dass sowohl der verwendete Stimulus ein valides Instrument zum Induzieren von Beat-basiertem Entrainment ist, wie auch MEG als enzephalographische Technologie und die dargelegte Preprocessing- und Analyse-Pipeline geeignete Werkzeuge zum Auffinden der gesuchten Aktivität sind. Es ist also von einer hohen internen Validität der neuronalen Messungen auszugehen. Auch die weitere Analyse-Pipeline bis hin zum Zahlenwert für neuronales Entrainment in den einzelnen Konditionen gibt keinen Anlass zum Zweifel.

Bei der Berechnung des Entrainment-Maßes ist möglicherweise eine Optimierung möglich, eine Diskussion dazu findet sich in → Perspektiven, S. 46).

Auch der Musical Ear Test könnte nach den Ergebnissen im vorliegenden Sample etwas schwieriger zu lösen gestaltet werden. Es zeigt sich zwar noch kein *Ceiling*-Effekt, also abruptes Abschneiden der Verteilung am maximal messbaren Wert. Dieser würde bedeuten, dass nicht genügend schwierig zu lösende Trials im Test enthalten sind und deshalb nicht die komplette Bandbreite der Kompetenz abgebildet werden kann. Trotzdem zeigen die erhöhten Werte für Median und Mittelwert, sowie die Konzentration der Daten im Bereich hoher Ergebnisse (siehe → Histogramm, S. 38), eine Tendenz von zumindest gut lösbaren Aufgaben. Nach Vermutung des Autors soll hiermit die Frustration während

des Tests niedrig gehalten werden. Wenn damit aber Ceiling-Effekte riskiert werden, erscheint das als die gravierendere Limitation.

2. Inverses Problem

Konsistent mit den hier gefundenen Ergebnissen auf Sensorebene fanden Li und KollegInnen erhöhtes Entrainment zu einem regulären Stimulus im supplementär-motorischen Areal (SMA), was zur Position des hier verwendeten frontalen Sensors passt. In der Exploration der MEG-Kanäle ausgehend vom frontalen MEG1041 fanden sich in der vorliegenden Arbeit zahlreiche Sensoren, in deren TF-Spektrogrammen Beat-abhängige Aktivität zu beobachten war. Sie decken Regionen ab, die vom präfrontalen und prämotorischen Cortex bzw. SMA bis hin zu parietalen (hier: weiter hinten gelegenen) Regionen reichen. Ein solch breites Auftreten von Entrainment-Patterns legt nahe, dass die Messung von einzelnen Sensoren hier an das inverse Problem stößt. Möglicherweise wurde mit den tiefensensorischen Magnetometern also eine Aktivität aufgezeichnet, die sich nicht über ca. ein Sechstel des Cortex erstreckt, sondern von einer zentraler liegenden Quelle stammt. Denkbare Regionen wären etwa der Thalamus oder die Basalganglien, die für antizipatorische sowie motorische Vorgänge bekannt sind (Wing und Bracewell 2009). Dazu passt auch das hier gefundene Entrainment im frontalen Kanal. Da der entsprechende Sensor womöglich Aktivität im präfrontalen Cortex aufgenommen hat und dieser über ausgiebige und wechselseitige Verbindungen zu Thalamus und Basalganglien sowie zu den Temporallappen (zu denen der auditorische Cortex zu zählen ist) verfügt (Fuster 2009), ist ein Zusammenhang durchaus naheliegend. Des Weiteren gilt auch das SMA als entscheidend für Timingprozesse zwischen Cortex und Basalganglien (Macar et al. 2006).

3. Hinweise auf tiefer liegende Quellen

Jessica Grahn fand in einer fMRI-Studie die Basalganglien als beteiligt an Beatverarbeitung (Grahn 2009). Neben einer erhöhten Konnektivität zu den auch hier als timingrelevant beobachteten Regionen des motorischen und auditorischen Cortex berichtet Grahn, dass die Basalganglien wohl vor allem in der mentalen Repräsentation des Beats eine wichtige Rolle spielen. Sie zeigten im Experiment höhere Aktivität, wenn VersuchtsteilnehmerInnen einen Beat imaginieren mussten, als wenn der Beat im Stimulus sehr präsent war. Die Basalganglien scheinen also eine entscheidende Rolle in der internen Beat- (oder musikologischer Puls-) Generierung zu spielen, vor allem wenn dieser konstruiert werden muss. Da im vorliegenden Experiment der Beat allerdings als einzige akustische Stimulierung äußerst präsent war, erscheint erhöhte Aktivität der Basalenganglien aus dieser Perspektive unwahrscheinlich.

Li et al. (2019) präsentieren in einer aktuellen Publikation Ergebnisse aus einer Kombination aus EEG und fMRI-Untersuchung. Da diese Fusions-Technologie nicht verbreitet zu sein scheint, sind die Ergebnisse besonders interessant. In der Studie wurde, wie auch in der vorliegenden Arbeit, neuronales Entrainment zu Beat (und Metrum) untersucht, allerdings mit dem Augenmerk der Lokalisierung. Die Autoren berichten besonders starkes Entrainment in verschiedenen Hirnregionen, darunter das Putamen, das SMA und der Thalamus. Beim Thalamus handelt es sich um eine der hier vermuteten tiefer liegenden Hirnregionen. Entrainment in diesem Bereich könnte die in der vorliegenden Arbeit beobachteten Beat-abhängigen Muster in Sensoren bis weit in den parietalen Bereich erklären.

4. Korrelation zwischen neuronalen und behavioralen Daten

Auch wenn die hier gefundenen Zusammenhänge nicht nur schwach, sondern in einigen Teilen auch moderat ausfallen, kann den Ergebnissen keine Kausalität entnommen werden. Einerseits ist anzunehmen, dass zwischen Beat-basiertem Entrainment und Rhythmusverständnis weitere kognitive Vorgänge liegen, die einen direkten Zusammenhang schwer nachweisbar machen. Gleichwohl weist die Tendenz auf miteinander verbundene Prozesse hin. Die hier gefundenen

Ergebnisse deuten sehr wohl eine Interaktion an, die möglicherweise noch weitere kognitive Mechanismen beeinflusst oder die von letzteren beeinflusst wird. Die *lediglich* moderate Korrelation könnte bedeuten, dass noch weitere, hier nicht untersuchte Prozesse zwischen den Variablen agieren, wie etwa Regularitätswahrnehmung oder Aufmerksamkeit bzw. Kapazität des Arbeitsgedächtnisses. Weitere Evidenz mit erhöhter statistischer Power ist für zukünftige Untersuchungen von Nöten.

iii. Perspektiven

Eine genaue Lokalisierung der Quellen erscheint möglich, ist aber wie vorab dargelegt nicht trivial. Daher wäre eine Alternative, die Untersuchung umzudrehen. Statt unter Anstrengung mit Magnetometer-Daten in die Tiefe schauen zu wollen, wäre ein effizienterer, wenn auch nur vorläufiger, Weg die Untersuchung der ebenfalls aufgenommenen Gradiometer-Daten. Gradiometer sind aufgrund ihrer physikalischen Beschaffenheit sehr akkurat in kortikalen, also schädelnahen Hirnregionen, und nahezu blind für tiefere Aktivitäten. Demnach wäre eine Untersuchung der Gradiometer an den gleichen Stellen, die in den Magnetometern Beat-abhängige Aktivität zeigten, ein Mittel, um den Ursprung der Aktivität weiter einzugrenzen. Zeigen sich auch in den Gradiometern die in den Magnetometern beobachteten Patterns, spricht das für eine kortikale, also schädelnahe Quelle. Zeigen sie das aber – was hier wahrscheinlicher erscheint – nicht, kann dies als weiterer Hinweis auf tiefer liegende Quellen gewertet werden. Denn kortikales Entrainment wäre damit sehr unwahrscheinlich.

1. Lokalisierung der beteiligten Quellen

Zukünftige Untersuchungen sollten eine Lokalisierung der hier gefundenen Aktivität ins Auge fassen, um zu verstehen, wo Entrainment im jeweiligen Frequenzband auftritt und die (Richtung der möglichen) Kommunikation zwischen den Bändern und Arealen zu untersuchen. Ein Ansatz, um das Ziel von hoher Genauigkeit sowohl im zeitlichen als auch im spatialen Bereich zu erreichen, ist die gleichzeitige Aufnahme von EEG und fMRT, wie sie ganz aktuell von Li et al. (2019) durchgeführt wurde. Da diese Technologie aber sehr innovativ zu sein scheint und daher nicht leicht zugänglich sein wird, wird hier nach Alternativen gesucht.

Die strukturellen MRT-Aufnahmen der VersuchsteilnehmerInnen der vorliegenden Arbeit sind bereits vorhanden. Dadurch sind verschiedene Wege denkbar. Einerseits kann, wie bspw. in Fujioka et al. (2012), Beamforming angewendet werden. Rechnerisch ähnlich wie bei der hier verwendeten *Independen Component Analysis* werden dabei auf spatialer Ebene Areale gesucht, die eine bestimmte Aktivität aufzeigen. Durch ein adaptives Verfahren, basierend auf der Kovarianz zwischen Sensoren, kann mithilfe des Beamforming zudem die Sensitivität erhöht werden. Es können also andere Signale entdeckt werden, als Untersuchungen auf Sensorebene zulassen (Cohen 2014, S. 313).

Das sogenannte *dynamic imaging of coherent sources* (DICS, Gross et al. 2001) funktioniert auf ähnliche Weise. Dabei können mit einem spatialen Filter sehr kleine Teile des Gehirns auf Kohärenz mit Vergleichsdaten untersucht werden (bspw. cortico-corticale Snychronisierung, vgl. Schnitzler und Gross 2005) und dementsprechend auffällige Aktivität räumlich detektiert werden. Beide Vorgehensweisen sind mit den vorliegenden Daten nach Wissen des Autors bereits machbar und könnten in zukünftigen Analyseschritten die Ortung der beobachteten Beat-abhängigen Oszillationsmodulationen ermöglichen.

Wenn bekannt ist, in welchen Bereichen die dominierende Oszillation herrscht, kann zudem durch TMS-Stimulation ein kausaler Zusammenhang mit dem Rhythmusverständnis untersucht werden.

Hierbei können ausgesuchte Hirnregionen non-invasiv angeregt werden. Mit einer gleichzeitigen Messung der Hirnaktivität lassen sich Folgen von erhöhter Aktivität im stimulierten Bereich nachvollziehen. Damit können einerseits kausale Zusammenhänge zwischen den Oszillationsbändern untersucht werden. Andererseits könnte, bei einer Kombination mit simultanem behavioralem Test der Einfluss auf das Rhythmusverständnis untersucht werden. Findet sich bei Stimulation in Bereich X eine verbesserte Performance im behavioralen Maß, ist davon auszugehen, dass Bereich X maßgeblich an den zugrundeliegenden kognitiven Vorgängen beteiligt ist.

2. Optimierung: Experiment

Für weitere Untersuchungen des auditorischen Cortex wäre experimentell außerdem interessant, neben dem Resting State eine Kontrollkondition mit akustischem Stimulus einzuführen. Dieser müsste hierbei entweder nur verschwindend geringe temporale Information enthalten, also aus statischen oder sphärischen Klängen mit der gleichen akustischen Energie bestehen. Alternativ wäre ein Vergleichsstimulus denkbar, der aus den gleichen Tönen besteht wie der hier verwendete isochrone Stimulus, diese aber irregular verteilt darbietet. Ein ähnliches Konzept wurde in Bekius et al. (2016) verwendet. Die Stärke des hier im EEG verwendeten experimentellen Designs könnte in Zukunft mit der in der vorliegenden Arbeit gezeigten Stärke des MEG als Messinstrument kombiniert werden.

3. Optimierung: Operationalisierung

Für weitere Analysen sollte aber über die Differenzbildung zwischen den Konditionen nachgedacht werden. Die ermittelten lokalen Peaks der Kondition Beat und der Kondition Resting werden hier subtrahiert. Das resultiert zum Teil in negativen Differenzen, die so nicht erwartet wurden und deren Bedeutung fraglich ist – jedenfalls verwundert die Tatsache, dass in der Kondition Resting offenbar teilweise stärkere Modulationen gemessen wurden als in der Kondition Beat. Im einfachsten Fall handelt es sich dabei um Messfehler bzw. Ausreißer, die wenig aussagekräftig ist. Denn die Daten, die hier vorliegen, wurden auf Sensorlevel gewonnen. Dabei ist nicht gesichert, dass die Anatomie der VersuchsteilnehmerInnen derart vergleichbar ist, dass bspw. der Kanal MEG1411 über dem auditorischen Cortex den auditorischen Cortex für alle Probanden gleich gut abbildet. Einerseits könnten Unterschiede in der Faltung dafür sorgen, dass das MEG nicht konsistent die neuronale Aktivität misst. Andererseits könnte Bewegung während und zwischen den Konditionen zu Unschlüssigkeiten der Daten geführt haben. Die Kopfbewegungen werden zwar mithilfe der Position der HPI-Spulen im → Preprocessing (MaxFilter, S. 22) kompensiert. Trotzdem kann eine Kopfbewegung die Ausrichtung der Quelle und dadurch das Magnetfeld derart verändern, dass eine vorher gemessene Aktivität nach der Bewegung aufgrund der winkelabhängigen Sensitivität für die MEG-Technologie nicht mehr in derselben Form auffindbar ist (siehe dazu → Magnetenzephalographie, S. 16).

Ein Ansatz, um negative Differenzwerte zu minimieren, könnte eine Gewichtung mit ihrer jeweiligen Spannweite, eine Normalisierung um den Median oder ein elaborierteres mathematisches Maß als die Differenz (bspw. ein Verhältnis oder Faktor) sein. Dabei muss bei der Weiterverarbeitung von Messwerten jeder Schritt gut durchdacht und begründet werden, um Validität und Reliabilität zu wahren.

Trotz gesunden Zweifelns ist hier festzuhalten, dass der Fall von negativen Differenzen für die Entrainment-Maße des lokalen Peaks nur in vergleichsweise wenigen Fällen auftrat. In den Scatterplots in → c. Ergebnisse (S. 40) ist ersichtlich, wie zwar die Spannweite der Daten (nach den Maxima der Datenpunkte) teilweise fast symmetrisch um x = 0 liegt, die Verteilung dabei aber größtenteils über Null ist (Anzahl der Datenpunkte) und damit sowohl arithmetisches Mittel als auch der Median der Differenzwerte klar positiv ist.

4. Weiterführende Gedanken

An die präsentierten Ergebnisse anschließend könnte untersucht werden, wie die beobachtete Modulation sich über die Zeit entwickelt. Treten Gewöhnungs- oder Lerneffekte auf, sind diese positiver oder negativer Art?

Um die Kausalität zwischen neuronalem Entrainment und Rhythmusverständnis weiter zu untersuchen, erscheint Neurostimulation (etwa TMS) besonders reizvoll (vgl. Weisz et al. 2014). Hiermit können Hirnregionen von außen in bestimmten Frequenzen aktiviert werden und Effekte auf andere Hirnareale und Frequenzbereiche sowie auf behaviorale Performance untersucht werden. Erfolgreiche Stimulation kann dabei weitreichende klinische Folgen haben – wie etwa der Zusammenhang zwischen Parkinson und Oszillationen in den Basalganglien (Gross et al. 2001) zeigt.

Wenn, wie vorab beschrieben, die Quelle des beobachteten Entrainments genauer bestimmt wurde, schließt sich die Frage an, welche Aktivität diese Quellen zeigen, wenn Musik gehört wird. Zum Auffinden von Strukturen ist naturalistische Musik als Stimulus zu komplex, weshalb simplifiziert wird (wie hier etwa reduziert auf den isochronen Beat). Wenn allerdings bekannt ist, wo und wie gesucht werden muss, ist die reale Kondition des Musikhörens näher am Leben und deshalb weitaus relevanter.

Noch ist eine mobile Anwendung nicht problemlos möglich, aber nach der Untersuchung von Musikhören im Labor wäre dann ein sehr interessanter Schritt, Versuchsteilnehmer (möglicherweise zunächst über virtuelle Realität) in einem Livekonzert-Kontext zu untersuchen. Dabei könnte auch die Synchronisierung von Hirnwellen von ZuhörerInnen und/oder MusikerInnen untersucht werden (Lindenberger et al. 2009).

7. Fazit

Zwischen neurokognitiven Vorgängen und musikalischem Verständnis liegt zunächst einmal eine große Kluft, die schwierig überwindbar erscheint. Trotzdem versuchen sich Kognitionswissenschaftler Innen und AnhängerInnen der systematischen Musikwissenschaft am interdisziplinären Spagat, da der mögliche *Outcome* durchaus reizvoll ist (Pearce und Rohrmeier 2012; Large und Kolen 1994; Large und Snyder 2009; Fitch und Rosenfeld 2007). Musik gewährt Einblicke in Bereiche der Psyche und des Gehirns, die mit anderen Methoden nur schwer oder gar nicht erreichbar sind (Peretz 2001; Dreifus 2010).

Der gestaltpsychologische Zusammenhang (Kok, Jehee, und de Lange 2012; Winkler, Denham, und Nelken 2009; Wittmann 2014) von den hier gezeigten neuronalen Oszillationen, ihrer Relation zum Musikverständnis, ihrer antizipativen Erwartungsbildung und ökonomisierten Aufmerksamkeitslenkung (Lakatos et al. 2008) ist beachtlich. Denn anhand der Maschinerie, die beim Entrainment angeregt wird und die dann unabhängig vom *Agens* fortläuft, wie Fraisse (1985) bemerkt, wird klar, wie Kognition auf Mustererkennung beruht.

Die hier gezeigte Aktivierung von motorischen Bereichen durch einen akustischen Beat zeigt zudem einen Teil davon, warum Musik uns zur Bewegung anregt. Die prädizierenden Mechanismen, die wohl vor allem in den Bereichen ablaufen, die auch Bewegung koordinieren, sind wortwörtlich naheliegend zur temporalen Wahrnehmung von Musik.

Beispielsweise lassen sich generelle temporale Vorgänge, wie hier gezeigt, durch weitestgehend musikalische Stimulation in der auditorischen Modalität induzieren und dementsprechend dokumentieren. Die Schlüsse, die man aus solchen Untersuchungen ziehen kann, überschreiten in

ihrer Relevanz das Thema Musik und auch Sprache, wenn durch Grundlagenforschung zunächst Abläufe verstanden und dann in Philosophie, Kunst oder Medizin eingesetzt werden (Schnitzler und Gross 2005; Dreifus 2010). So beeinflussen Oszillationen offenbar auch unseren Sinn für Zeit. Wittman schreibt dazu, dass die Gegenwart wohl ca. 3 Sekunden dauert: „Das momentan Erlebte hat Dauer“ (Wittmann 2014, S. 55). Daran anschließend soll hier noch einmal Michael Endes literarische Figur Momo erwähnt werden, die im Buch folgendes Rätsel zu lösen hat (Ende 1973, S. 154):

Drei Brüder wohnen in einem Haus,
die sehen wahrhaftig verschieden aus,
doch willst du sie unterscheiden,
gleicht jeder den anderen beiden.
Der erste ist *nicht* da, er kommt erst nach Haus.
Der zweite ist *nicht* da, er ging schon hinaus.
Nur der dritte ist da, der Kleinste der drei,
denn ohne ihn gäb’s nicht die anderen zwei.
Und doch gibt’s den dritten, um den es sich handelt,
nur weil sich der erst‘ in den zweiten verwandelt.
Denn willst du ihn anschaun, so siehst du nur wieder
Immer einen der anderen Brüder!
Nun sage mir: Sind die drei vielleicht einer?
Oder sind es nur zwei? Oder ist es gar – keiner?

Die drei Brüder, die gemeint sind, heißen Zukunft, Vergangenheit und Gegenwart. Wann immer man die Gegenwart zu fassen versucht, entwischt sie und wird entweder zur Vergangenheit oder Zukunft. Die Frage, ob Zeit überhaupt existiert (Stockton 2016) wird diese Arbeit nicht beantworten. Dass temporale Abläufe im Gehirn jedoch als entscheidend für die Wahrnehmung von Musik angenommen werden müssen, das konnte hier gezeigt werden.

8. Dank

Ich möchte mich bedanken bei meinen Supervisoren Prof. Dr. Stefan Weinzierl und Dr. Manon Grube: Prof. Weinzierl für das Ermöglichen der Arbeit und die Vernetzung mit Dr. Grube. Ihr möchte ich ganz herzlich danken für die Hilfe in der genaueren Ideenfindung und tatkräftige Unterstützung, Expertise sowie geduldige Erklärungen während des gesamten Projekts in Aarhus und Berlin.

Stephanie Brandl danke ich für die Bereitstellung ihrer Matlab-Skripte zur (Zeit-Frequenz-) Analyse und Unterstützung bei Verständnis und Anpassung dieser Skripte. Ebenfalls für die Unterstützung in Matlab danke ich Niels Trusbak-Haumann, der Preprocessing und erste TF-Analysen begleitet und seine Skripte zur Verfügung gestellt hat.

Ich danke Prof. Dr. Elvira Brattico, *Principal Investigator* der Studie, in deren Rahmen die vorliegenden Daten gesammelt wurden. Sie hat eine Verwendung für meine Masterarbeit ermöglicht und in der Analyse MEG-Expertise beigesteuert.

Des Weiteren danke ich Prof. Dr. Benjamin Blankertz, Leiter der *Neurotechnologie*-Gruppe für das Know-How und die Laptop-Leihgabe, Anastasiia Popova und Antonieta Martìnez-Guerrero für die Datenakquise und eine besondere Zeit und allen Freiwilligen für die Teilnahme am Experiment.

Zuletzt danke ich Sebastian Voigt-Radloff, Julia Seitz und Antonia Jordi für wertvolle Rückmeldung zu sprachlicher Korrektheit und Stil der Arbeit.

9. Quellen

Andreou, Lefkothea-Vasiliki, Makio Kashino, und Maria Chait. 2011. „The Role of Temporal Regularity in Auditory Segregation“. *Hearing Research* 280 (1–2): 228–35. https://doi.org/10.1016/j.heares.2011.06.001.

Apps, Matthew A. J., und Manos Tsakiris. 2014. „The free-energy self: A predictive coding account of self-recognition“. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, Multisensory integration, sensory substitution and visual rehabilitation, 41 (April): 85–97. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.01.029.

Arnal, Luc H. 2012. „Predicting “When” Using the Motor System’s Beta-Band Oscillations“. *Frontiers in Human Neuroscience* 6. https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00225.

Ashby, F. Gregory. 2015. „An Introduction to fMRI“. 2015. https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4939-2236-9_5.

Barlow, Horace. 2001. „The Exploitation of Regularities in the Environment by the Brain“. *Behavioral and Brain Sciences* 24 (4): 602–7. https://doi.org/10.1017/S0140525X01000024.

Bekius, Annike, Thomas E. Cope, und Manon Grube. 2016. „The Beat to Read: A Cross-Lingual Link between Rhythmic Regularity Perception and Reading Skill“. *ResearchGate* 10 (130). https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00425.

Berger, Hans. 1929. „Über das Elektrenkephalogramm des Menschen“. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten* 87 (1): 527–70. https://doi.org/10.1007/BF01797193.

Bishop, Daniel T., Michael J. Wright, und Costas I. Karageorghis. 2014. „Tempo and Intensity of Pre-Task Music Modulate Neural Activity during Reactive Task Performance“. *Psychology of Music* 42 (5): 714–27. https://doi.org/10.1177/0305735613490595.

Bispham, John. 2006. „Rhythm in Music: What Is It? Who Has It? And Why?“ *Music Perception* 24 (2): 125–34. https://doi.org/10.1525/mp.2006.24.2.125.

Blankertz, Benjamin, Laura Acqualagna, Sven Dähne, Stefan Haufe, Matthias Schultze-Kraft, Irene Sturm, Marija Ušćumlic, Markus A. Wenzel, Gabriel Curio, und Klaus-Robert Müller. 2016. „The Berlin Brain-Computer Interface: Progress Beyond Communication and Control“. *Frontiers in Neuroscience* 10 (November). https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00530.

Bohn, Karen, Johannes Knaus, Richard Wiese, und Ulrike Domahs. 2013. „The Influence of Rhythmic (Ir)Regularities on Speech Processing: Evidence from an ERP Study on German Phrases“. *Neuropsychologia* 51 (4): 760–71. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.01.006.

Boyle, Michael R., und Flavio Fröhlich. 2013. „EEG feedback-controlled transcranial alternating current stimulation“. *2013 6th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER), San Diego, CA*, 140–43. https://doi.org/10.1109/NER.2013.6695891.

Bregman, Albert S. 2001. „Auditory Scene Analysis“. In *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, herausgegeben von N. J. Smelzer und P. B. Bates, 940–42. Amsterdam: Pergamon. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B008043076700663X.

Breska, Assaf, und Leon Y. Deouell. 2017. „Neural Mechanisms of Rhythm-Based Temporal Prediction: Delta Phase-Locking Reflects Temporal Predictability but Not Rhythmic Entrainment“. Herausgegeben von David Poeppel. *PLOS Biology* 15 (2): e2001665. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2001665.

Burns, S. P., D. Xing, und R. M. Shapley. 2011. „Is Gamma-Band Activity in the Local Field Potential of V1 Cortex a ‚Clock‘ or Filtered Noise?“ *Journal of Neuroscience* 31 (26): 9658–64. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0660-11.2011.

Butler, Mark J. 2001. „Turning the Beat around: Reinterpretation, Metrical Dissonance, and Asymmetry in Electronic Dance Music“. *Music Theory Online* 7 (6).

Buzsaki, György, und Andreas Draguhn. 2004. „Neuronal Oscillations in Cortical Networks“. *Science* 304 (5679): 1926–29. https://doi.org/10.1126/science.1099745.

Calderone, Daniel J., Peter Lakatos, Pamela D. Butler, und F. Xavier Castellanos. 2014. „Entrainment of Neural Oscillations as a Modifiable Substrate of Attention“. *Trends in Cognitive Sciences* 18 (6): 300–309. https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.02.005.

Center for Music in the Brain. 2018. „Our Research: Perception“. Center for Music in the Brain. 20. September 2018. http://musicinthebrain.au.dk/our-research/perception/.

Chang, Andrew, Dan J. Bosnyak, und Laurel J. Trainor. 2016. „Unpredicted Pitch Modulates Beta Oscillatory Power during Rhythmic Entrainment to a Tone Sequence“. *Frontiers in Psychology* 7 (März). https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00327.

Chen, J. L., V. B. Penhune, und R. J. Zatorre. 2008. „Listening to Musical Rhythms Recruits Motor Regions of the Brain“. *Cerebral Cortex* 18 (12): 2844–54. https://doi.org/10.1093/cercor/bhn042.

Cirelli, Laura K., Dan Bosnyak, Fiona C. Manning, Christina Spinelli, CÃ©line Marie, Takako Fujioka, Ayda Ghahremani, und Laurel J. Trainor. 2014. „Beat-Induced Fluctuations in Auditory Cortical Beta-Band Activity: Using EEG to Measure Age-Related Changes“. *Frontiers in Psychology* 5 (Juli). https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00742.

Cohen, Mike X. 2014. *Analyzing neural time series data: theory and practice*. Issues in clinical and cognitive neuropsychology. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.

Cooper, Grosvenor W., und Leonard B. Meyer. 1960. *The Rhythmic Structure of Music*. Nachdr. Chicago: Univ. of Chicago Pr.

Dähne, Sven, Frank C. Meinecke, Stefan Haufe, Johannes Höhne, Michael Tangermann, Klaus-Robert Müller, und Vadim V. Nikulin. 2014. „SPoC: A Novel Framework for Relating the Amplitude of Neuronal Oscillations to Behaviorally Relevant Parameters“. *NeuroImage* 86 (Februar): 111–22. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.07.079.

Demos, Alexander P., Roger Chaffin, Kristen T. Begosh, Jennifer R. Daniels, und Kerry L. Marsh. 2012. „Rocking to the Beat: Effects of Music and Partner’s Movements on Spontaneous Interpersonal Coordination.“ *Journal of Experimental Psychology: General* 141 (1): 49–53. https://doi.org/10.1037/a0023843.

Donnelly, P.J., und C.J. Limb. 2009. „Music“. In *Encyclopedia of Neuroscience*, 1151–58. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-008045046-9.00269-2.

Dreifus, Claudia. 2010. „Exploring Music’s Hold on the Mind“. *The New York Times*, 31. Mai 2010, Abschn. Science. https://www.nytimes.com/2010/06/01/science/01conv.htmlbisphambis.

Eagleman, David. 2019. *The Time Bending Power of Your Brain*. Facebook Video. BBC Ideas. https://www.facebook.com/bbc/videos/1234786810027915/.

Edelman, Laura L., und Kathleen E. Harring. 2015. „Music and Social Bonding: The Role of Non-Diegetic Music and Synchrony on Perceptions of Videotaped Walkers“. *Current Psychology* 34 (4): 613–20. https://doi.org/10.1007/s12144-014-9273-y.

Ende, Michael. 1973. *Momo: oder die seltsame Geschichte von den Zeit-Dieben und von dem Kind, das den Menschen die gestohlene Zeit zurückbrachte ; ein Märchen-Roman*. 3. Aufl. Stuttgart: Thienemann.

Fernández-Sotos, Alicia, Antonio Fernández-Caballero, und José M. Latorre. 2016. „Influence of Tempo and Rhythmic Unit in Musical Emotion Regulation“. *Frontiers in Computational Neuroscience* 10 (August). https://doi.org/10.3389/fncom.2016.00080.

FieldTrip. 2019. „Use Independent Component Analysis (ICA) to Remove EOG Artifacts“. Tutorial. FieldTrip. 15. März 2019. http://www.fieldtriptoolbox.org/example/use_independent_component_analysis_ica_to_remove_eog_artifacts/.

Fitch, W. Tecumseh. 2016. „Dance, Music, Meter and Groove: A Forgotten Partnership“. *Frontiers in Human Neuroscience* 10 (März). https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00064.

Fitch, W. Tecumseh, und Andrew J. Rosenfeld. 2007. „Perception and Production of Syncopated Rhythms“. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal* 25 (1): 43–58. https://doi.org/10.1525/mp.2007.25.1.43.

Fraisse, Paul. 1985. *Psychologie der Zeit: Konditionierung, Wahrnehmung, Kontrolle, Zeitschätzung, Zeitbegriff*. München: Reinhardt.

Fujioka, T., L. J. Trainor, E. W. Large, und B. Ross. 2012. „Internalized Timing of Isochronous Sounds Is Represented in Neuromagnetic Beta Oscillations“. *Journal of Neuroscience* 32 (5): 1791–1802. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4107-11.2012.

Fujioka, Takako, Laurel J. Trainor, Edward W. Large, und Bernhard Ross. 2009. „Beta and Gamma Rhythms in Human Auditory Cortex during Musical Beat Processing“. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1169 (1): 89–92. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04779.x.

Fuster, J. M. 2009. „Prefrontal Cortex“. In *Encyclopedia of Neuroscience*, herausgegeben von Larry R. Squire, 905–8. Academic Press. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080450469011189.

Grahn, Jessica A. 2009. „The Role of the Basal Ganglia in Beat Perception: Neuroimaging and Neuropsychological Investigations“. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1169 (1): 35–45. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04553.x.

———. 2012. „Neural Mechanisms of Rhythm Perception: Current Findings and Future Perspectives“. *Topics in Cognitive Science* 4 (4): 585–606. https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2012.01213.x.

Gross, J., J. Kujala, M. Hamalainen, L. Timmermann, A. Schnitzler, und R. Salmelin. 2001. „Dynamic Imaging of Coherent Sources: Studying Neural Interactions in the Human Brain“. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98 (2): 694–99. https://doi.org/10.1073/pnas.98.2.694.

Grube, Manon, Stephanie Brandl, Pieter-Jan Kindermans, Benjamin Blankertz, Sven Dähne, und Klaus-Robert Müller. 2018. „Can we ‚find the beat‘? Searching the beta band in the human EEG as a function of acoustic rhythmic regularity and in correlation with behaviour“. In . Berlin. https://www.forskningsdatabasen.dk/en/catalog/2443004333.

Grube, Manon, Freya E. Cooper, und Timothy D. Griffiths. 2013. „Auditory Temporal-Regularity Processing Correlates with Language and Literacy Skill in Early Adulthood“. *Cognitive Neuroscience* 4 (3–4): 225–30. https://doi.org/10.1080/17588928.2013.825236.

Hauk, Olaf. 2013. „Introduction to EEG and MEG“. MRC CBU Wiki. 8. März 2013. http://imaging.mrc-cbu.cam.ac.uk/meg/IntroEEGMEG.

———. 2017. „Maxfilter“. MRC CBU Wiki. 1. März 2017. http://imaging.mrc-cbu.cam.ac.uk/meg/Maxfilter.

Heilbron, Micha, und Maria Chait. 2018. „Great Expectations: Is There Evidence for Predictive Coding in Auditory Cortex?“ *Neuroscience* 389 (Oktober): 54–73. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.07.061.

Herculano-Houzel, Suzana. 2013. *TED-Talk: What Is so Special about the Human Brain?* https://www.ted.com/talks/suzana_herculano_houzel_what_is_so_special_about_the_human_brain.

Herrmann, Björn, Molly J. Henry, Saskia Haegens, und Jonas Obleser. 2016. „Temporal Expectations and Neural Amplitude Fluctuations in Auditory Cortex Interactively Influence Perception“. *NeuroImage* 124 (Januar): 487–97. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.09.019.

Herrmann, Christoph S., Daniel Strüber, Randolph F. Helfrich, und Andreas K. Engel. 2016. „EEG Oscillations: From Correlation to Causality“. *International Journal of Psychophysiology* 103 (Mai): 12–21. https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2015.02.003.

Hickok, Gregory, Haleh Farahbod, und Kourosh Saberi. 2015. „The Rhythm of Perception: Entrainment to Acoustic Rhythms Induces Subsequent Perceptual Oscillation“. *Psychological Science* 26 (7): 1006–13. https://doi.org/10.1177/0956797615576533.

Hohwy, Jakob, Andreas Roepstorff, und Karl Friston. 2008. „Predictive coding explains binocular rivalry: An epistemological review“. *Cognition* 108 (3): 687–701. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2008.05.010.

Hove, Michael J., und Jane L. Risen. 2009. „It’s All in the Timing: Interpersonal Synchrony Increases Affiliation“. *Social Cognition* 27 (6): 949–60. https://doi.org/10.1521/soco.2009.27.6.949.

Huang, Yanping, und Rajesh P. N. Rao. 2011. „Predictive Coding“. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science* 2 (5): 580–93. https://doi.org/10.1002/wcs.142.

Huron, David Brian. 2006. *Sweet Anticipation: Music and the Psychology of Expectation*. Cambridge, Mass: MIT Press.

Iversen, John R, und Aniruddh D Patel. 2008. „The Beat Alignment Test (BAT): Surveying Beat Processing Abilities in the General Population“, 5.

Iversen, John R., Bruno H. Repp, und Aniruddh D. Patel. 2009. „Top-Down Control of Rhythm Perception Modulates Early Auditory Responses“. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1169 (1): 58–73. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04579.x.

Iyer, Vijay. 2002. „Embodied Mind, Situated Cognition, and Expressive Microtiming in African-American Music“. *Music Perception* 19 (3): 387–414. https://doi.org/10.1525/mp.2002.19.3.387.

Jackendoff, Ray, und Fred Lerdahl. 1983. *A Generative Theory of Tonal Music*. The MIT Press Series on Cognitive Theory and Mental Representation. Cambridge, Mass.: MIT Press.

Jensen, Ole, und Ali Mazaheri. 2010. „Shaping Functional Architecture by Oscillatory Alpha Activity: Gating by Inhibition“. *Frontiers in Human Neuroscience* 4. https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00186.

Judge, J. A. 2016. „Jonathan Berger and Gabe Turow (Eds.), Music, Science, and the Rhythmic Brain: Cultural and Clinical Implications: Routledge, New York/Oxford, 2011, 215pp., ISBN 978-0-415-89059-5, $150“. *Phenomenology and the Cognitive Sciences* 15 (2): 305–13. https://doi.org/10.1007/s11097-015-9424-0.

Justus, Timothy C., und Jamshed J. Bharucha. 2002. „Music Perception and Cognition“. In *Steven's Handbook of Experimental Psychology*, herausgegeben von Steven Yantis, 3. Aufl., Sensation and Perception:469–508. New York: John Wiley & Sons.

Kaiser, D., T. Stein, und M. V. Peelen. 2014. „Object Grouping Based on Real-World Regularities Facilitates Perception by Reducing Competitive Interactions in Visual Cortex“. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111 (30): 11217–22. https://doi.org/10.1073/pnas.1400559111.

Karajan, Herbert von. 1968. Ich musste vieles in mir zerstören.Der Spiegel. https://www.spiegel.de/spiegel/print/d-46050063.html.

Kilchenmann, Lorenz, und Olivier Senn. 2015. „Microtiming in Swing and Funk Affects the Body Movement Behavior of Music Expert Listeners“. *Frontiers in Psychology* 6 (August). https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01232.

Kok, Peter, Janneke F.M. Jehee, und Floris P. de Lange. 2012. „Less Is More: Expectation Sharpens Representations in the Primary Visual Cortex“. *Neuron* 75 (2): 265–70. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.04.034.

Küssner, Mats B. 2017. „Eysenck's Theory of Personality and the Role of Background Music in Cognitive Task Performance: A Mini-Review of Conflicting Findings and a New Perspective“. *Frontiers in Psychology* 8 (November). https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01991.

Küssner, Mats B., Annette M. B. de Groot, Winni F. Hofman, und Marij A. Hillen. 2016. „EEG Beta Power but Not Background Music Predicts the Recall Scores in a Foreign-Vocabulary Learning Task“. Herausgegeben von Antoni Rodriguez-Fornells. *PLOS ONE* 11 (8): e0161387. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161387.

Lakatos, P., G. Karmos, A. D. Mehta, I. Ulbert, und C. E. Schroeder. 2008. „Entrainment of Neuronal Oscillations as a Mechanism of Attentional Selection“. *Science* 320 (5872): 110–13. https://doi.org/10.1126/science.1154735.

Large, Edward W., und John F. Kolen. 1994. „Resonance and the Perception of Musical Meter“. *Connection Science* 6 (2–3): 177–208. https://doi.org/10.1080/09540099408915723.

Large, Edward W., und Joel S. Snyder. 2009. „Pulse and Meter as Neural Resonance“. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1169 (1): 46–57. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04550.x.

Levitin, Daniel J. 2008. *This Is Your Brain on Music: Understanding a Human Obsession*. London: Atlantic.

Lewis, Ashley G., und Marcel Bastiaansen. 2015. „A Predictive Coding Framework for Rapid Neural Dynamics during Sentence-Level Language Comprehension“. *Cortex* 68 (Juli): 155–68. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.02.014.

Li, Qiang, Guangyuan Liu, Dongtao Wei, Ying Liu, Guangjie Yuan, und Gaoyuan Wang. 2019. „Distinct Neuronal Entrainment to Beat and Meter: Revealed by Simultaneous EEG-FMRI“. *NeuroImage* 194 (Juli): 128–35. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.03.039.

Lidov, David. 2005. „Repairing Errors in the Musical Theory of Meter“. In *Aus dem Takt. Rhythmus in Kunst, Kultur und Natur*, herausgegeben von Christa Brüstle, Clemens Risi, und Sabine Schouten, 161–73. Bielefeld: transcript Verlag.

Lindenberger, Ulman, Shu-Chen Li, Walter Gruber, und Viktor Müller. 2009. „Brains Swinging in Concert: Cortical Phase Synchronization While Playing Guitar“. *BMC Neuroscience* 10 (1). https://doi.org/10.1186/1471-2202-10-22.

Loersch, Chris, und Nathan L. Arbuckle. 2013. „Unraveling the Mystery of Music: Music as an Evolved Group Process.“ *Journal of Personality and Social Psychology* 105 (5): 777–98. https://doi.org/10.1037/a0033691.

London, Justin. 2012. *Hearing in time: psychological aspects of musical meter*. 2nd ed. New York: Oxford University Press.

Lopes da Silva, Fernando H. 2010. „Electrophysiological Basis of MEG Signals“. In *MEG - An introduction to methods*, 1–23. New York: Oxford University Press.

Macar, Françoise, Jennifer Coull, und Franck Vidal. 2006. „The Supplementary Motor Area in Motor and Perceptual Time Processing: FMRI Studies“. *Cognitive Processing* 7 (2): 89–94. https://doi.org/10.1007/s10339-005-0025-7.

Mallinder, Stephen. 2011. „Movement - Journey of the Beat“. PhD Dissertation, Perth, Western Australia: Murdoch University. https://researchrepository.murdoch.edu.au/id/eprint/4866/2/02Whole.pdf.

Mandau, Markus. 2002. „Know-How: So funktioniert MPEG“. Chip. 3. August 2002. https://www.chip.de/artikel/Know-How-So-funktioniert-MPEG_140099325.html.

Mather, Mara, John T. Cacioppo, und Nancy Kanwisher. 2013. „Introduction to the Special Section: 20 Years of FMRI—What Has It Done for Understanding Cognition?“ *Perspectives on Psychological Science* 8 (1): 41–43. https://doi.org/10.1177/1745691612469036.

MathWorks, MAtlab. 2013. *adtest*. https://se.mathworks.com/help/stats/adtest.html.

Merchant, H., J. Grahn, L. Trainor, M. Rohrmeier, und W. T. Fitch. 2015. „Finding the Beat: A Neural Perspective across Humans and Non-Human Primates“. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 370 (1664): 20140093–20140093. https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0093.

Neuling, T., S. Rach, S. Wagner, C. H. Wolters, und C. S. Herrmann. 2012. „Good vibrations: Oscillatory phase shapes perception“. *NeuroImage* 63 (2): 771–78. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.07.024.

Ng, B. S. W., T. Schroeder, und C. Kayser. 2012. „A Precluding But Not Ensuring Role of Entrained Low-Frequency Oscillations for Auditory Perception“. *Journal of Neuroscience* 32 (35): 12268–76. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1877-12.2012.

Oostenfeld, Robert, und Jan-Mathijs Schoffelen. 2019. „About the FieldTrip project“. About. FieldTrip. 27. März 2019. http://www.fieldtriptoolbox.org/contact/.

Oppenheim, Alan V., Ronald W. Schafer, und John R. Buck. 2004. „Die Abtastung zeitkontinuierlicher Signale“. In *Zeitdiskrete Signalverarbeitung*, 2., überarb. Aufl. [Neuübers.], 195–309. et - Elektrotechnik Signalverarbeitung. München: Pearson Studium.

Parkkonen, Lauri. 2010. „Instrumentation and Data Preprocessing“. In *MEG: An Introduction to Methods*, herausgegeben von Peter C. Hansen, Morten L. Kringelbach, und Riitta Salmelin, 24–64. New York: Oxford University Press.

Patel, Aniruddh D. 2006. „Musical Rhythm, Linguistic Rhythm, and Human Evolution“. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal* 24 (1): 99–104. https://doi.org/10.1525/mp.2006.24.1.99.

Pearce, Marcus, und Martin Rohrmeier. 2012. „Music Cognition and the Cognitive Sciences“. *Topics in Cognitive Science* 4 (4): 468–84. https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2012.01226.x.

Pelt, Stan van, Lieke Heil, Johan Kwisthout, Sasha Ondobaka, Iris van Rooij, und Harold Bekkering. 2016. „Beta- and Gamma-Band Activity Reflect Predictive Coding in the Processing of Causal Events“. *Social Cognitive and Affective Neuroscience* 11 (6): 973–80. https://doi.org/10.1093/scan/nsw017.

Peretz, Isabelle. 2001. „The Biological Foundations of Music“. In *Language, Brain, and Cognitive Development*, herausgegeben von Emmanuel Dupoux, 435–45. The MIT Press.

Pöppel, Ernst. 1970. „Excitability Cycles in Central Intermittency“. *Psychologische Forschung* 34 (1): 1–9. https://doi.org/10.1007/BF00422860.

Quené, Hugo, und Robert F. Port. 2005. „Effects of Timing Regularity and Metrical Expectancy on Spoken-Word Perception“. *Phonetica* 62 (1): 1–13. https://doi.org/10.1159/000087222.

Ravignani, Andrea, Bill Thompson, Massimo Lumaca, und Manon Grube. 2018. „Why Do Durations in Musical Rhythms Conform to Small Integer Ratios?“ *Frontiers in Computational Neuroscience* 12 (November). https://doi.org/10.3389/fncom.2018.00086.

Repp, Bruno H. 2002. „The Embodiment of Musical Structure: Effects of Musical Context on Sensorimotor Synchronisation to Complex Timing Patterns“. In *Common Mechanisms in Perception and Action*, herausgegeben von W. Prinz und B. Hommel, 245–65. Attention and Performance, XIX. Oxford: Oxford University Press. http://www.haskins.yale.edu/Reprints/HL1244.pdf.

———. 2005. „Sensorimotor Synchronization: A Review of the Tapping Literature“. *Psychonomic Bulletin & Review* 12 (6): 969–92. https://doi.org/10.3758/BF03206433.

Roeder, John. 1998. „Review of Christopher F. Hasty, Meter as Rhythm“. *Music Theory Online* 4 (4). http://www.mtosmt.org/issues/mto.98.4.4/mto.98.4.4.roeder.html.

Sacks, Oliver W. 2011. *Musicophilia: Tales of Music and the Brain*. London: Picador.

Schäfer, Thomas, Peter Sedlmeier, Christine Städtler, und David Huron. 2013. „The psychological functions of music listening“. *Frontiers in Psychology* 4. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00511.

Schnitzler, Alfons, und Joachim Gross. 2005. „Normal and pathological oscillatory communication in the brain“. *Nature Reviews Neuroscience* 6 (4): 285–96. https://doi.org/10.1038/nrn1650.

Schröder, Friederice, und Manfred Thüring. 2019. „Skript: Kognitionspschologie. Vorlesung 1, Grundkonzepte und historsiche Entwicklung“.

Slater, Jessica, Nina Kraus, Kali Woodruff Carr, Adam Tierney, Andrea Azem, und Richard Ashley. 2018. „Speech-in-Noise Perception Is Linked to Rhythm Production Skills in Adult Percussionists and Non-Musicians“. *Language, Cognition and Neuroscience* 33 (6): 710–17. https://doi.org/10.1080/23273798.2017.1411960.

Stockton, Nick. 2016. „Time Might Only Exist In Your Head. And Everyone Elses.“ *Wired*, Science, , September. https://www.wired.com/2016/09/arrow-of-time/.

Szegedi, Márton. 2012. „Die Rolle des Timings am Beispiel zeitgenössischer Jazzgitarristen“. In *Black Box Pop*, herausgegeben von Dietrich Helms und Thomas Phleps. Bielefeld: transcript Verlag. https://doi.org/10.14361/transcript.9783839418789.201.

Tallon-Baudry, Catherine, und Olivier Bertrand. 1999. „Oscillatory Gamma Activity in Humans and Its Role in Object Representation“. *Trends in Cognitive Sciences* 3 (4): 12.

Tillmann, Barbara. 2012. „Music and Language Perception: Expectations, Structural Integration, and Cognitive Sequencing“. *Topics in Cognitive Science* 4 (4): 568–84. https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2012.01209.x.

Trusbak-Hauman, Niels. 2017. „Getting started with MEG-EEG analysis.pdf“.

Vuust, Peter, Leif Ostergaard, Karen Johanne Pallesen, Christopher Bailey, und Andreas Roepstorff. 2009. „Predictive coding of music – Brain responses to rhythmic incongruity“. *Cortex*, Special Issue on „The Rhythmic Brain“, 45 (1): 80–92. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2008.05.014.

Wallentin, Mikkel, Andreas Højlund Nielsen, Morten Friis-Olivarius, Christian Vuust, und Peter Vuust. 2010. „The Musical Ear Test, a New Reliable Test for Measuring Musical Competence“.

Learning and Individual Differences 20 (3): 188–96. https://doi.org/10.1016/j.lindif.2010.02.004.
Weinzierl, Stefan, Hrsg. 2008. *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin Heidelberg: Springer.
———. 2009. „Skript Audiotechnik Labor: Hörversuche. WS 16/17“. Fachgebiet Audiokommunikation, Technische Universität Berlin.
Weisz, Nathan, Claudia Lüchinger, Gregor Thut, und Nadia Müller. 2014. „Effects of Individual Alpha RTMS Applied to the Auditory Cortex and Its Implications for the Treatment of Chronic Tinnitus: Effects of Individual Alpha RTMS“. *Human Brain Mapping* 35 (1): 14–29. https://doi.org/10.1002/hbm.22152.
Will, Udo, und Eric Berg. 2007. „Brain Wave Synchronization and Entrainment to Periodic Acoustic Stimuli“. *Neuroscience Letters* 424 (1): 55–60. https://doi.org/10.1016/j.neulet.2007.07.036.
Wiltermuth, Scott S., und Chip Heath. 2009. „Synchrony and Cooperation“. *Psychological Science* 20 (1): 1–5. https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2008.02253.x.
Wing, A., und R.M. Bracewell. 2009. „Motor Timing“. In *Encyclopedia of Neuroscience*, 1067–75. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-008045046-9.01327-9.
Winkler, István, Susan L. Denham, und Israel Nelken. 2009. „Modeling the Auditory Scene: Predictive Regularity Representations and Perceptual Objects“. *Trends in Cognitive Sciences* 13 (12): 532–40. https://doi.org/10.1016/j.tics.2009.09.003.
Witek, Maria A. G., Eric F. Clarke, Mikkel Wallentin, Morten L. Kringelbach, und Peter Vuust. 2014. „Syncopation, Body-Movement and Pleasure in Groove Music“. Herausgegeben von Rouwen Canal-Bruland. *PLoS ONE* 9 (4): e94446. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094446.
Wittmann, Marc. 2014. *Gefühlte Zeit: kleine Psychologie des Zeitempfindens*. Originalausgabe, 3. Auflage. C.H. Beck Paperback 6070. München: Verlag C.H. Beck.
Zatorre, R. J., und Pascal Belin. 2001. „Spectral and Temporal Processing in Human Auditory Cortex“. *Cerebral Cortex* 11 (10): 946–53. https://doi.org/10.1093/cercor/11.10.946.
Zentner, M., und T. Eerola. 2010. „Rhythmic Engagement with Music in Infancy“. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107 (13): 5768–73. https://doi.org/10.1073/pnas.1000121107.

10. Verzeichnisse

a. Tabellen

Tabelle 1: Untersuchte Frequenzbänder der neuronalen Oszillation 28
Tabelle 2: Lineplots für zwei Beat-Perioden..... 35
Tabelle 3: Deskriptive Statistik der localpeak-Variablen. 37
Tabelle 4: Zusammenhang zwischen MET und localpeak-Daten 39

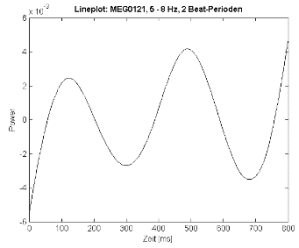
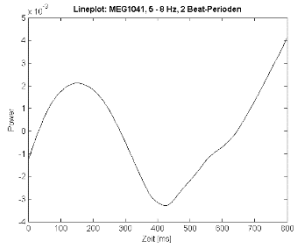
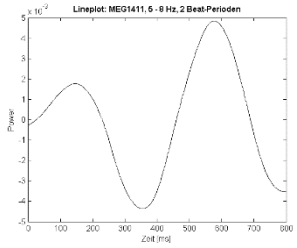
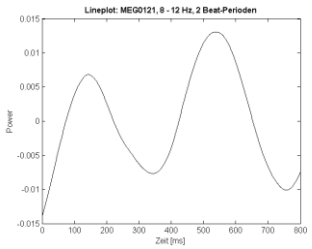
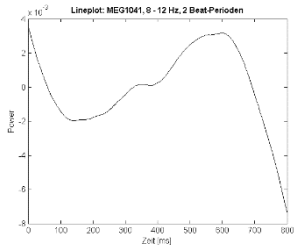
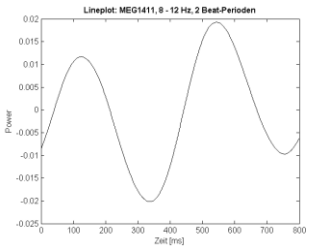
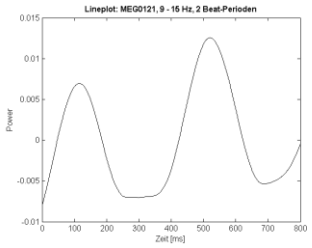
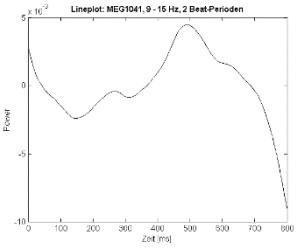
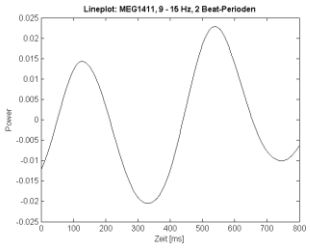
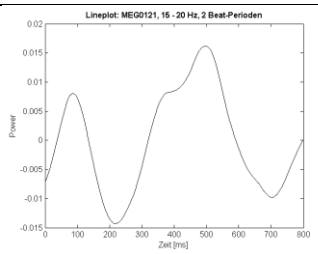
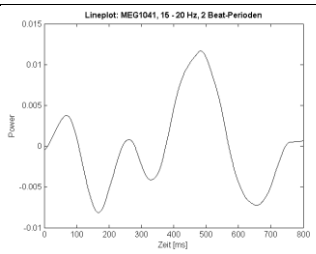
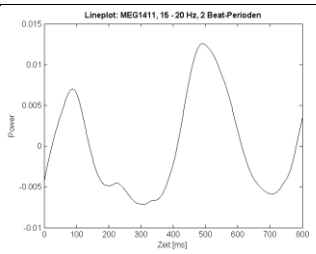
b. Abbildungen

Abbildung 1: Vergleich von evozierter und induzierter Aktivität..... 12
Abbildung 2: Versuchsteilnehmer im MEG-Scanner 20
Abbildung 3: Schema des präsentierten Stimulus 22
Abbildung 4: Schematischer Ablauf des Preprocessings..... 22
Abbildung 5: Exemplarische Illustration der ersten 10 ICA-Komponenten 24
Abbildung 6: Schematischer Ablauf der Analyse..... 25
Abbildung 7: Channel-Layout des verwendeten Elekta Neuromag Triux MEG Scanners 27
Abbildung 8: MEG-Layout mit farblicher Markierung der explorierten Kanäle 29
Abbildung 9: Spektrogramme aus den Daten von links-temporalen Kanälen 31
Abbildung 10: Spektrogramme aus den Daten von rechts-temporalen Kanälen 31

Abbildung 11: Spektrogramme aus den Daten von frontalen Kanälen 32
Abbildung 12: Spektrogramme von zwei Beat-Perioden der Kanäle MEG1041 (frontal) und MEG1441 (rechts-temporal) 33
Abbildung 13: Spektrogramme der ausgewählten MEG-Kanäle für die Kondition Beat 34
Abbildung 14: Spektrogramme der ausgewählten MEG-Kanäle für die Kondition Resting State 34
Abbildung 15: Darstellung der Ergebnisse aus der FFTofTF 36
Abbildung 16: Lineplots der Ergebnisse aus der FFTofTF 37
Abbildung 17: Histogramm der MET-Ergebnisse 38
Abbildung 18: Scatterplots der Daten mit Korrelationskoeffizienten von |r| > 0,3 40

11. Anhänge

***Tabelle 5: Lineplots aller Frequenzbänder für zwei Beat-Perioden**. Unterschieden wird hier nach den drei ausgesuchten Kanälen MEG0121 (links-temporal), MEG1041 (frontal) und MEG1411 (rechts-temporal) sowie nach acht Frequenzbändern. Aufgetragen ist die Änderung der Power (y-Achse) im jeweiligen Frequenzband über die Zeit (x-Achse: in ms).*

Kanal / Freq.-Band	MEG0121 (l. aud)	MEG1041 (front.)	MEG1411 (r. aud.)
5 – 8 Hz			
8 – 12 Hz			
9 – 15 Hz			
15 – 20 Hz			

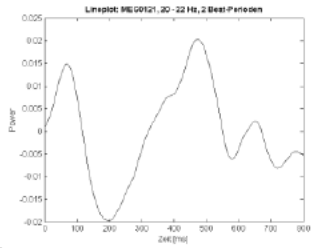
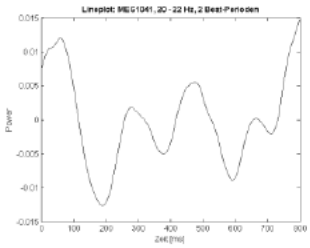
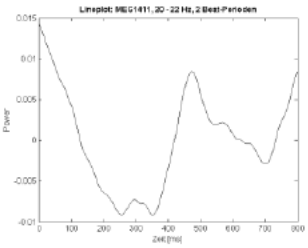
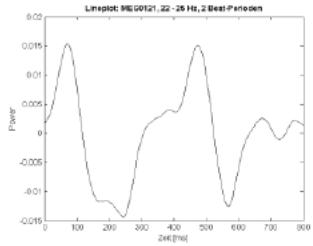
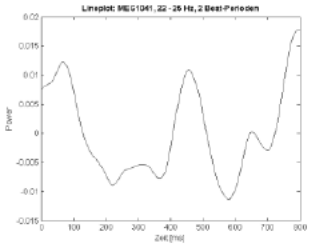
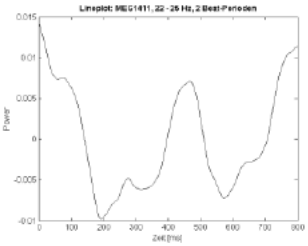
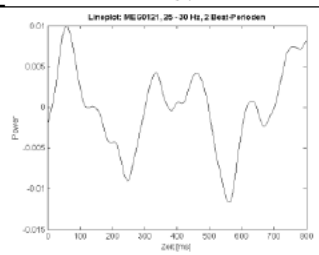
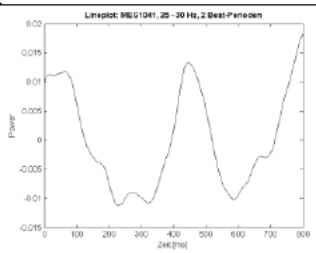
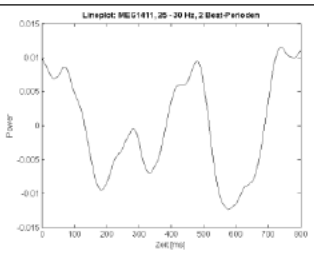
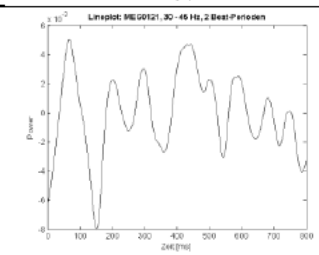
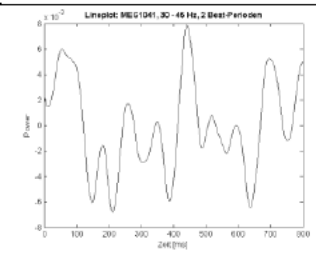
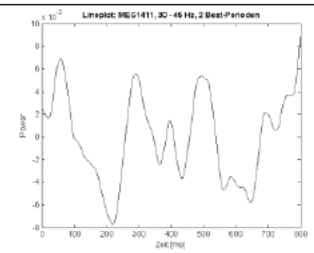
20 – 22 Hz			
22 – 25 Hz			
25 – 30 Hz			
30 – 45 Hz			

Tabelle 6: Übersicht über die p-Werte aus dem Anderson-Darling-Test auf Normalverteilung*: diff(localpeak). Die Ergebnisse sind sortiert nach den drei betrachteten Sensoren und acht Frequenzbändern.*

Kanal / Freq.-Band	MEG0121 (l. aud).	MEG1041 (front.)	MEG1411 (r. aud.)
5 – 8 Hz	0,5168	0,1995	0,9084
8 – 12 Hz	0,5859	0,1853	0,1731
9 – 15 Hz	0,0998	0,2073	0,0753
15 – 20 Hz	0,3373	0,5772	0,7811
20 – 22 Hz	0,1398	0,8006	0,9696
22 – 25 Hz	0,9681	0,4162	0,8352
25 – 30 Hz	0,7518	0,2164	0,1954
30 – 45 Hz	0,4769	0,3019	0,2818

12. Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und eigenhändig sowie ohne unerlaubte fremde Hilfe und ausschließlich unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Berlin, _____ Unterschrift Simjon Radloff _____