



Doctoral Thesis

## **Self-directed Assessment-driven Home Therapy of the Upper Extremity after Stroke with a Sensor-based Training System**

**Author(s):**

Wittmann, Frieder

**Publication Date:**

2016

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010813519> →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 23735

# Self-directed Assessment-driven Home Therapy of the Upper Extremity after Stroke with a Sensor-based Training System

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

presented by

FRIEDER PAUL WITTMANN

Diplom-Ingenieur Univ., Technische Universität München

born on 30.05.1985

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Roger Gassert (examiner)  
Prof. Dr. med. Andreas Luft (co-examiner)  
Prof. Dr. James Patton (co-examiner)

2016



## Abstract

Stroke is a leading cause of disability worldwide and long-term impairment in arm function is common in stroke survivors. Functional recovery after stroke was repeatedly found to be positively correlated with the dosage of the applied conventional or technology-based rehabilitative training. Virtual reality-based home therapy is an approach that has the potential to increase therapy dosage and has recently attracted great attention in the field of post-stroke rehabilitation. Several platforms dedicated to upper-extremity home rehabilitation have been proposed, although few have actually been tested for feasibility beyond case studies. The feasibility of entirely unsupervised home-based upper-limb post-stroke therapy over the course of several weeks remains to be investigated.

This demand led to the development of the ArmeoSenso upper-limb therapy system in collaboration with experts in the field of academic and commercial post-stroke rehabilitation at the University Hospital Zurich (USZ), the Balgrist University Hospital, Hocoma AG and ETH Zurich. ArmeoSenso is a wearable sensor- and VR-based therapy system, intended for unsupervised and affordable post-stroke home therapy. Two therapy games, with automatically adapting difficulty parameters and virtual rewards were developed with the intention to motivate the patient to train on a regular basis and with the goal of increased therapy dosage. The ArmeoSenso therapy system was subsequently evaluated in a clinical feasibility study with eleven chronic stroke survivors (on average 27 months post-stroke) who trained with the system for six weeks at home. Despite the lack of any external therapy supervision, patients selected a substantial therapy dosage, on average 137 minutes per week, with a high intensity (387 reached targets per session), with equal training on weekdays and weekends, and no significant decline over the course of the six-week intervention. This result compares favourably to other home therapy studies, where dosages in the range of 85 to 214 minutes per week were achieved, but higher levels of therapy supervision (e.g. visits or telephone calls) were incorporated, and it compares especially well to training times in routine outpatient therapy. A majority of patients stated that they would like to use the system long term, as well as in combination with conventional therapy. A majority of patients also found the system to be motivating. The feedback for the games was mixed, and accordingly the preferences for the games were also quite varied with most patients having a clear preference for one of the two games. This result underlines the need for a broad variety of therapy games to choose from. As automated rehabilitation systems carry the risk of being unsuitable for stroke patients due to their complexity, high priority was placed on developing a system that was easy and intuitive to use. Patient feedback on usability was positive, with the majority of patients

## Abstract

---

finding the games and assessments easy to understand, the items in the games easy to see and the system easy to set-up and use. Most patients were able to don all the sensors and sensor straps themselves, while the remaining patients were able to train by themselves after receiving assistance from their relatives with the straps for the upper arm and chest. The setup duration was low and represented only about 10% of the combined therapy and assessment time. The fact that patients, who were mostly elderly, often overweight and in one case obese, and with differing body heights, as well as typically without any gaming experience, were all able to successfully use the system, supports its broad applicability. However, patients with severe impairment of arm function used the system less than those with moderate or mild impairment, suggesting the need for the development of targeted training systems for this severely affected group, e.g. by addition of a gravity support system.

An algorithm developed specifically for ArmeoSenso, based on wearable inertial sensors allows for accurate (root mean square error of  $6^\circ$ ), low latency (61 ms) arm tracking. Although drift and magnetic disturbances are common, it was possible to develop a method that rejects long term drift in environments with inhomogeneous magnetic fields. This was validated for a full hour of ArmeoSenso arm therapy by using a retro reflective optical tracking system as ground truth. In addition, a majority of patients reported that the arm movement during the six-week home intervention matched their real-world arm movement. They also rested more frequently than required by the system, indicating that the forced rest is not a practical limitation of the method.

A voxel workspace assessment-driven target selection algorithm was shown to increase patients' three dimensional (3D) hand workspace by frequently placing targets at the border of the assessed workspace. To reduce compensatory movements, the pose of the arm was displayed relative to the trunk, which resulted in still observable, but relatively small and likely harmless trunk rotations and inclinations. Such observations would not have been possible with systems that do not track joint angles, or with commercial games which are not designed for rehabilitation purposes (e.g. Wii or XBox).

Despite a complete lack of any human therapy supervision – a first in home-based computer guided therapy – a high correlation between the short ArmeoSenso assessments and the clinical scales was found, demonstrating the potential to replace some of these time and resource consuming traditional assessments in the future, and to continue tracking patients' recovery in the home environment. The combined average time to complete all assessments for a therapy session was also just 4 minutes.

In conclusion, home therapy with ArmeoSenso, even without external therapy supervision, is safe and can motivate the patient to train for a substantial time over several weeks at high intensity. This research paves the way for abundant, VR-based physiotherapy at home, with the potential of significantly increasing therapy dosage and further promoting recovery.



## Zusammenfassung

Schlaganfall ist einer der Hauptursachen für körperliche Behinderungen weltweit und eine Beeinträchtigung der Armfunktion ist bei den Überlebenden des Schlaganfalls häufig. Es wurde mehrfach gezeigt, dass funktionelle Fähigkeiten nach einem Schlaganfall positiv mit der Dosis der Therapie korrelieren. Dies gilt sowohl für konventionelle als auch sensorbasierte Therapie. Heimtherapie mit Hilfe von Computerspielen ist ein Ansatz, welcher das Potential hat, diese Therapiedosis zu erhöhen. Entsprechend hat dieser Ansatz in den letzten Jahren viel Aufmerksamkeit im Bereich der Schlaganfalltherapie erhalten. Etliche Systeme welche auf das Training der oberen Extremitäten spezialisiert sind wurden vorgestellt, auch wenn nur wenige klinisch erprobt wurden. Die Durchführbarkeit einer nur vom Computer gesteuerten Heimtherapie, ohne Einwirkung von Fachkräften von aussen, über mehrere Wochen hinweg, ist bisher nicht untersucht worden.

Daher wurde das ArmeoSenso-Projekt ins Leben gerufen, welches auf einer Zusammenarbeit von Experten aus dem akademischen und kommerziellen Bereich der Schlaganfalltherapie beruht. ArmeoSenso ist ein Therapiesystem welches, basierend auf Computerspielen und tragbaren Bewegungssensoren (IMUs) dem Patienten eine kostengünstige und kurzweilige Trainingsmöglichkeit bieten soll. Zwei Therapiespiele, welche ihren Schwierigkeitsgrad automatisch an die Fähigkeiten des Patienten anpassen dienen dem regelmässigen Training.

Nach abgeschlossener Entwicklung eines ersten Prototypen, wurde das System in einer klinischen Machbarkeitsstudie an elf Schlaganfall Patienten (durchschnittlich 27 Monate nach ihrem Schlaganfall) erprobt. Diese Patienten trainierten mit dem System sechs Wochen lang selbstständig von zuhause aus. Obwohl keinerlei Intervention von aussen erfolgte, trainierten die Patienten in erheblichem Ausmass, durchschnittlich etwa 137 Minuten pro Woche. Dabei trainierten sie an Wochenenden genauso häufig wie auch unter der Woche, und es wurde keine statistisch signifikante Abnahme der wöchentlichen Therapie-Dauer zum Ende der Intervention hin festgestellt ( $p = 0.146$ ). Diese Therapiedauer ist vergleichbar mit bisherigen Studien (85 bis 214 Minuten pro Woche wurden berichtet) die ebenfalls eine Heimtherapie boten, welche hauptsächlich vom Computer gesteuert wird. Allerdings wurde bei diesen Studien die Therapie regelmässig von aussen überwacht, zB. durch Besuche oder Telefonanrufe von Seiten der Studienleiter. Diese regelmässige Überwachung birgt allerdings den Nachteil, dass sie zusätzliche Kosten verursacht, was dem Ziel einer kostengünstigen Heimtherapie entgegen steht. Daher war es wichtig zu zeigen, dass eine Therapiesteuerung – rein von den Algorithmen des Computers aus gesteuert – umsetzbar und unbedenklich ist.

Eine Mehrzahl der Studienteilnehmer gab am Ende der Studie an, dass sie das System gerne

## Zusammenfassung

---

langfristig zuhause nutzen würden, wenn möglich auch in Kombination mit konventioneller Therapie. Weiter fanden die meisten Teilnehmer das System motivierend. Die Rückmeldung bezüglich der Spiele war unterschiedlich, was sich auch in der beobachteten Trainingsdauer widerspiegelte. Die meisten Patienten bevorzugten eines der beiden Spiele deutlich gegenüber dem anderen. Allerdings war auf die gesamte Studiengruppe bezogen kein Spiel (statistisch signifikant) beliebter.

Automatische Rehabilitationssysteme können sich aufgrund ihrer Komplexität als ungeeignet für den Patienten erweisen. Gerade bei Schlaganfallpatienten, welche zumeist älter sind, ist dieses Risiko hoch. Daher wurde grosser Wert darauf gelegt ein System zu entwickeln welches einfach und intuitiv zu nutzen ist. So wurde beispielsweise das Microsoft Windows Betriebssystem im Hintergrund verborgen und musste nicht direkt bedient werden. Die Rückmeldung der Patienten bezüglich der Bedienbarkeit war positiv. Die Mehrzahl der Studienteilnehmer fanden die Spiele und Assessments leicht verständlich. Zudem konnten sie die virtuellen Gegenstände in den Spielen gut erkennen. Es fiel ihnen auch leicht das System zu starten, und die meisten Patienten waren in der Lage die Sensoren und die Sensorbefestigungen selbst am Körper anzubringen. Die übrigen drei Patienten konnten mit Hilfe von Angehörigen die Sensoren am Thorax und am Oberarm befestigen. Alle Patienten waren in der Lage das Armband mit dem dazugehörigen Handgelenkssensor selbstständig anzuziehen. Kein Patient benötigte Hilfe von professionellen Pflegern. Die durchschnittliche Zeit zum Starten des Systems, Anziehen der Sensoren und die Kalibrierung, betrug insgesamt nur  $4 \pm 2$  Minuten, was in etwa 10% der gesamten Nutzungsdauer (Spiele + Assessments) entspricht. Die Tatsache, dass grösstenteils ältere Schlaganfallpatienten (sechs von elf Patienten waren über 60 Jahre alt), welche meist keinerlei Computerspielerfahrung hatten, oft auch übergewichtig waren und unterschiedlichste Körpergrössen aufwiesen das System nutzen konnten, zeigt die breite Anwendbarkeit der ArmeoSenso-Therapie. Es kam jedoch zu einer statistisch signifikant geringeren Nutzung durch diejenigen vier Patienten welche eine starke funktioneller Einschränkung der oberen Extremität aufwiesen (FMA-UE < 20). Diese Beobachtung legt nahe, dass das System für schwer beeinträchtigte Patienten angepasst werden sollte, etwa durch eine Vorrichtung zur Gewichtsentlastung des Armes.

Für das ArmeoSenso-System wurde eigens eine neuartige Methode zur Rekonstruktion der Armbewegungen entwickelt. Aus den gemessenen IMU Sensordaten, bestehend aus Beschleunigung, Winkelrate und Magnetfeldstärke, kann die Orientierung der Sensoren im Raum mit hoher Genauigkeit (RMS 6 deg) und mit geringer Latenz (61 ms) geschätzt werden. Obwohl Drift und Störungen des Magnetfeldes bekannte Probleme beim Einsatz von IMUs sind, war es möglich ein Verfahren zu entwickeln, welches sich robust gegenüber Langezeitdrift erweist und auch in Umgebungen mit inhomogenen Magnetfeld (wie man es häufig im Heimbereich anfindet) zuverlässig funktioniert. Dieses Verfahren macht sich zu nutze, dass Armbewegungen im freien Raum steht anstrengend sind und regelmässige Pausen daher notwendig sind. Während dieser Pausen befindet sich der Arm in einer Ruhestellung, und das dortige Magnetfeld wurde während der Kalibrierung vermessen. So kann der mittlerweile aufgetretene Orientierungsdrift wieder korrigiert werden. Dieses Verfahren wurde über mehrere Testreihen, je eine Stunde ArmeoSenso-Armtherapie, mit Gesunden getestet, indem die geschätzten Ori-

entierung zeitgleich mit optischen Messungen (welche als Goldstandard betrachtet werden können) verglichen wurden. Zudem berichtete die Mehrzahl der Patienten, welche an der zuvor beschriebener Heimstudie während sechs Wochen teilnahmen, dass die Bewegungen des virtuellen Arms auf dem Bildschirm mit ihrer tatsächlichen Armbewegungen übereinstimmten. Ausserdem machten die Patienten öfters Pause als vom Algorithmus bedingt wäre, was dafür spricht, dass die notwendigen Ruhepausen keine praktische Einschränkungen mit sich bringt. Die entwickelte Methode liesse sich auch leicht in anderen Bereichen in denen man vor dem PC sitzt und Armbewegungen durchführt nutzen, etwa zum Spielen mit einem Virtual Reality Headset wie der Oculus Rift.

Ein Modell des Arbeitsraumes der Hand, basierend auf Voxeln wurde entwickelt und verwendet, um den Patienten während der Therapiespiele automatisch zu diagnostizieren. Gleichzeitig wird dieses Modell aber auch genutzt, um Ziele, welche der Patient erreichen muss, etwa die Meteore im 'Meteor' Spiel, genau an den Rand des erfassten Arbeitsraumes zu setzen. So wird der Patient permanent herausgefordert. Es wird jedoch gleichzeitig vermieden, dass Ziele weit ausserhalb des Arbeitsraumes platziert werden, was nur unnötigen Frust erzeugen dürfte. Um ungewollte Kompensationsbewegungen des Oberkörpers zu verhindern, wurden die Bewegungen des Armes in den Spielen steil relativ zum Oberkörper dargestellt. Kompensationsbewegungen liessen sich zwar weiterhin in den gemessenen Daten erkennen, betrug aber nur wenige Grad und sind daher vermutlich unbedenklich. Derartige Methoden und Beobachtungen wären mit kommerzielle Spielen, welche Armbewegungen erfordern, wie sie zB. für die Nintendo Wii oder Microsoft Xbox & Kinect erhältlich sind, nicht möglich.

Zudem wurden vor, und nach jeder Therapiesitzung zwei kurze Assessments durchgeführt (insgesamt ca. vier Minuten lang) welche unter anderem den planeren Arbeitsraum des Patienten vermessen. Obwohl diese Assessments ohne Aufsicht im Hause des Patienten stattfanden (etwas was bisher, so noch nicht versucht worden war), konnte eine starke, signifikante Korrelation mit den etablierten klinischen Assessments gezeigt werden. Es ist daher denkbar, dass solche selbstständig durchführbaren Assessments es in Zukunft erlauben werden, den Fortschritt des Patienten kostengünstig und regelmässig zu überwachen.

Zusammengefasst, ist die Heimtherapie mit dem ArmeoSenso-System unbedenklich und motiviert Schlaganfallpatienten durch computerspielartige Therapieübungen dazu regelmässig in substantiellem Ausmass zu trainieren, auch ohne Überwachung von Pflegern oder Ärzten. Diese Ergebnisse sollten helfen ein allgemein zugängliches und erschwingliches, Therapieangebot für Schlaganfallpatienten zu schaffen.