

**Auditive Zeitwahrnehmung:
Untersuchungen zum musikalischen und motorischen Tempo**

Dissertation
zur Erlangung des Grades
des Doktors der Philosophie (Dr. phil.)
an der Fakultät für Geisteswissenschaften
der Universität Hamburg
im Promotionsfach
Systematische Musikwissenschaft

vorgelegt von
David Indra Hammerschmidt

Hamburg, 2022

Erstgutachter: Prof. Dr. Clemens Wöllner
Zweitgutachter: Prof. Dr. Reinhard Kopiez
Drittgutachter: Prof. Dr. Holger Schramm

Tag der Disputation: 06. Juli 2022

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Beteiligten bedanken, die mich auf dem Weg der Promotion unterstützt haben, mit Rat und Tat zur Seite standen und immer ein offenes Ohr für mich hatten.

Mein großer Dank gilt Prof. Dr. Clemens Wöllner, der mich bereits im Master-Studium begleitet hat, mir die Mitarbeit im Forschungsprojekt „Slow Motion: Transformations of musical time in perception and performance“ ermöglichte und mir so die Gelegenheit gab, dieses Dissertationsprojekt unter seiner Aufsicht durchzuführen. Auch danke ich Prof. Dr. Reinhard Kopiez für seine Bereitschaft, das Zweitgutachten dieser Doktorarbeit zu verfassen. Auch bedanke ich mich bei Prof. Dr. Justin London, Dr. Birgitta Burger und Dr. Klaus Frieler für die Zusammenarbeit.

Großen Dank gilt meinen Kolleginnen Dr. Birgitta Burger, Emma Allingham, Xinyue Wang und Frithjof Faarsch für die zahlreichen Diskussionen, Denkanreize, sowie die praktische als auch mentale Unterstützung.

Nicht zuletzt möchte ich meinen Eltern und langjährigen Freund:innen meine tiefe Dankbarkeit aussprechen, da sie mich stets unterstützen und Rückhalt geben. Ich danke ganz besonders meiner Verlobten Kim, die mir die Gewissheit und Kraft gab, die Herausforderungen, die ein solchen Vorhaben mit sich bringen, zu meistern.

Euch und Ihnen allen ein recht herzliches Dankeschön.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	7
2	Auditive Zeitwahrnehmung	9
2.1	Retrospektive und prospektive Dauernbeurteilung.....	10
2.2	Messmethoden der prospektiven Dauernbeurteilung	11
2.3	Zeitdauern	13
2.4	Aufmerksamkeit.....	15
2.5	Emotion.....	16
2.6	Theorie der inneren Uhr.....	17
2.6.1	Dauer-basierte Modelle.....	18
2.6.2	Beat-basierte Modelle	20
3	Spontanes motorisches Tempo	22
3.1	Definition und generelle Aspekte	22
3.2	Spontanes motorisches Tempo als Indikator der inneren Uhr	23
3.3	Einflussfaktoren auf das spontane motorische Tempo	25
4	Zeit- und Tempowahrnehmung beim Musikhören	27
4.1	Dauernbeurteilungen beim Musikhören	27
4.2	Wahrnehmung musikalischer Tempi	29
4.2.1	Musikalische Faktoren	30
4.2.2	Personenbezogene Faktoren	31
5	Einordnung und Zusammenfassung der durchgeführten Studien.....	33
5.1	Studie 1 (Hammerschmidt & Wöllner, 2020).....	34
5.2	Studie 2 (Hammerschmidt, Wöllner, London & Burger, 2021)	36
5.3	Studie 3 (Hammerschmidt, Frieler & Wöllner, 2021)	38
5.4	Studie 4 (Hammerschmidt & Wöllner, 2022).....	40
6	Diskussion und Implikationen	42
6.1	Zusammenfassung des Forschungsvorhabens	42

6.2	Grundtempo und Zeitdauern.....	44
6.3	Metrische Ebenen und das (wahrgenommene) Tempo.....	46
6.4	Intra-und interindividuelle Unterschiede der inneren Uhr.....	48
6.5	Zeitwahrnehmung und musikalische Erfahrung.....	51
6.6	Implikationen für Wissenschaft und Praxis.....	53
7	Literaturverzeichnis.....	55
8	Anlagen.....	73
8.1	Referenzliste der Studien dieses Dissertationsprojektes.....	73
8.2	Studie 1.....	74
8.3	Studie 2.....	90
8.4	Studie 3.....	102
8.5	Studie 4.....	114
Anhang	.....	127
Abbildung I	.....	127
Kurzfassung der Ergebnisse (deutsch)	.....	128
Kurzfassung der Ergebnisse (englisch)	.....	131
Erklärungen zum Eigenanteil an den Studien	.....	134
Eidesstattliche Erklärung	.....	138

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Das <i>Attentional-Gate Model</i>	20
Abbildung 2. Schematische Darstellung einer dynamischen Kopplung.....	21
Abbildung I. Grafische Benutzeroberfläche der Webapplikation.....	127

1 Einleitung

Die Wahrnehmung von Zeit spielt eine fundamentale Rolle im menschlichen Erleben und ist essenziell für das Bewusstsein. Zeit wird oft als Fluss beschrieben, der permanent fortschreitet. Aus physikalischer Sicht betrachtet besitzt dieser Zeitfluss eine objektiv messbare Geschwindigkeit, die in Sekunden, Minuten oder Stunden gemessen werden kann. Das menschliche Zeiterleben – also die Wahrnehmung der Geschwindigkeit dieses Zeitflusses – ist im Gegensatz zu der physikalischen Messbarkeit nicht fest, sondern unterliegt Schwankungen; der Zeitfluss kann sich also subjektiv verlangsamen und beschleunigen. So können einer Person fünf Minuten sehr lange vorkommen, wenn sie auf einen Bus wartet. Umgekehrt scheint die Zeit sehr schnell zu vergehen, wenn einer sehr angenehmen oder spaßigen Aktivität nachgegangen wird, die Zeit scheint zu fliegen.

Musik als temporale Kunst, die sich über die Zeit entfaltet und eine gemeinsame Verarbeitung vergangener und gegenwärtiger auditiver Reize voraussetzt, erlaubt es zukünftig eintretende Ereignisse zu antizipieren. Diese Antizipation formt Erwartungsschemata, was als wesentlicher Mechanismus für das emotionale Erleben von Musik gilt (Meyer, 1956). Musik strukturiert also die Zeit in einer äußerst präzisen Art und Weise und erlaubt es so, das menschliche Zeiterleben zu steuern. Somit eignet sie sich sehr gut für die wissenschaftliche Untersuchung der Zeitwahrnehmung. Die im Rahmen dieses Dissertationsprojektes durchgeführten Studien hatten zum Ziel, die wahrgenommenen Zeitdauern von Musikausschnitten zu untersuchen, wobei sich vor allem auf grundlegende temporale Eigenschaften von Musik, wie die metrische Struktur und das Grundtempo fokussiert wurde. Der zweite Schwerpunkt dieses Dissertationsprojektes lag wiederum bei intra- und interindividuellen Unterschieden in der *inneren Uhr*, einem theoretischen Modell, welches Veränderungen und Unterschiede in der Beurteilung von Zeitdauern erklären kann.

Die Wahrnehmung von Zeit wird also aus zwei verschiedenen Blickwinkeln betrachtet: Der erste Blickwinkel betrachtete den Einfluss spezifischer Parameter externer auditiver Reize (d. h. der Musik) auf die *innere Uhr* und inwieweit diese Parameter mit Wahrnehmungs- und Verhaltensprozessen interagieren. Der zweite Blickwinkel betrachtet die *innere Uhr* isoliert, also ohne potenzielle Einflüsse externer auditiver Reize und hatte zum Ziel, personenbezogene Veränderungen und Unterschiede in der Ursprungsrate dieses intrinsischen Zeitgebers (d. h. das Tempo der *inneren Uhr*) zu bestimmen. Diese

potenziellen Unterschiede ermöglichen es wiederum, Rückschlüsse darüber zu gewinnen, warum Individuen die Zeitdauern unterschiedlich wahrnehmen können und warum sich zudem das Zeiterleben beim Musikhören von Person zu Person unterscheiden kann.

Der Aufbau dieser Arbeit gestaltet sich folgendermaßen: In Kapitel 2 wird in die wichtigsten Aspekte der auditiven Zeitwahrnehmung eingeführt. Hierbei wird vor allem auf die wesentlichen Mechanismen eingegangen, die für das Verstehen des Zeiterlebens von Musik entscheidend sind, jedoch darüber hinaus auch in andere Situationen gelten. Das Kapitel geht hierbei auf grundlegende Unterscheidungen in der Betrachtung des Zeiterlebens ein und stellt die wichtigsten Messmethoden der Forschung sowie fundamentale kognitive und physiologische Prozesse, die dem Erleben zugrunde liegen, vor. Abschließend werden zwei Arten von theoretischen Modellen erläutert, die der Klasse der *inneren Uhr* zugeordnet werden und die Beurteilung von unterschiedlichen Zeitdauern erklären.

Kapitel 3 bespricht das spontane motorische Tempo (SMT), welches auch internes oder präferiertes Tempo genannt wird (Boltz, 1994) und als Indikator der Ursprungsrate der *inneren Uhr* gelten kann, ein Ansatz der auf den Psychologen William Stern und dem „psychischen Tempo“ zurückgeht (Stern, 1900, S. 115). Das SMT beschreibt das Tempo, welches sich am angenehmsten und natürlichsten anfühlt, ohne durch externe Ereignisse oder Reize beeinflusst zu sein. Das Kapitel erläutert hierbei neben Messmethoden des SMT weitere allgemeine Aspekte wie den konkreten Zusammenhang mit der *inneren Uhr*, das Verhältnis zu (Wahrnehmungs-)Präferenzen in der Musik und welche Faktoren das SMT beeinflussen.

Kapitel 4 stellt den aktuellen Stand der Forschung im Bereich der Zeit- und Tempowahrnehmung von Musik vor. Hierbei werden die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Konzepte auf das Erleben von Musik angewandt und die wichtigsten Ergebnisse empirischer Forschung in diesem Bereich vorgestellt. Dabei werden musikalische und personenbezogene Faktoren besprochen, welche die Beurteilung von Zeitdauern beeinflussen. Es wird sich zeigen, dass sowohl wesentliche Eigenschaften der Musik aber auch personenbezogene Faktoren in vorangegangenen Studien nicht oder nur bedingt Berücksichtigung fanden.

Kapitel 5 stellt die im Rahmen dieses Dissertationsprojektes durchgeführten Studien vor. Diese hatten zum Ziel die in Kapitel 3 und 4 herausgearbeiteten Forschungslücken zu adressieren und einige grundlegende Fragen der musikalischen und generellen

Zeitwahrnehmung zu beantworten. So untersuchte Studie 1, welchen Einfluss die sensorische Synchronisation zu unterschiedlichen metrischen Ebenen in derselben musikalischen Struktur auf die Einschätzung von Zeitdauern hat. Studie 2 untersuchte den Zeitverzerrungseffekt des musikalischen Tempos. Studie 3 widmete sich interindividuellen Unterschieden im SMT unter Verwendung einer eigens entwickelten Webapplikation. Studie 4 verwendete eine angepasste Version dieser Webapplikation mit dem Hauptaugenmerk auf intraindividuellen Unterschieden im SMT. In allen vier Studien wurde zudem die musikalische Erfahrung der Versuchspersonen erhoben. Die kombinierten Ergebnisse der Studien erlauben es so, ein genaueres Bild über den Einfluss der musikalischen Erfahrung auf die Wahrnehmung von Zeitdauern zu erlangen.

Kapitel 6 diskutiert die Ergebnisse der Studien unter Berücksichtigung vorangegangener Forschung. Die Diskussion ist hierbei nicht nach den einzelnen Studien unterteilt, sondern diskutiert die Ergebnisse nach thematischen Schwerpunkten wie musikalisches Tempo, Unterschiede im SMT oder musikalische Erfahrung. Hierbei werden auch die sich aus den Ergebnissen der Studien ergebenden offenen Forschungsfragen benannt. Abschließend werden aus den gewonnenen Erkenntnissen dieses Dissertationsprojektes mögliche Implikationen für die Wissenschaft und Praxis besprochen.

2 Auditive Zeitwahrnehmung

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Mechanismen der auditiven Zeitwahrnehmung besprochen. Ziel ist es einen Überblick über die wichtigsten Messmethoden, Zeitverzerrungseffekte, kognitiven Prozesse und theoretischen Grundlagen zu geben. Auch generelle Unterscheidungen wie *retro-* und *prospektive Dauernbeurteilungen* sowie der Einfluss unterschiedlicher Zeitdauern werden vorgestellt. Viele der in diesem Kapitel besprochenen Aspekte beziehen sich dabei nicht ausschließlich auf die auditive Modalität, sondern gelten zum Teil auch für die visuelle Modalität. Allgemein ist eine Unterscheidung zwischen der auditiven und visuellen Modalität jedoch wichtig, da bei der Verarbeitung temporaler Informationen das Hörvermögen dominiert, was sich vor allem in einer höheren zeitlichen Auflösung und temporalen Unterscheidungsfähigkeit im Vergleich zum Sehvermögen widerspiegelt (Guttman et al., 2005; Large, 2008; Phillips & Hall, 2002; Wang & Wöllner, 2020). Das Kapitel soll ein Verständnis für die allgemeine Zeitwahrnehmung in Bezug auf auditive Ereignisse geben und aufzeigen, wel-

che Faktoren diese beeinflussen. Hierbei werden Themen wie Aufmerksamkeit und Emotion nicht in ihrer Gänze besprochen, sondern exemplarisch die wesentlichen Aspekte für die Wahrnehmung und Verarbeitung von Zeit vorgestellt, sodass die im Rahmen dieses Dissertationsprojektes durchgeführten Studien in einen größeren Kontext einordbar sind.

2.1 Retrospektive und prospektive Dauernbeurteilung

Für die Erforschung der Wahrnehmung von Zeit und temporaler Informationen wird zwischen zwei grundlegenden Paradigmen differenziert, da die Beurteilung von Zeitdauern erheblich davon abhängt, ob der Zeitverlauf eines Ereignisses oder einer Situation von einer Person bewusst oder unbewusst beurteilt werden soll. In der psychologischen Zeitforschung wird daher zwischen *retrospektiven* und *prospektiven Dauernbeurteilungen* unterschieden (Hicks et al., 1976). Im Alltag werden *prospektive Dauernbeurteilungen* relevant und wichtig, wenn eine zeitlich genaue abgestimmte Handlung erforderlich ist, wie zum Beispiel beim Überqueren einer befahrenen Straße. *Retrospektive Dauernbeurteilungen* werden in Situationen angewandt, in denen es beispielsweise um Erinnerungen oder Zeugenaussagen geht. Wie aus dieser kurzen Beschreibung bereits hervorgeht, sind unterschiedliche kognitive Prozesse bei *retrospektiven* und *prospektiven Dauernbeurteilungen* involviert, beziehungsweise sind dieselben Prozesse unterschiedlich stark beteiligt.

Bei *prospektiven Dauernbeurteilungen* – also der während des Erlebens einer Situation bewusst wahrgenommene Zeitverlauf – spielt die Aufmerksamkeit eine entscheidende Rolle, da das Maß an Aufmerksamkeit, die der Wahrnehmung und Verarbeitung von Zeit bereitgestellt wird, die spätere Dauernbeurteilung beeinflusst (siehe Kapitel 2.4 und 2.6.1). Damit einhergehend beeinflusst die kognitive Belastung während einer Situation die Dauernbeurteilung: Zum Beispiel werden Zeitdauern als kürzer wahrgenommen, wenn neben der Dauernbeurteilung eine zweite Aufgabe, wie die Reaktion auf einen bestimmten Reiz während derselben Situation, gelöst werden soll. Im Vergleich dazu wird dieselbe Situation ohne Sekundäraufgabe, in der alle kognitiven Ressourcen für den Verlauf der Zeit bereitstehen, als länger wahrgenommen (Block et al., 2010; Block & Zakay, 1997). Auch die Komplexität der zu verarbeitenden Informationen beeinflusst die Zeitwahrnehmung, da auch hier die kognitive Belastung höher ist und weniger Ressourcen für den Zeitverlauf zu Verfügung stehen, was in kürzer wahrgenommenen Zeitdauern resultiert (Block et al., 2010).

Die *retrospektive Dauernbeurteilung* wird nicht in dem Maß von der Aufmerksamkeit, die auf den Zeitverlauf gelenkt ist, beeinflusst, da es einer Person während des Erlebens einer Situation meistens nicht bewusst ist, dass die Zeitdauer im Nachhinein relevant sein wird (Block et al., 2010; Block & Zakay, 1997). Dementsprechend basieren die *retrospektiven Dauernbeurteilungen* mehr auf Gedächtnisprozessen, wobei die Zeitdauer einer Situation oder eines Ereignisses nachträglich mit dem Referenzgedächtnis für Zeitdauern und vergleichbaren Situationen abgeglichen wird. Die Dauernbeurteilung wird dann basierend auf diesen Vergleichen vorgenommen. Wie bei der *prospektiven Dauernbeurteilung* beeinflusst die kognitive Belastung auch die *retrospektive Dauernbeurteilung*, jedoch ist der Effekt hier umgekehrt, denn je höher die kognitive Belastung ist, umso länger wird die Dauer eines Ereignisses (Block et al., 2010). Eine Erklärung für diesen Effekt liefern die *Contextual-Change Models*, welche besagen, dass insbesondere durch ein hohes Maß an unterschiedlichen Verarbeitungsprozessen der Ereignisse die Zeitdauern als länger erinnert werden (Block, 2003; Poynter, 1989; Zakay et al., 1994).

Die Studienlage in Bezug auf diese beiden Paradigmen kann als unausgewogen bezeichnet werden, da der größte Teil an empirischer Forschung auf *prospektiven Dauernbeurteilungen* beruht (Block et al., 2018). Dies ist einem praktischen Problem der Experimentalforschung geschuldet: *Retrospektive Dauernbeurteilungen* erlauben per Definition lediglich eine einzelne Durchführung pro Experiment, da nach der ersten Beurteilung automatisch von einem Wechsel zu *prospektiven Dauernbeurteilungen* auszugehen ist. Ab dem Moment der ersten Dauernbeurteilung einer Versuchsperson ist dieser nämlich bewusst, dass der Zeitverlauf von Relevanz ist. Im weiteren Verlauf eines Experimentes würden deshalb Aufmerksamkeitsressourcen für den Zeitverlauf bereitgestellt werden.¹ Die im Folgenden besprochenen Messmethoden, Forschungsergebnisse, theoretischen Modelle und im Rahmen dieses Dissertationsprojektes durchgeführten Studien beziehen sich deshalb auf *prospektive Dauernbeurteilungen*.

2.2 Messmethoden der prospektiven Dauernbeurteilung

Für die quantifizierbare Messung der Zeitwahrnehmung existieren viele unterschiedliche Messmethoden (Grondin, 2008, 2010). In diesem Kapitel werden die am häufigsten verwendeten Messmethoden der *prospektiven Dauernbeurteilungen* beschrieben,

¹ Für eine Methode der mehrfachen *retrospektiven Dauernbeurteilung* siehe Boltz (1995).

welche die *Dauernproduktion*, die *verbale Dauerneinschätzung* und die *Dauernreproduktion* sind (Mioni, 2018). Besonderes Augenmerk wird auf die Unterschiede der *verbalen Dauerneinschätzung* und *Dauernreproduktion* gelegt, da diese beiden Messmethoden in den Studien 1 und 2 dieses Dissertationsprojektes verwendet worden sind.

Die *Dauernproduktion* und *verbale Dauerneinschätzung* gleichen sich in vielerlei Hinsicht, wobei diese Messmethoden in einem inversen Verhältnis zueinanderstehen. Bei der *Dauernproduktion* müssen Versuchspersonen die Dauer eines vorgegebenen Zeitintervalls produzieren. Eine typische Aufgabenstellung der *Dauernproduktion* könnte zum Beispiel heißen: „Bitte produzieren Sie fünf Sekunden.“ Hierfür drücken Versuchspersonen dann auf einem Eingabegerät (z. B. einer Computertastatur) zu Beginn und zum Ende der *Dauernproduktion* eine Taste. Bei der *verbalen Dauerneinschätzung* liegt die Aufgabe darin, die Zeitdauer eines zuvor präsentierten zeitlichen Intervalls einzuschätzen. Versuchspersonen wird also ein Zeitintervall mit der Dauer von beispielsweise fünf Sekunden präsentiert, dessen Zeitdauer es im Anschluss zu schätzen gilt. Die *verbale Dauerneinschätzung* wird hierbei in numerischen Zeiteinheiten ausgedrückt, beispielweise durch die Eingabe der geschätzten Dauer in Millisekunden oder Sekunden. Diese Übersetzung der erlebten Zeitdauer in eine numerische Zeiteinheit involviert einen Vergleich mit dem Referenzgedächtnis für internalisierte Zeiteinheiten, was eine gewisse Variabilität und Ungenauigkeit im Antwortverhalten mit sich bringt (Mioni, 2018). Darüber hinaus neigen Versuchspersonen dazu, ganzzahlige Antworten zu geben, was ebenfalls zu Ungenauigkeiten führen kann.

Bei der *Dauernreproduktion* besteht die Aufgabe darin, die Dauer eines zuvor präsentierten zeitlichen Intervalls zu reproduzieren. Hierbei wird ein Zeitintervall, dessen Anfang und Ende jeweils durch einen kurzen Ton oder Klick angegeben wird, wie bei der *Dauernproduktion* ebenfalls durch das Drücken einer Taste zu Beginn und Ende der wahrgenommenen Zeitdauer reproduziert. Diese Aufgabe besteht also aus dem direkten Vergleich zweier Zeitdauererfahrungen (d. h. Kodierungsphase und Reproduktionsphase) und involviert hauptsächlich das Arbeitsgedächtnis (Baudouin et al., 2006; Mioni, 2018). Im Vergleich zu der *verbalen Dauerneinschätzung* ist keine Übersetzung in numerische Zeiteinheiten nötig und dementsprechend produziert diese Messmethode genauere und weniger variable Messergebnisse (Mioni, 2018; Zakay, 1990). Ebenfalls wichtig ist die Eingabemethode der Reproduktion, da diese die Messergebnisse beeinflussen kann, denn das Drücken einer Taste am Anfang und Ende einer *Dauernreproduktion* liefert genauere

Ergebnisse als ein einzelner Tastendruck am Ende oder das kontinuierliche Drücken über die gesamte zu reproduzierende Zeitdauer (Mioni et al., 2014).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die *verbale Dauerneinschätzung* und die *Dauernreproduktion* sich hinsichtlich der involvierten kognitiven Prozesse unterscheiden, wobei neben dem bei beiden Messmethoden involvierten Arbeitsgedächtnis bei der *verbalen Dauerneinschätzung* auch das Referenzgedächtnis für Zeitdauern und numerische Zeiteinheiten eine Rolle spielt. Aus diesem Grund sollte die Wahl einer Messmethode von der Forschungsfrage abhängig gemacht werden. Aber auch die praktische Umsetzung eines Experimentes sollte bei der Wahl einer Messmethode berücksichtigt werden, da zum Beispiel eine *Dauernreproduktion* länger dauert als die *Dauernproduktion* und *verbale Dauerneinschätzung*.

2.3 Zeitdauern

Bei der Erforschung der Zeitwahrnehmung ist es ebenfalls von entscheidender Bedeutung, welche Zeitdauern betrachtet und untersucht werden. In der Forschung variieren diese Zeitdauern oder Intervalle erheblich und reichen an dem einen Ende des Spektrums von dem zirkadianen Rhythmus (d. h. 24-Stunden-Zyklus) bis hin zu Monaten und Jahren.² Am anderen Ende dieses Spektrums stehen Zeitdauern im Sekunden- und Millisekundenbereich (Buonomano, 2007). Dieses Dissertationsprojekt untersuchte die Zeitwahrnehmung beim Musikhören und das spontane motorische Tempo und damit Bereiche für die vor allem Zeitdauern im Millisekunden- und Sekundenbereich relevant sind. Aus diesem Grund werden im Folgenden hauptsächlich zeitliche Phänomene für diese Zeitdauern besprochen.

In der experimentellen Psychologie sind besonders Zeitdauern unter einer Sekunde untersucht worden, da diese Dauern entscheidend für adaptives Verhalten sind, wie zum Beispiel der Silbenrhythmus in der Sprache, der *Beat* und das Metrum bei Musik sowie der motorischen Koordination (Ding et al., 2017; Grondin, 2010). Im Bereich 0,1–1 Sekunde finden sich einige wesentliche Eigenschaften der menschlichen Zeitwahrnehmung, denn hier befindet sich das *Indifferenzintervall*, welches bei ungefähr 700 Millisekunden liegt und dadurch charakterisiert ist, dass es bei der Dauernbeurteilung dieses Zeitintervalls keine Tendenz zur Über- oder Unterschätzung gibt (Eisler et al., 2008). Die

² Bei Zeitdauern von Stunden, Tagen und Monaten wird häufig die *retrospektive Dauernbeurteilung* verwendet.

höchste Temposensibilität, das heißt, die Fähigkeit Abweichungen bei sequenziell präsentierten kurzen und (quasi)-isochronen Zeitintervallen auditiver Reize zu erkennen, liegt im Bereich von 300–800 Millisekunden (Drake & Botte, 1993). Ebenfalls in diesem Bereich liegt das präferierte Tempo für spontanes rhythmisch-motorisches Verhalten (z. B. Klatschen oder Gehen), für spontane musikalische Produktion (z. B. das Spielen einer Melodie) und die Wahrnehmung musikalischer Tempi, die sich um 500–650 Millisekunden gruppieren (Collyer et al., 1994; Fraisse, 1957; Friberg & Sundberg, 1995; Moelants, 2002; Zamm et al., 2018; siehe Kapitel 3).

Die Unterscheidung zwischen Zeitdauern unter und über einer Sekunde ist zum einen durch pharmakologische Effekte begründet (Rammsayer, 2008), aber vor allem dadurch, dass Zeitdauern unter einer Sekunde von der direkten Sinneserfahrung profitieren, also von einer automatischen und unbewussten Verarbeitung. Die Verarbeitung von Zeitdauern über einer Sekunde benötigt hingegen weitere kognitive Ressourcen wie das Arbeits- und Referenzgedächtnis (Hellström & Rammsayer, 2004). Paul Fraisse sprach dementsprechend bei Zeitdauern unter einer Sekunde auch von Zeitwahrnehmung und bei Zeitdauern über einer Sekunde von Zeiteinschätzung (Fraisse, 1984). Aufgrund der genannten höheren Sensibilität und Präferenz für bestimmte Zeitdauern und der erleichterten Verarbeitung ist eine Strategie für eine verbesserte Beurteilung von längeren Zeitdauern die temporale Segmentierung. Hierbei werden Zeitdauern von über einer Sekunde oft automatisch in kleinere Zeiteinheiten unterteilt, was zum Beispiel durch Zählen der Sekunden geschieht. Durch die Segmentierung wird eine weitere Referenz für die Dauernbeurteilung bereitgestellt, was zu genaueren Dauernbeurteilungen führen kann (Grondin et al., 1999; Grondin & Killeen, 2009).

Ein weiteres wichtiges Konzept für die Zeitwahrnehmung ist das *psychologische Jetzt* oder *Specious Present* (James, 1890). Dieses Konzept beschreibt das temporale Integrationsfenster, in dem das Gehirn fähig ist, aufeinanderfolgende Ereignisse zueinander in Beziehung zu setzen, ohne dass zusätzliche Gedächtnisprozesse involviert sind. Diese psychologische Gegenwart, also die Zeit in der sensorische Informationen und gleichzeitiges Verhalten in dieselbe Aufmerksamkeitsspanne integriert werden können, liegt bei 2–5 Sekunden (Fraisse, 1978; Pöppel, 1997; Wittmann & Pöppel, 1999). Diese Aufmerksamkeitsspanne gilt auch als das temporale Integrationsfenster für das Arbeitsgedächtnis, welches es ermöglicht gespeicherte Informationen zu manipulieren. Ein Beispiel für die

zeitliche Limitierung dieses temporalen Integrationsfensters ist das Erkennen musikalischer Melodien. Bekannte Melodien können nicht mehr richtig erkannt werden, wenn die *Inter-Onset Intervalle*, also die zeitliche Abstände der einzelnen Töne oder Harmonien, länger als zwei Sekunden sind (Warren et al., 1991). Die auditiven Reize (Töne) können also nicht zueinander in Bezug gesetzt und deshalb als zusammengehörige Ereignisse wahrgenommen werden.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt der Zeitwahrnehmung ist, dass die Variabilität und Genauigkeit von Dauernbeurteilungen von der Zeitdauer abhängen. Generell gilt: Je länger ein Zeitintervall ist, desto mehr wird dessen Zeitdauer im Vergleich zu der Tatsächlichen unterschätzt. Während Zeitdauern bis drei Sekunden noch relativ genau beurteilt werden können, nimmt das Maß an Unterschätzung mit längeren Zeitdauern zu (Eisler & Eisler, 1992). Ebenfalls nimmt die Variabilität (d. h. Streuung) der Dauernbeurteilungen mit der Länge von Zeitdauer linear zu (Lewis & Miall, 2009). Das bedeutet, dass das Verhältnis zwischen der Variabilität und dem Mittelwert von mehreren Dauernbeurteilungen konstant ist, was als skalare Eigenschaft beschrieben wird und eine Form des *Weber-Fechnerschen Gesetzes* darstellt (Church, 2003; Killeen & Weiss, 1987).

2.4 Aufmerksamkeit

Wie bereits in dem Kapitel 2.1 erwähnt, kann die kognitive Belastung die Zeitwahrnehmung beeinflussen und bei einer geringeren Belastung zu kürzeren Dauernbeurteilungen führen (Block et al., 2010). Hierbei spielt die Aufmerksamkeit eine entscheidende Rolle und gilt als Ursache dieses Zeitverzerrungseffektes. Die zugrundeliegende Idee ist, dass Aufmerksamkeit dahingehend begrenzt ist, dass ihr eine endliche Menge an kognitiven Ressourcen zur Verfügung steht, also in einer Situation mit vielen simultan stattfindenden Ereignissen diesen nicht gleichviel Wahrnehmungs- oder Konzentrationsressourcen bereitgestellt werden kann (Brown & Boltz, 2002; Buhusi & Meck, 2009). Dementsprechend findet eine Gewichtung oder Priorisierung dieser Ereignisse statt, wobei wichtigen oder prägnanten Ereignissen mehr Aufmerksamkeit zu Teil wird. Gilt es eine *prospektive Dauernbeurteilung* vorzunehmen und gleichzeitig eine weitere Aufgabe zu bearbeiten, wie zum Beispiel das Lösen einer mathematischen Gleichung, stehen weniger Aufmerksamkeitsressourcen für den Zeitverlauf zur Verfügung. Dies führt zu einer kürzeren Dauernbeurteilung im Vergleich zu einer Dauernbeurteilung ohne simultaner Sekundäraufgabe und zu einer größeren Abweichung von der tatsächlichen Zeitdauer

(Grondin & Macar, 1992; Macar et al., 1994). Ein weiterer Aspekt hierbei ist, dass die Schwierigkeit der Sekundäraufgabe ebenfalls Einfluss auf die Dauernbeurteilung nimmt. Eine Studie konnte zeigen, dass neben der Aufmerksamkeit sich die Belastung des Arbeitsgedächtnis proportional zu der Unterschätzung von Dauern verhält (Polti et al., 2018), was die wichtige Rolle der Einteilung der endlichen Menge an kognitiven Ressourcen unterstreicht und zeigt, dass die Aufmerksamkeit und das Arbeitsgedächtnis für die Wahrnehmung von Zeit eng zusammenhängen.

Aufmerksamkeit ist wie in diesem Beispiel beschrieben jedoch kein reiner *Top-Down Prozess*, also ausschließlich durch Intention kontrollierbar, sondern ebenfalls ein *Bottom-Up Prozess*. Prägnante Ereignisse können automatisch und unbewusst Aufmerksamkeit auf sich ziehen und deren Verarbeitung so kognitive Ressourcen beanspruchen, auch wenn dies nicht intendiert war. Die Aufmerksamkeit kann zwischen diesen beiden Prozessen hin und her springen und je häufiger der Aufmerksamkeitsfokus nicht auf dem Zeitverlauf liegt, umso kürzer wird die Zeitdauer anschließend beurteilt (Burle & Casini, 2001). Dieser Effekt konnte anhand vieler verschiedener temporaler und nicht-temporaler Sekundäraufgaben nachgewiesen werden: So unterschätzten Versuchspersonen die Zeitdauern deutlich mehr, wenn sie aufgefordert wurden bestimmte Ereignisse in musikalischen Melodien zu erkennen (im Vergleich zum reinen Hören; Brown & Boltz, 2002) oder wenn sie bestimmte Buchstaben oder Wortteile erkennen sollten (Polti et al., 2018). Weitere Aufgabentypen anhand derer dieser Effekt nachgewiesen werden konnte sind motorische und verbale Aufgaben sowie Diskriminierungsaufgaben (Brown, 1997).

2.5 Emotion

Der Frage nachgehend welche Faktoren die Zeitwahrnehmung beeinflussen, konnte bereits im frühen 20. Jahrhundert gezeigt werden, dass die Beurteilung von Zeitdauern von dem individuellen Erregungszustand abhängt, wobei mehr Erregung – zum Beispiel ausgedrückt durch eine erhöhte Herzrate und Hautleitfähigkeit – zu länger wahrgenommenen Zeitdauern führt (François, 1927; Hoagland, 1933).

Eine wichtige Unterscheidung bei der Untersuchung des Erregungszustandes ist jedoch, ob es sich hierbei um die subjektiv gefühlte oder um eine physiologische Erregung handelt. So zeigte sich, dass ein subjektiv gefühlter Erregungszustand zu längeren Dauernbeurteilungen führen kann, dies aber nicht notwendigerweise mit dem physiologischen Erregungszustand korreliert (Schwarz et al., 2013). Die Studie von Schwarz und

Kolleg:innen ergab, dass eine erhöhte Herzrate nicht zu längeren *verbalen Dauerneinschätzungen* und *Dauernproduktionen* führte, was dafür spricht, dass die Herzrate unter gewissen Umständen keinen Einfluss auf Dauernbeurteilungen hat beziehungsweise die Herzrate kein zuverlässiger Indikator für den emotionalen Erregungszustand ist (Mütze et al., 2020; Thayer, 1970). Von daher können personenbezogene Faktoren (gefühlte oder physiologische Erregung) zu anderen Ergebnissen führen, als die Analyse von Stimuli, denen unterschiedlich stark erregende Eigenschaften zugeschrieben werden, wie zum Beispiel unterschiedlich stark erregender Musik.

Der durch physiologische Aktivierung verursachte Zeitverzerrungseffekt konnte jedoch in verschiedenen Kontexten nachgewiesen werden, wie zum Beispiel bei emotionalen Klängen im Vergleich zu neutralen (Droit-Volet, Mermillod et al., 2010; Mella et al., 2011; Noulhiane et al., 2007), bei unterschiedlich stark erregender Musik (Droit-Volet et al., 2013; Droit-Volet, Bigand et al., 2010) und bei emotionalen Bildern sowie Videos (Angrilli et al., 1997; Gil & Droit-Volet, 2012; Grommet et al., 2011; Wöllner et al., 2018).

Darüber hinaus scheint auch die emotionale Valenz, also ob ein Ereignis als positiv oder negativ wahrgenommen wird, die Zeitwahrnehmung beeinflussen zu können. Negative Valenz führt zu längeren Dauernbeurteilungen bei einem hohen Erregungszustand als positive Valenz und der gegenteilige Effekt tritt bei einem niedrigen Erregungszustand ein (Angrilli et al., 1997; Droit-Volet & Gil, 2009).

Das Tempo, die Dichte und die Intensität von auditiven Reizen sind ebenfalls eng mit dem Erregungszustand verbunden, wobei schnellere Tempi sowie eine höhere Ereignisdichte und Intensität zu einem höheren Erregungszustand führen können (Droit-Volet et al., 2013). Dementsprechend konnte gezeigt werden, dass schnellere Tempi und höhere Intensitäten (d. h. Lautstärke) bei isochronen auditiven Klicks, Musik sowie visuellem Flackern zu länger wahrgenommen Zeitdauern führen (Droit-Volet et al., 2013; Droit-Volet & Wearden, 2001; Matthews et al., 2011; Ortega & López, 2008; Treisman et al., 1990; Wearden et al., 1999; Zakay et al., 1983; siehe Kapitel 4).

2.6 Theorie der inneren Uhr

Grundsätzlich wird bei der menschlichen Zeitwahrnehmung zwischen zwei theoretischen Ansätzen unterschieden. Modelle der *inneren Uhr* gehen von einem intrinsischen Zeitgeber aus, also einem zentralen und nur der Zeitwahrnehmung gewidmeten

Uhr-gleichen Mechanismus (Allman et al., 2014). Die andere theoretische Perspektive geht von keinem solchen zentralen Zeitgeber aus, sondern beschreibt temporale Wahrnehmungsprozesse anhand kognitiver Mechanismen (Block & Zakay, 2008) oder zeitabhängigen Zustandsänderungen neuronaler Netzwerke, wobei Zeitdauern als räumliche Aktivierungsmuster dargestellt werden und Dauernbeurteilungen auf dem Erkennen dieser Muster beruhen (Buonomano, 2007; Karmarkar & Buonomano, 2007). Die im Rahmen dieses Dissertationsprojektes aufgestellten Hypothesen basieren auf den Mechanismen der *inneren Uhr*, welche als simplifizierte Form neuronal-oszillatorischer Prozesse verstanden werden sollte, da es diesen Modellen zum Teil an neurophysiologischer Plausibilität mangelt, sie jedoch eine hohe Vorhersagegenauigkeit für *prospektiven Dauernbeurteilungen* aufweisen (Allman & Meck, 2012; Merchant et al., 2013; Schwartz & Kotz, 2015). Aus diesem Grund wird in den folgenden Unterkapiteln Zeitwahrnehmung aus der theoretischen Perspektive eines intrinsischen Zeitgebers beschrieben.

2.6.1 Dauer-basierte Modelle

Das klassische Dauer- oder Intervall-basierte Modell der *inneren Uhr*, *Pacemaker-Accumulator Model* genannt, beschreibt diese als Zeitgeber oder Schrittmacher, welcher konstant Impulse aussendet (Creelman, 1962; Treisman, 1963). Soll eine Dauernbeurteilung vorgenommen werden, öffnet sich ein Schalter und die Impulse gelangen in einen Akkumulator, einer Art kognitiven Speicher (d. h. Arbeitsgedächtnis), in dem die Impulse für die zu beurteilende Zeitdauer gesammelt werden. Am Ende schließt sich der Schalter und je mehr Impulse akkumuliert worden sind, desto länger wird eine Zeitdauer wahrgenommen. Verzerrungen oder Fehler bei der Beurteilung von Zeitdauern werden durch die Impulsrate des Zeitgebers verursacht: Eine höhere Impulsrate führt zu einer höheren Anzahl akkumulierter Impulse in derselben Zeitdauer, dementsprechend wird diese Zeitdauer länger wahrgenommen im Vergleich zu einer niedrigeren Impulsrate (Grondin, 2001). Wie im Kapitel 2.5 beschrieben führt ein erhöhter Erregungszustand zu länger wahrgenommenen Zeitdauern, der Erregungszustand beeinflusst also direkt die Impulsrate des Zeitgebers. Aber auch kognitive Belastung beeinflusst die Zeitwahrnehmung und je nach Sekundäraufgabe oder Komplexität der temporalen Information können auch Gedächtnis- und Entscheidungsprozesse zu Verzerrungseffekten führen (Polti et al., 2018). Aus diesem Grund sind dem klassischen *Pacemaker-Accumulator Model* zwei weitere Prozesse für die *prospektive Dauernbeurteilung* hinzugefügt worden. Bei

der *Scalar Expectancy Theory* wird die Information der gesammelten Impulse an das Referenzgedächtnis für Zeitdauern weitergegeben und basierend auf diesem Vergleich die Entscheidung für eine bestimmte Beurteilung vorgenommen (Gibbon, 1977; Gibbon et al., 1984). Dieses Modell berücksichtigt die skalare Eigenschaft von Dauernbeurteilungen und kann die Verzerrungen der wahrgenommenen Zeit nicht nur über die Impulsrate des Zeitgebers erklären, sondern auch über fehlerhafte Gedächtnisprozesse und Beurteilungsentscheidungen.

In einem weiteren Entwicklungsschritt des *Pacemaker-Accumulator Model* ist zwischen dem Zeitgeber, dem Schalter und dem Impulsspeicher eine Art „Tor“ hinzugefügt worden, welches durch die Aufmerksamkeit reguliert wird. Anders als der Schalter, der die Impulse des Zeitgebers in den Akkumulator durchlässt oder blockiert, also lediglich über zwei Zustände verfügt, ist das Aufmerksamkeitstor dynamisch, kann sich also unterschiedlich weit öffnen oder schließen. Das *Attentional-Gate Model* erklärt so den Zeitverzerrungseffekt der Aufmerksamkeit (Block & Zakay, 1996; Zakay & Block, 1998): Je mehr Aufmerksamkeit auf den Zeitverlauf gelegt wird, desto länger wird die Dauer von Ereignissen und Situationen wahrgenommen. In dem Modell öffnet sich das Tor in Abhängigkeit von der Aufmerksamkeit auf den Zeitverlauf; sind alle Aufmerksamkeitsressourcen dem Zeitverlauf zur Verfügung gestellt, steht das Tor offen und alle Impulse des Zeitgebers gelangen in den Akkumulator. Je weniger Aufmerksamkeit auf dem Zeitverlauf liegt, desto mehr schließt sich auch das Tor und desto weniger Impulse gelangen bis zum kognitiven Speicher. Dadurch wird die Dauernbeurteilung auf Basis weniger gespeicherter Impulse vorgenommen und die Zeitdauer als kürzer beurteilt (siehe Abbildung 1). Die von diesen Dauer-basierten Modellen prognostizierten Dauernbeurteilungen haben sich vor allem bei längeren Zeitdauern im Sekunden- und Minutenbereich als äußerst präzise erwiesen, während bei Zeitdauern unter einer Sekunde eine andere Art von Modell bessere Ergebnisse liefert (McAuley & Jones, 2003).

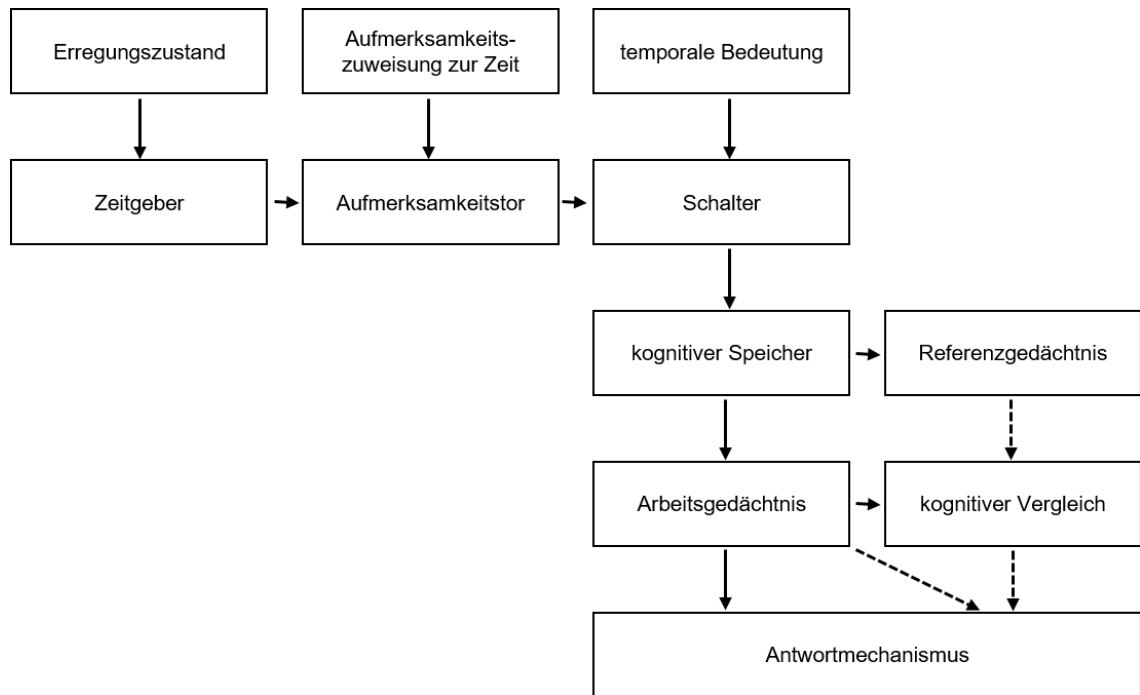


Abbildung 1. Das *Attentional-Gate Model* nach Zakay und Block (1998).

2.6.2 Beat-basierte Modelle

Diese andere Art der *inneren Uhr* Modelle geht nicht von einem linearen Zeitgeber als Grundlage der Zeitwahrnehmung aus, sondern beschreibt diese in Form eines dynamisch-oszillatorischen Prozesses. Diese Beat-basierten Modelle sind besonders akkurat bei quasi-regelmäßigen und sequenziellen zeitlichen Intervallen. Beispiele für regelmäßige und sich wiederholende zeitliche Intervalle finden sich vor allem beim wahrgenommenen musikalischen Puls und in der Sprache. Das wahrscheinlich am weitesten verbreitete Modell der Beat-basierten Zeitwahrnehmung ist die *Dynamic Attending Theory* (Jones, 1976, 2004; Jones & Boltz, 1989; Large & Jones, 1999). In diesem Modell sendet eine sich selbsterhaltende Oszillation permanent Impulse mit einer bestimmten Periode aus, auch *Referent Period* genannt. Die Periode dieser Oszillation koppelt sich bei extern wahrgenommenen temporalen Regelmäßigkeiten mit der Periode der externen Ereignisse (*Referent Level*) und strebt Phasensynchronität an (siehe Abbildung 2). Die temporal regelmäßig wiederkehrenden Ereignisse erlauben es so die Aufmerksamkeitsenergie auf ein relativ enges oder konzentriertes Zeitfenster zu legen und so genaue Vorhersagen über den Zeitpunkt des nächsten Ereignisses zu treffen, wie zum Beispiel der nächste Puls-

schlag in einem Musikstück (*Future-Oriented Attending*). Es wird also eine stabile zeitliche Beziehung zu externen periodischen Ereignissen aufgebaut und diese antizipiert, was auch *Entrainment* genannt wird. Dieser Prozess ist jedoch nicht auf einen einzelnen Oszillator und damit nur auf eine einzelne zeitliche Regelmäßigkeit begrenzt, sondern mehrere Oszillatoren können gleichzeitig unterschiedliche Perioden aufweisen und so ein Erwartungsschema konstruieren (Drake, Jones & Baruch, 2000). Zum Beispiel besteht Musik oftmals aus mehreren hierarchisch organisierten metrischen Ebenen, die jeweils ein anderes Tempo und damit Periode aufweisen (siehe Kapitel 4.2). Nach dem erfolgreichen *Entrainment*, also dem *Future-Oriented Attending*, können sich mehrere Oszillatoren mit den verschiedenen metrischen Ebenen koppeln, und die Aufmerksamkeit kann anschließend zwischen diesen Ebenen hin und her wechseln (*Analytic Attending*).

Dauer-basierte Modelle und Beat-basierte Modelle unterscheiden sich also dahingehend, ob ein Ereignis oder eine Situation eine reguläre Ereignisstruktur aufweist. Auch die Zeitdauern sind hierbei entscheidend, denn ist der zeitliche Abstand zwischen den regelmäßigen Ereignissen zu groß, können diese nicht mehr in Beziehung zueinander gesetzt werden (siehe Kapitel 2.3). Diese Unterscheidung zeigt sich auch in distinkten neuronalen Substraten, denn bei Ereignissen mit regulärer und regelmäßiger Struktur ist das *striato-thalamo-kortikale* Netzwerk aktiv, während beim längeren und einzelnen oder unregelmäßigen Ereignissen die *Nucleus Olivaris* und das Kleinhirn stärker aktiv sind (Teki et al., 2011; Teki et al., 2012; van Wassenhove, 2016). Trotz der unterschiedlichen Mechanismen der Dauer- und Beat-basierten Modelle, gehen beide von einem intrinsischen Zeitgeber aus, der jeweils eine periodische Referenz oder Impulsrate aufweist. Wie eingangs dieses Kapitels bereits erwähnt, sollte dieser intrinsische Zeitgeber (d. h. die *innere Uhr*) als psychologische Beschreibung des zugrundeliegenden neuronalen *Entrainments* der bei der Zeitwahrnehmung involvierten Gehirnareale verstanden werden.

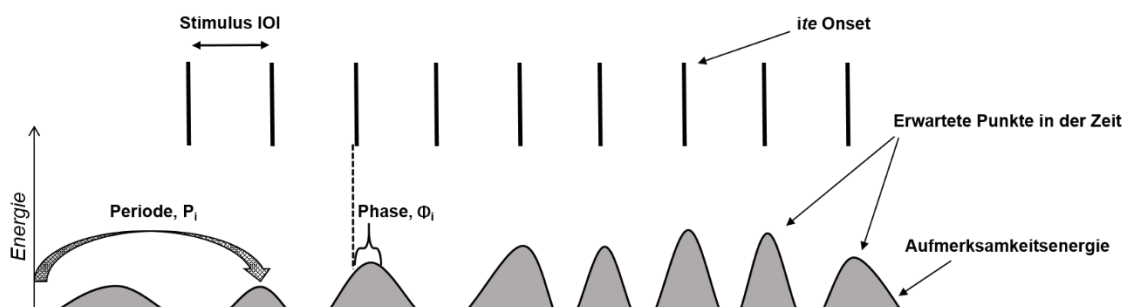


Abbildung 2. Schematische Darstellung zeitgesteuerter Impulse eines einzelnen Oszillators gekoppelt in Echtzeit zu einem isochronen Rhythmus (schwarze Linien). Die Periode P und die relative Phase Φ verändern sich über die Zeit, um die Gipfel (*Peaks*) der Aufmerksamkeitsenergie an den Stimulus IOIs (Inter-Onset Intervalle) anzupassen. Abbildung nach Jones (2004).

3 Spontanes motorisches Tempo

Ein weiteres zentrales Element dieses Dissertationsprojekts ist das spontane motorische Tempo (SMT), welches das natürliche Tempo bei periodisch-motorischer Aktivität beschreibt. Basierend auf den Theorien der *inneren Uhr* nimmt dieser motorische Akt eine zentrale Rolle bei der Zeitwahrnehmung ein, da es als Indikator des intrinsischen Zeitgebers gelten kann. Diese Annahme wird bereits bei William Stern diskutiert, der in dem Kapitel „Das psychische Tempo“ schreibt:

„Für jeden in der Zeit abrollenden seelischen Vorgang giebt es eine bestimmte Geschwindigkeit des Verlaufs, die das Subjekt einerseits gegenüber allen anderen Geschwindigkeiten als adäquat, natürlich, sympathisch empfindet, andererseits, falls es nach eigenem Ermessen den psychischen Prozess vollziehen kann, ganz von selbst, gleichsam instinktiv, zur Anwendung bringt. Bei Wahrnehmung (Anhören einer Melodie oder Rede) vermag jeder Hörer sofort zu beurteilen, ob ihm das Tempo des Gehöreindrucks zusagt; bei Willensakten, die sich motorisch äussern, wie: Sprechen, Gehen, Spielen eines Musikstückes u. s. w., wählen wir aus eigenem Antrieb eine uns natürliche Geschwindigkeit; und auch das Denken hat sein Tempo.“ (Stern, 1900, S. 115)

Das Kapitel beschreibt zunächst allgemeine Aspekte wie Definition und Messmethoden. Neben diesen liegt der Fokus auf konkreten Studienergebnissen, die aufzeigen, wie und in welcher Form das SMT mit der Beurteilung von Zeitdauern zusammenhängen. Darüber hinaus werden Faktoren vorgestellt, die das SMT beeinflussen und damit auf eine Veränderung der Ursprungsrate des intrinsischen Zeitgebers hindeuten.

3.1 Definition und generelle Aspekte

Das spontane motorische Tempo (SMT) beschreibt das selbstbestimmte und oft unbewusst gewählte Tempo von regelmäßigen und wiederholten Bewegungen wie Gehen, Händeklatschen oder Schwimmen. Es kann bei der Ausführung dieser und anderer periodisch-motorischer Aktivitäten beobachtet werden und wird daher auch als internes Tempo bezeichnet (Boltz, 1994). In wissenschaftlichen Experimenten wird das SMT meistens mit einem Fingerklopf-Paradigma (*Finger-Tapping*) gemessen, bei dem Menschen mit dem Zeigefinger ihrer bevorzugten Hand in einem Tempo klopfen, das sich in dem Moment am natürlichsten und angenehmsten anfühlt (Denner et al., 1963; Drake, Jones & Baruch, 2000). Andere Messmethoden des SMT sind die Schrittgeschwindigkeit

beim Gehen (MacDougall & Moore, 2005; Styns et al., 2007), das auf der Stelle treten oder das Fußklopfen (Rose et al., 2021).

Unabhängig von der Messmethode ist es wichtig, dass keine externen rhythmischen Ereignisse wie zum Beispiel Musik präsent sind, da sich das SMT mit dem Tempo dieser externen Ereignisse synchronisieren kann, wodurch Versuchspersonen nicht mehr ihr SMT klopfen würden, sondern es sich in Abhängigkeit des Tempos von den externen Ereignissen beschleunigt oder verlangsamt, also eine sensomotorische Synchronisation stattfindet (Repp, 2005; Repp & Su, 2013). Haben sich Versuchspersonen mit den externen rhythmischen Ereignissen synchronisiert, kehren sie jedoch nach einiger Zeit zu ihrem SMT zurück, wenn die externen Ereignisse nicht mehr präsent sind (Bove et al., 2009; McAuley et al., 2006; Yu et al., 2003).

Das SMT gruppiert sich meistens um 250 und 500 Millisekunden beim Fingerklopfen (Collyer et al., 1992, 1994; Delevoeye-Turrell et al., 2014; Fraisse, 1982) sowie um 500 Millisekunden beim Gehen, Fußklopfen und auf der Stelle treten (MacDougall & Moore, 2005; Rose et al., 2021; Styns et al., 2007). Beim direkten Vergleich dieser Messmethoden konnte eine Studie keinen Unterschied im SMT bei denselben Versuchspersonen feststellen (Rose et al., 2021). Obwohl 500 Millisekunden (2 Hz) ein Vielfaches von 250 Millisekunden (4 Hz) ist und damit vielleicht dieselbe neuronale Basis aufzeigt, legen diese Ergebnisse zwei Grundfrequenzen um 2 und 4 Hertz nahe. Eine mögliche Erklärung für diesen Tempounterschied ist die Kinematik zyklischer Bewegungen, da anatomische und biomechanische Eigenschaften des Körpers das SMT beeinflussen können (Goodman et al., 2000; Peckel et al., 2014; Todd et al., 2007; Todd & Lee, 2015). So ist es zum Beispiel einfacher, mit dem Finger Zeitintervalle von 250 Millisekunden zu klopfen als mit dem Fuß, da ein Finger kürzer ist und über eine geringere Masse verfügt als ein Fuß (Yu et al., 2003).

3.2 Spontanes motorisches Tempo als Indikator der inneren Uhr

Wie im Kapitel 2.6 besprochen gehen sowohl Dauer-basierte als auch Beat-basierte Modelle der *inneren Uhr* von einem intrinsischen Zeitgeber aus, welcher eine Art Ursprungsrate aufweist. Bei den *Pacemaker-Accumulator Models* ist dies die Impulsrate des Zeitgebers und bei oszillatorischen Modellen wie die *Dynamic Attending Theory* die *Referent Period*. Das SMT gilt hierbei als Indikator für diese Ursprungsrate der *inneren Uhr* (Boltz, 1994; McAuley et al., 2006), eine Annahme, die sich auf zwei grundlegende

empirische Befunde stützt: Zum einen zeigte sich, dass das SMT und Dauernbeurteilungen zusammenhängen, da Versuchspersonen mit einem schnelleren SMT dazu neigen Zeitdauern als länger einzuschätzen und zu produzieren im Vergleich zu einem langsameren SMT (Baudouin et al., 2006; Boltz, 1994). Zusätzlich kann sowohl der intrinsischen Zeitgeber als auch das SMT durch den Erregungszustand beeinflusst werden, wobei in beiden Fällen ein erhöhter Erregungszustand zu schnelleren Raten führt (Boltz, 1994; Dosseville et al., 2002; siehe Kapitel 2.5 und 3.3).

Diese Annahme wird auch weiterführend dadurch unterstützt, dass das SMT und das bevorzugte Wahrnehmungstempo (*Preferred Perceived Tempo*: PPT) für auditive rhythmische Strukturen korreliert (Kliger Amrani & Zion Golumbic, 2020; McAuley et al., 2006) und sich das SMT und die Wahrnehmungspräferenz beim musikalischen Tempo (500 ms; Moelants, 2002; van Noorden & Moelants, 1999) und in der Sprache (250 ms) gleichen (Assaneo & Pöppel, 2018; Ding et al., 2017). Darüber hinaus werden beim PPT Verarbeitungs- und temporale Unterscheidungsfähigkeiten als optimal angesehen (Drake & Botte, 1993). Auch korreliert das SMT mit der spontanen Produktionsrate (SPR) von Musik (Pfordresher et al., 2021), welche das spontan gewählte Tempo beim Spielen von Musik ohne externe Reize beschreibt, also im Gegensatz zum SMT nicht rein isochron ist, sondern metrische Betonungsschemata und eine Taktart beinhalten. Musiker:innen spielen bei ihrer SPR am beständigsten (Zamm et al., 2018) und die sensomotorische Synchronisation zu externen rhythmischen Hörereignissen ist bei diesem Tempo am genauesten (Scheurich et al., 2018). SMT, PPT und SPR spiegeln von daher den stabilsten Zustand der Bewegungstrajektorien wider, da sie die geringste kinetische Energie erfordern und weniger kognitive Ressourcen benötigen (Assaneo & Pöppel, 2018).

Zusammengefasst legen diese Studien nahe, dass die Wahrnehmung und das rhythmisch-motorische Verhalten dieselben zugrundeliegenden Mechanismen aufweisen, wie es in der *Preferred Period Hypothesis* formuliert wurde (Kliger Amrani & Zion Golumbic, 2020; McAuley et al., 2006; Michaelis et al., 2014; Provasi et al., 2014; Schwartze & Kotz, 2015). Dies spricht im Umkehrschluss auch dafür, dass das gewählte Tempo, welches sich am natürlichsten und angenehmsten anfühlt (d. h. das SMT), als Schätzer für die Impulsrate der *inneren Uhr* gelten kann.

3.3 Einflussfaktoren auf das spontane motorische Tempo

Wie bereits am Anfang dieses Kapitels erwähnt gruppiert sich das SMT um 250 und 500 Millisekunden, jedoch zeigten diese Studien ebenfalls eine große Streuung des SMT, welche von 150 bis über 1.000 Millisekunden reichen kann (Collyer et al., 1994; McAuley et al., 2006) und für inter- und intraindividuellen Veränderungen im SMT spricht. Aus diesem Grund sind Faktoren, die das SMT beeinflussen, eines der Hauptforschungsinteressen bezüglich des SMT.

Studien ergaben, dass unterschiedliche, durch auditive Reize induzierte Erregungsniveaus sowohl das SMT als auch Dauernbeurteilungen beeinflussen (Boltz, 1994). Stimuli mit hoher Erregung führten im Vergleich zu Stimuli mit niedriger Erregung zu einem schnelleren SMT und längeren Dauernbeurteilungen. Der Zusammenhang zwischen physiologischer Erregung und dem SMT ist jedoch nicht eindeutig geklärt: Physiologische Veränderungen im Körper (z. B. Herzfrequenz oder kortikaler Blutfluss), die durch körperliche Aktivität hervorgerufen werden, stehen in engem Zusammenhang mit dem Erregungsniveau (Fisher, 2014; Nobrega et al., 2014) und dementsprechend fand eine Studie schnellere SMT in Versuchspersonen nach einem Fahrradtraining (hohe physiologische Erregung) als vor dem Training (Dosseville et al., 2002). Im Gegensatz dazu konnte eine Studie, in der Versuchspersonen entweder Schwimmen, Laufen oder Ringen sollten, keinen solchen Anstieg im SMT nachweisen (Sysoeva et al., 2013). Die Autoren interpretierten dieses Ergebnis dahingehend, dass die Versuchspersonen das Tempo bewusst wählten und damit kontrollierten, also nicht das SMT gemessen wurde. Entsprechend der *Preferred Period Hypothesis*, die von einem gemeinsamen Mechanismus für Wahrnehmung und dem rhythmisch-motorischen Verhalten ausgeht (McAuley et al., 2006), konnten Studien zeigen, dass ein erhöhter Erregungszustand sowohl beim PPT (Holbrook & Anand, 1990; Jakubowski et al., 2015) als auch beim SPR ebenfalls zu schnelleren Tempopräferenzen führt (Wright & Palmer, 2020). Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das SMT vom Erregungszustand beeinflusst wird, jedoch ist bislang nicht genau geklärt, inwieweit der physiologische Erregungszustand im Vergleich zum induzierten Erregungsniveau zu unterschiedlichen Ergebnissen führt.

Der wohl am häufigsten replizierte Befund in Bezug auf Veränderungen im SMT ist der Alterseffekt, der eine Verlangsamung des SMT mit zunehmenden Alter beschreibt. Obwohl die Ergebnisse in den verschiedenen Studien leicht variieren, ergaben diese ein durchschnittliches SMT von 300–450 Millisekunden für kleine Kinder (2–7 Jahre)

(McAuley et al., 2006; Monier & Droit-Volet, 2018, 2019; Provasi & Bobin-Bègue, 2003), 500–650 Millisekunden für Erwachsene (18–66 Jahre) und ca. 1.050–1.125 Millisekunden für ältere Menschen (66–94 Jahre; Baudouin et al., 2004; McAuley et al., 2006). Diese Ergebnisse stimmen mit der *Slowing-with-Age Hypothesis* überein, die von einer Abnahme der Verhaltensgeschwindigkeit bei älteren Menschen ausgeht (Salthouse, 2010; Surwillo, 1968). Diese Verlangsamung des SMT bei älteren Menschen könnte demnach sowohl durch eine Abnahme der kognitiven Verarbeitungsgeschwindigkeit als auch durch Veränderungen im neuromuskulären System wie verringerte Muskelkraft und Ausdauer verursacht werden (Baudouin et al., 2004). Darüber hinaus sind der präfrontale Kortex und die Basalganglien bei älteren Menschen im Allgemeinen stärker an der motorischen Kontrolle beteiligt als bei jüngeren Menschen. Dabei handelt es sich um Gehirnregionen, die mit zunehmendem Alter häufig beeinträchtigt sind (Seidler et al., 2010).

Ein weiterer Einflussfaktor auf das SMT könnte die Tageszeit sein. Ein Beleg für diesen Einfluss stammt aus Studien, welche die zirkadiane Fluktuation des SMT beim Radfahren und dem Fingerklopfen untersuchte (Dosseville et al., 2002; Moussay et al., 2002). Das SMT wurde hierfür fünfmal am Tag gemessen und die Ergebnisse zeigten, dass sich das SMT zwischen 06:00 und 18:00 Uhr beschleunigte und zwischen 18:00 und 22:00 Uhr verlangsamte, was auf einen direkten Einfluss des zirkadianen Rhythmus (24-Stunden-Zyklus) auf das SMT hindeuten könnte. Basierend auf dem engen Zusammenhang zwischen dem SMT und der SPR (siehe Kapitel 3.2.) zeigte eine Studie, dass die SPR von Musiker:innen beim Spielen von Melodien als Funktion der Tageszeit variiert, da die Melodieproduktion am Morgen (09:00) langsamer war als zu späteren Zeiten (13:00, 17:00, 21:00; Wright & Palmer, 2020). Darüber hinaus wurde in einer weiteren Studie über die kognitive Leistungsfähigkeit rund um den Schlaf die Tippgeschwindigkeit bei der Smartphone-Nutzung über einen Zeitraum von drei Wochen untersucht (Huber & Ghosh, 2021). Obwohl nicht direkt mit dem SMT-Fingerklopfen vergleichbar, ergaben die Ergebnisse ebenfalls, dass das Tempo des Fingertippens auf dem Smartphone in den Morgenstunden zunahm, tagsüber relativ konstant blieb und in der Nacht abnahm.

Ein wichtiger Aspekt, der in der bisherigen Forschung zur Beziehung zwischen dem SMT und der Tageszeit nicht untersucht wurde, ist die Rolle interindividueller Unterschiede im Tageszeiteffekt. Individuelle Präferenzen im Schlaf- und Aktivitätszyklus werden gemeinhin als Chronotypen bezeichnet. Diese Typen unterscheiden sich in der

Phasenreferenz, also der Anfangszeit, dem Mittelpunkt und dem Endzeitpunkt der Schlafphase (Roenneberg et al., 2003). Chronotypen werden oft in einem Spektrum zwischen Morgentypen oder „Lerchen“ (Frühschläfer) und Abendtypen oder „Eulen“ (Spätschläfer) beschrieben. Der Chronotyp könnte potenzielle Unterschiede in den Schwankungen des SMT im Tagesverlauf erklären, da die Uhrzeiten für das schnellste und langsamste SMT zwischen Morgen- und Abendtypen verschoben sein könnte. Unterstützung für solche chronotypinduzierten Unterschiede stammt aus einer Studie zum Klavierspiel (van Vugt et al., 2013). Obwohl das Tempo des SMT nicht direkt untersucht wurde, zeigte die Studie, dass das *Timing* (Variabilität) von Abendtypen-Pianisten am Abend stabiler ist als am Morgen. Dies zeigt, dass generelle *Timing*-Mechanismen zu unterschiedlichen Tageszeiten durch den Chronotyp beeinflusst werden können. Darüber existieren weitere chronotypabhängige Leistungsunterschiede im Gedächtnis (West et al., 2002), der Aufmerksamkeit (Matchock & Mordkoff, 2009) und in sensomotorischen Aufgaben (Tamm et al., 2009). Es liegt daher nahe, einen Einfluss des Chronotyps auf die tageszeitabhängige Fluktuation des SMT anzunehmen, was ebenfalls ein eindeutiger Hinweis auf einen direkten Einfluss des zirkadianen Rhythmus und damit der *biologischen Uhr* auf das SMT liefern würde, die nachweislich kognitive und physiologische Funktion beeinflusst (Valdez et al., 2012).

4 Zeit- und Tempowahrnehmung beim Musikhören

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Eigenschaften, Effekte und zugrundeliegenden Mechanismen der auditiven Zeitwahrnehmung auf das Musikhören angewandt. Musik weist spezifische Eigenschaften auf, die sie von anderen auditiven Reizen unterscheidet und zu besonderen Effekten in der Zeitwahrnehmung führen kann. Eine hervorgehobene Rolle kann hierbei dem musikalischen Tempo zugesprochen werden, denn dieses beeinflusst nicht nur wahrgenommene und anschließend beurteilte Zeitdauern eines Ereignisses, sondern unterliegt selbst personenbezogenen Wahrnehmungseffekten, die eng mit dem spontanen motorischen Tempo verbunden sind.

4.1 Dauernbeurteilungen beim Musikhören

Gilt es die Zeitdauer eines auditiven Reizes zu beurteilen, zeigte sich, dass dieser Reiz länger wahrgenommen wird, wenn er „gefüllt“ ist, also beispielsweise zwischen Beginn und Ende ein durchgehender Ton zu hören ist, im Vergleich zu einem „leeren“ Reiz,

dessen Beginn und Ende durch zwei kurze Klicks signalisiert werden (Rammsayer & Lima, 1991). Dieser Effekt wird *Filled-Duration Illusion* genannt und beschreibt, dass eine Zeitdauer als länger beurteilt wird, wenn sie mit der Wahrnehmung einer vermehrten Anzahl von Ereignissen einhergeht (Wearden et al., 2007). Dieser Effekt tritt also nicht nur bei einem durchgehenden Ton auf, sondern auch bei kurzen Klicks, die zwischen Beginn und Ende präsentiert werden, wobei sich die wahrgenommene Dauer quasi-linear mit der Anzahl an Klicks verlängert, unabhängig von der eigentlichen Dauer und ob die Klicks in regelmäßigen oder unregelmäßigen Abständen präsentiert werden (Thomas & Brown, 1974; Wearden et al., 2007).

Obwohl die Klickstruktur im Vergleich zu leeren Ereignissen für die *Filled-Duration Illusion* zunächst weniger von Bedeutung ist, ist es durchaus von Bedeutung, ob eine Ereignisstruktur regelmäßig oder unregelmäßig ist. So ist der metrische Takt in der Musik ein endogenes Phänomen, bei dem regelmäßige oder quasi-regelmäßige Ereignisse zu einem gefühlten Puls oder Taktus führt (London, 2012), der sich in regelmäßigen und wiederkehrenden Zyklen organisiert (Large et al., 2015; Large & Palmer, 2002; Phillips-Silver et al., 2011; Tierney & Kraus, 2015). Die Unterscheidung zwischen regelmäßigen Ereignisstrukturen mit einem wahrgenommenen Puls und unregelmäßigen Ereignisstrukturen ohne ein Pulsgefühl ist wichtig, da unterschiedliche neuronale Substrate an der auditiven Verarbeitung beteiligt sind (Teki et al., 2011; Teki et al., 2012; van Wassenhove, 2016). Gilt es zum Beispiel die Dauer eines Musikstückes oder Ausschnittes zu beurteilen, werden beide neuronalen Netzwerke aktiviert (Dauer- vs. Beat-basierte Zeitwahrnehmung; siehe Kapitel 2.6): Zum einen findet eine Kopplung neuronaler Oszillation ausgedrückt in Aufmerksamkeitsenergie und dem musikalischen Puls statt (siehe Kapitel 2.6.2), der intrinsische Zeitgeber verhält sich also phasensynchron zum wahrgenommenen Puls der Musik. Zum anderen werden die Impulse des Zeitgebers im kognitiven Speicher (d. h. Arbeitsgedächtnis) für die Zeitdauer der Musik gespeichert und, basierend auf der Anzahl der gespeicherten Impulse, eine Dauernbeurteilung vorgenommen. Dies bedeutet, dass ein schnellerer Puls in der Musik und damit ein schnelleres musikalisches Tempo und eine höhere Ereignisdichte auch die Impulsrate des Zeitgebers erhöht, was in länger wahrgenommen Zeitdauern resultiert (Repp & Bruttomesso, 2010; Wearden et al., 2007).

Dementsprechend fanden mehrere Studien, dass identische Zeitdauern als länger beurteilt wurden, wenn die Musik ein schnelles Tempo hatte verglichen mit langsamerer

Musik (Zeitverzerrungseffekt des Tempos). In einer Reihe von Experimenten, in denen das musikalische Tempo manipuliert wurde, zeigte sich das Tempo als Hauptfaktor für die Beeinflussung der Zeitwahrnehmung (Droit-Volet et al., 2013). Versuchspersonen beurteilten die Dauer von schneller Musik (184 *Beats per Minute*: BPM) als länger im Vergleich zu Musik mit einem langsamen Tempo (72 BPM) für Zeitdauern von 0,5–6,8 Sekunden. Darüber hinaus wurde die schnelle Musik als erregender wahrgenommen, was den engen Zusammenhang zwischen musikalischem Tempo und physiologischer Aktivierung (d. h. Erregungszustand) zeigt (Husain et al., 2002). Zu ähnlichen Ergebnissen kam eine Studie über den Zusammenhang von wahrgenommener Wartezeit und Hintergrundmusik (Oakes, 2003). Musik in einer schnellen Tempobedingung mit einem durchschnittlichen Tempo von 145,4 BPM (Tempobereich: 130–179 BPM) resultierte in länger wahrgenommenen Wartezeiten als dieselbe Musik in einer langsamen Bedingung mit einem durchschnittlichen Tempo von 114,2 BPM (Tempobereich: 104–129 BPM). Die Wartezeiten lagen hierbei für beide Tempobedingungen zwischen 4 und 15 Minuten.

In Bezug auf die Bereitschaft zu Warten fanden Studien ebenfalls heraus, dass Versuchspersonen am wenigsten bereit waren zu warten, wenn keine Musik als Ablenkung im Hintergrund gespielt wurde, und dass die Zeit schneller vorübergehen zu scheint, wenn die begleitende Musik genossen wird (Cameron et al., 2003; Kellaris & Kent, 1992; North & Hargreaves, 1999). Diese Ergebnisse entsprechen den Mechanismen und Vorhersagen der *Pacemaker-Accumulator Models* (siehe Kapitel 2.6.1), denn die Impulsrate des intrinsischen Zeitgebers erhöht sich bei der Rezeption von schneller Musik, da diese zu einem höheren Erregungszustand führt. Zudem bewirkt Musik, die dem persönlichen Geschmack entspricht, dass ihr mehr Aufmerksamkeit zu Teil wird, wodurch weniger Aufmerksamkeit auf den Verlauf der Zeit gelegt wird und diese wiederum schneller vorüberzugehen scheint.

4.2 Wahrnehmung musikalischer Tempi

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben führen schnellere Tempi sowohl bei einfachen auditiven Klicks als auch bei Musik zu länger wahrgenommenen Zeitdauern. Ein wesentlicher Unterschied zwischen in regelmäßigen Abständen präsentierten Klicks und Musik ist jedoch, das letztere oft aus mehreren, hierarchisch strukturierten, metrischen Ebenen besteht, also beispielsweise Achtelnoten, Viertelnoten, halbe und ganze Noten aufweist (Cooper & Meyer, 1960; Lerdahl & Jackendoff, 1983). Hierbei

entspricht jede metrische Ebene einem anderen Tempo, welche von niedrigen Ebenen mit „lokalen“ zeitlichen Regelmäßigkeiten (z. B. Achtelnoten) bis zu höheren Ebenen mit „globaleren“ zeitlichen Regelmäßigkeiten reichen (z. B. ganze Noten bis hin zur musikalischen Phrase), die aus ganzzahligen Vielfachen der unteren Ebenen bestehen. Auf welcher dieser metrischen Ebenen der Puls wahrgenommen wird, ist also von entscheidender Bedeutung, denn liegt dieser auf einer niedrigen metrischen Ebene (z. B. Achtelnoten), ist das musikalische Tempo im Vergleich zu einer höheren metrischen Ebene (z. B. ganze Noten) schneller. Diese Wahrnehmung hängt dabei sowohl von musikalischen als auch von personenbezogenen Faktoren ab.

4.2.1 Musikalische Faktoren

Die Pulswahrnehmung hängt von verschiedenen temporalen Parameter in der Musik ab, wie zum Beispiel dem Grundtempo (BPM), Notendauer, Ereignisdichte und rhythmischer Komplexität (Bouwer et al., 2018; Drake et al., 1999; London, 2011; Matthews et al., 2019; Parncutt, 1994) als auch von nicht-temporalen Parametern wie Tonhöhe, harmonischer sowie tonaler Verlauf, Dynamik (d. h. Akzentstruktur) und Klangfarbe (Boltz, 2011; Eitan & Granot, 2009; Epstein, 1995; Hannon et al., 2004; Snyder & Krumhansl, 2001). Als psychoakustischer Indikator für die Pulswahrnehmung gilt der *Spectral Flux*, welcher den Veränderungsgrad akustischer Energie in einem gegebenen Hörspektrum über die Frequenzen hinweg angibt, indem der Abstand der Spektren zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten berechnet wird (Alluri & Toiviainen, 2010). Hierbei sind die Hörspektren im tiefen Frequenzbereich (100–200 Hz) entscheidend, da hier starke rhythmische Ereignisse von Instrumenten wie zum Beispiel *Kick-Drum* oder *Bass* stattfinden. So zeigte sich, dass vor allem Musik mit weniger tieffrequenten Komponenten (d. h. weniger *Spectral Flux* im Bereich 100–200 Hz) und hoher rhythmischer Komplexität keine eindeutige Pulsstruktur aufweisen kann, also eine geringe *Beat*-Salienz besitzt (Burger et al., 2013; Stupacher et al., 2016). Dementsprechend zeigte eine Studie, dass die metrischen Ebenen, in welcher der *Beat*³ eines Musikstückes wahrgenommen wird, stark variieren kann (McKinney & Moelants, 2006). Die Studie von McKinney und Moelants ergab, dass die Versuchspersonen für einige Musikstücke bis zu vier verschiedene metrische Ebenen als *Beat*-Ebene auswählten. Auch zeigte diese Studie, dass die

³ Im Gegensatz zum musikalischen Puls, der den zugrundeliegenden Schlag einer zeitlichen Struktur bezeichnet, gibt der *Beat* den spezifischen (Takt-)Schlag an, der eine Zählzeit im Takt/Metrum darstellt.

Beat-Salienz in bestimmten Genres (z. B. Jazz) weniger eindeutig ist als in anderen (z. B. Metal und Punk). Dies verdeutlicht, dass ein und dasselbe Musikstück unterschiedlich wahrgenommene Tempi haben kann und im Umkehrschluss auch dessen Zeitdauern unterschiedlich beurteilt werden könnten.

4.2.2 Personenbezogene Faktoren

Die Wahrnehmung des musikalischen Pulses hängt jedoch nicht nur von Eigenschaften der Musik selbst ab, sondern auch von personenbezogenen Faktoren. Generell gibt es die Tendenz, den Puls und damit das Tempo im Bereich von 500–600 Millisekunden (100–120 BPM) wahrzunehmen (Moelants, 2002; van Noorden & Moelants, 1999), da hier die Verarbeitungs- und zeitliche Unterscheidungsfähigkeiten temporaler Information als optimal gilt (Drake & Botte, 1993). Die wahrgenommene *Beat*-Salienz und der Prozess der Pulsfindung kann ebenfalls durch sensomotorische Synchronisation verbessert werden, also durch Bewegung im Rhythmus der Musik (Manning & Schutz, 2013; Su & Pöppel, 2012), wobei unterschiedliche Körperteile sich zu unterschiedlichen metrischen Ebenen synchronisieren können (Burger et al., 2018; London et al., 2016), abhängig von anatomischen und biomechanischen Eigenschaften des Körpers (siehe Kapitel 3.1). Darüber hinaus zeigte eine Studie anhand westlicher klassischer Musik, dass die Mehrdeutigkeit der wahrgenommenen *Beat*-Ebene zwischen Versuchspersonen nicht ausschließlich durch musikalische Parameter erklärt werden kann (Martens, 2011). Hinsichtlich der musikalischen Struktur konnten in der Studie drei Arten von Hörstrategien bestimmt werden: „*Surface*-Hörer“ konzentrieren sich auf den schnellsten konsistenten *Beat* (niedrige metrische Ebene), die „*Deep*-Hörer“ eher auf höhere metrische Ebenen, wohingegen eine Mischung dieser beiden Strategien von den „*Variable*-Hörern“ verwendet wird. Hierbei tendierten Versuchspersonen mit weniger musikalischer Erfahrung zu der „*Surface*“ Gruppe, während Versuchspersonen mit mehr Erfahrung häufiger die „*Variable*“ und „*Deep*“ Hörstrategien verwendeten. Zu ähnlichen Ergebnissen kam eine Studie, die Musiker:innen und Nichtmusiker:innen hinsichtlich ihrer sensomotorischen Synchronisation bei klassischen Klavierstücken untersuchte (Drake, Penel & Bigand, 2000). Musiker:innen neigten hierbei dazu, sich mit höheren metrischen Ebenen zu synchronisieren im Vergleich zu den Nichtmusiker:innen. Eine weitere Studie fand ebenfalls Unterschiede in Bezug auf musikalische Erfahrung, wobei erfahrene Versuchspersonen im Vergleich zu Versuchspersonen ohne Erfahrung eine höhere Flexibilität hinsichtlich der

wahrgenommenen *Beat*-Ebene zeigten. Während bei erfahrenen Versuchspersonen die wahrgenommene *Beat*-Ebene durch das musikalische Tempo beeinflusst wurde, zeigten unerfahrene Versuchspersonen keine Veränderungen in der gewählten *Beat*-Ebene für unterschiedliche Tempi (McAuley & Semple, 1999).

Andere Studien fanden jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen diesen beiden Gruppen (McKinney & Moelants, 2006; Moelants & McKinney, 2004). Die Divergenz dieser Ergebnisse könnte darauf hindeuten, dass Pulsfindungsunterschiede als Funktion der Musikerfahrung nicht auf allgemeine motorische Steuerungsunterschiede zurückzuführen sind, sondern auf das Vorhandensein von größeren Wahrnehmungsschwierigkeiten (z. B. bei der Extraktion der zeitlichen Periodizität) bei Individuen mit weniger Musikerfahrung (Snyder & Krumhansl, 2001).

Weitere Hinweise auf potenzielle personenbezogene Faktoren, welche auf Unterschiede bei dem präferierten wahrgenommen Tempo bei Musik und damit das Zeiterleben beeinflussen, liefern Studien zum spontanen motorischen Tempo (SMT), welches als Indikator des intrinsischen Zeitgebers gilt (siehe Kapitel 3.2.). Nach der *Dynamic Attending Theory*, findet eine sensomotorische Synchronisation der neuronal-oszillatorischen Prozesse zu der temporalen Struktur der Musik auf Basis der *Referent Period* statt, also der Ursprungsrate, die anhand des SMT gemessen werden kann (siehe Kapitel 2.6.2). Hierbei koppeln sich Individuen zunächst mit der metrischen Ebene, die dem Tempo der *Referent Period* am nächsten ist (Drake, Jones & Baruch, 2000). Entsprechend der Studien, die eine Tendenz von musikalisch mehr erfahrenen Versuchspersonen zur Wahrnehmung des *Beats* in höheren metrischen Ebenen fand (Drake, Penel & Bigand, 2000; Martens, 2011; McAuley & Semple, 1999), fand eine Studie auch ein langsames SMT bei Kindern, die Instrumentalunterricht hatten, im Vergleich zu Kindern, die keinen solchen Unterricht erhielten (Drake, Jones & Baruch, 2000). Dieser Unterschied im SMT konnte in derselben Studie bei erwachsenen Versuchspersonen jedoch nicht festgestellt werden, so dass es unklar bleibt, ob eine systematische Veränderung im SMT und damit im intrinsischen Zeitgeber durch musikalisches Training verursacht wird und wenn ja, welche Prozesse diesen potenziellen Unterschied verursachen.

Des Weiteren fanden Studien, dass sowohl das präferierte Wahrnehmungstempo (PPT) als auch das erinnerte Tempo von Melodien und Musik durch den Erregungszustand beeinflusst wird. Hierbei führt ein erhöhter Erregungszustand zu schneller erinnerten Tempi von Musikstücken sowie zu einer schnelleren Wahrnehmungspräferenz von

Musikstücken (Holbrook & Anand, 1990; Jakubowski et al., 2015; North & Hargreaves, 2000); Befunde, die den Modellen der *inneren Uhr* entsprechen und sich mit dem SMT gleichen (siehe Kapitel 3.3 und 2.6).

Zusammenfassend zeigt sich, dass schnelle Musik im Vergleich zu langsamer Musik zu längeren Dauernbeurteilungen führt, da schnellere Musik den Erregungszustand erhöht und damit auch die Impulsrate der *inneren Uhr* (Droit-Volet et al., 2013; Husain et al., 2002). Musik besteht jedoch aus mehreren metrischen Ebenen, und auf welcher dieser Ebenen der *Beat* und damit das Tempo der Musik wahrgenommen wird, kann in demselben Musikstück zwischen Individuen variieren, dasselbe Musikstück also verschiedene Tempi für verschiedene Individuen aufweisen (Martens, 2011; McKinney & Moelants, 2006). Dies kann zum einen mit Eigenschaften der Musik selbst erklärt werden (Burger et al., 2014; Burger et al., 2018), aber auch personenbezogene Faktoren wie musikalische Erfahrung und die Ursprungsrate der *inneren Uhr* könnten Einfluss darauf nehmen, wie Musik wahrgenommen und damit die temporalen Informationen verarbeitet werden (Drake, Jones & Baruch, 2000; Drake, Penel & Bigand, 2000).

5 Einordnung und Zusammenfassung der durchgeführten Studien

Im Folgenden werden die im Rahmen dieses Dissertationsprojektes durchgeführten Studien vorgestellt. Die Studien untersuchten zwei verschiedene Tempoaspekte, die für das Zeiterleben wesentlich sind: Studien 1 und 2 beziehen sich hierbei auf das Tempo von Musik und inwieweit dessen Wahrnehmung den intrinsischen Zeitgeber und damit Dauernbeurteilungen beeinflusst. Studien 3 und 4 untersuchten Faktoren, welche die Ursprungsrate des intrinsischen Zeitgebers beeinflussen, welche anhand des spontanen motorischen Tempos gemessen wurde. Besonderes Augenmerk wurde hierbei daraufgelegt, dass diese Faktoren unabhängig von externen Reizen wie zum Beispiel Musik sind, wobei der Untersuchung des potenziellen Einflusses des zirkadianen Rhythmus eine zentrale Rolle zukam. Für das Verstehen der zugrundeliegenden Wirkungsmechanismen des menschlichen Zeiterlebens sind diese Faktoren von entscheidender Bedeutung, da sie die Grundlage für die Verarbeitung und die Wahrnehmung externer Reize und Ereignisse bilden und somit zu einem gewissen Grad auch Unterschiede in der Wahrnehmung temporaler Information von Musik erklären können.

5.1 Studie 1 (Hammerschmidt & Wöllner, 2020)

Wie im Kapitel 4.2 beschrieben, gilt das musikalische Tempo als wesentlicher Faktor, der die wahrgenommene Zeitdauer eines Musikstückes oder die Zeitdauer einer Situation, in der Musik gehört wird, beeinflusst. Hierbei gilt, dass die Zeitdauer als länger beurteilt wird, wenn das Tempo schneller ist (Droit-Volet et al., 2013; Oakes, 2003). Ein wesentlicher Aspekt, der in vorangegangener Forschung jedoch nicht berücksichtigt wurde, ist, dass Musik über mehrere hierarchisch organisierte metrische Ebenen verfügt (Cooper & Meyer, 1960; Lerdahl & Jackendoff, 1983), wobei jede dieser Ebenen einem distinkten Tempo entspricht (London, 2012; siehe Kapitel 4.2).

Dementsprechend konnten Studien zeigen, dass in Abhängigkeit musikalischer und personenbezogener Parameter Individuen unterschiedliche metrische Ebenen für die sensomotorische Synchronisation zum musikalischen Puls wählen und damit potenziell auch unterschiedliche Tempi für dasselbe Musikstück wahrnehmen (Martens, 2011; McKinney & Moelants, 2006; Moelants & McKinney, 2004). Dies könnte im Umkehrschluss bedeuten, dass auch die Zeitdauern dieser Musikstücke unterschiedlich wahrgenommen werden, da die Impulsrate des intrinsischen Zeitgebers sich dem wahrgenommenen Tempo anpasst (siehe Kapitel 2.6). Dies ist ein wesentlicher Aspekt der auditiven Zeitwahrnehmung im Kontext von Musikrezeption. Die Untersuchung dieses Aspektes war Ziel der ersten Studie, da das *Entrainment* zu unterschiedlichen metrischen Ebenen in der vorangegangenen empirischen Forschung nicht berücksichtigt worden ist. Konkret untersuchte die Studie, inwieweit diese unterschiedlichen metrischen Ebenen bei rhythmisch-musikalischen Stimuli die Dauernbeurteilungen beeinflussen. Basierend auf den Modellen der *inneren Uhr* (Kapitel 2.6) und der in Kapitel 4.2 diskutierten Effekte von Tempo- und Pulswahrnehmung konnte davon ausgegangen werden, dass die Kopplung zu niedrigeren metrischen Ebenen in längeren Dauernbeurteilungen resultiert im Vergleich zu höheren metrischen Ebenen. Hierbei teilen die Aufmerksamkeitsenergie und motorische Koordination die rhythmische Struktur in kurze temporale Einheiten ein, wodurch auch ein schnelleres Tempo wahrgenommen werden könnte.

Des Weiteren wurde angenommen, dass auch das den metrischen Ebenen zugrundeliegende Grundtempo (BPM) der rhythmisch-musikalischen Stimuli die Dauernbeurteilungen beeinflusst, wobei auch hier ein schnelleres Tempo, unabhängig von der Kopplung zu einer bestimmten metrischen Ebene, zu längeren Dauernbeurteilungen führt. Zusätzlich wurde untersucht, inwieweit diese Effekte von der musikalischen Erfahrung der

Versuchspersonen abhängen, wobei Musiker:innen die Zeitdauern als länger wahrnehmen könnten als Nichtmusiker:innen, da diese über eine höhere Flexibilität bei der Wahrnehmung der verschiedenen metrischen Ebenen verfügen und deshalb weniger kognitive Ressourcen benötigen, um sich mit höheren metrischen Ebene zu synchronisieren (siehe Kapitel 4.2.2). Dies würde dazu führen, dass Musiker:innen mehr Aufmerksamkeit auf den Verlauf der Zeit legen können und somit Zeitdauern als länger wahrnehmen als Nichtmusiker:innen (siehe Kapitel 2.4).

Um diese Annahmen zu überprüfen, war es in Studie 1 Aufgabe der Versuchspersonen ($N = 30$), während der Präsentation von drei verschiedenen rhythmisch-musikalischen Stimuli, die aus *Kick-Drum*, *Snare-Drum*, *Hi-Hat* und *Synthesizer* bestanden, sich entweder zu den Achtelnoten, Viertelnoten oder halben Noten zu synchronisieren. Um sicher zu stellen, dass die Versuchspersonen sich zu den vorgegeben metrischen Ebenen koppeln, wurde das *Finger-Tapping* Paradigma für die sensomotorische Synchronisation (SMS) verwendet (Repp, 2005; Repp & Su, 2013). Die Versuchspersonen klopfen mit dem Zeigefinger ihrer präferierten Hand zu jeweils einer der drei vorgegebenen metrischen Ebenen. Die Reihenfolge der vorgegebenen metrischen Ebene war hierbei randomisiert. Nach der Präsentation eines Stimulus wurde dann dessen Zeitdauer in Sekunden geschätzt (*verbale Dauerneinschätzung*; siehe Kapitel 2.2). Als zusätzliche Kontrollbedingung schätzten die Versuchspersonen die Stimulidauern zunächst ohne SMS ein, sie hörten also Stimuli ohne zu einer vorgegeben metrischen Ebene mitzuklopfen. Die Auswahl der drei rhythmisch-musikalischen Stimuli basierte auf einer Vorstudie, in der Versuchspersonen zu ihrer präferierten metrischen Ebene von 24 verschiedenen rhythmisch-musikalischen Stimuli mitklopfen sollten. Die in der eigentlichen Studie verwendeten Stimuli wurden dann hinsichtlich ihrer gemesseneren *Beat-Salienz* ausgewählt, wobei der Stimulus mit der höchsten Übereinstimmung in Bezug auf die *Beat-Ebene* (hohe *Beat-Salienz*) ausgewählt wurde, der Stimulus mit der geringsten Übereinstimmung (niedrige *Beat-Salienz*) und der Stimulus, welcher dem Median am nächsten war. Diese drei Stimuli wurden in drei Grundtempi präsentiert (83, 120, 150 BPM) mit Dauern zwischen 12,80 und 23,13 Sekunden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die SMS zu den verschiedenen metrischen Ebenen die *verbalen Dauerneinschätzungen* der Versuchspersonen beeinflusste, wobei das *Finger-Tapping* zu den halben Noten zu den kürzesten *verbalen Dauerneinschätzungen*

führte (langames *Tapping*-Tempo, hohe metrische Ebene). SMS zu den Viertelnoten resultierte im Vergleich dazu zu länger wahrgenommenen Stimulidauern (mittleres *Tapping*-Tempo) und Achtelnoten ergaben die längsten *verbalen Dauerneinschätzungen* in den SMS-Bedingungen (schnelles *Tapping*-Tempo, niedrige metrische Ebene). Die Kontrollbedingung, bei der die Versuchspersonen nicht zu den Stimuli mitklopfen, ergab von allen Bedingungen die längsten Dauernbeurteilungen (kein *Tapping*-Tempo). Besonders deutlich war der Unterschied in den *verbalen Dauerneinschätzungen* bei den halben Noten, also die SMS zu einer hohen metrischen Ebene, die zu wesentlich kürzer wahrgenommenen Stimulidauern führte. Dieser Effekt interagierte mit den drei rhythmisch-musikalischen Stimuli, wobei der Effekt kürzer eingeschätzter Zeitdauern der halben Noten besonders stark für die beiden Stimuli mit der höchsten und mittleren *Beat*-Salienz war. Die drei Grundtempi beeinflussten die *verbalen Dauerneinschätzungen* unabhängig von den anderen Bedingungen, wobei auch hier die Stimulidauern länger eingeschätzt wurden, desto schneller das Grundtempo war. Keine Unterschiede in den *verbalen Dauerneinschätzungen* ergaben sich hinsichtlich der musikalischen Erfahrung der Versuchspersonen. Musiker:innen schätzen die Stimulidauern gleich oder ähnlich wie Nichtmusiker:innen ein.

5.2 Studie 2 (Hammerschmidt, Wöllner, London & Burger, 2021)

Wie die erste Studie dieses Dissertationsprojektes als auch vorangegangene Studien zeigten, führt eine schnelleres Grundtempo bei Musik zu längeren Dauernbeurteilungen (Droit-Volet et al., 2013; Oakes, 2003). Diese Studien verwendeten musikalische Stimuli, die sich in hinsichtlich ihrer BPM deutlich unterschieden, wobei Droit-Volet et al. (2013) für langsame Musik ein Grundtempo von 72 BPM und schnelle Musik 184 BPM verwendeten. Oakes (2003) verwendete langsame Stimuli mit einem durchschnittlichen Grundtempo von 114,2 BPM sowie schnelle Stimuli mit einem durchschnittlichen Grundtempo von 145,4 BPM. In der ersten Studie dieses Dissertationsprojektes lag das langsame Grundtempo der rhythmisch-musikalischen Stimuli bei 83 BPM, das mittlere bei 120 BPM und das schnelle bei 150 BPM. Diese Studien verwendeten bei der Untersuchung der Dauernbeurteilungen also Tempounterschiede von mindestens 30 BPM. Für die Tempowahrnehmung sind dies deutlich wahrnehmbare Unterschiede (Drake & Botte, 1993), ein Umstand der eine Forschungslücke im Bereich der Zeitwahrnehmung von Musik aufzeigt, denn es ist unklar, wie groß die Tempounterschiede von Musikstücken sein

müssen, damit sich diese in unterschiedlich lang wahrgenommenen und beurteilten Zeitdauern niederschlagen. Dementsprechend war es das Hauptziel der zweiten Studie diese Frage empirisch zu untersuchen.

Aus diesem Grund wurden Versuchspersonen ($N = 32$), die erneut aus Musiker:innen und Nichtmusiker:innen bestanden, sechs musikalische Ausschnitte präsentiert, die sich in ihrem Grundtempo unterschieden (105, 115, 125 BPM). Aufgabe der Versuchspersonen war es, die Stimulidauern sowohl verbal einzuschätzen als auch zu reproduzieren (siehe Kapitel 2.2). Die gewählten Grundtempi wurden gewählt, da diese im Bereich der höchsten Unterscheidungsfähigkeit temporaler Information liegen (Drake & Botte, 1993) sowie der generellen Wahrnehmungspräferenz musikalischer Tempi entsprechen (Moelants, 2002; van Noorden & Moelants, 1999; siehe Kapitel 4.2). Um auch potenzielle Tempounterschiede kleiner als 10 BPM messen zu können, wurden die Musikausschnitte zusätzlich im Grundtempo manipuliert, wobei jeder Musikausschnitt auch 5 BPM langsamer und schneller präsentiert wurde (resultierender Tempobereich: 100–130 BPM). Somit konnten potenzielle Unterschiede in den Dauernbeurteilungen mit einer Genauigkeit von 5 BPM gemessen werden. Die resultierenden Stimulidauern lagen zwischen 14,77 und 19,20 Sekunden. Um sicherzustellen, dass alle Versuchspersonen den Puls auf derselben metrischen Ebene wahrnehmen und somit auch für dieselben Musikausschnitte dasselbe Tempo hören, wurden Musikausschnitte aus dem Disco-Genre gewählt, die eine hohe *Beat*-Salienz aufweisen (London et al., 2019). Somit konnte der in Studie 1 gemessene Effekt unterschiedlicher metrischer Ebenen auf die Dauernbeurteilungen bestmöglich ausgeschlossen werden (siehe Kapitel 5.1). Die zwei verschiedenen Dauernbeurteilungen (*verbale Dauerneinschätzung* und *Dauernreproduktion*) wurden gewählt, da diese unterschiedliche kognitive Prozesse involvieren (siehe Kapitel 2.2) und sich hinsichtlich der Messgenauigkeit unterscheiden, wobei die *Dauernreproduktion* genauere Messergebnisse liefern kann als die *verbale Dauerneinschätzung* (Mioni, 2018).

Die Ergebnisse zeigen, dass die unterschiedlichen Tempi keinen Einfluss auf die *verbalen Dauerneinschätzungen* hatten, Stimuli mit schnelleren Grundtempi also nicht länger eingeschätzt wurden im Vergleich zu langsameren Grundtempi. Die unterschiedlichen Stimulidauern wurden dementsprechend von den Versuchspersonen erkannt. Bei den *Dauernreproduktionen* zeigten sich hingegen Unterschiede: Stimuli mit 125 BPM wurden länger reproduziert als Stimuli mit einem Tempo von 105 BPM, was einem Tempounterschied von 20 BPM entspricht. Die im Grundtempo manipulierten Stimuli zeigten

keinen Einfluss auf die beiden Dauernbeurteilungen. Unterschiede hinsichtlich der musikalischen Erfahrung gab es bei den *Dauernreproduktionen*: Musiker:innen tendierten zu genaueren Reproduktionen der Stimulidauern als Nichtmusiker:innen. Bei den *verbalen Dauerneinschätzungen* gab es keinen Unterschied zwischen diesen beiden Gruppen.

5.3 Studie 3 (Hammerschmidt, Frieler & Wöllner, 2021)

Während die Studien 1 und 2 Effekte unterschiedlicher musikalischer Grundtempi und unterschiedlicher metrischer Ebenen innerhalb derselben musikalischen Struktur untersuchten, also eine kontrollierte Beeinflussung der Impulsrate des intrinsischen Zeitgebers durch externe Reize stattfand, untersuchten Studie 3 und 4 verschiedene Einflussfaktoren auf die Ursprungsrate des intrinsischen Zeitgebers, also Faktoren, die die Impulsrate beeinflussen, ohne dass eine (sensomotorische) Synchronisation zu externen Ereignissen oder Reizen stattfindet.

Für die Untersuchung der Ursprungsrate des intrinsischen Zeitgebers bietet sich das spontane motorische Tempo (SMT) an, da dieses als Indikator für dessen Impulsrate gilt (siehe Kapitel 3.2). Die zugrundeliegende Idee ist, dass ein schnelleres SMT auf eine schnellere Impulsrate hindeutet, Individuen mit einem schnellen SMT eine Zeitdauer also als länger wahrnehmen im Vergleich zu Individuen mit einem langsamen SMT (Boltz, 1994). Wie im Kapitel 3.3 beschrieben, konnten vorangegangene Studien mehrere Einflussfaktoren bestimmen, die das SMT beeinflussen. Zu diesen Faktoren zählt das Alter, wobei Kinder ein schnelleres SMT haben als Erwachsene (Monier & Droit-Volet, 2018, 2019) und ältere Erwachsene ein langsames SMT als junge Erwachsene (Baudouin et al., 2004; McAuley et al., 2006). Der physiologische Erregungszustand beeinflusst das SMT dahingehend, dass eine erhöhte Erregung zu einem schnelleren SMT führt (Boltz, 1994; Dosseville et al., 2002); eine Studie konnte zeigen, dass das SMT von der Tageszeit abhängt, da in dieser Studie das SMT der Versuchspersonen über den Tag schneller wurde und sich zum Abend hin verlangsamte (Moussay et al., 2002), was auf einen Einfluss des zirkadianen Rhythmus hindeuten könnte. Des Weiteren fand eine Studie Unterschiede im SMT bei Kindern hinsichtlich ihrer musikalischen Erfahrung, denn Kinder, die Instrumentalunterricht bekamen, zeigten ein langsames SMT als Kinder ohne Instrumentalunterricht. Dieser Unterschied konnte bei Erwachsenen jedoch nicht festgestellt werden (Drake, Jones & Baruch, 2000).

Diese Effekte entsprechen den angenommenen Mechanismen der *inneren Uhr* (siehe Kapitel 2.6 und 3.2), jedoch ist die Anzahl an Studien, welche die oben genannten Faktoren untersuchen, relativ gering, vor allem hinsichtlich des Tageszeiteffekts, des Erregungszustandes und der Rolle von musikalischer Erfahrung.

Deshalb war es Ziel der Studien 3 und 4, diese Effekte mit verschiedenen Forschungsdesigns und Messmethoden weiter zu untersuchen und ein genaueres Verständnis über diese Einflussfaktoren zu erlangen. Hierfür wurde eine eigene Webapplikation entwickelt, die das SMT anhand des *Finger-Tapping* Paradigmas messen kann (siehe Abbildung I im Anhang). Die Aufgabe bei diesem Paradigma besteht darin, gleichmäßig in einem Tempo zu klopfen, welches sich in dem Moment am angenehmsten und natürlichsten anfühlt (siehe Kapitel 3.1). Das Verwenden einer Webapplikation ermöglicht es nicht nur, das SMT im Alltag und in vertrauten Umgebungen der Versuchspersonen zu messen (d. h. eine höhere ökologische Validität sicherzustellen), sondern kann durch die Online-Implementierung auch potenziell eine wesentlich höhere Anzahl an Versuchspersonen erreichen.

Studie 3 nutzte die Webapplikation deshalb in einem Online-Experiment und erhob neben dem SMT der Versuchspersonen auch deren demographischen Daten wie Alter und Nationalität. Auch bewerteten die Versuchspersonen ihren Erregungszustand, und die Applikation erfasste automatisch die jeweilige lokale Uhrzeit des verwendeten Gerätes (z. B. Computer, Tablet oder Smartphone) bei den Testdurchführungen. Um die Teilnahmebereitschaft zu erhöhen, bekamen die Versuchspersonen Rückmeldung über die Gleichmäßigkeit ihres *Finger-Tappings* und wurden darüber informiert, wie sie im Vergleich zu allen anderen Versuchspersonen abschnitten. Das gewählte *Tapping*-Tempo, welches für die Studie von eigentlichem Interesse war, wurde dabei nicht als wichtigster Faktor für die Testdurchführung dargestellt. Stattdessen wurden Versuchspersonen aufgefordert, sowohl das komfortabelste *Tapping*-Tempo zu wählen als auch so gleichmäßig wie möglich zu klopfen, in der Annahme, dass das SMT mit dem stabilsten Zustand der Bewegungstrajektorien einhergeht und daher zu erwarten ist, dass die gemessenen *Tapping*-Tempi dem jeweiligen SMT einer Versuchsperson entsprechen (Assaneo & Pöppel, 2018).

An der Studie nahmen insgesamt $N = 5.966$ Versuchspersonen teil, die Analyse basierte nach einer strikten Datenbereinigung auf $N = 3.576$ Testdurchführungen. Eines der Ziele der Studie, eine möglichst große Datenbasis zu erlangen, um für die geringere

Kontrolle bei der Datenerhebung zu kompensieren, konnte also erreicht werden. Die SMT-Daten ergaben dabei eine große Streuung mit Werten zwischen 123 und 2.150 Millisekunden. Des Weiteren zeigte sich eine linksschiefe, supergaußsche und leptokurtische Verteilung, weshalb die Versuchspersonen in sechs verschiedenen Gruppen aufgeteilt wurden. Diese Gruppen unterschieden sich hinsichtlich ihres SMT, von sehr schnell ($M = 265$ ms, $SD = 74$) bis sehr langsam ($M = 1.757$ ms, $SD = 166$) und entsprachen relativ genau dem subharmonischen Spektrum von 250 Millisekunden (4 Hz; siehe Kapitel 3.1). Die Gruppen unterschieden sich hinsichtlich ihres Alters, denn je älter die Versuchspersonen waren, desto langsamer war auch die Gruppe. Ebenfalls unterschieden sich diese Gruppen bei der durchschnittlichen Uhrzeit für die Testdurchführung, wobei Gruppen aus langsamen Versuchspersonen den Test früher am Tag durchführten. Die Versuchspersonen mit der durchschnittlich niedrigsten musikalischen Erfahrung waren in einer langsamen Gruppe. Hinsichtlich des Erregungszustandes unterschieden sich die Gruppen nicht.

Um allgemeine Prädiktoren des SMT zu untersuchen und dabei die Homoskedastizität sicherzustellen, wurde ein zusätzliches multiples Regressionsmodell mit gruppenweise z -transformierten SMT-Werten gerechnet, welches zeigte, dass in allen Gruppen Versuchspersonen mit höherem Erregungszustand ein schnelles SMT aufwiesen im Vergleich zu Versuchspersonen mit einem geringeren Erregungszustand. Derselbe Effekt zeigte sich hier auch für die musikalische Erfahrung, Versuchspersonen mit mehr Erfahrung waren also in allen Gruppen langsamer. Der Faktor musikalische Erfahrung ergab also für die zwei statistischen Analysen gegensätzliche Effekte.

5.4 Studie 4 (Hammerschmidt & Wöllner, 2022)

Studie 4 untersuchte dieselben Einflussfaktoren auf das SMT wie Studie 3, legte jedoch das Hauptaugenmerk stärker auf den Tageszeiteffekt und nutzte im Gegensatz zu dem breit angelegten Online-Experiment mit Zwischengruppendesign eine Erlebnisstichprobe (*Experience Sampling Method*). Versuchspersonen führten die Messung des SMT hierbei mehrfach durch, was ein genaueres Bild über die Veränderungen innerhalb einer Person schaffen sollte. Hierfür wurde eine leicht angepasste Variante der Webapplikation genutzt. Ziel war es die in Studie 3 gemessenen Effekte der Tageszeit, des Erregungszustandes und der musikalischen Erfahrung genauer zu untersuchen. Um weitere Rückschlüsse darüber zu gewinnen, ob der zirkadiane Rhythmus wirklich Ursache für den Tageszeiteffekt ist, wurde in dieser Studie auch der Chronotyp der Versuchspersonen

erhoben. Die Annahme hierbei war, dass der Chronotyp mit der Tageszeit interagieren müsste, wenn der zirkadiane Rhythmus die tatsächliche Ursache für den Tageszeiteffekt ist, da unterschiedliche Chronotypen zu unterschiedlichen Tageszeiten ihren höchsten Wachheitszustand erreichen, was sich im SMT widerspiegeln sollte (siehe Kapitel 3.3). Neben diesen beiden Faktoren wurde erneut der Erregungszustand gemessen und die musikalische Erfahrung der Versuchspersonen erhoben.

Vor Beginn des eigentlichen Experimentes erhielten die Versuchspersonen ($N = 36$) eine intensive Einführung in die Testdurchführung und die *Finger-Tapping* Aufgabe zur Messung des SMT. Zu Beginn der darauffolgenden Woche führten sie dann für sieben Tage (Montag–Sonntag) viermal täglich zu randomisierten Uhrzeiten den Test durch. Hierfür erhielten sie eine Textnachricht auf ihrem persönlichen Smartphone, jeweils zwischen 08:00–09:00, 12:00–13:00, 16:00–17:00 und 20:00–21:00 Uhr. Diese Textnachricht enthielt neben einem Link zur personalisierten Webapplikation eine Aufforderung den Test sobald es ihnen möglich war durchzuführen. Zusätzlich füllten die Versuchspersonen nach jedem *Finger-Tapping* einen Fragebogen zu ihrem physiologischen Erregungszustand aus. Bei der Auswahl der Versuchspersonen wurde darauf geachtet, dass diese einer normalen Arbeitswoche nachgingen und zwischen 19 und 40 Jahren alt waren, um einen Alterseffekt ausschließen zu können (Baudouin et al., 2004; McAuley et al., 2006).

Wie bereits in Studie 3 festgestellt werden konnte, ergaben auch die Ergebnisse dieser Studie, dass die Tageszeit das SMT der Versuchspersonen beeinflusste, denn dieses wurde über den Tag schneller, war also morgens am langsamsten. Entsprechend der Annahme, dass der zirkadiane Rhythmus die Ursache für den Tageszeiteffekt ist, interagierte dieser Effekt mit dem Chronotyp. Hier zeigte sich, dass Versuchspersonen, die dem Morgentyp zugeordnet werden konnten, morgens schneller waren als Abendtypen und Versuchspersonen ohne spezifischen Chronotyp. Das SMT der Morgentypen blieb relativ konstant und zeigte nur geringfügige Veränderungen über den Tag, wohingegen das SMT der Abendtypen schneller wurde. Dies war ebenfalls bei Versuchspersonen ohne spezifischen Chronotypen der Fall, der Anstieg im SMT war bei diesen Versuchspersonen jedoch geringer. Unabhängig von der Tageszeit und dem Chronotypen wurde das SMT auch vom physiologischen Erregungszustand beeinflusst: je höher dieser war, desto schneller war auch das gemessene SMT. Die musikalische Erfahrung beeinflusste das SMT nicht.

6 Diskussion und Implikationen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der im Rahmen dieses Dissertationsprojektes durchgeführten Studien zusammengefasst, interpretiert und unter Berücksichtigung vorangegangener Forschung diskutiert. Abschließend werden die aus der Diskussion resultierenden Implikationen für Wissenschaft und Praxis besprochen.

6.1 Zusammenfassung des Forschungsvorhabens

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, das Erleben von Zeit im Allgemeinen und im Kontext von Musik zu untersuchen und dabei neue Erkenntnisse zu erlangen und das Verständnis bereits bekannter Effekte der Zeitwahrnehmung zu vertiefen. Für die wissenschaftliche Untersuchung des menschlichen Zeiterlebens eignet sich Musik besonders, da diese nicht nur im Alltag vieler Menschen eine wesentliche Rolle spielt und sie damit eine höhere Validität gegenüber Klickreizen besitzt, sondern auch weil Musik als temporale Kunst die Möglichkeit bereitstellt, Zeit präzise zu strukturieren und damit auch zu manipulieren. Dennoch gibt es vergleichsweise wenig Studien, die das Zeiterleben und die Wahrnehmung von Zeitdauern im Kontext von Musik über das *psychologische Jetzt* hinaus (siehe Kapitel 2.3) untersuchen. Studien 1 und 2 untersuchten deshalb mehrere grundlegende Fragen der auditiven Zeitwahrnehmung in Bezug auf die musikalischen Parameter Grundtempo (*Beats per Minute*: BPM) und der metrischen Struktur sowie den personenbezogenen Faktor musikalische Erfahrung. Die konkreten Ziele dieser beiden Studien lagen darin, (1) herauszufinden inwieweit ein schnelleres Grundtempo Dauernbeurteilungen von Zeitdauern im Bereich von 12–23 Sekunden beeinflussen und wie dieser Effekt mit der synchronisierten metrischen Ebene zusammenhängt, (2) wie groß die Tempodifferenz von Musikstücken sein muss, damit ein Zeitverzerrungseffekt eintritt und (3) inwieweit die musikalische Erfahrung für die Prozesse eine Rolle spielt.

Studie 1 konnte hierbei zeigen, dass nicht nur ein schnelleres Grundtempo zu länger eingeschätzten Zeitdauern führt, sondern auch dass die sensomotorische Synchronisation zu unterschiedlichen metrischen Ebenen, die jeweils einem distinktem Tempo entsprechen, die *verbalen Dauerneinschätzungen* beeinflusst. Hierbei führte vor allem eine hohe metrische Ebene (halbe Noten; langsames *Tapping*-Tempo) zu kürzer eingeschätzten Zeitdauern.

Die Ergebnisse der Studie 2 ergab, dass der Zeitverzerrungseffekt des musikalischen Grundtempos von der Messmethode für Dauernbeurteilungen abhängt, da *Dauernreproduktionen* genauere Ergebnisse lieferten als die *verbale Dauerneinschätzung*. Musiker:innen reproduzierten die Zeitdauern der Stimuli etwas genauer als Nichtmusiker:innen. Darüber hinaus ergab sich eine Tempodifferenz von mindestens 20 BPM, damit dieser Effekt auftritt beziehungsweise messbar wird.

Aus theoretischer Sicht waren die Studien 3 und 4 den ersten beiden Studien dahingehend vorangestellt, dass diese die auditive Zeitwahrnehmung nicht durch eine kontrollierte Manipulation externer temporaler Reize untersuchten (d. h. Präsentation von Musik), sondern Unterschiede und Veränderungen der Ursprungsrate der *inneren Uhr* (d. h. die Impulsrate des intrinsischen Zeitgebers ohne Beeinflussung durch externe Reize) direkt untersuchten. Hierbei war es das Ziel dieser Studien, herauszufinden, inwieweit Faktoren wie die Tageszeit, der Erregungszustand und die musikalische Erfahrung generelle Veränderungen in der *inneren Uhr* verursachen und damit potenzielle Unterschiede in der Zeitwahrnehmung nicht nur beim Musikhören erklären können, sondern auch in vielen anderen Alltagssituationen. Ähnlich der Studienlage in Bezug auf Dauernbeurteilungen bei Musik, ergaben sich offene Forschungsfragen bei inter- und intraindividuellen Veränderungen beim spontanen motorischen Tempo (SMT), welches als Indikator der Impulsrate der *inneren Uhr* direkte Einblicke in die Wirkungsmechanismen der auditiven Zeitwahrnehmung ermöglichen kann (siehe Kapitel 3.2).

Studie 3 konnte zeigen, dass das SMT von der Tageszeit beeinflusst wird, wobei das SMT früh am Morgen am langsamsten war. Auch zeigte sich, dass ältere Versuchspersonen ein langsames SMT aufwiesen als jüngere und dass ein erhöhter Erregungszustand das SMT beschleunigt.

Studie 4 ergab, dass der Tageszeiteffekt abhängig von dem jeweiligen Chronotypen der Versuchspersonen ist, da Morgentypen ein schnelleres SMT in den Morgenstunden aufwiesen als Abendtypen. Das SMT von Abendtypen stieg über den Tag deutlich an. Der in Studie 3 beobachtete Effekt des Erregungszustandes konnte bestätigt werden und im SMT ergaben sich hinsichtlich der musikalischen Erfahrung der Versuchspersonen keine Unterschiede.

Im Rahmen dieses Dissertationsprojektes war es nicht möglich, alle offenen Forschungsfragen vollumfassend zu beantworten, jedoch gelang es, neue Erkenntnisse so-

wohl bei der Zeitwahrnehmung von Musik als auch generelle Unterschiede und Veränderungen im SMT zu gewinnen und somit zentrale Fragen der Zeitwahrnehmung beantworten zu können. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Zeitdauer ein und desselben Musikstückes unterschiedlich wahrgenommen werden kann und die Impulsrate der *inneren Uhr* vom zirkadianen Rhythmus abhängt, was für einen Einfluss der *biologische Uhr* auf temporale Prozesse der Kognition spricht.

6.2 Grundtempo und Zeitdauern

Vorangegangene Studien konnten zeigen, dass länger beurteilte Zeitdauern mit schnelleren Grundtempi eines Musikstückes einhergehen. Hierbei wurden Grundtempi von 72 und 184 BPM (Droit-Volet et al., 2013) sowie durchschnittlich 114,2 und 145,4 BPM (Oakes, 2003) genutzt. Studie 1 verwendete Grundtempi von 83, 120 und 150 BPM und fand ebenfalls, dass ein schnelleres Grundtempo der in der Studie verwendeten rhythmisch-musikalischen Stimuli zu länger wahrgenommen Zeitdauern führte. Dieses Ergebnis bestätigt also den Zeitverzerrungseffekt des musikalischen Grundtempos auf die Dauernbeurteilungen. Zusammengenommen zeigen diese drei Studien, dass der Effekt bei unterschiedlich langen Zeitdauern auftritt, konkret zwischen 0,5–6,8 Sekunden (Droit-Volet et al., 2013), 12,8–23,13 Sekunden (Studie 1) und 4–15 Minuten (Oakes, 2003). Auch verwendeten diese Studien unterschiedliche Messmethoden für die Dauernbeurteilungen (*retrospektive Dauerneinschätzung*, *prospektive Dauerneinschätzung* und *temporale Bisektionsaufgabe*⁴), was ebenfalls für die Robustheit dieses Effektes spricht.

Basierend auf den *Pacemaker-Accumulator Models* (siehe Kapitel 2.6.1) kann der Effekt dahingehend erklärt werden, dass schnellere Musik den Erregungszustand erhöht (Husain et al., 2002), was zu einer schnelleren Impulsrate des intrinsischen Zeitgebers führt und dadurch in der gleichen Zeitdauer mehr Impulse im kognitiven Speicher gesammelt werden, was in einer längeren Dauernbeurteilung resultiert. Bezogen auf die *Dynamic Attending Theory* (siehe Kapitel 2.6.2), die von einem dynamisch-oszillatorischen Prozess im Vergleich zu dem linearen System der *Pacemaker-Accumulator Models* als Mechanismus der intrinsischen Zeitgebers ausgeht, resultieren die längeren Dauernbeurteilungen durch eine Kopplung der Aufmerksamkeitsenergie zur *Beat*-Ebene der Musik.

⁴ Bei der *temporalen Bisektionsaufgabe* bekommen Versuchspersonen eine Referenzdauer präsentiert und vergleichen die Zeitdauern der Stimuli zu dieser Referenz. Hierbei geben die Versuchspersonen an, ob ein Stimulus länger oder kürzer als die Referenzdauer war. Dies ist eine weitere Messmethode der Zeitwahrnehmung, sie wurde jedoch nicht in den Studien dieses Dissertationsprojektes verwendet und daher nicht in Kapitel 2.2 bei den gängigsten Messmethoden vorgestellt.

Der intrinsische Zeitgeber erhöht also die Impulsrate aufgrund des neuronalen *Entrainments*.

Ein wichtiger Aspekt dieses Zeitverzerrungseffektes, der sowohl in den vorangegangenen Studien als auch in Studie 1 nicht untersucht worden ist, bezieht sich auf Tempounterschiede in der Musik, also wie groß die Unterschiede im Grundtempo sein müssen, damit diese Unterschiede in länger beurteilten Zeitdauern resultieren (d. h. minimale Tempodifferenzschwelle). Dies wurde in Studie 2 untersucht, wobei Musikstücke mit Grundtempi zwischen 105–125 BPM verwendet worden sind, einem Tempobereich, der dem präferierten wahrgenommenen Tempo von Musik entspricht (Moelants, 2002; van Noorden & Moelants, 1999) und die höchste wahrzunehmende Unterscheidungsfähigkeit aufweist (Drake & Botte, 1993). Zusätzlich sind zwei unterschiedliche Messmethoden der Zeitwahrnehmung verwendet worden (*verbale Dauerneinschätzung* und *Dauernreproduktion*), die sich hinsichtlich der Messgenauigkeit und involvierten kognitiven Prozesse unterscheiden (siehe Kapitel 2.2). Die Ergebnisse ergaben, dass es bei der *verbalen Dauerneinschätzung* keine Unterschiede basierend auf dem Grundtempo gab. Die Zeitdauern bei der *Dauernreproduktion* wurden für Stimuli mit 125 BPM länger reproduziert im Vergleich zu Stimuli mit 105 BPM. Die Ergebnisse deuten also an, dass der minimale Unterschied im Grundtempo von Musik bei 20 BPM liegt. Da die Messgenauigkeit bei *Dauernreproduktionen* höher ist als bei der *verbalen Dauerneinschätzung* (Mioni, 2018), ist davon auszugehen, dass der kleinste Unterschied im Grundtempo für diesen Effekt bei der *verbalen Dauerneinschätzung* nochmals größer sein muss als 20 BPM.

Die Studien 1 und 2 konnten hinsichtlich des Tempos von Musik also zeigen, dass ein schnelleres Grundtempo (BPM) zu längeren Dauernbeurteilungen führt, dass die minimale Differenz von Tempi im präferierten Wahrnehmungsbereich bei ungefähr 20 BPM liegt und diese Differenz abhängig von der Messmethode ist, da ungenauere Dauernbeurteilungen (*verbale Dauerneinschätzung*) eine größere Tempodifferenz als 20 BPM benötigen.

Diese vorgeschlagene minimale Tempodifferenzschwelle von 20–30 BPM (unabhängig von der Messmethode) gilt es weiter zu untersuchen, indem sowohl unterschiedliche Messmethoden und Paradigmen (z. B. *Dauernreproduktion*, *retrospektive Dauernbeurteilung*) als auch unterschiedliche Musik verwendet werden sollten, da in der Studie 2 ausschließlich Musik aus dem Disco-Genre verwendet wurde. Auch sollte dieser Tempo-effekt für andere Tempobereiche außerhalb des präferierten Tempobereichs untersucht

werden, wobei sowohl langsamere (z. B. 60–100 BPM) als auch schnellere (z. B. 130–180 BPM) Tempi verwendet werden sollten. Es ist nicht bekannt, ob die vorgeschlagene minimale Tempodifferenz von 20 BPM auch für andere Tempobereiche gilt. Darüber hinaus sollten unterschiedliche Zeitdauern systematisch untersucht werden, da die vorgeschlagene Schwelle von 20–30 BPM auch je nach Dauer der Musik variieren könnte (Buhusi & Meck, 2005). Um die Rolle unterschiedlicher Gedächtnisprozesse (Arbeitsgedächtnis vs. Langzeitgedächtnis) zu beurteilen, könnte in zukünftigen Studien auch die Zeitdauer zwischen der Präsentation der musikalischen Stimuli und der *Dauernreproduktion* erhöht werden.

6.3 Metrische Ebenen und das (wahrgenommene) Tempo

Ein wesentlicher Aspekt, der bei Dauernbeurteilungen von Musik in vorangegangenen Studien gänzlich außer Acht gelassen wurde, ist, dass Musik aus mehreren metrischen Ebenen besteht, die alle ein distinktes Tempo aufweisen (siehe Kapitel 4.2). Je nachdem auf welcher der metrischen Ebenen Individuen den *Beat* wahrnehmen und damit auch den musikalischen Puls, könnten Individuen also dasselbe Musikstück in unterschiedlichen Tempi hören (Martens, 2011; McKinney & Moelants, 2006; Moelants & McKinney, 2004). Demensprechend war es das vorrangige Ziel der Studie 1 herauszufinden, ob sich dieser Umstand auch in den wahrgenommenen Zeitdauern widerspiegelt, ob die Dauernbeurteilungen derselben Stimuli also von der Kopplung zu unterschiedlichen metrischen Ebenen abhängig sind. Diese gezielte Kopplung wurde anhand der sensomotorischen Synchronisation (*Finger-Tapping* Paradigma) untersucht. Zusätzlich wurden die Zeitdauern auch ohne sensomotorische Synchronisation (SMS) eingeschätzt. Während das Zuhören ohne *Finger-Tapping* zu den längsten und genauesten *verbalen Dauereinschätzungen* führte, wurden die Zeitdauern in den SMS-Bedingungen unterschätzt. Bei der Kopplung mit einer hohen metrischen Ebene (halbe Noten, langsames *Tapping*-Tempo) waren die geschätzten Zeitdauern am kürzesten, und die geschätzten Zeitdauern wurden mit niedrigeren metrischen Ebenen (Viertel- und Achtelnoten, mittleres und schnelles *Tapping*-Tempo) länger.

Daher legen die Ergebnisse der Studie 1 nahe, dass die Konzentration beziehungsweise Kopplung auf höhere metrische Ebenen in der Musik durch die Lenkung von Aufmerksamkeit und motorischer Aktivität (SMS) die wahrgenommene Zeitdauer beeinflusst (vgl. Allingham et al., 2021). Mit anderen Worten: die wahrgenommene Zeitdauern

verändert sich anders für Individuen bei der gleichen Musik, je nach der gewählten metrischen Ebene. Dieses Ergebnis konnte in einer anderen Studie repliziert werden, wobei auch in dieser Studie SMS zu einer höheren metrischen Ebene (halbe Noten) zu kürzeren *verbalen Dauerneinschätzungen* führte im Vergleich zu einer niedrigeren metrischen Ebene (Achtelnoten; Wöllner & Hammerschmidt, 2021). Anstatt rhythmisch-musikalischer Stimuli, wie in Studie 1 dieses Dissertationsprojektes, wurden Musikstücke aus dem Hip-Hop-Genre als Stimuli verwendet.

Das Ergebnis aus Studie 1 lässt sich zum einen durch Aufmerksamkeitsprozesse erklären: Nach dem *Attentional-Gate Model* (Block & Zakay, 1996; Zakay & Block, 1998) haben die Versuchspersonen in der Bedingung ohne *Finger-Tapping* im Vergleich zu den SMS-Bedingungen der *verbalen Dauerneinschätzung* möglicherweise mehr Aufmerksamkeitsressourcen zugewiesen, so das „Aufmerksamkeitstor“ weiter geöffnet war und mehr Impulse des Zeitgebers in den kognitiven Speicher gelangten, was in länger und genauer wahrgenommenen Zeitdauern resultierte. Wenn die Versuchspersonen hingegen zu den Stimuli klopften, wurde dem *Finger-Tapping* ebenfalls Aufmerksamkeitsressourcen zugewiesen, wodurch sich das „Tor“ weiter schloss, weniger Impulse in den kognitiven Speicher gelangten und dadurch die Zeitdauern kürzer beurteilt wurden. Je schneller das *Tapping*-Tempo in den SMS-Bedingungen, also je niedriger die metrische Ebene, desto länger wurden die Zeitdauern eingeschätzt.

Nach den *Pacemaker-Accumulator Models* führte das schnellere *Tapping*-Tempo zu einem höheren Erregungszustand, wodurch sich die Impulsrate des intrinsischen Zeitgebers erhöhte und mehr Impulse in den kognitiven Speicher gelangten (siehe Kapitel 2.6). Die Interaktion zwischen SMS-Bedingungen und den rhythmisch-musikalischen Stimuli weist darauf hin, dass die musikalischen Parameter der Stimuli die Zeitschätzungen beeinflussten, insbesondere auf der Viertel- und Achtelnotenebene. Der zeitverkürzende Effekt bei einer SMS zu den halben Noten war hierbei für Stimuli mit hoher und mittlerer *Beat*-Salienz besonders deutlich (Burger et al., 2013; Stupacher et al., 2016; siehe Kapitel 4.2.1). Die Ergebnisse der Studie 1 zeigen also, dass ein und dasselbe Musikstück zu unterschiedlichem Zeiterleben führen kann.

6.4 Intra-und interindividuelle Unterschiede der inneren Uhr

Die Ursprungsrate des intrinsischen Zeitgebers ist für die Zeitwahrnehmung von entscheidender Bedeutung, da sie beeinflusst, auf welcher metrischen Ebene der Puls eines Musikstückes wahrgenommen wird (siehe Kapitel 2.6.2 und 4.2). Zudem hängt sie eng mit dem präferierten Wahrnehmungstempo von Musik (PPT) sowie der spontanen Produktionsrate von Musik (SPR) zusammen (siehe Kapitel 3.2). Unterschiede und Veränderungen in der Ursprungsrate dieser *inneren Uhr* wurden in den Studien 3 und 4 anhand des SMT untersucht.

Hauptaugenmerk lag dabei auf der Untersuchung des Einflusses der Tageszeit, da vorangegangene Studien von einer Beschleunigung des SMT am Morgen und einer Verlangsamung am Abend berichteten (Dosseville et al., 2002; Moussay et al., 2002). Diese Ergebnisse wurden dahingehend interpretiert, dass das SMT unter dem Einfluss des zirkadianen Rhythmus steht. Damit stimmten die Ergebnisse der Studie 3 überein: je früher am Tag, desto langsamer auch das SMT der Versuchspersonen.

Studie 4 konnte ebenfalls zeigen, dass das SMT am Morgen am langsamsten ist und sich über den Tag beschleunigt. Auch Moussay et al. (2002) berichteten über eine Verlangsamung des SMT zwischen 18:00 und 22:00 Uhr, die aufgrund der zyklischen Natur der *biologischen Uhr* (d. h. zirkadianer Rhythmus) erwartet worden war. Obwohl in Studie 4 eine leichte Abnahme des SMT zum Abend hin zu beobachten war, konnte die Verlangsamung in den Abendstunden nicht eindeutig nachgewiesen werden. Dies könnte im Vergleich zu Moussay und Kolleg:innen aufgrund des Zeitraums der Datenerhebung erklärt werden. Da die Tageslänge (Anzahl der Sonnenstunden) in Abhängigkeit von den verschiedenen Jahreszeiten variiert, könnten die Daten dieser beiden Studien zu unterschiedlichen Zeiträumen im Jahr erhoben worden sein. Die Datenerhebung der Studie 4 erfolgte im Sommer mit einer durchschnittlichen Tageslänge von etwa 16 Stunden während der Testwoche. Diese langen Sonnenstunden könnten die Verlangsamung des SMT am Abend abgeschwächt haben, da sie das Schlafschema beeinflussen können. Daher sollte der Einfluss der Tageslänge auf die Veränderungen des SMT im Laufe des Tages weiter untersucht werden.

Ein weiterer Grund, der diesen Unterschied verursacht haben könnte, ist die Verteilung der Chronotypen. In der Studie 4 waren die Chronotypen normal verteilt und zeigten keine Tendenz hin zu einer Überrepräsentation eines bestimmten Chronotyps, was in der Stichprobe von Moussay und Kolleg:innen möglicherweise anders gewesen sein

könnte und sich wiederum auf ihre Ergebnisse auswirkte. Darüber hinaus fand eine aktuelle Studie zu Schlafmustern während des COVID-19 *Lockdowns* eine Verschiebung hin zu späteren Schlaf- und Wachzeiten (Gupta et al., 2020). Da die Datenerhebung für diese Studie nach dem *Lockdown* durchgeführt wurde, könnte sich dieser Effekt auf die Zeit nach dem *Lockdown* übertragen haben, was dazu führte, dass sich das SMT in den Abendstunden geringerfügiger verlangsamte.

Darüber hinaus zeigte Studie 4, dass der Tageszeiteffekt mit dem Chronotypen interagiert, der die individuelle Präferenz im Schlaf- und Aktivitätszyklus beschreibt (Roenneberg et al., 2003) und sowohl sensomotorische als auch kognitive Fähigkeiten beeinflusst (siehe Kapitel 3.3). Die Ergebnisse zeigten, dass Versuchspersonen, die dem Morgentyp zugeordnet werden konnten, ein schnelleres SMT in den Morgenstunden im Vergleich zu Versuchspersonen ohne spezifischen Chronotypen oder Abendtypen haben. Das SMT der Morgentypen wurde im Laufe des Tages nur geringfügig schneller, während das SMT der Abendtypen einen größeren Anstieg aufwies, was auf eine Verschiebung der Phasenreferenz im Schlafrhythmus hindeutet. Damit zeigt diese Studie erstmals, dass die interindividuellen Unterschiede in den Veränderungen des SMT im Tagesverlauf teilweise durch den Chronotyp erklärt werden können. Daraus folgt, dass das SMT in die Liste der sensomotorischen chronotypabhängigen Leistungsaufgaben aufgenommen werden sollte (Tamm et al., 2009; van Vugt et al., 2013; Wright & Palmer, 2020).

Die signifikante Wechselwirkung zwischen Tageszeit und Chronotyp unterstützt die Annahme eines direkten Zusammenhangs zwischen der Geschwindigkeit des SMT und dem zirkadianen Rhythmus und damit der *biologischen Uhr*. Die Ergebnisse der Studien 3 und 4, sowie frühere Studien, konnten also einen konsistenten Einfluss der Tageszeit auf die Geschwindigkeit des SMT bei verschiedenen Personengruppen, anhand unterschiedlicher Paradigmen (*Finger-Tapping*, Radfahren) und Methoden (laborbasiert und online), sowie Testzeiten berichteten (Dosseville et al., 2002; Moussay et al., 2002). Somit legen die Ergebnisse dieser Studie nahe, dass die spontane und bevorzugte Geschwindigkeit periodischer motorischer Aktionen tatsächlich vom zirkadianen Rhythmus der *biologischen Uhr* beeinflusst werden könnte.

Der in vorangegangenen Studien berichtete Effekt, dass ein erhöhter Erregungszustand zu einem schnelleren SMT führt (Boltz, 1994; Dosseville et al., 2002), konnte ebenfalls in den Studien 3 und 4 dieses Dissertationsprojektes nachgewiesen werden. Die Ergebnisse der Studie 4 konnten darüber hinaus zeigen, dass dieser Effekt unabhängig

von der Tageszeit ist. Diese Ergebnisse stehen damit im Gegensatz zu der Studie von Sysoeva et al. (2013), die keinen Einfluss des Erregungszustandes auf das SMT feststellen konnten. Die Gesamtzahl der Studien betrachtend scheint es also wahrscheinlicher, dass es eine direkte Verbindung des physiologischen Erregungszustandes und dem SMT gibt. Studien 3 und 4 unterstützen zum einen die Annahme, dass das SMT als Indikator des intrinsischen Zeitgebers gelten kann, da die *Pacemaker-Accumulator Models* von einem direkten Einfluss des Erregungszustandes auf den Zeitgeber ausgehen (siehe Kapitel 2.6.1 und 3.2). Zum anderen entsprechen diese Befunde der *Preferred Period Hypothesis*, die von einem gemeinsamen Mechanismus für Wahrnehmung und rhythmisch-motorisches Verhalten ausgeht (McAuley et al., 2006), da ein höherer Erregungszustand auch das präferierte Tempo für die Wahrnehmung (PPT) von Musik erhöht (Holbrook & Anand, 1990; Jakubowski et al., 2015).

Darüber hinaus konnte Studie 3 einen Alterseffekt feststellen, da ältere Versuchspersonen ein langsames SMT hatten als jüngere Versuchspersonen. Dieses Ergebnis bestätigt frühere Studien in Bezug auf SMT-Unterschiede verschiedener Altersgruppen, die ebenfalls diesen Alterseffekt feststellten (Baudouin et al., 2004; McAuley et al., 2006; Monier & Droit-Volet, 2018, 2019; Provasi & Bobin-Bègue, 2003). In Studie 3 lag das Alter der Versuchspersonen zwischen 7 und 49 Jahren. Während die Studie von Baudouin et al. (2004) ergab, dass ältere Individuen (66–94 Jahre) ein SMT von bis zu 1.125 Millisekunden bevorzugen legen die Ergebnisse der Studie 3 nahe, dass eine solche Verlangsamung auch schon bei jüngeren Erwachsenen (18–49 Jahre) auftreten kann. Während bei älteren Menschen von einer Verlangsamung des intrinsischen Zeitmessers und damit einem altersbedingten Rückgang der Verhaltens- und Verarbeitungsgeschwindigkeit ausgegangen werden kann (Surwillo, 1968), könnte eine solche Verlangsamung bereits in jüngeren Jahren beginnen. Dies steht im Einklang mit früheren Studien, die kognitive Alterungseffekte bei Gedächtnisprozessen und bei der mentalen Geschwindigkeit ab 20 Jahren zeigten (Salthouse, 2010). Diese Ergebnisse könnten auf einen höheren Ressourcenbedarf bei schnellerer Informationsverarbeitung bei Erwachsenen mittleren Alters hinweisen (bis 49 Jahre), da die Verarbeitungsgeschwindigkeit ein Mediator für das Arbeitsgedächtnis und das SMT ist (Baudouin et al., 2004). Zukünftige Studien sollten dies weiter untersuchen, indem sie sich explizit auf Erwachsene zwischen 20 und 60 Jahren konzentrieren.

6.5 Zeitwahrnehmung und musikalische Erfahrung

Eines der Ziele dieses Dissertationsprojektes war es zu ermitteln, welche Rolle die musikalische Erfahrung bei der Zeitwahrnehmung in generellen und in musikalischen Kontexten spielt, also ob es systematische Unterschiede in Abhängigkeit von der musikalischen Erfahrung in den Dauernbeurteilungen und bei der Ursprungrate der *inneren Uhr* gibt. Aus diesem Grund ist diese in allen vier Studien mit erhoben worden. Die Studienlage zu der Dauerwahrnehmung von Musikstücken beziehungsweise von längeren Ausschnitten von Zeitdauern kann als gering bezeichnet werden (siehe Kapitel 4.2.2). Es ist zwar bekannt, dass Musiker:innen oder musikalisch erfahrene Individuen dazu neigen, Musik in größeren Strukturen wahrzunehmen (Drake, Penel & Bigand, 2000; Martens, 2011; McAuley & Semple, 1999) und sich zu Musik genauer sensomotorisch synchronisieren können (Repp, 2010; Scheurich et al., 2018); ob sich diese musikalischen Fähigkeiten jedoch auch auf die Dauernbeurteilungen von Musikstücken auswirken, wurde in vorangegangenen Studien nicht untersucht.

Die Ergebnisse der Studien 1 und 2 ergaben, dass es zwischen Musiker:innen und Nichtmusiker:innen keine Unterschiede in den *verbalen Dauerneinschätzungen* von rhythmisch-musikalischen Stimuli und Disco-Songs gab. Hinsichtlich der Reproduktion der Zeitdauern konnte jedoch ein geringer Unterschied festgestellt werden, denn die Ergebnisse aus Studie 2 deuten darauf hin, dass Musiker:innen die Stimulidauern etwas genauer reproduzierten als Nichtmusiker:innen. Der Unterschied in der *Dauernreproduktion* könnte durch ein verbessertes Gedächtnis für musikalische Strukturen und eine stärkere Kodierung von musikalischen Parametern wie dem Tempo erklärt werden, was wiederum zu einem Transfervorteil bei der *Dauernreproduktion* im Vergleich zu Nichtmusiker:innen führt. Dies kann an der durch Übung verbesserten Fähigkeit von Musiker:innen liegen, ein Musikstück mental wiederzugeben und es sich präzise vorstellen zu können (Grondin & Killeen, 2009). Im Gegensatz dazu beruht die *verbale Dauerschätzung* mehr auf dem Referenzgedächtnis für numerische Zeiteinheiten und der Übersetzung der Zeitdauererfahrung in diese Einheiten (Mioni, 2018; Zakay, 1990). Die Genauigkeit dieser Übersetzung profitiert jedoch nicht direkt von der musikalischen Erfahrung, da es sich nicht um eine musikalische Aufgabe an sich handelt.

Hinsichtlich des spontanen motorischen Tempos (SMT) fand eine Studie ein langsames SMT bei Kindern mit Instrumentalunterricht im Vergleich zu Kindern ohne solchen Unterricht, jedoch konnte dieser Effekt bei Erwachsenen nicht festgestellt werden

(Drake, Jones & Baruch, 2000). Die Ergebnisse der Studie 3 ergaben, dass musikalisch erfahrenere Versuchspersonen ein langsames SMT bevorzugten. Gruppieren in sechs verschiedene SMT-Gruppen, die von einem sehr schnellen bis zu einem sehr langsamen Tempo reichten, zeigte dieselbe Studie jedoch in einer weiteren statistischen Analyse den gegenteiligen Effekt, da eine langsame Gruppe die geringste musikalische Erfahrung aufwies. In Studie 4 konnte kein Effekt der musikalischen Erfahrung auf das SMT festgestellt werden. Die eindeutigen Ergebnisse der Studie 4 und die schwer zu interpretierenden Ergebnisse der Studie 3 deuten deshalb darauf hin, dass die musikalische Erfahrung das SMT nicht beeinflusst; insbesondere auch da es keine theoretische Erklärung dafür gibt, wie sich die durch musikalisches Training verbesserten kognitiven Fähigkeiten auf die relativ einfache motorische Aufgabe des *Finger-Tappings* beim SMT übertragen sollten. Es ist wichtig anzumerken, dass sich das SMT von sensomotorischer Synchronisation (SMS) unterscheidet, bei der insbesondere bei komplexeren SMS-Aufgaben deutliche Effekte des musikalischen Trainings auftreten (McAuley & Semple, 1999; Repp, 2010; Scheurich et al., 2018). SMS beinhaltet eine zeitliche Vorhersage zukünftig eintretender Ereignisse, eine Fehlerkorrektur bei falscher oder ungenauer Synchronisation und adaptives *Timing* (van der Steen & Keller, 2013); dabei handelt es sich um Prozesse, die die weniger komplexe SMT-Aufgabe nicht direkt beeinflussen.

Zusammenfassend sprechen die Ergebnisse der vier Studien dafür, dass die musikalische Erfahrung die auditive Zeitwahrnehmung nicht generell beeinflusst, denn weder ergaben sich Unterschiede bei der *verbalen Dauerneinschätzung*, noch zeigten sich eindeutige Unterschiede im SMT und damit in der Ursprungsrate des intrinsischen Zeitgebers. Nur bei der *Dauernreproduktion* zeigte sich, dass Musiker:innen die Zeitdauern der Musikausschnitte etwas genauer beurteilen können, was durch ein präziseres Gedächtnis für musikalische Tempi erklärt werden kann. Weitere Studien sind jedoch nötig, um ein genaueres Bild potenzieller Unterschiede zu erlangen. So könnten zukünftige Studien spezifische musikalische Fähigkeiten in Bezug auf temporale Informationsverarbeitung untersuchen. Dass diese Fähigkeiten die Ursprungsrate der *inneren Uhr* generell beeinflussen, scheint jedoch unwahrscheinlich.

6.6 Implikationen für Wissenschaft und Praxis

Aus den Ergebnissen der im Rahmen dieses Dissertationsprojektes durchgeführten Studien ergeben sich eine Reihe von Implikationen für die Erforschung der auditiven Zeitwahrnehmung bei Musik und auch darüber hinaus.

Im wissenschaftlichen Kontext sollten zukünftige Studien zur Zeitwahrnehmung musikalischer Reize vor allem die *Beat*-Salienz der verwendeten Musik berücksichtigen. Komplexe musikalische Strukturen können inter- und intraindividuelle Mehrdeutigkeiten bei der gewählten metrischen Ebene hervorrufen und damit potenziell auch unterschiedliche wahrgenommene Tempi induzieren, die sich entsprechend auf die wahrgenommenen Zeitdauern auswirken können. Darüber hinaus gilt es zu untersuchen, ob die ermittelte Tempodifferenz von 20 BPM, ab der eine messbare Zeitverzerrung in den Dauernbeurteilungen auftritt, generelle Gültigkeit hat oder ob es Unterschiede in Bezug auf unterschiedliche Tempobereiche gibt (z. B. langsame Tempi: 60–100 BPM).

Die Ergebnisse dieses Dissertationsprojektes sprechen auch dafür, dass das spontane motorische Tempo (SMT) unter direktem Einfluss des zirkadianen Rhythmus und damit *der biologischen Uhr* steht und könnte somit eine nützliche und einfache Methode darstellen, den zirkadianen Rhythmus von Versuchspersonen zu bestimmen. Das SMT sollte deshalb in die Liste chronotypabhängiger Leistungsmessungen aufgenommen werden. Basierend auf der *Preferred Period Hypothesis* könnte dieses Ergebnis auch darauf hindeuten, dass auch das präferierte Wahrnehmungstempo von Musik von der *biologischen Uhr* beeinflusst wird, sich die Präferenz also in Abhängigkeit der Tageszeit und des Chronotypen unterscheiden. Dies würde bedeuten, dass unterschiedliche Musik zu unterschiedlichen Phasen eines Tages (un-)bewusst aufgrund biologischer Faktoren zum Hören gewählt wird. Dieser Annahme gilt es in zukünftigen Studien zu untersuchen, wobei hierbei jedoch die intendierte Wirkung der Musikauswahl berücksichtigt werden muss.

Weiterhin gilt es die Rolle der musikalischen Erfahrung zu untersuchen. Zwar sprechen die Ergebnisse dieses Dissertationsprojektes für keinen generellen Unterschied in der Zeitwahrnehmung bezüglich der Ursprungsraten der *inneren Uhr*, jedoch zeigten sich Unterschiede in einzelnen Messmethoden, was mit den involvierten kognitiven Prozessen zusammenhängen könnte. Welche Messmethoden von wahrgenommenen Zeitdauern und welche zeitlichen Intervalle potenziell von musikalischen Fähigkeiten profitieren könnten, sollte in weiteren Studien untersucht werden.

Über musikalische Kontexte hinaus konnte dieses Dissertationsprojekt zeigen, dass das SMT den generellen *Sweet Spot* für die Vorhersage temporaler Information angibt, was die Verarbeitung eingehender Hörereignisse wie Sprache verbessert, da die zeitliche Genauigkeit mit der Aufmerksamkeit und dem Arbeitsgedächtnis zusammenhängt (Ding et al., 2017; Kliger Amrani & Zion Golumbic, 2020). Somit kann sich das optimale *Timing* in Bezug auf die temporalen Aspekte dieser kognitiven Prozesse in Abhängigkeit der *biologischen Uhr* eines Individuums ändern, eine Annahme, die weiterer Untersuchungen bedarf.

Im praktischen Kontext ergeben sich ebenfalls einige Implikationen: Unter der Annahme eines gemeinsamen Mechanismus für Wahrnehmung und rhythmisches motorisches Verhalten (siehe Kapitel 3.2.) deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass Tempopräferenzen und die zeitliche Genauigkeit beim Musizieren auch von der *biologischen Uhr* beeinflusst werden können (McAuley et al., 2006; Wright & Palmer, 2020), von daher könnte es einen idealen Zeitpunkt geben, ein bestimmtes Musikstück basierend auf seinem Tempo zu üben. In Bezug auf die auditive Wahrnehmung kann sich die Tempopräferenz beim Musikhören in Abhängigkeit von der Tageszeit ändern und sollte daher ein nützliches Kriterium für die Wahl der Hintergrundmusik in der Öffentlichkeit sein, um das musikalische Tempo an die *biologische Uhr* des Hörers anzupassen. Bei der Auswahl geeigneter Musik für solche Situationen, wie beispielsweise in Wartesituationen oder kommerziellen Anwendungen in Supermärkten oder Restaurants, sollte ebenfalls auf die *Beat-Salienz* geachtet werden, wenn ein möglichst zielgerichtetes zeitliches Erleben sichergestellt werden soll.

Abschließend bleibt festzustellen, dass das menschliche Zeiterleben sowohl von externen Ereignissen als auch von personenbezogenen Faktoren beeinflusst und gesteuert wird. Musik besitzt die Fähigkeit diese Prozesse zu manipulieren und so den Zeitverlauf zu verlangsamen oder zu beschleunigen.

7 Literaturverzeichnis

- Allingham, E., Hammerschmidt, D. & Wöllner, C. (2021). Time perception in human movement: Effects of speed and agency on duration estimation. *Quarterly Journal of Experimental Psychology (2006)*, 74(3), 559–572.
<https://doi.org/10.1177/1747021820979518>
- Allman, M. J. & Meck, W. H. (2012). Pathophysiological distortions in time perception and timed performance. *Brain*, 135(3), 656–677.
<https://doi.org/10.1093/brain/awr210>
- Allman, M. J., Teki, S., Griffiths, T. D. & Meck, W. H. (2014). Properties of the internal clock: First- and second-order principles of subjective time. *Annual Review of Psychology*, 65(1), 743–771. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010213-115117>
- Alluri, V. & Toiviainen, P. (2010). Exploring perceptual and acoustical correlates of polyphonic timbre. *Music Perception*, 27(3), 223–242.
<https://doi.org/10.1525/mp.2010.27.3.223>
- Angrilli, A., Cherubini, P., Pavese, A. & Manfredini, S. (1997). The influence of affective factors on time perception. *Perception & Psychophysics*, 59(6), 972–982.
<https://doi.org/10.3758/BF03205512>
- Assaneo, M. F. & Pöppel, D. (2018). The coupling between auditory and motor cortices is rate-restricted: Evidence for an intrinsic speech-motor rhythm. *Science Advances*, 4(2), eaao3842. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao3842>
- Baudouin, A., Vanneste, S. & Isingrini, M. (2004). Age-related cognitive slowing: The role of spontaneous tempo and processing speed. *Experimental Aging Research*, 30(3), 225–239. <https://doi.org/10.1080/03610730490447831>
- Baudouin, A., Vanneste, S., Isingrini, M. & Pouthas, V. (2006). Differential involvement of internal clock and working memory in the production and reproduction of duration: A study on older adults. *Acta Psychologica*, 121(3), 285–296.
<https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2005.07.004>
- Block, R. A. (2003). Psychological timing without a timer: The roles of attention and memory. In H. Helfrich (Hrsg.), *Time and mind II: Information processing perspectives* (S. 41–59). Hogrefe und Huber.
- Block, R. A., Grondin, S. & Zakay, D. (2018). Prospective and retrospective timing processes: Theories, methods, and findings. In A. Vatakis, F. Balci, M. Di Luca &

- Á. Correa (Hrsg.), *Timing and time perception: Procedures, measures, and applications* (S. 32–51). BRILL. https://doi.org/10.1163/9789004280205_003
- Block, R. A., Hancock, P. A. & Zakay, D. (2010). How cognitive load affects duration judgments: A meta-analytic review. *Acta Psychologica*, *134*(3), 330–343. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.03.006>
- Block, R. A. & Zakay, D. (1996). Models of psychological time revisited. In H. Helfrich (Hrsg.), *Time and mind* (S. 171–195). Hogrefe & Huber.
- Block, R. A. & Zakay, D. (1997). Prospective and retrospective duration judgments: A meta-analytic review. *Psychonomic Bulletin & Review*, *4*(2), 184–197. <https://doi.org/10.3758/BF03209393>
- Block, R. A. & Zakay, D. (2008). Timing and remembering the past, the present, and the future. In S. Grondin (Hrsg.), *Psychology of time* (1. Aufl., S. 367–394). Emerald.
- Boltz, M. G. (1994). Changes in internal tempo and effects on the learning and remembering of event durations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *20*(5), 1154–1171. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.20.5.1154>
- Boltz, M. G. (1995). Effects of event structure on retrospective duration judgments. *Perception & Psychophysics*, *57*(7), 1080–1096. <https://doi.org/10.3758/BF03205466>
- Boltz, M. G. (2011). Illusory tempo changes due to musical characteristics. *Music Perception*, *28*(4), 367–386. <https://doi.org/10.1525/mp.2011.28.4.367>
- Bouwer, F. L., Burgoyne, J. A., Odijk, D., Honing, H. & Grahn, J. A. (2018). What makes a rhythm complex? The influence of musical training and accent type on beat perception. *PLOS ONE*, *13*(1), e0190322. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190322>
- Bove, M., Tacchino, A., Pelosin, E., Moisello, C., Abbruzzese, G. & Ghilardi, M. F. (2009). Spontaneous movement tempo is influenced by observation of rhythmical actions. *Brain Research Bulletin*, *80*(3), 122–127. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2009.04.008>
- Brown, S. W. (1997). Attentional resources in timing: Interference effects in concurrent temporal and nontemporal working memory tasks. *Perception & Psychophysics*, *59*(7), 1118–1140. <https://doi.org/10.3758/BF03205526>

- Brown, S. W. & Boltz, M. G. (2002). Attentional processes in time perception: Effects of mental workload and event structure. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28(3), 600–615.
<https://doi.org/10.1037/0096-1523.28.3.600>
- Buhusi, C. V. & Meck, W. H. (2005). What makes us tick? Functional and neural mechanisms of interval timing. *Nature Reviews: Neuroscience*, 6(10), 755–765.
<https://doi.org/10.1038/nrn1764>
- Buhusi, C. V. & Meck, W. H. (2009). Relative time sharing: New findings and an extension of the resource allocation model of temporal processing. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 364(1525), 1875–1885. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0022>
- Buonomano, D. V. (2007). The biology of time across different scales. *Nature Chemical Biology*, 3(10), 594–597. <https://doi.org/10.1038/nchembio1007-594>
- Burger, B., Ahokas, R., Keipi, A. & Toiviainen, P. (2013). Relationships between spectral flux, perceived rhythmic strength, and the propensity to move. In R. Bresin (Hrsg.), *Proceedings of the Sound and Music Computing Conference 2013* (S. 179–184). Logos.
- Burger, B., London, J., Thompson, M. R. & Toiviainen, P. (2018). Synchronization to metrical levels in music depends on low-frequency spectral components and tempo. *Psychological Research*, 82(6), 1195–1211.
<https://doi.org/10.1007/s00426-017-0894-2>
- Burger, B., Thompson, M. R., Luck, G., Saarikallio, S. H. & Toiviainen, P. (2014). Hunting for the beat in the body: On period and phase locking in music-induced movement. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 903.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00903>
- Burle, B. & Casini, L. (2001). Dissociation between activation and attention effects in time estimation: Implications for internal clock models. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(1), 195–205.
<https://doi.org/10.1037/0096-1523.27.1.195>
- Cameron, M. A., Baker, J., Peterson, M. & Braunsberger, K. (2003). The effects of music, wait-length evaluation, and mood on a low-cost wait experience. *Journal of Business Research*, 56(6), 421–430. [https://doi.org/10.1016/S0148-2963\(01\)00244-2](https://doi.org/10.1016/S0148-2963(01)00244-2)

- Church, R. M. (2003). A concise introduction to the scalar timing theory. In W. H. Meck (Hrsg.), *Methods and new frontiers in neuroscience. Functional and neural mechanisms of interval timing* (S. 3–22). CRC Press.
- Collyer, C. E., Broadbent, H. A. & Church, R. M. (1992). Categorical time production: Evidence for discrete timing in motor control. *Perception & Psychophysics*, *51*(2), 134–144. <https://doi.org/10.3758/bf03212238>
- Collyer, C. E., Broadbent, H. A. & Church, R. M. (1994). Preferred rates of repetitive tapping and categorical time production. *Perception & Psychophysics*, *55*(4), 443–453. <https://doi.org/10.3758/bf03205301>
- Cooper, G. W. & Meyer, L. B. (1960). *The rhythmic structure of music*. University of Chicago Press.
- Creelman, C. D. (1962). Human discrimination of auditory duration. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *34*(5), 582–593. <https://doi.org/10.1121/1.1918172>
- Delevoeye-Turrell, Y. N., Dione, M. & Agneray, G. (2014). Spontaneous motor tempo is the easiest pace to act upon for both the emergent and the predictive timing modes. *Procedia: Social and Behavioral Sciences*, *126*, 121–122. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.02.338>
- Denner, B., Wapner, S., McFarland, J. H. & Werner, H. (1963). Rhythmic activity and the perception of time. *The American Journal of Psychology*, *76*(2), 287. <https://doi.org/10.2307/1419166>
- Ding, N., Patel, A. D., Chen, L., Butler, H., Luo, C. & Pöppel, D. (2017). Temporal modulations in speech and music. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *81*(Pt B), 181–187. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.02.011>
- Dosseville, F., Moussay, S., Larue, J., Gauthier, A. & Davenne, D. (2002). Physical exercise and time of day: Influences on spontaneous motor tempo. *Perceptual and Motor Skills*, *95*(3 Pt 1), 965–972. <https://doi.org/10.1177/003151250209500301>
- Drake, C. & Botte, M.-C. (1993). Tempo sensitivity in auditory sequences: Evidence for a multiple-look model. *Perception & Psychophysics*, *54*(3), 277–286. <https://doi.org/10.3758/BF03205262>
- Drake, C., Gros, L. & Penel, A. (1999). How fast is the music? The relation between physical and perceived tempo. In S.-W. Yi (Hrsg.), *Music, Mind, and Science* (S. 190–203). Seoul National University Press.

- Drake, C., Jones, M. R. & Baruch, C. (2000). The development of rhythmic attending in auditory sequences: Attunement, referent period, focal attending. *Cognition*, 77(3), 251–288. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(00\)00106-2](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(00)00106-2)
- Drake, C., Penel, A. & Bigand, E. (2000). Tapping in time with mechanically and expressively performed music. *Music Perception*, 18(1), 1–23. <https://doi.org/10.2307/40285899>
- Droit-Volet, S., Bigand, E., Ramos, D. & Bueno, J. L. O. (2010). Time flies with music whatever its emotional valence. *Acta Psychologica*, 135(2), 226–232. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.07.003>
- Droit-Volet, S. & Gil, S. (2009). The time-emotion paradox. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 364(1525), 1943–1953. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0013>
- Droit-Volet, S., Mermillod, M., Cocenas-Silva, R. & Gil, S. (2010). The effect of expectancy of a threatening event on time perception in human adults. *Emotion*, 10(6), 908–914. <https://doi.org/10.1037/a0020258>
- Droit-Volet, S., Ramos, D., Bueno, J. L. O. & Bigand, E. (2013). Music, emotion, and time perception: The influence of subjective emotional valence and arousal? *Frontiers in Psychology*, 4, 417. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00417>
- Droit-Volet, S. & Wearden, J. H. (2001). Temporal bisection in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 80(2), 142–159. <https://doi.org/10.1006/jecp.2001.2631>
- Eisler, H. & Eisler, A. D. (1992). Time perception: Effects of sex and sound intensity on scales of subjective duration. *Scandinavian Journal of Psychology*, 33(4), 339–358. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9450.1992.tb00923.x>
- Eisler, H., Eisler, A. D. & Hellström, Å. (2008). Psychophysical issues in the study of time perception. In S. Grondin (Hrsg.), *Psychology of time* (1. Aufl., S. 75–110). Emerald.
- Eitan, Z. & Granot, R. Y. (2009). Primary versus secondary musical parameters and the classification of melodic motives. *Musicae Scientiae*, 13(1_suppl), 139–179. <https://doi.org/10.1177/102986490901300107>
- Epstein, D. (1995). *Shaping time: Music, the brain and performance*. Schirmer Books.

- Fisher, J. P. (2014). Autonomic control of the heart during exercise in humans: Role of skeletal muscle afferents. *Experimental Physiology*, *99*(2), 300–305.
<https://doi.org/10.1113/expphysiol.2013.074377>
- Fraisse, P. (1957). *Psychologie du temps*. Presses universitaires de France. <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/30484>
- Fraisse, P. (1978). Time and rhythm perception. In E. C. Carterette & M. P. Friedman (Hrsg.), *Handbook of perception: Bd. 8. Perceptual coding* (S. 203–254). Academic Press.
- Fraisse, P. (1982). Rhythm and tempo. In D. Deutsch (Hrsg.), *The psychology of music* (S. 149–180). Academic Press.
- Fraisse, P. (1984). Perception and estimation of time. *Annual Review of Psychology*, *35*(1), 1–36. <https://doi.org/10.1146/annurev.ps.35.020184.000245>
- François, M. (1927). Contributions à l'étude du sens du temps: La température interne comme facteur de variation de l'appréciation subjective des durées. *L'Année Psychologique*, *27*, 186–204.
- Friberg, A. & Sundberg, J. (1995). Time discrimination in a monotonic, isochronous sequence. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *98*(5), 2524–2531.
<https://doi.org/10.1121/1.413218>
- Gibbon, J. (1977). Scalar expectancy theory and Weber's law in animal timing. *Psychological Review*, *84*(3), 279–325. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.84.3.279>
- Gibbon, J., Church, R. M. & Meck, W. H. (1984). Scalar timing in memory. In J. Gibbon & L. Allan (Hrsg.), *Annals of the New York Academy of Sciences: Bd. 423. Timing and time perception* (S. 52–77). New York Academy of Sciences.
- Gil, S. & Droit-Volet, S. (2012). Emotional time distortions: The fundamental role of arousal. *Cognition & Emotion*, *26*(5), 847–862.
<https://doi.org/10.1080/02699931.2011.625401>
- Goodman, L., Riley, M. A., Mitra, S. & Turvey, M. T. (2000). Advantages of rhythmic movements at resonance: Minimal active degrees of freedom, minimal noise, and maximal predictability. *Journal of Motor Behavior*, *32*(1), 3–8.
<https://doi.org/10.1080/00222890009601354>
- Grommet, E. K., Droit-Volet, S., Gil, S., Hemmes, N. S., Baker, A. H. & Brown, B. L. (2011). Time estimation of fear cues in human observers. *Behavioural Processes*, *86*(1), 88–93. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2010.10.003>

- Grondin, S. (2001). From physical time to the first and second moments of psychological time. *Psychological Bulletin*, *127*(1), 22–44. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.127.1.22>
- Grondin, S. (2008). Methods for studying psychological time. In S. Grondin (Hrsg.), *Psychology of time* (1. Aufl., S. 51–74). Emerald.
- Grondin, S. (2010). Timing and time perception: A review of recent behavioral and neuroscience findings and theoretical directions. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *72*(3), 561–582. <https://doi.org/10.3758/APP.72.3.561>
- Grondin, S. & Killeen, P. R. (2009). Tracking time with song and count: Different Weber functions for musicians and nonmusicians. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *71*(7), 1649–1654. <https://doi.org/10.3758/APP.71.7.1649>
- Grondin, S. & Macar, F. (1992). Dividing attention between temporal and nontemporal tasks: A performance operating characteristic -POC- analysis. In F. Macar, V. Pouthas & W. J. Friedman (Hrsg.), *Time, action and cognition: Towards bridging the gap* (S. 119–128). Springer Netherlands.
- Grondin, S., Meilleur-Wells, G. & Lachance, R. (1999). When to start explicit counting in a time-intervals discrimination task: A critical point in the timing process of humans. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *25*(4), 993–1004. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.25.4.993>
- Gupta, R., Grover, S., Basu, A., Krishnan, V., Tripathi, A., Subramanyam, A., Nischal, A., Hussain, A., Mehra, A., Ambekar, A., Saha, G., Mishra, K. K., Bathla, M., Jagiwala, M., Manjunatha, N., Nebhinani, N., Gaur, N., Kumar, N., Dalal, P. K., . . . Avasthi, A. (2020). Changes in sleep pattern and sleep quality during COVID-19 lockdown. *Indian Journal of Psychiatry*, *62*(4), 370–378. https://doi.org/10.4103/psychiatry.IndianJPsychiatry_523_20
- Guttman, S. E., Gilroy, L. A. & Blake, R. (2005). Hearing what the eyes see: Auditory encoding of visual temporal sequences. *Psychological Science*, *16*(3), 228–235. <https://doi.org/10.1111/j.0956-7976.2005.00808.x>
- Hannon, E. E., Snyder, J. S., Eerola, T. & Krumhansl, C. L. (2004). The role of melodic and temporal cues in perceiving musical meter. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *30*(5), 956–974. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.30.5.956>

- Hellström, Å. & Rammsayer, T. H. (2004). Effects of time-order, interstimulus interval, and feedback in duration discrimination of noise bursts in the 50- and 1000-ms ranges. *Acta Psychologica*, *116*(1), 1–20.
<https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2003.11.003>
- Hicks, R. E., Miller, G. W. & Kinsbourne, M. (1976). Prospective and retrospective judgments of time as a function of amount of information processed. *The American Journal of Psychology*, *89*(4), 719. <https://doi.org/10.2307/1421469>
- Hoagland, H. (1933). The physiological control of judgments of duration: Evidence for a chemical clock. *The Journal of General Psychology*, *9*(2), 267–287.
<https://doi.org/10.1080/00221309.1933.9920937>
- Holbrook, M. B. & Anand, P. (1990). Effects of tempo and situational arousal on the listener's perceptual and affective responses to music. *Psychology of Music*, *18*(2), 150–162. <https://doi.org/10.1177/0305735690182004>
- Huber, R. & Ghosh, A. (2021). Large cognitive fluctuations surrounding sleep in daily living. *iScience*, *24*(3), 102159. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102159>
- Husain, G., Thompson, W. F. & Schellenberg, E. G. (2002). Effects of musical tempo and mode on arousal, mood, and spatial abilities. *Music Perception*, *20*(2), 151–171. <https://doi.org/10.1525/mp.2002.20.2.151>
- Jakubowski, K., Halpern, A. R., Grierson, M. & Stewart, L. (2015). The effect of exercise-induced arousal on chosen tempi for familiar melodies. *Psychonomic Bulletin & Review*, *22*(2), 559–565. <https://doi.org/10.3758/s13423-014-0687-1>
- James, W. (1890). *The principles of psychology* (1. Aufl.). Holt.
- Jones, M. R. (1976). Time, our lost dimension: Toward a new theory of perception, attention, and memory. *Psychological Review*, *83*(5), 323–355.
<https://doi.org/10.1037/0033-295X.83.5.323>
- Jones, M. R. (2004). Attention and timing. In J. G. Neuhoff (Hrsg.), *Ecological psychoacoustics* (S. 49–85). Elsevier Academic Press.
- Jones, M. R. & Boltz, M. G. (1989). Dynamic attending and responses to time. *Psychological Review*, *96*(3), 459–491. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.96.3.459>
- Karmarkar, U. R. & Buonomano, D. V. (2007). Timing in the absence of clocks: Encoding time in neural network states. *Neuron*, *53*(3), 427–438.
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.01.006>

- Kellaris, J. J. & Kent, R. J. (1992). The influence of music on consumers' temporal perceptions: Does time fly when you're having fun? *Journal of Consumer Psychology*, *1*(4), 365–376. [https://doi.org/10.1016/S1057-7408\(08\)80060-5](https://doi.org/10.1016/S1057-7408(08)80060-5)
- Killeen, P. R. & Weiss, N. A. (1987). Optimal timing and the Weber function. *Psychological Review*, *94*(4), 455–468. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.94.4.455>
- Kliger Amrani, A. & Zion Golombic, E. (2020). Spontaneous and stimulus-driven rhythmic behaviors in ADHD adults and controls. *Neuropsychologia*, *146*, 107544. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2020.107544>
- Large, E. W. (2008). Resonating to musical rhythm: Theory and experiment. In S. Grondin (Hrsg.), *Psychology of time* (1. Aufl., S. 189–232). Emerald.
- Large, E. W., Herrera, J. A. & Velasco, M. J. (2015). Neural networks for beat perception in musical rhythm. *Frontiers in Systems Neuroscience*, *9*, 159. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2015.00159>
- Large, E. W. & Jones, M. R. (1999). The dynamics of attending: How people track time-varying events. *Psychological Review*, *106*(1), 119–159. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.106.1.119>
- Large, E. W. & Palmer, C. (2002). Perceiving temporal regularity in music. *Cognitive Science*, *26*(1), 1–37. https://doi.org/10.1207/s15516709cog2601_1
- Lerdahl, F. & Jackendoff, R. (1983). An overview of hierarchical structure in music. *Music Perception*, *1*(2), 229–252. <https://doi.org/10.2307/40285257>
- Lewis, P. A. & Miall, R. C. (2009). The precision of temporal judgement: Milliseconds, many minutes, and beyond. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, *364*(1525), 1897–1905. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0020>
- London, J. (2011). Tactus ≠ tempo: Some dissociations between attentional focus, motor behavior, and tempo judgment. *Empirical Musicology Review*, *6*(1), 43–55. <https://doi.org/10.18061/1811/49761>
- London, J. (2012). *Hearing in time: Psychological aspects of musical meter* (2. Aufl.). Oxford University Press.
- London, J., Burger, B., Thompson, M. R., Hildreth, M., Wilson, J., Schally, N. & Toiviainen, P. (2019). Motown, disco, and drumming: An exploration of the relationship between beat salience, melodic structure, and perceived tempo. *Music Perception*, *37*(1), 26–41. <https://doi.org/10.1525/mp.2019.37.1.26>

- London, J., Burger, B., Thompson, M. R. & Toiviainen, P. (2016). Speed on the dance floor: Auditory and visual cues for musical tempo. *Acta Psychologica*, *164*, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2015.12.005>
- Macar, F., Grondin, S. & Casini, L. (1994). Controlled attention sharing influences time estimation. *Memory & Cognition*, *22*(6), 673–686. <https://doi.org/10.3758/BF03209252>
- MacDougall, H. G. & Moore, S. T. (2005). Marching to the beat of the same drummer: The spontaneous tempo of human locomotion. *Journal of Applied Physiology*, *99*(3), 1164–1173. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00138.2005>
- Manning, F. & Schutz, M. (2013). "Moving to the beat" improves timing perception. *Psychonomic Bulletin & Review*, *20*(6), 1133–1139. <https://doi.org/10.3758/s13423-013-0439-7>
- Martens, P. A. (2011). The ambiguous tactus: Tempo, subdivision benefit, and three listener strategies. *Music Perception*, *28*(5), 433–448. <https://doi.org/10.1525/mp.2011.28.5.433>
- Matchock, R. L. & Mordkoff, J. T. (2009). Chronotype and time-of-day influences on the alerting, orienting, and executive components of attention. *Experimental Brain Research*, *192*(2), 189–198. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1567-6>
- Matthews, T. E., Witek, M. A. G., Heggli, O. A., Penhune, V. B. & Vuust, P. (2019). The sensation of groove is affected by the interaction of rhythmic and harmonic complexity. *PLOS ONE*, *14*(1), e0204539. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204539>
- Matthews, W. J., Stewart, N. & Wearden, J. H. (2011). Stimulus intensity and the perception of duration. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *37*(1), 303–313. <https://doi.org/10.1037/a0019961>
- McAuley, J. D. & Jones, M. R. (2003). Modeling effects of rhythmic context on perceived duration: A comparison of interval and entrainment approaches to short-interval timing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *29*(6), 1102–1125. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.29.6.1102>
- McAuley, J. D., Jones, M. R., Holub, S., Johnston, H. M. & Miller, N. S. (2006). The time of our lives: Life span development of timing and event tracking. *Journal of Experimental Psychology: General*, *135*(3), 348–367. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.135.3.348>

- McAuley, J. D. & Semple, P. (1999). The effect of tempo and musical experience on perceived beat. *Australian Journal of Psychology*, *51*(3), 176–187.
<https://doi.org/10.1080/00049539908255355>
- McKinney, M. F. & Moelants, D. (2006). Ambiguity in tempo perception: What draws listeners to different metrical levels? *Music Perception*, *24*(2), 155–166.
<https://doi.org/10.1525/mp.2006.24.2.155>
- Mella, N., Conty, L. & Pouthas, V. (2011). The role of physiological arousal in time perception: Psychophysiological evidence from an emotion regulation paradigm. *Brain & Cognition*, *75*(2), 182–187. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2010.11.012>
- Merchant, H., Harrington, D. L. & Meck, W. H. (2013). Neural basis of the perception and estimation of time. *Annual Review of Neuroscience*, *36*(1), 313–336.
<https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-062012-170349>
- Meyer, L. B. (1956). *Emotion and meaning in music*. University of Chicago Press.
- Michaelis, K., Wiener, M. & Thompson, J. C. (2014). Passive listening to preferred motor tempo modulates corticospinal excitability. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, 252. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00252>
- Mioni, G. (2018). Methodological issues in the study of prospective timing. In A. Vatakis, F. Balci, M. Di Luca & Á. Correa (Hrsg.), *Timing and time perception: Procedures, measures, and applications* (S. 79–97). BRILL.
- Mioni, G., Stablum, F., McClintock, S. M. & Grondin, S. (2014). Different methods for reproducing time, different results. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *76*(3), 675–681. <https://doi.org/10.3758/s13414-014-0625-3>
- Moelants, D. (2002). Preferred tempo reconsidered. In C. Stevens, D. Burnham, G. McPherson, E. Schubert & J. Renwick (Hrsg.), *Proceedings of the ICMPC 7: 7th International Conference on Music Perception & Cognition* (S. 580–583). Causal Productions.
- Moelants, D. & McKinney, M. F. (2004). Tempo perception and musical content: What makes a piece fast, slow or temporally ambiguous. In S. D. Lipscomb, R. Ashley, R. O. Gjerdingen & P. Webster (Hrsg.), *Proceedings of the 8th Conference on Music Perception and Cognition* (S. 558–562). Society for Music Perception & Cognition.

- Monier, F. & Droit-Volet, S. (2018). Synchrony and emotion in children and adults. *International Journal of Psychology*, 53(3), 184–193.
<https://doi.org/10.1002/ijop.12363>
- Monier, F. & Droit-Volet, S. (2019). Development of sensorimotor synchronization abilities: Motor and cognitive components. *Child Neuropsychology*, 25(8), 1043–1062. <https://doi.org/10.1080/09297049.2019.1569607>
- Moussay, S., Dosseville, F., Gauthier, A., Larue, J., Sesboüe, B. & Davenne, D. (2002). Circadian rhythms during cycling exercise and finger-tapping task. *Chronobiology International*, 19(6), 1137–1149. <https://doi.org/10.1081/CBI-120015966>
- Mütze, H., Kopiez, R. & Wolf, A. (2020). The effect of a rhythmic pulse on the heart rate: Little evidence for rhythmical ‘entrainment’ and ‘synchronization’. *Musicae Scientiae*, 24(3), 377–400. <https://doi.org/10.1177/1029864918817805>
- Nobrega, A. C. L., O’Leary, D., Silva, B. M., Marongiu, E., Piepoli, M. F. & Crisafulli, A. (2014). Neural regulation of cardiovascular response to exercise: Role of central command and peripheral afferents. *BioMed Research International*, 2014, 478965. <https://doi.org/10.1155/2014/478965>
- North, A. C. & Hargreaves, D. J. (1999). Can Music Move People? *Environment and Behavior*, 31(1), 136–149. <https://doi.org/10.1177/00139169921972038>
- North, A. C. & Hargreaves, D. J. (2000). Musical preferences during and after relaxation and exercise. *The American Journal of Psychology*, 113(1), 43. <https://doi.org/10.2307/1423460>
- Noulhiane, M., Mella, N., Samson, S., Ragot, R. & Pouthas, V. (2007). How emotional auditory stimuli modulate time perception. *Emotion*, 7(4), 697–704. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.7.4.697>
- Oakes, S. (2003). Musical tempo and waiting perceptions. *Psychology and Marketing*, 20(8), 685–705. <https://doi.org/10.1002/mar.10092>
- Ortega, L. & López, F. (2008). Effects of visual flicker on subjective time in a temporal bisection task. *Behavioural Processes*, 78(3), 380–386. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2008.02.004>
- Parncutt, R. (1994). A perceptual model of pulse salience and metrical accent in musical rhythms. *Music Perception*, 11(4), 409–464. <https://doi.org/10.2307/40285633>

- Peckel, M., Pozzo, T. & Bigand, E. (2014). The impact of the perception of rhythmic music on self-paced oscillatory movements. *Frontiers in Psychology, 5*, 1037. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01037>
- Pfordresher, P. Q., Greenspon, E. B., Friedman, A. L. & Palmer, C. (2021). Spontaneous production rates in music and speech. *Frontiers in Psychology, 12*, 611867. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.611867>
- Phillips, D.P. & Hall, S.E. (2002). Auditory temporal gap detection for noise markers with partially overlapping and non-overlapping spectra. *Hearing Research, 174*(1-2), 133–141. [https://doi.org/10.1016/S0378-5955\(02\)00647-0](https://doi.org/10.1016/S0378-5955(02)00647-0)
- Phillips-Silver, J., Toiviainen, P., Gosselin, N., Piché, O., Nozaradan, S., Palmer, C. & Peretz, I. (2011). Born to dance but beat deaf: A new form of congenital amusia. *Neuropsychologia, 49*(5), 961–969. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.02.002>
- Polti, I., Martin, B. & van Wassenhove, V. (2018). The effect of attention and working memory on the estimation of elapsed time. *Scientific Reports, 8*(1), 6690. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25119-y>
- Pöppel, E. (1997). A hierarchical model of temporal perception. *Trends in Cognitive Sciences, 1*(2), 56–61. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(97\)01008-5](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(97)01008-5)
- Poynter, D. (1989). Judging the duration of time intervals: A process of remembering segments of experience. In I. Levin & D. Zakay (Hrsg.), *Advances in psychology: Bd. 59. Time and human cognition: A life-span perspective* (S. 305–331). North-Holland.
- Provasi, J., Anderson, D. I. & Barbu-Roth, M. (2014). Rhythm perception, production, and synchronization during the perinatal period. *Frontiers in Psychology, 5*, 1048. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01048>
- Provasi, J. & Bobin-Bègue, A. (2003). Spontaneous motor tempo and rhythmical synchronisation in 2½- and 4-year-old children. *International Journal of Behavioral Development, 27*(3), 220–231. <https://doi.org/10.1080/01650250244000290>
- Rammsayer, T. H. (2008). Neuropharmacological approaches to human timing. In S. Grondin (Hrsg.), *Psychology of time* (1. Aufl., S. 295–320). Emerald.
- Rammsayer, T. H. & Lima, S. D. (1991). Duration discrimination of filled and empty auditory intervals: Cognitive and perceptual factors. *Perception & Psychophysics, 50*(6), 565–574. <https://doi.org/10.3758/bf03207541>

- Repp, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization: A review of the tapping literature. *Psychonomic Bulletin & Review*, *12*(6), 969–992. <https://doi.org/10.3758/BF03206433>
- Repp, B. H. (2010). Sensorimotor synchronization and perception of timing: Effects of music training and task experience. *Human Movement Science*, *29*(2), 200–213. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2009.08.002>
- Repp, B. H. & Bruttomesso, M. (2010). A filled duration illusion in music: Effects of metrical subdivision on the perception and production of beat tempo. *Advances in Cognitive Psychology*, *5*, 114–134. <https://doi.org/10.2478/v10053-008-0071-7>
- Repp, B. H. & Su, Y.-H. (2013). Sensorimotor synchronization: A review of recent research (2006-2012). *Psychonomic Bulletin & Review*, *20*(3), 403–452. <https://doi.org/10.3758/s13423-012-0371-2>
- Roenneberg, T., Wirz-Justice, A. & Mero, M. (2003). Life between clocks: Daily temporal patterns of human chronotypes. *Journal of Biological Rhythms*, *18*(1), 80–90. <https://doi.org/10.1177/0748730402239679>
- Rose, D., Ott, L., Guérin, S. M. R., Annett, L. E., Lovatt, P. & Delevoeye-Turrell, Y. N. (2021). A general procedure to measure the pacing of body movements timed to music and metronome in younger and older adults. *Scientific Reports*, *11*(1), 3264. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82283-4>
- Salthouse, T. A. (2010). Selective review of cognitive aging. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *16*(5), 754–760. <https://doi.org/10.1017/S1355617710000706>
- Scheurich, R., Zamm, A. & Palmer, C. (2018). Tapping into rate flexibility: Musical training facilitates synchronization around spontaneous production rates. *Frontiers in Psychology*, *9*, 458. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00458>
- Schwartz, M. & Kotz, S. A. (2015). The Timing of regular sequences: Production, perception, and covariation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *27*(9), 1697–1707. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00805
- Schwarz, M. A., Winkler, I. & Sedlmeier, P. (2013). The heart beat does not make us tick: The impacts of heart rate and arousal on time perception. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *75*(1), 182–193. <https://doi.org/10.3758/s13414-012-0387-8>

- Seidler, R. D., Bernard, J. A., Burutolu, T. B., Fling, B. W., Gordon, M. T., Gwin, J. T., Kwak, Y. & Lipps, D. B. (2010). Motor control and aging: Links to age-related brain structural, functional, and biochemical effects. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 34(5), 721–733. <https://doi.org/10.1016/j.neubio-rev.2009.10.005>
- Snyder, J. S. & Krumhansl, C. L. (2001). Tapping to ragtime: Cues to pulse finding. *Music Perception*, 18(4), 455–489. <https://doi.org/10.1525/mp.2001.18.4.455>
- Stern, W. (1900). *Über Psychologie der individuellen Differenzen: Ideen zu einer "Differenziellen Psychologie"*. Johann Ambrosius Barth.
- Stupacher, J., Hove, M. J. & Janata, P. (2016). Audio features underlying perceived groove and sensorimotor synchronization in music. *Music Perception*, 33(5), 571–589. <https://doi.org/10.1525/mp.2016.33.5.571>
- Styns, F., van Noorden, L., Moelants, D. & Leman, M. (2007). Walking on music. *Human Movement Science*, 26(5), 769–785. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2007.07.007>
- Su, Y.-H. & Pöppel, E. (2012). Body movement enhances the extraction of temporal structures in auditory sequences. *Psychological Research*, 76(3), 373–382. <https://doi.org/10.1007/s00426-011-0346-3>
- Surwillo, W. W. (1968). Timing of behavior in senescence and the role of the central nervous system. In G. A. Talland (Hrsg.), *Human aging and behavior: Recent advances in research and theory* (S. 1–35). Academic Press.
- Sysoeva, O. V., Wittmann, M., Mierau, A., Polikanova, I., Strüder, H. K. & Tonevitsky, A. (2013). Physical exercise speeds up motor timing. *Frontiers in Psychology*, 4, 612. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00612>
- Tamm, A. S., Lagerquist, O., Ley, A. L. & Collins, D. F. (2009). Chronotype influences diurnal variations in the excitability of the human motor cortex and the ability to generate torque during a maximum voluntary contraction. *Journal of Biological Rhythms*, 24(3), 211–224. <https://doi.org/10.1177/0748730409334135>
- Teki, S., Grube, M. & Griffiths, T. D. (2012). A unified model of time perception accounts for duration-based and beat-based timing mechanisms. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 5, 90. <https://doi.org/10.3389/fnint.2011.00090>

- Teki, S., Grube, M., Kumar, S. & Griffiths, T. D. (2011). Distinct neural substrates of duration-based and beat-based auditory timing. *Journal of Neuroscience*, *31*(10), 3805–3812. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5561-10.2011>
- Thayer, R. E. (1970). Activation states as assessed by verbal report and four psychophysiological variables. *Psychophysiology*, *7*(1), 86–94. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1970.tb02278.x>
- Thomas, E. C. & Brown, I. (1974). Time perception and the filled-duration illusion. *Perception & Psychophysics*, *16*(3), 449–458. <https://doi.org/10.3758/BF03198571>
- Tierney, A. & Kraus, N. (2015). Neural entrainment to the rhythmic structure of music. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *27*(2), 400–408. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00704
- Todd, N. P. M., Cousins, R. & Lee, C. S. (2007). The contribution of anthropometric factors to individual differences in the perception of rhythm. *Empirical Musicology Review*, *2*(1), 1–13. <https://doi.org/10.18061/1811/24478>
- Todd, N. P. M. & Lee, C. S. (2015). The sensory-motor theory of rhythm and beat induction 20 years on: A new synthesis and future perspectives. *Frontiers in Human Neuroscience*, *9*, 444. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00444>
- Treisman, M. (1963). Temporal discrimination and the indifference interval: Implications for a model of the "internal clock". *Psychological Monographs*, *77*(13), 1–31. <https://doi.org/10.1037/h0093864>
- Treisman, M., Faulkner, A., Naish, P. L. & Brogan, D. (1990). The internal clock: Evidence for a temporal oscillator underlying time perception with some estimates of its characteristic frequency. *Perception*, *19*(6), 705–743. <https://doi.org/10.1068/p190705>
- Valdez, P., Ramírez, C. & García, A. (2012). Circadian rhythms in cognitive performance: Implications for neuropsychological assessment. *ChronoPhysiology and Therapy*, *81*. <https://doi.org/10.2147/CPT.S32586>
- van der Steen, M. C. M. & Keller, P. E. (2013). The ADaptation and Anticipation Model (ADAM) of sensorimotor synchronization. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*, 253. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00253>

- van Noorden, L. & Moelants, D. (1999). Resonance in the perception of musical pulse. *Journal of New Music Research*, 28(1), 43–66.
<https://doi.org/10.1076/jnmr.28.1.43.3122>
- van Vugt, F. T., Treutler, K., Altenmüller, E. & Jabusch, H.-C. (2013). The influence of chronotype on making music: Circadian fluctuations in pianists' fine motor skills. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 347.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00347>
- van Wassenhove, V. (2016). Temporal cognition and neural oscillations. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 8, 124–130.
<https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.02.012>
- Wang, X. & Wöllner, C. (2020). Time as the ink that music is written with: A review of internal clock models and their explanatory power in audiovisual perception. *Jahrbuch Musikpsychologie*, 29, e67. <https://doi.org/10.5964/jbdgm.2019v29.67>
- Warren, R. M., Gardner, D. A., Brubaker, B. S. & Bashford, J. A. (1991). Melodic and nonmelodic sequences of tones: Effects of duration on perception. *Music Perception*, 8(3), 277–289. <https://doi.org/10.2307/40285503>
- Wearden, J. H., Norton, R., Martin, S. & Montford-Bebb, O. (2007). Internal clock processes and the filled-duration illusion. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(3), 716–729.
<https://doi.org/10.1037/0096-1523.33.3.716>
- Wearden, J. H., Philpott, K. & Win, T. (1999). Speeding up and (...relatively...) slowing down an internal clock in humans. *Behavioural Processes*, 46(1), 63–73.
[https://doi.org/10.1016/S0376-6357\(99\)00004-2](https://doi.org/10.1016/S0376-6357(99)00004-2)
- West, R., Murphy, K. J., Armilio, M. L., Craik, F. I. M. & Stuss, D. T. (2002). Effects of time of day on age differences in working memory. *The Journals of Gerontology: Series B*, 57(1), P3-P10. <https://doi.org/10.1093/geronb/57.1.p3>
- Wittmann, M. & Pöppel, E. (1999). Temporal mechanisms of the brain as fundamentals of communication — with special reference to music perception and performance. *Musicae Scientiae*, 3(1_suppl), 13–28.
<https://doi.org/10.1177/10298649000030S103>
- Wöllner, C. & Hammerschmidt, D. (2021). Tapping to hip-hop: Effects of cognitive load, arousal, and musical meter on time experiences. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 83(4), 1552–1561. <https://doi.org/10.3758/s13414-020-02227-4>

- Wöllner, C., Hammerschmidt, D. & Albrecht, H. (2018). Slow motion in films and video clips: Music influences perceived duration and emotion, autonomic physiological activation and pupillary responses. *PLOS ONE*, *13*(6), e0199161. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199161>
- Wright, S. E. & Palmer, C. (2020). Physiological and behavioral factors in musicians' performance tempo. *Frontiers in Human Neuroscience*, *14*, 311. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00311>
- Yu, H., Russell, D. M. & Sternad, D. (2003). Task-effector asymmetries in a rhythmic continuation task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *29*(3), 616–630. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.29.3.616>
- Zakay, D. (1990). The evasive art of subjective time measurement: Some methodological dilemmas. In R. A. Block (Hrsg.), *Cognitive models of psychological time* (S. 59–84). Taylor and Francis.
- Zakay, D. & Block, R. A. (1998). An attentional-gate model of prospective time estimation. In V. DeKeyser, G. d'Ydewalle & A. Vandierendonck (Hrsg.), *Time and the dynamic control of behavior* (S. 167–178). Hogrefe & Huber.
- Zakay, D., Nitzan, D. & Glicksohn, J. (1983). The influence of task difficulty and external tempo on subjective time estimation. *Perception & Psychophysics*, *34*(5), 451–456. <https://doi.org/10.3758/BF03203060>
- Zakay, D., Tsal, Y., Moses, M. & Shahar, I. (1994). The role of segmentation in prospective and retrospective time estimation processes. *Memory & Cognition*, *22*(3), 344–351. <https://doi.org/10.3758/BF03200861>
- Zamm, A., Wang, Y. & Palmer, C. (2018). Musicians' natural frequencies of performance display optimal temporal stability. *Journal of Biological Rhythms*, *33*(4), 432–440. <https://doi.org/10.1177/0748730418783651>

8 Anlagen

8.1 Referenzliste der Studien dieses Dissertationsprojektes

- Studie 1: Hammerschmidt, D., & Wöllner, C. (2020). Sensorimotor synchronization with higher metrical levels in music shortens perceived time. *Music Perception*, 37(4), 263–277. <https://doi.org/10.1525/mp.2020.37.4.263>
- Studie 2: Hammerschmidt, D., Wöllner, C., London, J., & Burger, B. (2021). Disco time: The relationship between perceived duration and tempo in music. *Music & Science*, 4, 1–11. <https://doi.org/10.1177/2059204320986384>
- Studie 3: Hammerschmidt, D., Frieler, K., & Wöllner, C. (2021). Spontaneous motor tempo: Investigating psychological, chronobiological, and demographic factors in a large-scale online tapping experiment. *Frontiers in Psychology*, 12, 2338. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.677201>
- Studie 4: Hammerschmidt, D., & Wöllner, C. (2022). Spontaneous motor tempo over the course of a week: The role of the time of the day, chronotype, and arousal. *Psychological Research*. <https://doi.org/10.1007/s00426-022-01646-2>

8.2 Studie 1

Hammerschmidt, D. & Wöllner, C. (2020)

**Sensorimotor synchronization with higher metrical levels
in music shortens perceived time**

Music Perception, 37(4)

Mit freundlicher Genehmigung der University of California Press

SENSORIMOTOR SYNCHRONIZATION WITH HIGHER METRICAL LEVELS IN MUSIC SHORTENS PERCEIVED TIME

DAVID HAMMERSCHMIDT & CLEMENS WÖLLNER
Universität Hamburg, Hamburg, Germany

THE AIM OF THE PRESENT STUDY WAS TO INVESTIGATE if the perception of time is affected by actively attending to different metrical levels in musical rhythmic patterns. In an experiment with a repeated-measures design, musicians and nonmusicians were presented with musical rhythmic patterns played at three different tempi. They synchronized with multiple metrical levels (half notes, quarter notes, eighth notes) of these patterns using a finger-tapping paradigm and listened without tapping. After each trial, stimulus duration was judged using a verbal estimation paradigm. Results show that the metrical level participants synchronized with influenced perceived time: actively attending to a higher metrical level (half notes, longer intertap intervals) led to the shortest time estimations, hence time was experienced as passing more quickly. Listening without tapping led to the longest time estimations. The faster the tempo of the patterns, the longer the time estimation. While there were no differences between musicians and nonmusicians, those participants who tapped more consistently and accurately (as analyzed by circular statistics) estimated durations to be shorter. Thus, attending to different metrical levels in music, by deliberately directing attention and motor activity, affects time perception.

Received: February 15, 2019, accepted September 27, 2019.

Key words: time estimation, entrainment, tapping, attention, musical tempo

THERE IS A GROWING BODY OF WORK suggesting that music affects internal timing mechanisms and experiences of time. The tempo of a musical piece has been shown to be a main factor driving distortions of perceived time. In this respect, previous studies on time perception and music have not addressed that musical tempo *per se* is an ambiguous construct, since the tempo of a musical piece as notated and performed, and the tempo actually perceived by

listeners are not necessarily congruent. Furthermore, perception of beat salience may differ between individuals as they synchronize with different metrical levels in the music. This study aimed at investigating the effects of sensorimotor synchronization (SMS) with different metrical levels in music, compared to listening-only without tapping, on time estimations. It is proposed that deliberately attending to a given metrical level may alter experiences of the music's duration.

Time and timing mechanisms are essential components of the perception and performance of music (Epstein, 1995; London, 2012), yet the underlying mechanisms are still not entirely understood. Internal clock models of interval timing assume an oscillating mechanism that is constantly generating pulses (Gibbon, 1977; Gibbon, Curch, & Meck, 1984; Treisman, 1963). These pulses are accumulated when time needs to be judged. Increased physiological activation (arousal) causes the rate of the pulse generator to increase, therefore more pulses are accumulated in the same amount of time and, as a consequence, time seems to last longer. Several studies found this time-lengthening effect of arousal in different contexts such as hearing emotional versus neutral sounds (Noulhiane, Mella, Samson, Ragot, & Pouthas, 2007), looking at emotional compared to neutral pictures (Gil & Droit-Volet, 2012), and when listening to music (Droit-Volet, Bigand, Ramos, & Bueno, 2010; Droit-Volet, Ramos, Bueno, & Bigand, 2013).

According to the *attentional gate model* (Block & Zakay, 1996; Zakay & Block, 1995), temporal and non-temporal processes compete for the same attentional resources. The model is based on the internal clock models mentioned above, adding an attentional gate between the pulse generator and the accumulator, which "stores" the ongoing pulses. When more attention is allocated to time itself, the gate opens wider, allowing for more pulses to accumulate, and time is subsequently perceived to be longer. Referring to empirical music research, studies found that individuals were willing to wait the least amount of time when no music was played in the background as a distractor, and that time appears to be shorter when the accompanying music is enjoyed (Cameron, Baker, Peterson, & Braunsberger, 2003; Kellaris & Kent, 1992; North & Hargreaves, 1999).

Listening to music diverts more attention away from time or, in other words, “time flies” with music (see also Droit-Volet et al., 2010). A meta-analysis by Block, Hancock, and Zakay (2010) suggests that the attentional gate mechanism is supported by a large number of studies, and increased cognitive demands dedicated to non-temporal tasks (hence attention directed away from time) leads to shorter time estimations. It is important to note that time estimations strongly depend on whether or not participants are informed in advance that time needs to be judged (prospective time paradigm). If participants are not informed about a time estimation task (retrospective paradigm), effects on perceived time change since other cognitive processes such as memory are more involved (Block, Grondin, & Zakay, 2018).

Much of the literature on time perception proposes that the tempo of events and event density are the main factors in perceived time distortions, and that physiological activation and perceived (musical) tempo are closely linked. In a series of experiments (Droit-Volet et al., 2013), tempo and other musical parameters were manipulated. Musical tempo was the main factor influencing time perception such that fast music was judged to last longer than slow music, and participants also judged fast music as being more arousing than slow music. This finding is supported by an earlier study (Oakes, 2003) showing that perceived waiting time increases with faster music (i.e., higher event density). Similar results were found for controlled rhythmic sequences of simple clicks and visual flashes (Droit-Volet & Wearden, 2002; Ortega & López, 2008; Treisman, Faulkner, Naish, & Brogan, 1990). Furthermore, for audio-visual stimuli such as films and video clips, music may not only enhance perceived and felt arousal, but may also influence time perception. In a study of the effects of music in slow motion video scenes, music influenced perceived time, leading to more accurate estimations of scene durations compared to conditions without music (Wöllner, Hammerschmidt, & Albrecht, 2018).

Apart from musical factors, in the current study we argue that individuals’ motor activity may influence perceived time. Music often results in an urge to move in time, establishing a stable temporal relationship between body movements and the rhythm, a process called entrainment (e.g., Jones, 2004). When moving to music, different body parts synchronize differently to musical rhythms depending on the rhythmic structure and tempo (Burger, London, Thompson, & Toiviainen, 2018; London, Burger, Thompson, & Toiviainen, 2016). Although studies have found a preference for perceiving beats every 500–600 ms for regular rhythmic sequences (Moelants, 2002; van Noorden & Moelants,

1999), perceptions of beat salience (i.e., pulse) in music may differ between individuals. This is a crucial aspect of rhythmic entrainment and has not been addressed with regard to time perception. Thus, tempo in music is an ambiguous construct with no objectively correct period, and depends on individual perception and structural components of the music (Moelants & McKinney, 2004; Toiviainen & Snyder, 2003).

Concerning the latter, most music consists of multiple metrical levels that are hierarchically structured, and each of the levels correspond to a different tempo (Cooper & Meyer, 1960; Lerdahl & Jackendoff, 1983). These hierarchical levels may span from low levels with “local” temporal regularities to higher levels with more “global” temporal regularities consisting of integer multiples of the lower levels. Temporal cues to meter perception include tempo (BPM), note duration, and event density (Drake, Gros, & Penel, 1999; London, 2011; Madison & Paulin, 2010; Parncutt, 1994). Non-temporal cues include pitch, harmonic progression, tonal movement, loudness changes (i.e., musical accents), timbre, and the listener’s motor activity (Boltz, 2011; Drake et al., 1999; Eitan & Granot, 2009; Epstein, 1995; Hannon, Snyder, Eerola, & Krumhansl, 2004; London, 2011; Snyder & Krumhansl, 2001). For example, a study by McKinney and Moelants (2006) suggests that the most salient beat level in a given piece of music may vary largely among individuals, such that in some pieces there are up to four different metrical levels chosen for the most salient beat. Furthermore, beat salience is more ambiguous in certain genres (e.g., jazz) than in others (e.g., metal and punk).

In a finger tapping study using Western classical music (Martens, 2011), ambiguity of the perceived beat level between individuals could not be explained by musical tempo. There were three types of listening strategies with regard to musical structure: “Surface” listeners focused on the fastest consistent beat, the “deep” listeners more on higher metrical levels, whereas a mixture of these two strategies was used by the “variable” listeners. Less music training was associated with “surface” listening, while participants with more music training more frequently employed “variable” and “deep” listening strategies. In a similar vein, a study by Drake, Penel, and Bigand (2000) reported that musicians, compared to nonmusicians, had a tendency to tap along with higher metrical levels in classical piano pieces. Other studies did not find significant differences between musicians and nonmusicians, gender, or age groups (McKinney & Moelants, 2006; Moelants & McKinney, 2004; Snyder & Krumhansl, 2001). Regarding this divergence of findings, Snyder and Krumhansl (2001) suggested that, “pulse-finding differences as a function of musical experience are not

due to general motor control differences. Instead, style-dependent pulse-finding differences as a function of musical experience may indicate the presence of more perceptual difficulties (e.g., temporal periodicity extraction) with less musical experience” (p. 469).

Taken together, previous research suggests that music affects perceived time and that the tempo of music is the main musical factor, causing time to be perceived as lasting longer for faster tempi. However, musical tempo is not a single entity, since music contains multiple metrical levels at which a listener may perceive the beat and thus synchronize to the signal. Once a stable relationship between the preferred rate and the tapping has been established, attention can be allocated to other accessible metrical levels; hence, time can be structured in varying intervals (Drake, Jones, & Baruch, 2000).

The present study investigates how time estimations are affected by attending to different metrical levels when listening to music using a motor task (sensorimotor synchronization). Based on the literature cited above, we hypothesized that: 1) tapping at a faster rate by synchronizing to lower metrical levels causes longer time estimations, and vice versa (e.g., Drake et al., 1999; London, 2011); 2) faster musical tempi result in longer time estimations (e.g., Droit-Volet et al., 2013); and 3) musical characteristics of rhythmic patterns also to some extent influence time estimations, since the non-temporal features should affect the perception of the most salient beat (e.g., Boltz, 2011). Furthermore, 4) we assumed that time is perceived to last longer for musicians than nonmusicians, since fewer cognitive resources are needed to synchronize with a specific metrical level. Thus, musicians should allocate more attention to the time estimation task, which in turn would cause durations to be perceived as lasting longer (e.g., Block et al., 2010; Drake, Penel, & Bigand, 2000).

Method

PARTICIPANTS

A total of 34 participants took part in the study. After careful inspection of the data, four participants were excluded for the following four reasons: insufficient tapping performance (35.19% of all trials were incorrect for one participant, see “Data analysis”), technical issues in the recording, same answers given throughout (this participant apparently fell asleep during parts of the experiment), and higher age in order to balance the range of the two groups. Subsequent analyses were based on 30 participants.

The musician group consisted of 10 men and 5 women with a mean age of 26.53 years ($SD = 8.76$,

range: 19–47 years). Participants played a musical instrument for $M = 16.67$ years ($SD = 10.11$) and studied an instrument or voice with a teacher for $M = 9.80$ years ($SD = 5.16$). The general importance of music in their lives was $M = 5.77$ ($SD = 0.42$), rated on a 7-point scale ranging from 1 (*not important at all*) to 7 (*very important*). The nonmusician group consisted of 12 women and 3 men with a mean age of 28.73 years ($SD = 11.16$, range: 20–54 years) who had played a musical instrument for $M = 0.20$ years ($SD = 0.76$). Participants in this group had music lessons for $M = 0.23$ years ($SD = 0.77$). Importance of music was rated to be $M = 4.00$ ($SD = 1.41$). The two groups differed in terms of instrumental experience ($p < .001$) and the importance of music ($p < .001$), but did not differ in age ($p > .05$). All participants took part in accordance with the guidelines of the local Ethics Committee and were compensated with 10 € for participation.

STIMULI

The stimuli used in this study consisted of three rhythmic patterns that were based on the common “PoumTchak” rhythm (Zeiner-Henriksen, 2010b) typically used in electronic dance music (Snoman, 2009; Zeiner-Henriksen, 2010a). The patterns consisted of four instruments (kick drum, snare drum, hi-hat, and bass synthesizer) arranged in a 4/4 duple meter consisting of whole, half, quarter, and eighth notes and were presented in a loop. The bass synthesizer played the first four notes of a C minor scale in ascending direction (Figure 1).

A pilot study several weeks before the current experiment tested these stimuli, including the “PoumTchak” rhythm with the same instruments and 23 other patterns which were obtained by reassigning the four instruments to the four subdivisions in each possible combination. Thirty participants tapped freely to each of the patterns at their preferred rate, synchronizing with a metrical level of their own choice. Based on the results of the pilot study, a subset of three patterns was then chosen for the current study that varied in participants’ agreement regarding the chosen tapping rate, as measured by the coefficient of unalikeability. The coefficient of unalikeability is a measure of consensus (Dror, Panda, May, Majumdar, & Koren, 2014), and here indicates the degree of participants’ agreement on the preferred tapping rate (i.e., most salient beat) for each pattern. Pattern #1 had the lowest coefficient, indicating high agreement upon participants, while pattern #2 had the highest coefficient, indicating low agreement. Pattern #3 was the one closest to the median (Table 1). One interesting outcome of the pilot study was that the “PoumTchak” pattern did not yield the



FIGURE 1. Notations of the rhythmic patterns.

lowest coefficient of unalikeability, therefore it was not used in the current study.

Table 1 lists psychoacoustical features of the patterns that are particularly relevant for rhythm and tempo perception. Using the MIRtoolbox for Matlab (Lartillot, Toiviainen, & Eerola, 2008), the degree of spectral flux for sub-bands 100–200 Hz and 6,400–12,800 Hz was

calculated by taking the Euclidean distances of the power spectra for each two consecutive frames of the signal, using a frame length of 25 ms and an overlap of 50% between successive frames and then averaging the resulting time-series using the “mirflux” function (Alluri & Toiviainen, 2010). These two sub-bands were shown to be particularly related to rhythmic

TABLE 1. Features of Musical Rhythmic Patterns

Pattern	Features				
	Event Density (onset/s)	Mean Flux (100-200 Hz)	Mean Flux (6.4-12.8 kHz)	Spectral Centroid (Hz)	Coefficient of Unalikeability
#1	2.39	5.77	2.01	3053.47	0.24
#2	4.25	6.79	2.45	2926.65	0.66
#3	5.11	7.50	0.58	2112.26	0.43

TABLE 2. Temporal Details of the Musical Rhythmic Patterns

	Listening Condition	Tempo		
		83 BPM	120 BPM	150 BPM
IOI (s)	Half notes	1.446	1.000	0.800
	Quarter notes	0.723	0.500	0.400
	Eighth notes	0.361	0.250	0.200
Stimulus Duration (s)		23.133	16.000	12.800

features (Burger, Ahokas, Keipi, & Toiviainen, 2013). Event density was calculated by the salient note onsets per second since it can affect tempo perception (Drake et al., 1999). The spectral centroid was calculated using the “mircentroid” function as a descriptor of perceptual brightness.

For each of these three patterns, different versions with tempi at 83, 120, and 150 BPM (quarter notes) were produced and each version consisted of eight bars, resulting in 3 x 3 stimuli. While 120 BPM refer to the preferred tempo in music and spontaneous motor tempo (Moelants, 2002), the other two tempi were chosen in order to produce distinct slow and fast versions of the rhythmic patterns. Furthermore, a larger difference between 120 BPM and the lower tempo at 83 BPM was chosen compared to the faster tempo at 150 BPM to get closer to, but still within, the slower rate limits of the corresponding intertap intervals (ITIs, see Table 2) for sensorimotor synchronization (SMS) tasks and to take into account non-linear relations of movement timing and interval durations (Madison, 2014; Repp, 2006). Since the number of bars were fixed, the tempi determined stimulus durations (Table 2). Additional “catch-trials” based on the same rhythmic patterns consisted of either four bars (83 BPM = 11.57 s, 120 BPM = 8.00 s, 150 BPM = 6.40 s) or 12 bars (83 BPM = 34.70 s, 120 BPM = 24.00 s, 150 BPM = 19.20 s).

DESIGN AND PROCEDURE

The study design consisted of three musical rhythmic patterns, presented at three different tempi in four

listening condition (listening-only without tapping, attending and tapping to half notes, to quarter notes, and to eighth notes). The main task of the experiment was to estimate the time of each stimulus duration. Every participant was presented with all stimuli in all listening conditions, resulting in a 3 (Pattern) x 3 (Tempo) x 4 (Listening Condition, focusing on different metrical levels) repeated-measures design for the time estimation task, and a 3 x 3 x 3 repeated-measures design for the SMS task, since no tapping data were produced during the listening-only condition (Figure 2). Each condition was presented twice to account for response variability of time estimations (Grondin, 2010; Mioni, 2018). The listening-only block consisted of 18 trials and 3 catch-trials with varying stimulus durations, and the tapping block consisted of 54 trials and 9 catch-trials (one-seventh of all trials in each block). Each of the additional catch-trials varied in terms of stimulus conditions and were meant to test for participants’ attention to the time estimation task. Participants reliably recognized the shorter or longer durations of the catch-trials, such that their averaged time estimations correlated with the actual trials as indicated by intraclass correlation, $ICC = .96$, $CI(.92, .98)$.

After providing informed consent, participants were placed in front of a LCD display connected to the experiment computer and entered demographic data into OpenSesame (Version 3.1.9; Mathôt, Schreijf, & Theeuwes, 2012), which was used for experimental protocol as well as the collection of time estimation data. Then, participants were introduced to the first task, which was to estimate the time of stimulus duration in seconds without a secondary task (prospective paradigm), meaning without tapping to a specific metrical level of the musical patterns. They were informed before presentation to listen to the stimuli attentively without counting the time. Stimuli were played back via Live 9 (Version 9.7.7, Ableton) and Beyerdynamic DT-880 Pro headphones. After each stimulus, participants estimated the stimulus duration by entering the subjective time in seconds on a computer keyboard. They confirmed their estimation by pressing “enter,”

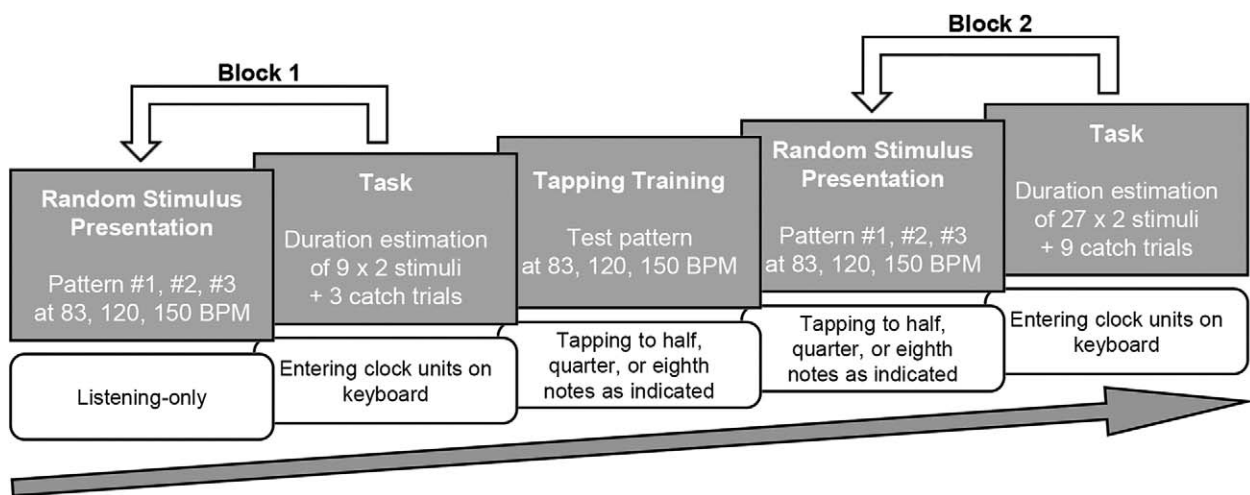


FIGURE 2. Experimental design. Participants first estimated the duration of each stimulus after listening without tapping (Block 1), then estimated the duration of each stimulus after tapping to a given metrical level (Block 2). Stimuli in both blocks were presented twice and in randomized order.

and the next stimulus played back with a delay of four seconds.

In the second part of the experiment, participants tapped to the stimuli and subsequently estimated the presentation duration as in the first part. A BopPad touch pad (Keith McMillen Instruments) with a C411 condenser vibration pickup (AKG) placed at the edge of the touch pad was used for tapping. The pickup was connected to a Scarlett 2i2 audio interface (Focusrite), and tapping data were recorded in Live 9. Software environment communication was done using a virtual MIDI port and the Mido library for Python. This setup allowed for recordings of audio and MIDI signals simultaneously. Intrasystem latency of the touch pad (6.80 ms) and audio hardware (7.89 ms) were compensated.

Participants were instructed to tap with the index finger of their preferred hand on the touch pad to the half, quarter or eighth note level, respectively. The respective metrical level for each trial was shown for four seconds on the display before a stimulus was played back and further indicated by a cow bell sound implemented in the stimuli for the first two bars, since nonmusicians were not expected to know the correct metrical level indicated by name immediately. All stimuli were presented in individually randomized orders (Figure 2). Before the second part of the experiment started, participants practiced the tasks for at least three test trials including each metrical level once, and were able to repeat the practice trials as often as they needed using a test pattern not included in the actual experiment.

DATA ANALYSIS

Tapping data. SMS performance is commonly assessed by tapping variability as a measure of SMS consistency, and tapping asynchrony as a measure of SMS accuracy (Repp, 2005; Repp & Su, 2013). SMS is achieved when an action is in attunement with a predictable external rhythm. In order to analyze tapping performance, all taps before the onset of the third bar (-25% of the corresponding ITI) were excluded. If two successive taps were within 10% from each other within a correct ITI, the second tap was counted as a rebound tap and removed from data. Successful SMS was defined by two conditions: first, the number of taps per trial had to be within a 25% error margin from the correct number of taps (half notes: 12 taps, quarter notes: 24 taps, eighth notes: 48 taps). Second, the mean ITI of a trial also had to be within a 25% error margin from the correct ITI. If one of these conditions was not met, that trial was counted as unsuccessful SMS and removed from analysis (3.76% of all trials). Of the remaining trials, the first 12 taps for each metrical level and tempo condition were considered for further analysis. Double or missing taps, with ITIs shorter or longer than two thirds of the correct ITI for the specific trial, were removed from the analysis (1.54% of the total number of taps).

Tapping performance was assessed by circular variance as a measure for tapping consistency, and mean asynchrony as a measure of tapping accuracy. Circular variance was computed based on asynchronies using the CircStat toolbox for Matlab (Berens, 2009). Asynchronies were computed by calculating the circular mean for each trial and then converted back to mean asynchrony

(in ms), since statistical methodology of circular data is not available for multifactor repeated-measures analyses (e.g., Wöllner, Deconinck, Parkinson, Hove, & Keller, 2012). Before entering the data into separate repeated-measures analyses of variance (ANOVAs), trials with identical conditions were averaged. If the data did not meet the sphericity assumption (Mauchly's W), a Greenhouse-Geisser correction was used. Post hoc comparisons were calculated with a Bonferroni adjustment.

Time estimation data. Time estimations for trials not fitting the criteria for successful SMS were removed from analysis. Time estimations (subjective time) were divided by the target duration (objective time) and subtracted by 1. This ratio is a standard method in assessing time estimation, whereby 0 indexes perfect time estimation, positive values overestimations and negative values underestimations of time, allowing for comparisons of time estimations for different target durations. In a last step, time estimation ratios for identical stimuli were averaged before a repeated-measures ANOVA was performed on the data. If the sphericity assumption was not met (Mauchly's W), a Greenhouse-Geisser correction was used. Bonferroni adjustments were employed for post hoc comparisons.

Relationship between time estimation ratio and tapping performance. To assess the relationship between time estimations and tapping performance, repeated-measures correlations including the factors Listening Condition and Tempo were computed (Bakdash & Marusich, 2017). Two separate correlations between time estimation ratios and tapping consistencies as well as time estimation ratios and tapping accuracies were computed. This statistical technique does account for the within-participants study design. Using simple regression/correlation techniques would violate the assumption of independence or require averaging/aggregation the data.

Results

Results are presented in the following order: First, effects of the factors Listening Condition, Tempo, Patterns, and the two groups (musicians vs. nonmusicians) on time estimation ratios are reported, followed by effects of the same factors on tapping consistency and tapping accuracy. Finally, the relationship between the two tapping performance measures and time estimation ratios are reported.

TIME ESTIMATIONS

To test for effects on time estimations, a repeated-measures ANOVA with the factors Listening Condition

(listening-only without tapping, tapping to half notes, quarter notes, eighth notes), Tempo (83, 120, 150 BPM), and Pattern (pattern #1, #2, #3) was run on time estimation ratios with the two groups as a between-participant factor. The ANOVA yielded a significant main effect for factor Listening Condition, $F(1.89, 47.16) = 11.08, p < .001, \eta_p^2 = .31$, suggesting that attending and tapping to a specific metrical level influenced the time estimations. Post hoc comparisons indicate that tapping to half notes shortened perceived time, differing from all other metrical levels ($p < .01$). The other levels did not show a significant difference between them ($p > .05$) (Figure 3A).

Time estimations were also affected by factor Tempo, $F(1.16, 28.93) = 13.61, p < .001, \eta_p^2 = .35$, suggesting that the faster the tempo, the longer stimuli seemed to last and the more accurate the time was estimated. Post hoc comparisons showed that all tempi differed from each other ($p < .05$) (Figure 3B).

Factor Pattern showed a main effect, $F(1.39, 34.89) = 6.26, p < .05, \eta_p^2 = .20$, suggesting that the musical characteristics of the patterns affected time estimations. Pattern #1 led to the shortest time estimations differing from the others ($p < .05$). Pattern #2 and #3 did not differ ($p > .05$) (Figure 3C).

Musicians and nonmusicians did not estimate the stimuli durations differently, $F(1, 25) = 0.02, p > .05, \eta_p^2 = .01$. The factor did not interact with any other factor either ($p > .05$).

Main factors Listening Condition and Pattern interacted with each other, $F(6, 150) = 3.12, p < .01, \eta_p^2 = .11$, suggesting that the effect of Listening Condition differs as a function of Pattern (Figure 3D). To further investigate this interaction, contrasts were performed on comparing all three patterns with each listening condition. Results show that tapping to half notes compared to quarter notes was perceived to last longer for pattern #1 than pattern #2 ($p < .01$). Further significant contrasts were found between quarter notes compared to eighth notes, which were judged longer for pattern #2 than for pattern #1 ($p < .001$). Tapping to eighth notes compared to quarter notes also differed between pattern #2 and #3 ($p < .01$), showing that time estimations were not affected for pattern #3 at these two metrical levels. No other interactions between main factors were found ($p > .05$).

TAPPING PERFORMANCE

To test for effects of the main factors Listening Condition, Tempo, and Pattern on tapping performance, two separate repeated-measures ANOVAs on circular variance as a measure for tapping consistency and

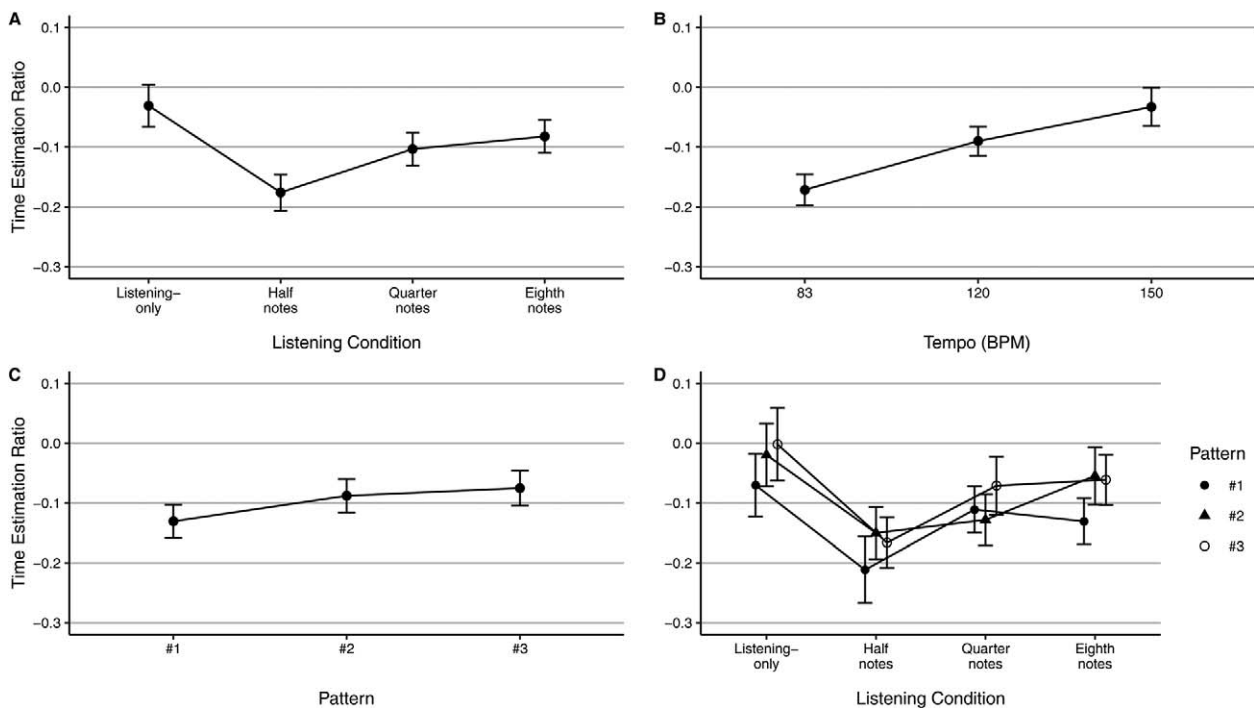


FIGURE 3. Results of the time estimation ratios for each main factor and significant interaction effects. Error bars indicate 95% confidence intervals.

mean asynchrony as a measure for tapping accuracy were run, with the two groups as a between-participant factor.

Tapping consistency. The ANOVA showed a main effect for Listening Condition on circular variance, $F(2, 50) = 21.86, p < .001, \eta_p^2 = .47$, suggesting that tapping consistency decreased with lower metrical levels. Figure 4 illustrates the circular histograms for the three metrical levels participants tapped to for all patterns and tempi. Post hoc comparisons indicate that tapping consistency was lowest for eighth notes compared to half notes and quarter notes ($p < .001$), while half notes and quarter notes did not differ ($p > .05$).

Factor Tempo yielded a main effect on circular variance as well, $F(2, 50) = 13.77, p < .001, \eta_p^2 = .36$, suggesting that tapping consistency decreased with faster tempi. 83 BPM showed the highest tapping consistency compared to 120 BPM ($p < .01$) and 150 BPM ($p < .001$). 120 and 150 BPM did not differ ($p > .05$).

Factor Pattern did not show a main effect on circular variance, $F(2, 50) = 1.30, p > .05, \eta_p^2 = .05$, indicating that the characteristics of the patterns did not influence tapping consistency. The between-participants factor showed no effect, $F(1, 25) = 3.05, p > .05, \eta_p^2 = .11$, suggesting that musicians and nonmusicians performed similar in terms of tapping consistency.

Factors Listening Condition and Tempo interacted with each other, $F(2.61, 65.34) = 8.96, p < .001, \eta_p^2 = .26$, indicating that tapping consistency was affected by tapping rate as both factors changed the respective ITIs (Figure 5A). Contrast analysis showed that circular variance increased for eighth note level compared to half note level between 83 and 120 BPM ($p < .01$), 83 and 150 BPM ($p < .001$), as well as 120 and 150 BPM ($p < .05$). Circular variance was not affected by Tempo when tapping to half notes ($p > .05$). Furthermore, circular variance differed between quarter notes and eighth notes, between 83 and 120 BPM ($p < .01$), and between 83 and 150 BPM ($p < .001$), indicating that the tempo only affected tapping consistency on the eighth note level, showing an increase in circular variance. There were no further interaction effects ($p > .05$).

Tapping accuracy. The ANOVA on asynchronies yielded a main effect for factor Listening Condition, $F(2, 50) = 13.10, p < .001, \eta_p^2 = .34$, suggesting that tapping to different metrical levels influenced accuracy. Particularly, the lower the metrical level (higher tapping rate), the smaller was the negative mean asynchrony, meaning that the corresponding metrical level within the pattern was less anticipated. Post hoc comparisons confirmed that all metrical levels differed from each other ($p < .05$).

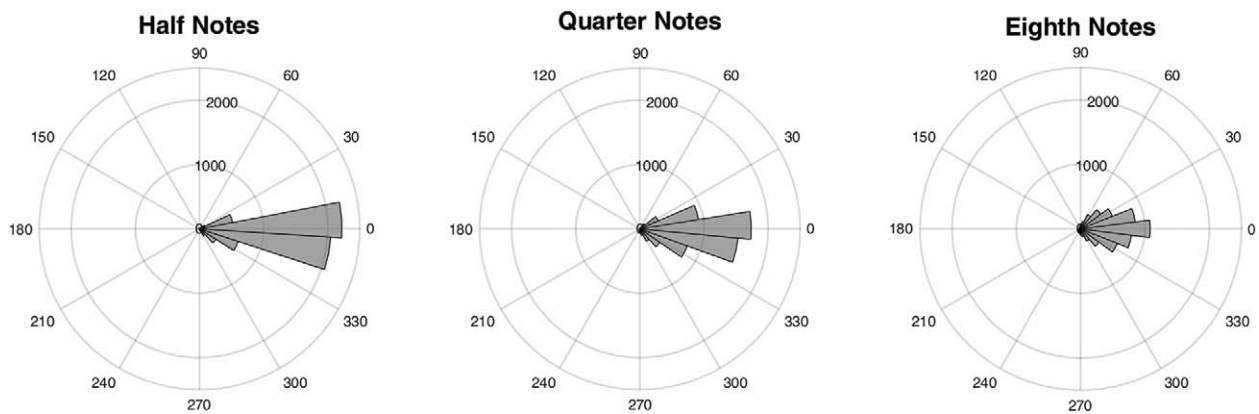


FIGURE 4. Circular histogram of participants' tapping according to Listening Condition. The size of the bins represent the total number of taps, 0° represents the beat.

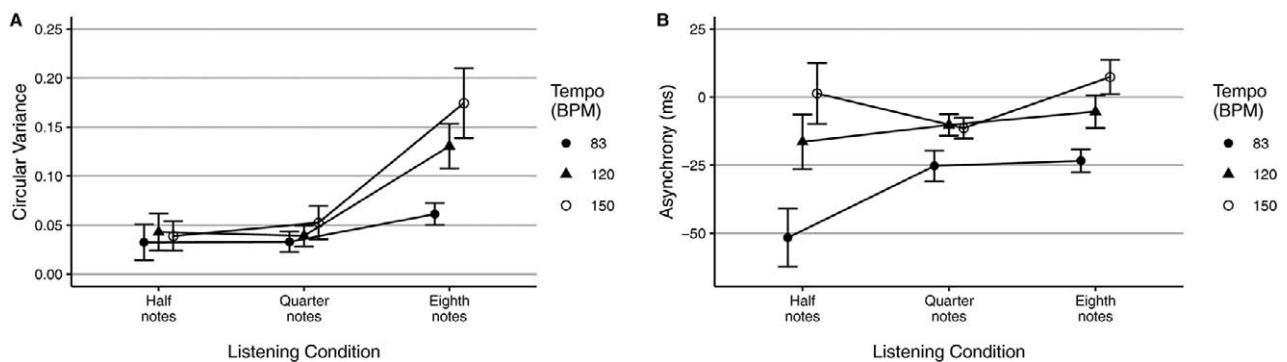


FIGURE 5. Significant interactions in tapping performance for (A) circular variance (B) and asynchrony. Error bars indicate 95% confidence intervals.

Tempo yielded a main effect, $F(1.50, 37.47) = 52.46$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .68$, suggesting that the faster the tempo, the less participants anticipated the corresponding metrical level (smaller negative mean asynchrony). Post hoc comparisons confirmed that all tempi differed in terms of mean asynchrony ($p < .01$). Mean asynchrony was not influenced by factor Pattern, $F(1.33, 33.31) = 2.15$, $p > .05$, $\eta_p^2 = .08$, thus the musical characteristics did not affect tapping accuracy.

Furthermore, the ANOVA yielded an interaction between factors Listening Condition and Tempo, $F(2.51, 62.86) = 9.16$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .27$ (Figure 5B). Contrast analysis indicates that asynchronies differed when tapping to half notes and quarter notes between 83 and 120 BPM ($p < .01$), and between 83 and 150 BPM ($p < .001$). Asynchronies for half notes differed between 120 BPM and 150 BPM as well ($p < .01$). Comparing half and eighth notes, asynchronies differed at all

tempi ($p < .05$), whereas asynchronies between 120 and 150 BPM were only affected for eighth notes compared to quarter notes ($p < .01$).

Musicians and nonmusicians did not perform differently in terms of tapping accuracy, $F(1, 25) = 0.41$, $p > .05$, $\eta_p^2 = .03$. Yet, there was an interaction with factor Tempo, $F(1.50, 37.47) = 3.94$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .14$. Contrast analysis indicates that nonmusicians showed higher negative asynchronies at 83 BPM compared to 150 BPM than musicians ($p < .05$), suggesting that asynchronies were less affected by Tempo for musicians than nonmusicians. Furthermore, factor Pattern interacted with the groups as well, $F(1.33, 33.31) = 3.96$, $p < .05$, $\eta_p^2 = .18$. Contrasts analysis suggests that musicians' tapping accuracy was less influenced by the patterns than nonmusicians' tapping accuracy, showing higher negative asynchronies for pattern #2 compared to the other two ($p < .05$). No

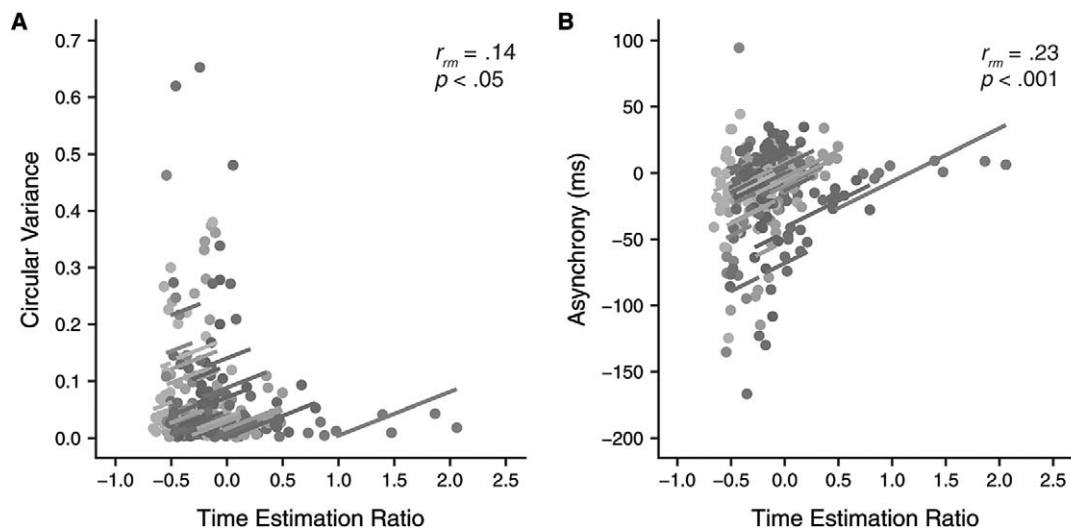


FIGURE 6. Repeated-measures correlation between (A) time estimation ratio and circular variance, and (B) between time estimation ratio and mean asynchrony, across Listening Condition and Tempo. Lines represent the fit for each individual participant.

other interactions between main factors were found ($p > .05$).

REPEATED-MEASURES CORRELATION BETWEEN TIME ESTIMATIONS AND TAPPING MEASURES

To assess the relationship between time estimations and tapping performance, two separate repeated-measure correlations were computed. Since factor Pattern did not show main effects on circular variance and mean asynchrony, data were averaged over the three patterns, therefore the correlations included the factors Listening Condition and Tempo. As Figure 6A shows, tapping consistency was significantly correlated with time estimation ratios, $r_{rm} = .14$, $p < .05$, $CI(.01, .26)$. The positive correlation shows that the higher the time estimation ratio, the higher the circular variance. In other words, the more unstable participants tapped, the longer they estimated the durations. Similarly, mean asynchrony as a measure of tapping accuracy yielded a significant correlation with time estimation ratios, $r_{rm} = .23$, $p < .001$, $CI(.11, .35)$, indicating that the higher the negative mean asynchrony, the shorter participants estimated the durations (Figure 6B).

Discussion

Previous studies have shown that the tempo of music has an impact on its perceived duration. Yet what is perceived as the most salient beat in music, and hence the tempo, may differ between individuals. This study aimed at investigating the relationship between the

metrical level of musical rhythmic patterns to which individuals actively attend (sensorimotor synchronization, SMS) and the perception of time. While listening to the patterns without tapping led to the longest and most accurate time estimations, SMS resulted in underestimations of stimuli durations. When synchronizing to a high metrical level (half notes), participants estimated time to be the shortest, while time estimations increased with lower metrical levels (quarter and eighth notes). Therefore, results of this study suggest that focusing on higher metrical levels in music, by directing attention and motor activity, affects perceived time. In other words, time passes differently for listeners of the same music, depending on the metrical level attended to.

The first hypothesis stated that the metrical level chosen for SMS influences time estimations, because structuring attentional processes and motor activity affects internal timing mechanisms according to internal clock models. Results showed that tapping to the half note level led to the shortest time estimations, followed by the quarter note level and eighth note level. While time was underestimated in all conditions, in the listening-only condition without tapping time was estimated as lasting longer compared to the SMS conditions. This can be explained by attentional processes. According to the attentional gate model (Block & Zakay, 1996; Zakay & Block, 1995), participants may have allocated more attentional resources to the time estimation task, thus time seemed to last longer following the accumulation of more pulses. Accordingly, time estimations

were most accurate without tapping. When participants tapped to the patterns, in contrast, durations were estimated to last longer with lower metrical levels (higher tapping rate) compared to the other listening conditions including tapping. The interaction between factors Listening Condition and Pattern indicates that the characteristics of the patterns influenced time estimations (Drake et al., 1999; McKinney & Moelants, 2006; Moelants & McKinney, 2004), especially at the quarter note and eighth note level. The time-shortening effect of the half note level was particularly large for patterns #1 and #3, suggesting that SMS with a higher metrical level shortens perceived time, particularly for musical rhythms with higher beat salience (i.e., preferred tapping rate).

The second hypothesis stated that time estimations are longer with faster tempi, which was confirmed by the results showing that musical tempo affected time estimations. This is in line with findings from previous studies suggesting the same effect of musical tempo on time perception (Droit-Volet et al., 2013; Oakes, 2003; Treisman et al., 1990), as well as for visual rhythms (Droit-Volet & Wearden, 2002; Ortega & López, 2008), thus, the tempo effect for rhythms seems to be robust in different modalities. The current study adds empirical support for time perception theories suggesting that faster rhythms cause an internal clock or pulse generator to run faster and thus accumulate more pulses.

The third hypothesis proposed that the musical characteristics of the patterns should influence time estimations. This was supported by the results, yet of all factors in this study, the different patterns showed the smallest effect on time estimations. Only pattern #1, which was the one most similar to the common “PoumTchak” pattern (Zeiner-Henriksen, 2010b), was different to patterns #2 and #3, leading to shorter perceptions of time. An explanation might be that pattern #1 showed the lowest event density and therefore was perceived as being slower or less physiologically arousing. The interaction between factors Pattern and Listening Condition, as discussed above, suggests that the perception of time is not independent from psychoacoustical characteristics of the patterns, especially for the quarter and eighth note level. Pattern #3, consisting of the lowest high-frequency spectral flux, showed no difference between quarter notes and eighth notes, and pattern #1 resulted in only a small time-lengthening trend for eighth notes. In Pattern #2, durations were perceived to be longer when tapping to eighth notes compared to quarter notes. It should be noted that pattern #2 had the lowest degree of participants’ agreement on the preferred tapping rate (coefficient of unlikeability) in the pilot study.

Nevertheless, patterns #1 and #2 consisted of similar high-frequency flux values, and the snare drum was placed in both patterns at the corresponding metrical levels, suggesting that event density of percussive instruments with prominent timbral features might be of particular importance for the perception of time. Taken together, results show that musical characteristics may influence time perception differently for specific metrical levels, revealing a complex interaction between these factors. More research on psychoacoustic characteristics, beat salience, and time perception is needed to corroborate the current findings.

The fourth hypothesis stated that musicians would estimate time as lasting longer compared to nonmusicians. Based on findings of the influence of cognitive load on time estimations and on the attentional gate model (Block et al., 2010; Block & Zakay, 1996; Zakay & Block, 1995), it was assumed that musicians would find it easier to perform the SMS tasks and could therefore allocate more attention to the time estimation task, which should have caused time to last longer. Nevertheless, there was no effect for time estimations, and also no main differences regarding tapping performance between these two groups of participants, suggesting that musicians and nonmusicians were able to allocate attentional resources equally to both tasks. Effects of the groups were present in statistical interaction effects, indicating that musicians’ tapping accuracy (smaller negative mean asynchrony) was less affected by the three tempi than it was for the nonmusicians group. Nonmusicians tapped with higher negative mean asynchrony at the slow tempo and were also more affected by the patterns, resulting in a higher negative mean asynchrony for pattern #2, which showed the least consensus on a preferred tapping rate in the pilot study. While this interaction may partly support previous research into music training and tapping performance (Repp, 2010; Repp & Doggett, 2007), the absence of main effects regarding tapping accuracy and consistency are more in line with Hove, Spivey, and Krumhansl (2010). Since both factors yielded no main effects and the interaction showed no crossover effect, this result should be interpreted with caution. It seems more likely that tapping performance is not simply enhanced by general music training, but should rather improve with domain-specific instrumental training such as for percussion instruments (Repp, London, & Keller, 2013).

Tapping performance measures showed a small tendency towards positive correlations with time estimations, indicating that time is perceived as lasting longer when tapping becomes less stable and less anticipatory

in terms of smaller negative asynchronies. This supports the assumption that the more difficult it is to synchronize with a musical rhythm, the fewer attentional resources are available for time estimation. Since tapping performance of the participants was generally successful (very few reactive taps), more extreme tempi could lead to more variability in tapping performance (see also Madison, 2014). In addition, future studies could use more complex tapping tasks such as presenting rhythms with varying metrical time signatures or polyrhythms in order to address this relationship in more detail.

In this study, self-produced musical rhythmic patterns were used, which allowed for the presentation at different tempi without the need for audio manipulation such as time-stretching or a posteriori modifications of other psychoacoustic parameters. Although some participants reported experiencing “ear worms” after the experiment, anecdotally supporting the goal of creating a realistic music listening experience, future studies should use real pieces of music to investigate if the reported effects of SMS on time estimations can be replicated. As a starting point, we decided to use controlled stimuli that bore sufficient resemblance with electronic dance music. These patterns showed interactions between non-temporal musical features and time perception. As mentioned above, another possible approach would be to test the effect of different rhythmic complexities with other ratios such as triple and quadruple meters. This would allow for investigations of the relationship between tapping performance, various rhythmic structures and perceived time. Furthermore, future studies could use different methods to investigate psychological time by employing time estimation, time production and reproduction tasks, since each method has certain advantages and drawbacks (cf. Mioni, 2018). In the current study, the verbal estimation method was chosen since it offered a good balance

between motor coordination (SMS) and time estimation responses.

To conclude, this study is the first to show that the metrical level chosen for sensorimotor synchronization to music affects time estimations. If attention and motor activity is directed towards higher metrical levels, perceptions of time are shortened. Thus, when listening to music with an ambiguous musical tempo, individuals may have different temporal experiences that go beyond a simple beats per minute measure. Future research on time perception using musical stimuli should take the beat salience of the music into consideration. Complex musical structures may induce inter- and intraindividual ambiguity in perceived tempi, which correspondingly affects perceived time. The results might also be of particular interests for the choice of appropriate music for situations in which the perception of time is important, such as in waiting situations or commercial applications including song selection for certain background contexts. The findings do not only offer new insights into the field of music psychology but also into the field of time perception more generally, supporting the assumption of a unified sensorimotor sense of time.

Author Note

This research was supported by a grant from the European Research Council to the second author (grant agreement: 725319) for the project “Slow motion: Transformations of musical time in perception and performance” (SloMo). We would like to acknowledge the contribution of Federico Visi in the pilot phase of this study, particularly regarding the rhythmic patterns.

Correspondence concerning this article should be addressed to David Hammerschmidt, Institute of Systematic Musicology, University of Hamburg, Neue Rabenstr. 13, 20354 Hamburg, Germany. E-mail: david.hammerschmidt@uni-hamburg.de

References

- ALLURI, V., & TOIVIAINEN, P. (2010). Exploring perceptual and acoustical correlates of polyphonic timbre. *Music Perception, 27*, 223–242. <https://doi.org/10.1525/mp.2010.27.3.223>
- BAKDASH, J. Z., & MARUSICH, L. R. (2017). Repeated measures correlation. *Frontiers in Psychology, 8*, 456. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00456>
- BERENS, P. (2009). CircStat: A Matlab toolbox for circular statistics. *Journal of Statistical Software, 31*(10), 1–21. <https://doi.org/10.18637/jss.v031.i10>
- BLOCK, R. A., GRONDIN, S., & ZAKAY, D. (2018). Prospective and retrospective timing processes: Theories, methods, and findings. In A. Vatakis, F. Balci, M. Di Luca, & Á. Correa (Eds.), *Timing and time perception: Procedures, measures, and applications* (pp. 32–51). Leiden, SH: Brill.
- BLOCK, R. A., HANCOCK, P. A., & ZAKAY, D. (2010). How cognitive load affects duration judgments: A meta-analytic review. *Acta Psychologica, 134*, 330–343. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.03.006>

- BLOCK, R. A., & ZAKAY, D. (1996). Models of psychological time revisited. In H. Helfrich (Ed.), *Time and mind* (pp. 171–195). Seattle, WA: Hogrefe & Huber.
- BOLTZ, M. G. (2011). Illusory tempo changes due to musical characteristics. *Music Perception*, 28, 367–386. <https://doi.org/10.1525/mp.2011.28.4.367>
- BURGER, B., AHOKAS, R., KEIPI, A., & TOIVAINEN, P. (2013). Relationships between spectral flux, perceived rhythmic strength, and the propensity to move. In R. Bresin (Ed.), *Proceedings of the Sound and Music Computing Conference 2013* (pp. 179–184). Berlin: Logos.
- BURGER, B., LONDON, J., THOMPSON, M. R., & TOIVAINEN, P. (2018). Synchronization to metrical levels in music depends on low-frequency spectral components and tempo. *Psychological Research*, 82, 1195–1211. <https://doi.org/10.1007/s00426-017-0894-2>
- CAMERON, M. A., BAKER, J., PETERSON, M., & BRAUNSBERGER, K. (2003). The effects of music, wait-length evaluation, and mood on a low-cost wait experience. *Journal of Business Research*, 56, 421–430. [https://doi.org/10.1016/S0148-2963\(01\)00244-2](https://doi.org/10.1016/S0148-2963(01)00244-2)
- COOPER, G. W., & MEYER, L. B. (1960). *The rhythmic structure of music*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- DRAKE, C., GROS, L., & PENEL, A. (1999). How fast is the music? The relation between physical and perceived tempo. In S.-W. Yi (Ed.), *Music, mind, and science* (pp. 190–203). Seoul, Korea: Seoul National University Press.
- DRAKE, C., JONES, M. R., & BARUCH, C. (2000). The development of rhythmic attending in auditory sequences: Attunement, referent period, focal attending. *Cognition*, 77, 251–288. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(00\)00106-2](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(00)00106-2)
- DRAKE, C., PENEL, A., & BIGAND, E. (2000). Tapping in time with mechanically and expressively performed music. *Music Perception*, 18, 1–23. <https://doi.org/10.2307/40285899>
- DROIT-VOLET, S., BIGAND, E., RAMOS, D., & BUENO, J. L. O. (2010). Time flies with music whatever its emotional valence. *Acta Psychologica*, 135, 226–232. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.07.003>
- DROIT-VOLET, S., RAMOS, D., BUENO, J. L. O., & BIGAND, E. (2013). Music, emotion, and time perception: The influence of subjective emotional valence and arousal? *Frontiers in Psychology*, 4, 417. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00417>
- DROIT-VOLET, S., & WEARDEN, J. (2002). Speeding up an internal clock in children? Effects of visual flicker on subjective duration. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section B*, 55, 193–211. <https://doi.org/10.1080/02724990143000252>
- DROR, D. M., PANDA, P., MAY, C., MAJUMDAR, A., & KOREN, R. (2014). “One for all and all for one”: Consensus-building within communities in rural India on their health microinsurance package. *Risk Management and Healthcare Policy*, 7, 139–153. <https://doi.org/10.2147/RMHP.S66011>
- EITAN, Z., & GRANOT, R. Y. (2009). Primary versus secondary musical parameters and the classification of melodic motives. *Musicae Scientiae*, 13(1_suppl), 139–179. <https://doi.org/10.1177/102986490901300107>
- EPSTEIN, D. (1995). *Shaping time: Music, the brain and performance*. New York: Schirmer Books.
- GIBBON, J. (1977). Scalar expectancy theory and Weber’s law in animal timing. *Psychological Review*, 84, 279–325. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.84.3.279>
- GIBBON, J., CURCH, R. M., & MECK, W. H. (1984). Scalar timing in memory. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 423, 52–77. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1984.tb23417.x>
- GIL, S., & DROIT-VOLET, S. (2012). Emotional time distortions: The fundamental role of arousal. *Cognition and Emotion*, 26, 847–862. <https://doi.org/10.1080/02699931.2011.625401>
- GRONDIN, S. (2010). Timing and time perception: A review of recent behavioral and neuroscience findings and theoretical directions. *Attention, Perception, and Psychophysics*, 72, 561–582. <https://doi.org/10.3758/APP.72.3.561>
- HANNON, E. E., SNYDER, J. S., EEROLA, T., & KRUMHANSL, C. L. (2004). The role of melodic and temporal cues in perceiving musical meter. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 30, 956–974. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.30.5.956>
- HOVE, M. J., SPIVEY, M. J., & KRUMHANSL, C. L. (2010). Compatibility of motion facilitates visuomotor synchronization. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 36, 1525–1534. <https://doi.org/10.1037/a0019059>
- JONES, M. R. (2004). Attention and timing. In J. G. Neuhoff (Ed.), *Ecological psychoacoustics* (pp. 49–85). Amsterdam, Boston: Elsevier Academic Press.
- KELLARIS, J. J., & KENT, R. J. (1992). The influence of music on consumers’ temporal perceptions: Does time fly when you’re having fun? *Journal of Consumer Psychology*, 1, 365–376. [https://doi.org/10.1016/S1057-7408\(08\)80060-5](https://doi.org/10.1016/S1057-7408(08)80060-5)
- LARTILLOT, O., TOIVAINEN, P., & EEROLA, T. (2008). A Matlab toolbox for music information retrieval. In C. Preisach, H. Burkhardt, & L. Schmidt-Thieme (Eds.), *Data analysis, machine learning and applications: Studies in classification, data analysis, and knowledge organization* (pp. 261–268). Berlin, Heidelberg: Springer.
- LERDAHL, F., & JACKENDOFF, R. (1983). An overview of hierarchical structure in music. *Music Perception*, 1, 229–252. <https://doi.org/10.2307/40285257>
- LONDON, J. (2011). Tactus \neq tempo: Some dissociations between attentional focus, motor behavior, and tempo judgment. *Empirical Musicology Review*, 6, 43–55. <https://doi.org/10.18061/1811/49761>
- LONDON, J. (2012). *Hearing in time: Psychological aspects of musical meter* (2nd ed.). Oxford, UK: Oxford University Press.

- LONDON, J., BURGER, B., THOMPSON, M., & TOIVIAINEN, P. (2016). Speed on the dance floor: Auditory and visual cues for musical tempo. *Acta Psychologica*, *164*, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2015.12.005>
- MADISON, G. (2014). Sensori-motor synchronisation variability decreases as the number of metrical levels in the stimulus signal increases. *Acta Psychologica*, *147*, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2013.10.002>
- MADISON, G., & PAULIN, J. (2010). Ratings of speed in real music as a function of both original and manipulated beat tempo. *Journal of the Acoustical Society of America*, *128*, 3032–3040. <https://doi.org/10.1121/1.3493462>
- MARTENS, P. A. (2011). The ambiguous tactus: Tempo, subdivision benefit, and three listener strategies. *Music Perception*, *28*, 433–448. <https://doi.org/10.1525/mp.2011.28.5.433>
- MATHÔT, S., SCHREIJ, D., & THEEUWES, J. (2012). OpenSesame: An open-source, graphical experiment builder for the social sciences. *Behavior Research Methods*, *44*, 314–324. <https://doi.org/10.3758/s13428-011-0168-7>
- McKINNEY, M. F., & MOELANTS, D. (2006). Ambiguity in tempo perception: What draws listeners to different metrical levels? *Music Perception*, *24*, 155–166. <https://doi.org/10.1525/mp.2006.24.2.155>
- MIONI, G. (2018). Methodological issues in the study of prospective timing. In A. Vatakis, F. Balci, M. Di Luca, & Á. Correa (Eds.), *Timing and time perception: Procedures, measures, and applications* (pp. 79–97). Leiden, SH: Brill.
- MOELANTS, D. (2002). Preferred tempo reconsidered. In C. J. Stevens, D. K. Burnham, G. McPherson, E. Schubert, & J. Renwick (Eds.), *Proceedings of the 7th Conference on Music Perception and Cognition* (pp. 580–583). Sydney, NSW: Causal Productions.
- MOELANTS, D., & MCKINNEY, M. F. (2004). Tempo perception and musical content: What makes a piece fast, slow or temporally ambiguous. In S. D. Lipscomb, R. Ashley, R. O. Gjerdingen, & P. Webster (Eds.), *Proceedings of the 8th Conference on Music Perception and Cognition* (pp. 558–562). Evanston, IL: Society for Music Perception & Cognition.
- NORTH, A. C., & HARGREAVES, D. J. (1999). Can music move people? *Environment and Behavior*, *31*, 136–149. <https://doi.org/10.1177/00139169921972038>
- NOULHIANE, M., MELLA, N., SAMSON, S., RAGOT, R., & POUTHAS, V. (2007). How emotional auditory stimuli modulate time perception. *Emotion*, *7*, 697–704. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.7.4.697>
- OAKES, S. (2003). Musical tempo and waiting perceptions. *Psychology and Marketing*, *20*, 685–705. <https://doi.org/10.1002/mar.10092>
- ORTEGA, L., & LÓPEZ, F. (2008). Effects of visual flicker on subjective time in a temporal bisection task. *Behavioural Processes*, *78*, 380–386. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2008.02.004>
- PARNCUTT, R. (1994). A perceptual model of pulse salience and metrical accent in musical rhythms. *Music Perception*, *11*, 409–464. <https://doi.org/10.2307/40285633>
- REPP, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization: A review of the tapping literature. *Psychonomic Bulletin and Review*, *12*, 969–992. <https://doi.org/10.3758/BF03206433>
- REPP, B. H. (2006). Rate limits of sensorimotor synchronization. *Advances in Cognitive Psychology*, *2*, 163–181. <https://doi.org/10.2478/v10053-008-0053-9>
- REPP, B. H. (2010). Sensorimotor synchronization and perception of timing: Effects of music training and task experience. *Human Movement Science*, *29*, 200–213. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2009.08.002>
- REPP, B. H., & DOGGETT, R. (2007). Tapping to a very slow beat: A comparison of musicians and nonmusicians. *Music Perception*, *24*, 367–376. <https://doi.org/10.1525/mp.2007.24.4.367>
- REPP, B. H., LONDON, J., & KELLER, P. E. (2013). Systematic distortions in musicians' reproduction of cyclic three-interval rhythms. *Music Perception*, *30*, 291–305. <https://doi.org/10.1525/mp.2012.30.3.291>
- REPP, B. H., & SU, Y.-H. (2013). Sensorimotor synchronization: A review of recent research (2006–2012). *Psychonomic Bulletin and Review*, *20*, 403–452. <https://doi.org/10.3758/s13423-012-0371-2>
- SNOMAN, R. (2009). *Dance music manual: Tools, toys and techniques* (2nd ed.). Amsterdam, NH: Focal.
- SNYDER, J. S., & KRUMHANSL, C. L. (2001). Tapping to ragtime: Cues to pulse finding. *Music Perception*, *18*, 455–489. <https://doi.org/10.1525/mp.2001.18.4.455>
- TOIVIAINEN, P., & SNYDER, J. S. (2003). Tapping to Bach: Resonance-based modeling of pulse. *Music Perception*, *21*, 43–80. <https://doi.org/10.1525/mp.2003.21.1.43>
- TREISMAN, M. (1963). Temporal discrimination and the indifference interval: Implications for a model of the "internal clock." *Psychological Monographs: General and Applied*, *77*(13), 1–31. <https://doi.org/10.1037/h0093864>
- TREISMAN, M., FAULKNER, A., NAISH, P. L. N., & BROGAN, D. (1990). The internal clock: Evidence for a temporal oscillator underlying time perception with some estimates of its characteristic frequency. *Perception*, *19*, 705–743. <https://doi.org/10.1068/p190705>
- VAN NOORDEN, L., & MOELANTS, D. (1999). Resonance in the perception of musical pulse. *Journal of New Music Research*, *28*, 43–66. <https://doi.org/10.1076/jnmr.28.1.43.3122>
- WÖLLNER, C., DECONINCK, F. J. A., PARKINSON, J., HOVE, M. J., & KELLER, P. E. (2012). The perception of prototypical motion: Synchronization is enhanced with quantitatively morphed gestures of musical conductors. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *38*, 1390–1403. <https://doi.org/10.1037/a0028130>

- WÖLLNER, C., HAMMERSCHMIDT, D., & ALBRECHT, H. (2018). Slow motion in films and video clips: Music influences perceived duration and emotion, autonomic physiological activation and pupillary responses. *PLOS ONE*, 13(6), e0199161. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199161>
- ZAKAY, D., & BLOCK, R. A. (1995). An attentional-gate model of prospective time estimation. In M. Richelle, V. D. Keyser, G. d'Ydewalle, & A. Vandierendonck (Eds.), *Time and the dynamic control of behavior* (pp. 167–178). Liège, LG: P.A.I.
- ZEINER-HENRIKSEN, H. T. (2010a). Moved by the groove: Bass drum sounds and body movements in electronic dance music. In A. Danielsen (Ed.), *Ashgate popular and folk music series. Musical rhythm in the age of digital reproduction* (pp. 121–139). Farnham, SU: Ashgate.
- ZEINER-HENRIKSEN, H. T. (2010b). The “PoumTchak” pattern: Correspondences between rhythm, sound, and movement in electronic dance music. Retrieved from <https://www.duo.uio.no/handle/10852/56756>

8.3 Studie 2

**Hammerschmidt, D., Wöllner, C.,
London, J. & Burger, B. (2021)**

**Disco time: The relationship between perceived duration
and tempo in music**

Music & Science, 4

Creative Commons BY-NC

Disco Time: The Relationship Between Perceived Duration and Tempo in Music

David Hammerschmidt¹ , Clemens Wöllner¹ ,
Justin London² and Birgitta Burger¹

Music & Science

Volume 4: 1–11

© The Author(s) 2021

Article reuse guidelines:

sagepub.com/journals-permissions

DOI: 10.1177/2059204320986384

journals.sagepub.com/home/mns

Abstract

Our perception of the duration of a piece of music is related to its tempo. When listening to music, absolute durations may seem longer as the tempo—the rate of an underlying pulse or beat—increases. Yet, the perception of tempo itself is not absolute. In a study on perceived tempo, participants were able to distinguish between different tempo-shifted versions of the same song (± 5 beats per minute (BPM)), yet their tempo ratings did not match the actual BPM rates; this finding was called tempo anchoring effect (TAE). In order to gain further insights into the relation between duration and tempo perception in music, the present study investigated the effect of musical tempo on two different duration measures, to see if there is an analog to the TAE in duration perception. Using a repeated-measures design, 32 participants (16 musicians) were randomly presented with instrumental excerpts of Disco songs at the original tempi and in tempo-shifted versions. The tasks were (a) to reproduce the absolute duration of each stimulus (14–20 s), (b) to estimate the absolute duration of the stimuli in seconds, and (c) to rate the perceived tempo. Results show that duration reproductions were longer with faster tempi, yet no such effect was found for duration estimations. Thus, lower-level reproductions were affected by the tempo, but higher-level estimations were not. The tempo-shifted versions showed no effect on both duration measures, suggesting that the tempo difference for the duration-lengthening effect requires a difference of at least 20 BPM, depending on the duration measure. Results of perceived tempo replicated the typical rating pattern of the TAE, but this was not found in duration measures. The roles of spontaneous motor tempo and musical experience are discussed, and implications for future studies are given.

Keywords

Auditory timing, duration estimation, duration reproduction, musical experience, tempo perception, tempo rating, time perception

Submission date: 11 March 2020; Acceptance date: 17 December 2020

Introduction

In perceiving the timing of events, we can attend to the duration of individual events as well as the rate at which a series of events occurs; in other words, the familiar distinction between interval-based and beat-based timing and time perception. In a musical context, event rate is known as tempo, often indexed in beats per minute (BPM). Duration and event rate in music are closely linked, as the tempo of rhythmic sequences causes the perception of these “musically filled” durations to be distorted (Hammerschmidt & Wöllner, 2020; Droit-Volet et al., 2013). Faster rhythmic tempi lead to time seeming to pass more quickly, as equivalent durations are judged to be longer in comparison to the same time interval filled with

a rhythm at a slower tempo (Ortega & López, 2008). However, the nature of the duration-lengthening effect in music is not well understood. For example, it is unclear if the duration-lengthening effect of faster tempi is found over different tempo ranges, and what the minimum tempo difference should be in order for this effect to occur. Furthermore, recent studies on tempo perception in music have

¹ Universität Hamburg, Hamburg, Germany

² Carleton College, Northfield, MN, USA

Corresponding author:

David Hammerschmidt, Institute of Systematic Musicology, Universität Hamburg, Alsterterrasse 1, 20354 Hamburg, Germany.

Email: david.hammerschmidt@uni-hamburg.de



Creative Commons Non Commercial CC BY-NC: This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits non-commercial use, reproduction and distribution of the work without further permission provided the original work is attributed as specified

on the SAGE and Open Access pages (<https://us.sagepub.com/en-us/nam/open-access-at-sage>).

shown that the judgment of perceived tempo can itself be distorted, since tempo ratings do not coincide with the actual tempo of the music when the same song is presented in multiple versions (London et al., 2016, 2019a, 2019b). The underlying mechanism(s) causing these effects are still under debate. Therefore, the current study aims at gaining further insights into the perception of duration and tempo, and the relationship between them, when listening to music by investigating these distortions in a combined-task experiment.

In cognitive psychology, the most commonly used paradigm in investigating duration perception is *prospective timing* (Block et al., 2010; Grondin, 2010). This paradigm, as opposed to *retrospective timing*, involves a task for which participants are informed in advance that a time judgment needs to be made. Prospective timing involves working memory, long-term memory, and attentional processes. This paradigm is often used for durations in the seconds to minutes range. Two of the main measures for prospective timing are *duration estimation* and *duration reproduction* (Grondin, 2008). In an estimation task, individuals are asked to translate their experienced duration of a stimulus into clock units (e.g. milliseconds, seconds), which typically involves a comparison of an experienced duration with a reference memory of internalized clock units (Block et al., 1998; Zakay, 1990). This translation produces a certain amount of variability and yields less accuracy. In addition, individuals have a tendency to use integer clock units for their response. In a reproduction task, participants reproduce the experienced duration of a stimulus, for example, by pressing a button at the start and at the end of the reproduction phase (Mioni et al., 2014). As such, duration reproduction does not involve a translation from experienced duration to clock units. Instead, a direct comparison of two duration experiences (i.e. encoding phase vs. reproduction phase) is made, a comparison that mainly relies on working memory. Compared to estimations, reproductions have been shown to produce more accurate and less variable responses (Mioni, 2018; Zakay, 1990). Thus, the type of duration measure and experimental task influence results when investigating duration perception, since they involve different cognitive processes.

Studies on duration perception in the context of music listening have shown that the tempo of music, measured as BPM, influences perceived duration. In a recent study on the influence of sensorimotor synchronization (SMS) to different metrical levels on perceived time in musical rhythmic patterns (Hammerschmidt & Wöllner, 2020), participants' duration estimations were influenced by the tempo of the patterns as well as their synchronization rate. Over a range of 83 to 150 BPM, faster tempi caused perceived time to pass by more quickly compared with slower tempi (duration range: 12.8–23.13 s). Likewise SMS, assessed by finger tapping, led to shorter duration estimations than listening-only, and SMS to a higher metrical level (longer inter-tap intervals) shortened perceived

durations, which is consistent with the duration-lengthening effect of increased tempo, highlighting the role of motor activity and attention on duration perception (Zakay & Block, 1996). Furthermore, no differences were found for duration estimations between musicians and non-musicians, suggesting that duration estimations of musical stimuli in the supra-second range are not influenced by musical training. Yet this finding does not rule out the possibility that musical training affects other measures such as reproductions, since this measure depends more on working memory and accurate encoding of musical features, including tempo. A study on the influence of emotional valence and arousal of music on duration perception, which included fast and slow tempo conditions as well, yielded similar results (Droit-Volet et al., 2013). Using a temporal bisection task, participants judged durations with music in the fast tempo conditions to be longer compared with slow tempo conditions (duration range: 0.5–6.8 s). Furthermore, the fast music was more arousing, showing the close link between musical tempo and physiological activation (i.e. arousal). The time distortion (duration-lengthening effect) of tempo has also been shown for simple and complex rhythmic sequences in auditory as well as visual stimuli (Droit-Volet & Wearden, 2002; Ortega & López, 2008; Treisman et al., 1990; Wöllner et al., 2018). Accordingly, in a study on perceived waiting time and background music, participants estimated perceived waiting time (4–15 min) to be longer with fast music compared with slow music (Oakes, 2003).

These findings in the supra-second duration range can be explained by interval timing theories such as the pacemaker-counter model (Gibbon et al., 1984; Treisman, 1963). These models assume that there is a mental pacemaker/timekeeper that generates pulses when a time judgment needs to be made. The more pulses the pacemaker generates during the to-be-judged duration, the longer the durational perception. The pulses are stored in an accumulator over the course of the to-be-judged duration, and the pulse count is compared to the reference memory when a judgment is made. Faster musical tempo increases the arousal level and causes the pacemaker to increase its rate; thus more pulses are generated and therefore more are accumulated over the same duration as compared with pulses generated at a slower rate, resulting in a longer duration judgment.

It is important to note that the “durations” to which we are referring are not single events (i.e. individual notes), but consist of multiple events that often occur at regular intervals (i.e. beats, measures). The metrical beat in music is an endogenous phenomenon, whereby regular or quasi-regular events give rise to a felt sense of pulse or “tactus” (London, 2012), as well as a sense that these pulses are organized in regularly recurring cycles or measures (Large et al., 2015; Large & Palmer, 2002; Phillips-Silver et al., 2011; Tierney & Kraus, 2015). The distinction between regular event structures with a felt sense of pulse versus irregular event

structures with no felt sense of pulse is important, since different neural substrates are involved in the auditory processing of each (Teki et al., 2011). Beat perception, which most strongly occurs in the temporal range around 120 BPM (Fraisse, 1984; Moelants, 2002, 2003; van Noorden & Moelants, 1999) activates the striato-thalamo-cortical network, and thus may involve sensory-based, automatic processing that is beyond cognitive control (Grahn, 2012; Karmarkar & Buonomano, 2007). By contrast, durations of several seconds or longer activate the inferior olive and the cerebellum, and involve cognitive resources such as attention and working memory, the so-called *distinct-timing hypothesis* (e.g. Rammsayer, 2008). Extended durations that consist of music with a regular beat in the supra-second range might activate both networks.

In the same way that duration perception is subject to distortions caused by musical tempo (i.e. duration-lengthening effect), the perception of musical tempo is itself subject to distortion. In a study on auditory and visual cues to musical tempo (London et al., 2016), one of the tasks was to rate the musical tempo of R'n'B songs. The original BPM rates of the songs were 105, 115, and 130 BPM, and in addition the BPM rate of each song was also “tempo-shifted” (+5% and -5% BPM) without changing pitch or timbre. Whereas participants were able to correctly differentiate between the different conditions (i.e. the original BPM rate vs. tempo-shifted versions of each song), the tempo ratings of the tempo-shifted songs did not match the actual BPM rates. Accelerated versions of the songs (+5% BPM) were overrated and decelerated versions (-5% BPM) underrated. The authors named this the tempo anchoring effect (TAE), because the perceived tempo of each song seemed to be “anchored” around the original BPM rate. Thus, the TAE describes a distortion of tempo. Melodic features in music seem to be particularly important for the TAE, since the effect seems to be present in different music genres (R'n'B, Disco) but not in purely percussive rhythmic patterns (London et al., 2019a). In another study investigating the TAE (London et al., 2019b), it was hypothesized that finger tapping to the beat of the music would reduce or even eliminate the TAE. The rationale for this assumption was that synchronous movement to music enhances rhythm perception and improves pulse finding, synchronization abilities, and the perception of rhythmic perturbations (Manning & Schutz, 2013; Su & Pöppel, 2012). However, using the same R'n'B songs as in the previous study, no differences in tempo ratings were found between listening-only and SMS conditions. The typical rating pattern of the TAE was present in both conditions, suggesting a disjunction between SMS and tempo ratings. This indicates that the cause of the TAE might take place in high-level rather than low-level encoding, as synchronized tapping to the beat of the music did not influence tempo ratings. The authors argued that the TAE might be an auditory example of *perceptual sharpening* (Kok et al., 2012; Teufel et al., 2018), as prior knowledge of a perceptual

target sharpens the contrast between low-level features. Sharpening in anticipatory tasks, such as primed visual object representation, or tracking unfolding speech in noise, is thought to be related to pre-activation of the sensory representations of the expected stimulus (Gandolfo & Downing, 2019; Press & Yon, 2019). Previous studies of perceptual sharpening have involved static visual images such as scenes or gradients. The TAE is hypothesized to be a form of sharpening that occurs in a more dynamic perceptual context, where the initial recognition of a song leads to the activation of its prior representation, and that representation affects the interpretation of the information from the low-level auditory/temporal feature detector, in this case, the detection of beat rate.

Research at the intersection of these temporal percepts (i.e. tempo and duration perception) is still sparse in the context of music listening, particularly regarding different effects and interactions. More fine-grained investigations are needed in order to understand these processes in more detail. For example, the minimum tempo difference (i.e. threshold) for the duration-lengthening effect of faster tempi is not known (Hammerschmidt & Wöllner, 2020; Droit-Volet et al., 2013). Thus, one of the aims of this study was to investigate the minimum tempo difference by presenting participants with musical stimuli at different tempi (105, 115, 125 BPM) and more fine-grained tempo differences with the tempo-shifted versions of the same musical stimuli (-5, ± 0 , +5 BPM), yielding a 5 BPM increment across all stimulus categories. The second aim was to assess the influence of the different duration measures on the duration-lengthening effect by having participants both estimate and reproduce the duration of the same musical stimuli. These two duration measures were chosen since they involve and emphasize different cognitive processes and they differ in terms of response accuracy and variability (Mioni, 2018). For example, duration reproduction might depend more on memory of musical tempo compared with duration estimation. The third aim was to gain further insights into the relationship between duration and tempo perception by letting participants also rate the tempi of the musical stimuli. Relating these different measures could potentially inform about the cognitive mechanism causing the TAE (high-level vs. low-level tempo encoding). If the results for the duration measures yielded a similar pattern as the TAE, this would indicate that the TAE, if present in both beat-based and interval-based judgments and tasks, is caused by a low-level mis-encoding of temporal information, rather than an interaction between high-level representations of the music versus low-level beat rate detectors, and thus would be evidence against the perceptual sharpening explanation of the TAE.

Regarding duration, we hypothesized (a) that faster tempi would lead to longer duration estimations and reproductions (duration-lengthening effect) and (b) that duration reproductions would be more accurate than duration estimations, since they do not involve a translation of

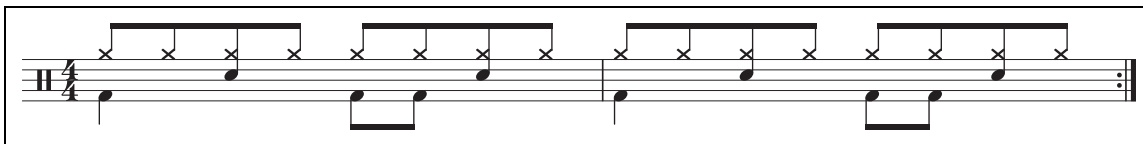


Figure 1. Notation of the drum pattern. The lowest notes represent the kick drum, the middle notes the snare drum, and the highest notes the hi-hat.

experienced duration into clock units and depend more on the memorized tempo of the musical stimuli. Regarding tempo perception, we hypothesized that (c) the accelerated versions of the songs (+5% BPM) would be overrated and decelerated versions (-5% BPM) underrated (i.e. replicating the TAE).

Method

Participants

A total of 32 participants (mean age: 23.41, $SD = 3.91$, range: 19–35 years; 16 male) took part in the study. Participants were split into two groups (16 musicians vs. 16 nonmusicians) based upon years of musical training; “musicians” were defined as those with six or more years of musical training (Zhang & Schubert, 2019). All participants took part in accordance with the guidelines of the local Ethics Committee and were compensated for their participation (€10).

Design and Procedure

The stimuli were six Disco songs, two at each of three original BPM rates (105, 115, 125 BPM). Each stimulus was presented at its original tempo (± 0 BPM) and in two tempo-shifted versions (i.e. -5, +5 BPM), yielding a 3 (original BPM rate) $\times 3$ (tempo shift) repeated-measures factorial design. The experiment was divided into three blocks, each corresponding to a different task: duration reproduction, duration estimation, or tempo rating.

After providing informed consent, baseline spontaneous motor tempo (SMT) measurements were obtained by having participants tap with their index finger for 30 seconds at their most comfortable speed (i.e. SMT) on a midi touch pad (BopPad, Keith McKillen Instruments), with taps being recorded in Live 9 (Ableton). Next, participants entered basic demographic information into OpenSesame 3.2.6 (Mathôt et al., 2012), which was used for experimental protocol, determination of task order, randomization of stimuli, and response collections. Participants listened to the original songs and rated their familiarity with the songs before being introduced to the experimental tasks. They were then fully informed about the presence of original vs. tempo-shifted versions of the songs, and were able to listen repeatedly to tempo-shifted example songs that were not included in the subsequent experiment. Example songs

were given for the low and high end of the original BPM rates.

The actual experiment started with one of three blocks, counterbalanced over participants. In Block A (duration reproduction), participants had to reproduce the durations of the stimuli immediately after presentation by pressing the space bar on the computer keyboard to start the reproduction and pressing the same key a second time to stop it. Before the block, participants practiced the task with example songs (duration range: 10–30 s) and received immediate feedback on their duration reproductions in comparison with the actual example duration. In Block B (duration estimation), participants estimated the duration of the stimuli by entering clock units (seconds + milliseconds) into the experiment computer. Again, participants were able to practice the task with example songs not included in the actual experiment and got immediate feedback on their estimation accuracy in comparison with the actual duration (duration range: 10–30 s). In Block C (tempo ratings), participants’ task was to rate the tempo of each stimulus on a 7-point Likert-type scale (1 = slow, 7 = fast), which was the same task and followed the same training procedure as in London et al. (2019a). Before participants rated the tempo of the stimuli, they rated the tempi of a standard rock drum pattern (Figure 1) presented at the same BPM rates as in the actual experiment (100–130 BPM, 5 BPM increments). The purpose of this task was (a) to familiarize participants with the rating scale, and (b) to evaluate participants’ ability to rate the tempo of simple rhythmic stimuli without tempo-shifting in relation to the BPM rate (London et al., 2019a).

Each block consisted of the same stimuli in different quasi-randomized orders. To account for possible order effects, individual randomization was constrained such that stimuli based on the same song would not be presented consecutively. Between a response of a participant and the presentation of the next stimulus, a 4-second delay was implemented. After performing all three blocks, participants performed the SMT finger-tapping task again, in order to assess potential differences in SMT before and after the experiment.

Stimuli

Stimuli consisted of six Disco songs taken from the compilation “The Disco Box” (Inglot, 1999) and were the same songs as in experiment 2a in London et al. (2019a). These excerpts were chosen based on their original BPM rates and

Table 1. Information on stimulus material and its characteristics.

Song	Artist	Original BPM rate	Spectral flux (100–200 Hz)	Event density (onsets/s)
Get Dancin'	Disco Tex & The Sex-O-Lettes	105	5.57	4.87
Change of Heart	Change	105	6.66	5.14
Forget Me Nots	Patrice Rushen	115	7.21	3.35
He's the Greatest Dancer	Sister Sledge	115	6.39	5.75
Disco Nights (Rock-Freak)	G. Q.	125	9.69	5.66
Cruisin' the Streets	The Boytown Gang	125	8.35	4.36

Note: Reported values of musical characteristics differ from London et al. (2019a) because calculations are based on different parts of the songs (introduction vs. verse/chorus).

Table 2. Stimuli durations according to factorial levels.

Original BPM rate	Tempo shift (BPM)	Stimuli durations (s)
105	-5	19.20
	±0	18.29
	+5	17.45
115	-5	17.45
	±0	16.70
	+5	16.00
125	-5	16.00
	±0	15.35
	+5	14.77

acoustic features for tempo cues (Table 1). The acoustic features included as criteria for the song selection were sub-band spectral flux (100–200 Hz), which has been shown to be specifically related to rhythmic features (Burger et al., 2013), and notes per second (event density), which affect tempo perception (Drake et al., 1999). The assessment was identical to London et al. (2019a) using the MIR toolbox for Matlab (Lartillot & Toiviainen, 2007), which aimed at the highest possible similarity of these features. The original BPM rates as reported in London et al. (2019a) were once more checked and confirmed by the authors of this study. Songs' original BPM rates were at or near at 105, 115, and 125 BPM and therefore in the preferred tempo range for most listeners (Drake & Botte, 1993; Moelants, 2002).

For this study, we used longer excerpts of the instrumental introduction (no vocals) of each song compared with London et al. (2019a), so that each stimulus was exactly eight bars long, reaching stimulus durations of up to 19.20 seconds. Since the song "Stayin Alive" by the Bee Gees does not consist of eight bars of introduction without lyrics, this song was replaced by Change's "Change of Heart" from the same compilation as the other songs. The selection criteria for the replacement were the same as for the other songs (original BPM rate, spectral flux, event density).

The songs were first tempo-shifted to match exactly BPM rates of either 105, 115, or 125 BPM, and further manipulated by tempo-shifting each song precisely 5 BPM in both directions, yielding BPM overlaps at 110 and 120 BPM between tempo-shifted stimuli (Table 2).

Manipulations of BPM rates were done via the "Warp" function in Live 9 (Ableton), resulting in 18 stimuli. Since the number of bars was fixed, the BPM rates determined the duration of each stimulus (Table 2). Participants were relatively unfamiliar with the six songs ($M = 2.33$, $SD = 1.80$), rated on a 7-point Likert-type scale (1 = not at all familiar, 7 = very familiar), and familiarity did not vary between songs, $F(5.00, 155.00) = 1.75$, $p = .13$, $\eta_p^2 = .05$.

Data Analysis

Duration reproductions from Block A were converted into duration reproduction ratios by dividing the subjective durations (duration reproduction) by the objective durations (stimuli durations). This normalization was done to account for the differences in absolute durations of the stimuli. Therefore, a value of 1 represents a perfect duration reproduction, values below 1 indicate underestimations and values above 1 indicate overestimations of the objective durations. Before entering the duration reproduction ratios into a mixed-model ANOVA with factors original BPM rate and tempo shift as repeated measures and musicianship as a between-group factor, responses from stimuli with the same original BPM rate and tempo shift were averaged.

Duration estimations from Block B were normalized and analyzed in the same way as duration reproductions in Block A. In order to assess the accuracy of both duration reproductions and estimations (i.e. Blocks A and B), one sample t -tests against a value of 1 (perfect accuracy) with the averaged data per participant of both reproduction and estimation ratios were performed. Tempo ratings from Block C were averaged over each pair of songs with the same original BPM rate and tempo shift. Ratings were then entered into a mixed-model ANOVA with the same factorial structure as the duration measures.

In order to investigate the relationship between the different measures, repeated-measures correlations (Bakdash & Marusich, 2017) between tempo ratings and duration estimation ratios, tempo ratings and duration reproduction ratios, as well as between the two duration measures were performed, including the factors original BPM rate and tempo shift. Furthermore, a paired-samples t -test with the average for all conditions of the duration measures was performed in order to check for general differences. SMT

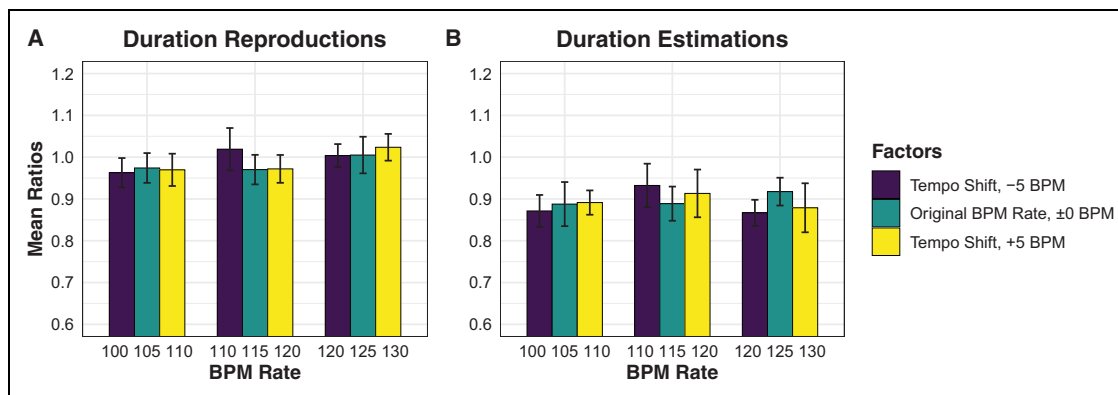


Figure 2. Duration measures. Mean duration reproduction ratios (a) and mean estimation ratios (b) for original BPM rates with no tempo shift (green bars) and tempo shift with -5 BPM (blue bars) and +5 BPM (yellow bars). Error bars indicate 95% confidence intervals.

(i.e. preferred tempo) before and after the experiment was assessed by the mean inter-tap interval (ITI) of each participant and entered into a paired samples *t*-test. For the comparison of SMT before and after the experiment, one participant was excluded due to technical issues in the recording process. In cases where the sphericity assumption in one of the ANOVAs was violated, the Greenhouse-Geisser correction was applied. Post-hoc comparisons were calculated with Bonferroni adjustment.

Results

The results are presented in the following order: first, results of the factors original BPM rate, tempo shift, and musicianship on duration measures (reproduction and estimation) are reported, followed by the effects of the same factors on tempo ratings for the drum pattern and the Disco songs. Results of the correlation analyses and paired-samples *t*-tests between duration measures, tempo ratings, and for SMT before and after the experiment then follow.

Duration Measures

Duration Reproduction. Results of the ANOVA on duration reproduction ratios showed a main effect for original BPM rate, $F(1.62, 48.72) = 4.26$, $p = .03$, $\eta_p^2 = .12$, suggesting that the BPM rate of the stimuli affected participants duration reproductions (Figure 2(a)). Post-hoc comparisons showed that duration reproduction for stimuli with 105 BPM were shorter than for stimuli with 125 BPM ($p = .01$). All other comparisons of original BPM rates were not significant (all $p > .05$). There was no main effect of tempo shift on duration reproduction ratios, $F(1.46, 43.98) = 0.27$, $p = .70$, $\eta_p^2 = .01$, suggesting that the tempo manipulations did not affect the reproductions of stimuli durations. Musicianship yielded a borderline significance, $F(1.00, 30.00) = 4.02$, $p = .05$, $\eta_p^2 = .12$, indicating that musicians' reproductions tended to be slightly longer than the actual durations (M

$= 1.02$, $SD = 0.07$), whereas nonmusicians' reproductions were slightly shorter ($M = 0.95$, $SD = 0.11$). Both main factors did not interact, $F(3.16, 94.65) = 1.25$, $p = .29$, $\eta_p^2 = .04$, and no interactions with the group factor was found (all $p > .05$). The averaged duration reproduction ratios for each condition were not significantly different from perfect reproduction, $t(31) = -0.63$, $p = .53$, $d = -0.11$, suggesting that participants' duration reproduction accuracy was high ($M = 0.99$, $SD = 0.10$).

Duration Estimation. The ANOVA on duration estimation ratios yielded no effect for the original BPM rate, $F(2.00, 60.00) = 1.42$, $p = .25$, $\eta_p^2 = .05$, suggesting that the different BPM rates did not influence participants' duration estimations. Tempo shift did not show an effect either, $F(2.00, 60.00) = 0.08$, $p = .92$, $\eta_p^2 = .003$, indicating that tempo manipulations did not affect duration estimations (Figure 2(b)). The group factor musicianship did not influence duration estimations, $F(1.00, 30.00) = 0.03$, $p = .86$, $\eta_p^2 = .001$, suggesting that musicians and nonmusicians estimated the stimuli durations equally. Neither main factors interacted, $F(4.00, 120.00) = 1.36$, $p = .25$, $\eta_p^2 = .04$, and no interactions of main factors with musicianship were found (all $p > .05$). Therefore, results indicate that participants estimated the durations of the stimuli independently of BPM rates, or their musical expertise, suggesting that musical tempo did not cause any time distortions. The averaged duration estimation ratios did differ from 1 (perfect estimation), $t(31) = -5.47$, $p < .001$, $d = -0.97$, suggesting that participants' duration estimation accuracy was lower than their reproduction accuracy. Overall, participants underestimated the durations ($M = 0.89$, $SD = 0.11$).

Tempo ratings

Drum Pattern Stimuli. The results for the ANOVA on tempo ratings for the different tempi of the drum pattern indicate that participants' tempo ratings corresponded to the

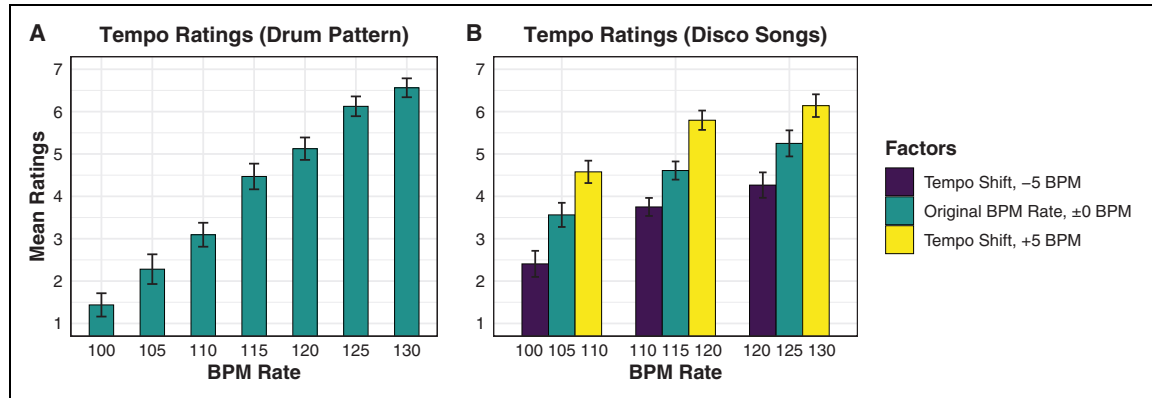


Figure 3. Tempo ratings. Mean tempo ratings for the drum pattern at different BPM rates (a) and mean tempo ratings (b) for the original BPM rates with no tempo shift (green bars) and tempo shift with -5 BPM (blue bars) and +5 BPM (yellow bars). Error bars indicate 95% confidence intervals.

different BPM rates, $F(4.37, 131.21) = 202.02, p < .001, \eta_p^2 = .87$. Post-hoc comparisons showed that all tempo ratings differed from each other (all $p < .05$). Thus mean tempo ratings of each BPM rate corresponded to the actual BPM rate of the drum pattern (Figure 3(a)). Group factor musicianship showed no effect on tempo ratings of the drum pattern, $F(1.00, 30.00) = 0.02, p = .88, \eta_p^2 = .001$, and did not interact with the tempi of the drum pattern, $F(4.37, 131.21) = 0.88, p = .48, \eta_p^2 = .03$. Furthermore, the average tempo ratings positively correlated with the BPM rates of the drum pattern, *Pearson's* $r = .96, p < .001$. Therefore, participants of both groups rated the tempo of the drum pattern accordingly to its respective BPM rate and were able to perceive all BPM differences correctly.

Disco Stimuli. The ANOVA run on tempo ratings of the Disco stimuli yielded a main effect for factor original BPM rate, $F(1.58, 47.32) = 87.34, p < .001, \eta_p^2 = .74$, suggesting that participants differentiated their tempo ratings based upon the different BPM rates. Post-hoc comparisons showed that all three original BPM rates (105, 115, 125 BPM) were rated differently (all $p < .001$), indicating that in the aggregate participants accurately rated the tempo relative to the original BPM rate of the stimuli (Figure 3(b)). The factor of tempo shift showed a main effect as well, $F(1.61, 48.18) = 155.60, p < .001, \eta_p^2 = .84$, suggesting that participants rated the tempo differently for the different tempo manipulations. Post-hoc comparisons showed that tempo ratings differed for all three tempo versions (-5, ± 0 , +5 BPM) (all $p < .001$), indicating that participants rated the tempo of the stimuli according to the tempo specific manipulation (Figure 3(b)). Musicianship showed no effect on tempo ratings, $F(1.00, 30.00) = 0.26, p = .61, \eta_p^2 = .01$. There was no interaction between the main factors, $F(3.09, 92.76) = 0.95, p = .42, \eta_p^2 = .03$, and no interactions were found involving the group factor (all $p > .05$). As Figure 3(b) illustrates, the tempo ratings show the typical rating pattern of the TAE (cf. London et al., 2019).

Relationship Between Measures

The average ratios of both duration measure (estimation and reproduction) differed from each other, $t(31) = -3.63, p = .001, d = -0.64$, indicating that duration estimations were shorter and less accurate ($M = 0.89, SD = 0.11$) than duration reproductions ($M = 0.99, SD = 0.10$). Furthermore, a repeated-measures correlation of both duration measures was not significant, $r_{rm}(255) = -.03, p = .59, 95\% \text{ CI } [-.16, .09]$, suggesting that the two duration measures are independent processes (Figure 4(a)). Whereas duration estimation ratios and tempo ratings did not correlate, $r_{rm}(255) = -.03, p = .58, 95\% \text{ CI } [-.16, .09]$ (Figure 4(b)), a small significant positive correlation was found between duration reproduction ratios and tempo ratings, $r_{rm}(255) = .16, p = .01, 95\% \text{ CI } [.04, .28]$ (Figure 4(c)), indicating that duration reproductions were longer when the tempo of the stimuli was rated faster. This reflects the fact that tempo ratings, while affected by the TAE, still broadly corresponded to the BPM rates of the stimuli.

The average ITI of participants' SMT did not change during the experiment, $t(30) = 0.60, p = .55, d = 0.11$, as measured before ($M = 513 \text{ ms}, SD = 207$) and after the experiment ($M = 499 \text{ ms}, SD = 146$). As the mean ITIs show, the average SMT was well within the BPM range of stimuli used in this experiment (SMT before: $513 \text{ ms} = 117 \text{ BPM}$, SMT after: $499 \text{ ms} = 120 \text{ BPM}$), therefore the stimuli used in this experiment were in the preferred tempo range of the participants. Likewise, there was no range effect, whereby one would observe a shift from pre- to post-test SMT measure, with the post-test SMT rates shifted toward the center of the range of the stimuli used in the experiment, as participants preferred tempi were already within that range.

Discussion

This study aimed at investigating different duration measures (estimation vs. reproduction) and their relation to perceived tempo when listening to Disco songs at different

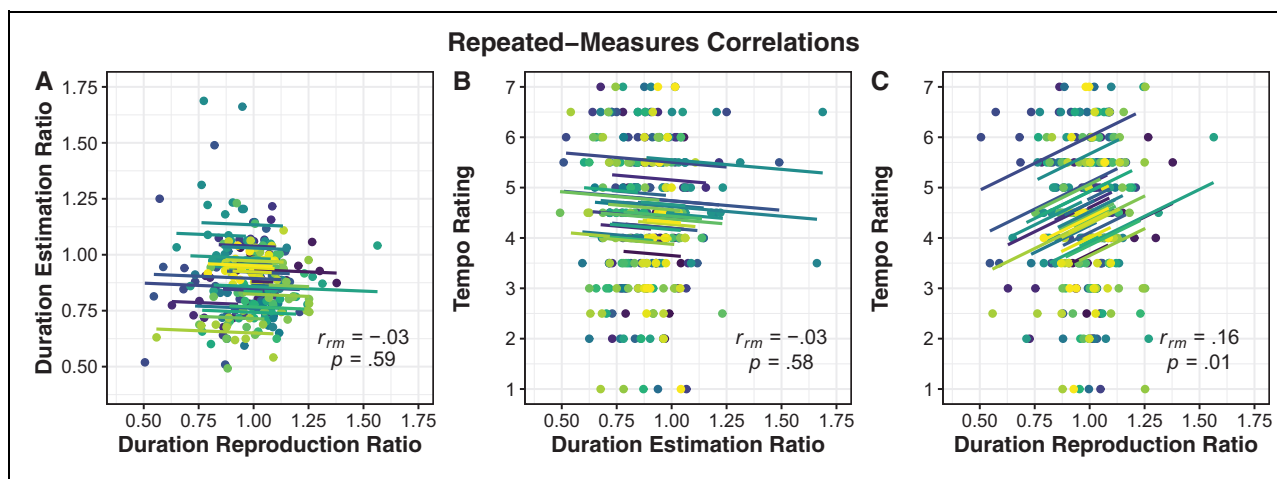


Figure 4. Repeated-measures correlations. Correlation between duration estimation and reproduction ratios (a), duration estimation ratios and tempo ratings (b), and duration reproduction ratios and tempo ratings (c). Each dot indicates the individual response by each participant in a particular trial, and each line is a linear fit for all responses from each participant.

BPM rates, and to tempo-manipulated versions of the same songs. Faster tempo (125 vs. 105 BPM) led to longer duration reproductions, and duration reproductions were generally more accurate in relation to clock time than duration estimations. Small tempo changes produced by the tempo-shift manipulation (± 5 BPM) showed no effect on either duration reproduction or estimation. Therefore, results of this study suggest a higher sensitivity of duration reproductions for the duration-lengthening effect than duration estimation. However, in the tempo-rating task, the small tempo-shift manipulations did have an effect, such that accelerated versions of the songs (+5% BPM) were overrated and decelerated versions (-5% BPM) underrated, replicating the TAE. As no such response pattern was found in the duration measures, this supports the notion that the TAE may be a form of *perceptual sharpening* for musical tempo.

Based on pacemaker-counter models (Gibbon et al., 1984; Treisman, 1963), the first hypothesis stated that faster tempi lead to longer duration estimations and reproductions as faster tempi generate more pulses of the pacemaker. The results partly confirm the hypothesis, as the factor of original BPM rate influenced duration reproductions but not duration estimations. Results showed longer duration reproductions for 125 BPM compared with 105 BPM, but no differences were found in comparison with 115 BPM. As the factor of tempo shift did not affect either duration estimation or reproduction, the results of this study suggest a minimum difference of 20 BPM for duration reproductions in the preferred tempo range in order for this effect to occur (Fraisse, 1984; Moelants, 2002; van Noorden & Moelants, 1999).

The second hypothesis stated that duration reproductions are more accurate than duration estimations, as duration estimations involve a translation and comparison of

experienced duration with a reference memory of clock units whereas duration reproductions do not involve such a translation, and therefore a more direct comparison is made (Block et al., 1998; Mioni, 2018; Zakay, 1990). The results of this study support this hypothesis, as reproductions were generally more accurate and closer to the actual stimuli durations than estimations. Furthermore, no correlation was found between duration estimation and duration reproduction, supporting previous research suggesting that these measures may be independent from each other and involve different cognitive processes (Zakay, 1990). A borderline significance was found regarding differences between musicians and nonmusicians: results suggest that musicians reproduced the stimuli durations slightly more accurately than nonmusicians. No such evidence for a difference was found in duration estimations, which is in line with a previous study where no difference for this task between musicians and nonmusicians was found (Hammerschmidt & Wöllner, 2020). The difference in duration reproduction might be explained by enhanced memory for musical structure and strong encoding of musical features such as tempo, in turn resulting in a transfer benefit helping musicians to reproduce the duration more accurately compared with nonmusicians. This may be due to the musicians' better ability and greater practice with *audiation*, that is, the mental replaying or imagining of a piece of music (Gordon, 1979; Grondin & Killeen, 2009). In contrast, duration estimation relies more on a general reference memory of clock time and the translation of the duration experience into such units (Block et al., 1998; Mioni, 2018; Zakay, 1990). The accuracy of this translation does not benefit from musical training directly, as it is not a musical task per se.

The third hypothesis stated that participants would overrate the accelerated versions of the stimuli (+5% BPM) and

underrate decelerated versions (-5% BPM), and this did occur, replicating the TAE (London et al., 2016, 2019a, 2019b). Likewise, participants accurately judged the tempi of the drum pattern across all BPM rates, showing that they were able to correctly map the Likert-type rating scale onto the different BPM rates used in the experiment.

In combination, the durational estimation and reproduction results alongside the replication of the TAE shed light on the source of the TAE. Neither results for duration reproduction nor duration estimation were affected by the ± 5 BPM tempo shifts. To be sure, these tempo differences might have been too small to cause an effect on duration perception, thus a source for the TAE based on a low-level encoding mechanism cannot entirely be ruled out as an explanation. Nonetheless, the accurate reproduction of original stimulus song durations, in comparison with the inaccurate reporting of stimulus beat rates (i.e. over- and underestimations in tempo judgments), supports the notion that the TAE may be a form of *perceptual sharpening* for tempo, which is related to the perceived pacing of events (beats) and not to the overall sequence duration (London et al., 2019b). In the current experiment, durations were generally accurately reproduced, and presumably this reproduction depends upon veridical internal reproduction of the music just heard—mentally “replaying the tape” at the right speed (cf. Wöllner & Williamon, 2007). Thus the mental representations of stimuli in the duration reproduction task—both original and time-shifted—were accurate with respect to tempo/event rate. Analogously, in a previous study (London et al., 2019b) participants’ tapping along to songs was accurate, but the TAE nonetheless persisted: tempo ratings of time-shifted songs, made immediately following their presentation/experience, are systematically distorted. These ratings—made abstractly using a Likert-type scale—exaggerate the tempo differences between stimuli. These nonveridical ratings are probably not due to the sharpening of a low-level feature detector for beat rate alone (Teufel et al., 2018). Rather, it may be that bottom-up sensory signals (i.e. the actual beat rate) that are incongruent with the prior representation are suppressed or modified (Kok et al., 2012; Lee & Mumford, 2003). In the context of a dynamic percept such as a musical beat, the sharpening is a result of an interaction between the prior representation of the music, the perception that the current stimulus is faster/slower, and then an exaggeration of the perceptual distance between the prior representation and the current stimulus, made in the context of a judgment task. Thus there is an interplay between low- and high-level features that results in a form of sharpening for multiple stimulus presentations.

This study used excerpts from actual Disco music in the preferred tempo range to investigate effects on the intersection of tempo and duration perception. Results of this study raise the question of the role of tempo differences and tempo ranges on the duration-lengthening effect of faster tempo. In other words, the proposed minimum tempo

difference threshold for the duration-lengthening effect of 20–30 BPM should be further investigated by using different duration measures (e.g. estimation, reproduction, bisection) and smaller differences in BPM rate, for instance starting from differences of 10 BPM. The duration-lengthening effect should be investigated for other tempo ranges compared with the preferred tempo range used in this study, using both slower (e.g. 60–100 BPM) and faster (e.g. 130–180 BPM) tempi. It is not known if the proposed minimum tempo difference of 20 BPM for the duration-lengthening effect holds for other tempo ranges. Similarly, it should be investigated if the TAE is present in music in tempi outside the preferred tempo range of 100–130 BPM. Furthermore, different stimulus durations should be systematically investigated when listening to music, as the proposed threshold of 20–30 BPM might also vary according to the duration of the music (Buhusi & Meck, 2005). In order to assess the role of different memory processes (working memory vs. long-term memory), future studies could also increase the time period between the presentation of musical stimuli and the reproduction task.

To conclude, this study investigated the relationship between tempo and duration perception in music by presenting participants with Disco songs at different original BPM rates, and digital manipulations of these BPM rates. The tasks were to reproduce and estimate the stimuli durations, and to rate the tempo of each stimulus. The main findings of this study suggest a threshold for a duration-lengthening effect of tempo in the range of 20–30 BPM in duration reproductions, while different BPM rates did not influence duration estimations. Comparing the duration measures, reproductions were generally more accurate than estimations, and musicians tended to be better at reproducing durations than nonmusicians. The TAE was replicated in a tempo-rating task, but was not observed in the duration estimation or reproduction tasks. This points to *perceptual sharpening* as an underlying mechanism for the TAE. The results of this study are especially informative in the field of time and timing perception in music, offering new insights into the effect of tempo on duration perception.

Action Editor

Tecumseh Fitch, Universität Wien, Department of Cognitive Biology.

Peer Review

Molly Henry, Max Planck Institute for Empirical Aesthetics. One anonymous reviewer.

Author Contribution

DH, CW, and JL researched literature and conceived the study. DH, CW, and JL were involved in study design. DH and CW gained ethical approval. DH and BB worked on stimuli selection criteria. DH, CW, and BB performed data analyses. DH wrote the first draft of the manuscript. All authors reviewed and edited the manuscript and approved the final version of the manuscript.


Declaration of conflicting interests


The authors declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

Funding

This research was supported by a Consolidator Grant from the European Research Council to the second author. The research is part of the project: “Slow motion: Transformations of musical time in perception and performance” (SloMo; Grant No. 725319).

ORCID iD

David Hammerschmidt  <https://orcid.org/0000-0002-5786-4040>

Clemens Wöllner  <https://orcid.org/0000-0002-8508-3508>

References

- Bakdash, J. Z., & Marusich, L. R. (2017). Repeated measures correlation. *Frontiers in Psychology, 8*, 456. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00456>
- Block, R. A., Hancock, P. A., & Zakay, D. (2010). How cognitive load affects duration judgments: A meta-analytic review. *Acta Psychologica, 134*(3), 330–343. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.03.006>
- Block, R. A., Zakay, D., & Hancock, P. A. (1998). Human aging and duration judgments: A meta-analytic review. *Psychology and Aging, 13*(4), 584–596. <https://doi.org/10.1037/0882-7974.13.4.584>
- Buhusi, C. V., & Meck, W. H. (2005). What makes us tick? Functional and neural mechanisms of interval timing. *Nature Reviews Neuroscience, 6*(10), 755–765. <https://doi.org/10.1038/nrn1764>
- Burger, B., Ahokas, R., Keipi, A., & Toiviainen, P. (2013). Relationships between spectral flux, perceived rhythmic strength, and the propensity to move. In R. Bresin (Ed.), *Proceedings of the sound and music computing conference 2013* (pp. 179–184). Logos-Verlag.
- Drake, C., & Botte, M. C. (1993). Tempo sensitivity in auditory sequences: Evidence for a multiple-look model. *Perception & Psychophysics, 54*(3), 277–286. <https://doi.org/10.3758/bf03205262>
- Drake, C., Gros, L., & Penel, A. (1999). How fast is that music? The relation between physical and perceived tempo. In S. W. Yi (Ed.), *Music, mind, and science* (pp. 190–203). Seoul National University Press.
- Droit-Volet, S., Ramos, D., Bueno, J. L. O., & Bigand, E. (2013). Music, emotion, and time perception: The influence of subjective emotional valence and arousal? *Frontiers in Psychology, 4*, 417. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00417>
- Droit-Volet, S., & Wearden, J. (2002). Speeding up an internal clock in children? Effects of visual flicker on subjective duration. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology. B, Comparative and Physiological Psychology, 55*(3), 193–211. <https://doi.org/10.1080/02724990143000252>
- Fraisse, P. (1984). Rhythm and tempo. In D. Deutsch (Ed.), *The psychology of music* (pp. 149–180). Academic Press.
- Gandolfo, M., & Downing, P. E. (2019). Causal evidence for expression of perceptual expectations in category-selective extrastriate regions. *Current Biology, 29*(15), 2496–2500. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.06.024>
- Gibbon, J., Church, R. M., & Meck, W. H. (1984). Scalar timing in memory. *Annals of the New York Academy of Sciences, 423*, 52–77. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1984.tb23417.x>
- Gordon, E. E. (1979). Developmental music aptitude as measured by the primary measures of music audiation. *Psychology of Music, 7*(1), 42–49.
- Grahn, J. A. (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>
- Grondin, S. (2008). Methods for studying psychological time. In S. Grondin (Ed.), *Psychology of time* (pp. 51–74). Emerald.
- Grondin, S. (2010). Timing and time perception: A review of recent behavioral and neuroscience findings and theoretical directions. *Attention, Perception, & Psychophysics, 72*(3), 561–582. <https://doi.org/10.3758/APP.72.3.561>
- Grondin, S., & Killeen, P. R. (2009). Tracking time with song and count: Different Weber functions for musicians and nonmusicians. *Attention, Perception, & Psychophysics, 71*(7), 1649–1654. <https://doi.org/10.3758/APP.71.7.1649>
- Hammerschmidt, D., & Wöllner, C. (2020). Sensorimotor synchronization with higher metrical levels in music shortens perceived time. *Music Perception 37*(4), 263–277. <https://doi.org/10.1525/mp.2020.37.4.263>
- Inglot, B. (1999). *The Disco Box* [CD]. Rhino Entertainment.
- Karmarkar, U. R., & Buonomano, D. V. (2007). Timing in the absence of clocks: Encoding time in neural network states. *Neuron, 53*(3), 427–438. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.01.006>
- Kok, P., Jehee, J. F. M., & Lange, F. P. de (2012). Less is more: Expectation sharpens representations in the primary visual cortex. *Neuron, 75*(2), 265–270. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.04.034>
- Large, E. W., Herrera, J. A., & Velasco, M. J. (2015). Neural networks for beat perception in musical rhythm. *Frontiers in Systems Neuroscience, 9*, 159. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2015.00159>
- Large, E. W., & Palmer, C. (2002). Perceiving temporal regularity in music. *Cognitive Science, 26*(1), 1–37. https://doi.org/10.1207/s15516709cog2601_1
- Lartillot, O., & Toiviainen, P. (2007). A Matlab toolbox for musical feature extraction from audio. In S. Marchand (Ed.), *DAFx-07: Proceedings of the 10th international conference on digital audio effects* (pp. 237–244). Université Bordeaux.
- Lee, T. S., & Mumford, D. (2003). Hierarchical Bayesian inference in the visual cortex. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision, 20*(7), 1434–1448. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.20.001434>
- London, J. (2012). *Hearing in time: Psychological aspects of musical meter* (2nd ed.). Oxford University Press.
- London, J., Burger, B., Thompson, M., Hildreth, M., Wilson, J., Schally, N., & Toiviainen, P. (2019a). Motown, Disco, and

- drumming: An exploration of the relationship between beat salience, melodic structure, and perceived tempo. *Music Perception*, 37(1), 26–41. <https://doi.org/10.1525/mp.2019.37.1.26>
- London, J., Burger, B., Thompson, M., & Toivainen, P. (2016). Speed on the dance floor: Auditory and visual cues for musical tempo. *Acta Psychologica*, 164, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2015.12.005>
- London, J., Thompson, M., Burger, B., Hildreth, M., & Toivainen, P. (2019b). Tapping doesn't help: Synchronized self-motion and judgments of musical tempo. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 81(7), 2461–2472. <https://doi.org/10.3758/s13414-019-01722-7>
- Manning, F., & Schutz, M. (2013). “Moving to the beat” improves timing perception. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20(6), 1133–1139. <https://doi.org/10.3758/s13423-013-0439-7>
- Mathôt, S., Schreij, D., & Theeuwes, J. (2012). Opensesame: An open-source, graphical experiment builder for the social sciences. *Behavior Research Methods*, 44(2), 314–324. <https://doi.org/10.3758/s13428-011-0168-7>
- Mioni, G. (2018). Methodological issues in the study of prospective Timing. In A. Vatakis, F. Balci, M. Di Luca, & Á. Correa (Eds.), *Timing and time perception: Procedures, measures, and applications* (pp. 79–97). Brill.
- Mioni, G., Stablum, F., McClintock, S. M., & Grondin, S. (2014). Different methods for reproducing time, different results. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 76(3), 675–681. <https://doi.org/10.3758/s13414-014-0625-3>
- Moelants, D. (2002). Preferred tempo reconsidered. In C. J. Stevens, D. K. Burnham, G. McPherson, E. Schubert, & J. Renwick (Eds.), *Proceedings of the 7th conference on music perception and cognition* (pp. 580–583). Causal Productions.
- Moelants, D. (2003). Dance music, movement and tempo preferences. In R. Kopiez, A. C. Lehmann, I. Wolther, & C. Wolf (Eds.), *Proceedings of the 5th triennial conference of the european society for the cognitive sciences of music* (pp. 649–652). Hanover University of Music and Drama.
- Oakes, S. (2003). Musical tempo and waiting perceptions. *Psychology and Marketing*, 20(8), 685–705. <https://doi.org/10.1002/mar.10092>
- Ortega, L., & López, F. (2008). Effects of visual flicker on subjective time in a temporal bisection task. *Behavioural Processes*, 78(3), 380–386. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2008.02.004>
- Phillips-Silver, J., Toivainen, P., Gosselin, N., Piché, O., Nozaradan, S., Palmer, C., & Peretz, I. (2011). Born to dance but beat deaf: A new form of congenital amusia. *Neuropsychologia*, 49(5), 961–969. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.02.002>
- Press, C., & Yon, D. (2019). Perceptual prediction: Rapidly making sense of a noisy world. *Current Biology*, 29(15), R751–R753. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.06.054>
- Rammsayer, T. H. (2008). Neuropharmacological approaches to human timing. In S. Grondin (Ed.), *Psychology of time* (pp. 295–320). Emerald.
- Su, Y.-H., & Pöppel, E. (2012). Body movement enhances the extraction of temporal structures in auditory sequences. *Psychological Research*, 76(3), 373–382. <https://doi.org/10.1007/s00426-011-0346-3>
- Teki, S., Grube, M., Kumar, S., & Griffiths, T. D. (2011). Distinct neural substrates of duration-based and beat-based auditory timing. *The Journal of Neuroscience*, 31(10), 3805–3812. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5561-10.2011>
- Teufel, C., Dakin, S. C., & Fletcher, P. C. (2018). Prior object-knowledge sharpens properties of early visual feature-detectors. *Scientific Reports*, 8(1), 10853. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28845-5>
- Tierney, A., & Kraus, N. (2015). Neural entrainment to the rhythmic structure of music. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 27(2), 400–408. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00704
- Treisman, M. (1963). Temporal discrimination and the indifference interval: Implications for a model of the “internal clock”. *Psychological Monographs*, 77(13), 1–31. <https://doi.org/10.1037/h0093864>
- Treisman, M., Faulkner, A., Naish, P. L., & Brogan, D. (1990). The internal clock: Evidence for a temporal oscillator underlying time perception with some estimates of its characteristic frequency. *Perception*, 19(6), 705–743. <https://doi.org/10.1068/p190705>
- Van Noorden, L., & Moelants, D. (1999). Resonance in the perception of musical pulse. *Journal of New Music Research*, 28(1), 43–66. <https://doi.org/10.1076/jnmr.28.1.43.3122>
- Wöllner, C., Hammerschmidt, D., & Albrecht, H. (2018). Slow motion in films and video clips: Music influences perceived duration and emotion, autonomic physiological activation and pupillary responses. *PloS One*, 13(6), e0199161. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199161>
- Wöllner, C., & Williamson, A. (2007). An exploratory study of the role of performance feedback and musical imagery in piano playing. *Research Studies in Music Education*, 29(1), 39–54. <https://doi.org/10.1177/1321103X07087567>
- Zakay, D. (1990). The evasive art of subjective time measurement: Some methodological dilemmas. In R. A. Block (Ed.), *Cognitive models of psychological time* (pp. 59–84). Psychology Press.
- Zakay, D., & Block, R. A. (1996). The role of attention in time estimation processes. In M. A. Pastor & J. Artieda (Eds.), *Advances in psychology: Time, internal clocks and movement* (Vol. 115, pp. 143–164). North-Holland. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(96\)80057-4](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(96)80057-4)
- Zhang, J. D., & Schubert, E. (2019). A single item measure for identifying musician and nonmusician categories based on measures of musical sophistication. *Music Perception*, 36(5), 457–467. <https://doi.org/10.1525/mp.2019.36.5.457>

8.4 Studie 3

Hammerschmidt, D., Frieler, K. & Wöllner, C. (2021)

**Spontaneous motor tempo: Investigating psychological,
chronobiological, and demographic factors in a large-scale
online tapping experiment**

Frontiers in Psychology, 12

Creative Commons BY



Spontaneous Motor Tempo: Investigating Psychological, Chronobiological, and Demographic Factors in a Large-Scale Online Tapping Experiment

David Hammerschmidt^{1*}, Klaus Frieler² and Clemens Wöllner¹

¹ Institute for Systematic Musicology, University of Hamburg, Hamburg, Germany, ² Max Planck Institute for Empirical Aesthetics, Frankfurt, Germany

OPEN ACCESS

Edited by:

Virginia Penhune,
Concordia University, Canada

Reviewed by:

Laura Verga,
Max Planck Institute for
Psycholinguistics, Netherlands
Dawn C. Rose,
Lucerne University of Applied
Sciences and Arts, Switzerland

*Correspondence:

David Hammerschmidt
david.hammerschmidt@
uni-hamburg.de

Specialty section:

This article was submitted to
Auditory Cognitive Neuroscience,
a section of the journal
Frontiers in Psychology

Received: 07 March 2021

Accepted: 24 May 2021

Published: 22 June 2021

Citation:

Hammerschmidt D, Frieler K and
Wöllner C (2021) Spontaneous Motor
Tempo: Investigating Psychological,
Chronobiological, and Demographic
Factors in a Large-Scale Online
Tapping Experiment.
Front. Psychol. 12:677201.
doi: 10.3389/fpsyg.2021.677201

The spontaneous motor tempo (SMT) describes the pace of regular and repeated movements such as hand clapping or walking. It is typically measured by letting people tap with their index finger at a pace that feels most natural and comfortable to them. A number of factors have been suggested to influence the SMT, such as age, time of the day, arousal, and potentially musical experience. This study aimed at investigating the effects of these factors in a combined and out-of-the-lab context by implementing the finger-tapping paradigm in an online experiment using a self-developed web application. Due to statistical multimodality in the distribution of participants' SMT ($N = 3,576$), showing peaks at modes of around 250 ms, a *Gaussian mixture model* was applied that grouped participants into six clusters, ranging from Very Fast ($M = 265$ ms, $SD = 74$) to Very Slow ($M = 1,757$ ms, $SD = 166$). These SMT clusters differed in terms of age, suggesting that older participants had a slower SMT, and time of the day, showing that the earlier it was, the slower participants' SMT. While arousal did not differ between the SMT clusters, more aroused participants showed faster SMTs across all normalized SMT clusters. Effects of musical experience were inconclusive. With a large international sample, these results provide insights into factors influencing the SMT irrespective of cultural background, which can be seen as a window into human timing processes.

Keywords: internal tempo, preferred tempo, slowing with age, time of the day, arousal, inter-tap intervals, circadian rhythm, finger tapping

INTRODUCTION

Spontaneous motor tempo (SMT) can be observed in many daily activities such as walking, hand clapping, or swimming. It describes the tempo of self-paced regular and repeated movements and corresponds to the preferred and natural pace to carry out isochronous motor actions, hence SMT is also called internal tempo (Boltz, 1994; Vanneste et al., 2001). The SMT has been described as an estimate of the period of an intrinsic timekeeper, is closely related to the preferred perceived tempo for rhythmic structures such as in music and language (McAuley et al., 2006), and tends to cluster around 500–600 ms (Fraisse, 1982; Collyer et al., 1994; Moelants, 2002).

While the exact time-keeping mechanisms remain largely unknown, laboratory research has elucidated some factors explaining the variance between individuals' SMT. It has been shown that the SMT is affected by factors such as age (Baudouin et al., 2004; McAuley et al., 2006; Monier and Droit-Volet, 2018, 2019), arousal (Boltz, 1994; Perilli, 1995), and time of the day (Moussay et al., 2002). Furthermore, it has been reported that musicians have a slower SMT than non-musicians (Drake et al., 2000). In experimental contexts, SMT is typically measured by letting people tap regularly with their index finger of the preferred hand at a pace that feels most comfortable and natural. Recent technology offers solutions to assess the SMT on a large scale in ecologically more valid environments, which allows investigations of naturally occurring conditions such as time of the day. In the current study, we implemented the finger-tapping paradigm in an online study using a self-developed web application, aiming at investigating potential factors for SMT in individuals' familiar environments.

SMT is a central feature in the psychophysics of time perception and plays a crucial role for timing and time processes. According to McAuley and Jones (2003), prevalent models of time experiences can be classified into interval-based and entrainment-based mechanisms. Interval models assume an "internal clock," which is described in terms of a pacemaker producing periodic pulses (Treisman, 1963; Grondin, 2010; Allman et al., 2014). Entrainment models like the *dynamic attending theory*, on the other hand, propose self-sustaining oscillations as the underlying mechanism of time perception, with attentional pulses reflecting attending energy at a given point of time (Jones and Boltz, 1989; Large and Jones, 1999). Both classes of models (i.e., interval-based and entrainment-based) share the assumption of an intrinsic timekeeper, that is the pacemaker in interval models and the oscillator in entrainment models. SMT can be seen as an estimate of this intrinsic timekeeper, reflecting the pacemaker's preferred pulse rate or the oscillator's preferred period, respectively.

Important aspects that need to be taken into account regarding the mechanism for the SMT are anatomical and biomechanical properties of the body (Goodman et al., 2000; Todd et al., 2007), suggesting that the spontaneous pace of cyclic movements may also be influenced by the joints imitating these movements (Peckel et al., 2014; Todd and Lee, 2015). For example, when asked to perform synchronization-continuation motor tasks at rates faster or slower than the SMT, individuals tend to fall back into their SMT over time (Yu et al., 2003; McAuley et al., 2006). The SMT is highly correlated with the preferred perceptual tempo (PPT), which describes optimal processing (i.e., temporal discrimination abilities), suggesting that perceptual and rhythmic motor behaviors share the same underlying mechanism (*preferred period hypothesis*) (McAuley et al., 2006; Michaelis et al., 2014). This assumption is further supported by studies showing a shared resonance frequency at around 2 Hz (500 ms) for the optimal tempo of rhythm perception in music and language (Fraisse, 1982; van Noorden and Moelants, 1999; Moelants, 2002; Ding et al., 2017; Assaneo and Poeppel, 2018), and the execution of predictive (rhythmic) and emergent (cyclic) movements such as finger tapping or walking (Collyer et al.,

1994; Goodman et al., 2000; MacDougall and Moore, 2005; Styns et al., 2007; Delevoeye-Turrell et al., 2014). Furthermore, the spontaneous pacing of these different body movements have been shown to be similar, as a recent study did not find differences in the SMT between finger tapping, toe tapping, and stepping on the spot, which averaged close to 2 Hz as well, suggesting that the SMT is not influenced by the modality (Rose et al., 2021).

One of the main discussions regarding the SMT concerns factors influencing its pace as a commonly observed result of the SMT is its variability, ranging from 190 to over 1,000 ms (Fraisse, 1982; Collyer et al., 1994; Moelants, 2002; Baudouin et al., 2004). One of the most important findings is a slowing of SMT with age, i.e., older individuals prefer a slower SMT compared to younger individuals (Baudouin et al., 2004). Although slightly varying across different studies, findings suggest an average SMT of 300–450 ms for young children (age 2–7 years) (Provasi and Bobin-Bègue, 2003; McAuley et al., 2006; Monier and Droit-Volet, 2018, 2019), 500–650 for adults (age 18–66 years) and around 1,050–1,125 ms for the elderly (age 66–94 years) (Baudouin et al., 2004; McAuley et al., 2006). These results are consistent with the *slowing-with-age hypothesis* which describes a decline in behavioral speed in the elderly (Surwillo, 1968; Baudouin et al., 2004). This decline of the SMT in the elderly might be caused both by the limits of processing speed (Baudouin et al., 2004) and changes in the neuromuscular system such as reduced muscle strength and endurance. Furthermore, the prefrontal cortex and basal ganglia networks are generally more involved in motor control in the elderly, which are brain regions that are often impaired with higher age (Seidler et al., 2010).

A further factor influencing SMT might be the time of the day. Evidence stems from a study investigating circadian fluctuation of SMT in cycling and finger tapping (Moussay et al., 2002). SMT of finger tapping was measured five times a day and results show that the SMT sped up between 06:00 to 18:00 and slowed down between 18:00 and 22:00, suggesting a direct influence of the circadian rhythm on the SMT. Furthermore, a recent study on cognitive output surrounding sleep investigated the tapping speed of smartphone usage for about three weeks (Huber and Ghosh, 2021). Although not directly comparable, results also show that finger tapping speed on the smartphone (i.e., typing) increased during the morning hours, remained relatively constant during the day and decreased during the night. Thus, these results suggest an influence of the circadian rhythm on the SMT and unconsciously paced finger movements in general, which has been shown to influence cognitive and physiological functions (Valdez and Ramirez, 2012).

Another commonly observed factor modulating the SMT is arousal. The *sympathetic hypothesis* states that higher physiological arousal should speed up the PPT and thus, SMT as well (Holbrook and Anand, 1990). Accordingly, studies found that auditory stimuli inducing varying arousal levels affected the SMT (Boltz, 1994; Perilli, 1995), where high arousal stimuli (i.e., induced short-term stress) led to a faster SMT. In line with this, higher arousal has been shown to be associated with longer time judgments (Burle and Casini, 2001; Ozel et al., 2004; Noulhiane et al., 2007; Wearden, 2008; Grommet et al., 2011; Schwarz et al., 2013), further suggesting that these mechanisms

are closely related and that the SMT is linked to an intrinsic timekeeper (Fisher, 2014). Physical activity evokes physiological changes in the body (e.g., heart rate, cortical blood flow) which have been linked to the arousal level (Fisher, 2014; Nobrega et al., 2014). Yet, it remains unclear if changes in heart rate directly affect the SMT. Studies about the relationship between SMT and physical activity remain inconclusive. Whereas one study did find a faster SMT after physical activity (pedaling exercise) (Dosseville et al., 2002), another study did not find a faster SMT after participants performed swimming, running, or wrestling tasks (Sysoeva et al., 2013). The authors explained their null result with the continuous voluntary control with a self-paced speed, yet they noted that further empirical investigations are needed to support this assumption. As mentioned above, induced short-term stress increases the arousal level, causing SMT to speed up as well (Boltz, 1994; Perilli, 1995). Yet, it is unclear if long-term or chronic stress, leading to general physiological changes in the body (e.g., increased heart rate over a longer time period), affects SMT as well (Yaribeygi et al., 2017).

Musical experience has also been reported to influence the SMT, as musicians showed a slower SMT than non-musicians (Drake et al., 2000). Drake et al. found that especially children with musical experience showed a bias toward a slower SMT than children without musical experience. As musical experience has been shown to improve sensorimotor synchronization (SMS) abilities to simple and musical rhythms (e.g., greater synchronization accuracy and rate range), the bias of a faster production rate in non-musicians has been interpreted in such a way that musicians are less restricted in their ability to track auditory-motor events over a longer time span, or in other words, musical experience enables the perceptual organization of events into longer time spans (Scheurich et al., 2018). However, this purely cognitive explanation is somewhat at odds with the assumptions of a low-level biological intrinsic timekeeper, which should not be malleable by a learned cognitive capacity. In sum, it remains unclear why a greater rate range in event tracking may affect the spontaneous and therefore preferred motor tempo.

To sum up, SMT may function as a representation of an underlying intrinsic timekeeper (Large and Jones, 1999; Vanneste et al., 2001; Allman et al., 2014). It slows down with age, potentially due to a decline in processing speed and changes in the neuromuscular system (Baudouin et al., 2004; McAuley et al., 2006; Hunter et al., 2016), it may further be influenced by the circadian rhythm (i.e., time of the day) (Moussay et al., 2002), and is likely to speed up with higher arousal levels (Boltz, 1994). Furthermore, it has been reported that the SMT is generally slower for children with musical experience than children without musical experience (Drake et al., 2000). It is not known if long-term or chronic stress affect SMT, which might be the case as long-term stress leads to general physiological changes in the body (Yaribeygi et al., 2017).

This study aimed at investigating these factors and their effects on the SMT for the first time with a large international sample, and further attempted to close the gap between lab-based studies using the finger-tapping paradigm as a measure of SMT and individuals' familiar environment by implementing this paradigm in an online experiment using a web application. We

hypothesized that (i) SMT slows down with age, that (ii) SMT is influenced by the time of the day, and that (iii) arousal and long-term stress speed up the pace of the SMT. Furthermore, we investigated if participants with more musical experience prefer a slower SMT than participants with less musical experience.

METHODS

Participants

A total of 5,966 participants took part in the study, out of which data from 3,576 participants were used for further analysis due to exclusion criteria (see section "Data Analysis"). The mean age of participants was 27.64 years ($SD = 7.61$, range: 7–49 years) and 64% were male (1% other). Participants were from 74 different countries, yet the majority was from China (81.2%), and 62.1% of them worked or studied for 40 h or more in a typical week. They were relatively inexperienced in terms of music making, $M = 2.07$ ($SD = 1.39$), whereby participants rated their experience in music making on a scale from 1 = "never" to 6 = "I am a professional." On average, participants needed $M = 1.59$ trials ($SD = 1.01$) to meet the criterion for a successful tapping trial (see section "Design and Procedure"). The number of tries needed for a successful tapping trial depended on musical experience, *Spearman's rho* = -0.09 , $p < 0.001$.

All participants gave informed consent online in accordance with the Declaration of Helsinki. The procedures were in accordance with the guidelines of the Ethics Committee of the Faculty of Humanities at University of Hamburg.

Design and Procedure

This study had a between-participant design and was divided in three parts. The first part consisted of demographic information. The second part consisted of the main experiment, in which the SMT was measured. In the third part, variables including arousal level, musical experience, and the long-term stress were collected (see **Supplementary Material**).

Participants were invited to test how good their "inner timing" is, meaning how even they can tap without external influences such as music, and how they perform compared to others. After providing informed consent, participants first entered their demographic information such as age, gender, country of residence, and the population size of the city/area they currently live in. Furthermore, they stated if they had taken part in the experiment before, as access to the web application was not restricted. Then they were asked to tap steadily for 15 s with their finger on a device of their choice (PC keyboard or mouse, touchscreen of a tablet, or smartphone). The task was "to keep the time between each tap as even as possible" and to "choose a pace that feels most comfortable and natural to you right now." During the tapping trial, a visual bar was running continuously from left to right indicating for how much longer they needed to tap (see **Supplementary Material**). After the finger-tapping task, feedback on their tapping consistency was given in terms of the evenness of taps, whereby 100% represent no variability at all between inter-tap intervals. Furthermore, they were informed how well their score was compared to the previous sample of participants. The goal of this feedback was

to make the experiment more appealing in order to reach a higher number of participants. They were not informed that the chosen pace of the taps was the main measure for this study. If the tapping variability, measured as the coefficient of variation (CV) of inter-tap intervals, was too high (maximum CV = 0.1) or the total number of taps was less than eight, participants were automatically asked to repeat the tapping task which was not limited in terms of number of tries. This strict criteria for the tapping variability were chosen as it warrants correct task execution, since the recording time of taps was relatively short. If a tapping trial was accepted, participants could proceed to the third part of the experiment. In this part, participants rated their current arousal level, ranging from 1 = “very calm” to 5 = “very excited,” their musical experience by asking if they make music, ranging from 1 = “never” to 6 = “I am a professional,” their average working/studying hours in a typical week, and filled out the short-form *Perceived Stress Scale* (PSS-4), in order to assess long-term stress (Cohen and Williamson, 1988). Further data included the date and local time of test execution and user agents of participants (device brand and model, operating system, and web browser). The experiment was available in four languages (English, German, French, and Mandarin) and participants could choose between them by clicking on the corresponding flag. The default language was English, and translations were carried out by native speakers using the back-translation method.

The browser-based web application was based on the MEN stack, and the frontend was programmed in Javascript using the Node.js Express Framework. The backend was hosted with NGINX on a Linux server from the University of Hamburg and the used database was MongoDB. The web implementation and programming were done by Simon Mayrshofer and is publicly available on Github (<https://github.com/g-mac/slomo>).

Data Analysis

The mean inter-tap intervals (ITI) of each participant were calculated as a measure of their SMT. Before applying statistical analysis, data was filtered according to the following conditions: all responses needed to be given by a single participant ($N = 3,986$), and if they took part in the experiment more than once only the first participation was considered ($N = 3,704$). If the mean ITI of a participant was faster than 100 ms, then their data was not further considered ($N = 3,703$), since 100 ms can be assumed to be the motoric lower limit for finger tapping. Furthermore, an outlier detection using 1.5 interquartile range was applied on age ($N = 3,577$). This factor informed the most about potential incorrect responses given by participants (e.g., one participant claimed to be 1 year old) and the outlier detection offered an objective approach for their exclusion. One participant was removed from the study who claimed to be from Antarctica. The data cleaning approach resulted in a data reduction from $N = 5,966$ to 3,576 (59.9%). The different hard- and software used by the participants (see **Supplementary Material**) did not influence the SMT results [device types: $t_{(1, 3,574)} = -1.40$, $p = 0.16$, $d = -0.5$, operating systems: $F_{(4, 3,571)} = 0.47$, $p = 0.44$, $\eta^2 = 0.001$, browser: $F_{(6, 3,569)} = 1.56$, $p = 0.15$, $\eta^2 = 0.003$], suggesting that any such potential influence was mitigated which

was expected as time point differences were measured so a device effect could only be caused by a varying internal device latency.

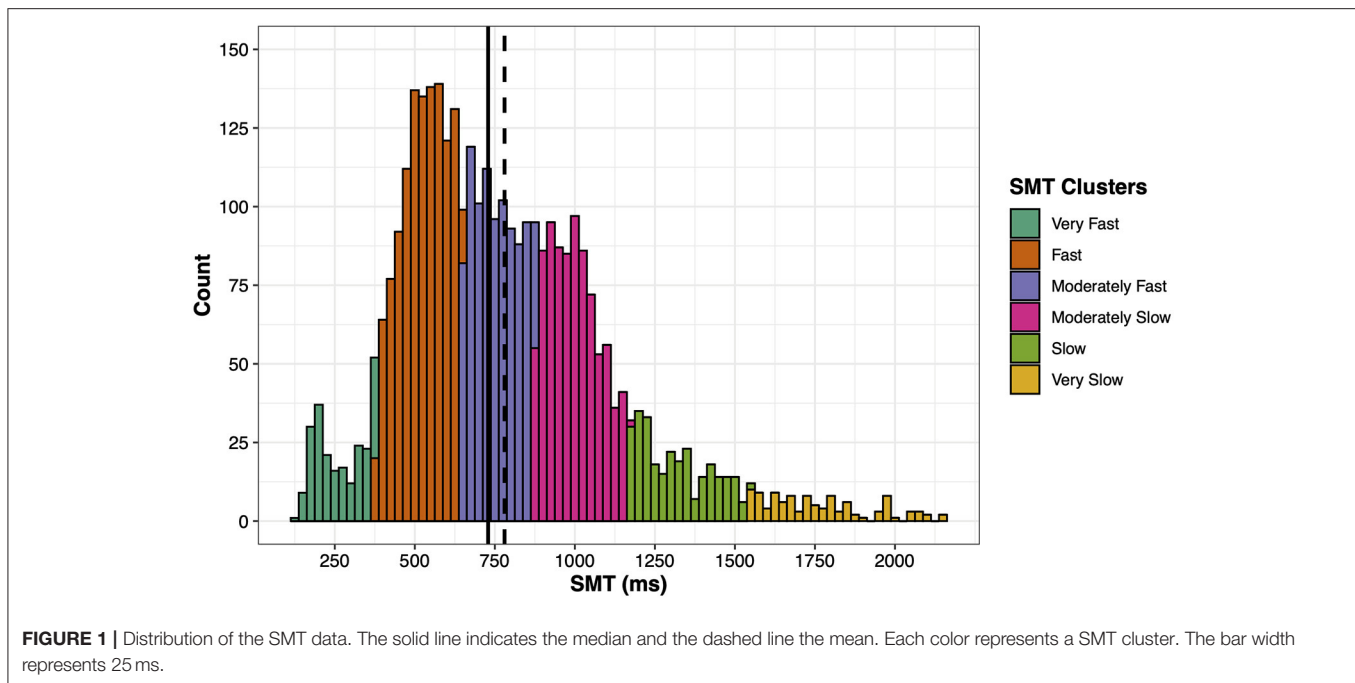
Inspecting the distribution of SMT data, a *Shapiro-Wilk* test ($W = 0.95$, $p < 0.001$), *measure of skewness* (0.91, $SE = 0.04$), and *Kurtosis* (1.25, $SE = 0.08$), suggested a left skewed, super Gaussian and leptokurtic distribution (see **Figure 1**). Furthermore, the data shows multiple modes (peaks) suggesting a multimodal distribution. In order to account for this multimodality by identifying different modes, a *Gaussian mixture model* was applied using the Mclust package in R. A systemic clustering was applied on the SMT and the coefficient of variation (CV) of SMT including 10 different geometric characteristics and up to nine mixture components (i.e., number of clusters). Participants' CV was included in order to stabilize the model and improve the clustering. As we were only interested in the clustering of the ITIs and not their corresponding variability, the final model grouped participants into six different clusters consisting of a spherical distribution with equal volume and equal shape (“EII”). This model identified the fastest cluster peaking around 200–250 ms, which is small but visible (see section “SMT Distribution and Clusters”). Next, separate *Analyses of Variance* (ANOVAs) were applied using these SMT clusters as an independent variable and age, arousal, long-term stress, and musical experience measures as fixed factors. *Post-hoc* comparisons of these ANOVAs were calculated with Tukey adjustments. As time of the day is circular, analyzing differences between the SMT clusters using a conventional ANOVA is not feasible. Thus, the local times of test execution were converted into circular vectors in order to apply a circular ANOVA to compare the mean time of the day between SMT clusters using the Circular package in R. Circular *post-hoc* comparisons were based on the method from Tasdan and Yeniay (2018) and adjusted according to Holm.

In order to check for general predictors of the SMT and to ensure homoscedasticity, ITIs were cluster-wise z-transformed before applying a multiple regression model with the factors age, arousal, musical experience, and long-term stress. The cluster-wise transformation was done in order to account for the different modes of multiples around 250 ms. Data processing and analysis for the whole study was done in R (R Core Team, 2020).

RESULTS

SMT Distribution and Clusters

Participants' individual SMT was calculated by taking the mean of their inter-tap intervals (ITIs). Overall, the mean SMT of all participants was 780 ms ($SD = 328$) and the median ITI was 729 ms, ranging from 123 to 2,150 ms. **Table 1** shows the descriptive statistics of fixed factors and **Table 2** the correlation matrix between them including the SMT. As **Figure 1** shows, the distribution of SMTs across all participants is multimodal (see section “Data Analysis”). In order to statistically account for this data distribution, a *Gaussian mixture model* (GMM) was applied before further testing for influences on the SMT. The GMM grouped the participants into six SMT clusters (see color scheme in **Figure 1**). These clusters differ in terms of participants' ITIs, thus each cluster represents a different tempo range of SMTs.



As **Table 3** shows, the mean SMTs for each cluster resulted in approximate multiples of 250 ms, which might be indicative of a base frequency of around 4 Hz.

Differences Between SMT Clusters

In order to check for differences of age, time of day, arousal, long-term stress, and musical experience between the SMT clusters, separate *Analyses of Variance* (ANOVAs) were performed.

Age

The ANOVA on Age showed a significant main effect, $F_{(5, 3,570)} = 8.79$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.01$, suggesting that the mean age of participants differed between the SMT clusters (**Figure 2**). *Post-hoc* comparisons show that participants in the Fast SMT cluster were younger than participants in the Moderate Slow ($p < 0.001$) and Slow SMT clusters ($p < 0.001$). Furthermore, Age differed between the Moderately Fast and Moderately Slow SMT clusters ($p = 0.04$), showing that the participants in the Moderately Fast SMT cluster were younger. All other comparisons were non-significant (all $p > 0.05$). These results indicate with increasing age, participants were more likely to be classified in a slower SMT cluster.

Time of the Day

In order to test if the Time of the Day differed between the SMT clusters, the hour of test execution from each participant was converted into circular vectors before applying a circular ANOVA. Time of the Day resulted in a significant main effect, $F_{(5, 3,570)} = 13.22$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.20$, suggesting that the mean hour of test execution differed between the SMT clusters (**Figure 3**). *Post-hoc* comparisons (adjusted $\alpha = 0.004$) resulted in significant differences between the Fast and Moderately Slow ($p = 0.004$), the Fast and Slow ($p < 0.001$) and the Moderately Fast and Slow ($p < 0.001$) SMT clusters. All other comparisons

were non-significant (all $p > 0.004$). These differences suggest that the earlier it was during the day, the higher was the probability to observe a slower SMT cluster.

Arousal

Arousal did not differ between the SMT clusters, $F_{(5, 3,570)} = 1.89$, $p = 0.09$, $\eta^2 = 0.003$, suggesting that participants arousal level did not influence the SMT in terms of the cluster ranges.

Long-Term Stress

Participants' PSS score did not show a main effect, $F_{(5, 3,570)} = 1.18$, $p = 0.32$, $\eta^2 = 0.002$, suggesting that long-term stress did not affect the SMT in terms of the cluster ranges.

Musical Experience

The ANOVA on Musical Experience and SMT clusters showed a main effect, $F_{(5, 3,570)} = 4.91$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.007$ (**Figure 4**). *Post-hoc* comparisons show that participants in the Slow SMT cluster had the lowest musical experience, compared to the Fast ($p < 0.001$), Moderately Fast ($p < 0.001$), and Moderately Slow SMT clusters ($p = 0.003$). All other comparisons were non-significant (all $p > 0.05$).

General Predictors of SMT

In order to predict general differences in SMT, participants' ITIs were cluster-wise z-transformed. Transforming the SMT values per cluster allows for the assessment and comparison of differences for faster or slower participants within each cluster, independently from their overall belonging to a given SMT cluster (i.e., mode). This approach accounted for the different time scales in the clusters. A multiple linear regression was applied in order to predict the z-scored SMT based on age, arousal, long-term stress, and musical experience. The regression was significant, $F_{(4, 3,570)} = 3.72$, $p = 0.01$, $R^2 =$

TABLE 1 | Descriptive statistics of fixed factors.

Factor	Mean	Median	Standard deviation	Range	Minimum	Maximum
Age (years)	27.65	26.00	7.61	42.00	7.00	49.00
Arousal (rating scale)	2.21	2.00	0.95	5.00	1.00	5.00
Long-term stress (PSS-4)	7.60	8.00	2.96	16.00	0.00	16.00
Musical experience (rating scale)	2.10	1.00	1.39	6.00	1.00	6.00

TABLE 2 | Correlation matrix using Spearman's rho.

	SMT (ms)	Age	Arousal	Long-term stress	Musical experience
SMT (ms)					
Age	0.12*				
Arousal	-0.06*	-0.10*			
Long-term stress	-0.01	-0.14*	0.15*		
Musical experience	-0.04	-0.18*	0.12*	-0.04	

Values indicate the correlation coefficient based on $N = 3,576$. Asterisks indicate significance (adjusted $\alpha = 0.005$).

TABLE 3 | Descriptive statistics of each SMT cluster.

SMT cluster	Number of participants	Mean ITI (ms)	Median ITI (ms)	Standard deviation (ms)	Range (ms)	Minimum (ms)	Maximum (ms)
Very Fast	223	265	261	74	123	123	375
Fast	1,184	525	529	70	267	375	642
Moderately Fast	925	754	750	67	232	642	875
Moderately Slow	852	997	992	77	289	876	1,164
Slow	283	1,314	1,301	106	373	1,167	1,541
Very Slow	109	1,757	1,729	166	607	1,543	2,150

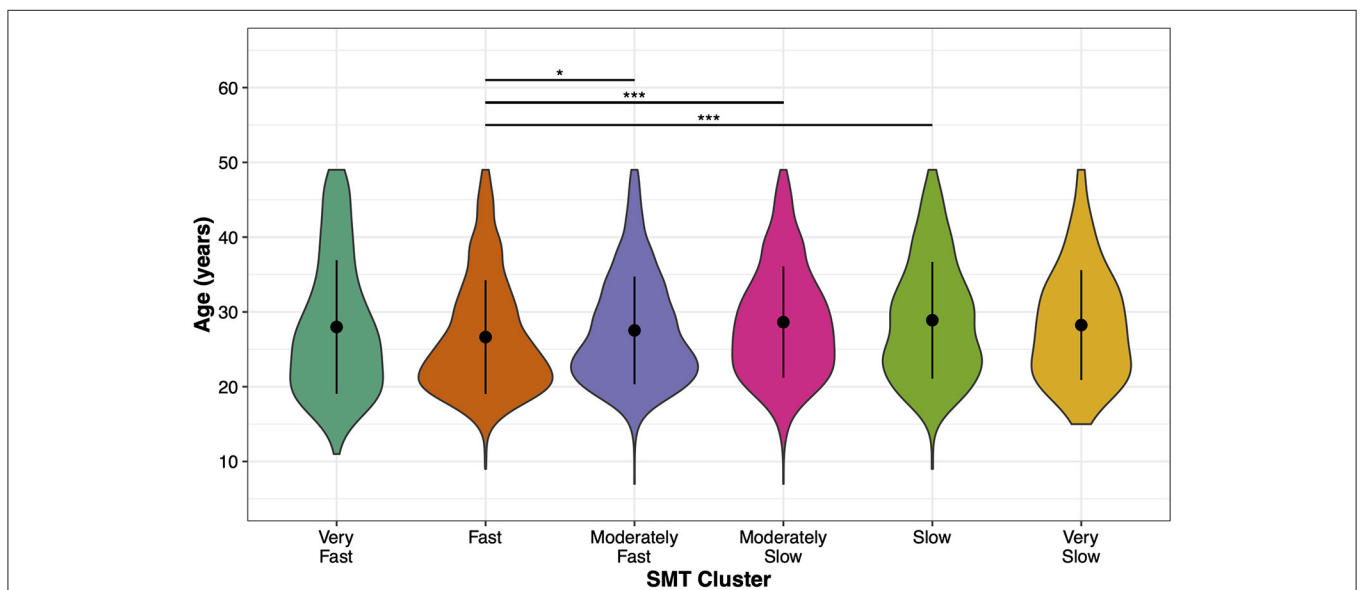


FIGURE 2 | Age distribution between SMT clusters. Mean values (black points) and standard deviations (error bars) of participants' age for each SMT cluster. Colored areas show the age distribution. Asterisks indicate significant differences: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, and *** $p < 0.001$.

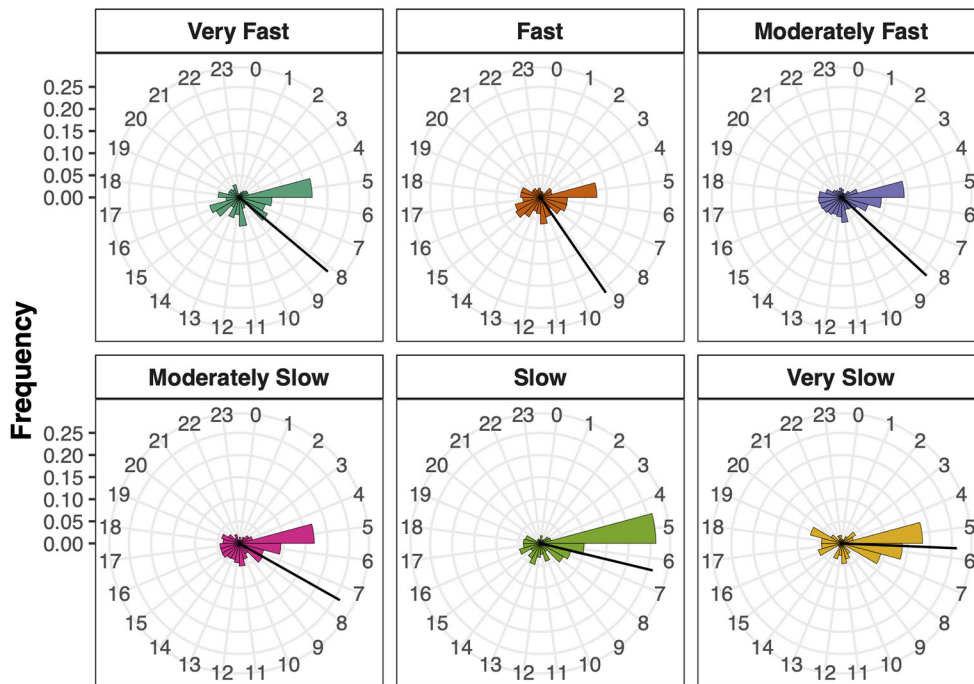


FIGURE 3 | Time of the day per SMT cluster. Bars show the hour of test execution and the bar length shows the frequency per hour. The black lines represent the circular mean per SMT cluster.

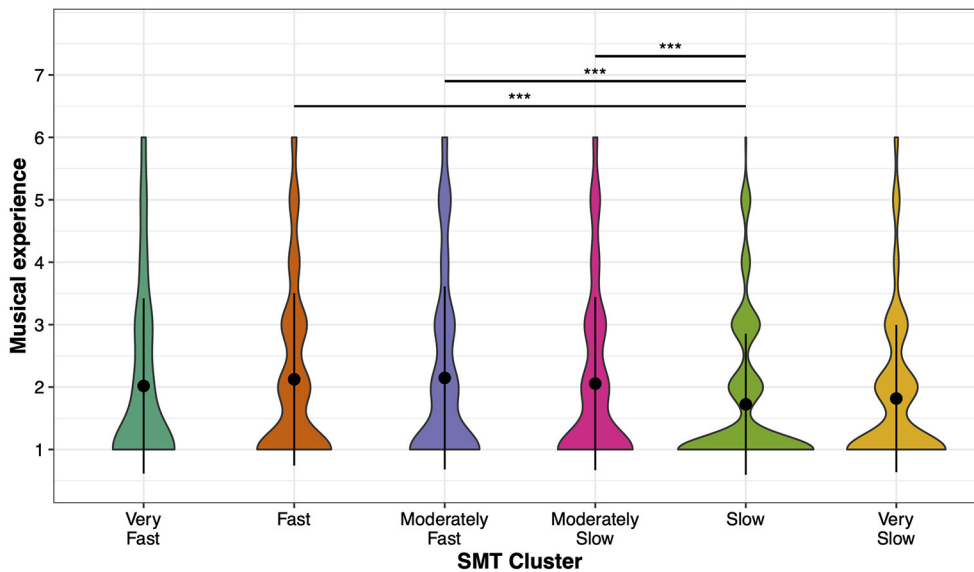


FIGURE 4 | Distribution of musical experience per SMT cluster. Mean values (black points) and standard deviations (error bars) of participants' musical experience for each SMT cluster. Colored areas show the distribution of musical experience. Asterisks indicate significant differences: *** $p < 0.001$.

0.004, with Arousal ($\beta = -0.05, p = 0.001$) and Musical Experience ($\beta = 0.03, p = 0.01$) as significant predictors. As the estimates show, more aroused participants showed a faster SMT than less aroused participants, and more musically experienced participants showed a slower SMT than less experienced participants across the sample.

DISCUSSION

With a large-scale online experiment, this study investigated factors influencing the spontaneous motor tempo (SMT), measured as the mean inter-tap interval (ITI), by implementing a finger-tapping paradigm in a web application. Participants were

grouped into six different SMT clusters, differing in terms of their mean ITIs, ranging from Very Fast ($M = 265$ ms, $SD = 74$) to Very Slow ($M = 1,757$ ms, $SD = 166$). Results show that the SMT clusters differed by age, suggesting that older participants preferred a slower SMT. The average time of the day of test execution differed between the SMT clusters as well, suggesting that the earlier it was during the day, the slower were participants' SMT. Arousal and long-term stress did not differ between the SMT clusters, yet more aroused participants showed a faster SMT within their SMT clusters. Furthermore, musical experience showed contrasting results when comparing differences between the SMT clusters and prediction across the whole sample. These findings suggest that individuals' SMT depends on age, the time of the day, and arousal.

The first hypothesis stated that SMT slows down with higher age, which was confirmed by our results, as the mean age of participants increased between the Fast ($M = 525$ ms, $SD = 70$) and the Slow ($M = 1,314$ ms, $SD = 106$) SMT clusters. This result confirms previous studies comparing the SMT of different age groups, which also found a slowed down SMT (Provasi and Bobin-Bègue, 2003; Baudouin et al., 2004; McAuley et al., 2006; Monier and Droit-Volet, 2018, 2019). In the current study, participants' age ranged from 7 to 49 years (after the removal of outliers). Whereas it was previously reported that elderly (age 66–94 years) showed SMTs of up to 1,125 ms (Baudouin et al., 2004), our results suggest that such a slowing pace preference exists for younger adults as well. This indicates that the slowing of SMT may already be present in younger to middle-aged adults (age 18–49 years). While the slowing of the intrinsic timekeeper, and in turn an age-related decline in behavioral and processing speed can be assumed for the elderly (Surwillo, 1968), such a decline may start at an earlier age as suggested by this study with a younger sample (age 7–49 years). This is in line with previous studies showing cognitive aging effects for memory and mental speed starting from 20 years on (Salthouse, 2010). Our results might point toward a higher resource demand for fast information processing present in middle-aged adults (up to 49 years), since processing speed is a mediator for working memory and SMT (Baudouin et al., 2004). Future studies could further investigate this by explicitly focusing on the young and middle-aged adults between 20 and 60 years.

The second hypothesis stated that chronobiology, i.e., the time of the day when responding, would influence the pace of the SMT. Previous studies showed a fluctuation of the SMT during the course of a day for finger tapping as well as smartphone tapping speed (Moussay et al., 2002; Huber and Ghosh, 2021). In order to further investigate this effect, we applied circular statistics on the mean ITIs and compared the SMT clusters for the average time of test execution. As the results show, the mean SMT was slower the earlier it was during the day, and the SMT clusters differed from each other. This is in line with a previously reported result suggesting a speeding-up of the SMT from 06:00 in the morning to 18:00 (Moussay et al., 2002). The reason for this fluctuation of the SMT might be the circadian rhythm (i.e., day-night cycle). The biological clock has been shown to influence cognitive and physiological functions such as motor processes, reaction time, time judgements, and memory tasks

(Valdez and Ramírez, 2012). It should be noted that in our case, each SMT cluster showed a relatively early average time of the day, which is probably caused by the online implementation of this experiment. As the study gained more visibility (especially in China), a large number of participants took part in a short amount of time, which in our case was in the respective local morning hours. Further research is needed to confirm the SMT fluctuation and its dependence on the circadian rhythm, controlling for the time of the day when assessing the SMT. Furthermore, the influence of the circadian rhythm indicates that the pace of the SMT might depend on the chronotype as well, that is a person's natural inclination for the sleep period of the day, which has been shown to also influence the motor timing of musicians (van Vugt et al., 2013). Our findings suggest that the SMT as measured with a finger-tapping paradigm might be a useful method to assess the circadian rhythm in cognitive performance capabilities.

The third hypothesis stated that arousal and long-term stress would influence the SMT, as a higher arousal level and more long-term stress caused the SMT to speed up. Previous studies showed that induced arousal and physical activity, which in turn leads to a higher arousal level, sped up the pace of SMT (Boltz, 1994; Perilli, 1995; Dosseville et al., 2002). The results of the current study partly confirm this, as the regression model with cluster-wise z-transformed ITIs did suggest a faster SMT with higher arousal across the SMT clusters, yet the arousal level of participants did not differ between the SMT clusters. The reason for this relatively small influence of arousal on the SMT might be due to the nature of this experimental setting. As participants were able to do the test online, it is quite likely that the majority of them were in relatively relaxed situations, for example in front of their desk at home. This assumption is further supported by the relatively low average arousal level. As long-term or chronic stress leads to general physiological changes such as a higher heart rate over longer time periods (Yaribeygi et al., 2017), we assumed a generally higher arousal level in participants with more long-term stress, and in turn a faster SMT. We could not find any influence of long-term stress, assessed by the 4-item *Perceived stress scale* (PSS), as neither the SMT clusters differed from each other nor did the PSS score show an effect in the regression model. This suggests that the SMT reflects short-term stress or physiological states and is not affected by long-term stress conditions. An explanation might be that physiological arousal is caused by adrenaline (and other hormones) that directly affect the neural circuits involved in the intrinsic timekeeper, and also leads to increased pulse and blood pressure, thus they are epiphenomena of arousal. Long-term stress does not necessarily result in momentary stress and in turn higher physiological arousal. The effects of long-term or chronic stress on heart rate are due to long-term adaptations to higher average adrenalin levels (note that we were using self-report measures of arousal and long-term stress, not physiological ones). Future studies might investigate the effect of arousal in a way which clearly differentiates between physiological and perceived as well as short- and long-term arousal states as previous studies' results are inconclusive (Dosseville et al., 2002; Sysoeva et al., 2013).

Previous studies reported an effect of musical experience on the SMT as children with musical experience showed slower SMTs than children without musical experience, yet no differences were found between adult musicians and non-musicians (Drake et al., 2000). This finding together with a slower production rate of melodies for musicians have been linked to the perceptual capability to organize events into longer time spans, which is reflected in a greater accuracy and rate range for sensorimotor synchronization to musical rhythms (Repp and Doggett, 2007; Repp, 2010; Martens, 2011; Scheurich et al., 2018; Hammerschmidt and Wöllner, 2020). Our results did not confirm the assumption of a slower SMT for musically experienced individuals, since the least experienced participants were in the Slow SMT cluster. On the contrary, the regression model of cluster-wise z-transformed SMTs suggested that musically more experienced participants in each SMT cluster preferred a slower SMT. Thus, a potential influence of musical experience on the SMT, its direction and underlying cause warrants further and more detailed investigations.

Compared to previous studies reporting SMTs ranging from 190 to over 950 ms for healthy adults (Fraisse, 1982; Collyer et al., 1994; Moelants, 2002), SMT variability was much larger in our study (range: 123–2,150 ms). A possible explanation for the very long ITIs might be that some of the participants did not follow the task instruction correctly and mentally subdivided their finger taps, for example, only carrying out every other tap physically. Furthermore, the distribution of ITIs was multimodal, showing clusters for mostly slower SMTs as well, drawing a more complex picture of the SMT than previously reported. This is an interesting result in itself, as the mean periods of SMT clusters could be approximate multiples of about 250 ms (mean absolute deviation from the closest value nT with $n \in \{1, 2, 3, 4, 5, 7\}$ and $T = 251$ ms was 17 ms, range 0–59 ms). This result might be indicative for an internal oscillator with a base frequency around 4 Hz (van Noorden and Moelants, 1999; Ding et al., 2017). Thus, lower modes (subharmonics) of this base frequency might have been used for the finger-tapping task (every second, third, fourth, etc. oscillatory peak). The SMT cluster with $T \sim 500$ ms (second mode) seems to be most common for the SMT as previous studies found a clustering around 500–600 ms, which corresponds with the Fast SMT cluster in our study, ranging from 375 to 642 ms ($M = 525$ ms, $SD = 70$) with the highest number of participants. The clustering around this potential second mode might be due to anatomical and biomechanical properties of the body (Goodman et al., 2000; Todd et al., 2007). This also seems to be in line with the resonance frequency model of pulse perception (van Noorden and Moelants, 1999). The small effect sizes for the factors age and musical experience might further indicate that the modulation of the SMT is relatively small and the preference for a certain pace of the SMT is, indeed, quite stable.

The larger variability of SMT and the possible explanation of mental subdivision of finger tapping points to a limitation of this study: Due to the online implementation it was not possible to observe and control for task comprehension and task execution. For example, participants in the Very Fast SMT cluster could have used two fingers and or deliberately did not follow task instructions. On the other hand, the online

implementation resulted in a large number of participants, keeping the potential influence and likelihood of false responses relatively small, and outliers had been excluded before analyses. Compared to other studies, a relatively short recording time of 15 seconds of the SMT was chosen in order to reduce dropout rate by keeping motivation in the study high. In order to account for this, a relatively strict cut-off value for tapping variability was implemented, thus ensuring that participants kept their tapping pace constant. The relatively simple measures for musical experience and arousal do not provide much detail in the respective domains, yet they were chosen to keep the experiment length relatively short in order to reduce the dropout rate of the experiment (Hoerger, 2010), as they are easy to understand for people not typically participating in scientific studies and coming from different backgrounds. Furthermore, it was not possible to control the distribution of participants based on specific demographics. The experiment was relatively short (3–5 min) and 67% completed the whole experiment. The dropout rate might have been further reduced when the feedback of tapping performance would have been given after participants were asked to rate their arousal level, musical experience, and the long-term stress (part 3 of the experiment).

To conclude, this study investigated factors influencing the spontaneous motor tempo (SMT) in a large-scale online experiment by implementing the finger-tapping paradigm in a self-developed web application. Results confirmed a slowing with age effect on the SMT and showed an influence of the time of the day, indicating that the earlier it is during the day, the slower is the SMT. This suggests that the SMT might be a useful method for the assessment of someone's circadian rhythm. Arousal only showed a small effect on the SMT, which might be due to the test conditions, as participants might have done the test in relatively relaxed situations. Whereas all these effects have a physiological basis, musical experience showed a more complex influence on the SMT than previous studies have suggested, which warrants further investigations. Thus, this study's methodological approach and outcomes are informative for the psychology of time and music, showing a complex relationship of factors and their effect on multimodal SMT distribution with a large number of individuals.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

The raw data supporting the conclusions of this article are openly available in Zenodo repository at <http://doi.org/10.5281/zenodo.4897921>.

ETHICS STATEMENT

The studies involving human participants were reviewed and approved by Ethics Committee of the Faculty of Humanities at University of Hamburg. Written informed consent from the participants' legal guardian/next of kin was not required to participate in this study in accordance with the national legislation and the institutional requirements.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

DH and CW designed the research. DH and KF analyzed the data. DH wrote most parts of the manuscript. All authors reviewed the manuscript.

FUNDING

This research was funded by the European Research Council (Consolidator Grant no. 725319, to CW) for the project *Slow motion: Transformation of musical time in perception and performance* (SloMo).

REFERENCES

- Allman, M. J., Teki, S., Griffiths, T. D., and Meck, W. H. (2014). Properties of the internal clock. First- and second-order principles of subjective time. *Annu. Rev. Psychol.* 65, 743–771. doi: 10.1146/annurev-psych-010213-115117
- Assaneo, M. F., and Poeppel, D. (2018). The coupling between auditory and motor cortices is rate-restricted. Evidence for an intrinsic speech-motor rhythm. *Sci. Adv.* 4:eaa03842. doi: 10.1126/sciadv.aao3842
- Baudouin, A., Vanneste, S., and Isingrini, M. (2004). Age-related cognitive slowing. The role of spontaneous tempo and processing speed. *Exp. Aging Res.* 30, 225–239. doi: 10.1080/03610730490447831
- Boltz, M. G. (1994). Changes in internal tempo and effects on the learning and remembering of event durations. *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn.* 20, 1154–1171. doi: 10.1037/0278-7393.20.5.1154
- Burle, B., and Casini, L. (2001). Dissociation between activation and attention effects in time estimation: implications for internal clock models. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 27, 195–205. doi: 10.1037/0096-1523.27.1.195
- Cohen, S., and Williamson, G. (1988). “Perceived stress in a probability sample of the United States,” in *The Social Psychology of Health*, eds. S. Spacapan and S. Oskamp (Newbury Park, CA: Sage), 31–68.
- Collyer, C. E., Broadbent, H. A., and Church, R. M. (1994). Preferred rates of repetitive tapping and categorical time production. *Percept. Psychophys.* 55, 443–453. doi: 10.3758/BF03205301
- Delevoeye-Turrell, Y., Dione, M., and Agneray, G. (2014). Spontaneous motor tempo is the easiest pace to act upon for both the emergent and the predictive timing modes. *Procedia Soc. Behav. Sci.* 126, 121–122. doi: 10.1016/j.sbspro.2014.02.338
- Ding, N., Patel, A. D., Chen, L., Butler, H., Luo, C., and Poeppel, D. (2017). Temporal modulations in speech and music. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 81, 181–187. doi: 10.1016/j.neubiorev.2017.02.011
- Dosseville, F., Moussay, S., Larue, J., Gauthier, A., and Davenne, D. (2002). Physical exercise and time of day. Influences on spontaneous motor tempo. *Percept. Motor Skills* 95, 965–972. doi: 10.1177/003151250209500301
- Drake, C., Jones, M. R., and Baruch, C. (2000). The development of rhythmic attending in auditory sequences. Attunement, referent period, focal attending. *Cognition* 77, 251–288. doi: 10.1016/S0010-0277(00)00106-2
- Fisher, J. P. (2014). Autonomic control of the heart during exercise in humans. Role of skeletal muscle afferents. *Exp. Physiol.* 99, 300–305. doi: 10.1113/expphysiol.2013.074377
- Fraisse, P. (1982). “Rhythm and tempo,” in *The Psychology of Music*, ed. D. Deutsch (New York, NY: Academic Press), 149–180.
- Goodman, L., Riley, M. A., Mitra, S., and Turvey, M. T. (2000). Advantages of rhythmic movements at resonance. Minimal active degrees of freedom, minimal noise, and maximal predictability. *J. Motor Behav.* 32, 3–8. doi: 10.1080/00222890009601354
- Grommet, E. K., Droit-Volet, S., Gil, S., Hemmes, N. S., Baker, A. H., and Brown, B. L. (2011). Time estimation of fear cues in human observers. *Behav. Process.* 86, 88–93. doi: 10.1016/j.beproc.2010.10.003
- Grondin, S. (2010). Timing and time perception. A review of recent behavioral and neuroscience findings and theoretical directions. *Attent. Percept. Psychophys.* 72, 561–582. doi: 10.3758/APP.72.3.561

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to thank Simon Mayrshofer (University of Hamburg) for the development of the web application and server maintenance.

SUPPLEMENTARY MATERIAL

The Supplementary Material for this article can be found online at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2021.677201/full#supplementary-material>

- Hammerschmidt, D., and Wöllner, C. (2020). Sensorimotor synchronization with higher metrical levels in music shortens perceived time. *Music Percept.* 37, 263–277. doi: 10.1525/mp.2020.37.4.263
- Hoerger, M. (2010). Participant dropout as a function of survey length in internet-mediated University studies. Implications for study design and voluntary participation in psychological research. *Cyberpsychol. Behav. Soc. Netw.* 13, 697–700. doi: 10.1089/cyber.2009.0445
- Holbrook, M. B., and Anand, P. (1990). Effects of tempo and situational arousal on the listener’s perceptual and affective responses to music. *Psychol. Music* 18, 150–162. doi: 10.1177/0305735690182004
- Huber, R., and Ghosh, A. (2021). Large cognitive fluctuations surrounding sleep in daily living. *iScience* 24:102159. doi: 10.1016/j.isci.2021.102159
- Hunter, S. K., Pereira, H. M., and Keenan, K. G. (2016). The aging neuromuscular system and motor performance. *J. Appl. Physiol.* 121, 982–995. doi: 10.1152/japplphysiol.00475.2016
- Jones, M. R., and Boltz, M. G. (1989). Dynamic attending and responses to time. *Psychol. Rev.* 96, 459–491. doi: 10.1037/0033-295X.96.3.459
- Large, E. W., and Jones, M. R. (1999). The dynamics of attending. How people track time-varying events. *Psychol. Rev.* 106, 119–159. doi: 10.1037/0033-295X.106.1.119
- MacDougall, H. G., and Moore, S. T. (2005). Marching to the beat of the same drummer. The spontaneous tempo of human locomotion. *J. Appl. Physiol.* 99, 1164–1173. doi: 10.1152/japplphysiol.00138.2005
- Martens, P. A. (2011). The ambiguous tactus. Tempo, subdivision Benefit, and three listener strategies. *Music Percept.* 28, 433–448. doi: 10.1525/mp.2011.28.5.433
- McAuley, J. D., and Jones, M. R. (2003). Modeling effects of rhythmic context on perceived duration: a comparison of interval and entrainment approaches to short-interval timing. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 29, 1102–1125. doi: 10.1037/0096-1523.29.6.1102
- McAuley, J. D., Jones, M. R., Holub, S., Johnston, H. M., and Miller, N. S. (2006). The time of our lives. Life span development of timing and event tracking. *J. Exp. Psychol. Gen.* 135, 348–367. doi: 10.1037/0096-3445.135.3.348
- Michaelis, K., Wiener, M., and Thompson, J. C. (2014). Passive listening to preferred motor tempo modulates corticospinal excitability. *Front. Hum. Neurosci.* 8:252. doi: 10.3389/fnhum.2014.00252
- Moelants, D. (2002). “Preferred tempo reconsidered,” in *Proceedings of the ICMPC 7: 7th International Conference on Music Perception and Cognition*, eds. C. Stevens, D. Burnham, G. McPherson, E. Schubert, and J. Renwick (Sydney, NSW: Causal Productions), 580–583.
- Monier, F., and Droit-Volet, S. (2018). Synchrony and emotion in children and adults. *Int. J. Psychol.* 53, 184–193. doi: 10.1002/ijop.12363
- Monier, F., and Droit-Volet, S. (2019). Development of sensorimotor synchronization abilities. Motor and cognitive components. *Child Neuropsychol.* 25, 1043–1062. doi: 10.1080/09297049.2019.1569607
- Moussay, S., Dosseville, F., Gauthier, A., Larue, J., Sesboüe, B., and Davenne, D. (2002). Circadian rhythms during cycling exercise and finger-tapping task. *Chronobiol. Int.* 19, 1137–1149. doi: 10.1081/CBI-120015966
- Nobrega, A. C. L., O’Leary, D., Silva, B. M., Marongiu, E., Piepoli, M. F., and Crisafulli, A. (2014). Neural regulation of cardiovascular response to

- exercise. Role of central command and peripheral afferents. *BioMed Res. Int.* 2014:478965. doi: 10.1155/2014/478965
- Noulhiane, M., Mella, N., Samson, S., Ragot, R., and Pouthas, V. (2007). How emotional auditory stimuli modulate time perception. *Emotion* 7, 697–704. doi: 10.1037/1528-3542.7.4.697
- Ozel, S., Larue, J., and Dosseville, F. (2004). Effect of arousal on internal clock speed in real action and mental imagery. *Can. J. Exp. Psychol.* 58, 196–205. doi: 10.1037/h0087444
- Peckel, M., Pozzo, T., and Bigand, E. (2014). The impact of the perception of rhythmic music on self-paced oscillatory movements. *Front. Psychol.* 5:1037. doi: 10.3389/fpsyg.2014.01037
- Perilli, G. G. (1995). Subjective tempo in adults with and without psychiatric disorders. *Music Ther. Perspect.* 13, 104–109. doi: 10.1093/mtp/13.2.104
- Provasi, J., and Bobin-Bègue, A. (2003). Spontaneous motor tempo and rhythmical synchronisation in 2½- and 4-year-old children. *Int. J. Behav. Dev.* 27, 220–231. doi: 10.1080/01650250244000290
- R Core Team (2020). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.
- Repp, B. H. (2010). Sensorimotor synchronization and perception of timing. Effects of music training and task experience. *Hum. Mov. Sci.* 29, 200–213. doi: 10.1016/j.humov.2009.08.002
- Repp, B. H., and Doggett, R. (2007). Tapping to a very slow beat. A comparison of musicians and nonmusicians. *Music Percept.* 24, 367–376. doi: 10.1525/mp.2007.24.4.367
- Rose, D., Ott, L., Guérin, S. M. R., Annett, L. E., Lovatt, P., and Delevoeye-Turrell, Y. N. (2021). A general procedure to measure the pacing of body movements timed to music and metronome in younger and older adults. *Sci. Rep.* 11:3264. doi: 10.1038/s41598-021-82283-4
- Salthouse, T. A. (2010). Selective review of cognitive aging. *J. Int. Neuropsychol. Soc.* 16, 754–760. doi: 10.1017/S1355617710000706
- Scheurich, R., Zamm, A., and Palmer, C. (2018). Tapping into rate flexibility. Musical training facilitates synchronization around spontaneous production rates. *Front. Psychol.* 9:458. doi: 10.3389/fpsyg.2018.00458
- Schwarz, M. A., Winkler, I., and Sedlmeier, P. (2013). The heart beat does not make us tick. The impacts of heart rate and arousal on time perception. *Attent. Percept. Psychophys.* 75, 182–193. doi: 10.3758/s13414-012-0387-8
- Seidler, R. D., Bernard, J. A., Burutolu, T. B., Fling, B. W., Gordon, M. T., Gwin, J. T., et al. (2010). Motor control and aging. Links to age-related brain structural, functional, and biochemical effects. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 34, 721–733. doi: 10.1016/j.neubiorev.2009.10.005
- Styns, F., van Noorden, L., Moelants, D., and Leman, M. (2007). Walking on music. *Hum. Mov. Sci.* 26, 769–785. doi: 10.1016/j.humov.2007.07.007
- Surwillo, W. W. (1968). “Timing of behavior in senescence and the role of the central nervous system,” in *Human Aging and Behavior: Recent Advances in Research and Theory*, ed. G. A. Talland (New York: Academic Press), 1–35.
- Sysoeva, O. V., Wittmann, M., Mierau, A., Polikanova, I., Strüder, H. K., and Tonevitsky, A. (2013). Physical exercise speeds up motor timing. *Front. Psychol.* 4:612. doi: 10.3389/fpsyg.2013.00612
- Tasdan, F., and Yeniay, O. (2018). A comparative simulation of multiple testing procedures in circular data problems. *J. Appl. Stat.* 45, 255–269. doi: 10.1080/02664763.2016.1273886
- Todd, N. P. M., Cousins, R., and Lee, C. S. (2007). The contribution of anthropometric factors to individual differences in the perception of rhythm. *Empir. Musical. Rev.* 2, 1–13. doi: 10.18061/1811/24478
- Todd, N. P. M., and Lee, C. S. (2015). The sensory-motor theory of rhythm and beat induction 20 years on. A new synthesis and future perspectives. *Front. Hum. Neurosci.* 9:444. doi: 10.3389/fnhum.2015.00444
- Treisman, M. (1963). Temporal discrimination and the indifference interval. Implications for a model of the “internal clock”. *Psychol. Monogr.* 77, 1–31. doi: 10.1037/h0093864
- Valdez, P., Ramírez, and García, A. (2012). Circadian rhythms in cognitive performance: implications for neuropsychological assessment. *Chronophysiol. Ther.* 2012:81–92. doi: 10.2147/CPT.S32586
- van Noorden, L., and Moelants, D. (1999). Resonance in the perception of musical pulse. *J. New Music Res.* 28, 43–66. doi: 10.1076/jnmr.28.1.43.3122
- van Vugt, F. T., Treutler, K., Altenmüller, E., and Jabusch, H.-C. (2013). The influence of chronotype on making music. Circadian fluctuations in pianists’ fine motor skills. *Front. Hum. Neurosci.* 7:347. doi: 10.3389/fnhum.2013.00347
- Vanneste, S., Pouthas, V., and Wearden, J. H. (2001). Temporal control of rhythmic performance. A comparison between young and old adults. *Exp. Aging Res.* 27, 83–102. doi: 10.1080/036107301750046151
- Wearden, J. H. (2008). Slowing down an internal clock. Implications for accounts of performance on four timing tasks. *Q. J. Exp. Psychol.* 61, 263–274. doi: 10.1080/17470210601154610
- Yaribeygi, H., Panahi, Y., Sahraei, H., Johnston, T. P., and Sahebkar, A. (2017). The impact of stress on body function. A review. *EXCLI J.* 16, 1057–1072. doi: 10.17179%2Fexcli2017-480
- Yu, H., Russell, D. M., and Sternad, D. (2003). Task-effector asymmetries in a rhythmic continuation task. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 29, 616–630. doi: 10.1037/0096-1523.29.3.616

Conflict of Interest: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright © 2021 Hammerschmidt, Frieler and Wöllner. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

8.5 Studie 4

Hammerschmidt, D. & Wöllner, C. (2022)

**Spontaneous motor tempo over the course of a week:
The role of the time of the day, chronotype, and arousal**

Psychological Research

Creative Commons BY



Spontaneous motor tempo over the course of a week: the role of the time of the day, chronotype, and arousal

David Hammerschmidt¹ · Clemens Wöllner¹

Received: 17 June 2021 / Accepted: 13 January 2022
© The Author(s) 2022

Abstract

The spontaneous motor tempo (SMT) or internal tempo describes the natural pace of predictive and emergent movements such as walking or hand clapping. One of the main research interests in the study of the spontaneous motor tempo relates to factors affecting its pace. Previous studies suggest an influence of the circadian rhythm (i.e., 24-h cycle of the biological clock), physiological arousal changes, and potentially also musical experience. This study aimed at investigating these effects in participants' everyday life by measuring their SMT four times a day over seven consecutive days, using an experience sampling method. The pace of the SMT was assessed with a finger-tapping paradigm in a self-developed web application. Measured as the inter-tap interval, the overall mean SMT was 650 ms ($SD = 253$ ms). Using multi-level modelling (MLM), results show that the pace of the SMT sped up over the course of the day, and that this effect depended on the participants' chronotype, since participants tending towards morning type were faster in the morning compared to participants tending towards evening type. During the day, the pace of the SMT of morning types stayed relatively constant, whereas it became faster for evening-type participants. Furthermore, higher arousal in participants led to a faster pace of the SMT. Musical sophistication did not influence the SMT. These results indicate that the circadian rhythm influences the internal tempo, since the pace of SMT is not only dependent on the time of the day, but also on the individual entrainment to the 24-h cycle (chronotype).

Introduction

The tempo of spontaneous motoric movements plays an important role in everyday life as it represents the unconsciously chosen pace for regular and repeated movements such as walking or hand clapping. In the study of spontaneous motor tempo (SMT), one of the main research questions relates to factors influencing its pace. The SMT typically clusters around 2 Hz (Collyer et al., 1994; Fraise, 1982), yet intra-individual changes in the pace of the SMT have been suggested to be based on the circadian rhythm (Hammerschmidt et al., 2021; Moussay et al., 2002). The purpose of the current study was to further investigate this effect by measuring participants' SMT four times a day over seven consecutive days in their everyday life. Furthermore, since there are different chronotypes, a potential influence of participants' individual 24-h sleep and activity cycle (i.e.,

chronotype) was also investigated. As previous studies did find differences in the pace of the SMT based on physiological arousal changes (Boltz, 1994; Dosseville et al., 2002), and musical experience (Drake et al., 2000; Hammerschmidt et al., 2021), participants' arousal level and musical sophistication were also taken into account as further predictors.

The SMT corresponds to the preferred and natural pace of periodic motor actions (i.e., cyclic movements), and therefore it is also called preferred or internal tempo (Boltz, 1994). This preference can be observed in synchronization-continuation motor tasks, for instance. When synchronizing to external events consisting of a steady pulse at rates faster or slower than the SMT, individuals eventually fall back into the pace of their internal tempo in the continuation phase (McAuley et al., 2006; Yu et al., 2003). The SMT is closely linked to the preferred tempo for the perception of rhythmic structures in music and language, for which temporal discrimination abilities are optimal, suggesting a shared mechanism for perceptual and rhythmic motor behaviors (i.e., *Preferred Period Hypothesis*; McAuley et al., 2006; McAuley & Jones, 2003; Michaelis et al., 2014). Furthermore, the pace of the SMT may reflect the rate of internal time

✉ David Hammerschmidt
david.hammerschmidt@uni-hamburg.de

¹ Institute for Systematic Musicology, University of Hamburg, Alsterterrasse 1, 20354 Hamburg, Germany

and timing mechanisms facilitating attentional synchrony (Jones & Boltz, 1989; McAuley & Jones, 2003). Hence, the SMT can be seen as an estimate of an intrinsic timekeeper (Allman et al., 2014; Boltz, 1994; Grondin, 2010; Treisman, 1963). Although there is a large variability in the pace of the SMT ranging from 190 to over 1000 ms, the optimal tempo of rhythm perception, the execution of predictive (rhythmic), and emergent (cyclic) movements such as finger tapping, stepping, or walking all have been shown to share the same resonance frequency at around 2 Hz (Collyer et al., 1994; Goodman et al., 2000; Rose et al., 2021; van Noorden & Moelants, 1999). This resonance frequency may be under the control of the central nervous system reflecting the most stable state for movement trajectories (Assaneo & Poeppel, 2018).

Changes in the SMT indicate that its pace is not fixed at a certain tempo but subject to intra-individual changes. One of the potential factors causing these changes is the circadian rhythm. This 24-h cycle of the low-level biological clock has been shown to affect multiple cognitive and physiological functions such as motor processes, reaction times, time judgments, and memory tasks (Valdez et al., 2012). Investigating the circadian fluctuation of the SMT, Moussay et al. (2002) measured SMT in cycling and finger tapping five times a day between 6 am and 10 pm showing that the pace of SMT got faster during the day (6 am to 6 pm) and slowed down during the evening (6 to 10 pm). This result suggests a direct influence of the circadian rhythm on the SMT. Further support for this stems from a large-scale online study with $N=3756$ participants investigating effects of psychological, chronobiological, and demographic factors on the SMT (Hammerschmidt et al., 2021). In this study, participants tapped at a tempo that felt most natural and comfortable in that moment on a device of their choice using a browser-based web application. Participants were grouped into six clusters which differed in terms of their SMT pace ranging from very fast ($M=265$ ms, $SD=74$) to very slow ($M=1757$ ms, $SD=166$). Results show that the slower the SMT cluster, the earlier was the mean hour of test participation, thus further supporting a direct influence of the biological clock on the SMT pace. Furthermore, a recent study found that musicians' spontaneous production rate (i.e., tempo) of musical melodies varies as a function of the time of the day, as melody production was slower in the morning (9 am) compared to later times (1 pm, 5 pm, 9 pm; Wright & Palmer, 2020). Another study on the cognitive output close to sleep phases investigated the tapping speed of smartphone usage for about three weeks (Huber & Ghosh, 2021). Although not directly comparable to predictive and emergent movements, results show that finger tapping speed on the smartphone (i.e., typing) got faster during the morning hours, remained relatively constant during the day, and slowed down during the night. These studies show that the

pace of the SMT as well as general finger movements vary during the day, and that these changes may be caused by the circadian rhythm.

An important aspect which has not been addressed in previous research on the relationship between the SMT and the circadian rhythm is the role of inter-individual differences in the internal clock and its entrainment to circadian rhythm. Individual preferences in the sleep and activity cycle are commonly referred to as chronotypes. These types differ in terms of the phase reference, meaning the midpoint between sleep onsets, which is shifted between them (Roenneberg et al., 2003). Chronotypes are often described on a spectrum between morning types or "larks" (early sleepers) and evening types or "owls" (late sleepers). The chronotype may further explain differences in the fluctuations of the SMT over the course of a day, because clock times for the fastest and slowest SMT may be shifted between morning and evening types. Support for such chronotype-induced differences stems from a study on piano playing. Although not directly investigating the pace of the SMT, the timing (variability) of evening-type pianists was reported to be more stable when playing in the evening than in the morning (van Vugt et al., 2013). Thus, timing mechanisms at different times during the day may be affected by the chronotype. Furthermore, other chronotype-dependent performance differences have been shown to exist in memory (Intons-Peterson et al., 1999; West et al., 2002), attention (Matchock & Mordkoff, 2009), and sensorimotor tasks (Tamm et al., 2009). Thus, it seems reasonable to assume an influence of the chronotype on the circadian fluctuation of the SMT.

Another important intra-individual factor which may affect the SMT is arousal. According to the *Sympathetic Hypothesis*, higher physiological arousal increases the preferred perceptual tempo (Jakubowski et al., 2015) and may in turn affect the SMT as well (Holbrook & Anand, 1990). In line with this, studies found that varying induced arousal levels from auditory stimuli affected both the SMT and duration judgments (Boltz, 1994). High arousal stimuli led to a faster SMT and shorter duration judgments compared to low arousal stimuli. On the other hand, in another study on the effects of perceived arousal in music and cognitive load, no differences in duration judgments were reported between high and low arousal music when the tempo was kept constant, and no influence of the SMT was found in contrast to significant effects of attention and cognitive load on time perception (Wöllner & Hammerschmidt, 2021). Regarding felt arousal in contrast to induced arousal, an online-study measuring SMT using a finger-tapping paradigm showed that participants who rated their arousal level as high showed a faster SMT as well (Hammerschmidt et al., 2021). Physiological changes in the body (e.g., heart rate, cortical blood flow) evoked by physical activity are closely related to the arousal level (Fisher, 2014; Nobrega et al.,

2014), yet the relationship between physiological arousal and SMT remain inconclusive. Whereas one study did find a faster SMT after a pedaling exercise (high physiological arousal) compared to before the exercise (Dosseville et al., 2002), no such faster pace was reported in a study in which participants performed either swimming, running, or wrestling tasks (Sysoeva et al., 2013). Furthermore, the effect of arousal may also be affected by the chronotype, as it has been shown that morning-type individuals have a higher skin conductance (i.e., physiological arousal) in the morning than evening types and vice versa (Wilson, 1990). Thus, further research is needed on the effect of arousal on the pace of the SMT, and potential changes based on the chronotype.

Apart from effects with regard to the biological clock (i.e., circadian rhythm, chronotype), other inter-individual factors have been shown in relation to the pace of the SMT. Perhaps the most consistently reported effect influencing the SMT is age. Multiple studies showed that the pace of the SMT slows down with higher age (Baudouin et al., 2004; Hammerschmidt et al., 2021; McAuley et al., 2006), either reflecting a slowing down of internal timing processes or a decline in cognitive and behavioral speed caused by changes in the neuromuscular system (Salthouse, 2010; Seidler et al., 2010; Surwillo, 1968). Musical experience has also been suggested to have an effect on the SMT. Children with musical training showed a slower SMT compared to children without such training in a study on the development of rhythmic attending (Drake et al., 2000). However, this difference dissolved for adults, whereas another study did find differences in the pace of SMT in adults based on musical experience (Hammerschmidt et al., 2021). In this study, participants with a slow SMT had the least musical experience. Yet, results regarding a potential influence of musical experience remained inconclusive, as more musically experienced participants generally preferred a slower SMT across all SMT clusters. Furthermore, a potential effect of musical experience lacks a detailed explanation. In contrast, for tasks involving sensorimotor coupling such as synchronization with an auditory beat or music benefit from musical training and enhance the ability to track auditory-motor events over a longer time span (Hammerschmidt & Wöllner, 2020; Repp, 2010; Scheurich et al., 2018). It can be assumed that SMT reflects the pacing of a rather low-level biological clock that should not rely on higher-level cognitive capabilities such as in sensorimotor synchronization (SMS) in young and middle-aged healthy adults. Thus, more research is needed in order to validate if musical experience slows down the pace of the SMT and reduces variability.

To sum up, previous research suggests a potential influence of the circadian rhythm on the SMT, since the pace of the SMT may fluctuate as a function of the time of the day (Hammerschmidt et al., 2021; Moussay et al., 2002). As different chronotypes show a shift in the biological clock and

its entrainment to the sleep and activity cycle (Roenneberg et al., 2003), it seems likely to assume that individual differences in the circadian fluctuation depend on the chronotype as well. In addition, higher arousal levels have been shown to cause the SMT to get faster in pace, yet studies resulted in diverging results for physiological activation, induced and perceived arousal (Boltz, 1994; Dosseville et al., 2002; Sysoeva et al., 2013; Wöllner & Hammerschmidt, 2021). Furthermore, musical experience may have an effect on the SMT (Drake et al., 2000; Hammerschmidt et al., 2021).

The current study aimed at investigating whether the SMT is systematically influenced by time of the day; a potential interaction with the chronotype, as well as the arousal level. Furthermore, participants' musical sophistication as a measure of experience was collected in order to control for potential differences in the SMT. We hypothesized that (i) the time of the day influences the pace of the SMT, (ii) the individual chronotype changes the effect of the time of the day on the pace of the SMT by shifting its phase (interaction effect), and that (iii) higher arousal leads to a faster SMT. These factors were measured in participants' everyday life and thus in an out-of-the-lab context using an experience sampling method. SMT was assessed with a finger-tapping paradigm, by letting participants tap on the touchscreen of their smartphone using a self-developed web application. Furthermore, an analysis of the same factors on tapping variability (coefficient of variation) was carried out.

Method

Participants

A total of 36 participants (21 female) took part in the study. Participants' age was between 19 and 40 years ($M = 28.64$, $SD = 5.00$). Eight participants were university students or on job training, four participants were unemployed, and the others were either full or part time working (66.7%). All participants were German residents. Their average musical sophistication was $M = 71.11$ ($SD = 23.91$, range: 26–115), which is slightly below the average of the general population ($M = 81.58$, $SD = 20.62$) as measured with the general factor of the *Musical Sophistication Index* (Gold-MSI; Müllensiefen et al., 2014). The average D-MEQ score as a measure of participants' chronotype was $M = 48.44$ ($SD = 10.52$), showing no bias towards a particular chronotype in the whole sample (see supplementary materials). Participants were recruited from a larger pool of individuals who took part in an online pre-study using the same finger-tapping paradigm ($N = 49$). Criteria for exclusion from the main study were as follows: (1) large variability in their finger tapping assuming false task execution, (2) age (> 40 years), as previous studies showed a slowing with age (e.g., McAuley et al., 2006),

and (3) being on vacation during the test period, as vacation might change the typical sleep and activity cycle compared to a typical week. All participants gave informed consent online and procedures were in accordance with the guidelines of the Ethics Committee of the Faculty of Humanities at University of Hamburg. Participants were compensated with 30€.

Design and procedure

In this study, an experience sampling method was used by prompting participants on their smartphone via text message four times a day over seven consecutive days (Monday–Sunday). This resulted in 28 repeated measures per participant. Before the start of the test period, participants were asked to fill out a questionnaire consisting of multiple inventories (see supplementary materials). Due to the general situation regarding the COVID-19 pandemic in Germany at the time of the experiment (20th–26th of July, 2020), all study procedures (declaration of participation, general introduction, example test) were carried out virtually.

Following the invitation to take part in the study, participants gave informed consent and filled out an online questionnaire using SoSci Survey. In this questionnaire, participants entered information on their age, gender, education, and current occupation. They also filled out the German version of the *Morning-Evening Questionnaire* (D-MEQ) in order to assess participants' chronotype (Griefahn et al., 2001). They also answered the questions from the general factor of the *Musical Sophistication Index* (Müllensiefen et al., 2014). In the next step, all participants took part in one of two general introduction events via a video conference tool in which they were informed about the test procedure during the week and the main finger-tapping task. This introduction took part on the Thursday and Friday before the start of the test week on the following Monday. During the weekend, they received a first text message including the link to the study in order to familiarize them with the test procedure and tasks. Starting on the Monday, participants received a text message on their smartphone prompting them to do the test as soon as possible by clicking on the attached link. These text messages were randomly sent between 8 and 9 am, 12 and 1 pm, 4 and 5 pm, as well as 8 and 9 pm to all participants, in order to prevent them from always responding at exactly the same time and anticipating the task.

In each test, participants' SMT was measured first by asking them to tap evenly for 25 s with their index finger of their preferred hand on the touchscreen of the smartphone at a pace that felt most comfortable and natural to them in that moment. If the tapping was too irregular (coefficient of variation of inter-tap intervals > 30%) or not enough taps were recorded (< 8 taps), they were asked to repeat the task. After

the tapping task, participants answered questions about their current activity, location, and company (see supplementary materials). They filled out the 7-item *Physiological Arousal Questionnaire* (PAQ) using a 7-point scale instead of the original 9-point scale (Dieleman et al., 2010). This adjustment was needed in order to fit the graphical representation of the rating scale on smartphone displays. On average, participants needed 1.07 trials ($SD = 0.33$) to reach criteria for a successful tapping task execution. The browser-based web application used for the recording of the finger taps and the other responses was the same as in Hammerschmidt et al. (2021), apart from changes regarding additional questions to account for the different scope of this study. The script for the application is publicly available and can be accessed on Github (<https://github.com/g-mac/slomo>).

Data processing

Participants' SMT was assessed by taking the mean of the inter-tap intervals (ITI) for each test in milliseconds. Before statistical testing, single cases were excluded when a test was incomplete or missed by a participant ($N = 62$). Next, separate outlier detections for each participant on their ITIs were performed using 1.5 interquartile range, resulting in $N = 17$ further cases being excluded. From the 1008 tests (36×28), 6.2% were missing or excluded, resulting in an average response rate of 93.8% per participant. Out of the 28 tests per participant, the minimum number of tests was 24 (85.7%). The scores for participants' chronotype (D-MEQ score), arousal (PAQ score), and general musical sophistication (general factor Gold-MSI score) were calculated according to the respective specifications. The actual times of test execution were converted to the relative times from the first text prompt from each day by subtracting the time of the first text message (between 8 and 9 am) from the times of the four tests per day. These time differences were then converted to decimals thus, a test at 10:30 pm and 1:30 h after a first prompt equals 1.5. This conversion allows for the assessment of the actual time of participants' responses instead of grouping them, controlling for differences in response times and allowing for the treatment of the time of the day as a continuous variable (cf., Smith et al., 2019). This procedure resulted in the exclusion of one more case since the corresponding test was done before the first prompt of the day (indicated by a negative time of the day value). In a last step, fixed variables were centered before performing multi-level modelling: the within-participants (level-1) variable PAQ score (assessed with each test) was centered-within-clusters (cwc approach) and between-participant variables D-MEQ and Gold-MSI (level-2, assessed before the test period) were grand-mean-centered (gmc approach) since 0 is not a meaningful score in these inventories. Thus, the SMT intercept of

the reported multi-level model represents the average SMT between 8 and 9 pm when arousal score (PAQ) equals the participant's average arousal across the week as well as the mean chronotype score (D-MEQ) and musical sophistication score (Gold-MSI) across all participants (Curran & Bauer, 2011; Nezlek, 2012). In the end, analysis was based on $N=946$ test cases. Data processing, model building, and statistical testing were done in R (R Core Team, 2020).

Model building

In order to assess the effects of time of the day, arousal (PAQ cwc-score), chronotype (D-MEQ gmc-score), and musical sophistication (Gold-MSI gmc-score) on the pace of the SMT, a multi-level model was applied regarding the mean ITI as a dependent variable using the *lme4* package in R. This statistical test was chosen to account for the hierarchical structure of experience sampling data (i.e., each participant provided up to 28 responses). In order to test our hypotheses and to find other potential interaction effects, a model building process was applied which resulted in four different models differing in the number of parameters (see Table 1). This approach allowed for an informed data-driven choice regarding which interactions to include in the final model and offers a broader model performance context. In a first step, it was checked if the pace of the SMT differed between days, which was not the case, $\beta = -2.20$, $t(910.21) = 0.86$, $p = 0.39$, and, therefore, the days were not included in the models. Next, an unconditional model with participants as random factor was performed as a baseline model and the intraclass correlation coefficient (ICC) was calculated. Then, the level-1 variables time of the day and arousal were added as random effects. The random effects covariance matrices resulted in singular fits (i.e., random variance close to 0) and were, therefore, not further included as random factors in the model building process. In the next step, a model with all variables (level-1: time of the day, arousal; level-2: chronotype, musical sophistication) as fixed factors was calculated.

In order to check for potential interaction effects between the variables, all possible interactions were included in the model. In order to avoid overfitting of the model, only two-way interactions were considered. All non-significant interactions ($p > 0.05$) were then removed again from the model, as it significantly improved model prediction and in order to achieve a more parsimonious model. In a last step, it was checked if the time of the day variable should be included as a polynomial term as well, which was not the case as this time factor was not significant, $\beta = 0.47$, $t(910.43) = 1.51$, $p = 0.13$ (see Fig. 1), and this did also not significantly improve model performance ($p = 0.16$; see Fig. 1). Therefore, time of the day was treated as a linear variable.

Table 1 shows the performance measures and sequential comparisons (significance tests) of the four models sorted by the number of parameters. The best performing model of that list was then chosen for reports of parameter predictions and to validate hypotheses. If an interaction was non-significant ($p > 0.05$), it was not included in the model. The final model resulted in the following equations:

Level-1:

$$y(\text{SMT})_{ij} = \beta_{0j} + \beta_{1j}(\text{Time of the day})_{ij} + \beta_{2j}(\text{Arousal})_{ij} + r_{ij} \quad (1)$$

Level-2:

$$\beta_{0j} = \gamma_{00} + \gamma_{01}(\text{Chronotype})_j + \gamma_{02}(\text{Musical sophistication})_j + u_{0j} \quad (2)$$

$$\beta_{1j} = \gamma_{10} + \gamma_{11}(\text{Chronotype})_j \quad (3)$$

With the variance estimates r (level-1) and u (level-2). The same data post processing and model building steps were applied on the coefficient of variation of the ITIs, in order to check if the tapping variability was also influenced by the same factors. As the analysis of tapping variability was not the main aim of this study, results will only be mentioned briefly. The full documentation and results can be found in the supplementary materials.

Table 1 Performance measures for the multi-level model building

Models	Number of parameters	AIC	BIC	Log Likelihood	Deviance	p
Unconditional	3	12,379	12,393	- 6186	12,373	
Fixed factors	7	12,368	12,402	- 6177	12,354	0.001
Fixed factors + sig. interactions*	8	12,366	12,405	- 6175	12,350	0.044
Fixed factors + all interactions	13	12,373	12,436	- 6174	12,347	0.716

Model comparisons (p -values) were done sequentially to the one below. The asterisk indicates the best performing and final model

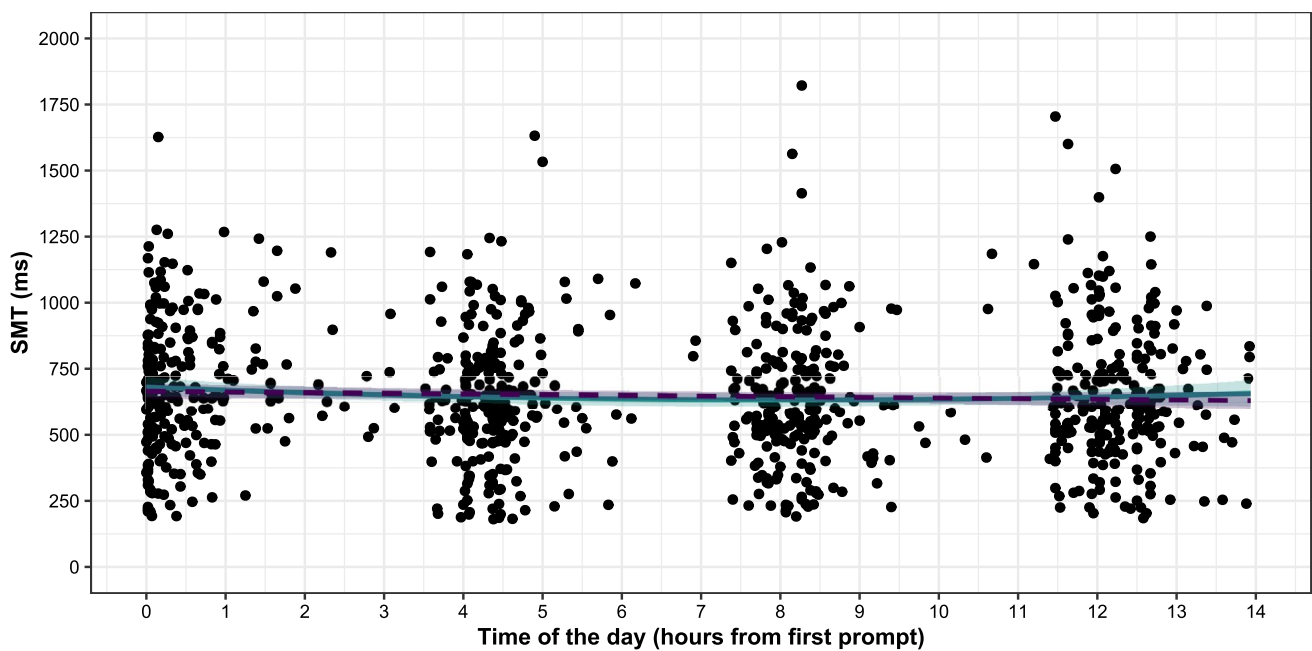


Fig. 1 Participants' SMT in milliseconds plotted against the time of participation after the first prompt between 8 and 9 am (value 0) for all seven days. The lines represent regression lines (dashed purple=linear, solid green=polynomial)

Table 2 Results of the multi-level analysis for the SMT

	Fixed					Random	
	Coeff	β [CI]	SE	T	P	Coeff	SD
Intercept	γ_{00}	668.80 [599.71, 737.92]	34.40	19.44	> 0.001	u_{0j}	199.36
Level-1							
Time of the day	γ_{10}	- 2.89 [- 5.66, - 0.64]	1.14	- 2.53	0.012		
Arousal	γ_{20}	- 3.65 [- 5.66, - 1.64]	1.03	- 3.56	> 0.001		
Level-2							
Chronotype	γ_{01}	- 0.97 [- 7.74, 5.80]	3.37	- 0.29	0.774		
Musical sophistication	γ_{02}	0.43 [- 2.49, 3.35]	1.45	0.30	0.770		
Cross-level							
Time of the day * Chronotype	γ_{11}	0.22 [0.01, 0.44]	0.11	2.01	0.044		

$R^2_{\text{conditional}} = 63\%$, $R^2_{\text{marginal}} = 1\%$

Results

Mean SMT pace and variability

Across all participants and tests, the mean SMT was 650 ms ($SD = 253$ ms), ranging from 181 and 1822 ms. Figure 1 shows the distribution of the SMT for all responses and each time of the day relative to the first prompt aggregated over seven consecutive days. The overall mean tapping variability measured with the coefficient of variation was 9.25% ($SD = 5.46$).

Multi-level analysis

In order to investigate the relationship between time of the day, chronotype (D-MEQ gmc-score), arousal (PAQ cwc-score), and musical sophistication (Gold-MSI gmc-score), a combined multi-level model was employed (Table 2). The ICC from the baseline model was 0.63, suggesting that 63% of variance stems from between participants and 37% from within participants. The final model resulted in a main effect of time of the day and shows that with each hour from the first prompt the SMT became on average 2.89 ms faster (Fig. 2A, green line). Thus, the SMT was slowest in the morning hours and became faster during the day. The

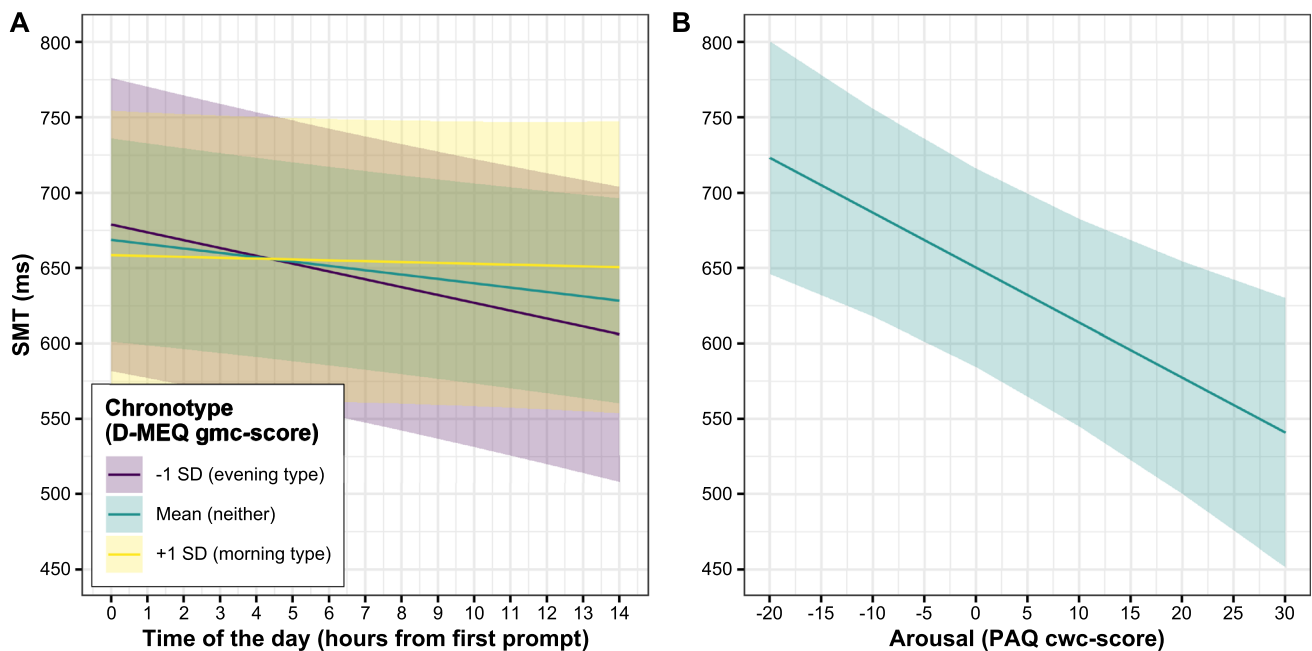


Fig. 2 Main effects of time of the day (**A**), the interaction effect with chronotype (D-MEQ gmc-score; **A**), and arousal (PAQ cwc-score; **B**). The shaded areas represent 95% confidence intervals

interaction between time of the day and chronotype was also significant, suggesting that the pace acceleration of the SMT during the day depended on the chronotype. As Fig. 2A shows, the SMT of participants tending towards the morning type (+1 *SD* of D-MEQ gmc-score) stayed relatively constant and only slightly sped-up throughout the day (yellow line), whereas the SMT of participants tending towards the evening type (-1 *SD* of D-MEQ gmc-score) became faster (purple line). The main effect of chronotype was not significant, suggesting no general difference between chronotypes in the SMT. Arousal did result in a significant main effect, suggesting that with each point on the PAQ score the SMT became 3.65 ms faster. Thus, the more aroused the participants were, the faster was their SMT. Participants' musical sophistication did not show a significant main effect on the SMT, suggesting no influence of participants' musical experience on the SMT. As described in the model building process, all non-significant interactions were removed from the model; thus, none of the fixed factors further interacted with each other.

Regarding the variability of the SMT, the final model resulted in no significant main effects of the fixed factors and no interaction (all $p > 0.05$). The best performing model was the unconditional one including a random slope for arousal. Furthermore, fixed factors did not significantly improve the model prediction, suggesting that the tapping variability of the SMT was not influenced by the time of the day, chronotype, arousal, and musical sophistication (see supplementary materials).

Discussion

This study investigated the influence of time of the day, chronotype, and arousal on the pace of the spontaneous motor tempo (SMT). Using an experience sampling method with a finger-tapping paradigm, participants' SMT was measured four times a day over seven consecutive days in their everyday life, by letting them tap at their most comfortable pace on the touchscreen of their smartphones. Furthermore, participants' musical sophistication was assessed in order to control for potential differences. Results of a multi-level model suggest an influence of the time of the day such that the pace of the SMT became faster during the day. This effect interacted with the chronotype score, as participants tending towards a morning type ("larks") were relatively faster in the morning and their SMT remained relatively constant during the day compared to more evening-type participants ("owls"), who were slower in the morning. Arousal affected the pace of the SMT as well. The more aroused participants were, the faster was the SMT. This effect did not interact with the other factors. These findings are in line with the chronobiological effects on the SMT and related tasks reported in previous studies (Hammerschmidt et al., 2021; Moussay et al., 2002; Tamm et al., 2009; Wright & Palmer, 2020), providing further support that the SMT may directly be influenced by the circadian rhythm of the biological clock, because fluctuations of the SMT over the day depend systematically on the combination of time of the day and participants' 24-h sleep and activity cycle (i.e., chronotype).

The first hypothesis stated that the time of the day influences the pace of the SMT, which was confirmed by the results of the multi-level model. The SMT became on average 2.89 ms faster for every hour after the first prompt of the day, which was between 8 and 9 am, suggesting a pace acceleration during the day. Although potential confounding influences of factors affecting the time of the day effect such as sleep patterns as well as medication, drug, and caffeine consumption during the week cannot be ruled out entirely, these results confirm previous studies which also found a speeding-up of the SMT during the day (Hammerschmidt et al., 2021; Moussay et al., 2002). Moussay et al. (2002) also reported a slowing of the SMT between 6 and 10 pm, which had been expected due to the cyclic nature of the biological clock. Although a slight slowing in the pace of the SMT was observable in the current study, this slowing in the evening hours might have been less distinct compared to Moussay et al. due to the time period of data collection. Since the day length (number of sun hours) varies as a function of different seasons, data of these two studies might have been collected at different periods in the year. Data collection for this study was done in the summer with an average day length of about 16 h during the test week. These long sun hours might have mitigated the slowing of the SMT in the evening since it can affect sleep patterns. Another reason which might have caused this difference is the distribution of chronotypes. In this study, chronotypes were normally distributed (see supplementary materials), showing no skewness towards a particular chronotype, which might have been different in the sample by Moussay and colleagues and in turn affecting their results. Furthermore, a recent study on sleep patterns during the COVID-19 lockdown found a shift to later bedtimes and waking times (Gupta et al., 2020). Since the data collection for this study was carried out after the lockdown, this effect might have carried over to the post-lockdown period, resulting only in the small slowing of the SMT in the evening hours.

The second hypothesis was closely related to the first one and stated that the changes of the SMT during the day are also influenced by the chronotype, because previous research on chronotype-dependent performance provided evidence that different entrainments to the 24-h cycle, meaning the midpoint between sleep onsets, do indeed affect timing, sensorimotor, and cognitive capabilities (Tamm et al., 2009; van Vugt et al., 2013; Wright & Palmer, 2020). Thus, an interaction effect was expected between time of the day and chronotype. Results confirmed this hypothesis, since the D-MEQ score as a measure of chronotype showed a significant interaction with time of the day. Participants with a high D-MEQ score (morning type) showed a faster SMT in the morning hours compared to participants with a mid-range chronotype score (neither type) and participants with a low score (evening type). High D-MEQ score participants'

SMT became only slightly faster during the day, whereas participants' SMT with a low score showed a much faster pace which indicates a shift in the phase reference. Thus, this study is the first to show that the inter-individual differences in the changes of the SMT during the day can partly be explained by the chronotype. Consequently, the SMT should be added to the list of sensorimotor chronotype-dependent performance tasks.

The significant interaction between time of the day and chronotype supports the assumption of a direct relationship between the pace of the SMT and the circadian rhythm and thus the biological clock. Furthermore, these results confirm previous studies reporting the same effect using different samples, paradigms (finger tapping, cycling), methods (lab-based and online), and test times (Hammerschmidt et al., 2021; Moussay et al., 2002). This shows a consistent influence of the time of the day on the pace of the SMT. Thus, results of this study suggest that the spontaneous and preferred rate of periodic motor actions is indeed influenced by the circadian rhythm of the biological clock.

The third hypothesis stated that higher arousal leads to a faster SMT pace. This was confirmed by a main effect of arousal. The results show that a higher PAQ score (Dieleman et al., 2010) resulted in a faster SMT with a 3.65-ms increase with each PAQ score point. This is in line with previous studies suggesting the same effect for induced arousal using auditory stimuli (Boltz, 1994; Perilli, 1995) and self-rated felt arousal (Hammerschmidt et al., 2021). It supports the finding of a faster SMT after physical exercise (i.e., increased physiological arousal) compared to before (Dosseville et al., 2002), and a faster preferred perceptual tempo (Jakubowski et al., 2015), in contrast to a study which found no such differences (Sysoeva et al., 2013). Since the PAQ measures self-perceived physiological states (e.g., sweatiness, moisture of the mouth), it can be assumed that physiological changes in the body (e.g., heart rate, cortical blood flow) speed up the SMT. It further supports the *Sympathetic Hypothesis*, stating that higher physiological arousal increases the preferred perceived tempo and thus the SMT as well (Holbrook & Anand, 1990).

Musical sophistication, measured with the general factor of *Musical Sophistication Index* (Müllensiefen et al., 2014), did not show an effect on the pace of the SMT. Previous studies reported differences in the SMT based on musical experience. One study reported a slower SMT for children with musical training compared to children with no musical training, yet this effect could not be found in adults (Drake et al., 2000). Results of an online study did find that musically more experienced participants regarding playing a musical instrument preferred a slower SMT. Yet, when grouped into six different SMT clusters ranging from a very fast to very slow pace, the same study found the opposite

effect, as a slow cluster showed the least musical experience (Hammerschmidt et al., 2021). In the current study, a more complex measure for musical sophistication was used showing no effect on the SMT. On the one hand, these seemingly contrasting results may partly be caused by the different measures used in the studies. The general factor of the Gold-MSI is mostly associated with the sub-scales Musical Training and Singing Ability which are closely related to the measures used in other studies. Thus, it cannot be ruled out that other ways which are characterized as musical and are not represented in these measures such as timing skills affect the SMT (Baker et al., 2020). On the other hand, it seems more likely that musical experience does not affect the SMT given the lack of explanation for how enhanced cognitive abilities from musical training should transfer to the relatively simple motor task of tapping to the SMT. In line with this, a study did find differences based on musical experience in the spontaneous production rate (SPR) when tapping the rhythms of melodies (Scheurich et al., 2018), whereas no such difference in the SPR could be found in another recent study when participants tapped isochronously rather than rhythmically (Scheurich et al., 2020). This also suggests that the influence of musical training depends on the complexity of the tapping task. For example, SMT is different from sensorimotor synchronization (SMS) for which clear effects of musical training occur, especially in more complex SMS tasks (e.g., Hammerschmidt & Wöllner, 2020; Repp, 2010). SMS involves prediction, error correction, and adaptive timing (van der Steen & Keller, 2013), processes which do not directly affect the rather lower-level SMT task. Furthermore, this is supported since the variability of participants' tapping was not influenced by any of the factors. Because the coefficient of variation was used for the analysis, thus controlling for different paces of the SMT, it can be assumed that only the pace of the SMT affects its variability. Tapping variability typically increases with slower tempos in sensorimotor synchronization tasks (Repp, 2005; Repp & Doggett, 2007). In contrast, SMT is unique in that musical sophistication did not influence the variability at the most comfortable tapping rate, which is usually the case in sensorimotor synchronization tasks.

The combination of an experience sampling method and the self-developed web application has proven to be a valuable tool for the assessment of the SMT in everyday-life contexts and offers further solutions for the usage of finger-tapping paradigms in out-of-the-lab scenarios. On the other hand, limitations of experience sampling method and online studies lie undoubtedly in the observability and control for task comprehension and execution. In this study, these circumstances were accounted for by a detailed introduction event. Furthermore, the different technical devices might have had an influence on response collection, yet this

influence should be of little concern as internally varying latencies in one and the same device were not of interest, because synchronization accuracy was not measured, for which latencies would need to be controlled. In line with this, a previous study using the same tapping application did not find differences between different hard- and software types on the pace of the SMT using a large sample (Hammerschmidt et al., 2021). However, future studies may use the same device in order to reach more control of the response collection process, particularly if synchronization is also analyzed. Future studies could also collect data on sleep patterns and disorders, as well as medication, drug and caffeine usage, in order to reach further control of potential factors affecting the circadian rhythm.

To conclude, this study investigated chronobiological effects on the spontaneous motor tempo (SMT) in participants' everyday life with an experience sampling method. Results show that the SMT varied according to the time of the day. Furthermore, this study is the first to show that these changes in the SMT depend on someone's chronotype, as a gradual phase shift in the chronotype score between "larks" (morning types) and "owls" (evening types) was observed. Thus, these results indicate an influence of the circadian rhythm on the SMT, which in turn suggests that the SMT is an estimate of the biological clock. Furthermore, self-assessed physiological arousal in the body caused the SMT to speed-up, an effect which was independent from the time of the day and chronotype in this study. Given the assumption of a shared mechanism for perceptual and rhythmic motor behaviors (Kliger Amrani & Zion Golumbic, 2020; McAuley et al., 2006), these results suggest that tempo preferences and temporal acuity when performing music may also be influenced by the biological clock (cf., Wright & Palmer, 2020); thus, there might be an ideal time to practice a certain piece of music based on its tempo. Regarding auditory perception, tempo preference when listening to music may change as a function of the time of day, and thus it should be a useful criterion for background music choice in public, in order to align the musical tempo with listeners' biological clock.

Beyond a musical context, the SMT generally indicates the "sweet spot" of temporal predictability necessary for the processing of upcoming auditory stimuli such as language, since temporal acuity is related to attention and working memory (Ding et al., 2017; Jones & Boltz, 1989; Kliger Amrani & Zion Golumbic, 2020). Thus, the optimal timing regarding the temporal aspects of these cognitive processes may change as a function of someone's biological clock, an assumption which needs further testing. Therefore, the outcomes of this study are informative for the psychology of time, chronobiology, as well as for music and language perception and production.

Supplementary Information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.1007/s00426-022-01646-2>.

Acknowledgements We would like to thank Simon Mayrshofer (University of Hamburg) for the development of the web application and server maintenance.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL. This research was funded by the European Research Council (Consolidator Grant, no. 725319, to the second author) for the project “Slow motion: Transformation of musical time in perception and performance” (SloMo).

Availability of data and material The data supporting the conclusions of this article are openly available in Zenodo repository at <https://doi.org/10.5281/zenodo.5947002>.

Declarations

Conflict of interest The authors have no conflicts of interest to declare that are relevant to the content of this article.

Ethical approval The procedures were in accordance with the guidelines of the Ethics Committee of the Faculty of Humanities at University of Hamburg.

Consent to participate All participants gave informed consent in accordance with the Declaration of Helsinki.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

References

- Allman, M. J., Teki, S., Griffiths, T. D., & Meck, W. H. (2014). Properties of the internal clock: First- and second-order principles of subjective time. *Annual Review of Psychology*, *65*, 743–771. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010213-115117>
- Assaneo, M. F., & Poeppel, D. (2018). The coupling between auditory and motor cortices is rate-restricted: Evidence for an intrinsic speech-motor rhythm. *Science Advances*, *4*(2), eaao842. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao3842>
- Baker, D. J., Ventura, J., Calamia, M., Shanahan, D., & Elliott, E. M. (2020). Examining musical sophistication: A replication and theoretical commentary on the Goldsmiths Musical Sophistication Index. *Musicae Scientiae*, *24*(4), 411–429. <https://doi.org/10.1177/1029864918811879>
- Baudouin, A., Vanneste, S., & Isingrini, M. (2004). Age-related cognitive slowing: The role of spontaneous tempo and processing speed. *Experimental Aging Research*, *30*(3), 225–239. <https://doi.org/10.1080/03610730490447831>
- Boltz, M. G. (1994). Changes in internal tempo and effects on the learning and remembering of event durations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *20*(5), 1154–1171. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.20.5.1154>
- Collyer, C. E., Broadbent, H. A., & Church, R. M. (1994). Preferred rates of repetitive tapping and categorical time production. *Perception and Psychophysics*, *55*(4), 443–453. <https://doi.org/10.3758/bf03205301>
- Curran, P. J., & Bauer, D. J. (2011). The disaggregation of within-person and between-person effects in longitudinal models of change. *Annual Review of Psychology*, *62*, 583–619. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych.093008.100356>
- Dieleman, G. C., van der Ende, J., Verhulst, F. C., & Huizink, A. C. (2010). Perceived and physiological arousal during a stress task: Can they differentiate between anxiety and depression? *Psychoneuroendocrinology*, *35*(8), 1223–1234. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2010.02.012>
- Ding, N., Patel, A. D., Chen, L., Butler, H., Luo, C., & Poeppel, D. (2017). Temporal modulations in speech and music. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *81*(Pt B), 181–187. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.02.011>
- Dosseville, F., Moussay, S., Larue, J., Gauthier, A., & Davenne, D. (2002). Physical exercise and time of day: Influences on spontaneous motor tempo. *Perceptual and Motor Skills*, *95*(3 Pt 1), 965–972. <https://doi.org/10.1177/003151250209500301>
- Drake, C., Jones, M. R., & Baruch, C. (2000). The development of rhythmic attending in auditory sequences: Attunement, referent period, focal attending. *Cognition*, *77*(3), 251–288. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(00\)00106-2](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(00)00106-2)
- Fisher, J. P. (2014). Autonomic control of the heart during exercise in humans: Role of skeletal muscle afferents. *Experimental Physiology*, *99*(2), 300–305. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2013.074377>
- Fraisse, P. (1982). Rhythm and tempo. In D. Deutsch (Ed.), *Academic Press series in cognition and perception. The psychology of music* (pp. 149–180). Academic Press.
- Goodman, L., Riley, M. A., Mitra, S., & Turvey, M. T. (2000). Advantages of rhythmic movements at resonance: Minimal active degrees of freedom, minimal noise, and maximal predictability. *Journal of Motor Behavior*, *32*(1), 3–8. <https://doi.org/10.1080/00222890009601354>
- Griefahn, B., Kunemund, C., Brode, P., & Mehnert, P. (2001). Zur Validität der deutschen Übersetzung des Morningness-Eveningness-Questionnaires von Horne und Ostberg [The Validity of a German Version of the Morningness-Eveningness-Questionnaire Developed by Horne and Ostberg]. *Somnologie*, *5*(2), 71–80. <https://doi.org/10.1046/j.1439-054X.2001.01149.x>
- Grondin, S. (2010). Timing and time perception: A review of recent behavioral and neuroscience findings and theoretical directions. *Attention, Perception & Psychophysics*, *72*(3), 561–582. <https://doi.org/10.3758/APP.72.3.561>
- Gupta, R., Grover, S., Basu, A., Krishnan, V., Tripathi, A., Subramanyam, A., Nischal, A., Hussain, A., Mehra, A., Ambekar, A., Saha, G., Mishra, K. K., Bathla, M., Jagiwal, M., Manjunatha, N., Nebhinani, N., Gaur, N., Kumar, N., Dalal, P. K., & Avasthi, A. (2020). Changes in sleep pattern and sleep quality during COVID-19 lockdown. *Indian Journal of Psychiatry*, *62*(4), 370–378. https://doi.org/10.4103/psychiatry.IndianJPsychiatry_523_20
- Hammerschmidt, D., & Wöllner, C. (2020). Sensorimotor synchronization with higher metrical levels in music shortens perceived time. *Musik Perception*, *37*(4), 263–277. <https://doi.org/10.1525/mp.2020.37.4.263>

- Hammerschmidt, D., Frieler, K., & Wöllner, C. (2021). Spontaneous motor tempo: Investigating psychological, chronobiological, and demographic factors in a large-scale online tapping experiment. *Frontiers in Psychology, 12*, 677201. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.677201>
- Holbrook, M. B., & Anand, P. (1990). Effects of tempo and situational arousal on the listener's perceptual and affective responses to music. *Psychology of Music, 18*(2), 150–162. <https://doi.org/10.1177/0305735690182004>
- Huber, R., & Ghosh, A. (2021). Large cognitive fluctuations surrounding sleep in daily living. *IScience, 24*(3), 102159. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102159>
- Intons-Peterson, M. J., Rocchi, P., West, T., McLellan, K., & Hackney, A. (1999). Age, testing at preferred or nonpreferred times (testing optimality), and false memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 25*(1), 23–40. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.25.1.23>
- Jakubowski, K., Halpern, A. R., Grierson, M., & Stewart, L. (2015). The effect of exercise-induced arousal on chosen tempi for familiar melodies. *Psychonomic Bulletin & Review, 22*(2), 559–565. <https://doi.org/10.3758/s13423-014-0687-1>
- Jones, M. R., & Boltz, M. G. (1989). Dynamic attending and responses to time. *Psychological Review, 96*(3), 459–491. <https://doi.org/10.1037/0033-295x.96.3.459>
- Kliger Amrani, A., & Zion Golumbic, E. (2020). Spontaneous and stimulus-driven rhythmic behaviors in ADHD adults and controls. *Neuropsychologia, 146*, 107544. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2020.107544>
- Matchock, R. L., & Mordkoff, J. T. (2009). Chronotype and time-of-day influences on the alerting, orienting, and executive components of attention. *Experimental Brain Research, 192*(2), 189–198. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1567-6>
- McAuley, J. D., & Jones, M. R. (2003). Modeling effects of rhythmic context on perceived duration: A comparison of interval and entrainment approaches to short-interval timing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 29*(6), 1102–1125. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.29.6.1102>
- McAuley, J. D., Jones, M. R., Holub, S., Johnston, H. M., & Miller, N. S. (2006). The time of our lives: Life span development of timing and event tracking. *Journal of Experimental Psychology: General, 135*(3), 348–367. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.135.3.348>
- Michaelis, K., Wiener, M., & Thompson, J. C. (2014). Passive listening to preferred motor tempo modulates corticospinal excitability. *Frontiers in Human Neuroscience, 8*, 252. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00252>
- Moussay, S., Dosseville, F., Gauthier, A., Larue, J., Sesboüe, B., & Davenne, D. (2002). Circadian rhythms during cycling exercise and finger-tapping task. *Chronobiology International, 19*(6), 1137–1149. <https://doi.org/10.1081/cbi-120015966>
- Müllensiefen, D., Gingras, B., Musil, J., & Stewart, L. (2014). The musicality of non-musicians: An index for assessing musical sophistication in the general population. *PLoS ONE, 9*(2), e89642. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089642>
- Nezlek, J. B. (2012). Multilevel modeling analyses of diary-style data. In M. R. Mehl & T. S. Conner (Eds.), *Handbook of research methods for studying daily life* (pp. 357–383). Guilford Press.
- Nobrega, A. C. L., O'Leary, D., Silva, B. M., Marongiu, E., Piepoli, M. F., & Crisafulli, A. (2014). Neural regulation of cardiovascular response to exercise: Role of central command and peripheral afferents. *BioMed Research International, 2014*, 478965. <https://doi.org/10.1155/2014/478965>
- Perilli, G. G. (1995). Subjective tempo in adults with and without psychiatric disorders. *Music Therapy Perspectives, 13*(2), 104–109. <https://doi.org/10.1093/mtp/13.2.104>
- R Core Team. (2020). R (Version 4.0.2) [Computer software]. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Repp, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization: A review of the tapping literature. *Psychonomic Bulletin & Review, 12*(6), 969–992. <https://doi.org/10.3758/bf03206433>
- Repp, B. H. (2010). Sensorimotor synchronization and perception of timing: Effects of music training and task experience. *Human Movement Science, 29*(2), 200–213. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2009.08.002>
- Repp, B. H., & Doggett, R. (2007). Tapping to a very slow beat: A comparison of musicians and nonmusicians. *Music Perception, 24*(4), 367–376. <https://doi.org/10.1525/mp.2007.24.4.367>
- Roenneberg, T., Wirz-Justice, A., & Mellow, M. (2003). Life between clocks: Daily temporal patterns of human chronotypes. *Journal of Biological Rhythms, 18*(1), 80–90. <https://doi.org/10.1177/0748730402239679>
- Rose, D., Ott, L., Guérin, S. M. R., Annett, L. E., Lovatt, P., & Delvoeye-Turrell, Y. (2021). A general procedure to measure the pacing of body movements timed to music and metronome in younger and older adults. *Scientific Reports, 11*(1), 3264. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82283-4>
- Salthouse, T. A. (2010). Selective review of cognitive aging. *Journal of the International Neuropsychological Society, 16*(5), 754–760. <https://doi.org/10.1017/S1556617710000706>
- Scheurich, R., Pfordresher, P. Q., & Palmer, C. (2020). Musical training enhances temporal adaptation of auditory-motor synchronization. *Experimental Brain Research, 238*(1), 81–92. <https://doi.org/10.1007/s00221-019-05692-y>
- Scheurich, R., Zamm, A., & Palmer, C. (2018). Tapping into rate flexibility: Musical training facilitates synchronization around spontaneous production rates. *Frontiers in Psychology, 9*, 458. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00458>
- Seidler, R. D., Bernard, J. A., Burutolu, T. B., Fling, B. W., Gordon, M. T., Gwin, J. T., Kwak, Y., & Lipps, D. B. (2010). Motor control and aging: Links to age-related brain structural, functional, and biochemical effects. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 34*(5), 721–733. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.10.005>
- Smith, J. M., Whisenhunt, B. L., Buchanan, E. M., & Hudson, D. L. (2019). Evaluating the effectiveness of ecological momentary assessment and intervention targeting body checking behaviors. *Eating Disorders, 27*(6), 521–537. <https://doi.org/10.1080/10640266.2018.1560850>
- Surwillo, W. W. (1968). Timing of behavior in senescence and the role of the central nervous system. In G. A. Talland (Ed.), *Human aging and behavior: Recent advances in research and theory* (pp. 1–35). Academic Press.
- Sysoeva, O. V., Wittmann, M., Mierau, A., Polikanova, I., Strüder, H. K., & Tonevitsky, A. (2013). Physical exercise speeds up motor timing. *Frontiers in Psychology, 4*, 612. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00612>
- Tamm, A. S., Lagerquist, O., Ley, A. L., & Collins, D. F. (2009). Chronotype influences diurnal variations in the excitability of the human motor cortex and the ability to generate torque during a maximum voluntary contraction. *Journal of Biological Rhythms, 24*(3), 211–224. <https://doi.org/10.1177/0748730409334135>
- Treisman, M. (1963). Temporal discrimination and the indifference interval: Implications for a model of the “internal clock.” *Psychological Monographs, 77*(13), 1–31. <https://doi.org/10.1037/h0093864>
- Valdez, P., Ramírez, & García, A. (2012). Circadian rhythms in cognitive performance: Implications for neuropsychological assessment. *ChronoPhysiology and Therapy. https://doi.org/10.2147/CPT.S32586*
- van der Steen, M., & Keller, P. E. (2013). The ADaptation and Anticipation Model (ADAM) of sensorimotor synchronization. *Frontiers*

- in *Human Neuroscience*, 7, 253. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00253>
- van Noorden, L., & Moelants, D. (1999). Resonance in the perception of musical pulse. *Journal of New Music Research*, 28(1), 43–66. <https://doi.org/10.1076/jnmr.28.1.43.3122>
- van Vugt, F. T., Treutler, K., Altenmüller, E., & Jabusch, H.-C. (2013). The influence of chronotype on making music: Circadian fluctuations in pianists' fine motor skills. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 347. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00347>
- West, R., Murphy, K. J., Armilio, M. L., Craik, F. I. M., & Stuss, D. T. (2002). Effects of time of day on age differences in working memory. *The Journals of Gerontology: Series B*, 57(1), P3–P10. <https://doi.org/10.1093/geronb/57.1.p3>
- Wilson, G. D. (1990). Personality, time of day and arousal. *Personality and Individual Differences*, 11(2), 153–168. [https://doi.org/10.1016/0191-8869\(90\)90008-F](https://doi.org/10.1016/0191-8869(90)90008-F)
- Wöllner, C., & Hammerschmidt, D. (2021). Tapping to hip-hop: Effects of cognitive load, arousal, and musical meter on time experiences. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 83(4), 1552–1561. <https://doi.org/10.3758/s13414-020-02227-4>
- Wright, S. E., & Palmer, C. (2020). Physiological and behavioral factors in musicians' performance tempo. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14, 311. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00311>
- Yu, H., Russell, D. M., & Sternad, D. (2003). Task-effector asymmetries in a rhythmic continuation task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(3), 616–630. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.29.3.616>

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Anhang

Abbildung I

The Inner Timing Study



Your task is now to tap steadily for 15 seconds.

Try to keep the time between each tap as even as possible. Choose a pace that feels most comfortable and natural to you right now.

When using a touchscreen display, please use your finger to tap in the circle that will appear below. If you use a computer, you can use any key on your keyboard or use the mouse to click into the circle. Please click "Start" when you are ready. The experiment timer will then start running with your first tap.

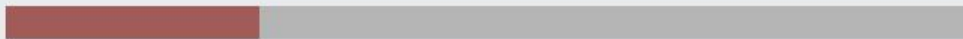


Abbildung I. Grafische Benutzeroberfläche der Webapplikation (Beispiel aus Studie 3).

Kurzfassung der Ergebnisse (deutsch)

Das vorliegende Dissertationsprojekt untersuchte die auditive Zeitwahrnehmung hinsichtlich der (wahrgenommenen) Tempoeigenschaften von Musik und des spontanen motorischen Tempos (SMT). Die theoretische Grundlage der Untersuchungen bilden die Modelle der *inneren Uhr*, die von einem intrinsischen Zeitgeber ausgehen, der Impulse in einem linearen oder dynamisch-oszillatorischen System aussendet. Das SMT gilt als Indikator für die Impulsrate dieses Zeitgebers. Diese Dissertation hatte zum Ziel, folgende übergeordneten Fragestellungen zu beantworten: (1) Inwieweit beeinflusst das Tempo von Musik die Beurteilung von Zeitdauern und ist diese Beeinflussung abhängig von der metrischen Ebene, auf der der musikalische *Beat* wahrgenommen wird? (2) Welche Faktoren beeinflussen das SMT unabhängig von externen Reizen wie beispielsweise Musik? (3) Welche Rolle spielt die musikalische Erfahrung bei der auditiven Zeitwahrnehmung von Musik und gibt es basierend auf diesem Faktor systematische Unterschiede in der Impulsrate der *inneren Uhr*? Zur Beantwortung dieser Fragen sind vier empirische Studien durchgeführt worden, wobei Studie 1 und 2 Untersuchungen zur Beantwortung der ersten Fragestellung durchführten und Studien 3 und 4 sich der zweiten Fragestellung widmeten. Alle Studien untersuchten die Rolle der musikalischen Erfahrung.

Das Ziel der Studie 1 war es herauszufinden, ob die *verbalen Dauerneinschätzung* von Musikstücken durch die sensomotorische Synchronisation zu unterschiedlichen metrischen Ebenen beeinflusst wird. In einem Experiment mit Messwiederholungsdesign wurden Musiker:innen und Nichtmusiker:innen musikalisch-rhythmische Stimuli präsentiert, die in drei verschiedenen Grundtempi präsentiert wurden. Die Versuchspersonen synchronisierten sich mit mehreren metrischen Ebenen (halbe Noten, Viertelnoten, Achtelnoten) unter Verwendung des *Finger-Tapping* Paradigmas. Nach jeder Präsentation galt es die Stimulusdauer einzuschätzen. Die Ergebnisse zeigen, dass die metrischen Ebene, zu der sich die Versuchspersonen synchronisierten, die wahrgenommenen Zeitdauern beeinflussten: Die Kopplung zu einer höheren metrischen Ebene (halbe Noten, langsames *Tapping*-Tempo) führte zu den kürzesten *verbalen Dauerneinschätzungen*, die Zeit schien also schneller zu vergehen im Vergleich zu den niedrigeren metrischen Ebenen (Viertel- und Achtelnoten, mittleres und schnelles *Tapping*-Tempo). Je schneller das Grundtempo der Stimuli war, desto länger wurden auch die Zeitdauern der Stimuli eingeschätzt. Keine Unterschiede in den *verbalen Dauerneinschätzungen* konnten zwischen

Musiker:innen und Nichtmusiker:innen festgestellt werden. Die Studie konnte also zeigen, dass die Zeitdauer von demselben Musikstück unterschiedlich wahrgenommen werden kann, wenn die gewählte metrische Ebene für die sensomotorische Synchronisation variiert.

Studie 2 hatte zum Ziel, den Zeitverzerrungseffekt des Grundtempos weiter zu untersuchen. Vorangegangene Studien als auch Studie 1 konnten zeigen, dass die Zeitdauer eines Musikstücks länger beurteilt wurde, je schneller das Grundtempo ist. Wie groß der Unterschied im Tempo sein muss, damit dieser Effekt eintritt, wurde unter Verwendung eines Messwiederholungsdesigns untersucht. Versuchspersonen, die erneut aus Musiker:innen und Nichtmusiker:innen bestanden, hörten Musikausschnitte mit Grundtempi zwischen 100–130 *Beats per Minute* (BPM). Die Aufgabe der Versuchspersonen war es, die Zeitdauern der Stimuli einzuschätzen und zu reproduzieren. Diese beiden Messmethoden wurden gewählt, da sie unterschiedliche kognitive Prozesse involvieren und unterschiedlich genaue Messergebnisse liefern können. Die Ergebnisse ergaben, dass der Tempounterschied für das Auftreten des Zeitverzerrungseffektes bei mindestens 20 BPM für die *Dauernreproduktion* lag. Keine Unterschiede konnten bei den *verbalen Dauereinschätzungen* festgestellt werden, es trat also kein Zeitverzerrungseffekt auf. Musiker:innen waren bei der *Dauernreproduktion* genauer als Nichtmusiker:innen, keine Unterschiede zwischen diesen Gruppen zeigte sich bei der *verbalen Dauereinschätzung*.

Studie 3 untersuchte Faktoren, die das spontane motorische Tempo (SMT) beeinflussen und damit Rückschlüsse auf Unterschiede in der Zeitwahrnehmung unabhängig von externen auditiven Reizen zulassen. Vorangegangene Studien konnten zeigen, dass sich das SMT mit zunehmendem Alter verlangsamt, es sich mit erhöhtem Erregungszustand beschleunigt und es abhängig von der Tageszeit ist. Ob musikalische Erfahrung das SMT beeinflusst, ist nicht bekannt. Die Anzahl an Studien, die diese Effekte untersuchten, ist gering und deshalb war es Ziel der Studie 3, diese Faktoren erstmals zusammen und anhand einer eigens entwickelten Webapplikation online zu untersuchen. Das SMT wurde unter Verwendung eines *Finger-Tapping* Paradigmas gemessen, wobei Versuchspersonen ($N = 3.576$) in ihrem präferierten Tempo klopfen. Die Ergebnisse ergaben, dass ältere Versuchspersonen ein langsames SMT aufwiesen als jüngere. Zudem hatten Versuchspersonen, die ihren Erregungszustand als höher bewerteten, auch ein schnelleres SMT, und je früher am Tag der Test durchgeführt wurde, desto langsamer war auch das

SMT. Musikalische Erfahrung zeigte gegensätzliche Effekte auf das SMT, wodurch kein eindeutiger Effekt nachzuweisen war.

Studie 4 untersuchte erneut Veränderungen im SMT, nutzte anstatt eines Zwischengruppendesigns (Studie 3) jedoch eine Erlebnisstichprobe. Hauptziel war es intra- und interindividuelle Unterschiede in der Tageszeit, dem Chronotypen, dem Erregungszustand und der musikalischen Erfahrung zu untersuchen. Hierfür wurde eine angepasste Version der Webapplikation unter Verwendung desselben *Finger-Tapping* Paradigmas wie in Studie 3 genutzt. Das SMT der Versuchspersonen wurde über die Dauer von sieben Tagen viermal täglich gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich das SMT in Abhängigkeit der Tageszeit verändert und dass dieser Effekt unterschiedlich für verschiedene Chronotypen ist. Während Morgentypen am Vormittag schneller waren, beschleunigte sich das SMT bei Abendtypen stärker über den Tag. Der Erregungszustand beeinflusste das SMT ebenfalls; ein erhöhter Erregungszustand beschleunigte das SMT unabhängig von den anderen Faktoren. Musikalische Erfahrung beeinflusste das SMT der Versuchspersonen nicht. Die Ergebnisse konnten erstmals zeigen, dass der Tageszeiteffekt von dem Chronotypen eines Individuums abhängt, was darauf hindeutet, dass der zirkadiane Rhythmus Ursache dieses Effektes ist.

Zusammenfassend konnten die im Rahmen dieses Dissertationsprojektes durchgeführten Studien zum einen das Verständnis des Zeitverzerrungseffektes des musikalischen Tempos vertiefen und zeigen, dass dieser auch von der individuellen sensomotorischen Synchronisation abhängt. Zum anderen konnte gezeigt werden, dass die *innere Uhr*, gemessen anhand des spontanen motorischen Tempos, nicht nur von der Tageszeit abhängt, sondern auch vom jeweiligen Chronotypen, was für einen Einfluss der *biologischen Uhr* auf die Zeitwahrnehmung spricht.

Kurzfassung der Ergebnisse (englisch)

The present dissertation project investigated auditory time perception with regard to the (perceived) tempo properties of music and the spontaneous motor tempo (SMT). The theoretical basis of these investigations are the models of the *internal clock*, which are based on an intrinsic timekeeper that sends out impulses in a linear or dynamic-oscillatory system. The SMT is considered to be an indicator of the pulse rate of this timekeeper. The aim of this dissertation was to answer the following overarching questions: (1) To what extent does the tempo of music influence the assessment of durations and does this influence depend on the metrical level at which the musical beat is perceived (i. e., perceived tempo)? (2) Which factors influence the SMT independent of external stimuli such as music? (3) What role does musical experience play in auditory time perception of music and are there systematic differences in the pulse rate of the *internal clock*?

In order to answer these questions, four empirical studies were carried out, whereby Studies 1 and 2 investigated the first question and Studies 3 and 4 were devoted to the second question. All studies considered the role of musical experience.

The aim of Study 1 was to find out whether the assessment of the duration of musical pieces is influenced by the sensorimotor synchronization to different metrical levels. In an experiment with a repeated-measures design, musicians and non-musicians were presented with musical-rhythmic stimuli that were played back in three different basic tempos. The subjects synchronized with multiple metric levels (half notes, quarter notes, eighth notes) using a finger-tapping paradigm. After each presentation, the duration of the stimulus had to be estimated. The results show that the metrical level to which the participants synchronized with influenced the perceived duration: The entrainment to a higher metric level (half notes) led to the shortest duration estimates, so time seemed to pass by faster in comparison to lower metrical levels (quarter and eighth notes). The faster the basic tempo of the stimuli, the longer the duration of the stimuli was estimated. No differences in the duration estimations were found between musicians and non-musicians. The study was able to show that the duration of the same piece of music can be perceived differently if the selected metrical level for sensorimotor synchronization varies.

Study 2 aimed to further investigate the time-distortion effect of basic tempo. Previous studies and Study 1 were able to show that the faster the basic tempo of a piece of music, the longer the duration is estimated. How large the difference in tempo has to be

for this effect to occur was investigated using a repeated-measures design. Participants consisted of musicians and non-musicians as in Study 1 and heard music excerpts whose basic tempo was between 100–130 beats per minute (BPM). Participants' task was to estimate and reproduce the duration of the stimuli. These two measurements were chosen because they involve different cognitive processes and can provide different accuracy in terms of measurement results. The results showed that the tempo difference for the occurrence of the time-distortion effect was 20 BPM for duration reproductions. No differences could be found the different tempi for duration estimations. Thus, there was no time-distortion effect. Musicians were more accurate in the duration reproduction task than non-musicians. There was no difference between these groups in the duration-estimation task.

Study 3 investigated factors that influence the spontaneous motor tempo (SMT) and thus allow conclusions to be drawn about differences in time perception independent of external auditory stimuli. Previous studies have shown that SMT slows down with higher age, that it accelerates with increased arousal, and that it depends on the time of day. It is not known whether musical experience influences the SMT. However, the number of studies that examined these effects is small and therefore the aim of Study 3 was to examine these factors for the first time in a joined online study using a self-developed web application. SMT was measured using a finger-tapping paradigm, whereby participants ($N = 3,576$) had to tap at their preferred pace. The results showed that older participants had a slower SMT than younger ones, participants who rated their arousal level as higher also had a faster SMT, and the earlier during the day the test was carried out, the slower was the SMT. Musical experience showed contradicting effects on the SMT, thus no conclusions could be drawn regarding this factor.

Study 4 also investigated changes in SMT, using an experience sampling method instead of a between-subject design (Study 3). The main aim was to investigate intra- and inter-individual differences in the time of day, chronotype, arousal level, and musical experience. For this purpose, an adapted version of the web application using the same finger-tapping paradigm as in Study 3 was used. The participants' SMT was measured four times a day over a period of seven days. The results show that the SMT changes depending on the time of day and that this effect interacted with the chronotype. While morning types were faster in the morning, SMT accelerated more rapidly in evening types

during the day. The arousal level also affected the SMT; an increased arousal level accelerated the SMT independent from the other factors. Musical experience did not affect the SMT. These results show for the first time that the time-of-day effect depends on someone's chronotype, which suggests that the circadian rhythm is the underlying cause of this effect.

In summary, the studies carried out within the scope of this dissertation project were able to deepen the understanding of the time-distortion effect of the musical tempo and show that this effect also depends on the individual sensorimotor synchronization. Furthermore, it could be shown that the internal clock, measured with the spontaneous motor tempo, does not only depend on the time of day but also on the respective chronotype, which suggests an influence of the biological clock on the perception of time.

Erklärungen zum Eigenanteil an den Studien

Studie 1:

Hammerschmidt, D., & Wöllner, C. (2020). Sensorimotor synchronization with higher metrical levels in music shortens perceived time. *Music Perception*, 37(4), 263–277. <https://doi.org/10.1525/mp.2020.37.4.263>

Studienkonzeption

Die dem Experiment zugrundeliegende Fragestellung stammt von Prof. Dr. Clemens Wöllner. David Indra Hammerschmidt entwickelte in Rücksprache mit Prof. Dr. Clemens Wöllner die Hypothesen, das Studiendesign, die Messmethoden und Aufgaben für die Versuchspersonen. Die Implementierung des Studienkonzepts in eine Software zur Präsentation und Aufzeichnung von Daten oblag David Indra Hammerschmidt.

Durchführung

Die Studiendurchführung wurde von David Indra Hammerschmidt und Prof. Dr. Clemens Wöllner beaufsichtigt. Die Datenaufbereitung und statistische Analyse führte David Indra Hammerschmidt durch. Die Gesamtaufsicht der Studie oblag Prof. Dr. Clemens Wöllner.

Berichtabfassung

Der auf dieser Studie basierende wissenschaftliche Artikel wurde von David Indra Hammerschmidt verfasst und von Prof. Dr. Clemens Wöllner bearbeitet und revidiert.

Studie 2:

Hammerschmidt, D., Wöllner, C., London, J., & Burger, B. (2021). Disco time: The relationship between perceived duration and tempo in music. *Music & Science*, 4, 1–11. <https://doi.org/10.1177/2059204320986384>

Studienkonzeption

Die dem Experiment zugrundeliegende Fragestellung stammt von David Indra Hammerschmidt. Die Hypothesen für das Experiment stammen von David Indra Hammerschmidt, Prof. Dr. Clemens Wöllner und Prof. Dr. Justin London. Das Studiendesign wurde von David Indra Hammerschmidt, Prof. Dr. Clemens Wöllner und Prof. Dr. Justin London entwickelt und von David Indra Hammerschmidt in der Testdurchführungssoftware implementiert. David Indra Hammerschmidt und Dr. Birgitta Burger wählten die Stimuli basierend auf Kriterien von Dr. Birgitta Burger aus.

Durchführung

Die Testdurchführung wurde von David Indra Hammerschmidt und Prof. Dr. Clemens Wöllner beaufsichtigt. David Indra Hammerschmidt führte gemeinsam mit Prof. Dr. Clemens Wöllner und Dr. Birgitta Burger die statistische Datenanalyse durch.

Berichtabfassung

Der auf dieser Studie basierende wissenschaftliche Artikel wurde von David Indra Hammerschmidt verfasst und von Prof. Dr. Clemens Wöllner, Prof. Dr. Justin London und Dr. Birgitta Burger bearbeitet und revidiert.

Studie 3:

Hammerschmidt, D., Frieler, K., & Wöllner, C. (2021). Spontaneous motor tempo: Investigating psychological, chronobiological, and demographic factors in a large-scale online tapping experiment. *Frontiers in Psychology*, *12*, 2338. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.677201>

Studienkonzeption

Die dem Experiment zugrundeliegende Fragestellung stammt von David Indra Hammerschmidt. Die Hypothesen für das Experiment stammen von David Indra Hammerschmidt und Prof. Dr. Clemens Wöllner. Das Studiendesign wurde von David Indra Hammerschmidt in Rücksprache mit Prof. Dr. Clemens Wöllner entwickelt und die Entwicklung der Webapplikation von David Indra Hammerschmidt angeleitet und von beiden beaufsichtigt.

Durchführung

Die Testdurchführung wurde von David Indra Hammerschmidt und Prof. Dr. Clemens Wöllner beaufsichtigt. David Indra Hammerschmidt führte gemeinsam mit Dr. Klaus Frieler die statistische Datenanalyse durch.

Berichtabfassung

Der auf dieser Studie basierende wissenschaftliche Artikel wurde von David Indra Hammerschmidt verfasst. Einzelne Textpassagen stammen von Dr. Klaus Frieler. Dr. Klaus Frieler und Prof. Dr. Clemens Wöllner bearbeiteten und revidierten das Manuskript.

Studie 4:

Hammerschmidt, D., & Wöllner, C. (2022). Spontaneous motor tempo over the course of a week: The role of the time of the day, chronotype, and arousal. *Psychological Research*.

Studienkonzeption

Die dem Experiment zugrundeliegende Fragestellung stammt von David Indra Hammerschmidt. Die Hypothesen für das Experiment stammen von David Indra Hammerschmidt. Das Studiendesign wurde von David Indra Hammerschmidt in Rücksprache mit Prof. Dr. Clemens Wöllner entwickelt und die Entwicklung der Webapplikation von David Indra Hammerschmidt angeleitet und von beiden Autoren beaufsichtigt.

Durchführung

Die Testdurchführung wurde von David Indra Hammerschmidt durchgeführt. David Indra Hammerschmidt führte in Rücksprache mit Prof. Dr. Clemens Wöllner die statische Datenanalyse durch.

Berichtabfassung

Der auf dieser Studie basierende wissenschaftliche Artikel wurde von David Indra Hammerschmidt verfasst. Prof. Dr. Clemens Wöllner revidierte das Manuskript.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "D. Humenick", with a long horizontal stroke extending to the right.

Hamburg, den 04. August 2022

Unterschrift