

Alfredo Raglio, Daniele Molteni, Chiara Imbriani, Monica Panigazzi

La riabilitazione neuromotoria con tecniche di “sonification”

Istituti Clinici Scientifici Maugeri IRCCS, Pavia, Italy

RIASSUNTO. L'impiego del suono e della musica in un contesto riabilitativo è ormai supportato da numerose evidenze scientifiche. La reiterazione di movimenti orientati al recupero funzionale, tipica dei training riabilitativi, può essere efficacemente coadiuvata da un adeguato supporto sonoro-musicale. Questa integrazione ha lo scopo di introdurre un feedback audio-motorio, descrivendo e modulando il movimento, ma anche migliorandone potenzialmente l'esecuzione. Lo stimolo sonoro può inoltre indurre cambiamenti plastici e stimolare i circuiti cerebrali deputati ai meccanismi di ricompensa e motivazione incrementando il coinvolgimento del paziente e la sua compliance nel percorso riabilitativo. In particolare, la Neurologic Music Therapy (NMT) mostra evidenze scientifiche in questa direzione declinandole in diverse tecniche utilizzate per perseguire obiettivi inerenti l'ambito motorio, cognitivo e sensoriale. La “sonification” si pone come tecnica finalizzata a rappresentare dati cinetici (ottenuti grazie all'impiego di sensori) mediante opportune sonorizzazioni (elaborate da software di sintesi sonora) con lo scopo di migliorare il controllo del movimento dalla sua pianificazione alla sua esecuzione migliorandone il feedback propriocettivo. In un recente studio (realizzato su pazienti con ictus in fase sub-acuta) basato sull'utilizzo del kit “SonicHand” si sono ottenuti risultati significativi nella riabilitazione delle funzioni motorie degli arti superiori, nonché sulla qualità di vita dei pazienti e sul dolore percepito durante la riabilitazione. I risultati emersi dallo studio supportano dunque l'intervento con sonification nella riabilitazione degli arti superiori. Su tali basi è stato sviluppato un nuovo progetto di ricerca basato sull'utilizzo di tecniche di sonification e volto alla riabilitazione del cammino in pazienti con ictus, malattia di Parkinson e Sclerosi Multipla.

Parole chiave: Sonification, Neurologic Music Therapy, Ictus, Riabilitazione neuromotoria.

ABSTRACT. *The use of sound and music in the rehabilitation context is now supported by a lot of scientific evidence. The reiteration of tasks-oriented movements to functional recovery, typical of the rehabilitation training, can be effectively supported by adequate sonorous-music stimuli. This integration aims at introducing an audio-motor feedback, describing and modulating the movement. In addition, the sonorous-music stimuli induce potential plastic changes and stimulates brain networks underlying to the mechanisms of reward and motivation, improving the patient's involvement and compliance in the rehabilitation activities. In particular, the Neurologic Music Therapy (NMT) provided interesting results based on different techniques that use sonorous-music elements to achieve objectives related to motor, cognitive and sensory domains. The sonification arises as a technique designed to represent kinetic data (obtained by the use of sensors) through appropriate*

Molte evidenze supportano e promuovono l'integrazione del suono e della musica in un contesto riabilitativo grazie alla loro azione estensiva sul nostro cervello in particolare su aree limbiche e paralimbiche, aree motorie, aree deputate al processamento cognitivo e del linguaggio e sui circuiti neurochimici alla base della motivazione, della ricompensa e regolazione del tono dell'umore (1-5). La riabilitazione motoria supportata dalla musica prevede, in generale, la reiterazione dei movimenti associati a uno specifico feedback uditivo o musicale. È possibile quindi un utilizzo della musicoterapia anche nel contesto riabilitativo per raggiungere obiettivi che riguardano il recupero motorio ma che impattano positivamente anche su aspetti cognitivi, linguistici, ma anche emotivi, di coinvolgimento, ricompensa e motivazione (6-12). Supportando l'intervento riabilitativo con una componente musicale è possibile stimolare il circuito audio-senso-motorio e indurre potenziali cambiamenti plastici. Tali cambiamenti non sono limitati ai solo circuiti motori e tenderebbero a perdurare anche dopo il training riabilitativo (6, 13-17). A partire da queste considerazioni che definiscono il razionale neurofisiologico per l'impiego della musica in riabilitazione si è sviluppata la Neurologic Music Therapy (NMT) che può essere definita come un insieme di tecniche di trattamento basate su evidenze e consolidate grazie a ricerche scientifiche in ambito riabilitativo che fanno uso di elementi propri del suono e della musica (ritmo, melodia, armonia, dinamica, tempo...) per raggiungere obiettivi inerenti l'ambito motorio (velocità della camminata, miglioramento del range articolare, etc.), del linguaggio (miglioramento dell'articolazione, prosodia...), sensoriale (attivazione, integrazione sensoriale) e cognitivo (memoria, attenzione, funzioni esecutive, etc.). Il musicoterapeuta crea esercizi ad hoc oppure integra, utilizzando il supporto sonoro-musicale, quelli previsti nelle cure standard con la finalità di riabilitare/ottimizzare il funzionamento di specifiche abilità (18-19).

La “sonification”, che si accosta per finalità alle tecniche di riabilitazione neuromotoria della NMT, è la rappresentazione di informazioni relative al movimento mediante l'utilizzo di elementi sonori (escludendo il parlato). È una tecnica, omologa alla visualizzazione ma in ambito di percezione uditiva, con cui vengono modellati suoni in risposta all'interazione con una fonte di dati (20-21).

sonorous-music patterns (processed by a sound synthesis software) with the aim of improving the control of the movement from its planning to its execution, also improving the proprioceptive feedback. In a recent study involving stroke patients in a sub-acute stage, the use of the “SonicHand” kit was positively evaluated not only in the rehabilitation of upper limbs motor functions, but also in the quality-of-life improvement and in perceiving pain during rehabilitation. On this basis, a new research project (“SonicWalk”) has been developed based on the use of sonification techniques and aimed at gait rehabilitation in patients with stroke, Parkinson’s disease and Multiple Sclerosis.

Key words: Sonification, Neurologic Music Therapy, Stroke, Neuromotor Rehabilitation.

Le informazioni, che possono essere di diversa natura ma che in questo specifico contesto limitiamo a dati relativi a movimenti, sono tradotte attraverso parametri sonori (ad esempio: altezza, volume, disposizione nello spazio, qualità timbrica...).

La “sonification” dei movimenti ha lo scopo di migliorare il controllo del movimento dalla sua pianificazione alla sua esecuzione migliorandone il feedback propriocettivo (22). Questo accade perché si viene a creare uno stretto legame tra movimento e suono (meccanismo di feedback - feedforward) che rende la “sonification” una risorsa di interesse in ambito riabilitativo come strategia adatta per fornire un feedback aumentato migliorando quindi la percezione multimodale e rinforzando il legame tra percezione e azione con il risultato di un più efficiente apprendimento e controllo della performance motoria (23-27).

La “sonification” richiede l’uso di tecnologie per generare suoni: i movimenti del corpo vengono mappati da sensori in grado di tradurre parametri di movimento (velocità, forza, pressione, etc.) in un insieme di valori numerici che poi potranno essere interpretati ed elaborati da appositi motori di sintesi sonora. Quel che accade sostanzialmente è che la persona, tramite il movimento, riesce a modulare in tempo reale i parametri del suono che sarà a sua volta anche un feedback dell’esecuzione del movimento. L’elemento sonoro viene utilizzato per integrare il feedback propriocettivo deficitario e per promuovere la riacquisizione di schemi di motori. Il feedback può essere di 2 tipi: intrinseco se le informazioni sono derivate dal sistema sensoriale di chi esegue il movimento oppure estrinseco, o aumentato, se fornito da un mediatore esterno (istruzioni date da un istruttore oppure fornito mediante una tecnologia). Il feedback aumentato opportunamente implementato favorisce la velocità di apprendimento di compiti motori, rende più tollerabile la ripetitività con cui sono strutturati i training, favorisce motivazione, coinvolgimento e apprendimento (28-32).

Studi recenti documentano l’impiego della “sonification” per la riabilitazione degli arti superiori (33-36). Questa tecnica può migliorare il processo riabilitativo facilitando l’integrazione dei sistemi uditivi e senso-motori (37-39). Inoltre, la componente sonora rinforza e supporta il sistema propriocettivo danneggiato e rende il processo riabilitativo più stimolante da un punto di vista emotivo e motivazionale (14,39). Alcuni studi per la sonorizzazione hanno utilizzato un suono sintetico i cui parametri, tipica-

mente frequenza e altezza, vengono modulati dal movimento (40-43). In altri studi riferiti alla riabilitazione della mano in pazienti post-stroke, è stata richiesta l’esecuzione di scale musicali attraverso il movimento con lo scopo finale di riprodurre “semplici filastrocche o altre melodie familiari” modulandone timbro e intensità (39,44). Un altro studio relativo alla riabilitazione del cammino ha combinato un suono ecologico (rumore di un passo nella neve) con un effetto predeterminato di glissando (45).

Trattamenti di tipo task-oriented, strutturati cioè sulla base di attività facilmente riferibili alla vita quotidiana ma che siano volte al raggiungimento di obiettivi riabilitativi, sono importanti per migliorare la destrezza e la funzionalità degli arti superiori dopo un ictus (46). L’intensità del trattamento e la motivazione del paziente sono fattori chiave per la riuscita della riabilitazione (47-48). A tale proposito integrare la figura del musicoterapeuta o trovare strategie per incentivare l’utilizzo del mezzo sonoro-musicale all’interno dell’equipe riabilitativa può contribuire a migliorare in senso ampio l’efficacia dell’intervento rendendolo più coinvolgente, aumentando motivazione e concentrazione nel paziente. Ciò permette di contrastare le resistenze che si riscontrano soprattutto nei pazienti che faticano a sostenere percorsi di riabilitazione intensivi (49).

La tecnologia può essere un ulteriore strumento motivazionale che va a incidere positivamente anche sull’efficacia e tempistica del training riabilitativo. Recenti sviluppi nel campo della realtà virtuale hanno reso possibile formulare nuovi paradigmi applicativi ottenuti dall’integrazione degli attuali percorsi riabilitativi con interventi strumentali. La riabilitazione supportata dalla realtà virtuale ne è un esempio che dimostra come tale aspetto possa assumere un ruolo significativo anche nel recupero dei deficit motori prodotti da gravi cerebrolesioni acquisite. In particolare, le tecniche di riabilitazione sensoriale-motoria ottenute mediante dispositivi di realtà virtuale vengono utilizzate in supporto alle tradizionali tecniche riabilitative; esse sembrano in grado di fornire parametri oggettivi per la valutazione del paziente, accelerare il processo di recupero motorio e migliorare la prestazione motoria alla dimissione (50-55).

SonicHand è il nome di un kit riabilitativo (Figura 1) oltre che di un progetto di ricerca, attivato dal Laboratorio di Ricerca in Musicoterapia degli Istituti Clinici Scientifici Maugeri IRCCS di Pavia, che sfrutta le peculiarità del feedback aumentato. Lo studio a esso collegato (56) ha valutato l’efficacia di un approccio di “sonification” sulle funzioni motorie degli arti superiori, la qualità della vita e il dolore percepito durante la riabilitazione della persona colpita da ictus e in fase subacuta. L’ictus cerebrale costituisce la seconda causa di morte e la terza causa di disabilità a livello mondiale, e la prima causa di disabilità negli anziani. Nel 35% dei pazienti colpiti da ictus, globalmente considerati, residua una disabilità grave. Le conseguenze di uno stroke nell’80-90% dei sopravvissuti portano a emiparesi, difficoltà motorie, problemi del linguaggio e altre disabilità che impattano fortemente con la qualità di vita della persona colpita e con la sua capacità di gestire in autonomia la quotidianità (57-59). I pazienti dello studio sono stati allocati in 2 gruppi: un intervento basato su 20 sedute (5 a settimana)

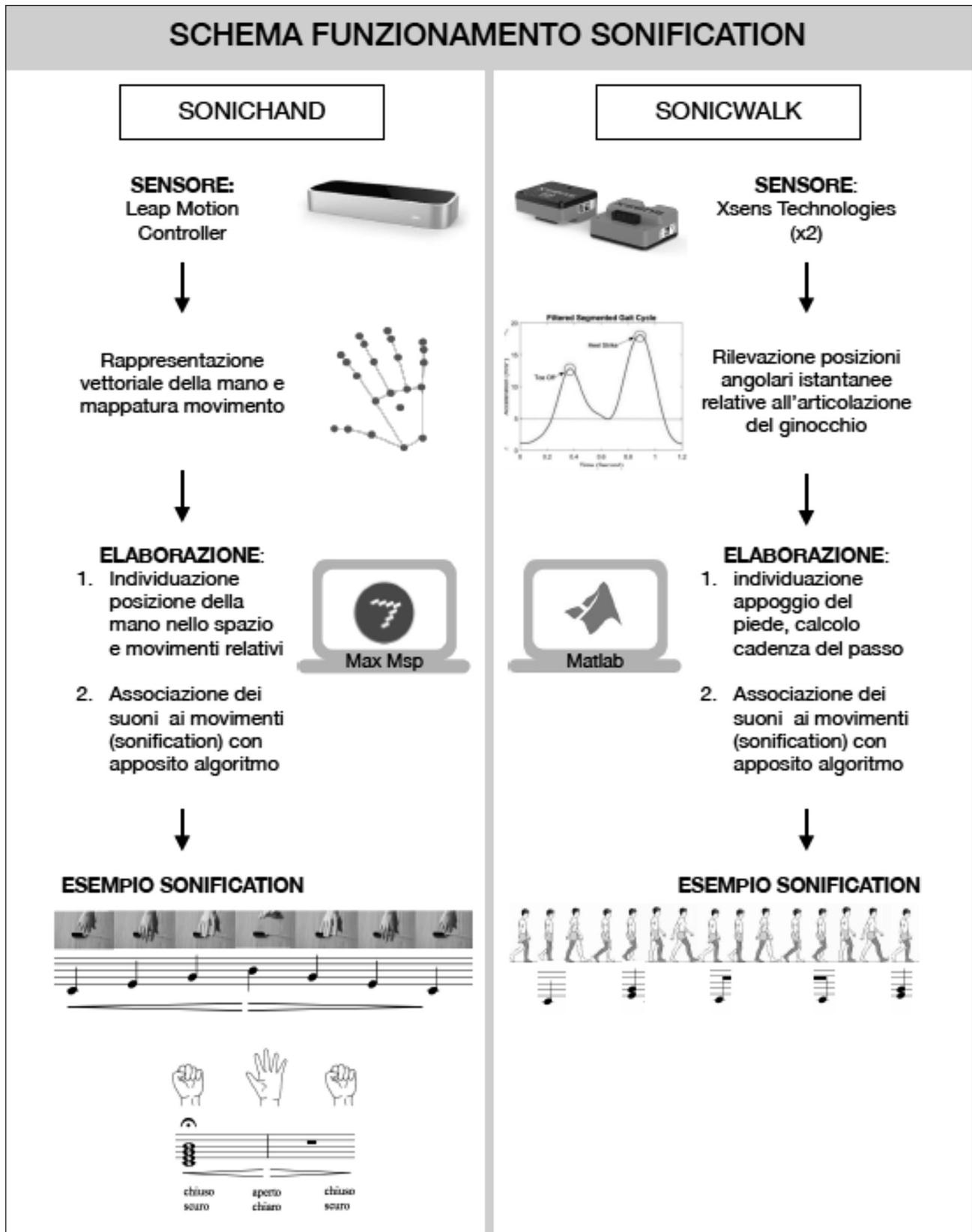


Figura 1. Schema che illustra le tecniche di "sonification" utilizzate nei progetti SonicHand e SonicWalk

di riabilitazione motoria standard degli arti superiori o un trattamento con gli stessi esercizi, della stessa durata e frequenza ma con il supporto di tecniche di "sonification". Per la rilevazione dei movimenti è stato impiegato il Leap Motion Controller, un sensore in grado di mappare i movimenti della mano fornendone i dati vettoriali a un software creato

ad hoc che si occupava di interpretare ed elaborare i dati cinetici e produrne la sonorizzazione.

L'assessment motorio ha previsto la somministrazione della Fugl-Meyer Upper Extremity Scale, il Box and Block Test e la Modified Ashworth Scale e della McGill Quality of Life-it e Numerical Pain Rating Scale per valu-

tare la qualità della vita e il dolore. La valutazione è stata eseguita alla baseline, dopo 2 settimane, alla fine del trattamento e al follow-up (1 mese dopo la fine del trattamento). Al termine del trattamento i punteggi totali della Fugl-Meyer Upper Extremity Scale e dei sub-items relativi a mano e polso, i punteggi di destrezza manuale dell'arto interessato e non interessato nel Box and Block Test, i punteggi del dolore della Numerical Pain Rating Scale sono migliorati significativamente nel gruppo sperimentale rispetto al gruppo di controllo. I risultati suggeriscono che le sedute basate sulla "sonification" possono essere considerate un efficace intervento standardizzato per l'arto superiore nella riabilitazione subacuta dell'ictus.

Partendo da questi risultati è stata introdotta una nuova sperimentazione che si rivolge alla riabilitazione del cammino sfruttando sia il razionale relativo alla "sonification" che quello su cui si basa la NMT (in particolare l'immediato adeguamento del sistema motorio ad uno stimolo esterno con una chiara ritmicità). Obiettivo di questo nuovo trial multicentrico, denominato SonicWalk (dall'omonimo kit riabilitativo, Figura 1) proposto Laboratorio di Ricerca in Musicoterapia degli Istituti Clinici Scientifici Maugeri IRCCS di Pavia, è studiare l'efficacia di una sonorizzazione in tempo reale dell'esercizio riabilitativo (avvalendosi di specifici sensori) sulla riabilitazione del cammino. In letteratura sono infatti riportati studi che documentano interventi riabilitativi con supporto di "sonification" per pazienti con disordini del movimento (60-68) ma in essi lo stimolo sonoro è di natura ritmico-uditiva (sonorizzazione dell'impulso ritmico) e non di natura propriamente musicale. SonicWalk, al contrario, prevede una "sonification" con una chiara connotazione musicale che rende lo stimolo, oltre che potenzialmente efficace, anche piacevole e prevedibile. Questa particolare forma di sonorizzazione del passo viene proposta come supporto e integrazione a una selezione di esercizi che rientrano nel tradizionale training riabilitativo di alcune popolazioni neurologiche (stroke, malattia di Parkinson e sclerosi multipla). Obiettivo primario è valutare l'efficacia rispetto alla velocità del cammino comparando l'intervento con un trattamento standard e, secondariamente, verificarne l'incidenza sulla riduzione della fatica percepita durante la riabilitazione oltre che valutarne l'impatto sulla qualità di vita del paziente.

La "sonification" appare dunque, nelle sue diverse forme, un innovativo e stimolante strumento riabilitativo che integra aspetti tecnologici e tecniche musicoterapeutiche con interessanti prospettive di efficacia che la letteratura scientifica ha posto in evidenza.

Bibliografia

- Raglio A. (2018). Music and neurorehabilitation: Yes, we can!. *Functional neurology*, 33(4), 173-174.
- Raglio, A., Imbriani, C., & Oddone, E. (2017). Musicoterapia e Medicina del Lavoro [Music therapy and Occupational medicine]. *Giornale italiano di medicina del lavoro ed ergonomia*, 38(4), 257-260.
- Raglio, A., Giambelluca, E., Balia, et al. (2020). Music as support to Occupational Therapy. La musica come supporto alla terapia occupazionale. *Giornale italiano di medicina del lavoro ed ergonomia*, 42(2), 133-136.
- Raglio A., Molteni D., Panigazzi M., et al. (2018). La riabilitazione con la musica nella Medicina Riabilitativa e nelle Cure Correlate: basi scientifiche e applicazioni, *Giornale Italiano di Medicina del Lavoro ed Ergonomia*, 40(1), Suppl. 59-66.
- Sihvonen, A.J., Särkämö, T., Leo, V., et al. (2017). Music-based interventions in neurological rehabilitation. *The Lancet Neurology*, 16(8), 648-660.
- Chatterjee, D., Hegde, S., & Thaut, M. (2021). Neural plasticity: The substratum of music-based interventions in neurorehabilitation. *NeuroRehabilitation*, 10.3233/NRE-208011. Advance online publication. <https://doi.org/10.3233/NRE-208011>
- Wilson B.A. Neuropsychological rehabilitation: state of the science. *S Afr J Psychol*. 2013;43(3):267-277. doi:10.1177/0081246313494156
- Supnet, C., Crow, A., Stutzman, S., et al. (2016). Music as medicine: the therapeutic potential of music for acute stroke patients. *Critical Care Nurse*, 36(2), e1-e7.
- Magee, W.L., & Baker, M. (2009). The use of music therapy in neuro-rehabilitation of people with acquired brain injury. *British Journal of Neuroscience Nursing*, 5(4), 150-156.
- Twyford, K., & Watson, T. (2008). *Integrated team working: Music therapy as part of transdisciplinary and collaborative approaches*. Jessica Kingsley Publishers.
- Sihvonen, A.J., Särkämö, T., Leo, V., et al. (2017). Music-based interventions in neurological rehabilitation. *The Lancet Neurology*, 16(8), 648-660.
- Schneider, S., Schönle, P.W., Altenmüller, E., et al. (2007). Using musical instruments to improve motor skill recovery following a stroke. *Journal of neurology*, 254(10), 1339-1346.
- Altenmuller, E., Marco-Pallares, J., Munte, T.F., et al. (2009). Neural reorganization underlies improvement in stroke-induced motor dysfunction by music-supported therapy. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169(1), 395-405.
- Schlaug, G. (2009). Part VI introduction: listening to and making music facilitates brain recovery processes. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169, 372.
- Zhang, Y., Cai, J., Zhang, Y., et al. (2016). Improvement in stroke-induced motor dysfunction by music-supported therapy: a systematic review and meta-analysis. *Scientific reports*, 6(1), 1-8.
- Bangert, M., & Altenmüller, E.O. (2003). Mapping perception to action in piano practice: a longitudinal DC-EEG study. *BMC neuroscience*, 4:26.
- Bangert, M., Peschel, T., Schlaug, G., et al. (2006). Shared networks for auditory and motor processing in professional pianists: evidence from fMRI conjunction. *Neuroimage*, 30(3), 917-926.
- Thaut, M., & Hoemberg, V. (Eds.). (2014). *Handbook of neurologic music therapy*. Oxford University Press (UK).
- Thaut, M.H., & Thaut, M. (2005). *Rhythm, music, and the brain: Scientific foundations and clinical applications (Vol. 7)*. Routledge.
- Hermann, T., Hunt, A., & Neuhoff, J.G. (2011). The "sonification" handbook (pp. 399-425). Berlin: Logos Verlag.
- Dubus, G., & Bresin, R. (2013). A systematic review of mapping strategies for the "sonification" of physical quantities. *PloS one*, 8(12), e82491.
- Effenberg, A.O. (2005). Movement "sonification": Effects on perception and action. *IEEE multimedia*, 12(2), 53-59.
- Stanton, T.R., & Spence, C. (2020). The influence of auditory cues on bodily and movement perception. *Frontiers in psychology*, 10, 3001.
- Dyer, J.F., Stapleton P., & Rodger, M. (2017). Mapping "sonification" for Perception and Action in Motor Skill Learning. *Front. Neurosci*. 11:463. doi: 10.3389/fnins.2017.00463
- Oppici, L., Frith, E., & Rudd, J. (2020). A perspective on implementing movement "sonification" to influence movement (and eventually cognitive) creativity. *Frontiers in Psychology*, 11.
- Schaffert, N., Janzen, T.B., Mattes, K., et al. (2019). A review on the relationship between sound and movement in sports and rehabilitation. *Frontiers in Psychology*, 10, 244.
- Castro, F., Osman, L., Di Pino, G., et al. (2021). Does "sonification" of action simulation training impact corticospinal excitability and audiomotor plasticity?. *Experimental Brain Research*, 1-17.
- Winstein, C.J. (1991). Knowledge of results and motor learning—implications for physical therapy. *Physical therapy*, 71(2), 140-149.

- 29) Kilduski, N.C., & Rice, M.S. (2003). Qualitative and quantitative knowledge of results: effects on motor learning. *American Journal of Occupational Therapy*, 57(3), 329-336.
- 30) F Dyer, J., Stapleton, P., & WM Rodger, M. (2015). "sonification" as concurrent augmented feedback for motor skill learning and the importance of mapping design. *The Open Psychology Journal*, 8(1).
- 31) Ghai, S., & Ghai, I. (2019). Role of "sonification" and Rhythmic Auditory Cueing for Enhancing Gait Associated Deficits Induced by Neurotoxic Cancer Therapies: A Perspective on Auditory Neuroprosthetics. *Frontiers in neurology*, 10, 21. <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.00021>
- 32) Mezzarobba, S., Grassi, M., Pellegrini, L., et al. (2018). Action Observation Plus "sonification". A Novel Therapeutic Protocol for Parkinson's Patient with Freezing of Gait. *Frontiers in neurology*, 8, 723. <https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00723>
- 33) Bevilacqua, F., Boyer, E.O., Françoise, J., et al. (2016). Sensorimotor learning with movement "sonification": perspectives from recent interdisciplinary studies. *Frontiers in neuroscience*, 10, 385.
- 34) Effenberg, A.O., Fehse, U., Schmitz, G., et al. (2016). Movement "sonification": effects on motor learning beyond rhythmic adjustments. *Frontiers in neuroscience*, 10, 219.
- 35) Friedman, N., Chan, V., Reinkensmeyer, A.N., et al. (2014). Retraining and assessing hand movement after stroke using the MusicGlove: comparison with conventional hand therapy and isometric grip training. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 11(1), 1-14.
- 36) Zondervan, D.K., Friedman, N., Chang, E., et al. (2016). Home-based hand rehabilitation after chronic stroke: Randomized, controlled single-blind trial comparing the MusicGlove with a conventional exercise program. *Journal of rehabilitation research and development*, 53(4), 457-472.
- 37) Scholz, D.S., Wu, L., Pitzer, J., et al. (2014). "sonification" as a possible stroke rehabilitation strategy. *Frontiers in neuroscience*, 8, 332.
- 38) Scholz, D.S., Rhode, S., Großbach, M., et al. (2015). Moving with music for stroke rehabilitation: a "sonification" feasibility study. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1337(1), 69-76.
- 39) Scholz, D.S., Rohde, S., Nikmaram, N., et al. (2016). "sonification" of arm movements in stroke rehabilitation—a novel approach in neurologic music therapy. *Frontiers in neurology*, 7, 106.
- 40) Scholz, D.S., et al. "sonification" of Arm Movements in Stroke Rehabilitation - A Novel Approach in Neurologic Music Therapy. *Front. Neurol.* 7:106 (2016).
- 41) Schmitz, G., Bergmann, J., Effenberg, A.O., et al. (2018). Movement "sonification" in stroke rehabilitation. *Frontiers in neurology*, 9, 389.
- 42) Ghai, S., Schmitz, G., Hwang, T.H., et al. (2018). Auditory proprioceptive integration: effects of real-time kinematic auditory feedback on knee proprioception. *Frontiers in neuroscience*, 12, 142.
- 43) Effenberg, A.O., & Schmitz, G. (2018). Acceleration and deceleration at constant speed: systematic modulation of motion perception by kinematic "sonification". *Annals of the New York Academy of Sciences* 1425 (2018), Nr. 1.
- 44) Nikmaram, N., Scholz, D.S., Großbach, M., et al. (2019). Musical "sonification" of arm movements in stroke rehabilitation yields limited benefits. *Frontiers in neuroscience*, 13, 1378.
- 45) Reh, J., Hwang, T.H., Schmitz, G., et al. (2019). Dual Mode Gait "sonification" for Rehabilitation After Unilateral Hip Arthroplasty. *Brain sciences*, 9(3), 66. <https://doi.org/10.3390/brainsci9030066>
- 46) Kwakkel, G., & Kollen, B.J. (2013). Predicting Activities after Stroke: What is Clinically Relevant? *International Journal of Stroke*, 8(1), 25-32. <https://doi.org/10.1111/j.1747-4949.2012.00967.x>
- 47) Kwakkel, G. (2006). Impact of intensity of practice after stroke: issues for consideration. *Disability and rehabilitation*, 28(13-14), 823-830.
- 48) Maclean, N., Pound, P., Wolfe, C., et al. (2000). Qualitative analysis of stroke patients' motivation for rehabilitation. *Bmj*, 321(7268), 1051-1054.
- 49) Street, A., Zhang, J., Pethers, S., et al. (2020). Neurologic music therapy in multidisciplinary acute stroke rehabilitation: Could it be feasible and helpful?. *Topics in stroke rehabilitation*, 27(7), 541-552.
- 50) Colombo, R., Raglio, A., Panigazzi, M., et al. (2019). The SonicHand Protocol for Rehabilitation of Hand Motor Function: A Validation and Feasibility Study. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering: a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 27(4), 664-672. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2019.2905076>
- 51) Schaffert, N., Braun Janzen, T., Ploigt, R., Schluter, S., Vuong, V., Thaut, M.H. (2020) Development and evaluation of a novel music-based therapeutic device for upper extremity movement training: A pre-clinical, single-arm trial. *PLoS ONE* 15(11): e0242552. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242552>
- 52) Partesotti, E., Peñalba, A., & Manzolli, J. (2018). Digital instruments and their uses in music therapy. *Nordic Journal of Music Therapy*, 27(5), 399-418.
- 53) Magee, W.L., & Burland, K. (2008). An exploratory study of the use of electronic music technologies in clinical music therapy. *Nordic Journal of Music Therapy*, 17(2), 124-141.
- 54) Ward, A., Davis, T., & Bevan, A. (2019). Music technology and alternate controllers for clients with complex needs. *Music Therapy Perspectives*, 37(2), 151-168.
- 55) Magee, W.L., & Burland, K. (2008). Using electronic music technologies in music therapy: Opportunities, limitations and clinical indicators. *British Journal of Music Therapy*, 22(1), 3-15.
- 56) Raglio, A., Panigazzi, M., Colombo, R., et al. (2021). Hand rehabilitation with "sonification" techniques in the subacute stage of stroke. *Scientific reports*, 11(1), 7237. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86627-y>
- 57) Magee, W.L., & Burland, K. (2008). Using electronic music technologies in music therapy: Opportunities, limitations and clinical indicators. *British Journal of Music Therapy*, 22(1), 3-15.
- 58) Pollock, A., Farmer, S.E., Brady, M.C., et al. (2014). Interventions for improving upper limb function after stroke. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (11).
- 59) Kwakkel, G., & Kollen, B.J. (2013). Predicting activities after stroke: what is clinically relevant?. *International Journal of stroke*, 8(1), 25-32.
- 60) Linnhoff, D., Alizadeh, S., Schaffert, N., et al. (2020). Use of Acoustic Feedback to Change Gait Patterns: Implementation and Transfer to Motor Learning Theory—A Scoping Review. *Journal of Motor Learning and Development*, 1(aop), 1-21.
- 61) Guerra, J., Smith, L., Vicinanza, D., et al. (2020). The use of "sonification" for physiotherapy in human movement tasks: a scoping review. *Science & Sports*, 35(3), 119-129.
- 62) Shen, X., & Mak, M.K. (2014). Balance and gait training with augmented feedback improves balance confidence in people with Parkinson's disease: a randomized controlled trial. *Neurorehabilitation and neural repair*, 28(6), 524-535.
- 63) Piron, L., Tonin, P., Atzori, A.M., et al. (2003). The augmented-feedback rehabilitation technique facilitates the arm motor recovery in patients after a recent stroke. *Studies in health technology and informatics*, 94, 265-267.
- 64) Ghai, S., & Ghai, I. (2019). Effects of (music-based) rhythmic auditory cueing training on gait and posture post-stroke: A systematic review & dose-response meta-analysis. *Scientific reports*, 9(1), 1-11.
- 65) Ghai, S., Ghai, I., Schmitz, G., et al. (2018). Effect of rhythmic auditory cueing on parkinsonian gait: a systematic review and meta-analysis. *Scientific reports*, 8(1), 1-19.
- 66) Brodie, M.A., Dean, R.T., Beijer, T.R., et al. (2015). Symmetry matched auditory cues improve gait steadiness in most people with Parkinson's disease but not in healthy older people. *Journal of Parkinson's disease*, 5(1), 105-116.
- 67) Baram, Y., & Miller, A. (2007). Auditory feedback control for improvement of gait in patients with Multiple Sclerosis. *Journal of the neurological sciences*, 254(1-2), 90-94.
- 68) Rodger, M.W., Young, W.R., & Craig, C.M. (2013). Synthesis of walking sounds for alleviating gait disturbances in Parkinson's disease. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 22(3), 543-548.