

# Sonifikation als innovativer Therapieansatz in der neurologischen Rehabilitation

Martin Knauer, Dominik Fuchs, Petra Friedrich

Hochschule für angewandte Wissenschaften, 87435 Kempten

E-Mail: martin.knauer@hs-kempten.de, petra.friedrich@hs-kempten.de

## Einleitung

Folgen eines Schlaganfalls sind häufig Störungen der Motorik und des Gleichgewichts bzw. der posturalen Kontrolle. Hier ist es für die Betroffenen wichtig, frühestmöglich die eingeschränkte Balance durch Gleichgewichtsübungen in der Rehabilitation zu trainieren. Für die optimale Unterstützung der Betroffenen ist es sinnvoll, erweitertes, extrinsisches Feedback bereitzustellen. Dies kann erwiesenermaßen das Erlernen motorischer Fähigkeiten beschleunigen, indem es zusätzliche Informationen bietet und die Fehlerrate signifikant verringert [1]. Bisher wird häufig die visuelle Unterstützung verwendet, da diese meist leicht verständlich ist. Neben dem Visus kann auch Information zur Bewegung in Echtzeit in Form eines Audiosignals vermittelt werden. Hier spricht man von interaktiver Sonifikation [2]. Die Verwendung von Klang bietet dabei den Vorteil, dass der Hörer nicht in eine Richtung orientiert sein muss, um einen Bildschirm zu sehen. Das Gehör ist zudem in der Wahrnehmung von zeitlichen Änderungen sehr genau und besitzt die Fähigkeit mehrere Stimuli parallel zu verarbeiten [3]. Besonders nach einem Schlaganfall kann dies zusätzliche Vorteile bringen: Betroffene leiden hier häufig unter visuellen Problemen (Doppel-Vision, Augenbewegungsprobleme, blinde Flecken etc.), oder visuellen Abhängigkeiten [4], wohingegen Beeinträchtigungen des Hörens eher selten und subtil sind [5]. Außerdem wirkt Klanginformation unabhängig von den meisten intrinsischen Sinneswahrnehmungen, so dass sie – anders als visuelle Rückmeldung – den Lerner weniger von seiner natürlichen Bewegungswahrnehmung (Propriozeption) ablenkt [1].

Für die Entwicklung eines neuen Systems ist es wichtig, die Art und Polarität der Sonifikation sorgfältig zu wählen. Hierfür gibt es bisher noch keine einheitlichen Richtlinien und nur wenige Publikationen beschäftigen sich ausreichend mit dieser Problematik [6]. Daher wurden in diesem Projekt verschiedene Klangmodelle entwickelt und zunächst in zwei Testreihen mit gesunden Probanden getestet, bevor eine Machbarkeitsstudie in einer neurologischen Reha-Klinik folgte.

## Methode

In dem Kooperationsprojekt BalThaSAR wurde ein spezielles Training unter Verwendung eines zertifizierten medizinischen Rehabilitationsgerätes entwickelt. Inhalte des Trainings sind eine Zielfindungsübung, ein akustisches Memory und eine musikalische Improvisationsübung, jeweils gesteuert durch Schwerpunktverlagerung. Dem Patienten wird dabei je nach Trainingsfortschritt und Schwierigkeitsgrad visuelles und/oder auditives Feedback gegeben.

## Aufbau

Durch einen dynamischen Steh- und Balancetrainer [7] der Firma medica Medizintechnik GmbH wird dem Patienten eine fallsichere Umgebung geboten. Dabei ist er an der Hüfte fest fixiert und die maximale Auslenkung des Körperschwerpunkts beträgt 12 Grad. Durch einen Bluetooth-Sensor, welcher am Gerät befestigt ist, können die aktuellen Positionsdaten des Körperschwerpunktes gemessen werden. Mithilfe eines Computers können die Sensordaten in Echtzeit weiterverarbeitet werden. Es kann so sowohl visuelles Feedback über den Bildschirm, als auch auditives Feedback über Kopfhörer ausgegeben werden. Eine Übersicht des gesamten Aufbaus ist in Abbildung 1 zu sehen. Die Software wurde dabei in Python umgesetzt.

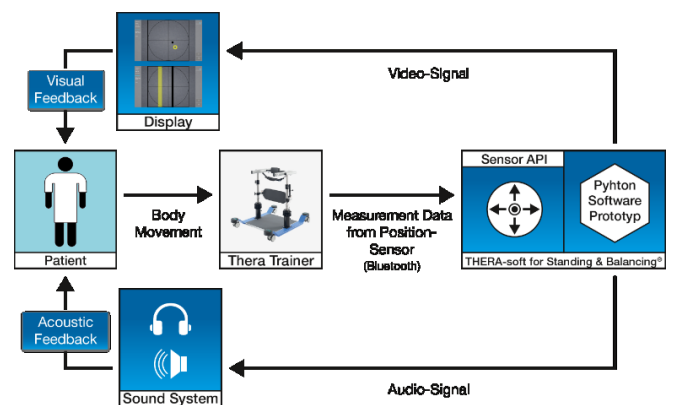


Abbildung 1: Übersicht des Trainingsaufbaus und der Signalwege.

Die Kernübung des Trainings ist eine Zielfindung in der zweidimensionalen Ebene. Der Proband bekommt dabei eine Zielposition vorgegeben und soll diese mithilfe von Schwerpunktverlagerung erreichen. Dies wird ihm zu Beginn visuell und auditiv vorgegeben, im späteren Verlauf wird versucht, auf die visuelle Hilfe zunehmend zu verzichten.

## Audioparameter

Für die Entwicklung eines geeigneten Sonifikationsmodells wurden folgende Audioparameter in Betracht gezogen: Modulation der Tonhöhe (sowohl kontinuierlich als auch in Tonsprüngen), Modulation der Tonhöhe oder Lautstärke mit einer Vibration, Überlagerung mit perkussiven Klängen, Modulation der Lautstärke, Modulation der Klangfarbe sowie Panning im Stereo-Signal. Da die Zielfindung in der zweidimensionalen Ebene stattfindet, müssen mehrere Parameter überlagert werden. Ziel ist es dabei, die Parameter so zu kombinieren, dass das Modell möglichst einfach und intuitiv ist und eindeutig zu dem Zielbereich führt.

Bei der Zielfindung handelt es sich um explizites Lernen – ein bestimmter Klang beschreibt immer die Richtung, welche zum Ziel führt. Im Gegensatz hierzu steht der Aspekt des impliziten Lernens - hier gibt es keine ideale Bewegung zu der die eigene Bewegung in Relation gebracht wird. Diese beiden Herangehensweisen sind im Grunde komplementär und die Kombination beider kann zusätzlich zum Lernerfolg beitragen [8]. Daher wurde auch ein Modell mit dem Ansatz der freien Improvisation zu verschiedenen Hintergrundliedern entwickelt [9].

### Umsetzung

Für eine beschleunigte Prototypenentwicklung wurden die Sonifikationsmodelle zunächst in Pure Data [10] und später mit der Software Reaktor [11] erstellt. Beide bieten den Vorteil, dass sie visuell programmiert werden und Änderungen sehr leicht umsetzbar sind. Die Sensordaten werden dabei zunächst im Hauptprogramm (geschrieben in Python) über eine API ausgelesen. Hier erfolgen zudem die Steuerung des Trainingsablaufs, eine erste Filterung der Daten sowie die visuelle Darstellung. Anschließend werden die Bewegungsdaten über das OSC Netzwerkprotokoll an das Sonifikationsmodell gesendet, wo die Klangsynthese erfolgt.

Im späteren Verlauf des Projektes wurden die besten Modelle in Python umgesetzt. Diese wurden in einer separaten Klasse realisiert, sodass die Steuerung nicht mehr über OSC, sondern direkt über Funktionsaufrufe möglich ist. Da die Vertonung in Echtzeit benötigt wird, werden die Samples mithilfe einer Callback-Funktion in Blöcken von 512 Samples berechnet und anschließend an die Soundkarte übergeben. Dies ergibt eine maximale Verzögerung von etwa 12ms seitens der Sonifikation. Für die Berechnung der einzelnen Samples wurden dabei zwei verschiedene Ansätze verwendet: Bei einfachen Modellen wird direkt in der Callback-Funktion ein Sinuston generiert und anschließend moduliert. Dabei darf es zwischen den einzelnen Sample-Blöcken zu keinen Phasensprüngen kommen. Bei ästhetisch aufwändigeren Modellen wurden hingegen Samples verwendet. Diese werden zu Beginn in Matrizen gespeichert und anschließend in der Callback-Funktion entsprechend ausgelesen und angepasst, ähnlich wie bei einem Sampler.

### Tests

Für die Erstellung einer möglichst optimalen Sonifikation für die Zielfindungsübung wurden die verschiedenen Audio-parameter, umgesetzt in 5 Modellen, in einer ersten Testreihe mit 10 gesunden Studenten untersucht. Dabei wurde eine vereinfachte Version der Übung verwendet, bei der das Ziel nur in einer Dimension verschoben wurde (mediolateral). Dies geschah zunächst mit visueller Unterstützung, anschließend rein auditiv.

Mithilfe der Ergebnisse dieser ersten Tests wurden anschließend zwei Modelle für die Zielfindung in der zweidimensionalen Ebene entwickelt und mit 20 gesunden Probanden ( $M = 43$ ,  $SD = 13.78$ ,  $f/m = 7/13$ ) getestet. Dabei wurden sowohl die Rohdaten der Übungen mitgeschrieben (beispielsweise die benötigte Zeit pro Zielfindung), als auch subjektive Aussagen mithilfe von Fragebögen ermittelt (wie

angenehm oder nützlich wurden die Modelle bewertet etc.) [12].

Die optimierten Modelle wurden anschließend in einer Akzeptanz- und Machbarkeitsstudie in der neurologischen Rehabilitationsklinik (Schön Klinik) in Bad Aibling durchgeführt. Dies geschah mit vier Schlaganfallpatienten, die jeweils vier 30-minütige Sessions innerhalb des Studienzeitraumes absolvierten. Die Patienten waren im Alter von 59 bis 76 Jahren und ein Anfangs-Assessment mit der „Berg Balance Scale“ ergab, dass die Gruppe bezüglich ihrer Gleichgewichtsfähigkeit sehr heterogen war, was für diesen Zweck von Vorteil ist.

### Ergebnisse

Aus der ersten Testreihe erwies sich die Tonhöhe sowie die Verwendung von perkussiven Elementen als besonders vielversprechend. Auch die Modulation der Tonhöhe sowie der Lautstärke mithilfe einer Vibration erwies sich als effektiv, obwohl sie von den Probanden als eher unangenehm empfunden wurde. Auch das Panning im Stereo-Signal erwies sich als effektiv, wurde jedoch ausgeschlossen, da hier die Wirkung eines zweiten Parameters bei einer Überlagerung beeinträchtigt würde. Die Modulation der Klangfarbe hatte dagegen eher mäßigen Erfolg.

Für die zweite Testreihe wurden für die Zielfindung zwei Modelle verwendet: 1.) ein „synthetisches“ Modell, bei der die Richtung anterior/posterior durch Überlagerung mit hohem bzw. tiefem Rauschen, und lateral durch die synthetische Modulation der Amplitude bzw. der Frequenz eines Sinusklangs signalisiert wird und 2.) ein „ästhetisches“ Modell, bei der die Richtung anterior/posterior durch die Modulation der Tonhöhe eines Klaviertons (Dur Tonleiter) im Bezug zu einem Referenzton, und lateral durch die Überlagerung mit zunehmend schneller werdenden perkussiv-rhythmischen Samples signalisiert wird.

Im Allgemeinen korrelierte die Fähigkeit der Probanden, das Ziel zu lokalisieren, in den beiden Klangmodellen ( $r = 0,53$ ,  $p = 0,028$ ) und war schneller mit dem synthetischen Modell ( $t(16) = -2,65$ ,  $p = 0,017$ ). Probanden mit musikalischem Hintergrund erreichten das Ziel ohne visuelle Unterstützung im Durchschnitt schneller und bewerteten zudem das ästhetische Modell deutlich besser [12].

In der Klinik konnte mithilfe des „Intrinsic Motivation Inventory“ Fragebogens sowie zusätzlichen Fragen gezeigt werden, dass das Balancetraining mit Audiofeedback eine gute Akzeptanz und Machbarkeit erzielte. Die höchsten Werte wurden bei der Subskala „Anstrengung/Bedeutung“ gemessen. Verbunden damit, dass die niedrigsten Werte bei der Skala zu „Wahrgenommener Kompetenz“ zu sehen sind, kann man ableiten, dass die Patienten stark gefordert und zum Teil womöglich überfordert waren. Daher wurde anschließend versucht, die Modelle weiter zu optimieren und ein weiterer Ansatz wurde entwickelt, welcher unter Verwendung von Richtungshören („Head-Related Transfer Functions“) die kognitive Anstrengung besonders zu Beginn des Trainings weiter reduzieren könnte. Die funktionale Wirkung muss jedoch noch in zukünftigen Tests untersucht werden.

## Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Sonifikation ein sehr wertvolles Werkzeug sein kann, um das Gleichgewicht in der neurologischen Rehabilitation (neu) zu trainieren. Um jedoch eine kognitive Überlastung zu verhindern, sollte das Audiofeedback möglichst einfach gehalten werden. Fragen zur Effektivität des Trainings im Vergleich zur herkömmlichen Standardtherapie müssen jedoch noch in zukünftigen Forschungsarbeiten untersucht werden.

## Danksagung

Die Arbeiten sind im Rahmen des ZIM Projektes BalThaSAR (ZF4021401ED5) entstanden und wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert. Für die Zusammenarbeit danken die Autoren der medica Medizintechnik GmbH aus Hochdorf, Feo Elektronik GmbH aus Ravensburg sowie der Schön Klinik in Bad Aibling.

## Literatur

- [1] Whitehead, D. W.: Applying Theory to the Critical Review of Evidence from Music-Based Rehabilitation Research. *Critical Reviews in Physical and Rehabilitation Medicine* 27(1) (2015), 79-92
- [2] Rosati, G., Rodà, A., Avanzini, F., & Masiero, S.: On the Role of Auditory Feedback in Robot-Assisted Movement Training after Stroke: Review of the Literature. *Computational Intelligence and Neuroscience* (2013)
- [3] Kramer G., Walker B., Bonebright T., et al.: Sonification Report: Status of the Field and Research Agenda. Prepared for the National Science Foundation by members of the International Community for Auditory Display (1997)
- [4] Schädler, S.: Visuelle Abhängigkeit. In: *Gleichgewicht und Schwindel*: Elsevier (2016): S. 159–168.
- [5] Lesaffre M., Vets T., Moens B., Leman M.: Using auditory feedback for the rehabilitation of symmetrical body-weight distribution after ischemic stroke or brain trauma. *Proceedings of the Ninth Triennial Conference of the European Society for the Cognitive Sciences of Music* (2015)
- [6] Dubus G., Bresin R.: A Systematic Review of Mapping Strategies for the Sonification of Physical Quantities. *Plos One* (2013)
- [7] Thera-Trainer Coro, URL: <https://www.thera-trainer.de/thera-trainer-produkte/standing-balancing/thera-trainer-coro/>
- [8] Bevilacqua, F., Boyer, E. O., Françoise, J., Houix, O., Susini, P., Roby-Brami, A., Hanneton, S.: Sensori-Motor Learning with Movement Sonification: Perspectives from Recent Interdisciplinary Studies. *Frontiers in Neuroscience*, 10 (2016)
- [9] Fuchs D., Knauer M., Jüngling S., Friedrich P.: Interactive Musical Sonification for Balance Training. *Behavioral Sciences. Special Issue "Embodied Aesthetics and Interpersonal Resonance"* (2017)
- [10] Pure Data, URL: <http://puredata.info/>
- [11] Reaktor, URL: <https://www.native-instruments.com/de/products/komplete/synths/reaktor-6/>
- [12] Fuchs D., Knauer M., Jüngling S., Friedrich P.: Evaluation of Different Sonification Models for Balance Training. *European Society for Cognitive Sciences of Music - ESCOM* (2017)