



Eine modulare Toolbox für die Entwicklung mobiler Anwendungen zur Sonifikation von Bewegungen

Exposé zur Masterarbeit

im Fachgebiet

Audiokommunikation und -technologie

Jay Alexander Shrowder

Matrikel-Nummer: 206444

jay.shrowder@campus.tu-berlin.de

Betreuer: Prof. Dr. Stefan Weinzierl

Markus Hädrich, M.A.

Zusammenfassung

In den vergangenen zehn Jahren wurden von der Universität Hamburg in Kooperation mit der Firma BeSB GmbH Studien und Forschungsprojekte zur Bewegungssonifikation im Hochleistungssport und in der medizinischen Rehabilitation durchgeführt. Anwender*innen und Sport- und Trainingsgeräte wurden mit in Modulen integrierten hochqualitativen, industriellen Trägheitssensoren (*inertial measurement unit IMU*) ausgestattet, welche Bewegungsdaten zur Analyse und Evaluation messen und diese in Echtzeit als Auditory Feedback sonifizieren. Das Ziel der Sonifikation ist hierbei eine Optimierung der Bewegungstechnik und Leistungssteigerung.

Die Bewegungssonifikation birgt viel Potential, die motorischen Fähigkeiten von Patient*innen in der Rehabilitation zu optimieren, als auch die Leistungsfähigkeit von Sportler*innen zu erhöhen. Es ist daher wünschenswert der Allgemeinheit die Vorteile der Bewegungssonifikation zugutekommen zu lassen.

In dieser Masterarbeit wird aus diversen Studien zur Bewegungssonifikation eine modulare Toolbox konzipiert, welche die Bestandteile der Systeme zur Bewegungssonifikation systematisch in Module klassifiziert. Die Toolbox soll eine Sonifikation von beliebigen rotierenden und translatorischen Bewegungsabläufen ermöglichen, aus der im Rahmen dieser Arbeit zu Vergleichs- und Demonstrationszwecken eine prototypische Anwendung abgeleitet wird. Die prototypische Demonstrator-Anwendung soll auf einem Smartphone mittels der internen Trägheitssensoren Bewegungsabläufe messen, um die Sensorrohdaten algorithmisch auf eine Auswahl von Klangsyntheseparametern abzubilden. Die Demonstrator-Anwendung soll im Rahmen einer Studie der Universität Hamburg zum Unterwasser-Delphin-Kick (UDK) beim Schwimmen eingesetzt und evaluiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, inwiefern ein Mittelklasse-Smartphone hinsichtlich der sensorisch-technischen Komponenten, der *User Experience (UX)* und der *Usability* den gleichen Anforderungen entspricht wie das von der BeSB GmbH entwickelte *Dedicated -Embedded* Sensormodul *Sofiswim*. Die Fragestellung ist also, ob sich Mittelklasse Smartphones mit entsprechenden Anwendungen prinzipiell als Alternative zu *Dedicated-Embedded* Systemen zur Messung und Sonifikation im Sport- und Reha-Bereich einsetzen lassen.

Inhaltsangabe

1. Einleitung	1
2. Stand der Forschung	2
2.1 Echtzeit in der Bewegungssonifikation	2
2.2 Vorarbeiten zur modularen Toolbox	4
2.3 Hard-und Software Sensorsysteme	5
3. Methode	6
4. Evaluation	8
5. Zeitplan	10
6. Literaturverzeichnis	11

1 Einleitung

Die Sonifikation setzt sich insbesondere seit der Gründung der *ICAD (The International Conference on Auditory Display)* im Jahre 1992 auch wissenschaftlich mit Fragen zur Verklanglichung von Daten auseinander [1].

Das *Auditory Display* beschreibt technisch-akustische Systeme die Informationen als Audiosignale hörbar machen. So ist auch die Sonifikation, die Daten auf Klangsyntheseparameter abbildet, ein Bestandteil des Auditory Displays [2].

Bei der Bewegungssonifikation, ein Teilbereich aus der *Augmented Reality (AR)*, werden Messwerte in Echtzeit (*Realtime auditory feedback RAF*) vertont, was den Anwender*innen eine Überwachung und Kontrolle der Bewegungsausführung ermöglicht [2]. In diversen Hochleistungssportstudien, wie zum Beispiel im Rudersport [3], konnte dadurch bei den Athlet*innen eine Leistungssteigerung sowie eine Optimierung der Bewegungsausführung registriert werden. Aufgrund der leistungssteigernden Wirkung, wurden zur Bewegungssonifikation im letzten Jahrzehnt vermehrt Untersuchungen im Bereich der Sportwissenschaft und der rehabilitativen Medizin durchgeführt [4].

Ein Ziel der Masterarbeit ist die Konzeptionierung einer modularen Toolbox, welche die Forschungsergebnisse von diversen Studien zur Bewegungssonifikation katalogisiert und in Modulen klassifiziert. Die Module der Toolbox unterteilen sich in Roh- und Messdatenerfassung, Datenverarbeitung und -aufbereitung sowie die eigentliche Sonifikation mittels Parameter-Mapping. Die ubiquitäre Verbreitung von sensorbestückten Mittelklasse-Smartphones [5] stellt eine kostengünstige Alternative zu Dedicated-Embedded Sensormodulen dar. Aus dem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit ein Smartphone mit prototypischer Demonstrator-Anwendung verwendet, um aus der modularen Toolbox eine Applikation zum Unterwasser-Delphin-Kick (UDK) [6] beim Schwimmen abzuleiten. Die Modularität erlaubt es, verschiedene Anwendungsfälle, wie z.B. unterschiedliche Sportarten bzw. Bewegungen, aus der Toolbox abzuleiten. Die IMUs des Gerätes messen translatorische und rotierende Bewegungen [7]. Die Lagedaten werden mittels Fusionsalgorithmen aus den Rohdaten ermittelt. Die Evaluation der Applikation soll in einer Schwimmstudie von der Universität Hamburg in Kooperation mit der Firma BeSB GmbH durchgeführt werden.

Dabei findet eine Vergleichsstudie zum Unterwasser-Delphin-Kick zwischen dem Sony Xperia XZ1 und dem von der Firma BeSB GmbH entwickelten Dedicated-Embedded-Mess- und Sonifikationssystem Sofiswim statt. Die Auswertung untersucht qualitativ die UX und die Usability der jeweiligen Hardware als auch quantitativ den Output der Datenfusionswerte. Das Ergebnis der Studie soll aufzeigen, inwieweit Mittelklasse-Smartphones alternativ für den Einsatz als Messgerät bei Sport- und Reha-Studien verwendet werden können.

2 Stand der Forschung

Im Folgenden wird zunächst auf den Begriff Bewegungssonifikation und deren Anforderungen an ein RAF eingegangen. Android-Endgeräte haben unter Umständen Schwierigkeiten bei Echtzeit-Anwendungen das Latenzkriterium einzuhalten. Zur Einhaltung der geforderten Latenz werden softwaretechnische Lösungen, wie z.B. C++ Bibliotheken, vorgestellt. Des Weiteren werden Metastudien zur Bewegungssonifikation vorgestellt, aus denen sich die Bausteine der modularen Toolbox ableiten. Der konzeptionelle Ansatz zur Struktur der Toolbox entspricht dabei der Toolbox SonART [8]. Zuletzt werden die verwendeten Sensoren und die Fusionsalgorithmen beider Geräte vorgestellt.

2.1 Echtzeit in der Bewegungssonifikation

Kramer definiert Sonifikation als „ [...] *the use of nonspeech audio to convey information. More specifically, sonification is the transformation of data relations into perceived relations in an acoustic signal for the purposes of facilitating communication or interpretation.*“ [9, S. 4].

Van Vugt und Tillman [10] untersuchten in einer Studie zum motorischen Lernverhalten, inwiefern die Synchronität zwischen Klang und Bewegung beim Auditory Feedback wichtig für das Erlernen und Speichern von Bewegungsabläufen ist. Die Probanden sollten Tastenkombinationen auf einer Tastatur in einer bestimmten Reihenfolge erlernen. Die Einteilung erfolgte in drei Testgruppen. Zwei Testgruppen

hörten beim Tastendrücken ein synchrones und asynchrones Feedback und eine weitere Gruppe überhaupt keines. Die synchrone Gruppe hörte den Klang in Echtzeit (RAF), also unterhalb von 10 ms [11]; die asynchrone Gruppe hörte den Klang oberhalb des Echtzeitkriteriums. Die Verzögerung des Klangs variierte zwischen 10 und 190 ms, wobei das menschliche Gehör eine Latenz oberhalb von 35 ms als Echo wahrnimmt [12]. Das Ergebnis der Studie wies bei der Gruppe mit RAF im Durchschnitt die kleinste Fehlerrate auf. Die geringe Fehlerquote konnte dabei unabhängig vom akustischen Feedback beibehalten werden. Die Studie bestätigt somit, dass RAF sich positiv auf das Timing in den Bewegungsabfolgen auswirkt und dieses unabhängig vom Feedback weiterhin beibehalten werden kann.

Die Architektur des Android-Betriebssystems weist Schwierigkeiten in der Umsetzung kurzer Latenzzeiten auf. Dennoch rechtfertigt ein weltweiter Marktanteil im zweiten Quartal 2020, von 72,6 % des Betriebssystems Android OS, die Auswahl des Android Endgerätes für die Masterarbeit [13]. Die meisten Android-Audio-Applikationen weisen Latenzwerte über 100 ms auf [14]. Herstellerspezifische Unterschiede im Hinblick auf die Hardwareressource [15] und eine mehrschichtige Interaktion zwischen dem *Application Framework (AF)* und dem Linux-Kernel erschweren eine Reduzierung der Latenzzeit. Zwischen dem Linux-Kernel und dem AF befinden sich mit dem *Binder IPC Proxies (BIP)*, den *Android System Services (ASySe)* und dem *Hardware Abstraction Layer (HAL)* drei Schichten. Hierbei ist das AF für die grafische Erstellung von mobilen Applikationen verantwortlich und nutzt die Interprozesskommunikation BIP zur Adressierung der Systemdienste in den ASySe. Die ASySe regeln Zugriffe über das HAL, ein Kommunikationslayer für den Zugriff auf die Treiber im Linux-Kernel. In herkömmlichen Android Audioanwendungen geschieht die Audiopufferung und die Steuerung des Audiostreams innerhalb der Java API *android.media.Track* und *android.media.MediaPlayer* im Layer AF. Die lange Übertragungskette zwischen den Audiodaten und dem Audio-Treiber im Linux-Kernel verhindert die Einhaltung des Echtzeitkriteriums. Dafür ist eine Verlagerung der Audioverarbeitung in die ASySe notwendig. Hierbei werden die Audiodaten im Stream, ohne den Zwischenschritt über die BIP und die ASySe, direkt in das HAL geleitet. Die systemnahe C/C++ API Oboe regelt die Audiopufferung effizienter, indem über manuell einstellbare Puffergrößen der Puffer kleinstmöglich gewählt und über eine Callback-Funktion automatisch mit den

nächsten Audiodaten wieder befüllt wird. Das *Java Native Interface (JNI)* dient als Schnittstelle zwischen der Java-Anwendung im AF und der C++ API, um den Audiostream über die Callback-Funktion zu steuern. Dieser Ansatz soll für die Audioverarbeitung in der Schwimmapplikation genutzt werden. Weiterführende Details zur Android Systemarchitektur und zur Minimierung der Latenz sind bei Künneth [16] bzw. Balsini et al. zu finden [17].

2.2 Vorarbeiten zur modularen Toolbox

Eine Metastudie von Dubus und Bresin [18] untersuchte im Zeitraum zwischen 1990 und 2012 in 179 Publikationen zum Thema Bewegungssonifikation physikalischer Daten, welche Daten und welche Klangsyntheseparameter wie häufig verwendet wurden. Dabei wurden Ein- und Ausgabeparameter in Module klassifiziert. Die physikalischen Daten der Eingabe wurden in *Kinematics* (z.B. Beschleunigung, Lage), *Kinetics* (z.B. Temperatur), *Matter* (z.B. Masse), *Time* (z.B. Zeit) und *Dimensions* (z.B. Volumen) unterteilt. Eine Untergliederung der ausgegebenen Klangsyntheseparameter erfolgte in *Pitch-related* (z.B. Tonhöhe), *Timbral* (z.B. Klangfarbe), *Loudness-related* (z.B. Lautstärke), *Spatial* (z.B. Räumlichkeit) und *Temporal* (z.B. Tempo). Die Metastudie untersuchte zudem die häufigsten Kombinationen zwischen den Ein- und Ausgabedaten und auf welche Klangsyntheseparameter überwiegend abgebildet wurde. Die Analyse ergab, dass die Elemente der Gruppe Kinematics und die Elemente der Gruppe Pitch-Related die häufigsten Kombinationen darstellten. Die Klangsyntheseparameter der Gruppe Pitch-Related waren außerdem die meist genutzten aller Studien. Insbesondere die Tonhöhe und die Lautstärke wurden überproportional oft verwendet.

SonART ist ein Framework für Desktop-Computer, das Big Data mittels Sonifikation analysiert. In Ben-Tal et al. [8] ist der Aufbau und die Funktionsweise der Toolbox beschrieben. Kern der Anwendung ist die Parameter-Engine-Matrix, welche beliebige Kombinationen zwischen Eingabe (Daten) und Ausgabe (Klangsyntheseparameter) ermöglicht. Die variable Abbildung zwischen dem Input und Output in der Parameter-Engine-Matrix ermöglicht unterschiedlichste Sonifikationsszenarien.

2.3 Hard- und Software Sensorsysteme

Bei Sofiswim handelt es sich um ein Embedded-System, das für das Einlesen, die Speicherung und die Verklanglichung der Sensordaten zuständig ist. Es ist zweckbestimmt auf eine Aufgabe ausgerichtet und wird daher auch als Dedicated_System bezeichnet [19]. Das Modul Sofiswim enthält das System-in-Package (SiP) BNO080, in dem mehrere Chips in einem Chipgehäuse untergebracht sind. Es ist von der Firma Ceva Technologies, ausgerüstet mit dem 9-Achsen IMU BMF055 der Firma Bosch. Zusätzlich ist im BNO080 ein 32-Bit-Arm Mikrokontroller integriert, ausgestattet mit der SH-2 Firmware von Hillcrest Labs. Teil dieser ist die Closedware MotionEngine, welche u.a. die Signalverarbeitung der Sensordaten regelt [20].

Das Sony Xperia XZ1 ist mit dem Snapdragon-835-Prozessor von Qualcomm und dem 6-Achsen-IMU mit der Modellbezeichnung LSM6DSM des Herstellers STMicroelectronics ausgestattet [21].

Sofiswim nutzt zum Bestimmen der Lage den sog. GAME_ROTATION_VECTOR. Hierbei werden mittels eines unbekanntes Fusionsalgorithmus (Black-Box) aus den Gyroskop- und Beschleunigungsdaten die Lagedaten berechnet. Beim Smartphone werden die Lagedaten mittels TYPE_GAME_ROTATION_VECTOR ebenfalls aus Gyroskop- und Beschleunigungsdaten berechnet. Die Fusionsmethode wird hierbei ebenfalls in einer Black-Box verdeckt durchgeführt.

Ohne Kenntnisse der verwendeten Fusionsalgorithmen ist ein Vergleich der beiden Sensorsysteme nur über die Eingabe- und Ausgabewerte möglich.

Gemeinhin wird die Daten- oder Informationsfusion in dynamischen Lokalisierungssystemen angewendet und ermöglicht eine genaue Zustandsschätzung. Unter Verwendung ungleicher Informationsquellen wird neues und/oder präziseres Wissen über physikalische Größen gewonnen[22].

In der Masterarbeit sind Fusionsmethoden für die Werte der Trägheitssensoren relevant. Dadurch ist eine akkurate Berechnung der Lage möglich. Hierbei werden die Daten des Beschleunigungs- und Gyroskop-Sensors verarbeitet. Mithilfe einer 3x3-Rotationsmatrix werden die Roll-, Neigungs- und Gier-Winkel für die Bestimmung der

Lage errechnet [23]. Die Fusion erhöht die Messgenauigkeit, reduziert das Rauschen beider Sensoren [24] und korrigiert die Abdrift des Gyroskop-Sensors [25]. Die gebräuchlichsten Fusionsalgorithmen sind das Kalman-Filter, das Mahony&Madgwick-Filter und das Komplementär-Filter. Diesen Algorithmen liegen die gleichen Prinzipien zugrunde. Ausgehend von den aktuellen Daten wird eine Schätzung des nächsten Zustandes berechnet. Die Schätzung wird dann mit dem tatsächlichen Zustand verglichen und bei einer Abweichung korrigiert. Genaue Definitionen der genannten Fusionsalgorithmen sind bei Welch & Bishop [26], Ludwig [27] und Yang [28] nachzulesen.

3 Methode

Der Inhalt der Masterarbeit gliedert sich in

1. eine Literaturrecherche und darauf aufbauend die Konzeptionierung der modularen Toolbox,
2. aufbauend auf der Toolbox: die Implementierung einer Demonstrator-Anwendung,
3. die Evaluierung der Demonstrator-Anwendung in einer vergleichenden Studie (siehe Kapitel 4).

1. Bei der Literaturrecherche werden Studien zur Bewegungssonifikation berücksichtigt, wobei der Schwerpunkt auf Sportarten mit zyklisch-periodischen Bewegungen liegt. Diese eignen sich insbesondere für eine Verklanglichung, da es hierbei nachvollziehbarer und damit leichter ist Unterschiede zwischen den einzelnen sich wiederholenden Bewegungssequenzen herauszuhören. Sämtliche vertonte Datentypen, Arten der Datenverarbeitungen und verwendete Klangsyntheseparameter der Studien werden untersucht und methodische Gemeinsamkeiten der Abhandlungen herausgearbeitet (z.B. ob bei der Datenverarbeitung gleiche Filter zur Glättung der Eingangswerte benutzt wurden).

Die im Rahmen dieser Masterarbeit zu entwickelnde Toolbox wird aus folgenden Komponenten bestehen:

- Roh- bzw. Messdatenerfassung.

- Datenverarbeitung und -aufbereitung für die Sonifikation
- Sonifikation durch Parameter-Mapping

Die Eingangsparameter der Toolbox sind die Rohdaten des IMUs. Die Gyroskop- und Beschleunigung Sensoren erfassen jeweils dreidimensional die Winkelgeschwindigkeit (in rad/s) und die Beschleunigung (in m/s²) [7]. Wie bereits in Kapitel 2.3 erwähnt, ergeben sich aus der Fusion der Rohdaten die Lagewerte *Roll*, *Pitch* und *Yaw*, welche die Bewegung um die longitudinale, laterale und vertikale Achse anzeigen [29]. Die interessierenden Bewegungen des zu untersuchenden Objekts bestimmen hierbei die Auswahl der relevanten Roh- und Lagedaten als Eingangsgrößen für die Sonifikation.

Um die Rohdaten für die Sonifikation zu optimieren, wird in der Datenaufbereitung unter anderem die Samplerate angepasst. Zudem kommen Filter- und Glättungsfunktionen zum Einsatz. Eine Methode zur Glättung der Rohdaten wäre z.B. eine Tiefpassfilterung mittels eines gleitenden Mittelwertes [30].

In der Sonifikation werden beim Parameter-Mapping Bewegungsdaten auf Klangsyntheseparameter abgebildet [31].

Nach Hermann [32] beschreibt folgende Formel das Parameter-Mapping:

$$s(t) = \sum_{i=1}^N f(g(\vec{x}_i), t)$$

Das Audiosignal $s(t)$ ist die Summe der Parameter-Mapping-Funktion $g(\vec{x}_i)$ in Abhängigkeit von der Zeit t . Die d -dimensionalen Datenpunkte $\{\vec{x}_1 \dots \vec{x}_n, \vec{x}_i \in \mathbb{R}^d\}$ werden auf die Einstellwerte des Klangsyntheseparameters abgebildet.

Aus multivariaten Datensätzen erfolgt eine Abbildung der Dateneigenschaften auf die Einzelwerte der Klangsyntheseparameter, wie zum Beispiel die Beschleunigungswerte in der x -Richtung auf die Tonhöhe. Dadurch ist die Zuordnung in der ausführenden Bewegung eindeutig zuordenbar und überprüfbar.

2. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine prototypische Demonstrator-Anwendung zur

Verklanglichung des Unterwasser-Delphin-Kicks (UDK) aus der modularen Toolbox abgeleitet. Es ist eine Applikation für das mobile Betriebssystem Android OS vorgesehen, die in der Entwicklungsumgebung Android Studio implementiert wird. Sie soll für Android Endgeräte ab der Android OS Version 5 kompatibel sein. Das *Graphical User Interface (GUI)* der Applikation wird mit Hilfe des *Software Development Kits (SDK)* in der Programmiersprache Java entwickelt. Das SDK enthält alle wichtigen Tools, Klassenbibliotheken und Dokumentationen für die Entwicklung. Die GUI soll mit Bedienelementen ausgestattet sein, die unter anderem eine Parametrisierung der Sonifikation ermöglichen. Darüber hinaus werden grundlegende Bedienelemente wie zum Starten und Beenden der Sonifikation und zur Speicherung der Messwerte implementiert.

Wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, soll die Latenz minimiert werden. Dazu wird die Audioverarbeitung und -ausgabe im *Native Development KIT (NDK)*, in nativem Code (C++), implementiert und wird über das JNI mit dem SDK Informationen austauschen, um den Audiostream zu steuern. Das NDK ist das Pendant zum SDK auf Prozessorebene. Die C++ Klasse *AudioEngine* erzeugt den Audiostream, indem sie Audiodaten mit minimaler Pufferung direkt über den Linux-Kernel an die Audioausgabe sendet. Sobald der Puffer entleert ist, fordert eine Callback-Funktion automatisch neue Audiodaten für den Stream an.

4 Evaluation

Die Evaluation der Applikation soll anhand einer Vergleichsstudie zum Unterwasser-Delphin-Kick zwischen dem Sony Xperia XZ1 und dem von der Firma BeSB GmbH entwickelten Dedicated-Embedded- Mess- und Sonifikationssystem Sofiswim erfolgen. Mit diesem wurden bereits Studien an der Universität Hamburg zum UDK durchgeführt. Laut dieser konnte durch die Sonifikation eine Optimierung in der vertikalen Hüftauslenkung beim UDK erreicht werden. Der UDK konnte dadurch konstant auf einem hohen technischen Niveau geschwommen werden. Im Vergleich zu Probeläufen ohne Sonifikation, wiesen die Probeläufe mit Sonifikation eine höhere Geschwindigkeit in der Vorwärtsbewegung auf.

Im Rahmen der Masterarbeit sollen:

1. die Usability bezüglich des Tragekomforts und der Audioausgabe, sowie die Performanz hinsichtlich einer Leistungssteigerung, und
2. die technischen Daten insb. hinsichtlich Latenz und Genauigkeit der Messwerte beider Systeme verglichen werden.

Bezüglich des ersten Punkts sollen in einer Blindstudie nach abwechselnden Probeläufen mit der jeweiligen Hardware die UX der Testpersonen bewertet werden. Hierbei werden die Geräte jeweils am unteren Rücken befestigt, da zum einen dort die interessierenden Bewegungen ausreichend erfasst werden können und zum anderen die Schwimmer*innen vergleichsweise wenig in der Bewegungsausführung behindert werden. Zusätzlich ist durch eine Anbringung des Systems an dieser Stelle der Wasserwiderstand der Schwimmer*innen am wenigsten beeinträchtigt [33]. Die Audioausgabe erfolgt dabei über kabelgebundene wasserdichte Kopfhörer.

Die Evaluation bezieht sich auf die empfundene Qualität und Latenz des Audiosignals, als auch den Tragekomfort der Hardware. Hierzu wird ein Leitfadeninterview in Form eines qualitativen Fragebogens erarbeitet. Zusätzlich wird abgefragt, inwiefern das jeweilige System sich positiv auf die Ausführungen der Schwimmbewegungen und damit Leistung der einzelnen Schwimmer*innen auswirkt.

Als zweiter Punkt soll ein Datenvergleich hinsichtlich der absoluten Messwerte beider Systeme durchgeführt werden. Die Prüfgrößen sind die Latenz und die Genauigkeit. Bei der Genauigkeit wird geprüft, inwieweit die Messwerte des Smartphones von denen des Systems Sofiswim abweichen. Dafür werden beide Systeme im Labor mit identischer Ausrichtung auf einer Vorrichtung installiert, die wiederholbar gleichförmige Bewegungen ausführt. Die hierbei erhobenen Messdaten (insb. Pitch- und Beschleunigungswerte) werden anschließend verglichen. Dabei dienen die Daten von Sofiswim als Referenz, da sich das System Sofiswim in der Praxis bewährt hat und damit bereits erfolgreich sportwissenschaftliche Studien durchgeführt wurden [6].

Die Auswertung der so ermittelten Messdaten erfolgt anhand geeigneter statistischer Verfahren wie z.B. den Zweistichproben t-Test.

Der Vergleich der Latenz beider Systeme bezieht sich jeweils auf die Gesamtlatenz, d.h. die Zeitdifferenz zwischen Anregung (z.B. Bewegen des Systems) und der entsprechenden Audioausgabe. Hierzu wird z.B. das zu untersuchende System mit einem mechanischen Impuls angeregt und die Zeit bis zur Ausgabe der entsprechenden Verklanglichung des Impulses gemessen. Die Zeitmessung kann z.B. durch eine externe akustische Messung erfolgen, bei der sowohl die mechanische Anregung, wie auch die Audioausgabe des Systems aufgezeichnet werden. Die so ermittelten Latenzen beider Systeme können sowohl mit dem o.g. Echtzeitkriterium als auch miteinander verglichen werden.

Beim Vergleich der Performanz von Sofiswim mit der des Smartphones ist anzunehmen, dass Sofiswim in Bezug auf die Latenz geringere Werte aufweist. Die Annahme lässt sich mit dem Aufbau des Dedicated-Embedded-Systems von Sofiswim begründen, dass ohne grafische Oberfläche (GUI), wenig spezialisierten Funktionen und systemnah in C Code entwickelt wurde. Das Smartphone ist ein Shared-Resource-System. Das Teilen der Ressourcen mit anderen im Hintergrund laufenden Diensten und Anwendungen und die in Kapitel 2.1 beschriebene Android-Systemarchitektur kann sich nachteilig auf die Latenz und damit die Echtzeitfähigkeit auswirken. Es ist daher anzunehmen, dass das Smartphone höhere Latenzen als Sofiswim aufweist.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse der Vergleichstest nicht auf andere Android Smartphone Modelle, als das im Rahmen dieser Arbeit verwendete übertragbar sind. Grund hierfür sind insbesondere Rechenleistung und Unterschiede in der verbauten Sensorik und auch Unterschiede im OS.

5 Zeitplan

Vorhaben	Zeitraum
Literaturrecherche / Planung der Toolbox	1 Monat
Implementierung der Applikation	3 Monate
Verfassen der Masterarbeit	2 Monate

6 Literaturverzeichnis

- [1] Kramer, G. & Walker, B: „Sound Science: Marking Ten International Conferences on Auditory Display“. In: *ACM Transactions on Applied Perception* 2 (4) (2005). S. 383-388.
- [2] Hermann, T.: “Taxonomy and Definitions for Sonification and Auditory Display”. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Auditory Display (ICAD2008), Paris, 2008*.
- [3] Mattes, K., Schaffert, N.; Effenberg, A.: “An investigation of online acoustic information for elite rowers in on-water training conditions”. In: *Journal of Human Sport and Exercise* 6 (2) (2011). S. 392-405.
- [4] Schaffert, N., Braun Janzen, T., Mattes, K., Thaut, M.: “A Review on the Relationship Between Sound and Movement in Sports and Rehabilitation”. In: *Frontiers in Psychology* 10 (2019). S. 1-21.
- [5] Borck, P.: *Analyse und Verwendungsmöglichkeiten von Smartphone-Sensoren am Beispiel des Samsung Galaxy S3*. Seminar zu aktuellen Entwicklungen, SoSe 2013. Berlin: HTW, 2013.
- [6] Schaffert, N., Engel, A., Schlüter, S., Mattes, K.: „The sound of the underwater dolphin-kick: developing real-time audio feedback in swimming“. In: *Displays* 59 (2019). S. 53-62.
- [7] Woodman, O.J.: *An introduction to inertial navigation*. Technical Report No. 696. Cambridge: University of Cambridge, 2007.
- [8] Ben-Tal, O., Berger, J., Cook, B., Daniels, M., Scavone, G.: “Sonart: The Sonification Application Toolbox”. In: *International Conference on Auditory Display, Kyoto, 2002*. S. 1-3.
- [9] Kramer, G., Walker, B., Bonebright, T., Cook, P., Flowers, J. H.: “Sonification Report: Status of the Field and Research Agenda”. In: *Faculty Publications, Department of Psychology Paper 444* (2010). S. 1-31.

- [10] van Vugt, F. T. & Tillmann, B.: „Auditory feedback in error-based learning of motor regularity“. In: *Brain Research* 1606 (2015). S.54-67.
- [11] Hau, A.: *Latenz verbessern — Wo brennts?*, 2015. <https://www.soundandrecording.de/tutorials/latenz-verbessern-wo-brennts/> Zugriff 19.07.2020.
- [12] Sigismondi, G: "Personal Monitor Systems". In: Ballou, G.M (Hg.) *Handbook for Sound Engineers*;4. Focal Press, 2008. S. 1413-1435.
- [13] Tenzer, F.: *Marktanteile der Betriebssysteme an der mobilen Internetnutzung weltweit bis 2020, 2020* .
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/184335/umfrage/marktanteil-der-mobilen-betriebssysteme-weltweit-seit-2009/> Zugriff 09.07.2020.
- [14] Szanto, G.: *Android Audio's 10 Millisecond Problem: The Android Audio Path Latency Explainer*, 2019. <https://superpowered.com/androidaudiopathlatency> Zugriff 07.02.2020.
- [15] Villing, R., Lazzarini, V., Czesak, D., O'Leary, S., Timoney, J.: “Approaches for constant audio latency on Android”. In: *The 17th international conference on Digital Audio Effects (DAFx-15), Trondheim, 2015*. S. 1-7.
- [16] Künneth, T.: *Android 7. Das Praxisbuch für Entwickler*. 4., vollst. Überarb. U. akt. Aufl. Bonn: Rheinwerk Verlag GmbH, 2017.
- [17] Balsini, A., Cucinotta, T., Abeni, L., Fernandes, J., Burk, P., Bellasi, P., Rasmussen, M.: “Energy-efficient low-latency audio on android”. In: *Journal of Systems and Software* 152 (2019). S. 182-195.
- [18] Dubus, G. & Bresin, R.: “A Systematic Review of Mapping Strategies for the Sonification of Physical Quantities”. In: *PLOS ONE* | www.plosone.org 8 (12) (2013). S. 1-28.
- [19] Barr, M. & Massa, A.: *Programming Embedded Systems*. 2., vollst. überarb. u. akt. Aufl. USA: O'Reilly, 2006.
- [20] Hillcrest Laboratories, Inc.: BNO080 Data Sheet. Rockville, 2017. –Datenblatt

- [21] STMicroelectronics.: LSM6DSM. iNEMO inertial module: always-on 3D accelerometer and 3D gyroscope. Genf 2017 (DocID028165 Rev 7). –Datenblatt
- [22] Ruser, H. & Leon, F.P.: „Informationsfusion – Eine Übersicht“. In: *Technisches Messen* 74 (3) (2007). S. 93-102.
- [23] Louis, D. & Müller, P.: *Android. Der schnelle und einfache Einstieg in die Programmierung und Entwicklungsumgebung*. 2., vollst. überarb. U. akt. Aufl. München: Hanser, 2016.
- [24] Zul Azfar, A. & Hazry,D.: “A Simple Approach on Implementing IMU Sensor Fusion in PID Controller for Stabilizing Quadrotor Flight Control”. In: *Proceedings IOI IEEE in International Colloquium on Signal Processing and its Applications*, Penang, 2011. S. 28-32.
- [25] Li, S., Gao1, Y., Meng, G., Wang, G., Guan, L.: “Accelerometer-Based Gyroscope Drift Compensation Approach in a Dual-Axial Stabilization Platform”. In: *Electronics* 8 (5) (2019). S. 594.
- [26] Bishop, G. & Welch,G.: "An Introduction to the Kalman Filter". In: University of North Carolina at Chapel Hill, Department of Computer Science, 2006.
- [27] Ludwig, S.: "Optimization of Control Parameter for Filter Algorithms for Attitude and Heading Reference Systems". In: *2018 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Rio de Janeiro, 2018*.
- [28] Yang, L., Ren, J., Song, K., Ma, X., Yang, X.: “Complementary Filter Design Based Error Allocation for Attitude Estimation with Low-Cost Sensor”. In: *International Conference on Electrical, Control and Automation Engineering (ECAE 2017), Xiamen, 2017*. S. 206-211.
- [29] Kleshnev, V.:“ Rotational motions of the boat“. In: *Rowing Biomechanics Newsletter* 12 (2012). S. 132.
- [30] Himmelsbach, M., & Böhm, H.M.:“ Informationsverdichtung durch den gleitenden Mittelwert“. In: *Zeitschrift Stochastik in der Schule (SiS)* 35 (3) (2015). S. 12-19.

- [31] Grond, F. & Berger, J.: „Parameter Mapping Sonification“. In: Hermann, T., Hunt, A., Neuhoff, J.G. (Hg.) *The Sonification Handbook*. Logos Publishing House, 2011. S. 363-397.
- [32] Hermann, T.: *Sonification for Exploratory Data Analysis*. Dissertation Bielefeld: Universität Bielefeld, 2002.
- [33] de Magalhaes, F.A., Vannozzi, G., Gatta, G., Fantozzi, S.: “Wearable inertial sensors in swimming motion analysis: a systematic review”. In: *Journal of Sports Sciences* 33 (7) (2015). S. 732-745.