

DISS. ETH NO. 26711

SMARTPHONE-BASED ACOUSTIC BREATHING
PATTERNS DETECTION FOR A BIOFEEDBACK-
GUIDED BREATHING TRAINING

A dissertation submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

CHEN-HSUAN IRIS SHIH
MSc., Computer Science, Technical University of Munich

born on 31 January 1990
citizen of Taiwan

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. E. Fleisch, examiner
Prof. Dr. med. D. l'Allemand, co-examiner
Ass. Prof. Dr. T. Kowatsch, co-examiner

2020

ABSTRACT

Slow-paced biofeedback-guided breathing training has been shown to improve cardiac functioning and psychological well-being. Current training options, however, only attract a fraction of individuals who could benefit from it and are limited in their scalability as they require dedicated biofeedback hardware. In this dissertation, Breeze is introduced and examined, a mobile application that uses a smartphone's microphone to continuously detect acoustic breathing patterns, which then trigger an enjoyable biofeedback-guided breathing training. Accordingly, the implementation design of Breeze consists of the development of an accurate real-time acoustic breathing phases and patterns detection algorithm and a gamified biofeedback visualization. Thus, it enables an objective physiological signal measurement and provides a smooth and interactive interface between the device and the user. Build upon the design; three build-and-evaluate iterations are utilized to optimize the core functionalities of Breeze.

In the first iteration, Breeze#1, a field study with 27 overweight adolescents, was conducted to assess the technical feasibility and acceptance of Breeze. An engagement rate of 66.6% was achieved over the 5.5-month intervention with Breeze being successfully completed over 1,000 times. For the second iteration, Breeze#2, circa 2.76 million breathing sounds from 43 subjects, along with control sounds, were collected and annotated to train and test a generalizable breathing detection algorithm. We model breathing as inhalation-pause-exhalation-pause sequences and implement a phase-detection system with an attention-based LSTM model in conjunction with a CNN-based breath extraction module. A biofeedback-guided breathing training with Breeze works in real-time and achieves an accuracy of 75.5% in breath-phase detection. Furthermore, Breeze was evaluated in a pilot study with 16 new subjects, showing that the majority of subjects prefer Breeze over a validated active control condition in usefulness, enjoyment, control, and usage intentions. Breeze is also effective in strengthening users' cardiac

functioning by increasing high-frequency heart rate variability. To explore further, a third iteration, Breeze#3, examines the feasibility of smartphone acoustic-based abdominal breathing detection by inheriting the design pipeline of Breeze#2. Using the same set of data from the 43 subjects with an Attention-based Deep LSTM model and an MPCNN model for nose-inhalation identification, an f1-score of 79.0% and 69.9% is achieved with the studio microphone and the mobile phones' data, respectively, to detect abdominal breathing. These are the first results ever which demonstrate the feasibility of acoustic-based recognition of abdominal breathing.

The overall goal of Breeze is to extend the reach of therapeutic and preventive health interventions for chronic disease and mental illness by providing a scalable and effective breathing training. Its technical implementation, acceptance, and physiological impact present optimism regarding future longitudinal studies and applications in health care systems. This dissertation thus contributes to the interdisciplinary field of mobile health at the intersection of computer science, biological psychology, and behavioural medicine, and responds to the urgent need for scalable digital health interventions that improve the self-management capabilities of individuals with and without chronic disease or mental illness in their everyday lives.

ZUSAMMENFASSUNG

Entschleunigte, biofeedbackgeführte Atemübungen verbessern nachweislich die Herzfunktion und das psychische Wohlbefinden. Die derzeitigen Übungsmöglichkeiten begeistern jedoch nur einen Bruchteil der Personen, die davon profitieren können. Zudem sind sie in ihrer Skalierbarkeit begrenzt, da spezielle Biofeedbackhardware erforderlich ist. In dieser Dissertation stellen wir die mobile Applikation Breeze vor, die über das Smartphonemikrofon kontinuierlich Atemphasen und -muster erkennt, um eine gamifizierte, biofeedbackgeführte Atemübung durchzuführen. Das Implementierungsdesign von Breeze basiert auf der Entwicklung eines genauen Algorithmus zur Erkennung akustischer Atemmuster in Echtzeit und einer gamifizierten Biofeedback-Visualisierung. Das ermöglicht eine objektive physiologische Signalmessung und schafft eine reibungslose, sowieinteraktive Schnittstelle zwischen Gerät und Benutzer. Zur Optimierung der Kernfunktionalitäten in Breeze, führen wir aufbauend auf diesem Design, drei Entwicklungs- und Evaluationsiterationen durch.

In der ersten Iteration von Breeze#1 wurde eine Feldstudie mit 27 überwiegend Jugendlichen durchgeführt, um die technische Machbarkeit und Akzeptanz von Breeze zu bewerten. Die 5,5-monatige Intervention verzeichnet eine Engagement-Rate von 66,6%, wobei Breeze über 1000 Mal erfolgreich durchlaufen wurde. Für die zweite Iteration, Breeze#2, wurden ca. 2,76 Millionen Atem- und Kontrollgeräusche von 43 Probanden gesammelt und annotiert, um einen allgemeinen Atemerkennungsalgorithmus zu trainieren und zu testen. Wir modellieren die Atmung als Einatmung-Pause-Ausatmung-Pause-Sequenzen und implementieren ein Phasendetektionssystem mit einem aufmerksamkeitsbasierten LSTM-Modell in Verbindung mit einem CNN-basierten Atmungsextraktionsmoduls. Die biofeedbackgeführte Atemübung in Breeze arbeitet in Echtzeit und erkennt Atemphasen mit einer Genauigkeit von 75,5%. Des Weiteren wurde Breeze in einer Pilotstudie mit 16 neuen Testpersonen evaluiert. Die Studie zeigt, dass

die Mehrheit der Testpersonen Breeze in Nützlichkeit, wahrgenommener Freude, Bedienbarkeit und Nutzungsabsicht gegenüber einer validierten aktiven Kontrollbedingung bevorzugt. Zudem stärkt Breeze die Herzfunktion der Anwender, indem es die Herzfrequenzvariabilität im hochfrequenten Bereich erhöht. Eine dritte Iteration, Breeze#3, untersucht basierend auf der Design-Pipeline von Breeze#2 die Detektierbarkeit von Abdominalatmung. Unter Verwendung desselben Datensatzes der 43 Teilnehmer für das aufmerksamkeitsbasierte Deep LSTM-Modell und dem MPCNN-Modell zur Identifikation der Naseninhalation wird ein f_1 -Score bei der Erkennung von Abdominalatmung von 79,0% für Studiomikrofondaten und 69,9% für Smartphonedaten erzielt. Damit ist dies der erste Machbarkeitsnachweis einer auf akustikbasierten Erkennung der Abdominalatmung überhaupt.

Das übergeordnete Ziel von Breeze ist es, die Reichweite therapeutischer und präventiver Gesundheitsmaßnahmen für chronische und psychische Krankheiten durch ein skalierbares und effektives Atemtraining zu erweitern. Die technische Umsetzung, die Akzeptanz und die physiologischen Auswirkungen von Breeze stimmen optimistisch im Hinblick auf zukünftige Längsschnittstudien und Anwendungen in Gesundheitssystemen. Diese Dissertation leistet somit einen Beitrag zum interdisziplinären Gebiet der mobilen Gesundheit an der Schnittstelle von Informatik, Psychologie und Verhaltensmedizin und reagiert auf den dringenden Bedarf an skalierbaren digitalen Gesundheitsinterventionen, die die Selbstmanagementfähigkeiten von Menschen mit und ohne chronischer Krankheit oder psychischer Erkrankung im Alltag verbessern.