

3Mo Model voor biofeedback met muziek

AUTEUR & CO-AUTEUR(S): Buhmann J., & Maes P-J

REDACTEUR: Blondeel S.

ONDERZOEKSINSTITUUT: Universiteit Gent, IPEM - Instituut voor Psychoacustica en Elektronische Muziek

ABSTRACT

In de sport en motorische rehabilitatie is het zeer belangrijk om fysiologische processen en fysieke bewegingen optimaal te reguleren en controleren. Real-time auditieve feedback van zulke fysiologische en fysieke parameters door middel van geluiden (ook wel "sonificatie" genoemd) blijkt hier uitermate geschikt voor te zijn. In dergelijke biofeedbacksystemen blijkt naast het inzetten van geluid, het gebruik van muziek minder onderzocht te zijn. In dit artikel stellen we dat het gebruik van muziek en muzikale principes een toegevoegde waarde heeft ten opzichte van enkel geluidssignalen in het psychologisch en fysiek verbeteren van sport en motor rehabilitatie prestaties. Om de drie belangrijkste functies van muziek die hieraan bijdragen te beschrijven, ontwikkelden we het 3Mo model. Deze drie functies betreffen de kracht van muziek om te motiveren en om fysiologische en fysieke processen te monitoren en/of te modificeren. Het 3Mo model verenigt concepten en theorieën die gaan over de menselijke sensomotorische interactie met muziek, en geeft de onderliggende psychologische en fysiologische beginsels in detail weer. Het model is als conceptueel raamwerk ontwikkeld om als leidraad te dienen voor toekomstig onderzoek naar muzikale biofeedback systemen in de sport en motor rehabilitatie.

Sleutelwoorden: Muziek, biofeedback, lopen, tempo, motivatie, bewegingsmanipulatie

Datum: 01/07/2017

Extra bronnen: Zie lijst achter tekst

Contactadres: Jeska.Buhmann@UGent.be, Pieterjan.Maes@UGent.be

Disclaimer: Het hierna bijgevoegde product mag enkel voor persoonlijk gebruik worden afgehaald. Indien men wenst te dupliceren of te gebruiken in eigen werk, moet de bovenvermelde contactpersoon steeds verwittigd worden. Verder is een correcte bronvermelding altijd verplicht!



INTRODUCTIE

Sporters luisteren op verschillende momenten en om verschillende redenen naar muziek. Vooral tijdens een warm-up of vlak voor een wedstrijd gebruiken atleten muziek om zich op te peppen of om als het ware in een eigen wereld te geraken. Muziek kan geassocieerd worden met eerder beleefde successen of kan het geloof in jezelf vergroten. In al deze gevallen heeft muziek met name de functie om de sporter te motiveren en te laten focussen op de te leveren prestatie.

Een bekend succesverhaal is dat van Haile Gebrselassie. Hij behaalde het wereldrecord op de 10.000 meter terwijl muziek van Scatman door de speakers in het stadion schalde. "Het ritme was perfect om op te lopen", aldus Gebrselassie. Behalve dat de muziek hem wellicht motiveerde, is het in dit geval ook het tempo van de muziek dat hem als het ware bleef meentrekken en voorkwam dat hij zou vertragen.

Dit principe van verschillende tempo's die elkaar zodanig beïnvloeden dat ze gaan samenvallen, wordt ook wel "entrainment" genoemd. Binnen de sport en staprehabilitatie is dit een interessant verschijnsel om stapfrequentie, ofwel het aantal stappen per minuut te beïnvloeden ter verbetering van bijvoorbeeld loopprestaties of om blessures te voorkomen. Dit gebeurt met name door het inzetten van auditieve biofeedback.

Bij auditieve biofeedback of "sonificatie" worden fysiologische en fysieke parameters (bv. staptempo) in real-time vertaald naar geluidsparementers zoals bijvoorbeeld luidheid, toonhoogte en ritme (Dubus & Bresin, 2013; Hermann & Hunt, 2005). Muzikale biofeedback is een speciale vorm van sonificatie waar nog niet vaak gebruik van gemaakt wordt (Bergstrom, Seinfeld, Arroyo-Palacios, Slater, & Sanchez-Vives, 2014; Moens et al., 2014; Van Dyck et al., 2015). Meestal wordt sonificatie gebruikt om de gebruiker bewust te maken van zijn of haar fysiologische processen (bv. ademhaling) of fysieke bewegingen. Als je je

hier eenmaal bewust van bent, kun je ze controleren en optimaliseren.

In dit artikel stellen we dat muziek als biofeedback een toegevoegde waarde heeft boven het gebruik van geluid. We zullen dit aan de hand van de drie belangrijkste functies van muziek en muzikale biofeedback uiteenzetten: de kracht van muziek om te motiveren, de mogelijkheid om m.b.v. muzikale biofeedback fysiologische en/of fysieke processen te monitoren, en de capaciteit om die processen te beïnvloeden ofwel te modificeren.

Onze aanpak is gebaseerd op de idee dat interactie met muziek gevoelens van empowerment oproept (Leman, 2016). We stellen muziek centraal bij de ontwikkeling van interactieve techniek die biofeedback gebruikt. Hiervoor kijken we naar informatie vanuit verschillende disciplines, zoals musicologie, cognitiewetenschappen, (neuro)fysiologie en bewegingswetenschappen. Concepten en theorieën uit deze disciplines smelten samen in een algemeen model voor muzikale biofeedback: het 3Mo model, een conceptueel raamwerk met richtlijnen voor toekomstig onderzoek en ontwikkeling van applicaties en technieken voor muzikale biofeedback.

MOTIVATIE

Sport en motorische rehabilitatie gaan vaak gepaard met zware inspanningen, vermoeidheid, pijn en eentonige herhalingen, en vergen daarom de nodige motivatie om te volharden. Muziek bezit een aantal specifieke kwaliteiten die uitermate geschikt zijn om motivatie te bevorderen. Zo kan muziek ons spontaan aanzetten tot actief bewegen, positief inwerken op onze gemoedstoestand, gevoelens van beloning opwekken en zelfs onze pijngrens verhogen. Om die reden zijn we ervan overtuigd dat muziek en muzikale biofeedback uitermate geschikt zijn in de context van sport en motorische rehabilitatie. Echter, diepgaande wetenschappelijk inzichten omtrent muziek en motivatie zijn onontbeerlijk voor doeltreffende en doordachte toepassingen van muziek en

muzikale biofeedback tijdens fysieke inspanningen.

Muziek en beweging

Een typisch effect van muziek is dat het mensen vaak spontaan aanzet tot beweging. Dit kan zich uiten in verschillende vormen, gaande van het tikken van de voet, het wiegen van de heupen, tot “headbanging” of het spelen van luchtgitaar. In de wetenschappelijk literatuur worden hier twee mechanismen voor verantwoordelijk geacht. Een eerste mechanisme betreft een *activatie (arousal) mechanisme*. Onderzoek heeft aangetoond dat de hersenstam (meer precies de reticulaire formatie) instaat voor het reguleren van de activatietoestand, die zich uit in een verhoogde of verlaagde alertheid en motivatie om tot actie over te gaan (Pfaff, 2006; Juslin & Västfjäll, 2008). Dergelijke regulatie van de activatietoestand, via muziek, kan bijdragen tot het leveren van topprestaties. Belangrijk om daarbij op te merken is dat de regulatie van de activatietoestand via muziek erg afhangt van de specifieke kenmerken van de muziek (zie Buhmann et al., 2016). Een tweede mechanisme betreft een *motor resonantie mechanisme*. Een interessante bevinding vanuit de hersenwetenschappen is dat het passief beluisteren van muziek automatisch hersendelen activeert die gelinkt zijn aan bewegingscontrole (zie Maes, Leman, Palmer, & Wanderley, 2014).

Muziek en gemoedstoestand

Naast het stimuleren van beweging is muziek zeer effectief in het opwekken van emoties en het beïnvloeden van de gemoedstoestand van mensen. Er is overvloedig onderzoek dat bewijst dat muziek een effect heeft op de activiteit van ons limbisch systeem, dat beschouwd wordt als de emotionele kern van onze hersenen (Blood & Zatorre, 2001; Koelsch, 2010; Peretz, Aubé & Armony, 2013). Onderzoek heeft uitgewezen dat emoties en de gemoedstoestand voor een groot deel gedefinieerd worden door middel van twee dimensies: valentie en activatie. Valentie betreft het gevoel van aangenaamheid (positieve/negatieve gevoelens), activatie betreft de mate van alertheid, zoals eerder

besproken. Onderzoek heeft uitvoerig aangetoond dat muziek een invloed kan uitoefenen op beide dimensies. Daarbij is het belangrijk om zowel muzikale kenmerken (tempo, modaliteit, consonantie, textuur, enz.) als de muzikale voorkeur van personen in rekening te brengen. Een correcte muziekkeuze dient hierin gemaakt te worden op basis van welke fysieke activiteit men voor ogen heeft (bv. opwarming versus prestatie).

Muziek en veranderd bewustzijn

Het luisteren of spelen van muziek kan leiden tot een veranderd bewustzijn, gekenmerkt door gevoelens gaande van lichte euforie tot extase en trance. Dergelijke toestanden van veranderd bewustzijn worden versterkt door het uitvoeren van ononderbroken, repetitieve en vaak heftige fysieke inspanning, zoals bij dans, sport, of rituelen. Onderzoek heeft laten zien dat fysieke inspanning leidt tot de aanmaak van lichaamseigen stoffen in het menselijke centrale zenuwstelsel, zoals onder meer endocannabinoïden en endorfines: een samenvoeging van *endogeen* (= lichaamseigen) en respectievelijk *cannabis* en *morfine*. Deze stoffen worden aangemaakt in het centrale zenuwstelsel en hebben een stress-verlagend effect, ondersteunen het immuunsysteem, en zorgen ervoor dat pijnsignalen onderdrukt worden. Het zijn tevens deze stoffen die bij lopers zorgen voor de zogenaamde “*runners’ high*”: het gelukzalige gevoel dat door sommigen als erg verslavend ervaren wordt, opgewekt tijdens en na het lopen. Onderzoek heeft aangetoond dat het beluisteren van muziek tijdens sportactiviteiten de pijndrempel van sporters verhoogt en de vermoeidheid verlaagt (Karageorghis & Priest, 2012). Ander onderzoek heeft uitgewezen dat dit effect zelfs nog sterker wordt wanneer mensen effectief zelf muziek produceren in combinatie met een fysieke activiteit (zie bv. Fritz et al., 2013).

MONITORING

Tijdens het trainen of gedurende een wedstrijd zijn sporters zich meestal bewust van hun bewegingen, ritmes en andere processen in het lichaam. Door middel van auditieve biofeedback kunnen we dit natuurlijke bewustzijn of monitor-mechanisme uitbreiden, waardoor sporters niet bewust uitgevoerde lichaamshandelingen gewaar worden. Dit type ondersteuning en bevordering van zelfregulatie kan op zijn beurt leiden tot optimale prestaties en verbeterde efficiëntie op het gebied van sport en rehabilitatie. Het is in deze disciplines met name van belang om meerdere biologische en/of bewegingsprocessen te kunnen coördineren.

Gelaagdheid in muziek en menselijke processen

Door de gelaagdheid binnen een muziekstuk is biofeedback met muziek volgens ons bij uitstek geschikt voor het coördineren van meerdere processen. Dit kan aan de hand van drie sonificatie-strategieën waarbij zowel de gelaagdheid van muziek als die van fysiologische- en/of bewegingsprocessen centraal staat. De eerste strategie draait om het menselijk vermogen om verschillende elkaar overlappende lagen geluid te verwerken. We denken dat het mogelijk is om met een uitgebalanceerd muziekstuk (ofwel meerdere lagen geluidsstimuli) de samenwerking van verschillende spieren te coördineren. De sonificatie van verschillende spieren kan het bewustzijn van hun onderlinge relatie vergroten, zou het motorisch gedrag kunnen optimaliseren en spierverkrampingen en -blessures kunnen voorkomen.

In een tweede strategie gaat het niet om het vermogen om verschillende lagen muziek te kunnen onderscheiden, maar juist om het eindresultaat: hoe meerdere geluidslagen samensmelten in een op zichzelf staand muzikaal object. Het idee is dat een optimale coördinatie van verschillende processen leidt tot aangenaam klinkende output, die als beloning voor de geleverde prestatie dienst doet.

Bij de derde strategie draait het om het samengaan van verschillende periodiciteiten in zowel lichamelijke processen als in muziek. Muziek bestaat uit meerdere herhaalde patronen en ritmes, waarvan de periodiciteiten veelvouden van elkaar zijn. Een fysiologisch proces, zoals ademhaling of hartslag, heeft zijn eigen periodiciteit, maar zo'n proces staat ook in verhouding tot andere processen. Synchronisatie van verschillende periodiciteiten blijkt een fysieke oefening gemakkelijker te maken en efficiëntie te verhogen. Daarbij moet rekening gehouden worden met het feit dat de verhouding in periodiciteiten kan veranderen naarmate de intensiteit van de taak verandert. Zo verschuift de adem-pedaal verhouding bij professionele wielrenners van 1:3 naar 1:2 als de intensiteit verhoogt of de sportieve inspanning langer duurt (McConnell, 2011).

Taakgerichte muziekkeuze

Waar we bij het gebruik van muziek ter motivatie ijverden voor het gebruik van eigen geprefereerde songs en/of playlists, moeten we bij monitoring uitgaan van muziek met specifieke eigenschappen die passen bij de taak en bijbehorende bewegingen en processen. We geven er daarom de voorkeur aan om binnen een set van zelfgekozen muziek te filteren op songs die voor de taak geschikt zijn. Denk hierbij bijvoorbeeld aan muziek die qua tempo past bij de cadens van hardlopen of wandelen. Op deze manier kan de muziek optimaal motiveren terwijl de gebruiker tegelijkertijd bewust gemaakt wordt van zijn of haar bewegingen.

MODIFICATIE

Het monitoren van iemands gedrag (beweging, fysiologische activiteit, prestatie, enz.) via muzikale feedback is in eerste instantie gericht op het aanscherpen van de eigen gewaarwording en het bewustzijn van dit gedrag (= informatie-gericht). In tweede instantie echter kan deze informatie gebruikt worden om iemands gedrag aan te passen. Wij onderscheiden twee strategieën waarmee aanpassingen in gedrag gerealiseerd kunnen worden via muzikale feedback. Deze strategieën

verwijzen naar twee gangbare leermethoden, met name 'doelgericht leren' en 'leren via bekrachtiging'.

Bij de eerste strategie, gebaseerd op doelgericht leren, is het noodzakelijk iemand expliciete kennis te verschaffen omtrent het gewenste gedrag (= doel). Door het werkelijke gedrag en het gewenste gedrag te verklanken door middel van muzikale feedback, kan de persoon door vergelijking van beide zijn of haar gedrag bijsturen. Zoals Ram & Leake (1995, p.1) aangeven, vergt dit doelgerichte leergedrag een bewuste aandacht om gedrag bij te sturen, waardoor een dergelijke strategie vaak niet de meest aangewezen strategie is.

Een alternatieve, bijzonder krachtige strategie is gebaseerd op het positief bekrachtigen (= belonen) van gewenst gedrag en het negatief bekrachtigen (= bestraffen) van ongewenst gedrag. Bij deze strategie is het niet nodig om expliciete kennis te verschaffen omtrent het gewenste gedrag. Echter, wat men wel doet, is het koppelen van een beloning aan het gewenste gedrag. Omwille van die beloning zouden mensen spontaan geneigd zijn het gewenste gedrag te vertonen. Denk maar wat een snoepje teweeg kan brengen bij een kind. Onderzoek heeft aangetoond dat het dopamine-beloningssysteem een belangrijke rol speelt in dit mechanisme (Schultz, 1999; Wise, 2004). Andere onderzoeken hebben eveneens laten zien dat het luisteren naar muziek het dopamine-beloningssysteem activeert (Blood & Zatorre, 2001; Menon & Levitin, 2005; Alluri et al., 2015). Wij zullen verder argumenteren dat muziek verschillende kwaliteiten bezit die mensen aantrekken en zodoende kunnen gebruikt worden als positieve bekrachtiger in het aanpassen en sturen van gedrag. We verwijzen daarbij naar twee specifieke muzikale beloningsmechanismen; de ene is een mechanisme gebaseerd op automatische reacties van de auditieve hersenstam, de andere is gebaseerd op een voorspellend mechanisme van het menselijke cognitieve apparaat.

Beloning gestuurd door de hersenstam

De hersenstam is een evolutionair erg oud deel van de hersenen dat onder andere verantwoordelijk is voor de vroege verwerking van auditieve informatie. Specifiek voor de hersenstam is zijn automatische reactie op geluid dat dreiging signaleert, zoals plotse, luide, dissonante of zeer laag- of hoogfrequente geluiden (Juslin & Västfjäll, 2008). Dergelijke reactie leidt tot een onmiddellijk verhoogde activatie en alertheid, en in extreme gevallen tot een zogenaamde vecht-of-vlucht reactie. In lijn met onze leermethode via bekrachtiging kunnen dergelijke geluiden (zoals dissonantie, distorsie en ruis) gekoppeld worden aan ongewenst gedrag waardoor mensen aangezet worden om hun gedrag bij te sturen. In aanvulling op deze negatieve bekrachtiging is het misschien nog belangrijker om gewenst gedrag positief te bekrachtigen via aangename geluiden zoals zachte, harmonische, consonante en heldere klanken/muziek om zodoende mensen aan te zetten om dit gedrag te vertonen. Een voorbeeld van een toepassing van een dergelijke strategie zou het hertrainen van balans kunnen zijn. Bij wielrenners/wielrensters zou bijvoorbeeld het verschil in druk op het linker- en rechterpedaal aan een ruisniveau gekoppeld kunnen worden. Hoe groter het drukverschil, des te slechter de balans en des te meer de aangeboden muziek verstoord wordt door ruis. Omdat dit als hoogst onaangenaam ervaren wordt, is de veronderstelling dat mensen spontaan geneigd zijn om hun balans te vergroten door te trachten een zuivere, aangename klank te verkrijgen. Een gelijkaardige strategie wordt, in het kader van een Europees project (<http://www.grensregio.eu/projecten/nano4sports>), momenteel ook uitgetest bij lopers met de bedoeling om de impact van het neerkomen van de voet te reduceren via muzikale feedback. Op die manier kan muziek bijdragen tot blessurepreventie.

Beloning gestuurd door voorspellingsmechanisme

Binnen de cognitieve wetenschappen wordt het meer en meer gangbaar om het menselijke brein te beschouwen als een “voorspellingsmachine” (Friston & Kiebel, 2009; Clark, 2013). In onze waarneming van de wereld rondom ons, en ons handelen in deze wereld zijn we steeds bezig met het maken van voorspellingen. Dit gebeurt ook bij het waarnemen en spelen van muziek. Muziekonderzoek heeft aangetoond dat ons vermogen om op gebeurtenissen in muziek te anticiperen een belangrijke bron vormt van muzikaal plezier en beloning (Huron, 2006; Gebauer et al., 2012; Zatorre & Salimpoor, 2013). Net daarom is muziek relevant voor gebruik als positieve/negatieve bekrachtiger in strategieën om gedrag te sturen via muziek. In hetgeen volgt bespreken wij kort twee van dergelijke strategieën, namelijk spontane synchronisatie en auditief-motorische associatie.

Spontane synchronisatie. Synchronisatie is het fenomeen waarbij ritmische lichaamsbewegingen afgestemd worden op de muzikale beat, zoals in het meetikken van de voet met de beat. Synchronisatie vergt het vermogen om op het moment van de beat te anticiperen. Het succesvol voorspellen van de beat leidt tot sterke gevoelens van plezier, controle en beloning. Vermoedelijk daarom hebben mensen vaak de spontane neiging om hun bewegingen te synchroniseren met de muzikale beat. Met andere woorden, de muzikale beat oefent een aantrekkingskracht uit op mensen, die als positieve bekrachtiger ingezet kan worden in muzikale strategieën om gedrag te sturen. Dit opent mogelijkheden om het tempo waarmee ritmische bewegingen uitgevoerd worden te manipuleren (versnellen en vertragen). Om dit te testen werd een experiment opgezet door Van Dyck et al. (2015). In hun studie werd een test gedaan met lopers (N = 16) om te kijken of hun comforttempo tijdens het lopen versneld en vertraagd kon worden door het overeenkomstige tempo van muziek beluisterd tijdens het lopen te manipuleren. Lopers kregen

de taak om vier ronden van 200m te lopen op een voor hen comfortabel tempo. De strategie die getest werd om het looptempo te beïnvloeden verliep in drie fasen. In een eerste fase (eerste ronde) zochten de lopers een voor hen comfortabel tempo. Dit tempo werd geregistreerd (door middel van de accelerometers en gyroscopen van IPods bevestigd aan de enkels). In een tweede fase (tweede ronde) werd muziek afgespeeld met een tempo dat overeenkomt met het looptempo geregistreerd in ronde 1. Tenslotte, in een derde fase (derde en vierde ronde), werd het muzikale tempo geleidelijk versneld, vertraagd, of bleef het gelijk (-3, -2.5, -2, -1.5, -1, 0, +1, +1.5, +2, +2.5, of +3%). Uit de resultaten bleek dat manipulaties van het muzikale tempo een verandering van looptempo tot gevolg hadden in dezelfde richting als de manipulaties.

Auditief-motorische associatie. Naast het volgen van louter de muzikale beat, hebben mensen ook vaak de spontane neiging om andere parameters in de muziek uit te drukken in overeenkomstige lichaamsbewegingen (bv. amplitude profiel, energieniveau, frasering, enz.). Gelijkaardig aan de strategie gebaseerd op spontane synchronisatie opent dit mogelijkheden om andere parameters dan louter tempo te ondersteunen en/of bij te sturen bij sporters (bv. krachtverdeling over de tijd, verhouding kracht/snelheid, grootte van een beweging, gelijkmatigheid van een beweging, enz.).

CONCLUSIE

Alhoewel auditieve biofeedback door middel van geluidssignalen zijn nut heeft bewezen in de sport en motor rehabilitatie, is het gebruik van muziek in dergelijke systemen minder uitvoerig onderzocht. In dit artikel stellen we dat muziek een toegevoegde waarde heeft om psychologische en fysieke parameters te verbeteren. We presenteren het 3Mo model dat de drie belangrijkste functies beschrijft die hieraan bijdragen, namelijk motivatie, monitoring en modificatie. Alhoewel het model belangrijke concepten en principes uiteenzet, zijn er nog vele uitdagingen om de potentie van muziek in biofeedback systemen te optimaliseren. Zo is er meer onderzoek nodig om de muzikale en akoestische parameters te bepalen die muziek motivationeel of relaxerend maken. Ook zijn er nieuwe methodes nodig om (automatisch) gelaagde periodiciteitspatronen in muziek te analyseren. Daarnaast zouden modificatie strategieën die bewegingen proberen te manipuleren verder getest en ontwikkeld moeten worden. Ze zouden zowel temporele (bv. staptempo), spatiale (bv. stapgrootte) en gecombineerde (bv. snelheid) aspecten moeten omvatten. Nog een belangrijke uitdaging is het verder integreren en optimaliseren van fysiologische en fysieke processen en hoe deze best samenwerken. Als laatste dient er vooruitgang geboekt te worden op het vlak van hard- en software om signalen betrouwbaar te sonificeren. Binnen het 3Mo model gaan we ervan uit dat er zeer interdisciplinair (musicologie, psychologie, kunst, neuro-, bewegings- en ingenieurswetenschappen) gewerkt moet worden om echte vooruitgang te boeken op het vlak van muzikale biofeedback in de sport en motor rehabilitatie.

REFERENTIES

- Alluri, V., Brattico, E., Toiviainen, P., Burunat, I., Bogert, B., Numminen, J., et al. (2015). Musical expertise modulates functional connectivity of limbic regions during continuous music listening. *Psychomusicology* 25, 443–454.
- Bergstrom, I., Seinfeld, S., Arroyo-Palacios, J., Slater, M., & Sanchez-Vives, M. V. (2014). Using music as a signal for biofeedback. *International Journal of Psychophysiology*, 93(1), 140-149.
- Blood, A. J., and Zatorre, R. J. (2001). Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated in reward and emotion. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 98, 11818–11823.
- Buhmann, J., Desmet, F., Moens, B., Van Dyck, E., and Leman, M. (2016). Spontaneous velocity effects of musical expression on self-paced walking. *PLoS ONE* 11:e0154414.
- Clark, A. (2013). Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science. *Behav. Brain Sci.* 36, 181–204.
- Dubus, G., & Bresin, R. (2013). A systematic review of mapping strategies for the sonification of physical quantities. *PloS one*, 8(12), e82491.
- Friston, K., and Kiebel, S. (2009). Predictive coding under the free-energy principle. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 364, 1211–1221.
- Fritz, T. H., Hardikar, S., Demoucron, M., Niessen, M., Demey, M., Giot, O., et al. (2013). Musical agency reduces perceived exertion during strenuous physical performance. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 110, 17784–17789.
- Gebauer, L., Kringelbach, M. L., and Vuust, P. (2012). Ever-changing cycles of musical pleasure: the role of dopamine and anticipation. *Psychomusicology* 22, 152–167.
- Hermann, T., & Hunt, A. (2005). Guest editors' introduction: An introduction to interactive sonification. *IEEE multimedia*, 12(2), 20-24.
- Huron, D. B. (2006). *Sweet Anticipation: Music and the Psychology of Expectation*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Juslin, P. N., & Västfjäll, D. (2008). Emotional responses to music: the need to consider underlying mechanisms. *Behav. Brain Sci.* 31, 559–575.
- Karageorghis, C. I., & Priest, D.-L. (2012). Music in the exercise domain: a review and synthesis (part II). *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 5(1): 44-66.
- Koelsch, S. (2010). Towards a neural basis of music-evoked emotions. *Trends Cogn. Sci.* 14, 131–137.
- Leman, M. (2016). *The expressive moment: How*

interaction (with music) shapes human empowerment:
MIT Press.

Maes, P.-J., Leman, M., Palmer, C., and Wanderley, M. M. (2014). Action-based effects on music perception. *Front. Psychol.* 4:1008.

McConnell, A. (2011). *Breathe strong, perform better*. Champaign, IL: Human Kinetics.

Menon, V., and Levitin, D. J. (2005). The rewards of music listening: response and physiological connectivity of the mesolimbic system. *Neuroimage* 28, 175–184.

Moens, B., Muller, C., van Noorden, L., Franěk, M., Celie, B., Boone, J., . . . Leman, M. (2014). Encouraging spontaneous synchronisation with D-Jogger, an adaptive music player that aligns movement and music. *PloS one*, 9(12), e114234. doi: 10.1371/journal.pone.0114234

Peretz, I., Aubé, W., and Armony, J. L. (2013). “Towards a neurobiology of musical emotions,” in *The Evolution of Emotional Communication: From Sounds in Nonhuman Mammals to Speech and Music in Man*, eds E. Atenmüller, S. Schmidt and E. Zimmerman (Oxford: Oxford University Press), 277–299.

Pfaff, D. W. (2006). *Brain Arousal and Information Theory*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Ram, A., and Leake, D. B. (1995). “Learning, goals, and learning goals,” in *Goal-Driven Learning*, eds A. Ram and D. B. Leake (Cambridge, MA: MIT Press), 1–38.

Schultz, W. (1999). The reward signal of midbrain dopamine neurons. *News Physiol. Sci.* 14, 249–255.

Van Dyck, E., Moens, B., Buhmann, J., Demey, M., Coorevits, E., Dalla Bella, S., & Leman, M. (2015). Spontaneous entrainment of running cadence to music tempo. *Sports medicine-open*, 1(1), 1. doi: 10.1186/s40798-015-0025-9

Wise, R. A. (2004). Dopamine, learning and motivation. *Nat. Rev. Neurosci.* 5, 483–494.

Zatorre, R. J., and Salimpoor, V. N. (2013). From perception to pleasure: music and its neural substrates. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 110(Suppl. 2), 10430–10437.