

In: Brüstle, Christa, Ghattas, Nadia, Risi, Clemens, Schouten, Sabine (Hg.) (2005), Aus dem Takt. Rhythmus in Kunst, Kultur und Natur (S. 127-148). Bielefeld: transcript.

Musikalischer Rhythmus und seine wahrnehmungspsychologischen Grundlagen

REINHARD KOPIEZ

Zeitliche Prozesse üben seit langer Zeit eine besondere Faszination aus die psychologische Forschung aus, und die psychologische Rhythmusforschung kann mittlerweile auf eine 140-jährige Tradition zurückblicken.¹ Allerdings ist es in den letzten Jahrzehnten nur gelungen, Bausteine zu einer Theorie der Rhythmuswahrnehmung zu entwickeln, nicht jedoch eine umfassende Theorie selber. Dies liegt unter anderem daran, dass man Theoriebildung auf diesem Gebiet nur mit Hilfe computergestützter Modellierungsverfahren und exakter Messmethoden betreiben kann. Die hierfür notwendige Technik steht erst seit ca. 20 Jahren zur Verfügung. Dieser Beitrag soll einen Überblick über den aktuellen Stand der musikpsychologischen Forschung zur Wahrnehmung akustischer Rhythmen geben, und zwar durch Darstellung der wesentlichen Einsichten in die beiden Forschungsbereiche Rhythmuswahrnehmung und Rhythmuswirkung. Im ersten Abschnitt zu den wahrnehmungspsychologischen Grundlagen wird es zunächst um den Rhythmusbegriff und sein Verhältnis zum Begriff des Metrums gehen. Gezeigt werden soll vor allem, dass eine Trennung dieser beiden Merkmale des Rhythmischen nicht sinnvoll ist. Als vereinheitlichende Beschreibung wird auf der Objektseite der Begriff der Periodizität vorgeschlagen, der auf der Wahrnehmungsseite dem Begriff der Oszillation entspricht. Damit verbunden ist die Oszillationstheorie der Rhythmuswahrnehmung. Das Eigenleben der Oszillatoren wird

1. Vgl. Albert Spitznagel: »Zur Geschichte der psychologischen Rhythmusforschung«, in: Gisela Aschersleben/Katharina Müller (Hg.), Rhythmus. Ein interdisziplinäres Handbuch, Bern 2000, S. 1-40.

dann am Beispiel des Phänomens der subjektiven Rhythmisierung beschrieben. Zum Abschluss dieses ersten Teils wird dann noch als Beispiel für Basisprozesse die Frage des Tonbeginns (Onsets) und die Bedeutung kleinster Abweichungen in der Rhythmusperformance (Mikrotiming) für das ästhetische Urteil diskutiert.

Der zweite Teil dieses Beitrags widmet sich den psychophysiologischen Wirkungen des Rhythmus. Zunächst wird das Phänomen der Synchronisation zu einem äußeren Puls diskutiert und anschließend mit dem Magneteffekt eine Beschreibung für mögliche physiologische Wirkungen periodischer Anregungen gegeben. Inwiefern die Wirkung des Rhythmus nicht auf einem passiven Sensormodell des Menschen basiert, sondern auf einer Anregung von eigenaktiven Detektoren, beschreibt der Abschnitt über rhythmische Resonanz und das spontane Tempo. Es folgt eine kurze Darstellung der Theorie des Synchronklatschens als Beispiel für rhythmische Prozesse im Alltag, und zum Abschluss wird die Frage der Lust am lauten Musikhören mit der physiologischen Theorie der ›Rock and Roll Threshold‹ beantwortet. Der Beitrag endet mit einem Forschungsausblick.

I. Wahrnehmungspsychologische Grundlagen

I.1 DEFINITION DES RHYTHMUSBEGRIFFES

Rhythmusdefinitionen gibt es mindestens so viele, wie Lexikaeinträge oder Handbücher zu diesem Thema existieren.² Das Besondere an dieser Forschung ist, dass sie immer interdisziplinär ausgerichtet war und Gebiete wie die Musikwissenschaft, die Psychoakustik, die Psychophysiologie, die visuellen Künste, die Literaturwissenschaft und die Neurowissenschaft einbezog. Trotz aller Unterschiede in der Forschungsmethodik kann beobachtet werden, dass sich die experimentelle Rhythmusforschung im Kern immer auf zwei Aspekte rhythmischer Prozesse konzentrierte: erstens auf den Aspekt von *Ordnung* und zweitens auf den Aspekt einer zeitlich-dynamischen Veränderung bzw. *Bewegung*. Wenn wir an drei Beispielen die historischen und lexikalischen Rhythmusdefinitionen betrachten, finden wir genau diese beiden Momente wieder, und sie scheinen den Kern

2. Vgl. Herbert Bruhn: »Zur Definition von Rhythmus«, in: G. Aschersleben/K. Müller (Hg.), Rhythmus, S. 41-56.

aller rhythmischen Prozesse zu bilden. So beschreibt Platon im Abschnitt über den Chorgesang die Merkmale wie folgt: »[...] dass man ferner die Ordnung in den körperlichen Bewegungen Rhythmos [...] nenne.«³ Im Riemann-Musiklexikon findet sich im Artikel »Rhythmus« folgende zweite Definition:

»[...] ist in Tanz, Musik und Versdichtung wirksam als eigenständig zeitliches, im jeweiligen Gesamtphänomen integriertes Ordnungs- und Gestaltungsprinzip. Im Begriff der Ordnung ist dabei das Moment der Regelmäßigkeit [...], im Begriff der Gestaltung das Moment der Spontaneität enthalten.«⁴

Die dritte Definition aus dem Musiklexikon MGG fügt eine neue und qualitative Komponente dem Rhythmus hinzu und betont das subjektive Erleben: »Rhythmus bezeichnet die Ordnung der Bewegung oder Zeiten, die dem menschlichen Sinn unmittelbar deutlich und faßlich ist und deren Wahrnehmung sich mit dem Gefühl des Wohlgefallens verbindet.«⁵ In dieser letzten Definition wird die wichtigste Eigenschaft des Rhythmus angesprochen, nämlich Bewegungsempfindungen auszulösen. Worauf beruht jedoch das subjektive Gefallen eines gehörten Rhythmus und worauf die ausgelöste Bewegungsempfindung? Hierauf geben die nächsten Abschnitte eine Antwort.

I.2 METRUM VERSUS RHYTHMUS?

In der musikwissenschaftlichen und -theoretischen Terminologie findet sich häufig die Abgrenzung von Metrum und Rhythmus, wobei dem Metrum am ehesten der Ordnungsaspekt des Rhythmus entspricht. Hierzu die Definition von Metrum im Riemann-Musiklexikon: »[...] eine auf qualitativer Abstufung gleich großer Zeiteile beruhende, musikalisch wirksame Ordnung oder Maßeinheit. Prototyp eines metrischen Ordnungsgefüges ist der Takt [...].«⁶ Das

3. Vgl. Platon: *Nomoi-Gesetze*, Frankfurt/Main 1991.

4. Vgl. Frieder Zamminer: »Rhythmus«, in: Hans-Heinrich Eggebrecht (Hg.), *Riemann Musiklexikon*, Mainz 1967, S. 803.

5. Vgl. Wilhelm Seidel: »Rhythmus, Metrum, Takt«, in: Ludwig Finscher (Hg.), *Die Musik in Geschichte und Gegenwart*, 2. Ausgabe, Sachteil, Bd. 8. Kassel u.a. 1998, Sp. 258.

6. Vgl. Frieder Zamminer: »Metrum«, in: Hans-Heinrich Eggebrecht (Hg.), *Riemann Musiklexikon*, Mainz 1967, S. 568.

Klicken eines Metronoms würde demzufolge nicht als Rhythmus bezeichnet werden, sondern als Metrum oder Pulsation. Diese Trennung ist nicht wahrnehmungspsychologisch begründbar, und wie die folgenden Ausführungen zeigen werden, ist es sogar fragwürdig, den Ordnungsaspekt vom Veränderungsaspekt zu sondern, denn sie bilden eine untrennbare Einheit. Ein hartes Argument liefert eine aktuelle neurowissenschaftliche Studie zur Frage der Wahrnehmung von Metrum und Rhythmus in getrennten Netzwerken des Gehirns.⁷ Hätte die Annahme von Metrum versus Rhythmus eine neuronale Grundlage, müsste sich dies auch in der getrennten Aktivierung von spezialisierten Hirnarealen in Höraufgaben nachweisen lassen. Die populäre Annahme einer hemisphärischen Dichotomie in Bezug auf Rhythmus und Metrum (das heißt, die Annahme, dass Metrum rechtshemisphärisch und Rhythmus linkshemisphärisch verarbeitet wird⁸) konnte jedoch nicht bestätigt werden. Eigentlich ist das hartnäckige Festhalten am Begriff des Metrums als Gegenbegriff zum Begriff des Rhythmus erstaunlich, denn bereits 1968 hat Helga de la Motte-Haber auf die Unhaltbarkeit dieser Unterscheidung hingewiesen.⁹ Vermutlich als Langzeitwirkung der Publikation von Klages¹⁰ hat sich diese Unterscheidung jedoch in der Literatur festgesetzt. Wie lassen sich aber die beiden Aspekte von Ordnung und Bewegung trotzdem in ein einheitliches Wahrnehmungsmodell integrieren? Die Antwort auf diese Frage geben die Begriffe *Periodizität* und *Oszillation*. Diese Begriffe einer neuen Theorie der Rhythmuswahrnehmung sind Gegenstand des folgenden Abschnitts.

7. Vgl. Michael Großbach: Neuronale Grundlagen des Erwerbs mentaler Repräsentationen musikalischer Zeitstrukturen (Rhythmus und Metrum), Diss. Universität Hannover 2004.

8. Vgl. Hans M. Borchgrevink: »Prosody and musical rhythm are controlled by the speech hemisphere«, in: Manfred Clynes (Hg.), Music, mind, and brain. The neuropsychology of music, New York 1982, S. 151-157.

9. Vgl. Helga de la Motte-Haber: Ein Beitrag zur Klassifikation musikalischer Rhythmen, Köln 1968.

10. Vgl. Ludwig Klages: Vom Wesen des Rhythmus, Kampen 1934.

I.3 PERIODIZITÄT UND OSZILLATION ALS NEUE THEORIE DER RHYTHMUSWAHRNEHMUNG

Jeder rhythmische Prozess kann zunächst aufgrund seiner Zeitstruktur beschrieben werden. Im einfachsten Fall geschieht dies durch die Beschreibung seiner regelmäßigen Merkmale. Vereinfacht dargestellt, lässt sich dieser Vorgang folgendermaßen beschreiben: Ein mit 60 Schlägen pro Minute klickendes Metronom besitzt eine Periodizität von 1000 ms und eine rhythmische Frequenz von 1 Hertz. Wie Langner in seiner Oszillationstheorie der Rhythmuswahrnehmung beschreibt,¹¹ trifft die Periodizität dieses akustischen Signals nun auf unsere Wahrnehmung und stimuliert dort im Nervensystem eine weitere Anregung eigenaktiver neuronaler Detektoren (Oszillatoren), mit dem Ergebnis einer Oszillation (Schwingungsanregung). Periodizität ist somit eine Objekteigenschaft des Stimulus und Oszillation das Ergebnis der Wahrnehmung von Periodizitäten. Das Verhalten dieser Oszillatoren kann gut im Computer simuliert und Vorhersagen über die Veränderungen der Wahrnehmung können überprüft werden. Zur Beschreibung des Schwingungszustandes benötigt man lediglich zwei Parameter: *Anregungsstärke* und *Änderungsstärke*. Der Anregungsstärke entspricht am ehesten das Moment des Regelmäßigen und der Änderungsstärke das Moment der Veränderung oder Interessantheit. Beide Parameter sind kontinuierlich skaliert, aber je nach Input unterschiedlich stark ausgeprägt. Es gibt Hinweise darauf, dass sich mit diesen Kenngrößen möglicherweise sogar die musikalischen Präferenzen von Musikkonsumenten erklären lassen. So scheinen jugendliche Hörer eine Vorliebe für eine hohe Anregungsstärke zu entwickeln, wodurch sich beispielsweise die Vorliebe für Techno- oder Rockmusik erklären ließe. Entscheidend ist an dieser Theorie der Rhythmuswahrnehmung aber, dass es keine Trennung von Metrum und Rhythmus mehr gibt, sondern jeglicher periodische Input durch kontinuierliche Kenngrößen beschrieben werden kann, die immer präsent sind, aber durch ihren unterschiedlichen Ausprägungsgrad auch in unterschiedlichem Maße zum Rhythmuserlebnis beitragen. Letztlich resultiert das ästhetische Vergnügen an einem Rhythmus aus dem Wechsel von Ordnung und Bewegung oder – in der Terminologie der Ästhetik – aus dem Wechsel von Einheit und Mannigfaltigkeit. Dies hatte bereits der

11. Vgl. Jörg Langner: *Musikalischer Rhythmus und Oszillation. Eine theoretische und empirische Erkundung*, Frankfurt/Main 2002.

Psychologe Wundt in den Ausführungen zur Wirkung des Rhythmus erkannt.¹² Dass es keine Wahrnehmung von ›nur‹ Metrum gibt, belegt auch das im nächsten Abschnitt beschriebene Phänomen der ›subjektiven Rhythmisierung‹.

I.4 SUBJEKTIVE RHYTHMISIERUNG

Seit 120 Jahren ist in der experimentellen Rhythmusforschung ein Phänomen bekannt, das sich wie folgt beschreiben lässt: Wenn man Hörern eine gleichmäßige Pulsfolge von beispielsweise Klopfgeräuschen vorgibt und sie nach der subjektiv wahrgenommenen Gruppierung der Schläge fragt, erhält man in der Regel für einen mittleren Tempobereich als überwiegende Nennung Zweier- oder Vierergruppen. Dieses Phänomen wird als ›subjektive Rhythmisierung‹ bezeichnet und ist ein zuverlässig reproduzierbarer Befund. Wie Spitznagel¹³ beschreibt, wurde dieses Phänomen zuerst von den Psychologen Dietze¹⁴ und Bolton¹⁵ systematisch untersucht. Die Reanalyse der Daten von Bolton ist in Abbildung 1 dargestellt.¹⁶ Man sieht folgende interessante Hinweise auf die Organisation der menschlichen Wahrnehmung von Periodizitäten: Erstens dominiert die Gruppierung von Ereignissen zu je zwei, vier und acht Einheiten; zweitens kommen Dreiergruppierungen oder wechselnde Gruppierungen nur in sehr geringem Maße und auch nur bei sehr schnellen Klopffolgen vor; drittens tritt keine subjektiv empfundene Gruppierung nur in sehr langsamem Tempo auf (> 1.000 ms Intervallabstand); viertens, je schneller das Klopftempo, desto größer ist die Anzahl von Ereignissen pro Gruppierung.

Die subjektive Rhythmisierung kann als Hinweis auf zwei Eigen-

12. Vgl. Wilhelm Wundt: Grundzüge der physiologischen Psychologie, Leipzig 1874.

13. Vgl. A. Spitznagel: »Zur Geschichte der psychologischen Rhythmusforschung«.

14. Vgl. Georg Dietze: »Untersuchungen über den Anfang des Bewußtseins bei regelmäßig aufeinander folgenden Schalleindrücken«, in: Philosophische Studien 2 (1885), S. 362-394.

15. Vgl. Thaddeus L. Bolton: »Rhythm«, in: American Journal of Psychology 6 (1894), S. 145-238.

16. Die Reanalyse basiert auf den Daten der Tabelle von S. 215 in Boltons Aufsatz.

schaften menschlicher Rhythmuswahrnehmung gewertet werden: einerseits als Hinweis auf Wahrnehmung als aktiven Vorgang mit einer zusätzlichen und bisher nicht erklärbaren Tendenz zur Organisation in Einheiten von 2^n und andererseits als Hinweis auf die weiter oben bereits angesprochene Eigenaktivität der Wahrnehmungszellensysteme, die sich keinesfalls passiv verhalten.

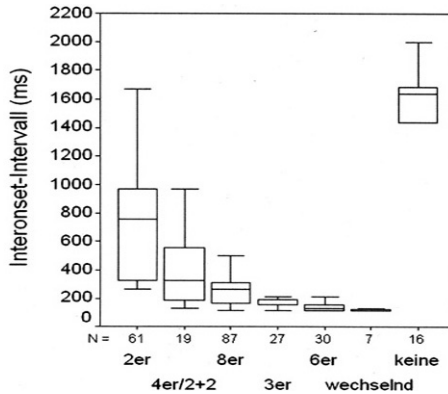


Abbildung 1: Boxplot der Reanalyse der Daten aus Boltons Experiment zur subjektiven Rhythmisierung beim Hören einer isochronen Pulsfolge. Die x-Achse zeigt die von den Hörern wahrgenommene Gruppierung und die Anzahl der Hörer pro Gruppe, die y-Achse zeigt die Zeitabstände zwischen den Schlägen in Millisekunden. Einem Interonset-Intervall von 500 ms entspräche eine Metronomgeschwindigkeit von M.M. = 120 (zwei Schläge pro Sekunde). Die Tendenz ist wie folgt: Bei 61 Nennungen von 28 Versuchspersonen führt eine Schlagdauer von ca. 700 ms (Median) zur überwiegenden Wahrnehmung als Zweiergruppierung.

I.5 WANN BEGINNT EIN TON?

Die elementarste Voraussetzung zur Wahrnehmung rhythmischer Verläufe ist die Wahrnehmung des Ton-Einsatzzeitpunktes (Onsets). Mit anderen Worten: »Wann beginnt ein Ton?« Erst wenn wir diesen Prozess erklären können, wird erstens verständlich, warum die besondere Qualität in der Ausführung eines Rhythmus sich durch Veränderungen seiner Mikro-Zeitstruktur ergibt, und zweitens, warum die Rhythmuswahrnehmung auch eine gewisse Unschärfe besitzt, die durch die psychoakustischen Eigenschaften des Gehörs bedingt sind. Wir wollen uns zuerst der Frage des Tonbeginns widmen und danach der Frage der Bedeutung des Mikroti-

mings. Grundsätzlich gibt es vier Modelle der Vorhersage eines Ton-Onsets: das Schwellenmodell, das Hüllkurven-Modell, das P-Center-Modell und das psychoakustische Phonetik-Modell.¹⁷

- **Schwellenmodell:** In einer frühen Studie zur Bestimmung der Synchronizität der Einsätze in einem Ensemble¹⁸ verwendeten Vos und Rasch¹⁹ ein so genanntes Schwellenmodell. Als Einsatzzeitpunkt wurde derjenige Zeitpunkt des Signalpegels definiert, an dem dieser 15 Dezibel (dB) unter dem Signalmaximum lag. Allerdings ist der Schwellenwert auch abhängig vom jeweiligen Schallpegel und kann bei sehr leisen Tönen (37 dB) bis auf acht dB absinken. Am Beispiel von drei verschiedenen Ensemble-Besetzungen (Blockflötentrio, Holzbläsertrio und Streichtrio) konnten die Autoren zeigen, dass im Mittel der Synchronfehler (gemessen als Standardabweichung der Onset-Unterschiede) bei 36 Millisekunden liegt. Begründet wurde dieser Fehler mit den unterschiedlich langen Einschwingzeiten der Instrumente. Als psychoakustische Voraussetzung muss angemerkt werden, dass die Schwelle für eine zuverlässige Unterscheidung zweier Klangereignisse als ›früher‹ oder ›später‹ im Laborexperiment bei einer absoluten Zeitdifferenz von mindestens 20 Millisekunden liegt.²⁰ Es muss jedoch kritisch angemerkt werden, dass das Schwellenmodell von Rasch aus heutiger Sicht kein adäquates Beschreibungsmodell für die Onset-Bestimmung ist und die angegebenen Werte höchstwahrscheinlich Artefakte der Methode sind.
- **Hüllkurven-Modelle:** Hüllkurvenorientierte Schwellenmodelle funktionieren nur mit Klickimpulsen, so wie es in den Studien von Schütte²¹ dargestellt wurde. Immerhin gewann Schütte mit die-

17. Vgl. Reinhard Kopiez: »Experimentelle Interpretationsforschung«, in: Helga de la Motte-Haber/Günther Rötter (Hg.), Handbuch der Systematischen Musikwissenschaft 3, Laaber (im Druck).

18. Vgl. Rudolf A. Rasch: »Timing and synchronization in ensemble performance«, in: John A. Sloboda (Hg.), Generative processes in music, Oxford 1988, S. 70-90.

19. Vgl. Joos Vos/Rudolf Rasch: »The perceptual onset of musical tones«, in: Perception & Psychophysics 29 (1981), S. 323-335.

20. Vgl. Ira J. Hirsh: »Auditory perception of temporal order«, in: Journal of the Acoustical Society of America 31 (1959), S. 759-767.

21. Vgl. Hans Schütte: »Ein Funktionsschema für die Wahrnehmung eines gleichmäßigen Rhythmus in Schallimpulsfolgen«, in: Biological Cybernetics 29

sem einfachen Modell die Einsicht, dass der Beginn eines Tons nicht zu Anfang, sondern bis zu 50 ms in den Klang hinein verschoben ist. Je länger der Flankenanstieg eines Signals ist, desto mehr ist der subjektiv wahrgenommene Ton-Onset in das Signal hineinverlagert. Eine Konsequenz aus diesem Modell ist, dass beim Zusammenspiel zweier Instrumente mit unterschiedlich langen Einschwingzeiten (zum Beispiel Kontrabass und Marimbaphon) die Spieler die Zeitverzögerungen des Ton-Onsets in Echtzeit kompensieren müssen.

- **P-Center-Modell:** Aus der Phonetik ist der gleiche Effekt der Verlagerung des subjektiven Onsets in den Sprachlaut hinein als »P-Center-Theorie« (Perceptual Center) bekannt.²² Gibt man Versuchspersonen die Aufgabe, die Zahlen von eins bis zehn synchron zu einem Metronom zu sprechen, so zeigt sich eine charakteristische Vorverlagerung der Hüllkurve der gesprochenen Zahlen »six« und »seven« von bis zu 80 ms. Die Regel für diese Verschiebung heißt: je länger der vorhergehende Konsonant, desto weiter ist das P-Center in das Wort hinein verschoben.
- **Psychoakustisches Phonetik-Modell:** Keine der vorhergehenden Theorien liefert jedoch eine hinreichend genaue Beschreibung für die Bestimmung des Einsatzzeitpunktes eines Klangereignisses. Zum Teil basieren die Beobachtungen auch nur auf synthetischen Stimuli (Klickimpulsen), die mit der akustischen Struktur realer Klänge wenig zu tun haben. Wie Bernd Pompino-Marschall für den Sprechrhythmus überzeugend nachgewiesen hat, kann der Onset eines Klangs mit harmonisch komplexem Spektrum letztlich nur durch ein psychoakustisches Modell bestimmt werden, welches auf der Analyse des frequenzabhängigen Lautheitsverlaufs basiert.²³ Physikalische Schwellenwertmodelle helfen also bei der Bestimmung des Ton-Onsets nicht weiter, sondern nur gehörpsychologische Modelle.

(1978), S. 49-55; ders.: »Subjektiv gleichmäßiger Rhythmus«, in: *Acustica* 41 (1978), S. 197-206.

22. Vgl. Carol A. Fowler: »Perceptual centers« in speech production and perception«, in: *Perception & Psychophysics* 25 (1979), S. 375-388; John Morton/Steve Marcus/Clive Frankish: »Perceptual centers (P-centers)«, in: *Psychological Review* 83 (1976), S. 405-408.

23. Vgl. Bernd Pompino-Marschall: *Die Silbenprosodie: ein elementarer Aspekt der Wahrnehmung von Sprachrhythmus und Sprechtempo*, Tübingen 1990. Vgl. auch den Beitrag von Pompino-Marschall im vorliegenden Band.

Eine letzte Herausforderung an alle physikalischen Onset-Modelle sind die so genannten ›Smooth rhythms‹, die von dem Musikpsychologen Robert Gjerdingen als Stimuli für Experimente zur Rhythmuswahrnehmung vorgeschlagen wurden.²⁴ Hierbei handelt es sich um amplitudenmodulierte Hüllkurvenverläufe einfacher Sinustöne, die sich durch besonders geringe Pegeldifferenzen und extrem flache Anstiege zwischen den benachbarten Amplitudenmaxima auszeichnen. Entgegen der Vorhersage von Vos und Rasch kann man jedoch selbst bei einer Pegeldifferenz von 0,3 dB noch einen deutlichen Ton-Onset und eine rhythmische Pulsation hören.

I.6 MIKROTIMING: DIE BEDEUTUNG DER KLEINEN UNTERSCHIEDE

Abschließend möchte ich noch die Bedeutung kleinster zeitlicher Verschiebungen im rhythmischen Verlauf ansprechen. Besonders in der Produktion populärer Musik haben sich durch die computerbasierten Produktionsbedingungen in den letzten Jahren Techniken zur Zeitgestaltung im Millisekundenbereich entwickelt, die prägend für ganze Musikstile geworden sind. So demonstriert eine systematische Verschiebung der Audiospuren eines Popmusiktitels um wenige Millisekunden, wie hierdurch der richtige ›Groove‹ entsteht.²⁵ Als letztes sei für die Bedeutung des richtigen Mikrotimings für das emotionale Erleben von Musik noch das Swing-Phänomen in der Jazzmusik genannt. Wie jüngere Studien zeigen, entsteht das richtige Swing-Gefühl und die Anregung einer starken Bewegungsempfindung erst, wenn die Dauernverhältnisse des ersten und letzten Triolenachtels in einem eng begrenzten Tempobereich sind.²⁶ Im mittleren Tempo liegt diese Proportion bei 1,75 : 1 und im sehr schnellen Tempo (M.M. = 350) bei 1,1 : 1.

Die Frage des Ton-Onsets verweist letztlich auf eine Grundeigenschaft unserer Hörwahrnehmung und unseres Gehirns. Die erstaunlichste Leistung unserer Hörbahn ist nämlich die hochgradige Opti-

24. Vgl. Robert O. Gjerdingen: »Smooth rhythms as probes of entrainment«, in: *Music Perception* 10 (1993), S. 503-508.

25. Vgl. Stefan Lindlahr: »Eine Frage des Timings [...] Amtliche Grooves und zwingende Beats«, in: *keys*, Heft 11(1999), S. 142-148.

26. Vgl. Anders Friberg/Andreas Sundström: »Swing ratios and ensemble timing in jazz performance: evidence for a common rhythmic pattern«, in: *Music Perception* 19 (2002), S. 333-349.

mierung für die Detektion von Schall-Onsets und damit von Periodizitäten selbst bei sehr unscharfem Input. Voraussetzung dafür ist eine sehr schnelle subkortikale Verarbeitung in den auf Zeitverarbeitung hochspezialisierten neuronalen Kernen des Netzwerks der Hörbahn.²⁷ Wie jüngere Studien zeigen konnten, sind gerade die Dauernabweichungen im Bereich von Millisekunden und die minimalen Intensitätsschwankungen der Lautstärkeakzente beispielsweise entscheidend für den ›Groove‹ brasilianischer Perkussionsensembles²⁸ oder für die ästhetische Bewertung des *Bolero*-Rhythmus.²⁹

II. Psychophysiologische Wirkungen auf den Hörer

II.1 SYNCHRONISATION ZU EINER GEGEBENEN PULSATION

Die auffälligste Wirkung musikalischer Rhythmen auf den Menschen ist die Auslösung von Körperbewegungen, die in der Regel synchron zum Rhythmus verlaufen. Ein schöner anekdotischer Bericht zu diesem Phänomen findet sich in einer Beschreibung der Uraufführung von Strawinskys Orchesterwerk *Sacre du printemps*:

»Der junge Mann, der hinter mir in der Loge saß, stand im Verlauf des Balletts auf, um besser zu sehen. Die starke Erregung die ihn gefangenhielt, äußerte sich darin, daß er sogleich anfang, mit seinen Fäusten im Takt auf meinen Kopf zu schlagen. Ich selbst war so außer mir, daß ich die Schläge lange Zeit nicht spürte.«³⁰

Diese Fähigkeit des Menschen, sich zu einem periodischen Pulsschlag zu bewegen (aus physikalischer Sicht handelt es sich um eine so genannte Phasenkopplung), hat nach McNeill³¹ primär eine so-

27. Vgl. Günter Ehret: »Auditorische Systeme«, in: Josef Dudel/Randolf Menzel/Robert F. Schmidt (Hg.), Neurowissenschaft, Berlin 1996, S. 353-381.

28. Vgl. Christiane Gerischer: *O suingue baiano* – mikrorhythmische Phänomene in baianischer Perkussion, Frankfurt/Main 2003. Vgl. auch den Beitrag von Gerischer im vorliegenden Band.

29. Vgl. J. Langner: Musikalischer Rhythmus und Oszillation.

30. Vgl. Helmut Kirchmeyer: Strawinskys russische Ballette: Der Feuervogel, Petruschka, Le Sacre du Printemps, Stuttgart 1974, S. 121f.

31. Vgl. William H. McNeill: Keeping together in time. Dance and drill in human history, Cambridge (MA) 1995.

zio-biologische Funktion, denn dadurch wird in menschlichen Gruppen das soziale Gefühl für den Zusammenhalt verstärkt. Gemeinsames Marschieren oder Tanzen dient diesem Zweck. Auch im Sport ist diese Fähigkeit der optimalen Kraftkopplung von Bedeutung: Am Beispiel eines Achter-Ruderbootes konnten Wing und Woodburn³² zeigen, dass Ruderer die Paddelbewegungen mit nur sehr geringen Phasenverschiebungen aufeinander abstimmen können. Vermutlich handelt es sich bei der Fähigkeit zur Synchronisation um die Leistung eines nur sehr kleinen neuronalen Netzwerkes, denn bereits bei Grillen und Fröschen ist die Fähigkeit zur rhythmischen Phasenkopplung ausgeprägt.³³ Ein wichtiger Unterschied besteht allerdings zwischen Fröschen und Menschen: Der Mensch besitzt die Fähigkeit, seine Synchronisation auch bei einer Tempoänderung beizubehalten. Tempovariabilität in der Lautsynchronisation ist bei Grillen und Fröschen aber nur in einem sehr begrenzten Maße möglich. Wie Thomas und Farlow³⁴ argumentieren, scheint die Fähigkeit zur Synchronisation ein sehr altes evolutionäres Erbe zu sein, denn anhand von 1938 in Texas gefundenen Dinosaurierspuren konnte man eine Jagdszene rekonstruieren, bei der ein kleineres Tier ein größeres in dem Moment ansprang und zu Fall brachte, als der Jäger seine Schritte mit denen der Beute synchronisiert hatte. Ohne Bewegungs-Synchronisation wäre die Jagd wegen der ungleichen Größenverhältnisse nicht erfolgreich verlaufen. Auch an vielen anderen Stellen lassen sich im Alltag synchronisierte Bewegungen beobachten: Ohne die Fähigkeit zur Synchronisation

- könnte kein Kind seilspringen,
- könnten wir nicht reiten,
- könnten keine schweren Gegenstände ohne technische Hilfsmittel bewegt werden und
- könnten wir nicht zur Musik tanzen und hätten vielleicht nie auf diesem Wege unsere Lebenspartner kennen gelernt.

32. Vgl. Alan M. Wing/Charles Woodburn: »The coordination and consistency of rowers in a racing eight«, in: *Journal of Sport Sciences* 13 (1995), S. 187-197.

33. Vgl. Enrico Sismondo: »Synchronous, alternating, and phase-locked stridulation by a tropical katydid«, in: *Science* 249 (1990), S. 55-58.

34. Vgl. David A. Thomas/James O. Farlow: »Spuren einer Dinosaurierjagd«, in: *Spektrum der Wissenschaft*, Februar (1998), S. 86-91.

II.2 DER RHYTHMISCHE MAGNETEFFEKT

Zum impliziten musikpsychologischen Wissen von DJs gehört es, im Laufe eines Tanzabends (zum Beispiel eines Techno-Raves) die Stücke so auszuwählen, dass sich das Tempo langsam steigert. Durch die Annahme einer Kopplung an die Herzschlagfrequenz soll die körperliche Anregung der Tänzer ebenfalls zunehmen. Dieser Effekt wird in der Literatur in Analogie zu elektromagnetischen Kräften als ›Magneteffekt‹ bezeichnet.³⁵ Er basiert auf tierexperimentellen Studien von Holst,³⁶ der feststellte, dass es bei Fischen dominante Flossen gibt, zu deren Schlagfrequenz sich andere Flossen synchronisieren. Kneutgen³⁷ weitete diese Studien auf Säugetiere aus und konnte angeblich eine Kopplung der Atemfrequenz mit dem Puls beim Anhören von Wiegenliedern beobachten.³⁸ Problematisch an diesen Studien ist, dass in ihnen häufig die physiologischen Kennwerte Herz- und Atemfrequenz mit den ebenfalls stattfindenden Körperbewegungen konfundiert sind. Eine experimentell ausgezeichnete Studie zur Überprüfung dieser Annahmen durch Allesch³⁹ ergab keine Bestätigung für generalisierbare Effekte musikalischer Merkmale auf Puls- und Atemfrequenz. Vielmehr erwiesen sich sämtliche physiologischen Reaktionen als hochgradig individuell. So blieb bei Versuchspersonen mit einer niedrigen Anfangspulsfrequenz diese auch nach dem 20-minütigen Teststück niedrig. Entsprechend verhielt es sich bei Personen mit einer bereits anfänglich hohen Pulsfrequenz.

35. Vgl. Heiner Gembris: »Psychovegetative Aspekte des Musikhörens«, in: Zeitschrift für Musikpädagogik 2 (1977), S. 59-65.

36. Vgl. Erich v. Holst: »Über den ›Magnet-Effekt‹ als koordinierendes Prinzip im Rückenmark«, in: Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie 237 (1936), S. 655-682.

37. Vgl. Johannes Kneutgen: »Beobachtungen über die Anpassung von Verhaltensformen an gleichförmige akustische Reize«, in: Zeitschrift für Tierpsychologie 21 (1964), S. 763-779.

38. Vgl. Johannes Kneutgen: »Eine Musikform und ihre biologische Funktion. Über die Funktionsweise der Wiegenlieder«, in: Zeitschrift für angewandte Psychologie und Charakterkunde 17 (1970), S. 245-265.

39. Vgl. Christian G. Allesch: »Untersuchungen zum Einfluß von Musik auf Puls- und Atmungsfrequenz«, in: Zeitschrift für klinische Psychologie und Psychotherapie 29 (1981), S. 353-382.

II.3 RHYTHMISCHE RESONANZ UND DER ›600 MS-OSZILLATOR‹

Eine alltägliche Beobachtung ist, dass Menschen bei bestimmten Tempi von Musik besonders stark zum Mitklatschen oder Tanzen angeregt werden. Bei extrem langsamen oder schnellen Tempi nimmt diese Tendenz ab. Diese Kopplung zwischen gehörtem und erlebtem Tempo ist seit mehreren Jahrzehnten Gegenstand der Rhythmusforschung. Eine bis heute akzeptierte Antwort auf die Frage, warum es ausgewählte Tempobereiche gibt, welche die menschliche Motorik besonders stark anregen, stammt von Fraisse⁴⁰ und wird als ›Theorie des spontanen bzw. bevorzugten Tempos‹ bezeichnet. Der Autor berichtet einerseits von eigenen umfangreichen Tapping-Experimenten mit Versuchspersonen, die aufgefordert wurden, ein spontan gewähltes Tempo zu klopfen. Hierbei zeigte sich, dass die meisten Personen ein Tempo im Bereich von ca. M.M. = 100-120 wählten. Entsprechend dem Zeitintervall zwischen zwei Schlägen wird deshalb in der Literatur auch vom ›600 ms-Oszillator‹ gesprochen. Ein ähnliches Ergebnis der Bevorzugung bestimmter mittlerer Tempi zeigte sich auch, wenn Hörer das ihnen subjektiv angenehmste Tempo auf einem Metronom einstellen sollten. Alle neueren Theorien zur Rhythmuswahrnehmung nehmen einen solchen bevorzugten Tempobereich an, bei dem die menschliche Wahrnehmung besonders stark auf rhythmische Pulsationen anspricht und der bei der Aufgabe, spontan in einem selbstgewählten Tempo zu klopfen, gewählt wird.⁴¹ Eine informelle Bestätigung für die Annahme eines besonders stark zur Mitbewegung anregenden Tempos findet sich in den Angaben zum Marschtempo in der Militärmusik: Sowohl bei Schneider⁴² als auch in den *Zentralen Dienstvorschriften der Bundeswehr*⁴³ gibt es die Empfehlung, das Marschtempo auf M.M. = 114 festzulegen.

Eine weitere Möglichkeit der Bestimmung bevorzugter Tempo-

40. Vgl. Paul Fraisse: »Rhythm and tempo«, in: Diana Deutsch (Hg.), *The psychology of music*, San Diego 1982, S. 149-180.

41. Vgl. J. Langner: *Musikalischer Rhythmus und Oszillation*; Edward E. Large/John F. Kolen: »Resonance and the perception of musical meter«, in: *Connection Science* 6 (1996), S. 177-208; vgl. Richard Parncutt: »A perceptual model of pulse salience and metrical accent in musical rhythms«, in: *Music Perception* 11 (1994), S. 409-464.

42. Vgl. Willy Schneider: *Handbuch der Blasmusik*, Mainz 1954.

43. Vgl. ZDv, in: *Zentrale Dienstvorschrift der Bundeswehr 78/3* (1986).

bereiche ist die statistische Analyse des Tempos einer großen Zahl von Musikstücken verschiedener Stile und Epochen. Diese Methode haben Noorden und Moelants gewählt.⁴⁴ Die Analyse von mehr als 20.000 Einträgen aus so genannten BPM-Listen (Beats-per-minute-Listen) aus dem Internet ergab eine Tempoverteilung der Stücke, die in Abbildung 2 dargestellt ist.⁴⁵ Es ist deutlich zu sehen, dass die Verteilung ein globales Maximum bei 500 ms hat. Die Verteilung ist jedoch nicht normal, sondern schief: Auf der linken Seite der Verteilung mit sehr schnellen Tempi (kurze Interonset-Intervalle) liegen nur sehr wenige Stücke, wogegen die rechte Seite eher langsam abfällt und noch zahlreiche Einträge bis hin zu einem Interonset-Intervall des Grundpulses von 1.400 ms (entsprechend einem Metro-nomwert von 43) enthält.

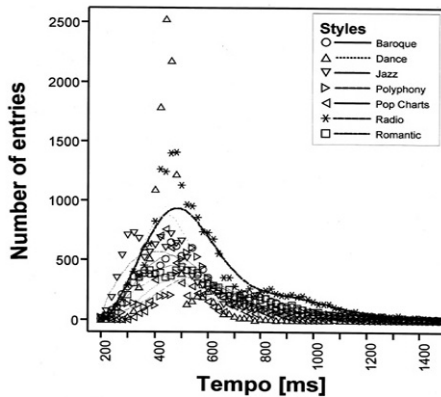


Abbildung 2: Reanalyse der Tempoverteilung von mehr als 20.000 Musikstücken unterschiedlicher Epochen und Stile aus der statistischen Auswertung von BPM-Listen (Beats-per-minute-Listen) von Noorden und Moelants.

Offen bleibt beim aktuellen Stand der Forschung die Frage, ob es sich bei dem Effekt um eine Art biomechanische Resonanz der Gliedmaßen oder um einen neuropsychologischen Effekt der Anregung von auf bestimmte Zeitintervalle spezialisierten Netzwerken

44. Vgl. Leon van Noorden/Dirk Moelants: »Resonance in the perception of musical pulse«, in: *Journal of New Music Research* 28 (1999), S. 43–66.

45. Ich danke Dirk Moelants (Universität Gent) für die Überlassung seiner Rohdaten für diese Reanalyse.

des Gehirns handelt.⁴⁶ Ohne einen harten neurowissenschaftlichen Beweis dafür zu haben, nimmt man aber momentan spezifische neuronale Oszillatorennetze an, die ein eingebautes Sensitivitätsmaximum im Bereich von ca. 600 ms Pulsabstand besitzen. Zumindest haben alle computergestützten Simulationen der Rhythmuswahrnehmung gezeigt, dass diese Tendenz (Bias) unabhängig von der realen Körperbewegung in den Modellen eingebaut ist, damit sie zuverlässige Erklärungen für das Verhalten der Versuchspersonen liefern. Folgende Begriffe und Angaben zu Sensitivitätsmaxima finden sich in der Literatur: Parncutt⁴⁷ verwendet die Bezeichnung ›most salient pulse sensation‹ (500-600 ms), Todd⁴⁸ den Begriff der ›natural periods of the sensorimotor system‹ (600 ms), bei Large⁴⁹ heißt dieser Bereich ›entrainment bias‹ (638 ms) und bei Langner⁵⁰ ›einhüllende Funktion‹ (598 ms).

II.4 DIE THEORIE RHYTHMISCHEN SYNCHRONKLATSCHENS

Beobachtet man das freie und nicht durch Musik stimulierte rhythmische Applaus-Klatschen des Publikums bei Theateraufführungen oder Musikveranstaltungen, dann kann man beobachten, dass es durch einen Wechsel von synchronen und nicht-synchronen Phasen gekennzeichnet ist. Dieser dynamische Wechsel wird in jüngerer Zeit durch eine ›Klatschtheorie des rhythmischen Applauses‹ einer Gruppe theoretischer Physiker erklärt.⁵¹ Die Theorie kann wie folgt zusammengefasst werden: Zunächst klatscht jeder Besucher mit individuellem Tempo (Modus I). Dies liegt bei ca. 330 ms oder 3 Hz und garantiert ein Maximum an Lautstärke. Das psychologische Bedürfnis, das Gefallen durch synchrones Klatschen kundzutun, wird nun durch eine Periodenverdopplung bzw. eine Halbierung der Klatschfrequenz erreicht (Modus II), was jedoch eine Abnahme der

46. Vgl. Manfred Spitzer: *Musik im Kopf. Hören, Musizieren, Verstehen und Erleben im neuronalen Netzwerk*, Stuttgart 2002.

47. Vgl. R. Parncutt: »A perceptual model of pulse salience«.

48. Vgl. Neil P. McAngus Todd: »The kinematics of musical expression«, in: *Journal of the Acoustical Society of America* 97 (1995), S. 1940-1949.

49. Vgl. Edward E. Large: »On synchronizing movements to music«, in: *Human Movement Science* 19 (2000), S. 527-566.

50. Vgl. J. Langner: *Musikalischer Rhythmus und Oszillation*.

51. Vgl. Zoltán Néda/Erzsébet Ravasz/Tamás Vicsek u.a.: »Physics of rhythmic applause«, in: *Physical Review E* 61 (2000), S. 6987-6992.

Gesamtlautstärke zur Folge hat. Das wechselnde Bedürfnis der Zuschauer sowohl nach Gemeinsamkeit (langsames Klatschen mit hohem Gesamtschallpegel) als auch nach Individualität (schnelles Klatschen mit geringerem Gesamtschallpegel) bestimmt nun den Wechsel des Klatschtempos.⁵²

II.5 PHYSIOLOGISCHE GRUNDLAGEN DER LUST AM (LAUTEN) MUSIKHÖREN: DIE ›ROCK AND ROLL THRESHOLD‹

Schon früh wurden die physiologischen Wirkungen der Musik untersucht: So führte Dogiel⁵³ bereits im 19. Jahrhundert erste pionierhafte Studien mit Hunden, Katzen, Kaninchen durch. Er stellte fest, dass unterschiedliche Musik sich unterschiedlich auf den Blutdruck und den Herzschlag auswirkt. Die stärksten Veränderungen fanden sich bei Klängen von Flöte, Piccolo-Flöte und Klarinette. Bei Menschen schien auch die Nationalität eine Rolle zu spielen: Der tartarische Labordienst zeigte die deutlichsten Blutdruckänderungen bei einer tartarischen Melodie.⁵⁴

Eine besondere Wirkung hat jedoch das Hören lauter Musik. Besonders die populäre Musik des 20. Jahrhunderts ist eine Musik, die laut gehört werden muss, damit sie ihre Hauptwirkung, die motorische Anregung, entfalten kann. Dieser letzte Aspekt der Wirkung des Rhythmus bezieht sich deshalb auf die merkwürdige Lust am lauten Musikhören. Eine Erklärung für dieses besonders bei Jugendlichen beobachtbare Verhalten liefern die Autoren Todd und Cody⁵⁵ mit dem Hinweis, dass für Lautstärkepegel über 90 Dezibel durch den *Sacculus* (dies ist eine Komponente des ansonsten für das Gleichgewicht des Körpers zuständigen Vestibularsystems) lustvolle Bewegungsempfindungen im Gehirn ausgelöst werden. Die Autoren

52. Klangbeispiele finden sich auf der Homepage der Autoren unter <http://www.nd.edu/~networks/clap/> (gesehen am 2. März 2005).

53. Vgl. Josef Dogiel: »Ueber den Einfluss der Musik auf den Blutkreislauf«, in: Archiv für Anatomie und Physiologie/Physiologische Abteilung (1880), S. 416-428.

54. Vgl. Gambrino Gembrinus: »Die Wirkung verschiedenartiger Musik bei gemischtfarbigen Gummibärchen (ursus latex multicoloratus)«, in: Gilbert Stöck/Katrin Stöck/Golo Föllmer (Hg.), Facta musicologica. Festschrift für Wolfgang Ruf zum 60. Geburtstag, Würzburg 2003, S. 285-300.

55. Vgl. Neil P. McAngus Todd/Frederick W. Cody: »Vestibular responses to loud dance music: a physiological basis of the ›rock and roll threshold?‹«, in: Journal of the Acoustical Society of America 107 (2000), S. 496-500.

bestimmen die Stärke der motorischen Anregung, indem sie die Aktivität der Halsmuskeln beim rhythmischen Kopfnicken maßen. Todd bezeichnet die Lautstärkeschwelle, bei der dieser Effekt auftritt, als ›Rock and Roll Threshold‹.⁵⁶ Die benötigten hohen Schalldruckpegel können dauerhaft erst durch eine elektrische Schallverstärkung erzeugt werden, worauf der Klang der Pop- und Rockmusik ja im Wesentlichen beruht. Eine besondere Rolle spielen dabei tiefe Frequenzen (< 500 Hz), die eine besonders stark anregende Funktion haben. Interessanterweise müssen wir diese Lust am lauten Musikhören erst ›lernen‹, denn Babys und Tiere zeigen in der Regel eine Angstreaktion bei lauten Schallen. Obwohl es sich bei dieser Theorie um eine interessante physiologische Theorie der Wirkung lauter Musik handelt, muss einschränkend angemerkt werden, dass eine Bewegungsempfindung auch bei normalen Hörlautstärken ausgelöst werden kann. Ein Schalldruckpegel von mehr als 90 Dezibel kann über längere Zeit nur in Livekonzerten oder in der Diskothek ohne Konflikte mit den Wohnungsnachbarn konsumiert werden.

III. Offene Forschungsfragen

Wie die vorhergehenden Ausführungen gezeigt haben, bleiben in der musikpsychologischen Rhythmusforschung trotz guter Einzelstudien viele Fragen unbeantwortet, und auch die Theoriebildung ist noch längst nicht abgeschlossen. Zwei Forschungsfragen seien an dieser Stelle grob skizziert:

- **Intermodalität.** Häufig werden Rhythmen nicht nur akustisch wahrgenommen, sondern treten besonders bei Livekonzerten immer in Verbindung mit visuellen Rhythmen auf. Dies können Dirigierbewegungen sein, musiksynchrone Lichtimpulse in einer Diskothek, der Bilderrhythmus eines Videoclips oder vibrotaktile Empfindungen durch laute Musik. Wie verhalten sich aber diese Sinnesmodalitäten zueinander? Denkbar wäre, dass sie entweder ähnlichen Wahrnehmungsgesetzen unterliegen (visueller 600 ms-Oszillator, Onset-Problem etc.) oder ganz eigenen Gesetzen. Wie beeinflussen sich diese Modalitäten gegenseitig?

⁵⁶. Vgl. John Dibble: »Hearing loss and music«, in: Journal of the Audio Engineering Society 10 (1995), S. 275-285.

- **Neuropsychologische Grundlagen.** Eine große Bedeutung messe ich in den nächsten Jahren der Neurowissenschaft zu. Mit den modernen bildgebenden Methoden (fMRI = Functional Magnetic Resonance Imaging etc.) wird es vielleicht möglich sein, spezielle Netzwerke zu identifizieren, die auf die Verarbeitung periodischer Prozesse spezialisiert sind. Eine langfristige Aufgabe dieser Forschung wäre es, Hinweise auf qualitative Unterschiede in der Rhythmusperformance zu geben.

Beide Forschungsaufgaben sind nur interdisziplinär zu lösen. Hierdurch wäre es vielleicht doch möglich, eines Tages eine umfassende Erklärung für den Zusammenhang zwischen Musik und Bewegung zu liefern.

Literatur

- Allesch, Christian G.:** »Untersuchungen zum Einfluß von Musik auf Puls- und Atmungsfrequenz«, in: *Zeitschrift für klinische Psychologie und Psychotherapie* 29 (1981), S. 353-382.
- Aschersleben, Gisela/Müller, Katharina (Hg.):** *Rhythmus. Ein interdisziplinäres Handbuch*, Bern 2000.
- Bolton, Thaddeus L.:** »Rhythm«, in: *American Journal of Psychology* 6 (1894), S. 145-238.
- Borchgrevink, Hans M.:** »Prosody and musical rhythm are controlled by the speech hemisphere«, in: Manfred Clynes (Hg.), *Music, mind, and brain. The neuropsychology of music*, New York 1982, S. 151-157.
- Bruhn, Herbert:** »Zur Definition von Rhythmus«, in: Aschersleben/Müller (Hg.), *Rhythmus. Ein interdisziplinäres Handbuch* (2000), S. 41-56.
- Dibble, John:** »Hearing loss and music«, in: *Journal of the Audio Engineering Society* 10 (1995), S. 275-285.
- Dietze, Georg:** »Untersuchungen über den Anfang des Bewußtseins bei regelmäßig aufeinander folgenden Schalleindrücken«, in: *Philosophische Studien* 2 (1885), S. 362-394.
- Dogiel, Josef:** »Ueber den Einfluss der Musik auf den Blutkreislauf«, in: *Archiv für Anatomie und Physiologie/Physiologische Abteilung* (1880), S. 416-428.
- Ehret, Günter:** »Auditorische Systeme«, in: Josef Dudel/Randolf Menzel/Robert F. Schmidt (Hg.), *Neurowissenschaft*, Berlin 1996, S. 353-381.

- Fowler, Carol A.:** »Perceptual centers« in speech production and perception«, in: *Perception & Psychophysics* 25 (1979), S. 375-388.
- Fraisse, Paul:** »Rhythm and tempo«, in: Diana Deutsch (Hg.), *The psychology of music*, San Diego 1982, S. 149-180.
- Friberg, Anders/Sundström, Andreas:** »Swing ratios and ensemble timing in jazz performance: evidence for a common rhythmic pattern«, in: *Music Perception* 19 (2002), S. 333-349.
- Gembrinus, Gambrino:** »Die Wirkung verschiedenartiger Musik bei gemischtfarbigen Gummibärchen (ursus latex multicoloratus)«, in: Gilbert Stöck/Katrin Stöck/Golo Föllmer (Hg.), *Facta musicologica. Festschrift für Wolfgang Ruf zum 60. Geburtstag*, Würzburg 2003, S. 285-300.
- Gembris, Heiner:** »Psychovegetative Aspekte des Musikhörens«, in: *Zeitschrift für Musikpädagogik* 2 (1977), S. 59-65.
- Gerischer, Christiane:** »O suingue baiano« – mikrorhythmische Phänomene in baianischer Perkussion, Frankfurt/Main 2003.
- Gjerdingen, Robert O.:** »Smooth« rhythms as probes of entrainment«, in: *Music Perception* 10 (1993), S. 503-508.
- Großbach, Michael:** *Neuronale Grundlagen des Erwerbs mentaler Repräsentationen musikalischer Zeitstrukturen (Rhythmus und Metrum)*, Diss. Hannover 2004.
- Hirsh, Ira J.:** »Auditory perception of temporal order«, in: *Journal of the Acoustical Society of America* 31 (1959), S. 759-767.
- Holst, Erich v.:** »Über den »Magnet-Effekt« als koordinierendes Prinzip im Rückenmark«, in: *Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie* 237 (1936), S. 655-682.
- Kirchmeyer, Helmut:** *Strawinskys russische Ballette: Der Feuervogel, Petruschka, Le Sacre du Printemps*, Stuttgart 1974.
- Klages, Ludwig:** *Vom Wesen des Rhythmus*, Kamen 1934.
- Kneutgen, Johannes:** »Beobachtungen über die Anpassung von Verhaltensformen an gleichförmige akustische Reize«, in: *Zeitschrift für Tierpsychologie* 21 (1964), S. 763-779.
- Ders.:** »Eine Musikform und ihre biologische Funktion. Über die Funktionsweise der Wiegenlieder«, in: *Zeitschrift für angewandte Psychologie und Charakterkunde* 17 (1970), S. 245-265.
- Kopiez, Reinhard:** »Experimentelle Interpretationsforschung«, in: Helga de la Motte-Haber/Günther Rötter (Hg.), *Handbuch der Systematischen Musikwissenschaft* 3, Laaber (im Druck).
- Langner, Jörg:** *Musikalischer Rhythmus und Oszillation. Eine theoretische und empirische Erkundung*, Frankfurt/Main 2002.
- Large, Edward E.:** »On synchronizing movements to music«, in: *Human Movement Science* 19 (2000), S. 527-566.

- Large, Edward E./Kolen, John F.:** »Resonance and the perception of musical meter«, in: *Connection Science* 6 (1996), S. 177-208.
- Lindlahr, Stefan:** »Eine Frage des Timings [...] Amtliche Grooves und zwingende Beats«, in: *keys*, Heft 11 (1999), S. 142-148.
- McNeill, William H.:** *Keeping together in time. Dance and drill in human history*, Cambridge (MA) 1995.
- Morton, John/Marcus, Steve/Frankish, Clive:** »Perceptual centers (P-centers)«, in: *Psychological Review* 83 (1976), S. 405-408.
- Motte-Haber, Helga de la:** *Ein Beitrag zur Klassifikation musikalischer Rhythmen*, Köln 1968.
- Néda, Zoltán/Ravasz, Erzsébet/Vicsek, Tamás/Brechet, Yves/ Barabási, Albert-László:** »Physics of rhythmic applause«, in: *Physical Review E* 61 (2000), S. 6987-6992.
- Noorden, Leon van/Moelants, Dirk:** »Resonance in the perception of musical pulse«, in: *Journal of New Music Research* 28 (1999), S. 43-66.
- Parncutt, Richard:** »A perceptual model of pulse salience and metrical accent in musical rhythms«, in: *Music Perception* 11 (1994), S. 409-464.
- Platon:** *Nomoi-Gesetze*, Frankfurt/Main 1991.
- Pompino-Marschall, Bernd:** *Die Silbenprosodie: ein elementarer Aspekt der Wahrnehmung von Sprachrhythmus und Sprechtempo*, Tübingen 1990.
- Rasch, Rudolf A.:** »Timing and synchronization in ensemble performance«, in: John A. Sloboda (Hg.), *Generative processes in music*, Oxford 1988, S. 70-90.
- Schneider, Willy:** *Handbuch der Blasmusik*, Mainz 1954.
- Schütte, Hans:** »Ein Funktionsschema für die Wahrnehmung eines gleichmäßigen Rhythmus in Schallimpulsfolgen«, in: *Biological Cybernetics* 29 (1978), S. 49-55.
- Ders.:** »Subjektiv gleichmäßiger Rhythmus«, in: *Acustica* 41 (1978), S. 197-206.
- Seidel, Wilhelm:** »Rhythmus, Metrum, Takt«, in: Ludwig Finscher (Hg.), *Die Musik in Geschichte und Gegenwart*, 2. Ausgabe, Sachteil, Bd. 8, Kassel u.a. 1998, Sp. 257-317.
- Sismondo, Enrico:** »Synchronous, alternating, and phase-locked stridulation by a tropical katydid«, in: *Science* 249 (1990), S. 55-58.
- Spitzer, Manfred:** *Musik im Kopf. Hören, Musizieren, Verstehen und Erleben im neuronalen Netzwerk*, Stuttgart 2002.
- Spitznagel, Albert:** »Zur Geschichte der psychologischen Rhythmusforschung«, in: Aschersleben/Müller (Hg.), *Rhythmus. Ein interdisziplinäres Handbuch* (2000), S. 1-40.

- Thomas, David A./Farlow, James O.:** »Spuren einer Dinosaurierjagd«, in: *Spektrum der Wissenschaft*, Februar (1998), S. 86-91.
- Todd, Neil P. McAngus:** »The kinematics of musical expression«, in: *Journal of the Acoustical Society of America* 97 (1995), S. 1940-1949.
- Todd, Neil P. McAngus/Cody, Frederick W.:** »Vestibular responses to loud dance music: a physiological basis of the ›rock and roll threshold‹?« in: *Journal of the Acoustical Society of America* 107 (2000), S. 496-500.
- Vos, Joos/Rasch, Rudolf:** »The perceptual onset of musical tones«, in: *Perception & Psychophysics* 29 (1981), S. 323-335.
- Wing, Alan M./Woodburn, Charles:** »The coordination and consistency of rowers in a racing eight«, in: *Journal of Sport Sciences* 13 (1995), S. 187-197.
- Wundt, Wilhelm:** *Grundzüge der physiologischen Psychologie*, Leipzig 1874.
- Zaminer, Frieder:** »Metrum«, in: Hans-Heinrich Eggebrecht (Hg.), *Riemann Musiklexikon*, Mainz 1967, S. 568-570.
- Ders.:** »Rhythmus«, in: ebd., S. 803-808.
- ZDv, in:** *Zentrale Dienstvorschrift der Bundeswehr* 78/3 (1986).