

Abschlussbericht zum Vorhaben
FR327

Laufzeit

01.01.2022 – 30.12.2024

Berichtszeitraum

01.01.2024– 30.11.2024

Bericht vom 30.06.2054

Autoren

C. Prahm

M. Bressler

T. Gohlke

A. Hönning (Statistiker)

J. Kolbensschlag

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung Deutsch	3
Kurzfassung Englisch	4
1. Problemstellung	5
2. Forschungszweck/-ziel	5
3. Methodik	7
3.1 Studienteilnahme und Datenerhebung	7
3.2 Motion Tracking System	8
3.3 VR Applikation	9
3.4 Kontrollgruppe	15
3.5 Statistische Auswertung	15
3.5.1 Vorgehen bei der statistischen Analyse	16
3.5.2 Missing Data und Plausibilitätschecks	17
4. Ergebnisse des Gesamtvorhabens	18
Demographische Daten	18
Motivation und Anstrengung	24
Klinische Funktionalität: Bewegungsausmaß (ROM)	26
Klinische Funktionalität: Kapandji Index	30
Klinische Funktionalität: Kraftmessung	31
PROMS: Disabilities of the Arm, Hand, and Shoulders Questionnaire (DASH)	33
Klinische Funktionalität: Schmerz (NRS, semi-strukturierte Interviews)	35
Klinische Funktionalität: Clothespin Relocation Test	39
PROMs: Fragebögen zur Lebensqualität SF-36	43
Greif- und Planungsverhalten – Motion und Eye Tracking: Kohorte Karpal Tunnel	44
Klinische Funktionalität - Bewegungsausmaß (ROM, Kapandji, DASH, BCTQ): Kohorte Karpaltunnel	47
Klinische Funktionalität - Bewegungsausmaß (ROM, Kapandji, Handkraft, DASH): Kohorte Distale Radiusfraktur	52
Publikationen	55
Konferenzbeiträge	56
Infomaterial	57
5. Auflistung der für das Vorhaben relevanten Veröffentlichungen, Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechte von nicht am Vorhaben beteiligten Forschungsstellen	57
6. Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich des Forschungszwecks/-ziels, Schlussfolgerungen	58
7. Aktueller Umsetzungs- und Verwertungsplan	60
11. Anhänge	64

Kurzfassung Deutsch

Ziele: Hypothesen/Fragestellungen

Ziel des Vorhabens war die klinische und anwendungsnahe Evaluation digital-gestützter Rehabilitationsmethoden bei Handverletzungen und -erkrankungen. Es sollte untersucht werden: (a) ob Virtual-Reality-gestützte Rehabilitationssysteme wie StableHandVR die Therapieadhärenz und Funktion verbessern, (b) ob standardisierte subjektive und objektive Assessments wie AROM, Handkraft, 2PD, DASH, BCTQ und SF-36 im Verlauf valide Therapieerfolge abbilden, und (c) welche Unterschiede sich zwischen operativer und konservativer Versorgung (z. B. bei distaler Radiusfraktur oder Karpaltunnelsyndrom) im klinischen Verlauf zeigen.

Aktivitäten/Methoden:

Die Studie erfolgte als prospektive, multizentrische Beobachtungs- und Interventionsstudie mit insgesamt 110 gesunde ProbandInnen und 235 PatientInnen in verschiedenen Indikationsgruppen: traumatische Handverletzungen, Karpaltunnelsyndrom (CTS), distale Radiusfraktur. Zur Methodik gehörten die Entwicklung von VR Feedback Systemen: Nutzung eines farbcodierten Bewegungsfeedbacks zur Förderung der Bewegungsausführung (Ampel-Hände), täglich freigeschaltete Spielstationen, Bewohner der VR Welt, Highscores, und der Begleithund. Es wurden standardisierte klinische Untersuchungen durchgeführt zur Funktionalität (ROM, Kraft, 2PD, Kapandji) und zur Bewertung der Range of Motion (ROM), in der insgesamt insgesamt 52 einzelne Parameter analysiert wurden. Außerdem wurden Patient-Reported Outcome Measures, PROMs, vorgelegt (DASH, BCTQ, SF-36, IMI, SUS). Die PatientInnen wurde in Interventions- und Kontrollgruppen randomisiert mit Mixed-Methods-Analyse (quantitativ & qualitative Rückmeldung).

Ergebnisse/ Praxisverwertung:

- Die demografischen Analysen unterstrichen eine hohe Relevanz der Rehabilitationsbedarfe bei PatientInnen in körperlich belastenden Berufen mit dominanter Handverletzung.
- *StableHandVR* wurde sehr gut akzeptiert (IMI & SUS hoch); es konnte eine gesteigerte Übungstreue bei gleichzeitig hohem subjektiven Nutzen festgestellt werden. *StableHandVR* ist praxistauglich, alltagskompatibel und mit geringen Schulungsaufwänden implementierbar. Die automatisierte Datenerfassung ermöglicht eine objektive und langfristige Verlaufskontrolle.
- Bei PatientInnen mit traumatischen Handverletzungen konnte durch die Anwendung von *StableHandVR* eine signifikante Verbesserung der Beweglichkeit (ROM, Kapandji) und Handkraft im Therapieverlauf erzielt werden, während sich in DASH, Schmerzempfinden (NRS) und Zweipunktschwelle (2PD) keine signifikanten Gruppenunterschiede nachweisen ließen.
- Bei CTS zeigten sich signifikante Verbesserungen in Handkraft, Sensibilität (2PD), Kapandji-Score und subjektiver Symptombelastung (BCTQ). Auch bei distaler Radiusfraktur konnten signifikante Verbesserungen in ROM, Handkraft und DASH-Score nachgewiesen werden.
- Die Ergebnisse unterstützen die Weiterentwicklung digitaler Rehabilitationspfade und können perspektivisch zur Reduktion von Arbeitsunfähigkeitstagen beitragen.

Kurzfassung Englisch

Objectives / Research Questions

The aim of this project was the clinical and application-oriented evaluation of digitally supported rehabilitation methods for hand injuries. Specifically, it investigated: (a) whether VR-based systems like *StableHandVR* improve therapy adherence and functional outcomes; (b) whether standardized subjective and objective assessments (AROM, grip strength, 2PD, DASH, BCTQ, SF-36) validly reflect therapeutic progress; and (c) whether differences exist in clinical outcomes between operative and conservative treatments (e.g. for distal radius fractures, or carpal tunnel syndrome).

Methods

This was a prospective, multicenter observational and interventional study involving 110 healthy participants and 235 patients with various indications: traumatic hand injuries, carpal tunnel syndrome (CTS), and distal radius fractures. The VR feedback system included color-coded motion guidance ("traffic light hands"), progressively unlocked game stations, virtual inhabitants, high scores, and a companion dog. Standardized clinical assessments were conducted (ROM, strength, 2PD, Kapandji score), evaluating a total of 52 functional parameters. Patient-reported outcome measures (PROMs) included DASH, BCTQ, SF-36, IMI, and SUS. Patients were randomized into intervention and control groups, and both quantitative and qualitative data were collected.

Results / Practical Implications

- Demographic analysis highlighted a high rehabilitation need among patients in physically demanding jobs, especially with dominant hand injuries.
- *StableHandVR* was well accepted (high IMI & SUS scores), demonstrating increased training adherence and perceived benefit. It proved practical, user-friendly, and easy to implement with minimal training requirements. Automated data collection supports long-term monitoring.
- In patients with traumatic hand injuries, *StableHandVR* significantly improved range of motion (ROM, Kapandji) and grip strength, while no significant group differences were found in DASH, pain (NRS), or two-point discrimination (2PD).
- CTS patients showed significant improvements in grip strength, sensitivity (2PD), Kapandji score, and symptom burden (BCTQ).
- For distal radius fractures, significant improvements were seen in ROM, grip strength, and DASH score.
- These results support the further development of digital rehabilitation pathways, which may ultimately reduce work absence due to hand-related conditions.

1. Problemstellung

Die funktionelle Wiederherstellung der Hand- und Fingerfunktion nach traumatischen Handverletzungen stellt eine zentrale Herausforderung in der rehabilitativen Nachsorge dar. Trotz moderner chirurgischer Versorgung ist der Rehabilitationsverlauf häufig langwierig und durch eingeschränkte Motivation sowie unzureichende Therapieadhärenz der Patientinnen und PatientInnen erschwert. Besonders außerhalb der strukturierten Therapiesitzungen fehlt es vielen Betroffenen an Anreiz, regelmäßig und ausreichend intensiv eigenständig zu üben.

Klassische Rehabilitationsübungen werden von den Patientinnen und PatientInnen oft als monoton, schmerzhaft oder wenig zielgerichtet empfunden, was zu geringer Übungshäufigkeit und damit zu unzureichendem funktionellen Outcome führen kann. Dies betrifft insbesondere komplexe Handverletzungen mit motorischer und sensorischer Beeinträchtigung, bei denen eine hochfrequente und qualitativ hochwertige Beübung essenziell für die Wiederherstellung der Arbeitsfähigkeit ist.

Virtuelle Realität (VR) bietet das Potenzial, durch immersive, spielerisch gestaltete Szenarien sowohl die extrinsische Motivation als auch die objektive Bewegungsqualität zu steigern. Gleichzeitig ermöglicht die Integration von Bewegungserfassungssystemen (z. B. optisches Handtracking) und digitalen Feedbackmechanismen eine kontinuierliche Verlaufsdokumentation. Bisher fehlen jedoch etablierte, evaluierte VR-Systeme, die speziell auf die Bedürfnisse von Patientinnen und PatientInnen mit komplexen Handverletzungen zugeschnitten sind und sowohl im stationären als auch im häuslichen Setting Anwendung finden können.

Ziel des Projekts StableHandVR war es daher, ein immersives, motivierendes und technisch praktikables VR-System zur Handrehabilitation zu entwickeln und in einer klinischen Studie hinsichtlich Umsetzbarkeit, Motivation, Nutzungsverhalten und funktioneller Wirksamkeit zu evaluieren.

2. Forschungszweck/-ziel

Bisher bedarf es der jahrelangen Erfahrung ausgebildeter Physio- und Ergotherapeuten, um Abweichungen, Fehlstellungen und Fehlbewegungen zu erkennen und zu korrigieren. Der Therapieerfolg ist demnach ebenso abhängig von der Erfahrung des jeweiligen Therapeuten. Diese Bewegungen und Abläufe können mit der virtuellen Anwendung StableHandVR objektiv quantifiziert werden. StableHandVR verfolgt jedoch nicht nur rehabilitative, sondern auch diagnostische Ziele. Dies ermöglicht den PatientInnen ein speziell angepasstes, virtuelles Training in spielbasierten Szenarien basierend auf der Auswertung und adaptiven Anpassung des Meta Quest 3 Fingertrackings.

Ziel des Forschungsvorhabens StableHandVR war die Entwicklung, Implementierung und Evaluation eines virtuellen Trainingssystems zur funktionellen Rehabilitation der Hand- und Fingerfunktion nach traumatischen Verletzungen. Das letztendliche Ziel dieses Forschungsvorhabens soll es sein, eine validierte, virtuelle Anwendung zur Handrehabilitation zu entwickeln und in den klinischen Ablauf zu integrieren. Dadurch soll sowohl die Frequenz als auch die Qualität der Beübung gesteigert werden. Weiterhin ist es möglich, kontinuierlich die Leistung des PatientInnen zu überwachen und damit den Therapiefortschritt zu messen. Dies soll im Rahmen des stationären Aufenthaltes mittels einer VR-Anwendung erfolgen, bei der verschiedene Handbewegungen und Tätigkeiten durchgeführt werden können. Im Zentrum stand dabei die Frage, ob ein motivierendes, spielbasiertes Virtual-Reality-System (VR) die Eigenaktivität der PatientInnen im Rahmen der stationären Rehabilitation erhöhen und dadurch zur Verbesserung klinischer Outcomes

beitragen kann. Der Forschungszweck gliedert sich in drei zentrale Zielbereiche mit folgenden Fragestellungen:

1. Klinische Machbarkeit und Wirksamkeit

Untersuchung der Anwendbarkeit eines VR-basierten Serious Games im realen Klinikalltag (Komplexstationäre Rehabilitation, KSR):

- Evaluation des Einflusses der VR-Intervention auf funktionelle Parameter wie Bewegungsumfang (ROM), Schmerzempfinden (NRS), und Handfunktion (DASH, Kapandji) → Wird durch den Einsatz des VR Systems die Beweglichkeit der PatientInnen verbessert?
- Kann die Rehabilitation schwerer Handverletzungen durch den Einsatz einer VR Umgebung im Vergleich zu konservativen Therapiemethoden beschleunigt werden?
- Vergleich mit einer Kontrollgruppe ohne spezifische VR-Beübung und Untersuchung eines Alterseffekts

2. Motivationsförderung und Nutzungsverhalten

- Bewertung der Wirkung von Gamification-Elementen wie visuelles Feedback, Aufgabenstruktur und Belohnungssysteme → Wird durch den Einsatz des VR Systems die Motivation der PatientInnen verbessert?
- Analyse der intrinsischen Motivation und Nutzerakzeptanz mittels validierter Fragebögen (z. B. IMI, SUS, MARS, UEQ).
- Erhebung eines funktionellen Ausgangs- und Endbefundes, sowie Dokumentation der Veränderungen über die Dauer der Rehabilitation (Spieldauer, Übungshäufigkeit, Interaktion mit Trainingsstationen).

3. Technische und diagnostische Komponente

- Validierung eines VR-Trainingsystems mit integriertem Handtracking zur Bewegungsanalyse ohne zusätzliche Sensorik oder Handschuhe.
- Entwicklung und Nutzung eines farbcodierten Bewegungsfeedbacks zur Förderung der Bewegungsausführung (Ampel-Hände).
- Dokumentation der Veränderung dieser visuomotorischen Antizipationszeit im Therapieverlauf und Erhebung von Vergleichsdaten gesunder ProbandInnen zur Identifikation von Normwerten

Das Projekt adressiert damit eine bestehende Lücke in der digitalen Rehabilitation nach Handverletzungen, indem es ein niedrigschwelliges, kabelloses und klinisch anschlussfähiges System zur Förderung selbstständiger Übungsaktivität entwickelt und evaluiert.

Forschungshypothesen

1. Durch Anwendung des HandVR Systems kann die Handfunktion intraindividuell verbessert werden. Dies schlägt sich sowohl in unabhängigen Tests als auch im systeminternen High-score nieder
2. Im Vergleich zur Kontrollgruppe, die keine VR Intervention erhalten hat, sind Verbesserungen bezüglich der funktionellen Handbewegung (DASH) mindestens gleich gut
3. Die VR Intervention motiviert die PatientInnen mehr als die konventionelle Therapie

Primäre Zielsetzungen:

- Verbesserung der Rehabilitation bei Handverletzungen zur schnellen Wiedereingliederung in das Berufsleben (ROM, Kapandji Index, DASH)

Sekundäre Zielsetzung:

- Abschwächung vorhandener Schmerzen (NRS)

3. Methodik

3.1 Studienteilnahme und Datenerhebung

Die Studie wurde im Rahmen der Komplexstationären Rehabilitation (KSR) an der BG Klinik Tübingen durchgeführt. Eingeschlossen wurden erwachsene PatientInnen mit traumatischen Handverletzungen, welche physisch und kognitiv in der Lage waren, an der VR-Therapie teilzunehmen. Nach schriftlicher Einwilligung und Screening erfolgte die randomisierte Zuteilung zur Interventions- oder Kontrollgruppe.

PatientInnen der Interventionsgruppe erhielten über einen Zeitraum von drei Wochen täglich an Werktagen (12 Einheiten) eine VR-gestützte Therapiesitzung mit einer durchschnittlichen Dauer von etwa 20–25 Minuten pro Einheit. Die VR-Anwendung war frei zugänglich in der physiotherapeutischen Abteilung installiert und konnte unter Anleitung oder eigenständig genutzt werden. Dabei wurden sowohl die Bewegungsreichweite als auch die Interaktion mit virtuellen Objekten (z. B. Greifbewegungen, Präzisionsaufgaben) trainiert.

Während jeder Sitzung wurden automatisch folgende Nutzungsdaten aufgezeichnet:

- Start- und Endzeit der Sitzung
- Dauer pro Spieleinheit
- Anzahl der absolvierten Spielstationen
- Art und Häufigkeit ausgeführter Bewegungen
- Feedbackfarbe der „Ampelhände“ (zur Visualisierung des Bewegungsausmaßes)
- Ingame-Leistungen (Highscores, Fortschritt)

Zusätzlich erfolgte die Erhebung klinisch-funktioneller Parameter zu zwei Zeitpunkten (prä/post):

- Funktionelle Tests und Fragebögen: Bewegungsausmaß (Range of Motion - ROM), Kapandji-Index, Kraftmessung, Fragebogen Disability of Arm, Shoulder and Hand (DASH=
- Schmerz- und Lebensqualitätsparameter: Numerical Rating Scale (NRS), Lebensqualität Fragebogen (Short-Form 36, -SF-36)
- Motivations- und Systemakzeptanz-Fragebögen: Fragebogen zur intrinsischen Motivation (Intrinsic Motivation Inventory - IMI), Anwendernützlichkeitsfragebogen (System Usability Scale -SUS), Bewertungsbogen für Applikationen (Mobile Application Rating Scale - MARS), Nutzererfahrungsfragebogen (User Experience Questionnaire - UEQ)

Alle Daten wurden pseudonymisiert mittels alphanumerischem Code erhoben und auf klinikinternen Servern DSGVO-konform gespeichert. Der Zugriff war ausschließlich autorisierten StudienmitarbeiterInnen vorbehalten. Die Auswertung erfolgte unter Verwendung etablierter statistischer Verfahren (SPSS, R) unter Berücksichtigung der jeweils geeigneten Verteilungsannahmen.

Insgesamt haben 235 PatientInnen und 110 gesunde ProbandInnen an der Studie teilgenommen. Die Gesamtteilnehmerzahl beträgt damit 345 exklusive Drop-outs

Bei den PatientInnen mit distaler Radiusfraktur und Karpaltunnelsyndrom war es letztlich nicht möglich, alle 12 Einheiten der StableHandVR-Intervention bzw. der Kontrolltherapie umzusetzen, da diese Personen überwiegend ambulant betreut wurden und selbst im Rahmen einer Studie nicht bereit waren, mehr als drei- bis viermal für Therapiesitzungen in die Klinik zu kommen. Eine Nutzung von StableHandVR im häuslichen Umfeld konnte aufgrund der verschärften Regelungen des Medizinproduktegesetzes nicht ermöglicht werden. Diese PatientInnen wurden jedoch trotzdem bei ihren Besuchen in die Motion- und Eye-Tracking Analyse einbezogen und nahmen daran teil.

3.2 Motion Tracking System

Zur detaillierten Bewegungsanalyse wurde zusätzlich ein externes Motion Tracking System (Qualisys) eingesetzt. Dieses kam insbesondere in den Validierungs- und Vergleichsphasen zum Einsatz, um das integrierte VR-Handtracking objektiv zu beurteilen und die Bewegungen präzise zu dokumentieren. Dabei wurden retroreflektive Marker an definierten anatomischen Referenzpunkten angebracht und mittels Infrarotkameras in 3D erfasst, so dass das Bewegungsausmaß (ROM) automatisiert erfasst werden kann.

Das Motion Tracking System ermöglichte:

- Die Erfassung objektiver kinematischer Parameter (Bewegungswinkel, -geschwindigkeit, -amplitude) mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung,
- Die Validierung der Bewegungserkennung innerhalb der VR-Umgebung (z. B. Erreichbarkeit und Genauigkeit von Bewegungen),
- Die Unterscheidung kompensatorischer vs. physiologischer Bewegungsmuster, insbesondere bei komplexen Handverletzungen.

Darüber hinaus diente das System in Kombination mit Eye Tracking als Grundlage für die Analyse des Antizipationsverhaltens, indem die zeitliche Koordination von Blick- und Greifbewegung gemessen und über den Therapieverlauf dokumentiert wurde.

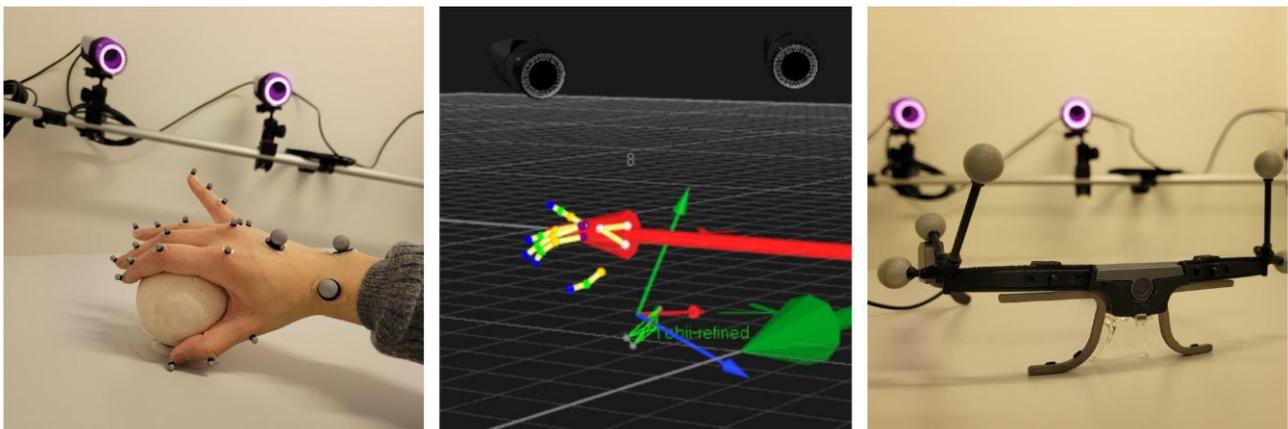


Figure 1 Motion Tracking System (links, mitte) and Eye Tracking System (rechts)

3.3 VR Applikation

Das Pilotprojekt zur Überprüfung der Zusammenarbeit aller Systeme, Fragebögen und Datenbanken ist fristgerecht abgeschlossen worden. Der RCT zur VR Studie konnte vor mit einer Verzögerung von 3 Monaten aufgrund des Einkaufs der VR Brillen gestartet werden. Dieser Umstand korreliert allerdings mit der Verzögerung des Einbaus des Motion Tracking Systems aufgrund Lieferverzögerungen der benötigten Mikrochips.

Zunächst wurden im bestehenden VR-Projekt die technischen Voraussetzungen der unterschiedlichen VR-Systeme evaluiert. Nach ausführlicher Prüfung der verschiedenen VR-Hard- und -Software haben wir uns für den Einsatz einer Oculus Quest 2 bzw. im weiteren zeitlichen Verlauf auch der weiter entwickelten Meta Quest 3 entschieden. Der Vorteil dieser Modelle gegenüber vergleichbaren Anbietern besteht in einem kabellosen Head Mounted Display, das über 4 Kameras die Handbewegungen der Studienprobanden erfasst und aufzeichnet.

Für dieses VR-System wurde im interdisziplinären Team aus TherapeutInnen, MedizinwissenschaftlerInnen, ÄrztInnen und einem Software-Entwickler eine virtuelle Farmumgebung entwickelt und im Sinne eines „serious games“ gestaltet, das den handverletzten PatientInnen zur Durchführung von Übungen motivieren soll.

Das System umfasst über mehr als 17 spezifische therapeutische Bewegungen (siehe Figure 2), darunter isolierte Einzelbewegungen, die zu komplexen Kombinationsbewegungen erweitert werden, und die sowohl gleichläufig als auch gegenläufig ausgeführt werden können. Die Übungen zielen auf funktionelle Bewegungsabläufe ab, wie sie im Alltag zur Anwendung kommen, z. B. Greifen, Pronation/Supination, Opposition oder radiale/ulnare Abduktion. Die Aufgaben lassen sich hinsichtlich Intensität, Dauer und Komplexität an das jeweilige Rehabilitationsstadium anpassen.

Zur visuellen Anleitung dienen sogenannte „Vorschauhände“, die die jeweilige Zielbewegung in Echtzeit in der virtuellen Umgebung vormachen (siehe Figure 3). PatientInnen können diese Bewegungssequenz mit ihren eigenen Händen unmittelbar nachahmen. Dadurch wird die motorische Planung unterstützt und ein intuitives Bewegungsklernen gefördert. Gleichzeitig reduziert die visuelle Orientierung Unsicherheiten im Bewegungsablauf, da die PatientInnen ihre echten Hände nicht sehen können und auch die TherapeutInnen in diesem Fall keine Bewegungen vormachen. Alles ist direkt in der VR Umgebung integriert.

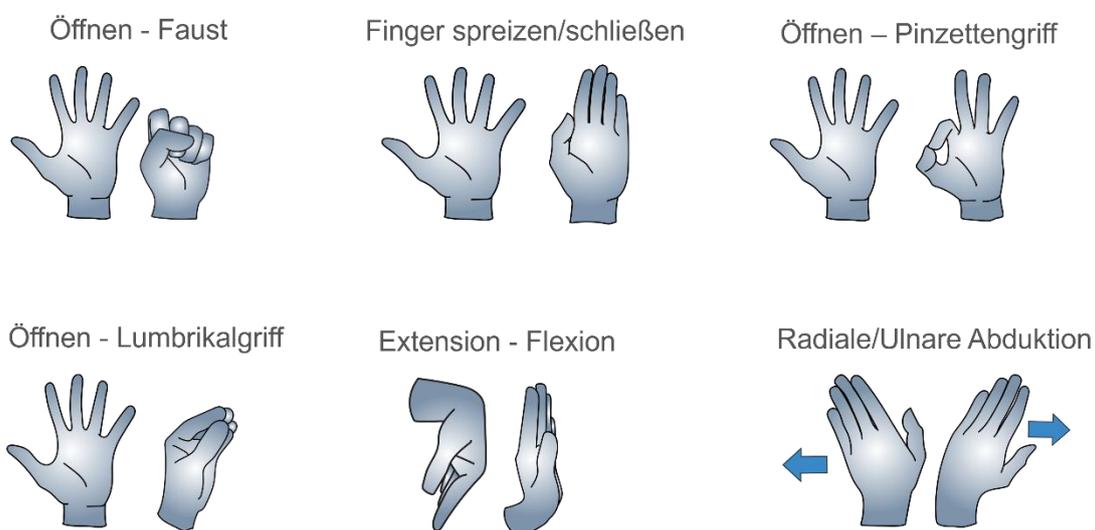


Figure 2 Es stehen über 17 therapeutische Einzelbewegungen zur Verfügung, die auch als Kombinationsbewegungen ausgeführt werden können, sowohl gleichläufig als auch gegenläufig.



Figure 3 Die "Vorschauhände" zeigen den PatientInnen die Übungen vor, die mit den eigenen Händen nachgemacht werden können

Die Zusammenstellung der Übungen kann mithilfe eines zusätzlichen Tools, dem *StableHandVR Manager*, für jede PatientIn individuell angepasst werden (siehe Figure 4). TherapeutInnen können gezielt bestimmte Bewegungsarten oder Griffmuster in das tägliche Übungsprogramm integrieren, etwa zur gezielten Förderung der Greiffunktion oder zur Steigerung der Bewegungsreichweite eines bestimmten Gelenks. Alternativ passt ein integrierter adaptiver Algorithmus das Training automatisch an den aktuellen Leistungsstand und den bisherigen Verlauf an, da mittels der Kameras in der Meta Quest 3 kontinuierlich Bewegungsdaten aufgenommen und in der Applikation verarbeitet werden.

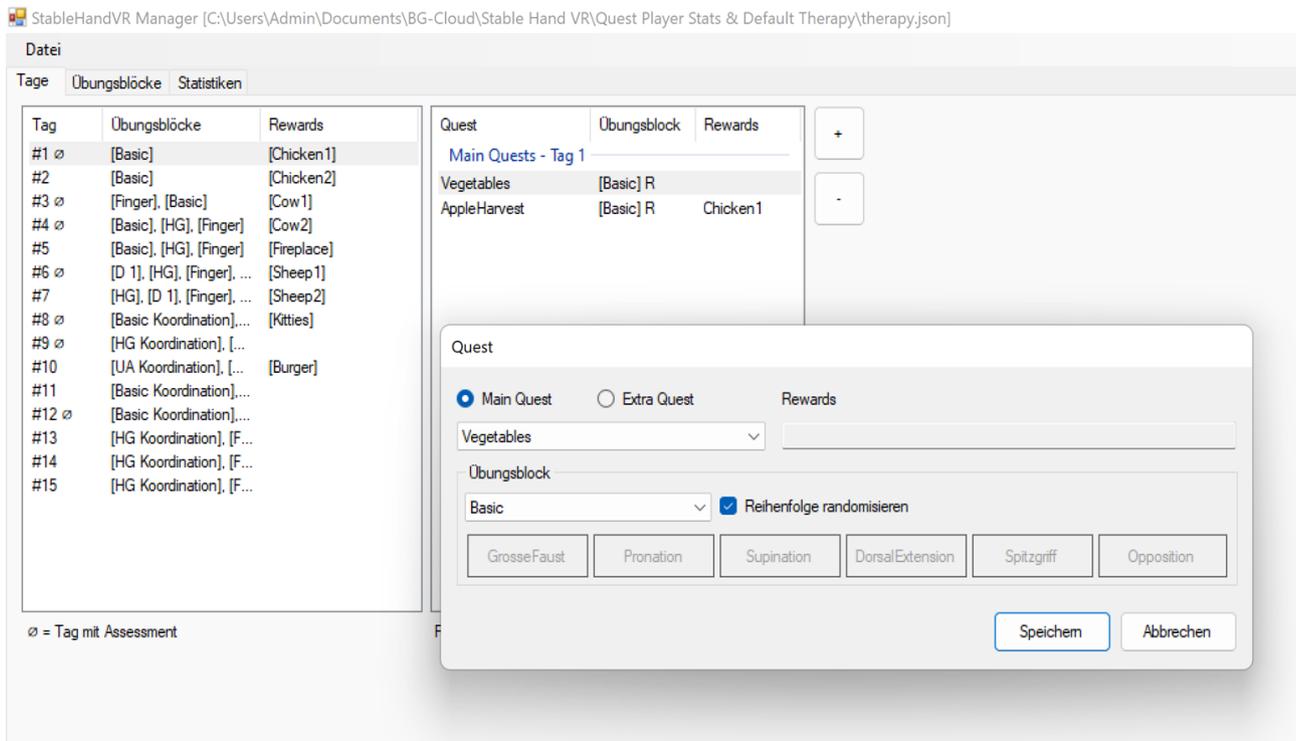


Figure 4 In einem zusätzlichen Tool (*StableHandVR Manager*) kann die Übungszusammensetzung für den Spieler/Patient für jeden Trainingstag individuell angepasst werden, z.B. wenn bestimmte Griffarten explizit geübt werden sollen. Andernfalls werden die Übungen durch einen adaptiven Algorithmus automatisch angepasst.

In einer Vorstudie wurde 2021 an über 20 gesunden Probanden und 7 HandPatientInnen der motivierende und praktikable Effekt dieses VR- und Farmsettings erprobt und stetig weiterentwickelt. Dabei wurden 4 Spielelemente mit dem Ziel entwickelt, die Motivation der Spielenden hochzuhalten (siehe Abbildung 2). Die Praktikabilität des Therapiespiels und die Motivation der Studienteilnehmer wurden über eine Erhebung mit etablierten Befragungsinstrumenten (Intrinsic Motivation Inventory IMI, Game Experience Questionnaire GEQ, Mobile Application Rating Scale MARS, User Experience Questionnaire UEQ, System Usability Scale SUS) erfasst: Es zeigte sich, dass die spielerische VR-Anwendung StableHandVR therapeutisch sinnvoll und praktikabel ist und von den PatientInnen ohne größere Umsetzungsprobleme angewendet werden konnte.



Figure 5 Beispiele der Aufgaben, die PatientInnen in der Bauernhofumgebung erledigen müssen: ein Gemüsebeet anpflanzen und ernten (links) und an einer Feuerstelle kochen (rechts)



Figure 6 Weitere Beispiele für Stationen am Bauernhof sind der Hühnerstall und der Kuhstall

Aus den Erkenntnissen der VR-Anwendung mit primär gesunden Probanden konnten wir das Hand- und Fingertracking bewerten und die entsprechenden Bedingungen für eine bestmögliche Bewegungsanalyse der Handbewegungen optimieren (Einfluss der Lichtverhältnisse, Austestung der Handpositionen mit optimaler Erkennung der Fingerbewegungen etc.). Die Teilnehmer der Vorstudie empfanden insgesamt ihre Erfahrung mit StableHandVR als immersiv und angenehm. Sie empfanden das VR-Training als fordernd und gaben an, während dem Üben nur einen geringfügigen Handlungsdruck zu empfinden.

Darüber hinaus waren die Teilnehmer sehr begeistert, dass sie ihre eigenen Hände über Hand- und Fingerfunktionsgriffe in einer virtuellen Welt benutzen konnten, um dort Veränderungen im Bauernhof zu

bewirken (Gemüse pflanzen und ernten, Hühner füttern, Brücke oder Traktor reparieren etc., siehe Figure 5 und Figure 6).

Als besonders motivierend für die Durchführung der Handübungen in der virtuellen Umgebung wurden von den Teilnehmenden die sogenannten 'Feedback-Hände' beschrieben. Diese visualisieren das Ausmaß der Bewegungen durch Ampelfarben: Rot für geringe, Gelb für mittlere und Grün für optimale Bewegungsamplitude, und unterstützen so die gezielte Bewegungsausführung (siehe Figure 7).



Figure 7 Überblick über die motivierenden Spielelemente: (Links oben) Figuren auf der virtuellen Farm versorgen den Spieler mit täglichen Aufgaben. (Rechts oben) Die Assessment Station gibt einen Überblick über den bisherigen Spielverlauf. (Links unten) Ampelhände als Echtzeit-Bewegungsfeedback. (Rechts unten) Die virtuelle Farm enthält 12 Übungsstationen, die im Verlauf des Spiels freigeschaltet werden.

Die Tatsache, dass die die wahrgenommene Auswahl, der Spielspaß und das bereitwillige Eintauchen in die virtuelle Realität (Immersion) gleichbleibend hoch waren, spricht für die positive Wirkung, die das Spiel auf die Motivation unserer Teilnehmer ausübte. Insbesondere der Fakt, dass sehr viele Probanden freiwillig Zusatzaufgaben gelöst haben und diese Bereitschaft auch im Laufe der Zeit nicht abgenommen hat, deutet für uns auf ein langanhaltendes Interesse und eine hohe intrinsische Motivation für das spielerische Setting der VR-Übungsaufgaben hin.

Nach der Evaluation der Ergebnisse dieser Vorstudie wurden die Verbesserungsvorschläge der Probanden iterativ in einer Folgeversion von StableHandVR umgesetzt. Es wurden weitere Hand- und Fingerbewegungen in zusätzlich entwickelte spielerische Übungsstationen integriert und auch kleinere technische Schwierigkeiten im Hand Tracking reduziert. Seit Juli 2022 läuft die Randomisiert Kontrollierte Studie (RCT) mit handverletzten PatientInnen an der BG Klinik Tübingen. Es wurden 150 handverletzte PatientInnen randomisiert in die StableHandVR-Studie eingeschlossen.



Figure 8 PatientInnen bei der Anwendung von StableHandVR mit unterschiedlichen Pathologien und damit einhergehenden funktionellen Einschränkungen der Hand. StableHandVR passt sich vielfältigen Beeinträchtigungen an und zeichnet sich durch besondere Flexibilität aus.

StableHandVR wurde so konzipiert, dass es auf handelsüblichen VR-Systemen läuft und sich mit geringem Schulungsaufwand in bestehende Therapieprozesse integrieren lässt. Die automatisierte Datenerfassung ermöglicht eine objektive und langfristige Verlaufskontrolle der funktionellen Fortschritte.



Figure 9 StableHandVR Nutzerin mit eingeschränkter Mobilität

StableHandVR wurde so konzipiert, dass die Übungen unabhängig von der Körperhaltung ausgeführt werden können. Ob im Sitzen, Liegen oder auch bei eingeschränkter Geh- oder Stehfähigkeit – das Training ist orts- und lageunabhängig durchführbar und damit auch für PatientInnen mit eingeschränkter Mobilität oder akuten Bewegungseinschränkungen zugänglich.

Ein zentrales Gestaltungsprinzip von war die einfache und selbsterklärende Bedienbarkeit (Plug and Play). Die Benutzeroberfläche wurde so entwickelt, dass sich PatientInnen nach einer kurzen Einweisung selbstständig im Spiel orientieren und die Übungen ohne fortlaufende Anleitung durchführen können. Dies ermöglicht nicht nur ein selbstbestimmtes, motivierendes Training, sondern auch den parallelen Einsatz mit mehreren PatientInnen, z. B. in Gruppensettings, bei geringem personellen Betreuungsaufwand.

3.4 Kontrollgruppe

Die Kontrollgruppe bestand aus PatientInnen, die wie auch die Versuchsgruppe per Zufallsprinzip einem Studienarm zugeteilt wurden. Um potenzielle Neuheitseffekte durch die Nutzung eines Virtual-Reality-Systems zu vermeiden, kamen in beiden Gruppen dieselben VR-Headsets vom Typ Meta Quest 3 zum Einsatz. So wurde sichergestellt, dass Unterschiede im Therapieerfolg nicht allein auf das Medium Virtual Reality zurückzuführen sind.



Figure 10 Ori Ori Ball aus Silikon mit Zähleinheit zum Drücken und Patient der Kontrollgruppe beim Betrachten des 360° Videos

Anstelle einer interaktiven Trainingsanwendung wurde den PatientInnen der Kontrollgruppe ein immersives 360°-Video gezeigt, das entspannende Natur- oder Stadtszenen darstellte. Die Dauer der Videos entsprach mit 15 bis 20 Minuten derjenigen in der Versuchsgruppe. Während des Betrachtens wurden die PatientInnen dazu angeleitet, einfache, unspezifische Handübungen durchzuführen. Hierbei kam ein sogenannter Ori Ori Ball zum Einsatz. Der Ori Ori Ball ist ein weicher, ergonomisch geformter Silikonball, in den eine Zählmechanik integriert ist, die jede Kompression erfasst (siehe Figure 10). So konnte die Anzahl der während der Videositzung durchgeführten Greifbewegungen objektiv registriert werden.

Ein Vergleich ausschließlich mit einer Kontrollgruppe, die lediglich die Standardtherapie im Rahmen der komplex-stationären Rehabilitation erhält, wurde bewusst vermieden. Zusätzliche Interventionen jeglicher Art führen erfahrungsgemäß zu einem gewissen therapeutischen Effekt. Da die leitliniengerechte Basistherapie den PatientInnen in keinem Fall vorenthalten werden sollte, wurde eine aktive Kontrollgruppe ebenfalls in VR konzipiert. Diese ermöglichte einen Vergleich hinsichtlich der spezifischen Wirkung der StableHandVR-Anwendung unter kontrollierten, aber klinischen Bedingungen.

3.5.1 Vorgehen bei der statistischen Analyse

Vergleich von Interventionsgruppe und Kontrollgruppe

Die Veränderung kontinuierlicher Variablen soll anhand einer ANCOVA untersucht werden, in der der Follow Up Wert als abhängige Variable definiert wird, die Gruppe als Faktorvariable und der Baseline Wert als Kovariate eingeht. Sind die Voraussetzungen für eine ANCOVA nicht erfüllt, wird ein generalisiertes lineares Modell angewendet. Die Voraussetzungen sollen anhand einer Darstellung der QQ-Plots geprüft werden. Statistische Tests auf Normalverteilung der Residuen wie der Shapiro-Wilk-Test sollen nicht zum Einsatz kommen, da deren Ergebnis sehr stark von der Größe der Fallzahl beeinflusst wird. Die Veränderung ordinaler Variablen soll anhand einer ordinalen logistischen Regression untersucht werden, ebenfalls mit dem Follow Up Wert des zu untersuchenden Parameters als abhängiger Variablen, der Gruppe als Faktorvariable und kontrolliert für den Baseline Wert.

Prä-post Vergleiche innerhalb der Untersuchungsgruppen

Die Veränderung der Parameter innerhalb der Gruppen soll im Falle von kontinuierlichen, normalverteilten Variablen mittels eines t-Test für verbundene Stichproben untersucht werden. Im Falle nicht-normalverteilter Daten und/oder ordinalem Skalenniveau soll der Wilcoxon-Rangsummen-Test zum Einsatz kommen.

Größe des Effekts

Während die statistischen Tests zu Gruppenvergleichen und prä-post Vergleichen lediglich indizieren, ob ein Unterschied statistisch signifikant ist, gibt die Effektstärke an, wie groß ein Effekt tatsächlich ist. Sie ist unabhängig von der Stichprobengröße und lässt Aussagen über die praktische Bedeutung eines Ergebnisses zu. Anhaltspunkte zur Interpretation der Effektstärken bieten folgende Faustregeln:

1. Bei Gruppenvergleichen: Interpretation von η^2 nach Cohen (1988):

Table x. Bewertung der Effektstärke η^2

η^2	Interpretation
$\geq 0.01 - < 0.06$	kleiner Effekt
$\geq 0.06 - < 0.14$	mittlerer Effekt
≥ 0.14	großer Effekt

2. Bei prä-post Vergleichen für kontinuierliche Variablen: Berechnung von Cohen's d nach Cummings (2012, $MW_{FU} - MW_{BL} / (SD_{BL} + SD_{FU}) / 2$), Interpretation nach Cohen (1988):

Table x. Bewertung der Effektstärke Cohen's d

d	Interpretation
---	----------------

$\geq 0.2 - < 0.5$	kleiner Effekt
$\geq 0.5 - < 0.8$	mittlerer Effekt
≥ 0.8	großer Effekt

3. Bei Prä-post Vergleichen für ordinale Variablen: Interpretation von r nach Bartz (1999):

Table x. Bewertung der Effektstärke r

r	Interpretation
$\geq 0.1 - < 0.3$	kleiner Effekt
$\geq 0.3 - < 0.5$	mittlerer Effekt
≥ 0.5	großer Effekt

3.5.2 Missing Data und Plausibilitätschecks

Im Rahmen einer Missing Data Diagnostik wird die Häufigkeit der Fehlwerte aller Variablen zu beiden Erhebungszeitpunkten (d.h., Baseline und Follow Up), insbesondere auch im Vergleich beider PatientInnen, untersucht. Darüber hinaus sollen die Baseline-Messungen zwischen denjenigen Probanden in deskriptiver Art gegenübergestellt werden, die im späteren Verlauf aus der Studie ausgeschieden sind (Non-Completer) und solchen, die bis zum letzten Messzeitpunkt in der Studie verblieben sind (Completer). Relevante Unterschiede im Vergleich der Behandlungsgruppen könnten zu verzerrten Ergebnissen und somit einer falschen Schlussfolgerung bei der Beantwortung der Forschungsfragen führen.

Im Rahmen einer Qualitätskontrolle der Daten sollen Fehleingaben oder Messfehler anhand von Plausibilitätschecks identifiziert und korrigiert werden. Hierzu werden alle im Rahmen der Studie erhobenen Variablen für beide Erhebungszeitpunkte deskriptiv dargestellt und auf inplausible Werte, insbesondere anhand von Minima und Maxima unter Berücksichtigung des gültigen Wertebereichs bzw. der jeweiligen Streuung, gescreent.

Die Missing Data Diagnostik ergab, dass der Anteil an fehlenden Werten in beiden Gruppen durchgängig gering war. In der Kontrollgruppe fehlten im Maximum bei 12.0% (9 aus 75, Handkraft und SF-36) der teilnehmenden PatientInnen die Follow Up Werte, in der Interventionsgruppe bei nur maximal 9.3% (SF-37:7 aus 75) der Teilnehmer. Die höchste Follow Up-Rate konnte bei den Range of Motion Messparametern und dem Kapandji Index erzielt werden, mit einem Vorhandensein von Baseline- und Follow Up-Werten bei 73 von 75 PatientInnen (97.3%)

Die Unterschiede in den Baseline-Messungen von Completern und Non-Completern im Vergleich zwischen Interventionsgruppe und Kontrollgruppe waren in sämtlichen Parametern vernachlässigbar, sodass kein Einfluss der Studienabbrecher auf den Behandlungseffekt angenommen werden kann.

4. Ergebnisse des Gesamtvorhabens

Demographische Daten

Die untersuchte PatientInnenkohorte setzte sich überwiegend aus männlichen PatientInnen zusammen (Verhältnis 2:1). Diese geschlechtsspezifische Verteilung entspricht der bekannten epidemiologischen Tendenz bei arbeitsbedingten Handverletzungen, insbesondere im Bereich handwerklicher und körperlich fordernder Berufe.

Die Altersverteilung zeigte einen klaren Schwerpunkt im Bereich 30 bis 60 Jahre, mit einem Gipfel bei ca. 55 Jahren. Dies entspricht der typischen Erwerbsbevölkerung.

Der Body-Mass-Index (BMI) der PatientInnen verteilte sich überwiegend im normalgewichtigen bis übergewichtigen Bereich. Extreme Ausprägungen wie Unter- oder Adipositas Grad II/III waren selten vertreten.

Von den 230 PatientInnen über alle Kohorten mit vollständigen Angaben zur Handdominanz und betroffenen Seite waren 67 % (n=154) an ihrer dominanten Hand verletzt.

Die Verteilung der AU-Tage (Arbeitsunfähigkeit) war breit gestreut, mit einem deutlichen Gipfel im Bereich von 230 Tagen.

Hinsichtlich der Arbeitsschwere dominierte die Kategorie mittelschwere körperliche Arbeit, gefolgt von leichter Tätigkeit und nur wenigen Fällen schwerer körperlicher Belastung.

Der Schulabschluss der PatientInnen lag in den meisten Fällen im Bereich des mittleren Bildungsniveaus (Realschulabschluss), gefolgt von Hauptschulabschluss und einer kleineren Gruppe mit Hochschulreife.

Die Zugehörigkeit zu den verschiedenen Berufsgenossenschaften war relativ breit gestreut, wobei insbesondere Branchen mit erhöhtem manuellen Arbeitsaufwand (z. B. Bau, Metall, Holz) überrepräsentiert waren.

Table 1 Übersicht Demographische Werte

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
Alter	45.9 Jahre	±13.8 Jahre	18	70
BMI	27.0	±4.5	16.3	41.0
AU-Tage	254 Tage	±152 Tage	20	781

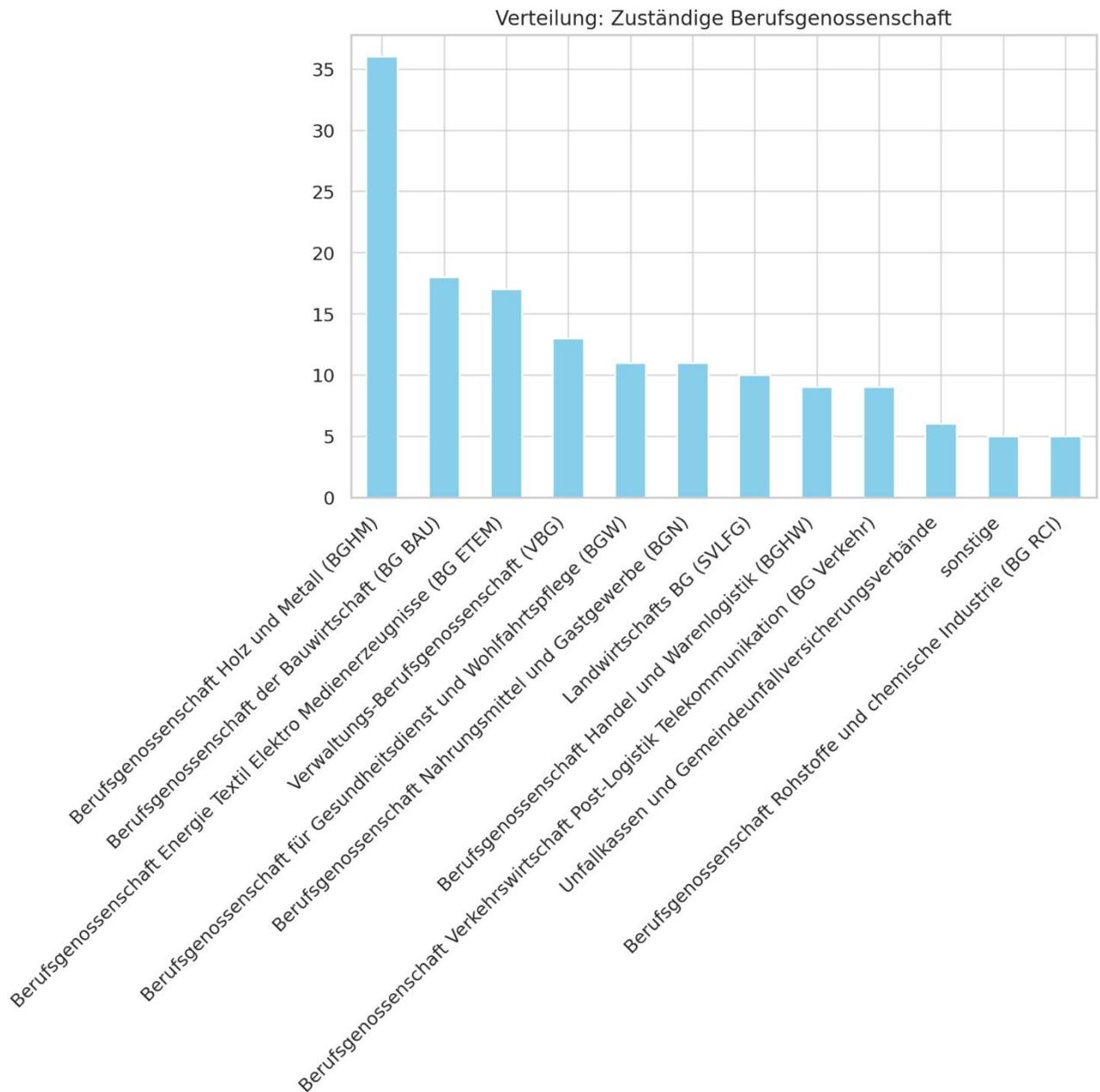


Figure 11 Histogramm: Bezüglich der Unfallversicherung zeigte sich eine heterogene Verteilung: Die häufigsten zuständigen Träger waren die Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM, $n = 36$), gefolgt von der BG Bauwirtschaft (BG BAU, $n = 18$), der BG Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG ETEM, $n = 17$) und der Verwaltungs-Berufsgenossenschaft (VBG, $n = 13$).

Die PatientInnen in dieser Studie waren mehrheitlich bei der Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM) versichert, die mit 36 Fällen den größten Anteil ausmachte. Dahinter folgte die Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG BAU) mit 18 PatientInnen. Auch die BG ETEM (Energie, Textil, Elektro, Medien) und die VBG (Verwaltungs-Berufsgenossenschaft) waren mit jeweils 17 bzw. 15 Fällen stark vertreten. Weitere relevante Gruppen waren die BGW (Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege), die BGN (Nahrung und Gastgewerbe) sowie die BG Verkehr und die Unfallkassen. Kleinere Anteile entfielen auf die RCI (Rohstoffe und chemische Industrie), kommunale Unfallversicherungsträger und sonstige Einrichtungen.

Diese Verteilung spiegelt die berufliche Exposition wider, die mit einem erhöhten Risiko für handbezogene Verletzungen oder Überlastungsschäden einhergeht – insbesondere in Berufen mit hoher körperlicher Beanspruchung oder handwerklicher Tätigkeit.

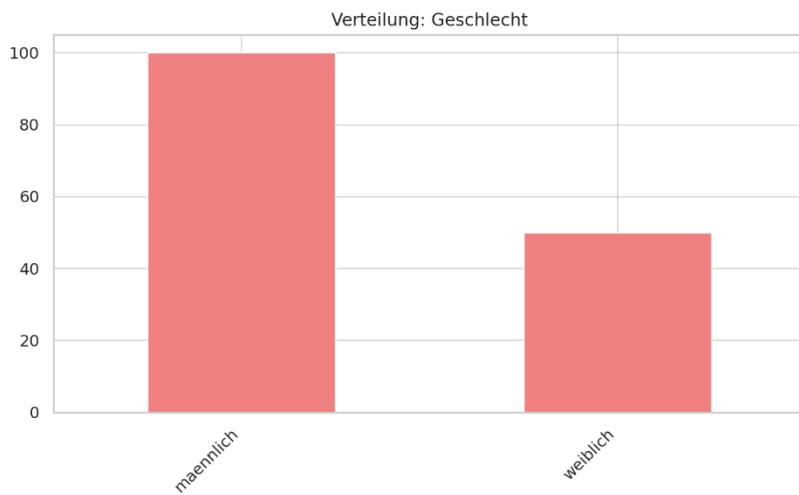


Figure 12 Histogramm: Verteilung des Geschlechts der PatientInnen der StableHandVR Kohorte in absoluten Zahlen

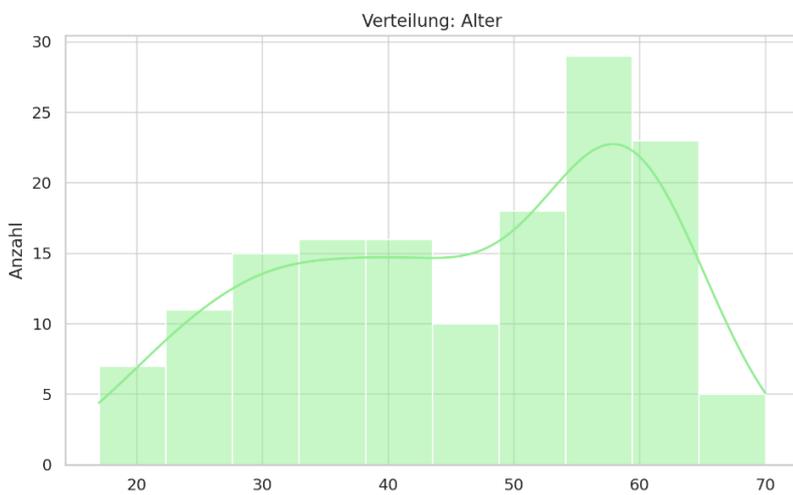


Figure 13 Histogramm: Verteilung Alter der StableHandVR Kohorte

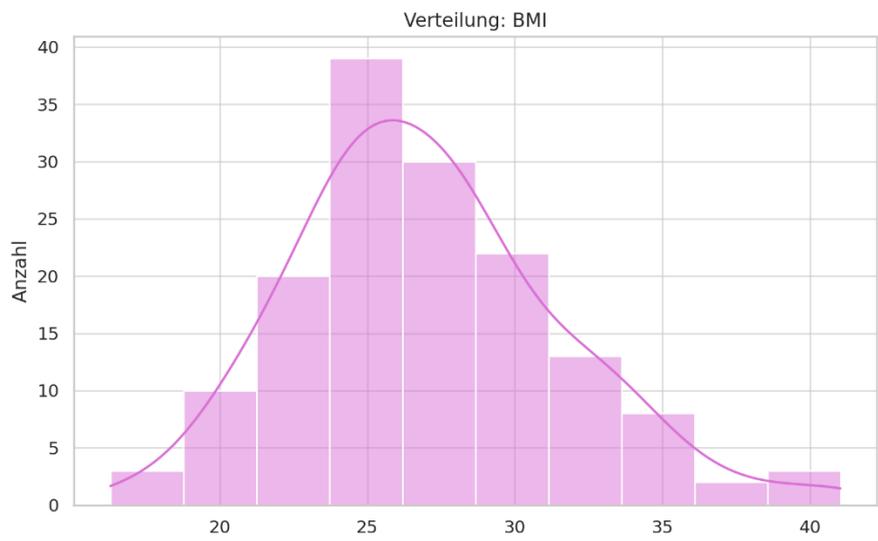


Figure 14 Histogramm: Die Mehrheit der PatientInnen der StableHandVR Kohorte lag im Bereich leichtes Übergewicht laut WHO-Klassifikation (ab einem BMI von 25).

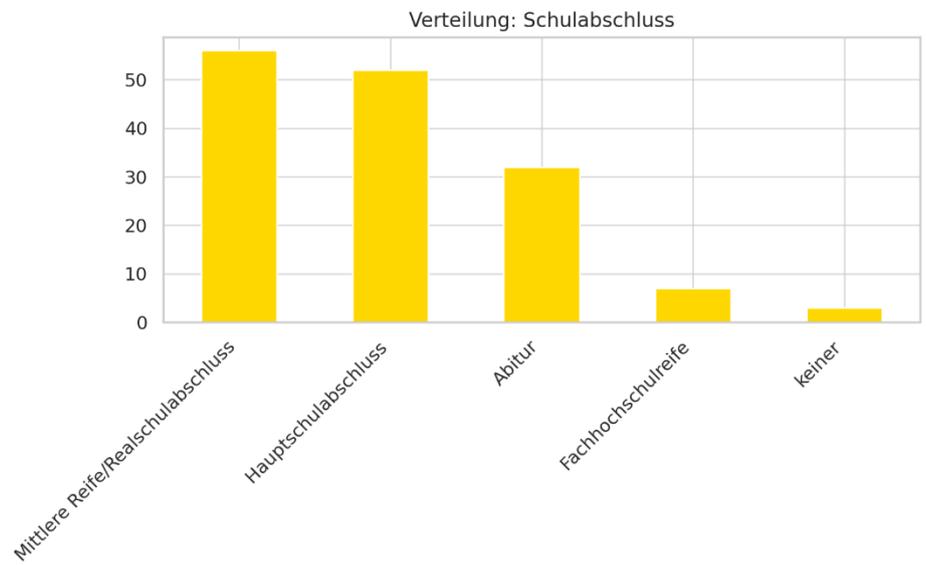


Figure 15 Schulabschluss der StableHandVR Kohorte

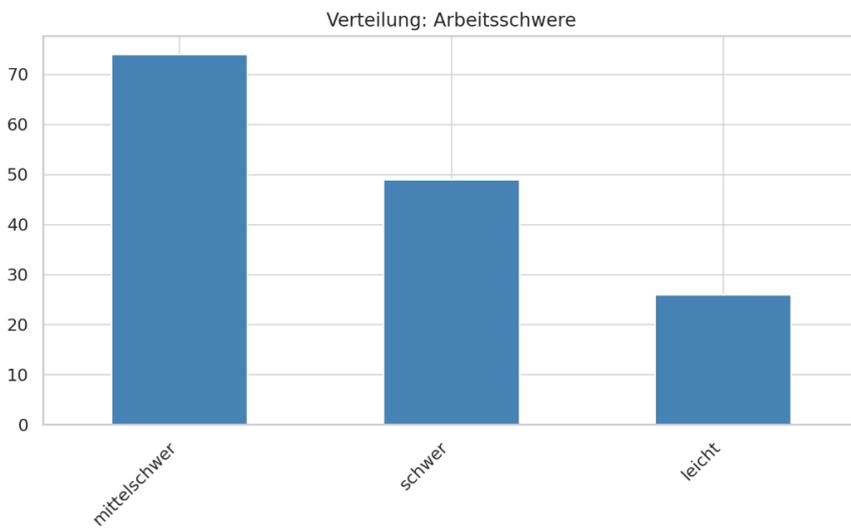


Figure 16 Die Angabe zur zuletzt ausgeübten Tätigkeit erfolgte als Freitext und umfasste ein breites Spektrum von handwerklichen, industriellen und verwaltungstechnischen Berufen.

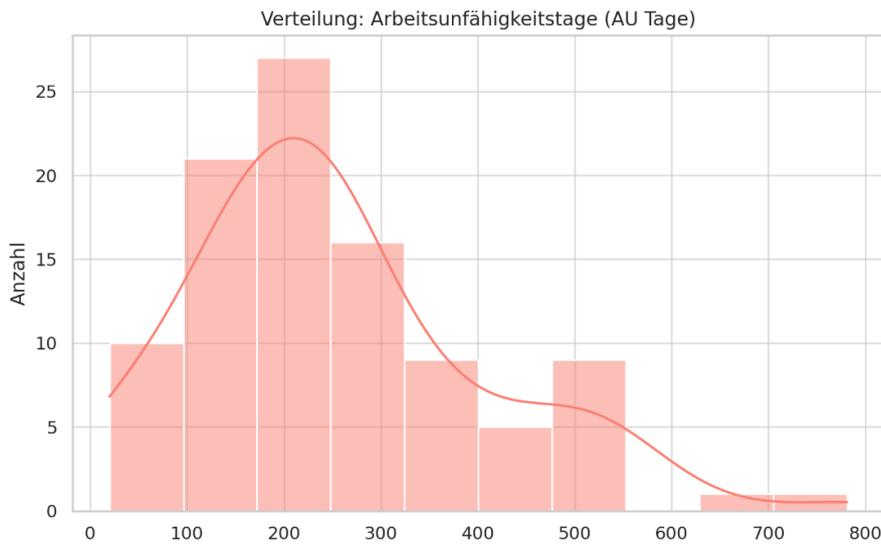


Figure 17 Die Arbeitsunfähigkeitsdauer (AU-Tage) lag im Mittel bei 254 Tagen, mit einer Spanne von 20 bis 781 Tagen (Median: 227 Tage).

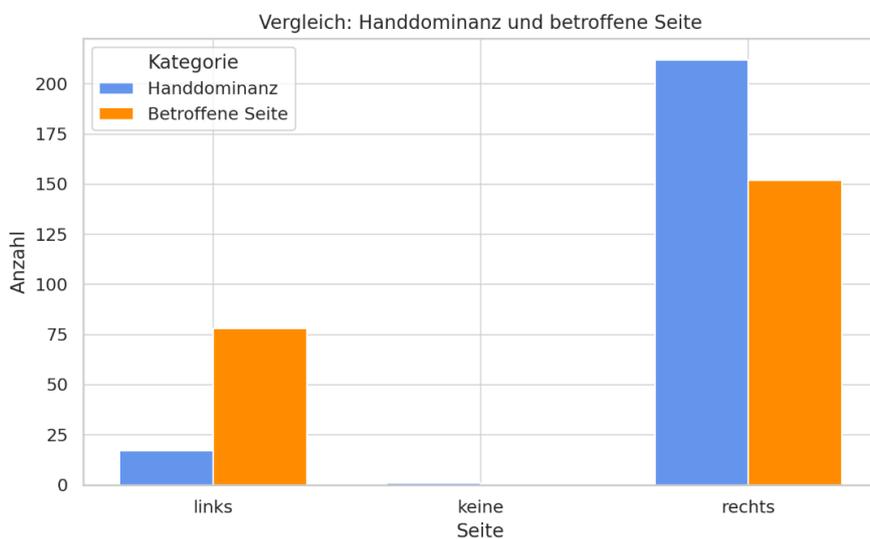


Figure 18 Von den 230 PatientInnen über alle Kohorten mit vollständigen Angaben zur Handdominanz und betroffenen Seite waren 67 % (n=154) an ihrer dominanten Hand verletzt.

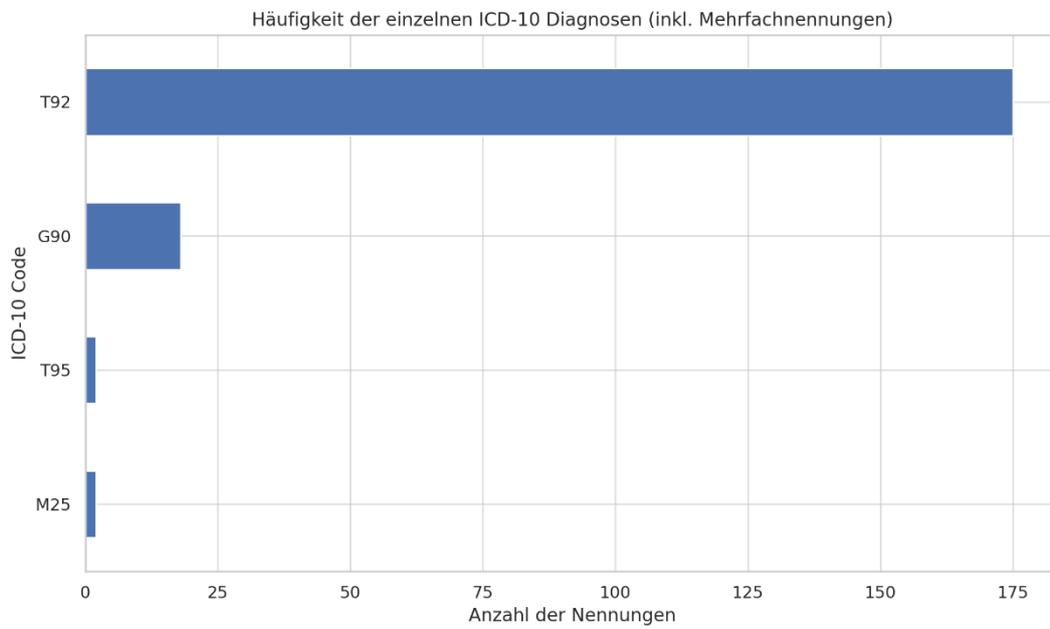


Figure 19 Histogramm der ICD-10 Hauptdiagnosen in der StableHandVR Kohorte

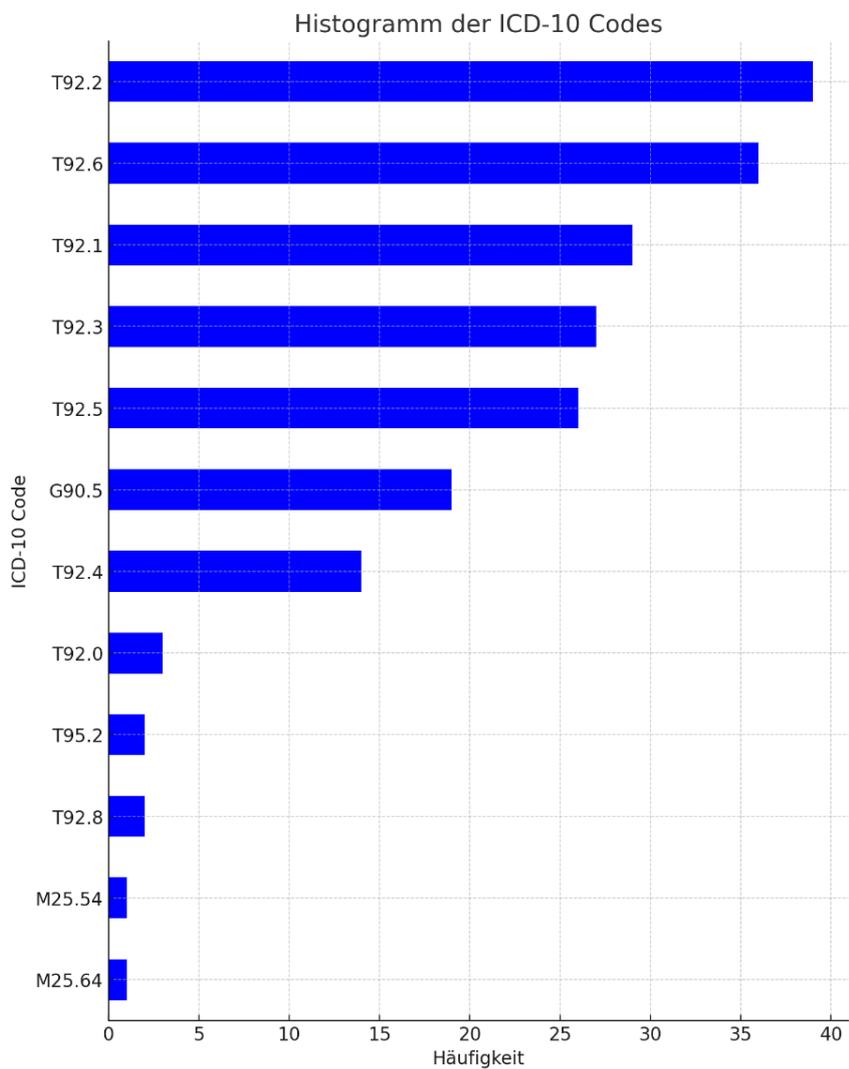


Figure 20 Histogramm der ICD-10 Subdiagnosen in der StableHandVR Kohorte

Motivation und Anstrengung

Im Zuge der iterativen Weiterentwicklung von StableHandVR wurden drei Entwicklungsstände miteinander verglichen. Diese werden im Folgenden als Version 1, Version 2 und Version 3 (die finale Version) bezeichnet. Während Version 1 und Version 2 mit jeweils 10 PatientInnen evaluiert wurde, wurden 52 PatientInnen bei der Evaluierung von Version 3 eingeschlossen. Bei allen drei Versionen wurde das Spiel von den PatientInnen an 12 aufeinander folgenden Werktagen gespielt, die durchschnittliche Spieldauer verringerte sich von Version 1 mit 22.8 Minuten zu Version 2 auf 20.9 Minuten und steigert sich in Version 3 auf 24.4 Minuten. Aus den automatisch aufgezeichneten Nutzungsdaten geht hervor, dass die Anzahl der gespielten Stationen pro Tag in Version 2 signifikant höher war als in Version 1 ($p < 0.01$) und in Version 3 signifikant höher als in Version 2 ($p = 0.026$). **PatientInnen spielten freiwillig mehr Stationen, als ihnen im Rahmen der Studie vorgegeben wurden** (siehe Figure 21). Ebenso konnte eine signifikant kürzere ($p < 0.001$) Zeitspanne für die Durchführung einer Handbewegung in Version 2 erreicht werden, was auf die verbesserte Erkennung der Handbewegungen zurückzuführen ist. Durch erweitertes optisches und akustisches Feedback konnte diese in Version 3 erneut leicht verbessert werden (siehe Figure 21).

Demografische Unterschiede im Spielverhalten konnten in Bezug auf Alter, Geschlecht, so wie auf vorherige VR-Erfahrung tendenziell zwar gefunden werden, allerdings sind keine dieser Unterschiede statistisch signifikant. Betreffend das Alter der PatientInnen spielte die zwei jüngsten Altersgruppen durchschnittlich die meisten Stationen pro Tag und die Altersgruppe der 40–49- die wenigsten (siehe Figure 22). Männliche PatientInnen spielten durchschnittlich mehr Stationen (5,0 Stationen) als weibliche PatientInnen (4,6 Stationen, andere Geschlechter waren nicht vertreten) und PatientInnen, die VR noch nie ausprobiert hatten, spielten mehr (4,9) als welche, die bereits Erfahrungen damit gesammelt hatten (4,5).

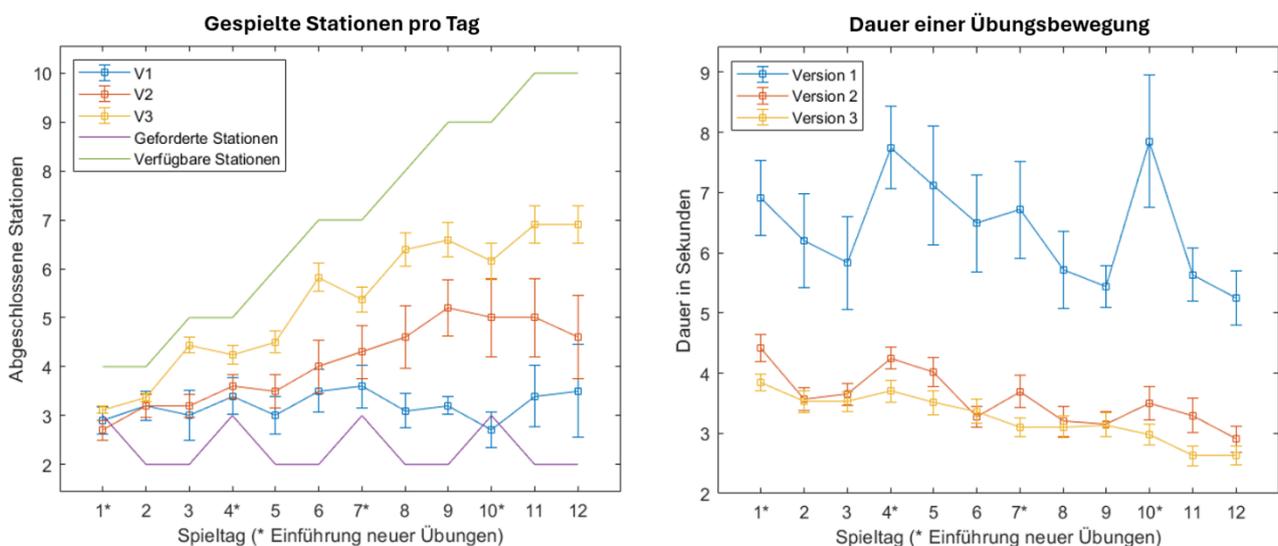


Figure 21 (Links) Die Anzahl der gespielten Stationen lag bei allen drei Versionen über dem geforderten Minimum (gelb) und konnte in Version 2 und Version 3 im Vergleich zum Vorgänger jeweils signifikant gesteigert werden. (Rechts) Die Verbesserung der Bewegungserkennung zeigt sich durch die durchschnittliche Dauer der Durchführung einer einzelnen Übungsbewegung, welche ab Version 2 signifikant reduziert werden konnte.

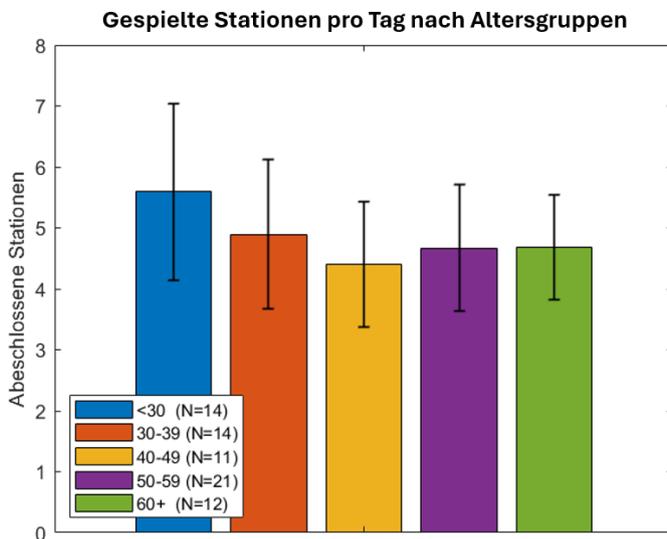


Figure 22 Die durchschnittliche Anzahl an gespielten Stationen pro Tag von allen 3 Versionen zusammengefasst zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Altersgruppen.

Die Motivation der PatientInnen wurde auch mit dem Intrinsic Motivation Inventory (IMI) Fragebogen gemessen. **Der Vergleich zwischen Übungs- und Kontrollgruppe zeigte signifikante Unterschiede in den zwei Subskalen Effort ($p < 0.001$) und Usefulness ($p = 0.018$)** (siehe Figure 23). Ebenfalls wurde das Erleben der gesamten VR-Erfahrung von Übungs- und Kontrollgruppe mit dem User Experience Questionnaire (UEQ) erhoben. **Die Erfahrung wurde generell sehr positiv bewertet** (alle Werte > 0.8 sind als nicht neutral anzusehen), signifikante Unterschiede in der Bewertung gab es in den zwei Subskalen *Efficiency* ($p = 0.003$) und *Dependability* ($p < 0.001$).

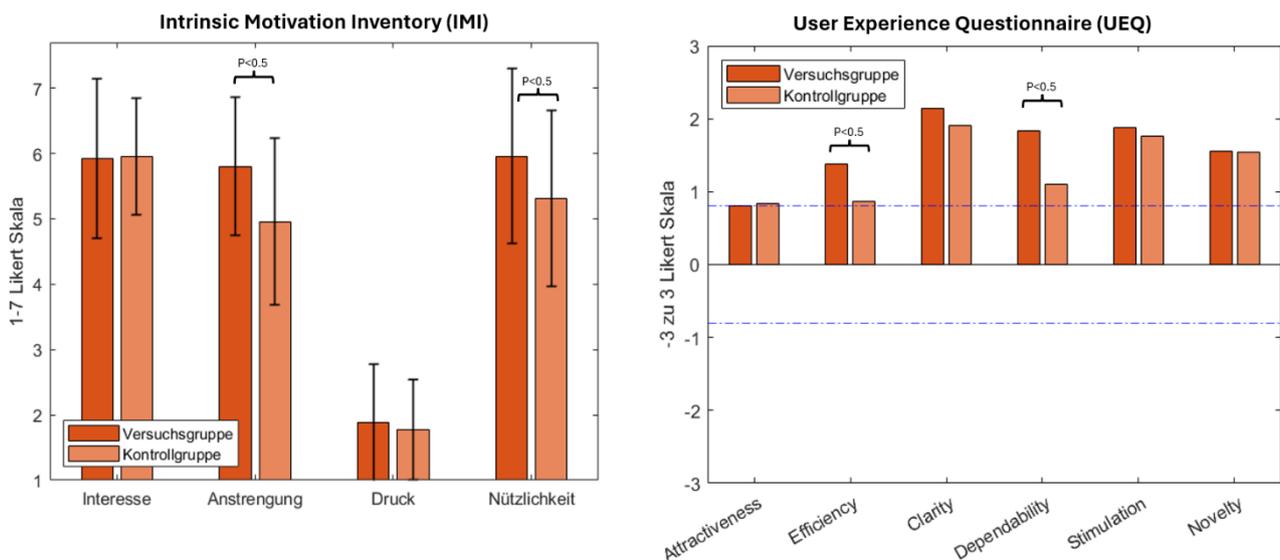


Figure 23 (Links) Die Motivation der Patienten, erfasst mit dem IMI-Fragebogen, lag in der Übungsgruppe in zwei Subskalen signifikant* höher als in der Kontrollgruppe. (Rechts) Bewertung der Benutzererfahrung anhand des UEQ-Fragebogens. Alle Werte zwischen 0.8 und -0.8 (markiert durch die blauen Linien) werden als neutral bewertet. Signifikante Unterschiede* zwischen Versuchs- und Übungsgruppe wurden ebenfalls in zwei Subskalen gemessen. (* statistisch signifikant bei $p < 0.05$)

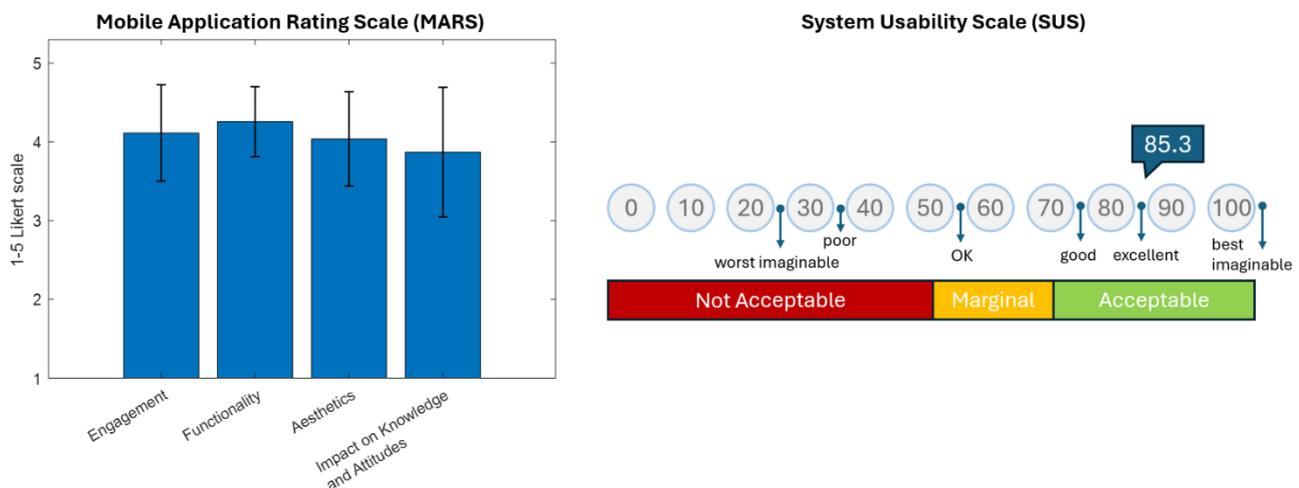


Figure 24 (Links) Bewertung von StableHandVR durch die Patienten der Versuchsgruppe mit dem MARS-Fragebogen. (Rechts) Auf dem System Usability Scale erreichte StableHandVR eine durchschnittliche Bewertung von 8.53.

Bei den PatientInnen der Übungsgruppe wurde die Qualität der Benutzererfahrung zusätzlich mit dem System Usability Scale (SUS) und dem Mobile Application Rating Scale (MARS) erhoben. Die Befragung mit dem SUS-Fragebogen ergab einen durchschnittlichen Wert von 85.3, welcher im vierten Quartil liegt, und für **exzellente Benutzerfreundlichkeit** steht (die zweithöchste Kategorie). Die Befragung mit dem MARS-Fragebogen ergab durchgehend hohe Werte für alle vier Subskalen (siehe Figure 24).

Klinische Funktionalität: Bewegungsausmaß (ROM)

Folgende primäre Fragestellung soll untersucht werden:

Führt die Anwendung von StableHandVR zu einer signifikanten intraindividuellen Verbesserung der Handfunktion (1) im Vergleich zu Baseline sowie (2) im Vergleich zur Kontrollgruppe?

Herangezogen werden die Ergebnisse der funktionellen Tests (Handuntersuchung und Range of Motion), die vor Beginn sowie nach Abschluss der Intervention durchgeführt wurden. Als Zielkriterien sind eine Verbesserung der Handkraft, eine Verbesserung des Kapandji Scores sowie eine Verbesserung der Range of Motion definiert. Die Bewegungsfreiheit ist ein Objektiver Parameter im Gegensatz zum DASH, der subjektiv vom Patienten ausgefühlt wird.

Zur Bewertung der Range of Motion (ROM) wurden insgesamt 52 einzelne Parameter analysiert. Die deskriptiven Statistiken der ROM Parameter des Handgelenks sind in Table 2 zu sehen.

Table 2 ROM - Handgelenk

Variable	n	Mean	SD	Min	Max
Intervention group					
Pronation BL	73	79.66	12.14	20.00	100.00
Pronation FU	73	81.51	7.80	60.00	90.00

Pronation CFB	73	1.85	8.84	-10.00	50.00
Supination BL	73	78.05	20.31	5.00	90.00
Supination FU	73	85.27	11.45	35.00	100.00
Supination CFB	73	7.22	13.38	-10.00	82.00
Radioulnar joints AROM BL	73	157.71	29.90	25.00	190.00
Radioulnar joints AROM FU	73	166.78	17.00	100.00	190.00
Radioulnar joints AROM CFB	73	9.07	18.66	-10.00	92.00
Wrist dorsal extension BL	73	43.49	20.41	-20.00	80.00
Wrist dorsal extension FU	73	54.86	14.41	20.00	80.00
Wrist dorsal extension CFB	73	11.37	11.73	-10.00	50.00
Wrist palmar flexion BL	73	51.44	17.01	10.00	80.00
Wrist palmar flexion FU	73	60.07	12.95	20.00	80.00
Wrist palmar flexion CFB	73	8.63	10.75	-10.00	30.00
Wrist radial abduction BL	73	17.60	8.82	-10.00	35.00
Wrist radial abduction FU	73	20.55	6.10	5.00	35.00
Wrist radial abduction CFB	73	2.95	6.55	-10.00	20.00
Wrist ulnar abduction BL	73	32.60	11.61	0.00	50.00
Wrist ulnar abduction FU	73	37.47	9.86	10.00	50.00
Wrist ulnar abduction CFB	73	4.86	7.68	-10.00	30.00
Wrist AROM BL	73	145.14	48.17	10.00	235.00
Wrist AROM FU	73	172.95	34.52	70.00	230.00
Wrist AROM CFB	73	27.81	22.71	-20.00	80.00
Control group					
Pronation BL	73	80.48	10.81	20.00	90.00
Pronation FU	73	82.60	6.88	60.00	90.00
Pronation CFB	73	2.12	10.20	-10.00	70.00
Supination BL	73	73.97	26.98	-50.00	90.00
Supination FU	73	79.04	23.21	-50.00	90.00
Supination CFB	73	5.07	13.37	-20.00	70.00

Radioulnar joints AROM BL	73	154.45	32.71	40.00	180.00	BL –
Radioulnar joints AROM FU	73	161.64	25.07	40.00	180.00	
Radioulnar joints AROM CFB	73	7.19	21.73	-20.00	140.00	
Wrist dorsal extension BL	73	44.25	21.61	-40.00	80.00	
Wrist dorsal extension FU	73	51.71	17.14	0.00	80.00	
Wrist dorsal extension CFB	73	7.47	11.52	-20.00	60.00	
Wrist palmar flexion BL	73	47.74	24.08	-20.00	90.00	
Wrist palmar flexion FU	73	52.53	21.35	-30.00	90.00	
Wrist palmar flexion CFB	73	4.79	10.85	-30.00	40.00	
Wrist radial abduction BL	73	15.82	8.98	-5.00	30.00	
Wrist radial abduction FU	73	17.74	8.12	0.00	40.00	
Wrist radial abduction CFB	73	1.92	5.31	-10.00	15.00	
Wrist ulnar abduction BL	73	30.96	14.43	-30.00	55.00	
Wrist ulnar abduction FU	73	34.04	12.15	0.00	55.00	
Wrist ulnar abduction CFB	73	3.08	6.44	-10.00	30.00	
Wrist AROM BL	73	138.77	56.59	0.00	235.00	
Wrist AROM FU	73	156.03	48.88	0.00	235.00	
Wrist AROM CFB	73	17.26	23.38	-40.00	120.00	

Baseline, FU – Follow Up, CFB – Change From Baseline

Der Vergleich der Endwerte, jeweils kontrolliert nach den entsprechenden Baseline-Werten, führte bei **11 ROM Parametern zu einem signifikanten Unterschied zwischen Interventionsgruppe und Kontrollgruppe** (siehe Table 3). Aufgrund der Vielzahl an Einzelvergleichen (d.h., 52) muss jedoch beachtet werden, dass aufgrund der Anzahl an durchgeführten Tests ein rein zufälliges Auftreten von signifikanten Unterschieden nicht ausgeschlossen werden kann. Die dargestellten p-Werte sind daher als explorativ zu betrachten. Dennoch ist **zu beobachten, dass bei sämtlichen Vergleichen, bei denen der p-Wert <0.05 betrug, die Interventionsgruppe eine größere Verbesserung im Vergleich zur Kontrollgruppe erreichte**, was mit dem Zufall kaum vereinbar scheint. Insbesondere die das Handgelenk betreffende Parameter deuten auf einen Vorteil zugunsten der Interventionsgruppe hin. So ist bei den beiden Parametern *AROM Handgelenk* (siehe Figure 25) und *palmar Flexion Handgelenk* ein Unterschied zwischen den beiden Gruppen vorhanden, der nach Cohen (1988) einem mittleren Effekt entspricht. Bei den weiteren 9 Parametern ist der Effekt als klein zu bewerten.

Table 3 ROM - Signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen, die sich aus der ANCOVA ergeben

Variable at FU, adjusted for BL	R ²	β	t	p-value	η ²
AROM wrist	0.825	-12.28	-4.08	<0.001	0.10
Wrist palmar flexion	0.744	-4.85	-3.18	0.001	0.07
Digitus Manus III PIP flexion	0.783	-3.90	-2.69	0.004	0.05
Wrist dorsal extension	0.704	-3.63	-2.52	0.007	0.04
Wrist ulnar abduction	0.714	-2.25	-2.26	0.013	0.03
Wrist radial abduction	0.571	-1.74	-2.17	0.016	0.03
Supination	0.699	-3.63	-2.14	0.017	0.03
Digitus Manus V PIP extension	0.788	-2.37	-1.79	0.038	0.02
Thumb opposition	0.773	0.26	1.78	0.038	0.02
Digitus Manus I AROM ext flex	0.736	-5.36	-1.81	0.037	0.02
Digitus Manus I radial abduction	0.643	-1.88	-1.82	0.035	0.02

BL – Baseline, FU – Follow Up, R² - Coefficient of determination, β – Regression coefficient, t – t value, η² - Effect size

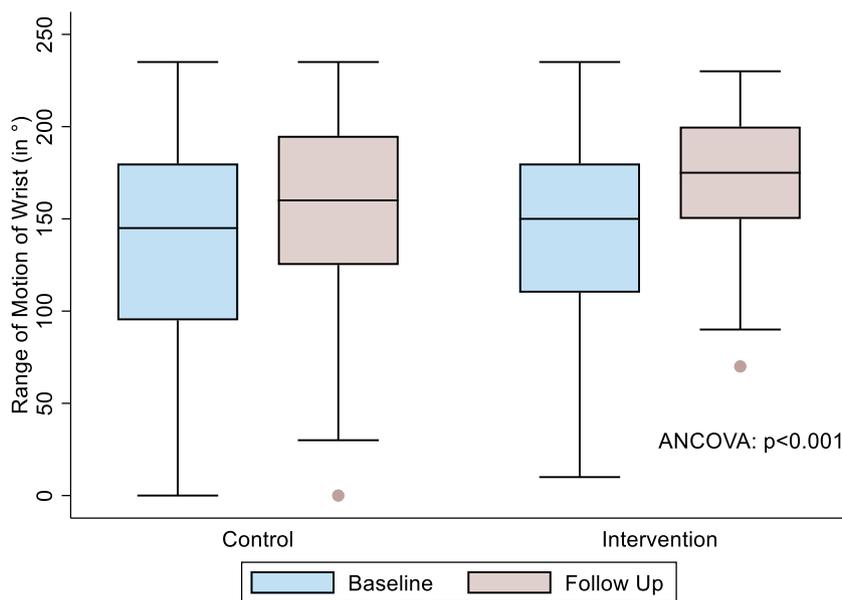


Figure 25 Ausgangs- und Nachuntersuchungswerte des Bewegungsumfangs des Handgelenks

Die Prä-Post Vergleiche der gemessenen ROM Parameter, basierend auf dem Wilcoxon-Mann-Whitney-U Test, fielen bis auf eine Ausnahme (Digitus manus II DIP extension in der Interventiongruppe) in beiden Gruppen statistisch signifikant aus. Die Effektgröße Cohen's d bewegte sich in beiden Gruppen in der

überwiegenden Mehrheit in einem Bereich zwischen 0.3 bis 0.6, was einem mittleren bis großen Effekt entspricht.

Klinische Funktionalität: Kapandji Index

Der Kapandji Index, ein Maß zur Beurteilung der Daumenbeweglichkeit, zeigte **eine signifikante ($p = 0.4$) Verbesserung der Interventionsgruppe** im Vergleich vor und nach der Intervention, während die Verbesserung der Kontrollgruppe keine statistische Relevanz aufzeigte (siehe Figure 26). Während in der Kontrollgruppe 28 (38%) der PatientInnen zwischen Baseline und letzter Messung einen höheren Kapandji Index erreichten, gelang dies in der Interventionsgruppe 40 PatientInnen (55%) (siehe Figure 27).

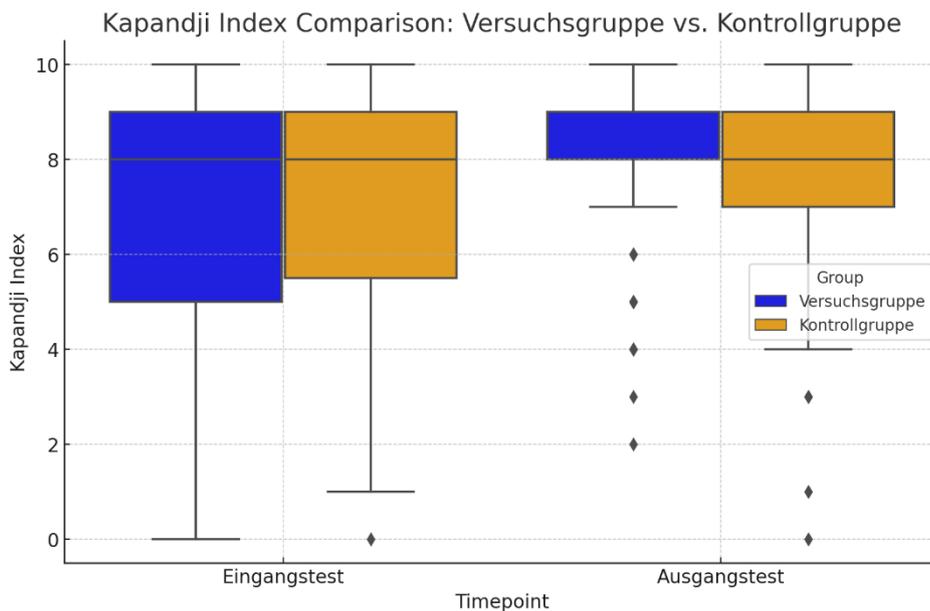


Figure 26 Vergleich Kapandji Score zwischen den Gruppen

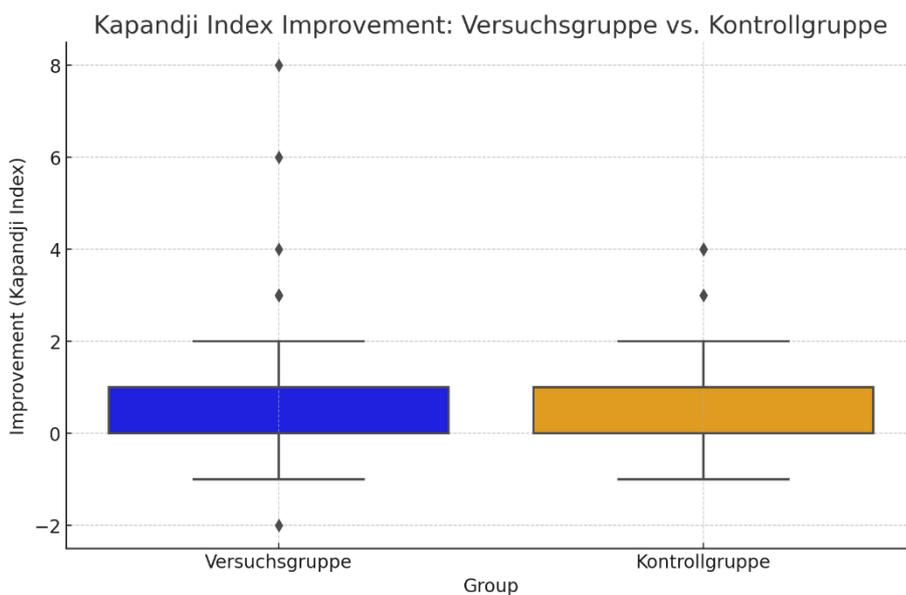


Figure 27 Verbesserung des Kapandji Scores pro Gruppe

Die Veränderung im Kapandji Score wurde anhand einer ordinalen logistischen Regression mit dem Kapandji Score zum Follow Up Zeitpunkt als abhängiger Variablen, der Gruppe als Faktorvariable und kontrolliert für den Kapandji Index zu Baseline untersucht. Bei einseitiger Testung wurde ein signifikanter Unterschied ($p =$

0.049) zu Gunsten der Interventionsgruppe detektiert. Das Odds Ratio von 1.69 indiziert, dass PatientInnen in der Interventionsgruppe eine 1.69 Mal höhere Chancen haben, zum Follow-Up Zeitpunkt einen höheren Kapandji Score zu erreichen verglichen mit PatientInnen der Kontrollgruppe (s. Table 4).

Table 4 Kapandji Score – Results of ordered logistic regression analysis

Variable	Pseudo R ²	β	z	p-value	OR
Kapandji Index	0.315	-0.52	-1.66	0.049	1.69

Pseudo R² - Coefficient of determination, β – Regression coefficient, z – z value, OR – Odds Ratio

Die Testung basierend auf den prä-Post-Werten mittels Wilcoxon-Mann-Whitney-U Test ergab, dass signifikante Unterschiede in beiden Gruppen vorlagen (p < 0.001). Die Effekte können sowohl in der Interventionsgruppe als auch in der Kontrollgruppe nach Bartz (1999) als groß interpretiert werden (s. Table 5).

Table 5 Kapandji Score - Ergebnisse des Wilcoxon Signed-Rank-Tests

Variable	z	p-value	r
Kapandji Score within Intervention group	5.75	<0.001	0.67
Kapandji Score within Control group	4.38	<0.001	0.51

z – z value, r – Effect size

Klinische Funktionalität: Kraftmessung

Die gemessenen Handkraftwerte zeigen, dass nach Abschluss der Behandlung in beiden Untersuchungsgruppen eine deutliche Steigerung der Handkraft im Vergleich zur Baseline erzielt werden konnte (siehe Figure 28 und Table 6). **So erhöhte sich die Maximalkraft im Mittel zwischen 4.97 kg (Kontrollgruppe, linke Hand) und 8,49 kg (Interventionsgruppe, rechte Hand).** Da nur die verletzte Hand trainiert wurde, wurden auch nur die Werte der verletzten Hand in der Analyse berücksichtigt.

Um bewerten zu können, ob sich die Handkraft in der Interventionsgruppe im Vergleich zur Kontroll-gruppe signifikant verbessert hat, wurde in separaten ANCOVAS der Einfluss der Behandlungsgruppe auf die Follow Up Werte maximale Handkraft rechte Hand, maximale Handkraft linke Hand, mittlere Handkraft rechte Hand sowie mittlere Handkraft linke Hand, jeweils kontrolliert für die Baseline des jeweiligen Werts, untersucht. **Auch wenn die absoluten Verbesserungen in der Interventionsgruppe größer waren als in der**

Kontrollgruppe, war bei keinem der Parameter ein signifikanter Gruppenunterschied detektierbar.

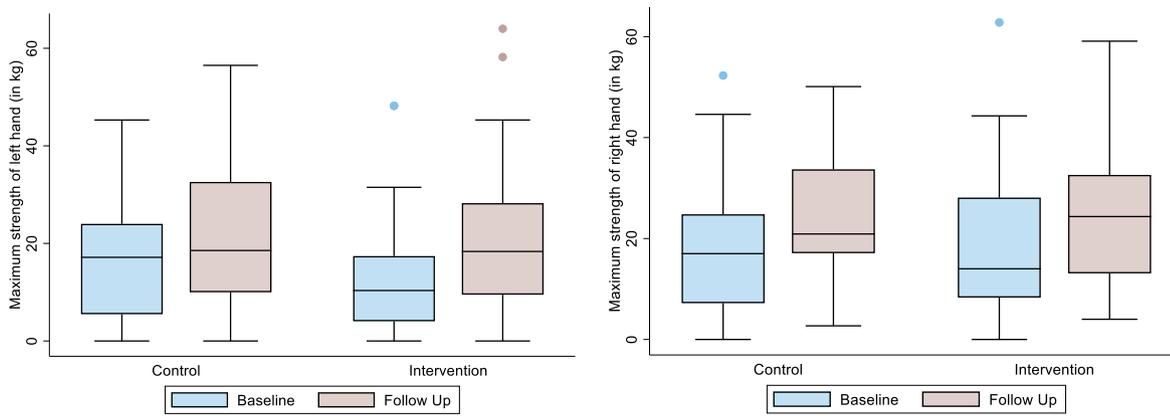


Figure 28 Erste und letzte Messung (Baseline und Endline) der Handkraft. Linke Abbildung: linke Hand, rechte Abbildung: rechte Hand.

Table 6 Handkraft nach verletzter Hand - Ergebnisse der ANCOVA

Variable	R ²	β	t	p-value	η ²
Maximum strength right hand	0.535	-1.95	-0.81	0.21	<0.01
Maximum strength left hand	0.604	-2.08	-0.87	0.20	0.013
Mean strength right hand*	0.541	-1.14	-0.51	0.31	<0.01
Mean strength left hand	0.608	-2.19	-0.98	0.17	0.015

*Mean strength is the arithmetic mean of three measurements, R² - Coefficient of determination, β - Regression coefficient, t - t value, η² - Effect size

Im Gegensatz zu den Gruppenvergleichen waren sämtliche Prä-Post Differenzen innerhalb der Gruppen signifikant ($p < 0.001$). Für beide Untersuchungsgruppen sind gemäß Bartz (1999) alle vier errechneten Effektstärken als große Effekte zu interpretieren (siehe Table 7).

Table 7 Hand strength by injured hand – Results of Wilcoxon signed-rank test

Variable	z	p-value	r
Within Intervention group			
Maximum strength right hand	4.30	<0.001	0.738
Maximum strength left hand	4.53	<0.001	0.754
Mean strength right hand*	4.24	<0.001	0.727
Mean strength left hand	4.50	<0.001	0.750

Within Control group

Maximum strength right hand	4.30	<0.001	0.718
Maximum strength left hand	3.98	<0.001	0.726
Mean strength right hand	4.52	<0.001	0.753
Mean strength left hand	3.97	<0.001	0.725

*Mean strength is the arithmetic mean of three measurements, z – z value, r - Effect size

PROMS: Disabilities of the Arm, Hand, and Shoulders Questionnaire (DASH)

Folgende sekundäre Fragestellung soll untersucht werden:

Führt die Anwendung von StableHandVR zu einer mindestens gleich guten Verbesserung der funktionellen Handbewegung (DASH) im Vergleich zur Kontrollgruppe?

Der DASH ist ein subjektiver Parameter, da es sich um einen Fragebogen handelt, den die PatientInnen selbst ausfüllen. **Beide Gruppen verbesserten sich signifikant zwischen Ein- und Ausgangstest:** Versuchsgruppe $p < 0.001$ und Kontrollgruppe ebenfalls $p < 0.001$. **Es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen in der Veränderung des DASH Scores** ($p = 0.417$). Die deskriptive Statistik der DASH Summenscore zeigt eine relevante Verbesserung für beide Gruppen für den prä-post Zeitraum im Bereich von 10 Punkten. Die Verbesserung in der Kontrollgruppe fällt sowohl im Mittelwert als auch im Median in geringem Maße größer aus im Vergleich zur Interventionsgruppe (Mittelwert: 11.39 vs. 9.31, Median, 9.17 vs. 8.33).

Table 8 DASH Mittelwerte pro Gruppe

Gruppe	Eingangstest	Ausgangstest
Kontrollgruppe	48.38	36.62
Versuchsgruppe	47.57	38.14

DASH Hauptmodul

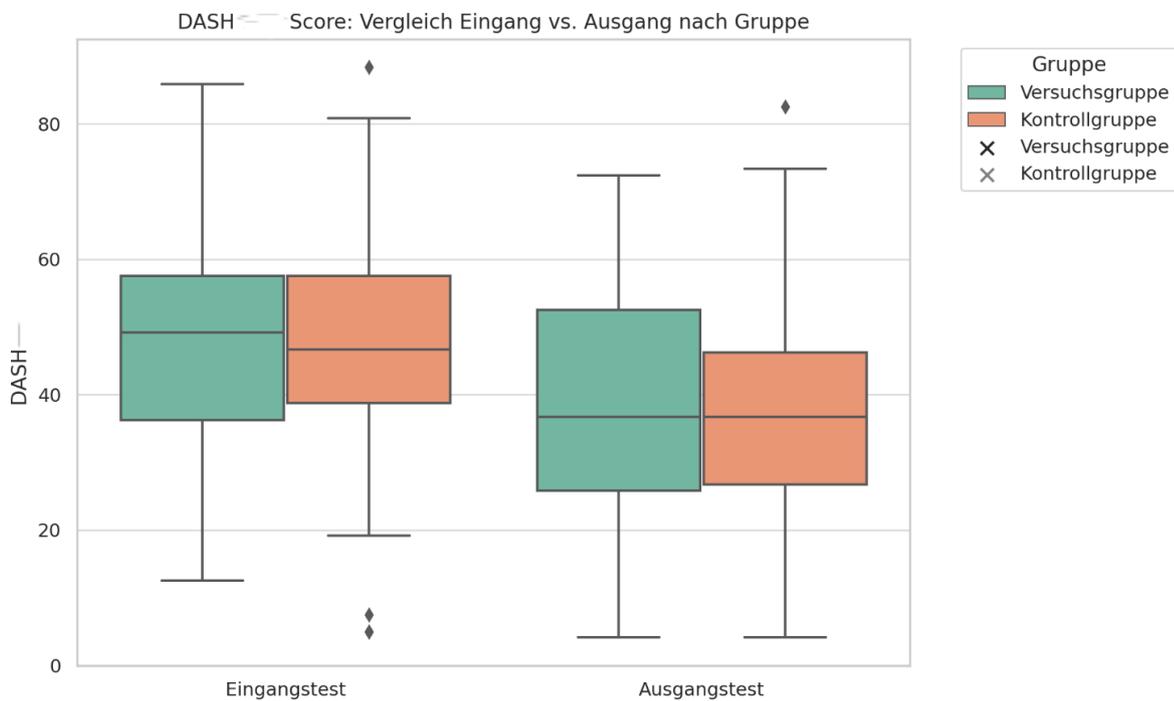


Figure 29 Boxplot mit DASH Werten für Eingangs- vs. Ausgangstest, aufgeteilt nach Versuchsgruppe und Kontrollgruppe (Median). Zusätzlich sind die individuellen Wertepunkte (Ausreißer) als graue Diamanten dargestellt.

Anders als bei den Tests der primären Fragestellung wird beim Vergleich der DASH Scores nicht auf einen Vorteil der Interventionsgruppe getestet, stattdessen wird eine mindestens gleich gute Verbesserung der Interventionsgruppe propagiert. Die Ergebnisse der ANCOVA zeigen, dass sich die Follow Up DASH Scores zwischen Interventionsgruppe und Kontrollgruppe nicht signifikant voneinander unterscheiden ($p = 0.351$).

Table 9 DASH-Score - Ergebnisse der ANCOVA

Variable	R ²	β	t	p-value	η^2
DASH score	0.503	-1.92	-0.94	0.351	<0.01

R² - Coefficient of determination, β - Regression coefficient, t - t value, η^2 - Effect size

Die Prä-Post Differenz innerhalb beider Gruppen ist signifikant ($p < 0.001$), die Effektstärke entspricht gemäß Cohen einem mittleren Effekt.

Table 10 DASH-Score - Ergebnisse des gepaarten t-Tests

Variable	DF	t	p-value	d
DASH score within Intervention group	68	-6.55	<0.001	0.56
DASH score within Control group	66	-6.84	<0.001	0.68

DF - Degrees of Freedom, t - t value, d - Cohen's d

DASH Modul Arbeit

Beide Gruppen verbesserten sich signifikant vom Eingangstest zum Ausgangstest; Versuchsgruppe $p < 0.001$ und Kontrollgruppe ebenfalls $p < 0.001$. Im DASH Score zwischen den Gruppen im Bereich Arbeit besteht kein signifikanter Unterschied $p = 0.621$.

Klinische Funktionalität: Schmerz (NRS, semi-strukturierte Interviews)

Deskriptive Kennwerte der durch die Patienten berichteten Schmerzen, dargestellt auf einer Skala von 0 (geringster Schmerz) bis 10 (stärkster Schmerz), sind in Table 11 zu sehen. **Auffällig ist, dass bei den Ruheschmerzen in der Interventionsgruppe im Rahmen der Behandlung keine Besserung eintritt, während sie in der Kontrollgruppe leicht abnehmen. Auch bei den Schmerzen in Bewegung fällt die Besserung in der Interventionsgruppe geringer aus als in der Kontrollgruppe.**

Ein zentrales Ergebnis der Nutzerbeobachtungen und semistrukturierten Interviews war die hohe immersive Qualität der virtuellen Umgebung, die von den PatientInnen als besonders hilfreich im Umgang mit Schmerz und Belastungssymptomen beschrieben wurde. **Viele PatientInnen berichteten, dass sie während der Anwendung von *StableHandVR* „von den Sorgen weg“ seien, sich „einfach abschalten“ könnten und in eine andere Welt „eintauchten“.** Diese immersive Erfahrung führte nicht nur zu einer temporären kognitiven Entlastung, sondern auch dazu, dass die Ausführung der Übungen als weniger belastend wahrgenommen wurden. Die Aufmerksamkeit verlagerte sich weg von der Verletzung hin zur Spielaufgabe, ein Mechanismus, der in der Literatur zur VR-basierten Schmerzmodulation als vielversprechend beschrieben wird. Besonders eindrucksvoll war die Aussage, man merke „erst, wenn man müde wird, dass man viel geübt hat“, was auf eine signifikante Reduktion der subjektiven Schmerzfokussierung schließen lässt. Der positive Einfluss visueller Rückmeldung über Farbcodierungen („Im Spiel weiß ich auch durch die Farben, dass ich die Übungen richtig mache“) unterstützte zusätzlich die Bewegungsmotivation, ohne die Aufmerksamkeit auf den Schmerz zu lenken. **Generell haben die PatientInnen angemerkt, dass sie sich „mehr zutrauen, da man die eigenen kaputten Hände nicht sieht“ und somit auch in größeren Bewegungsumfängen die Hand beüben können.**

Table 11 Übersicht Schmerz NRS

Variable	n	Mean	SD	Median	Min	Max
Intervention group						
Pain at rest BL	70	1.80	2.22	0.50	0.00	10.00
Pain at rest FU	70	1.80	2.00	1.00	0.00	8.00
Pain at rest CFB	70	0.00	1.73	0.00	-6.00	5.00
Pain on movement BL	70	3.54	2.68	4.00	0.00	10.00
Pain on movement FU	70	2.76	2.16	3.00	0.00	8.00
Pain on movement CFB	70	-0.79	2.25	-1.00	-7.00	6.00
Control group						

Pain at rest BL	67	1.63	2.30	0.00	0.00	10.00	BL –
Pain at rest FU	67	1.25	1.80	0.00	0.00	8.00	
Pain at rest CFB	67	-0.37	2.01	0.00	-10.00	4.00	
Pain on movement BL	67	3.51	2.83	3.00	0.00	10.00	
Pain on movement FU	67	2.34	2.29	2.00	0.00	10.00	
Pain on movement CFB	67	-1.16	2.19	-1.00	-6.00	4.00	

Baseline, FU – Follow Up, CFB – Change From Baseline

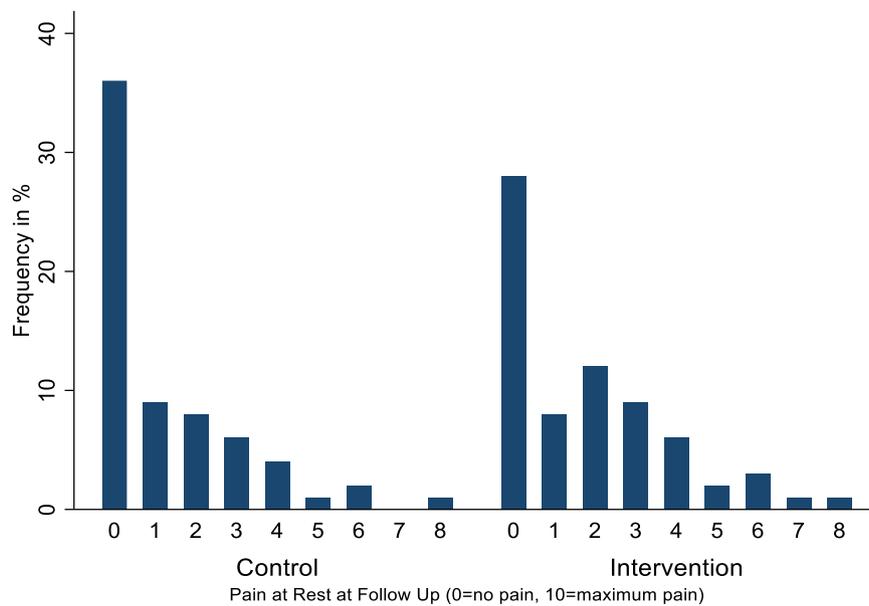
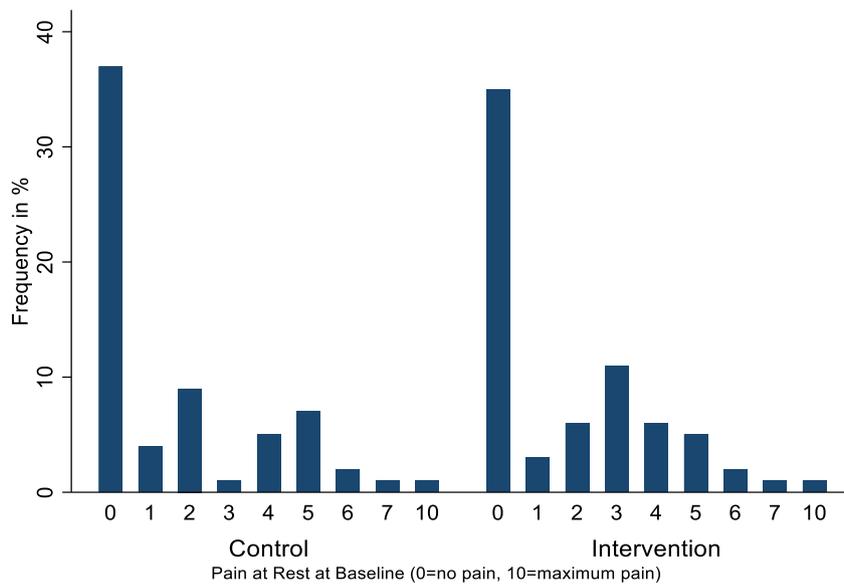


Figure 30 Schmerzen in Ruhe zu Beginn der Studie (oben) und bei der Nachuntersuchung (unten)

Die Unterschiede in den berichteten Schmerzen zum Follow Up stellen sich zwischen den beiden Gruppen basierend auf einer ordinalen logistischen Regression als nicht signifikant dar (s. Table x). **Innerhalb der beiden Gruppen sind die prä-post Unterschiede hinsichtlich Schmerzen in Bewegung jeweils signifikant für Kontrollgruppe ($p < 0.001$) und Interventionsgruppe ($p = 0.004$)** und in Bezug auf Schmerzen in Ruhe nicht signifikant.

Table 12 Schmerz NRS - Ergebnisse der geordneten logistischen Regressionsanalyse

Variable	Pseudo R ²	β	z	p-value
Pain at rest at FU, adjusted for BL	0.134	-0.65	-1.94	0.052
Pain on movement at FU, adjusted for BL	0.131	-0.51	-1.64	0.101

Pseudo R² - Coefficient of determination, β – Regression coefficient, z – z value

Table 13 Schmerz NRS - Ergebnisse des Wilcoxon Signed-Rank-Tests

Variable	z	p-value
Pain at rest		
Pain VAS within Intervention group	-0.08	0.937
Pain VAS within Control group	-1.08	0.279
Pain on movement		
Pain VAS within Intervention group	-2.88	0.004
Pain VAS within Control group	-3.95	<0.001

z – z value

Die Anzahl der Patienten, die Schmerzmittel benötigten, hat zwischen Baseline und Follow Up Zeitpunkt in beiden Gruppen zugenommen. In der Interventionsgruppe war die Zunahmen jedoch deutlich stärker ausgeprägt (von 32.2% auf 57.6%) **verglichen mit der Kontrollgruppe** (von 42.4% auf 49.2%).

Table 14 Schmerzmedikation

Variable	n	%
Intervention group		
Pain medication at BL (yes/no)	19/40	32.2
Pain medication at FU (yes/no)	34/25	57.6
Control group		
Pain medication at BL (yes/no)	25/34	42.4

Pain medication at FU (yes/no) 29/30 49.2

BL – Baseline, FU – Follow Up

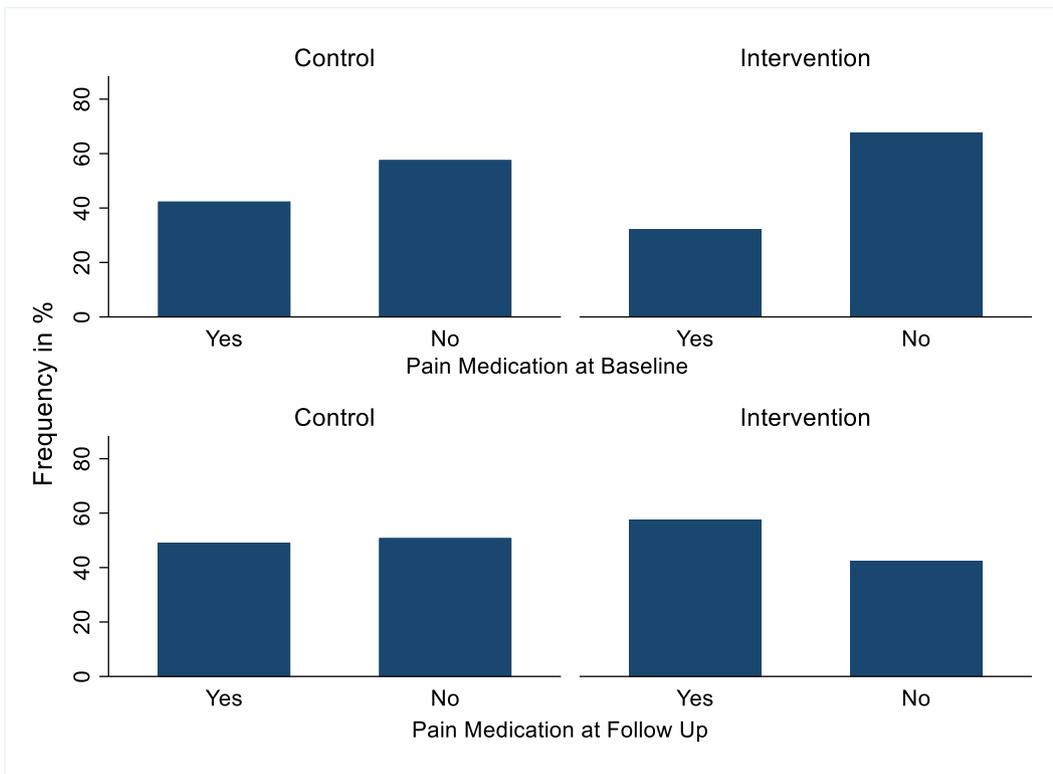


Figure 31 Schmerzmedikation zu Beginn der Studie (oben) und bei der Nachuntersuchung (unten)

Klinische Funktionalität: Clothespin Relocation Test

Die Darstellung der Baselinewerte des Clothespin Relocation Tests per Box Plots zeigt, dass insbesondere 5 Werte von den restlichen Werten stark abweichen (s. Figure 32 Clothespin Relocation test – Baseline Werte). Da die zu diesen fünf Werten zugehörigen Follow Up-Werte deutlich niedriger sind, sind die gemittelten CFB Werte stark verzerrt und nicht geeignet, um die Veränderung zwischen den Gruppen zu bewerten. Ein Vergleich von Table 15 Clothespin Relocation Test – All data (alle Daten) und Table 16 Clothespin Relocation test – (ohne die 5 auffälligen Werte) zeigt, wie stark sich der Mittelwert bei Herausnahme dieser Werte ändert. Daher sollte hier bei der Interpretation der Änderungen zwischen Baseline und Follow Up der Median herangezogen werden, der robust gegenüber stark von der Norm abweichenden Werten ist.

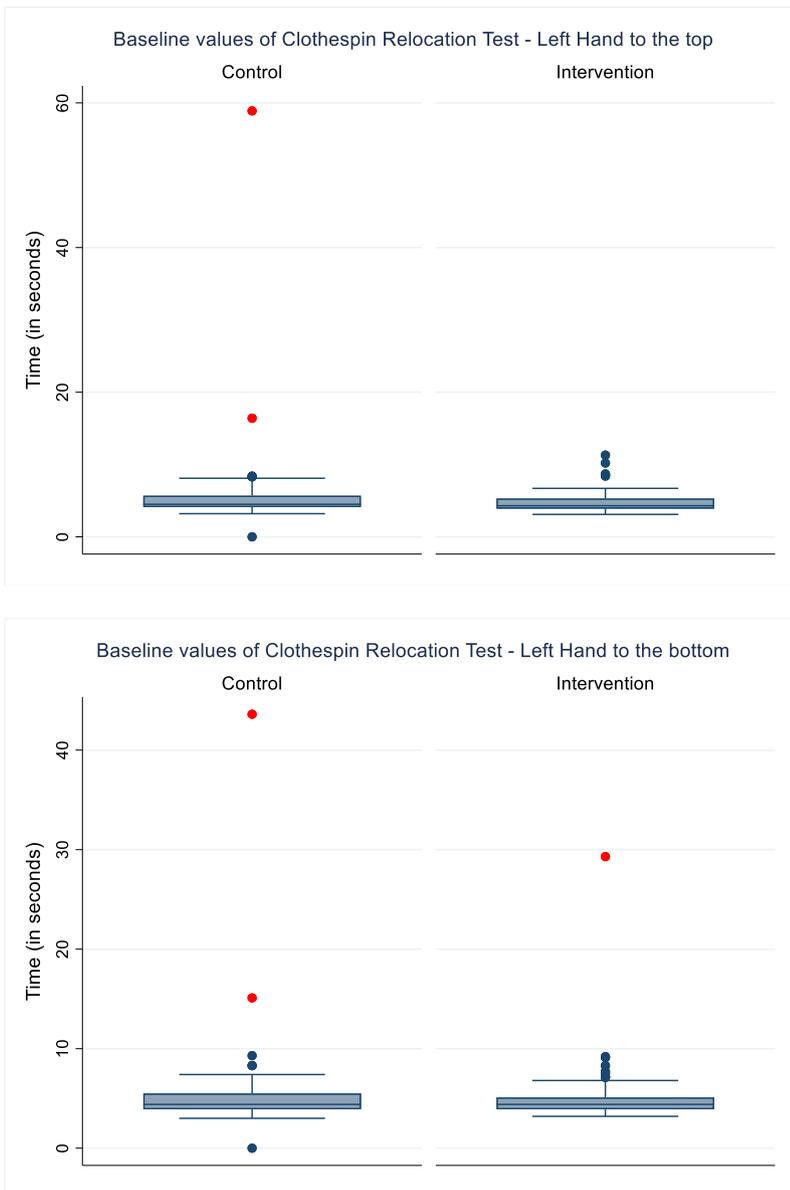


Figure 32 Clothespin Relocation test – Baseline Werte

Table 15 Clothespin Relocation Test – All data

Variable	n	Mean	SD	Median	Min	Max
Intervention group						
Right to the top BL	34	4.70	1.77	4.10	3.00	10.80
Right to the top FU	34	3.94	0.82	3.80	2.50	6.40
Right to the top CFB	34	-0.76	1.19	-0.50	-4.40	0.90
Right to the bottom BL	34	4.65	1.46	4.30	2.70	10.20
Right to the bottom FU	34	4.10	0.98	3.85	2.80	7.40
Right to the bottom CFB	34	-0.55	0.75	-0.40	-2.80	0.50
Left to the top BL	36	5.52	1.88	5.20	3.30	11.30
Left to the top FU	36	4.42	0.91	4.20	3.00	6.60
Left to the top CFB	36	-1.10	1.32	-0.75	-4.70	0.70
Left to the bottom BL	36	6.11	4.27	4.95	3.30	29.30
Left to the bottom FU	36	4.53	0.80	4.65	3.00	6.80
Left to the bottom CFB	36	-1.58	3.95	-0.80	-23.30	1.00
Control group						
Right to the top BL	36	5.22	2.40	4.35	0.00	11.60
Right to the top FU	36	4.28	1.43	3.95	0.00	8.40
Right to the top CFB	36	-0.94	1.53	-0.40	-6.70	0.80
Right to the bottom BL	36	5.25	2.86	4.25	0.00	16.40
Right to the bottom FU	36	4.32	1.60	3.90	0.00	9.30
Right to the bottom CFB	36	-0.93	2.18	-0.30	-10.70	1.80
Left to the top BL	31	7.54	9.84	5.10	3.30	58.90
Left to the top FU	31	5.48	2.73	4.90	2.90	17.40
Left to the top CFB	31	-2.06	7.53	-0.10	-41.50	1.50
Left to the bottom BL	31	6.88	7.16	4.90	3.30	43.60
Left to the bottom FU	31	5.38	2.92	4.50	3.00	18.90
Left to the bottom CFB	31	-1.50	4.65	-0.30	-24.70	1.70

BL – Baseline, FU – Follow Up, CFB – Change From Baseline

Table 16 Clothespin Relocation test – ohne die hohen Werte

Variable	n	Mean	SD	Median	Min	Max
Intervention group						
Right to the top BL	34	4.70	1.77	4.10	3.00	10.80
Right to the top FU	34	3.94	0.82	3.80	2.50	6.40
Right to the top CFB	34	-0.76	1.19	-0.50	-4.40	0.90
Right to the bottom BL	34	4.65	1.46	4.30	2.70	10.20
Right to the bottom FU	34	4.10	0.98	3.85	2.80	7.40
Right to the bottom CFB	34	-0.55	0.75	-0.40	-2.80	0.50
Left to the top BL	36	5.52	1.88	5.20	3.30	11.30
Left to the top FU	36	4.42	0.91	4.20	3.00	6.60
Left to the top CFB	36	-1.10	1.32	-0.75	-4.70	0.70
Left to the bottom BL	35	5.45	1.59	4.90	3.30	9.20
Left to the bottom FU	35	4.49	0.78	4.60	3.00	6.80
Left to the bottom CFB	35	-0.96	1.35	-0.70	-4.70	1.00
Control group						
Right to the top BL	36	5.22	2.40	4.35	0.00	11.60
Right to the top FU	36	4.28	1.43	3.95	0.00	8.40
Right to the top CFB	36	-0.94	1.53	-0.40	-6.70	0.80
Right to the bottom BL	36	5.25	2.86	4.25	0.00	16.40
Right to the bottom FU	36	4.32	1.60	3.90	0.00	9.30
Right to the bottom CFB	36	-0.93	2.18	-0.30	-10.70	1.80
Left to the top BL	29	5.46	1.52	5.00	3.30	8.40
Left to the top FU	29	4.96	1.50	4.80	2.90	9.60
Left to the top CFB	29	-0.50	1.26	-0.10	-3.90	1.50

Left to the bottom BL	29	5.33	1.38	4.80	3.30	8.30
Left to the bottom FU	29	4.83	1.45	4.50	3.00	8.90
Left to the bottom CFB	29	-0.50	1.31	-0.30	-4.40	1.70

BL – Baseline, FU – Follow Up, CFB – Change From Baseline

Bei keinem der vier Parameter war ein signifikanter Unterschied zwischen Interventionsgruppe und Kontrollgruppe detektierbar (siehe Table 17 Clothespin Relocation Test – Results of ordered logistic regression).

Table 17 Clothespin Relocation Test – Results of ordered logistic regression

Variable	Pseudo R ²	β	z	p-value	OR
Right hand - to the top	0.147	0.32	0.76	0.45	1.37
Right hand - to the bottom	0.096	-0.21	-0.50	0.62	0.81
Left hand - to the top	0.114	0.82	1.79	0.07	2.26
Left hand - to the bottom	0.051	0.49	1.12	0.26	1.63

R² - Coefficient of determination, β – Regression coefficient, t – t value, η² - Effect size

Sämtliche Prä-Post Differenz innerhalb beider Gruppen waren statistisch signifikant. Der der Effektstärken in der Kontrollgruppe entsprechen gemäß Bartz (1999) einem mittleren Effekt, eine einem großen Effekt. Alle Differenzen in der Interventionsgruppe sind als große Effekte zu interpretieren (s. Table 18 Clothespin Relocation Test – Results of Wilcoxon signed-rank test).

Table 18 Clothespin Relocation Test – Results of Wilcoxon signed-rank test

Variable	z	p-value	r
Within Intervention Group			
Right hand - to the top	-3.396	<0.001	0.58
Right hand - to the bottom	-3.610	<0.001	0.62
Left hand - to the top	-4.581	<0.001	0.76
Left hand - to the bottom	-3.756	<0.001	0.63
Within Control Group			
Right hand - to the top	-3.756	<0.001	0.63

Right hand - to the bottom	-2.412	0.016	0.40
Left hand - to the top	-2.019	0.044	0.36
Left hand - to the bottom	-2.186	0.029	0.39

z – z value, r - Effect size

PROMs: Fragebögen zur Lebensqualität SF-36

Die Auswertung der SF-36-Fragebögen ergab keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen in Bezug auf die acht erfassten Subskalen, weder für körperliche noch für psychische Aspekte der gesundheitsbezogenen Lebensqualität (s. Table 19 SF 36 – Ergebnisse der ANCOVA). Auch wenn in einzelnen Skalen wie „Rolle – emotional“ oder „Allgemeine Gesundheit“ numerische Trends zu erkennen waren, erreichten diese keinen statistischen Schwellenwert. Die Effektstärken (η^2) fielen insgesamt sehr gering aus, was zusätzlich auf einen fehlenden relevanten Unterschied zwischen den Gruppen hinweist. Insgesamt deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass sich die Lebensqualität der PatientInnen, gemessen mit dem SF-36, im Verlauf der Interventionen nicht substantiell veränderte.

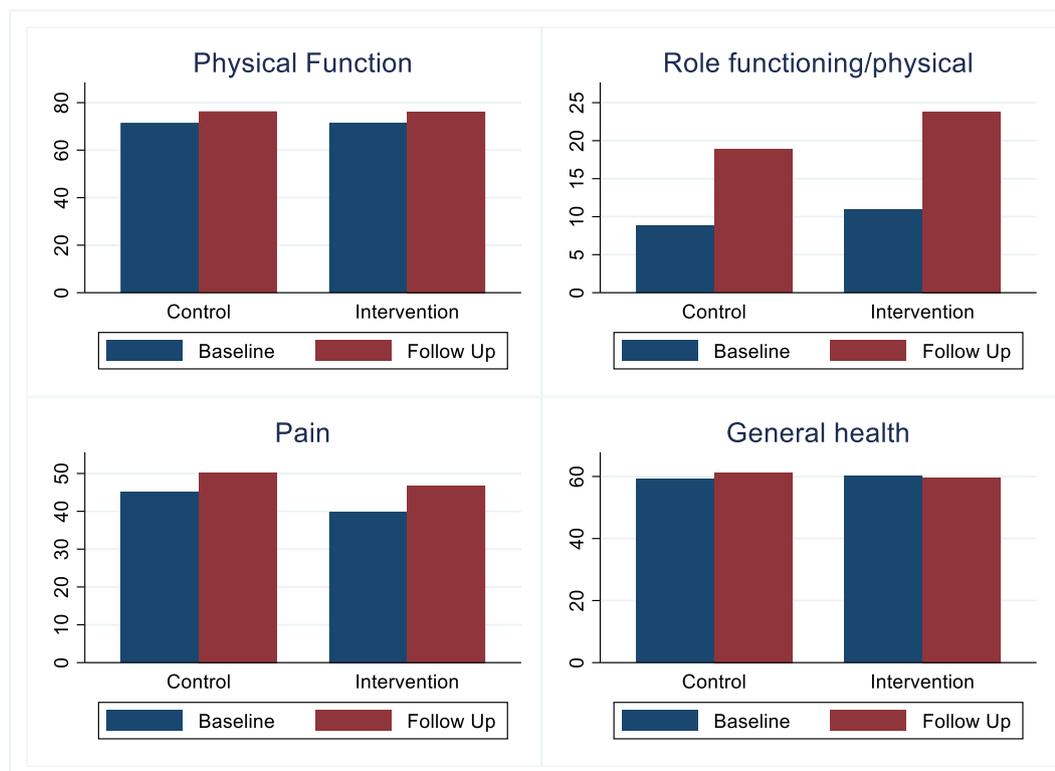


Figure 33 SF-36 Unterskalen zu körperlichen Aspekten bei Baseline und Follow-up

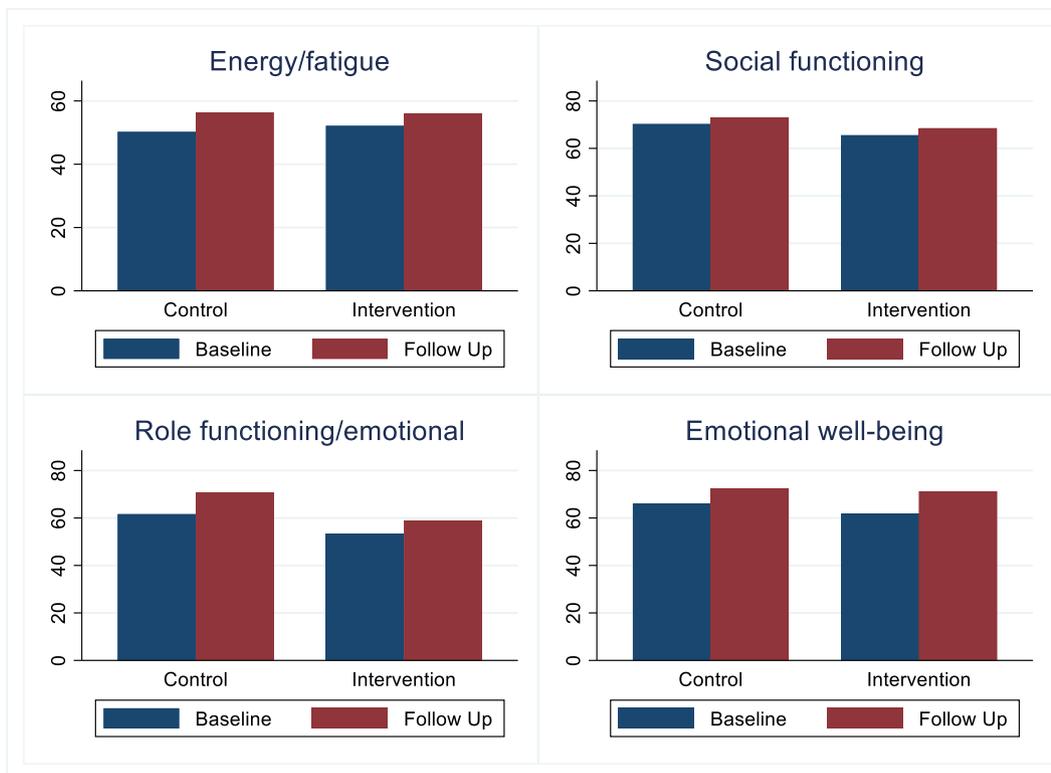


Figure 34 SF-36 Subskalen zu psychischen Aspekten bei Baseline und Follow-up

Table 19 SF 36 – Ergebnisse der ANCOVA

Variable	R ²	β	t	p-value	η ²	R ² -
Physical functioning	0.452	0.00	0.00	1.00	<0.001	
Role functioning/physical	0.203	-3.49	-0.62	0.54	<0.01	
Pain	0.498	-0.21	-0.07	0.94	<0.001	
General health	0.432	2.26	0.95	0.34	<0.01	
Energy/fatigue	0.444	1.56	0.58	0.56	<0.01	
Social functioning	0.467	1.34	0.40	0.69	<0.01	
Role functioning/emotional	0.181	8.55	1.20	0.23	0.011	
Emotional well-being	0.513	-1.85	-0.77	0.44	<0.01	

Coefficient of determination, β – Regression coefficient, t – t value, η² - Effect size

Greif- und Planungsverhalten – Motion und Eye Tracking: Kohorte Karpal Tunnel

Greifbewegungen dauern länger und erreichen niedrigere Maximalgeschwindigkeiten in der Kohorte mit Karpaltunnelsyndrom (CTS). Außerdem unterscheidet sich die Position der Hand mit CTS beim Greifen eines Objekts von derjenigen von Händen ohne CTS. Tatsächlich neigen Personen mit CTS dazu, größere Gelenkwinkel zu verwenden, um eine stärkere radiale Greifkraft zu erzielen, was die motorische Kontrolle

verbessert und das Risiko eines Griffverlusts verringert. Obwohl sich diese Unterschiede nach der Operation verringerten, waren die Unterschiede in der Planung und Ausführung von Greifbewegungen zwischen Personen mit und ohne CTS am Ende des Messzeitraums immer noch offensichtlich.

Die Kombination aus 3D-Motion-Tracking und Eye-Tracking ermöglichte eine präzise Analyse kinematischer Parameter sowie visuomotorischer Antizipation. Die CTS-Kohorte zeigte im Vergleich zur Kontrollgruppe signifikant verlängerte Greifzeiten (OGT, $p < 0.001$) und reduzierte maximale Handgeschwindigkeiten (VMax, $p < 0.001$), insbesondere bei der reach-to-grasp-Phase (TTO). Während sich alle Zeitparameter nach Operation signifikant verbesserten (z. B. OGT MP1 vs. MP3: $p < 0.001$), blieben die Unterschiede zur gesunden Vergleichsgruppe auch am Ende der Beobachtungszeit bestehen.

Auch die Greifkonfiguration war bei Personen mit CTS deutlich verändert: Die funktionellen Bewegungsumfänge (ROM) von Finger- und Daumengelenken waren insbesondere im DIP- und MCP-Bereich signifikant größer als bei gesunden Personen, ein Hinweis auf kompensatorische Strategien zur Verbesserung der Griffkraft durch verstärkte radiale Kraftausrichtung. Diese veränderten Winkel blieben auch sechs Wochen nach der Operation bestehen.

Planungs- und Greifverhalten zusammenfassend:

- Die Operation verbessert kinematische Parameter, jedoch bleiben residuale Unterschiede zur gesunden Kontrolle auch nach 6 Wochen bestehen.
- CTS-Betroffene nutzen kompensatorische Strategien, u. a. durch größere Gelenkwinkel und veränderte Griffkonfiguration.
- Eine rein chirurgische Behandlung reicht nicht aus: neurokognitive und funktionelle Rehabilitation sollten integraler Bestandteil der Therapie sein

Analyse im Detail:

Demographische Daten

Die demografischen Daten der Kontrollgruppe (n = 30) sowie der alters- und geschlechtsgematchten Kohorte mit Karpaltunnelsyndrom (CTS) (n = 30) wurden erhoben, ebenso wie klinische Untersuchungsparameter, etwa die Messung der Griffkraft der rechten Hand. Für die CTS-Kohorte werden die Ergebnisse zum ersten Messzeitpunkt vor der Operation (MP1) und zum dritten Messzeitpunkt (MP3), sechs Wochen postoperativ, dargestellt. Zusätzlich wurden die PatientInnen mit CTS gebeten, ihre bewegungsabhängigen Schmerzen in der rechten Hand mittels NRS selbst einzuschätzen. Darüber hinaus füllten sie verschiedene standardisierte Fragebögen aus: den BCTQ mit seinen beiden Skalen zur Symptomschwere und zur funktionellen Beeinträchtigung sowie den DASH.

Table 20 Demografische Daten, Fragebogen und klinische Untersuchung

	Kontrollgruppe (n=30)	Versuchsgruppe (n=30)
Alter (mean ± SD)	37.7 ± 12.17	65.6 ± 11.67
Geschlecht (male/female)	15/15	13/17
Hand Dominanz (right/left)	30/0	30/0
Symptombdauer (months, mean ± SD)	---	27.0 ± 36.35
OP (yes/no)	0/30	30/0
MP1 Griffkraft Hand rechts (male/female; kg, mean ± SD)	50.0 ± 8.34/33.2 ± 5.22	32.8 ± 10.05/19.2 ± 6.39

MP3 Griffkraft Hand rechts (male/female; kg, mean ± SD)	---	27.3 ± 9.76/14.1 ± 6.37
MP1 Schmerz (NRS, mean ± SD)	---	2.2 ± 2.85
MP3 Schmerz (NRS, mean ± SD)	---	1.73 ± 2.20
MP1 Symptomschwere Skala des BCTQ (mean ± SD)	---	2.73 ± 0.94
MP3 Symptomschwere Skala des BCTQ (mean ± SD)	---	1.93 ± 0.71
MP1 Funktionelle Skala des BCTQ (mean ± SD)	---	2.46 ± 0.96
MP3 Funktionelle Skala des BCTQ (mean ± SD)	---	2.09 ± 0.86
MP1 DASH	1.2 ± 2.00	37.8 ± 24.93
MP3 DASH	---	30.1 ± 22.07

Zeitparameter der Greifbewegung

- Overall Grasping Time (OGT) war bei Personen mit CTS signifikant länger als bei der Kontrollgruppe, verbesserte sich aber postoperativ.
- Time to Object (TTO) war bei CTS-Betroffenen zu allen Messzeitpunkten verlängert (signifikant), vor allem bei schweren Objekten.
- Maximum Velocity (VMax) der Greifbewegung war reduziert in der CTS-Kohorte und stieg postoperativ an, erreichte aber nicht das Niveau der Kontrollgruppe.
- Time to First Fixation (TFF) und Time of Delay 1 (ToD1) waren zu Studienbeginn kürzer in der CTS-Kohorte, wurden jedoch über den Verlauf länger – möglicherweise ein Effekt von Motivation und Gewöhnung.
- Time of Delay 2 (ToD2) war postoperativ bei CTS kürzer als bei Kontrollen, was auf erhöhten visuellen Informationsbedarf hindeuten könnte.

Kinematik

- Die Maximale Greifgeschwindigkeit (MGV) war im Vergleich zur Kontrollgruppe nicht signifikant unterschiedlich, nahm jedoch innerhalb der CTS-Kohorte postoperativ zu.
- Die Maximale Greiföffnung (MGA) war bei CTS signifikant größer als bei Kontrollen, auch postoperativ.
- Die kinematischen Parameter zeigten durchgehend eine langsame, aber inkonstante Annäherung an die Kontrollgruppe über die drei Messzeitpunkte hinweg.

Gelenkwinkel und Griffkonfiguration

- CTS-PatientInnen zeigten größere Bewegungsumfänge (ROM) in den Finger- und Daumengelenken, insbesondere im DIP und PIP des Zeigefingers sowie in der Daumenabduktion und -interphalangealflexion. Diese Unterschiede bestanden prä- und postoperativ und waren besonders beim Greifen kleinerer Objekte ausgeprägt.

- Die Winkel am Ende der Greifbewegung (t4) zeigten in der CTS-Kohorte größere MCP- und DIP-Winkel aller Langfinger sowie eine erhöhte Daumen-Anteponation.
- Der Winkel der Handrotation (RAW) war bei CTS reduziert (für Ball, Prisma und Tasse), was auf kompensatorische Anpassungen hindeutet.

Klinische Funktionalität - Bewegungsausmaß (ROM, Kapandji, DASH, BCTQ): Kohorte Karpaltunnel

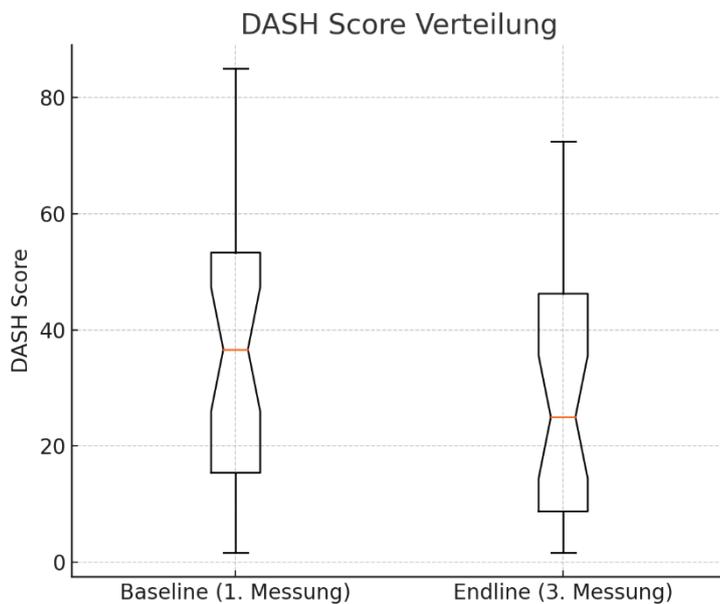


Figure 35 Boxplot der DASH Werte ohne Zusatzmodule bei der Kohorte Karpaltunnel

Der Boxplot des **DASH Scores zeigt eine signifikante Abnahme der DASH-Scores von der Baseline zur Endline** (Median Baseline: 34,2; Median Endline: 27,5; $p = 0.012$), **was auf eine funktionelle Verbesserung der oberen Extremität hinweist**. Die geringere Streuung bei der Endline deutet zudem auf konsistentere Behandlungsergebnisse hin. Insgesamt spricht der Verlauf für einen positiven Effekt der chirurgischen Intervention.

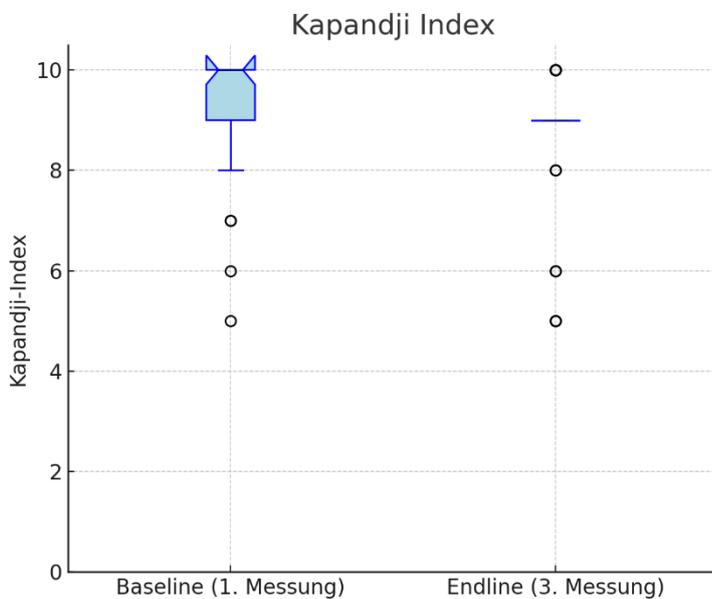


Figure 36 Boxplot Kapandji Index der Kohorte Karpaltunnel

Die statistische Auswertung des **Kapandji Werts zeigt eine signifikante Abnahme des Kapandji-Index** von Median 10.0 bei Baseline auf Median 9.0 bei Endline ($t = -2.72$, $p = 0.011$). Dies weist auf eine relevante Verschlechterung der Daumenopposition nach einer Karpaltunnel Operation hin.

Die statistische Analyse der **Handgelenksbeweglichkeit** (Range of Motion, ROM) umfasste vier Bewegungsparameter: Dorsalextension, Palmarflexion, radiale Abduktion und ulnare Abduktion. Für alle Parameter wurden gepaarte t-Tests durchgeführt, um Veränderungen zwischen der ersten und der dritten Messung zu bewerten. **Keiner der Werte zeigte eine signifikante Veränderung im Verlauf** (siehe Figure 37).

Die Dorsalextension, das Zurückziehen des Handrückens in Richtung Unterarm, blieb mit einem Mittelwert von $52,5^\circ$ zu Beginn und $53,0^\circ$ am Ende nahezu unverändert ($p = 0.813$). Auch die Palmarflexion, also die Beugung des Handgelenks zur Handfläche hin, zeigte mit $54,2^\circ$ zu $52,0^\circ$ keinen signifikanten Unterschied ($p = 0.288$). Eine leichte, nicht signifikante Reduktion zeigte sich bei der radialen Abduktion (Abspreizen zur Daumenseite) von $27,2^\circ$ auf $22,8^\circ$ ($p = 0.231$), während die ulnare Abduktion (Abspreizen zur Kleinfingerseite) leicht von $38,5^\circ$ auf $39,8^\circ$ anstieg ($p = 0.601$).

Insgesamt deuten die Ergebnisse auf eine stabile Handgelenksfunktion über den Untersuchungszeitraum hin. Weder eine Verbesserung noch eine klinisch relevante Verschlechterung der Beweglichkeit konnte statistisch nachgewiesen werden.

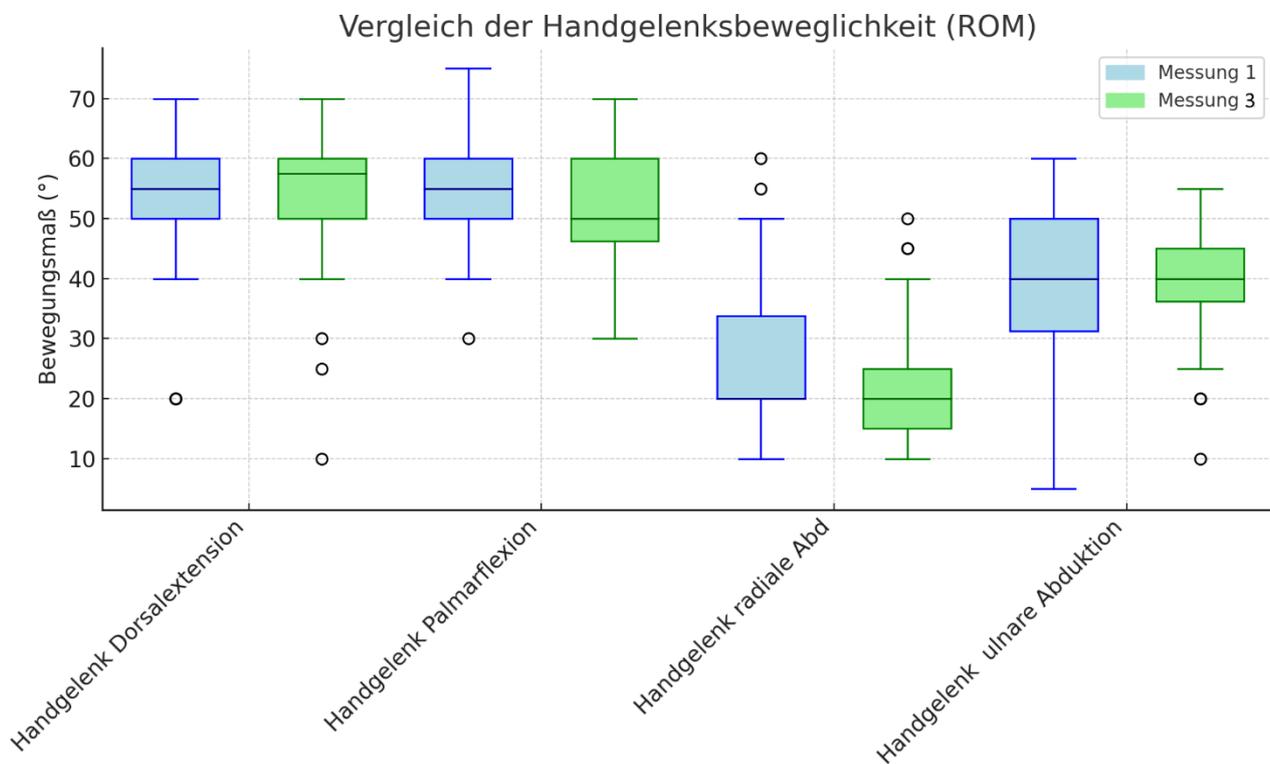


Figure 37 Vergleich der Handgelenksbeweglichkeit (ROM) zwischen der 1. und 3. Messung. Dargestellt sind die Bewegungsumfänge in Grad für Dorsalextension, Palmarflexion, radiale und ulnare Abduktion als Boxplots mit Median, Quartilen und Whiskers. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messzeitpunkten.

Die statistische Auswertung des **Boston Carpal Tunnel Questionnaire (BCTQ)** zeigte **signifikante Verbesserungen sowohl im Symptombereich als auch in der funktionellen Bewertung** über den Zeitraum von Event 1 (Baseline) bis Event 3 (Endline). Für die Analyse wurde ein Friedman-Test im Within-Subject-Design durchgeführt, der die Veränderungen über drei Messzeitpunkte hinweg prüft.

Im Bereich der Symptomschwere zeigten sich deutliche Verbesserungen in mehreren zentralen Dimensionen. So nahm beispielsweise das nächtliche Schmerzempfinden (Item 1) signifikant ab, mit einem Medianrückgang von 4,5 auf 2,0 ($p < 0,001$). Auch das Taubheitsgefühl der Hand (Item 3) verbesserte sich stark von einem Medianwert von 3,0 auf 1,0 ($p < 0,001$). Das Kribbeln (Item 6) zeigte ebenfalls einen signifikanten Rückgang der Beschwerden ($p < 0,001$).

Im funktionellen Teil des Fragebogens ergaben sich ebenso signifikante Veränderungen in mehreren alltagsrelevanten Aktivitäten. Das Halten eines Buches beim Lesen (Item 2) verbesserte sich beispielsweise mit einem Median von 3,0 auf 2,0 ($p < 0,001$), während das Öffnen von Gläsern (Item 9) eine Besserung von 3,0 auf 2,0 zeigte ($p < 0,001$). Insgesamt deutet der Verlauf der Medianwerte auf eine kontinuierliche Reduktion der Symptomlast und Funktionsbeeinträchtigung hin (siehe Figure 38).

Die Ergebnisse bestätigen eine klinisch relevante und statistisch signifikante Besserung des Gesundheitszustands der PatientInnen im Verlauf der Nachuntersuchungen. Sowohl subjektive Symptome als auch alltagsfunktionelle Einschränkungen nahmen im Gruppenmittel signifikant ab.

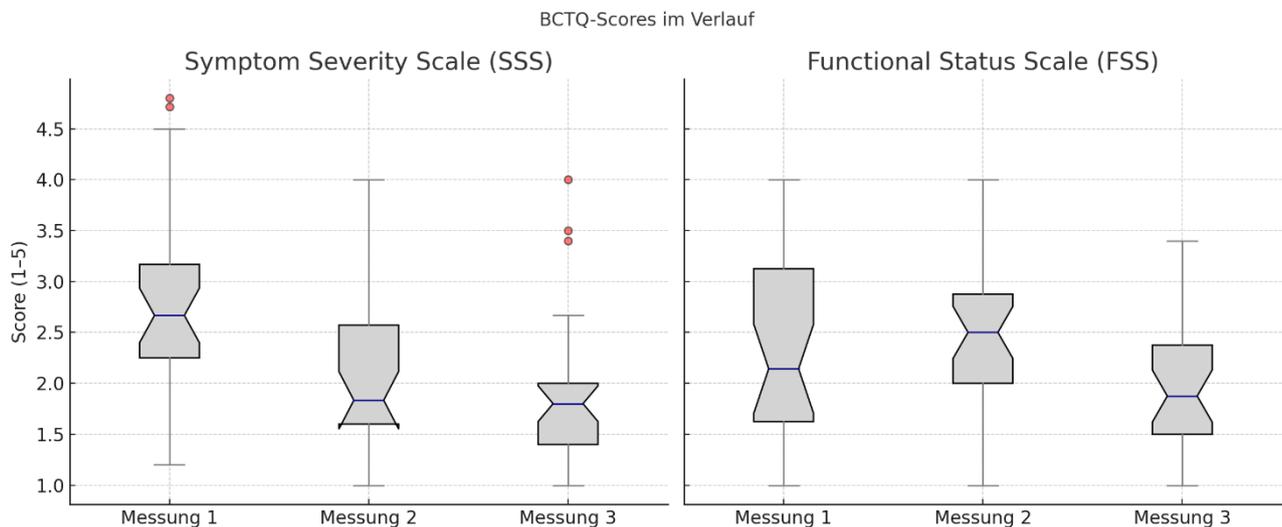


Figure 38 Verlauf der standardisierten BCTQ-Scores (Symptom Severity Scale [SSS] und Functional Status Scale [FSS]) über die drei Messzeitpunkte. Beide Skalen zeigen eine signifikante Abnahme der Beschwerden im Zeitverlauf: Der SSS-Score verbesserte sich hochsignifikant ($p = 0,000013$), ebenso der FSS-Score mit statistisch signifikanter Reduktion der funktionellen Einschränkungen ($p = 0,00047$). Boxplots zeigen Median, Interquartilsabstand und Ausreißer.

Klinische Sensibilität – 2-Punkt-Diskrimination: Kohorte Karpaltunnel

Die Analyse der Zwei-Punkt-Diskrimination (2PD) an den Fingern D1 bis D3 zeigt eine signifikante Verbesserung der taktilen Sensibilität im Verlauf der drei Messzeitpunkte. Mittels Friedman-Test wurden die Werte von Messpunkt 1 (Baseline), Messpunkt 2 (Zwischenmessung) und Messpunkt 3 (Endline) innerhalb der PatientInnengruppe verglichen.

Besonders ausgeprägt war die Verbesserung an den ulnaren Arealen von D2 und D3 sowie an der radialen Seite von D1. So sank der Median der 2PD an D2 ulnar von 8,0 mm bei Messzeitpunkt 1 auf 6,0 mm bei Messzeitpunkt 2 und schließlich auf 5,0 mm bei Messzeitpunkt 3 ($p < 0.001$). Ähnliche Verläufe zeigten sich an D3 radial (von 8,0 mm auf 5,0 mm, $p < 0.001$), D3 ulnar (von 9,0 mm auf 6,0 mm, $p < 0.001$) und D1 radial (von 8,0 mm auf 5,0 mm, $p < 0.001$) (siehe Figure 39, Figure 40, Figure 41).

Diese Veränderungen sind statistisch hochsignifikant und lassen auf eine klinisch relevante Erholung der Sensibilität im Versorgungsgebiet des N. medianus und einen erfolgreichen operativen Eingriff schließen. Die deutliche Abnahme der 2PD-Werte weist auf eine verbesserte Reizauflösung und funktionelle Rückgewinnung der taktilen Wahrnehmung hin.

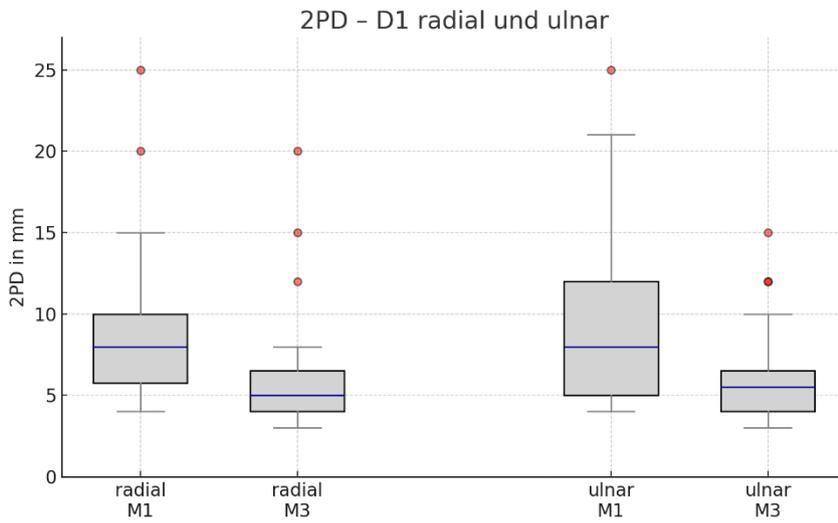


Figure 39 Zwei-Punkt-Diskrimination (2PD) am Daumen (D1), radial und ulnar, im Verlauf der Messzeitpunkte 1 und 3. Die Boxplots zeigen eine signifikante Verbesserung der taktilen Sensibilität, insbesondere auf der radialen Seite ($p = 0,000015$).

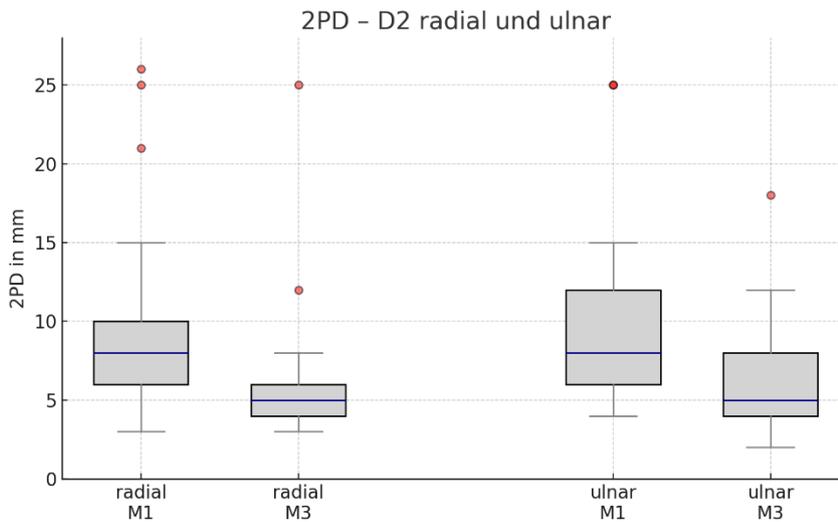


Figure 40 Zwei-Punkt-Diskrimination (2PD) am Zeigefinger (D2), radial und ulnar, im Verlauf der Messzeitpunkte 1 und 3. Sowohl radial als auch ulnar zeigt sich eine deutliche und statistisch signifikante Verbesserung der Diskriminationsfähigkeit ($p < 0,001$).

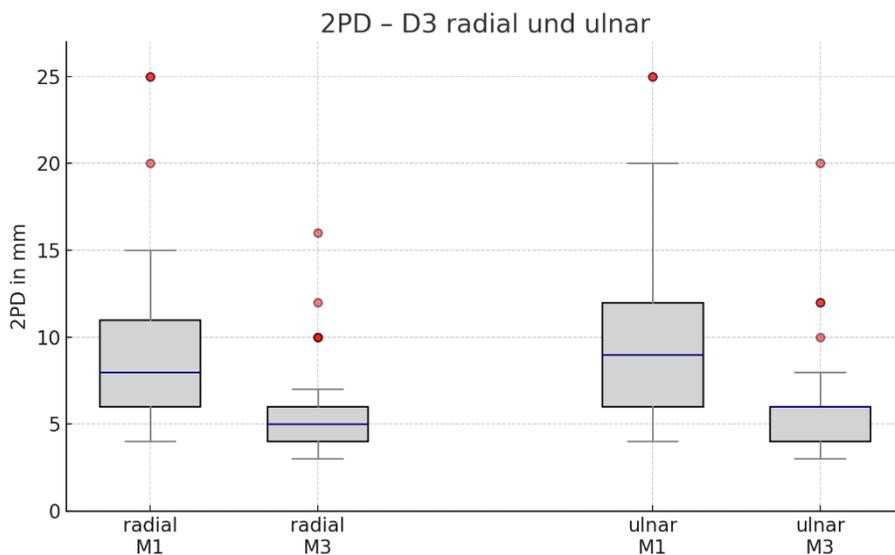


Figure 41 Zwei-Punkt-Diskrimination (2PD) am Mittelfinger (D3), radial und ulnar, zwischen Messung 1 und 3. Beide Seiten zeigen eine hochsignifikante Abnahme der 2PD-Werte, was auf eine verbesserte taktiler Wahrnehmung hindeutet ($p < 0,001$).

Klinische Funktionalität - Bewegungsausmaß (ROM, Kapandji, Handkraft, DASH): Kohorte Distale Radiusfraktur

Im Therapieverlauf zeigten sich sowohl in der konservativ als auch in der operativ behandelten Kohorte signifikante Verbesserungen in mehreren Bewegungsparametern der oberen Extremität. **Insbesondere konnten die Pronation, Supination, die Handgelenk-Dorsalextension, Palmarflexion sowie die radiale Abduktion des Handgelenks statistisch signifikant gesteigert werden (alle $p < 0.05$).** Diese Ergebnisse verdeutlichen die Wirksamkeit beider therapeutischer Ansätze im Hinblick auf die funktionelle Wiederherstellung der Handgelenkbeweglichkeit. Die Analyse des Kapandji Index ergab ebenfalls statistisch signifikante Verbesserung der Daumenopposition sowohl nach konservativer Behandlung als auch nach operativer Versorgung.

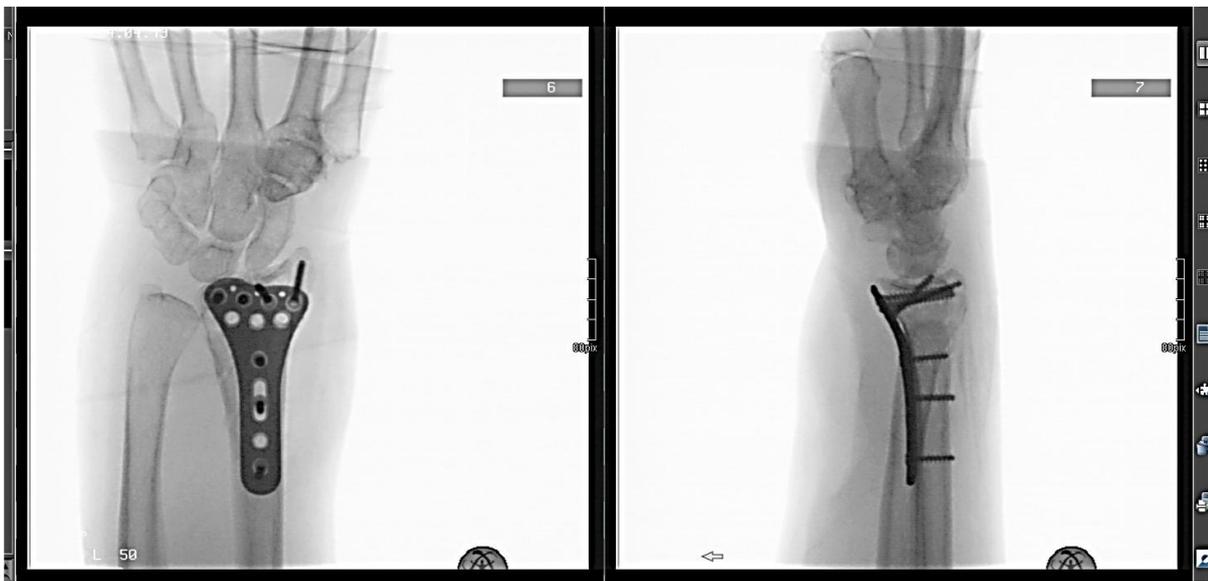


Figure 42 Beispiel einer operativ versorgten distalen Radiusfraktur eines Studienteilnehmers

Keine statistisch signifikanten Verbesserungen zeigten sich hingegen bei der ulnaren Abduktion des Handgelenks, den verschiedenen Daumenoppositions- und Greifmaßen sowie bei mehreren Spitzgriffen (z. B. Daumen-D2 bis D5). Diese Befunde deuten darauf hin, dass feinmotorische und kraftbezogene Funktionen im Vergleich zur reinen Beweglichkeit langsamer oder weniger konsistent auf die eingesetzten Therapieformen ansprechen, oder es dort keine Beweglichkeit zu Verbessern gab, da diese Funktionen nicht beeinträchtigt waren.

Zur Bewertung der funktionellen Erholung in der konservativen Behandlungsgruppe wurde die maximale Handkraft der rechten Hand zwischen dem ersten (Baseline) und dem zweiten Erhebungszeitpunkt (Endline) verglichen. **Die durchschnittliche Handkraft stieg signifikant ($p < 0,001$) von 13,45 kg (SD = 12,44 kg) zu 28,56 kg (SD = 13,00 kg) an. Die mittlere Zunahme betrug 15,11 kg (SD = 10,22 kg).** In der operativen Behandlungsgruppe wurde die maximale Handkraft der rechten Hand zwischen dem ersten Erhebungszeitpunkt (Baseline) und dem dritten Erhebungszeitpunkt (Endline) analysiert. **Die durchschnittliche Handkraft stieg signifikant ($p < 0,001$) von 2,00 kg (SD = 0,00 kg) auf 26,89 kg (SD = 10,86 kg). Die mittlere Zunahme betrug 24,89 kg (SD = 10,86 kg).** Wobei die PatientInnen in der operativen Gruppe nicht mehr als 2kg zugreifen sollten nach diesem Eingriff. Um die weitere funktionelle Entwicklung in der operativ behandelten Gruppe zu untersuchen, wurde der Unterschied der maximalen Handkraft rechts zwischen dem zweiten und dritten Erhebungszeitpunkt analysiert. Die durchschnittliche Handkraft stieg von 20,01 kg (SD = 7,40 kg) auf 27,69 kg (SD = 10,81 kg) an. **Die mittlere Zunahme betrug 7,67 kg (SD = 8,91 kg).**

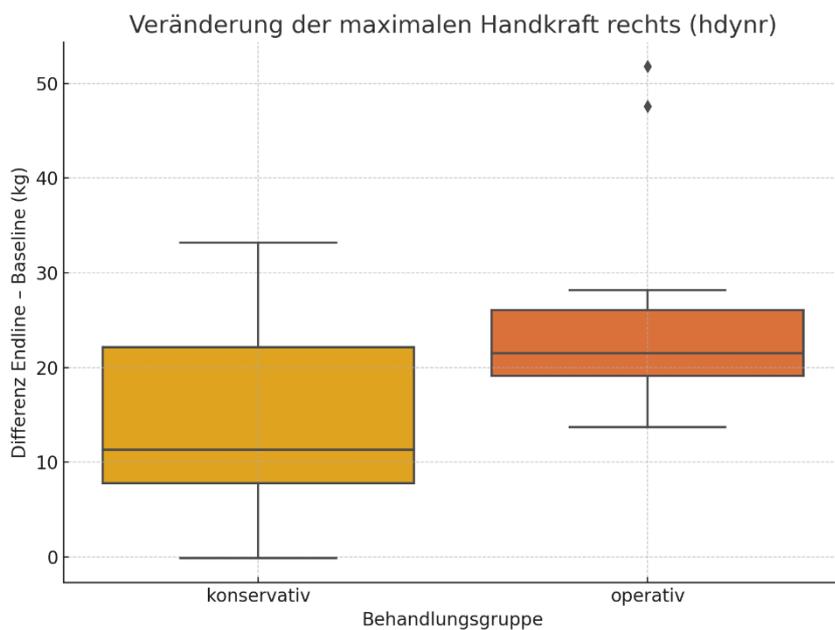


Figure 43 Veränderung der maximalen Handkraft

Die Analyse der DASH-Werte zeigte eine hochsignifikante Reduktion der funktionellen Einschränkungen zwischen der ersten und der letzten Messung ($p < 0.001$). Der Medianwert sank von 50,4 auf 12,9, was eine deutliche Verbesserung der alltagsrelevanten Handfunktion belegt (siehe Figure 44).

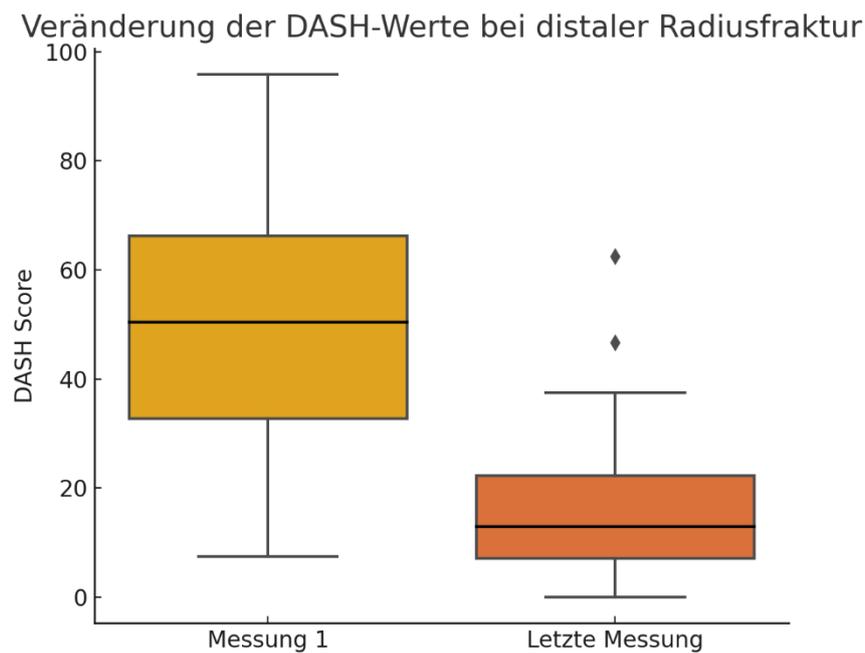


Figure 44 Boxplot der DASH-Werte bei PatientInnen mit distaler Radiusfraktur im Verlauf. Der Median sank signifikant von Messung 1 zur letzten Messung (Wilcoxon-Test, $p < 0.001$).

Die statistische Auswertung der 2-Punkt-Diskrimination bei PatientInnen mit distaler Radiusfraktur zeigte signifikante Verbesserungen in allen analysierten Fingerpositionen (radial und ulnar, D1–D5). Besonders deutlich war der Rückgang der Schwellenwerte bei den ulnaren Messpunkten, was auf eine verbesserte sensorische Wiederherstellung im Rehabilitationsverlauf hinweist ($p < 0.05$, siehe Figure 45).

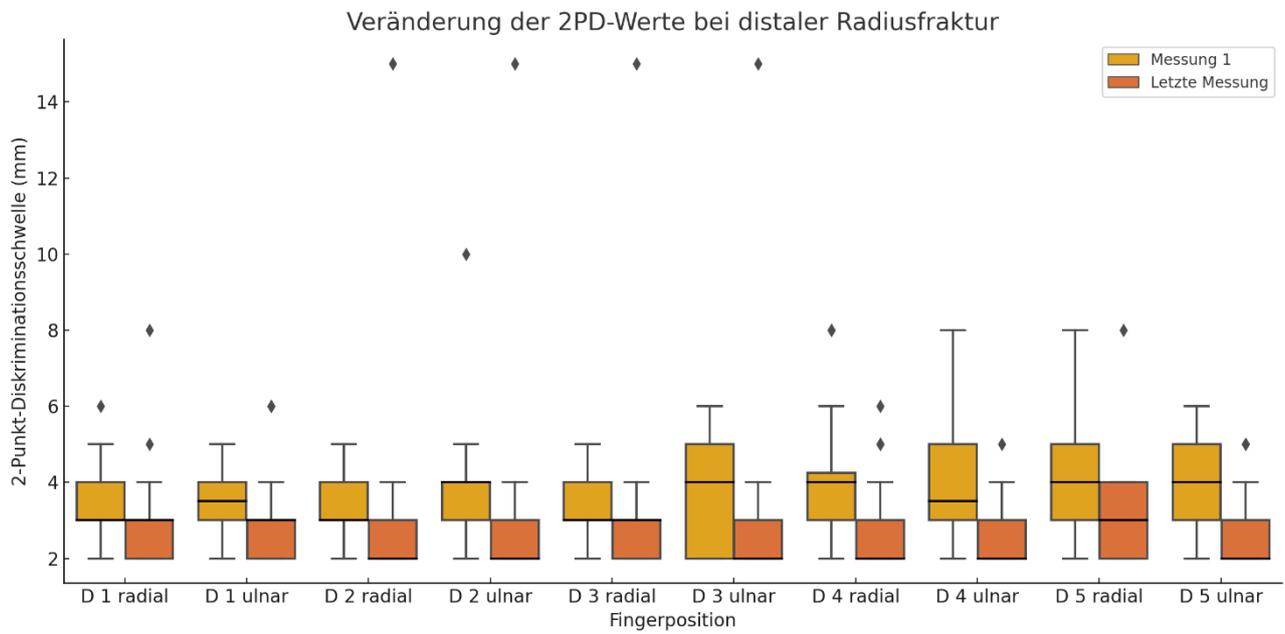


Figure 45 Boxplots der 2PD-Werte bei PatientInnen mit distaler Radiusfraktur. Dargestellt sind Messung 1 und die jeweils letzte verfügbare Messung für alle signifikant verbesserten Fingerpositionen.

Publikationen

Veröffentlicht:

Journal Paper:

Bressler M, Merk J, Gohlke T, Kayali F, Daigeler A, Kolbenschlag J, Prahm C. A Virtual Reality Serious Game for the Rehabilitation of Hand and Finger Function: Iterative Development and Suitability Study. JMIR Serious Games. 2024 Aug 27;12:e54193. doi: 10.2196/54193. PMID: 39190432; PMCID: PMC11387912.

Systematic Review:

Pereira MF, Prahm C, Kolbenschlag J, Oliveira E, Rodrigues NF. Application of AR and VR in hand rehabilitation: A systematic review. J Biomed Inform. 2020 Nov;111:103584. doi: 10.1016/j.jbi.2020.103584. Epub 2020 Oct 2. PMID: 33011296.

Conference Papers:

Pereira, M. F., Prahm, C., Kolbenschlag, J., Oliveira, E., & Rodrigues, N. F. A Virtual Reality Serious Game for Hand Rehabilitation Therapy. In Proceedings of the 8th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH 2020), 2020. IEEE. doi: 10.1109/SeGAH49190.2020.9201789

Pereira, M. F., Oliveira, E., Rodrigues, N. F., Bressler, M., Kolbenschlag, J., & Prahm, C. Hand rehabilitation with virtual reality: Preliminary learning results. In Proceedings of the 9th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH 2021), 2021, Dubai, United Arab Emirates. IEEE. <https://doi.org/10.1109/SEGAH52098.2021.9551862>

Derzeit in Review:

Buhl M, Höglinger D, Glenk D, Hönning A, Daigeler A, Kolbenschlag A, Prahm, C. Altered Grasping Kinematics and Visual Anticipation in Carpal Tunnel Syndrome: A Longitudinal 3D Motion and Eye-Tracking Study Pre and Post Surgery, Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2025

Derzeit in Vorbereitung:

Prahm C, Bressler M, Gohlke T, Hönning A, Harhaus-Wähner L, Daigeler A, Kolbenschlag J, StableHandVR - An optical tracking immersive VR System for Hand and Finger Rehabilitation: Results from a Randomized Controlled Trial in 150 Patients with Traumatic Hand Injuries, NPJ Digital Medicine, 2025

Glenk D, Höglinger D, Buhl M, Hönning A, Daigeler A, Kolbenschlag A, Prahm, C. Altered Grasping Kinematics and Visual Anticipation in Traumatic Hand Injuries: A Longitudinal 3D Motion and Eye-Tracking Study Pre and Post Surgery (Arbeitstitel), Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2026

Au Yeung A, Höglinger D, Hönning A, Daigeler A, Kolbenschlag A, Prahm, C. Altered Grasping Kinematics and Visual Anticipation in Distal Radius Fractures: A Longitudinal 3D Motion and Eye-Tracking Study Pre and Post Surgery (Arbeitstitel), Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2026

Prahm C, Bressler M, Gohlke T, Hönning A, Daigeler A, Kolbenschlag J, Harhaus-Wähner L. BGliche Handverletzungen in der Komplex Stationären Rehabilitation. HaMiPla, 2026.

Presse:

Andreas Abel, Berliner Morgenpost, "Bei der Reha in virtuelle Welten abtauchen – Am Unfallkrankenhaus Berlin werden digitale Spiele-Apps in der Therapie schwerer Hand- und Armverletzungen eingesetzt", 5.7.2025

Konferenzbeiträge

FESSH (Federation of European Societies for Surgery of the Hand), Helsinki, Finnland, 25. - 28.6.2025.

Vortrag: An Immersive Virtual Reality Serious Game for Hand and Finger Rehabilitation: Initial Findings from a Randomized Controlled Trial. Vortragende: Cosima Prahm

BG Wissenschaftstage, Berlin, Deutschland, 22.-25.3.2025. Poster: „StableHand VR: Urlaub auf dem virtuellen Bauernhof zur Beübung der Hand und Fingerfunktion“. Vortragende: Tanja Gohlke

IFSSH-IFSHT Triennial Congress, Washington D.C., USA, 24.-28.3.2025. Vortrag: "A Virtual Reality Application for the Rehabilitation of Hand and Finger Function: StableHandVR". Vortragende: Cosima Prahm

DAATH/DGH (Deutsche Gesellschaft für Handchirurgie/Deutsche Arbeitsgemeinschaft für Handtherapie), Hannover, Deutschland, 10.-12.10.2024. Vortrag: „StableHandVR - Virtuelles Rehabilitationstraining nach berufsbedingten Handverletzungen“; Workshop: „Digitalisierung in der Handrehabilitation: Virtual Reality Applikation zur therapeutischen Beübung der Hand und Finger“. Vortragender: Cosima Prahm, Tanja Gohlke

VSOU (Vereinigung Süddeutsche Orthopädie und Unfallchirurgie), Baden Baden, Deutschland, 24.7.2024. Vortrag: „Digitalisierung in der Handrehabilitation“. Vortragende: Cosima Prahm

Rehasymposium Berlin, Deutschland, 28.-29.09.2023. Vortrag: „StableHandVR: Virtuelles Training nach berufsbedingten Handverletzungen“. Vortragender: Michael Bressler

Schulkonferenz der PT Akademie Tübingen, 18.01.2023. Vortrag: „Computergestützte Rehabilitation für PatientInnen nach Arbeitsunfällen – Aktuelle Forschungsprojekte an der BG Klinik Tübingen“. Vortragender: Joachim Merk

AG Forschung, Duisburg, 29.-30.06.2023. Vortrag: „Forschungsprojekte mit Therapiebezug – C.A.L.A. und StableHandVR“. Vortragender: Joachim Merk, Cosima Prahm

6. UVT Beiratssitzung BG Klinik Tübingen, 15.11.2023. Vortrag: „Digitale Rehabilitationsprojekte an der BG Klinik Tübingen“. Vortragender: Joachim Merk

Wintersymposium der Klinik für HPRV an der BG Klinik Tübingen, 01.12.2023. Vortrag: „Digitale Strategien zur Dokumentation und Rehabilitation von Nervenschmerz“. Vortragende: Cosima Prahm

Wintersymposium der Klinik für HPRV an der BG Klinik Tübingen, 02.12.2023. Workshop: „Digitale Methoden in der Schmerztherapie“. Vortragende: Cosima Prahm, Tanja Gohlke

39. Unfallmedizinische Tagung Baden-Baden des Landesverbandes Südwest der DGUV e.V., 24./25.11.2023. Vortrag: „Computergestützte Rehabilitation – Serious Games und digitale Studienprojekte“. Vortragender: Joachim Merk

IFSSH, IFSHT & FESSH, London, United Kingdom, 6.-10.6.2022. Poster: “StableHandVR - Finally a self-training that motivates – Hand exercises in virtual environment”: Vortragender: Michael Bressler

BG Wissenschaftstage Berlin, 22.-24.11.2022. Vortrag: „Virtual Rehabilitation“. Vortragende: Cosima Prahm

DGH/DAHTH, Garmisch-Partenkirchen, Deutschland, 6.-8.10.2022. Vortrag: „Entwicklung einer Virtual-Reality-Applikation zur therapeutischen Beübung der Hand und Finger“: Vortragender: Michael Bressler

DAM (Deutsche Arbeitsgemeinschaft für Mikrochirurgie), Graz, Österreich, 11.-13.11.2021. Vortrag: „Virtuelle Rehabilitation nach schweren Handverletzungen“. Vortragender: Cosima Prahm

DGH/DAHTH (Deutsche Gesellschaft für Handchirurgie/Deutsche Arbeitsgemeinschaft für Handtherapie), Münster, Deutschland, 2.-3.9.2021: Vortrag: „Gamification in der Rehabilitation: Entwicklung einer Virtual Reality Applikation zur therapeutischen Beübung der Hand und Finger“. Vortragender: Michael Bressler

Infomaterial

Flyer StableHandVR (siehe Anhang)

Videos, Bilder, Flyer, Informationen finden sich auf der Homepage: www.playbionic.org/Stablehand-VR

5. Auflistung der für das Vorhaben relevanten Veröffentlichungen, Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechte von nicht am Vorhaben beteiligten Forschungsstellen

Zhu P, Niu M, Liang S, et al. Non-hand-worn, load-free VR hand rehabilitation system assisted by deep learning based on ionic hydrogel. Nano Research, 2025, 18(4): 94907301. <https://doi.org/10.26599/NR.2025.94907301>

Wir machen zwar keinen Schlaganfall:

Xu S, Xu Y, Wen R, Wang J, Qiu Y, Chan CC. Virtual Reality Enhanced Exercise Training in Upper Limb Function of Patients With Stroke: Meta-Analytic Study. J Med Internet Res 2025;27:e66802, doi: 10.2196/66802, PMID: 39969977

Olana, D., Abessa, T., Lamba, D. et al. Effect of virtual reality-based upper limb training on activity of daily living and quality of life among stroke survivors: a systematic review and meta-analysis. J NeuroEngineering Rehabil 22, 92 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12984-025-01603-1>

Abbate, G., Giusti, A., Randazzo, L. et al. A mirror therapy system using virtual reality and an actuated exoskeleton for the recovery of hand motor impairments: a study of acceptability, usability, and embodiment. Sci Rep 13, 22881 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49571-7>

Soleimani, M., Ghazisaeedi, M. & Heydari, S. The efficacy of virtual reality for upper limb rehabilitation in stroke patients: a systematic review and meta-analysis. BMC Med Inform Decis Mak 24, 135 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12911-024-02534-y>

Borzelli, D., Boarini, V. & Casile, A. A quantitative assessment of the hand kinematic features estimated by the oculus Quest 2. Sci Rep 15, 8842 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91552-5>

Ein kommerziell verfügbares System mit ähnlicher Zielsetzung ist CUREO® von Cureosity GmbH (<https://www.cureosity.com/de>). Das System nutzt ebenfalls eine VR-Umgebung zur Bewegungsförderung von Arm und Hand, ist jedoch primär für neurologische Indikationen wie Schlaganfall oder Parkinson konzipiert, während bei StableHandVR die adaptive Handbeübung von traumatisch verletzten PatientInnen im Vordergrund steht. Außerdem kann Cureo keine Fingerübungen abbilden, da die PatientInnen einen Controller in der Hand halten müssen, es findet also kein Handtracking statt. CUREO® demonstriert allerdings eine wachsende Akzeptanz spielbasierter Rehabilitationsverfahren im klinischen Alltag, ist allerdings nicht gelistet als zugelassene DiGa im offiziellen Verzeichnis des BfArM.

Es sind keine relevanten Schutzrechte bekannt.

6. Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich des Forschungszwecks/-ziels, Schlussfolgerungen

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die definiterten Projektziele nicht nur erreicht, sondern in mehreren Aspekten übertroffen wurden. StableHandVR stellt einen innovativen, praxisnahen und klinisch wirksamen Beitrag zur digitalen Transformation der Handrehabilitation dar.

Virtual Reality und Handverletzungen

In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl von digitalen Anwendungen für die Handrehabilitation entwickelt. Es scheint gängige Praxis zu sein, jede computergestützte Anwendung als System der virtuellen Realität (VR) zu bezeichnen. Streng genommen bezieht sich der Begriff VR jedoch auf ein Setting, bei dem der Betrachter von einer computergenerierten 3D-Umgebung umgeben ist und sich in dieser virtuellen Welt in Echtzeit bewegen, sie aus verschiedenen Blickwinkeln betrachten und mit ihr interagieren kann [1]. Die meisten dieser als VR-Anwendungen bezeichneten Systeme wurden jedoch im Sitzen vor einem Monitor bedient und bieten nicht den hohen Grad an Immersion, wie es bei der Verwendung von echter VR erreicht werden kann. Studien mit solchen Virtual Reality-Settings haben gezeigt, dass sich VR-basierte Rehabilitations-Systeme positiv auf den Genesungsprozess auswirken, indem sie die Motivation steigern und Schmerzen reduzieren [2][3][4].

Zur Thematik Virtual Reality Anwendungen speziell für die Rehabilitation schwerer Handverletzungen gibt es nach wie vor nur wenige Studien [1][2][3]. Bei allen diesen Studien wurde vor allem Wert auf die praktische Umsetzbarkeit des Virtual Reality Systems gelegt und weniger darauf, ein längerfristig motivierendes und immersives Übungsszenario zu entwickeln. So war einerseits die Anzahl der PatientInnen gering, zweitens wurden nur wenige VR Sitzungen pro Patient durchlaufen und drittens gab es keine Überlegungen zur Langzeitmotivation. Eine weitere Unzulänglichkeit dieser und weiterer Studien besteht in der Gestaltung der Übungsszenarien, welche für PatientInnen mit stark eingeschränkter Handfunktion nicht immer durchführbar wären und damit für diese das Spielen unmöglich machen würden [4][5].

Hand und Finger Tracking in VR

Für die Aufgabe, die Bewegungen der Hände und Finger des Spielers zu verfolgen, findet sich in der Literatur eine große Vielfalt an Eingabesystemen. Sie reichen von haptischen Geräten wie Joysticks [5], Robotern die eine gezielte Bewegung der Finger ermöglichen [6], Datenhandschuhen [2][7][8] oder tragbaren Inertial-Trackern [9] bis hin zu optischen Tracking-Geräten mit außen angebrachten Kameras wie der Nintendo Wii [10] oder dem Ultraleap Motion Controller [11][12][13][14], der sogar auf ein Virtual-Reality-Gerät montiert werden kann [15].

Für unsere Arbeit haben wir festgestellt, dass die Meta Quest 3 derzeit am besten für unsere Bedürfnisse geeignet und anpassbar ist. Sie verfügt über ein eingebautes optisches Tracking und bietet nach unseren Recherchen und Geräte-Erprobungen derzeit die höchste Genauigkeit unter den Systemen dieser Art. Außerdem erfordert dieses Head Mounted Display keine zusätzliche Ausrüstung oder Kalibrierung und ermöglicht daher eine schnelle Einrichtung der Trainingsumgebung. Perspektivisch könnte ein solches System sogar von PatientInnen unbeaufsichtigt im häuslichen Umfeld für das tägliche Training verwendet werden.

Motivation und Gamification

Das bloße Einfügen von Spielmechaniken wie z.B. Punkten, Abzeichen, Aufgaben, Belohnungen, usw. führt nicht automatisch zu einem fesselnden Spielerlebnis, ohne den Zusammenhang dieser Mechaniken mit Strategien zur Verhaltensänderung zu berücksichtigen [16]. Geläufige Strategien sind z.B. die Selbstbestimmungstheorie, welche das Gefühl von jeweils Autonomie, Kompetenz und sozialer Verbundenheit als die drei wesentlichen Grundbedürfnisse definiert, die für das Entstehen von Engagement und Motivation vorhanden sein müssen. Oder die Flow-Theorie, welche als Voraussetzung für die vollständige Vertiefung in eine Tätigkeit das Vorgeben klarer Ziele, direktes Feedback und ein angemessenes Maß an Herausforderung definiert [17].

Darüber hinaus haben verschiedene Spielerpersönlichkeiten unterschiedliche Vorlieben und Methoden, um im Spiel auf ihre Kosten zu kommen. Während der Philanthrop durch den Zweck selbst motiviert ist, erkundet der Freigeist gerne die Umgebung; der Ehrgeizige strebt nach Fortschritt und Abzeichen, und der Wettkämpfer ist motiviert, Punkte zu sammeln und die Rangliste anzuführen. Bei der Gestaltung von Spielmechaniken sollte daher immer auch darauf geachtet werden, dass diese unterschiedlichen Spielstile unterstützt werden [18].

Bewertung im Hinblick auf das Forschungsziel

Ein Abgleich der im Projekt erzielten Ergebnisse mit den ursprünglich definierten Zielen der Vorhabensbeschreibung zeigt, dass das Projekt in wesentlichen Punkten erfolgreich und teils sogar über die Erwartungen hinaus umgesetzt wurde. Im Zentrum des Vorhabens stand die Entwicklung und klinische Evaluation eines virtuellen Rehabilitationssystems (StableHandVR), das durch den Einsatz von Gamification-Strategien, personalisierten Bewegungsaufgaben und adaptiven Feedbackmechanismen die Motivation und aktive Teilnahme von PatientInnen mit Handverletzungen nachhaltig steigern sollte.

Dieses Ziel wurde in vollem Umfang erreicht: StableHandVR wurde in mehreren Entwicklungsstufen (vom Prototyp bis zur finalen Version) umgesetzt und konnte erfolgreich in den klinischen Alltag einer komplexstationären Rehabilitation integriert werden. Die Nutzerfreundlichkeit des Systems wurde durch den sehr hohen System Usability Scale (SUS)-Wert von 86,9 bestätigt. Darüber hinaus zeigte sich eine signifikante Steigerung der intrinsischen Motivation, gemessen an den Subskalen "Effort" und "Usefulness" des Intrinsic Motivation Inventory (IMI), sowie eine signifikant höhere Übungsfrequenz im Vergleich zu konventioneller Therapie. Damit belegt die Datenlage, dass StableHandVR nicht nur als technisches System funktioniert, sondern auch eine messbare therapeutische Wirkung entfaltet.

Das adaptive System, welches für die Erkennung der therapeutischen Übungsbewegungen eigens entwickelt wurde, stellte nicht nur sicher, dass auch Patienten mit stark eingeschränkter Handfunktion in der Lage waren, das Spiel mit ihren Bewegungen zu steuern. Es erwies sich darüber hinaus auch als äußerst effektives und beliebtes Element zur Steigerung des Engagements. Eine Farbänderung der virtuellen Hände, die einem Ampelsystem folgend von Rot über Gelb zu Grün wechselten, zeigte die Güte der durchgeführten Bewegung an und gab den Patienten nicht nur Sicherheit in der Ausführung der Bewegungen, sondern spornten auch dazu an, an die Grenzen des bisher erreichten Bewegungsumfanges zu gehen.

Durch die Entwicklung mehrerer motivierender Elemente sollten unterschiedliche Spielertypen und Spielstile angesprochen werden. Generell erwiesen sich die entwickelten motivierenden Elemente als sehr erfolgreich und wurden in den Evaluierungen sehr positiv bewertet. Auch die Auswertung nach demographischen Kriterien bestätigte, dass StableHandVR in der Lage war, einen Großteil der Spieler unabhängig von Alter, Geschlecht oder auch technischer Affinität zu motivieren.

Die in der Vorhabensbeschreibung geforderte Integration validierter Messinstrumente wurde ebenfalls vollständig umgesetzt. Neben subjektiven Skalen wie DASH, SF-36 und BCTQ kamen objektive klinische Parameter wie die Zwei-Punkt-Diskrimination (2PD), der funktionellen Bewegungsumfang (ROM), der Kapandji-Index, Kraftmessungen und AU-Tage zum Einsatz. Die Ergebnisse zeigten konsistente Verbesserungen bei sensiblen Parametern und eine signifikante Reduktion der Beschwerden, insbesondere im Bereich nächtlicher Schmerzen und funktioneller Einschränkungen. Auch die standardisierten Scores bestätigten eine hochsignifikante Besserung über die drei Messzeitpunkte hinweg.

Ein weiteres Ziel des Projekts war die Überprüfung der Praxistauglichkeit von StableHandVR und seiner potenziellen Überführung in die Regelversorgung. Auch dieses Ziel wurde erfolgreich adressiert: Das System wurde von den PatientInnen gut angenommen, in den Therapiealltag integriert und durch ein digitales Monitoringsystem ergänzt, was eine automatische Erfassung der Trainingsverläufe erlaubt. Die hohe Benutzerfreundlichkeit und die leichte Handhabung sowohl der VR-Brille wie auch des Spieles selbst bestätigen die Eignung für einen möglichen Einsatz zu Hause beim Patienten, der anschließend an die Therapie die Fortführung der Übungen sicherstellen könnte. Darüber hinaus würde ein derartiges Szenario das Sammeln von Erfahrungen für eine zukünftige Anwendung als digitales Tool zur Tele-Rehabilitation ermöglichen.

StableHandVR aus therapeutischer Sicht

StableHandVR ist ein therapeutisches Spiel, das das eigenständige Üben der Patienten fördert, unterstützt und dabei auch noch Spaß macht. Abgelenkt durch die spielerischen Elemente und die virtuelle Umgebung führen die Patienten freiwillig und eigenständig die für die Handfunktion so wichtigen Bewegungen durch. Sie sind oft selbst positiv überrascht, dass sie im Spiel bis zu 300 Handbewegungen in einer Trainingseinheit schaffen. Der oft so stark auf Schmerz und Funktionseinschränkung gestellte Fokus wird mehr auf Spielspaß und das erfolgreiche Erledigen der Aufgaben gelenkt. Mithilfe der Anleitung durch das Spiel ist es Therapeuten möglich mehrere Patienten gleichzeitig betreuen zu betreuen.

7. Aktueller Umsetzungs- und Verwertungsplan

Die im Rahmen des Projekts StableHandVR entwickelten technischen, konzeptionellen und klinischen Bausteine haben sich im Versorgungsalltag als praktikabel, motivierend und klinisch anschlussfähig erwiesen. Auf Grundlage der positiven Evaluationsergebnisse wurde bereits mit der Umsetzung erster konkreter Verwertungs- und Transferstrategien begonnen.

1. Weiterer Einsatz im klinischen Setting

Das StableHandVR-System ist über die Projektlaufzeit hinaus in der physiotherapeutischen Routineversorgung als freiwillige Weiterbeübung in der Freizeit der PatientInnen an der BG Klinik Tübingen im Einsatz. Es wird dort zur Motivation von PatientInnen während der komplexstationären Rehabilitation (KSR). Der niedrighschwellige, kabellose Aufbau erlaubt zudem den Einsatz auch bei PatientInnen mit mobilen Bewegungseinschränkungen, noch nicht geschlossenen Wunden oder nach Osteosynthesen.

2. Medizinprodukt und Übertragung auf weitere BG Kliniken

Es besteht ein konkretes Interesse weiterer BG Kliniken, das System nach Abschluss des Projekts in bestehende Therapiefade zu integrieren. Die einfache Implementierung auf handelsüblichen VR-Systemen (Meta Quest 3 - Preis ca. 500€) und die intuitive Bedienbarkeit ermöglichen eine kosteneffiziente Skalierung ohne hohen Schulungsaufwand. Erste Gespräche mit klinischen EntscheidungsträgerInnen wurden im Rahmen der BG Wissenschaftstage 2025 und des Rehasymposiums Berlin 2023 geführt. Wir sind weiterhin in Gesprächen mit der BG Holding bzgl. der Umsetzung als mögliches Medizinprodukt, eventuell auch als Eigenherstellung. Die dafür notwendigen technischen, legalen und dokumentarischen Voraussetzungen (z. B. DSGVO-konforme Datenspeicherung, interoperable Schnittstellen) wurden während der Entwicklung und Projektlaufzeit bereits berücksichtigt, die finanziellen Mittel das umzusetzen sind allerdings noch nicht vorhanden.

Referenzen

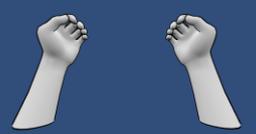
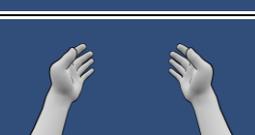
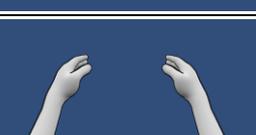
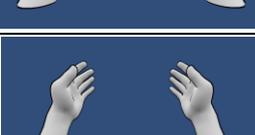
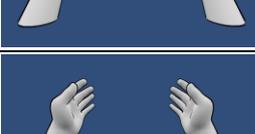
- [1] Gaetano Tieri, Giovanni Morone, Stefano Paolucci, and Marco Iosa. 2018. Virtual reality in cognitive and motor rehabilitation: facts, fiction and fallacies. *Expert Review of Medical Devices* 15, 2 (2018), 107–117. <https://doi.org/10.1080/17434440.2018.1425613>
- [2] Mónica Da Silva Cameiro, Sergi Bermúdez I Badia, Esther Duarte, and Paul F.M.J. Verschure. 2011. Virtual reality based rehabilitation speeds up functional recovery of the upper extremities after stroke: A randomized controlled pilot study in the acute phase of stroke using the Rehabilitation Gaming System. *Restorative Neurology and Neuroscience* 29, 5 (2011), 287–298. <https://doi.org/10.3233/RNN-2011-0599>
- [3] Margarida F Pereira, Cosima Prahm, Jonas Kolbenshlag, Eva Oliveira, and Nuno F Rodrigues. 2020. Application of AR and VR in hand rehabilitation: A systematic review. *Journal of Biomedical Informatics* 111, July (2020), 103584. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2020.103584>
- [4] Joon Ho Shin, Mi Young Kim, Ji Yeong Lee, Yu Jin Jeon, Suyoung Kim, Soobin Lee, Beomjoo Seo, and Younggeun Choi. 2016. Effects of virtual reality-based rehabilitation on distal upper extremity function and health-related quality of life: A single-blinded, randomized controlled trial. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 13, 1 (2016), 1–10. <https://doi.org/10.1186/s12984-016-0125-x>
- [5] Deepak Ganjiwale, Ranjit Pathak, Amitabh Dwivedi, Jaishree Ganjiwale, and Sanket Parekh. 2018. Occupational therapy rehabilitation of industrial setup hand injury cases for functional independence using modified joystick in interactive computer gaming in Anand, Gujarat. *National Journal of Physiology, Pharmacy and Pharmacology* 9, 0 (2018), 1. <https://doi.org/10.5455/njppp.2019.9.06202112018001>
- [6] S. Liu, D. Meng, L. Cheng, and F. Huang, “A Virtual Reality based Training and Assessment System for Hand Rehabilitation,” *9th Int. Conf. Intell. Control Inf. Process. ICICIP 2018*, pp. 33–38, 2018, doi: 10.1109/ICICIP.2018.8606705.
- [7] M. Elboim Gabizon, B. Engel-Yeger, S. Tresser, and S. Springer. 2016. Using a virtual reality game to assess goal-directed hand movements in children: A pilot feasibility study. *Technology and Health Care* 24, 1 (2016), 11–19. <https://doi.org/10.3233/THC-151041>
- [8] Joon Ho Shin, Mi Young Kim, Ji Yeong Lee, Yu Jin Jeon, Suyoung Kim, Soobin Lee, Beomjoo Seo, and Younggeun Choi. 2016. Effects of virtual reality-based rehabilitation on distal upper extremity function and health-related quality of life: A single-blinded, randomized controlled trial. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 13, 1 (2016), 1–10. <https://doi.org/10.1186/s12984-016-0125-x>
- [9] Xuerui Yang, Shih Ching Yeh, Jian Niu, Yan Gong, and Geng Yang. 2017. Hand Rehabilitation Using Virtual Reality Electromyography Signals. *Proceedings - 2017 5th International Conference on Enterprise Systems: Industrial Digitalization by Enterprise Systems, ES 2017* 51521064 (2017), 125–131. <https://doi.org/10.1109/ES.2017.27>
- [10] P. J. Standen, K. Threapleton, A. Richardson, L. Connell, D. J. Brown, S. Battersby, F. Platts, and A. Burton. 2017. A low cost virtual reality system for home based rehabilitation of the arm following stroke: A randomised controlled feasibility trial. *Clinical Rehabilitation* 31, 3 (2017), 340–350. <https://doi.org/10.1177/0269215516640320>
- [11] Octavian Postolache, Filipe Lourenco, J. M. Dias Pereira, and Pedro Silva Girao. 2017. Serious game for physical rehabilitation: Measuring the effectiveness of virtual and real training environments. *I2MTC 2017 - 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Proceedings* (2017). <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2017.7969978>
- [12] H. K. Tang, Z. Q. Feng, T. Xu, and X. H. Yang. 2017. VR system for active hand rehabilitation training. *ICCSS 2017 - 2017 International Conference on Information, Cybernetics, and Computational Social Systems* (2017), 316–320. <https://doi.org/10.1109/ICCSS.2017.8091432>

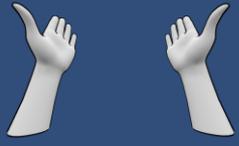
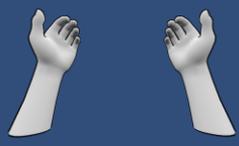
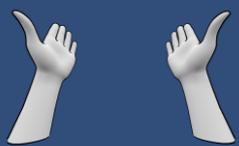
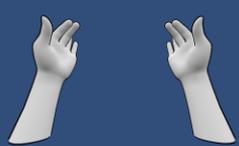
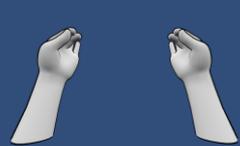
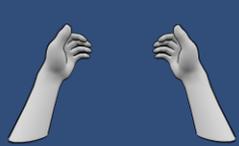
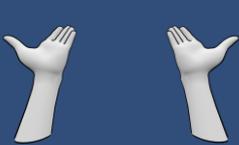
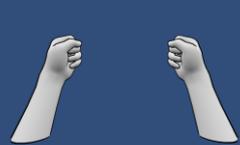
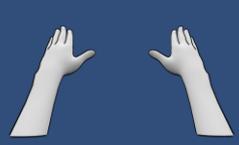
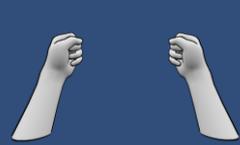
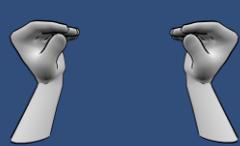
- [13] Z. R. Wang, P. Wang, L. Xing, L. P. Mei, J. Zhao, and T. Zhang, "Leap Motion-based virtual reality training for improving motor functional recovery of upper limbs and neural reorganization in subacute stroke patients," *Neural Regen. Res.*, vol. 12, no. 11, pp. 1823–1831, 2017, [https://doi: 10.4103/1673-5374.219043](https://doi.org/10.4103/1673-5374.219043)
- [14] Yah TingWu, Kuo Hu Chen, Shiun Lei Ban, Kwang Yi Tung, and Li Ru Chen. 2019. Evaluation of leap motion control for hand rehabilitation in burn patients: An experience in the dust explosion disaster in Formosa Fun Coast. *Burns* 45, 1 (2019), 157–164. <https://doi.org/10.1016/j.burns.2018.08.001>
- [15] Hunter G. Hoffman, David A. Boe, Eric Rombokas, Christelle Khadra, Sylvie LeMay, Walter J. Meyer, Sam Patterson, Ann Ballesteros, and Stephen W. Pitt. 2020. Virtual reality hand therapy: A new tool for nonopioid analgesia for acute procedural pain, hand rehabilitation, and VR embodiment therapy for phantom limb pain. *Journal of Hand Therapy* 33, 2 (2020), 254–262. <https://doi.org/10.1016/j.jht.2020.04.001>
- [16] B. Cugelman, "Gamification: What It Is and Why It Matters to Digital Health Behavior Change Developers," *JMIR Serious Games*, vol. 1, no. 1, p. e3, Dec. 2013, doi: 10.2196/games.3139.
- [17] J. Krath, L. Schürmann, and H. F. O. von Korflesch, "Revealing the theoretical basis of gamification: A systematic review and analysis of theory in research on gamification, serious games and game-based learning," *Comput. Human Behav.*, vol. 125, no. January, p. 106963, 2021, doi: 10.1016/j.chb.2021.106963.
- [18] G. F. Tondello, R. R. Wehbe, L. Diamond, M. Busch, A. Marczewski, and L. E. Nacke, "The Gamification User Types Hexad Scale," in *Proceedings of the 2016 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, Oct. 2016, pp. 229–243. doi: 10.1145/2967934.2968082.

11. Anhänge

- Therapeutische Übungen
- Flyer StableHandVR
- Poster StableHandVR BG Wissenschaftstage 2025
- Artikel Berliner Morgenpost vom 5.7.2025

Übersicht der therapeutischen Übungen

#	Position 0	Position 0.5	Position 1	Description
1				Close the hand to a fist
2				Close the long fingers to hooks
3				Rotate the wrist towards the thumb
4				Rotate the wrist away from the thumb
5				Extend the wrist towards the back of the hand
6				Flex the wrist towards the palm
7				Touch the tip of the thumb and the tip of the index finger
8				Stretch the thumb far outwards and then move it towards the little finger
9				Stretch the fingers sideways
10				Move the wrist up and down

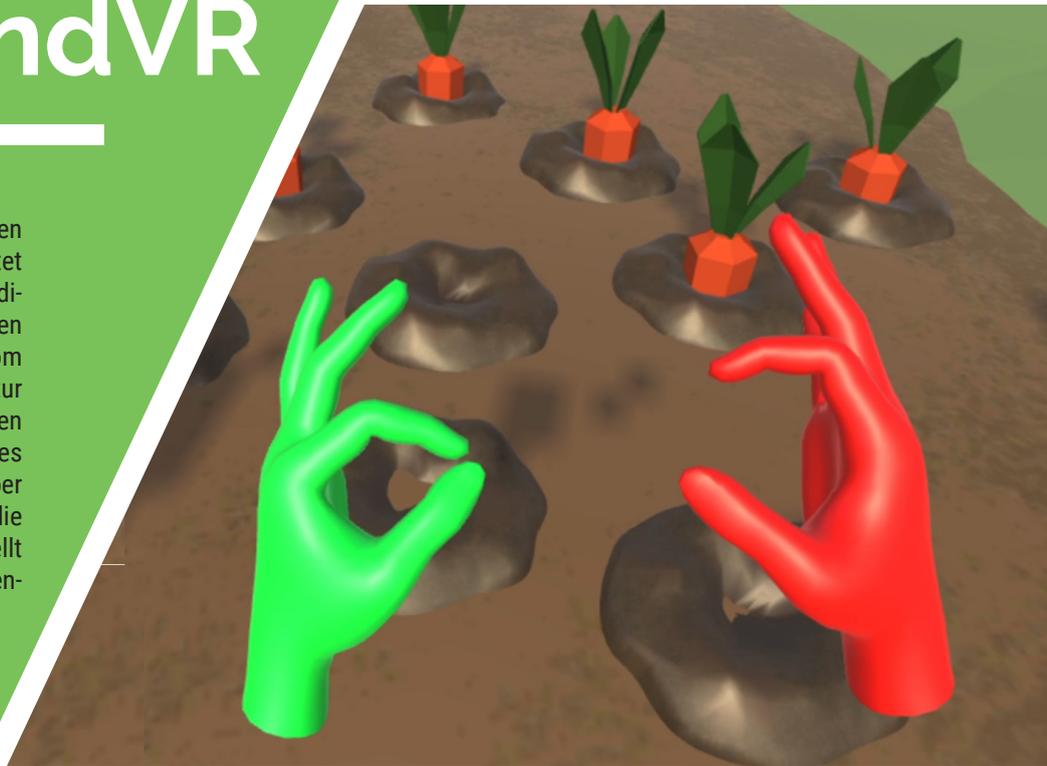
11				Perform a lateral grip (e.g. turning a key in the lock)
12				Touch the tips of thumb, index and middle finger
13				Combination of #1 (fist) and #6 (palmar flexion)
14				Combination of #1 (fist) and #3 (wrist pronation)
15				Combination of #1 (fist) and #4 (wrist supination)
16				Perform a lumbrical grip, the long fingers are not bent
17				Alternate between forming a V and a L

StableHandVR

Die virtuelle Realität (VR) hat längst Einzug in den Gesundheitssektor gehalten. StableHandVR bietet eine hochgradig immersive und einfach zu bedienende VR-Erfahrung, die den Patienten auf einen virtuellen Bauernhof versetzt. Jede Aufgabe - vom Füttern der flauschigen Hühner bis zur Reparatur eines kaputten Traktors - muss mit den Händen erledigt werden. Das optische Handtracking des VR Headsets ermöglicht die Ausübung von über 30 einzelnen und kombinierten Handübungen, die von TherapeutInnen individuell zusammengestellt werden können, um den Bedürfnissen der PatientInnen bestmöglich zu entsprechen.



PLAY BIONIC



METHODIK

.....

Nach einer traumatischen Verletzung ist eine rasche und gezielte Rehabilitation der Handfunktion entscheidend. Die monotone Wiederholung von Übungen führt oft zu Motivationsverlust und beeinträchtigt den Therapieerfolg. StableHandVR, das zusammen mit TherapeutInnen entwickelt wurde, bietet eine Lösung, die speziell auf die Hand- und Fingerrehabilitation abgestimmt wurde. In einer interaktiven Bauernhof-Umgebung verbessern Patienten spielerisch ihre Beweglichkeit. Durch die Kombination von VR-Technologie und Biofeedback, das auf Fingerbewegungen reagiert, profitieren PatientInnen von anpassbaren Übungen und einer motivierenden, praxisnahen Trainingsumgebung.

THERAPIE

.....

-  Leitsystem mit einem Begleithund, das den Patienten sicher und vertrauensvoll durch die Übungen führt.
-  Keine Einsatz von Controllern erforderlich, die Steuerung erfolgt vollständig durch Handerkennung.
-  Ermöglicht telemedizinisches Training in der häuslichen Umgebung mit kontinuierlicher Fortschrittsverfolgung.
-  Über 30 Hand- und Fingerübungen ermöglichen ein flexibles Trainingskonzept, das individuell an die funktionellen Einschränkungen des Patienten angepasst werden kann.



Stationen

.....

16 Übungsstationen mit individuellen Aufgaben, passend zu den Bereichen des Bauernhofs.



Beübung

.....

Die Hand- und Fingerübungen können an das Behandlungsniveau des Patienten angepasst werden.



Feedback

.....

Das farbcodierte Ampelsystem auf den Händen liefert Biofeedback zur Qualität der Bewegungsausführung.



Motivation

.....

Die immersive VR-Umgebung motiviert und unterstützt das Ausblenden von Schmerzen während der Übung.



UKB Unfallkrankenhaus Berlin
Warenerstr. 7
12683 Berlin



BG Klinik Tübingen
Schnarrenbergstr. 95
72076 Tübingen



www.PlayBionic.org
info@playbionic.org



StableHand VR: Urlaub auf dem virtuellen Bauernhof zur Beübung der Hand- und Fingerfunktion

Tanja Gohlke¹, Michael Bressler², Joachim Merk¹, Adrien Daigeler¹, Jonas Kolbenschlager¹, Cosima Prahm²

¹ BG Klinik Tübingen, Klinik für Hand-, Plastische, Rekonstruktive und Verbrennungschirurgie

² BG Klinikum Unfallklinik Berlin, Charité Universitätsmedizin, Klinik für Hand-, Replantations- und Mikrochirurgie

Hintergrund: Die Wiederherstellung der Hand- und Fingerfunktion nach einer traumatischen Handverletzung erfordert ein konsequentes und gewissenhaftes Übungsprogramm. Häufig schwindet die Motivation jedoch aufgrund von sich immer wiederholenden, eintönigen Aufgaben oder Unbehagen und Schmerzen. Dies führt dazu, dass die Übungen nachlässig ausgeführt oder ganz vermieden werden. Durch Gamifizierung können die Aufgaben attraktiver gestaltet werden und letztlich die Motivation der PatientInnen für ein konsequentes Training erhöhen. Ziel dieser Studie war die iterative Entwicklung eines Virtual-Reality-Spiels zur Rehabilitation der Hand- und Fingerfunktion in einer ansprechenden, digitalen Umgebung, welche die Motivation der PatientInnen für den Zeitraum einer zweiwöchigen Therapiedauer fördern sollte.

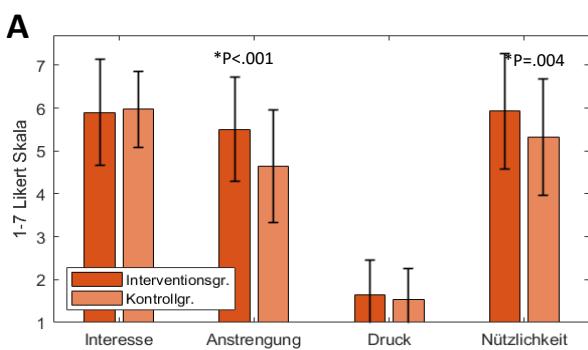


(A) Der Prototyp von StableHandVR enthielt 6 unterschiedliche Übungen aus der klassischen Physiotherapie. Ab Version 1 enthielt StableHandVR 17 verschiedene Übungen, die mit beiden Händen synchron oder gegenläufig durchgeführt werden konnten. (B) Beim Üben zeigte die wechselnde Farbe der Hände das korrekte Durchführen der Übungen an.

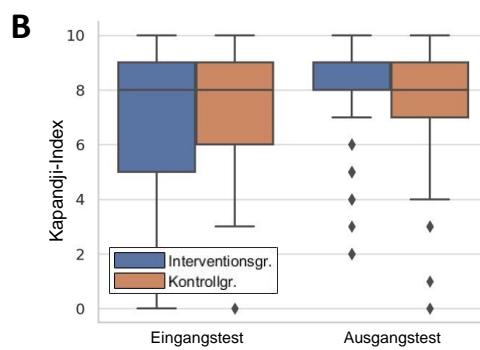
Methodik: Der Entwicklungsprozess umfasste 4 Stufen, die jeweils einer Bewertung durch die TeilnehmerInnen unterzogen wurden. Zunächst wurde ein Prototyp mit der zugrundeliegenden Spielmechanik erstellt und von 18 gesunden TeilnehmerInnen und 7 PatientInnen mit eingeschränkter Handfunktion bewertet. Anschließend wurde Version 1 des Spiels entwickelt und mit 20 PatientInnen evaluiert, die in eine Untersuchungs- und eine Kontrollgruppe unterteilt wurden. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wurde Version 2 entwickelt und nach dem gleichen Schema mit 20 PatientInnen evaluiert. Abschließend wurde Version 3 entwickelt und gleichermaßen mit 110 PatientInnen evaluiert. Die Motivation der TeilnehmerInnen wurde anhand des Intrinsic Motivation Inventory (IMI) bewertet, die Benutzererfahrung der TeilnehmerInnen der Untersuchungsgruppe wurde durch den Mobile Application Rating Scale (MARS) und ab Version 2 auch anhand des System Usability Scale (SUS) ermittelt. Weiteres Feedback zum Spiel wurde mittels halbstrukturierter Interviews und durch Benutzerbeobachtung erhoben. Als Maß für die Handfunktion wurde zu Beginn und am Ende der Studie bei allen TeilnehmerInnen die Beweglichkeit des Daumens mit dem Kapandji-Index evaluiert.



(A) Ein Hund als ständiger Begleiter führte den Spieler durch das Spiel und konnte auch gestreichelt werden. (B) Um sich zwischen den verschiedenen Übungsstationen auf dem Bauernhof zu bewegen, konnte sich der Spieler mit der unverletzten Hand teleportieren. (C) An jeder der 12 Übungsstationen wird beim Durchführen der vorgegebenen Übungen eine bestimmte Aufgabe verrichtet, wie z.B. das Zubereiten einer nahrhaften Suppe an der Feuerstelle.



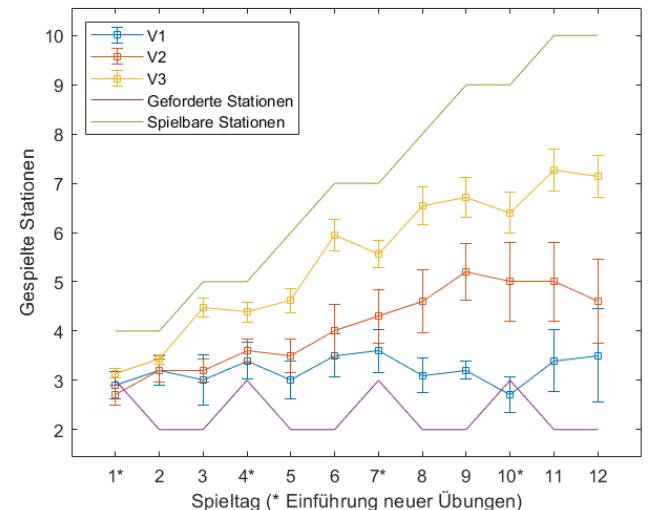
(A) Bei den Interventionsgruppen konnte im Gesamtvergleich zu den Kontrollgruppen anhand des Intrinsic Motivation Inventory (IMI) Fragebogens in zwei Subskalen eine statistisch relevante* Steigerung der Motivation gemessen werden (n=150). (B) Der Kapandji-Index, ein Maß zur Beurteilung der Daumenbeweglichkeit, zeigte eine signifikante (P<.001) Verbesserung der Interventionsgruppen im Vergleich vor und nach der Intervention, während die Verbesserung der Kontrollgruppen keine statistische Relevanz aufzeigte.



Während die Patientin mit der Virtual Reality Brille die Hand- und Fingerübungen in StableHand VR durchführt, kann die Therapeutin das Geschehen auf einem mobilen Endgerät überwachen (z.B. Laptop, Tablet oder Smartphone).

Ergebnisse: Durch den Prototyp konnte die grundsätzliche Akzeptanz und Umsetzbarkeit des Spielkonzepts gezeigt werden. In Version 1 konnte eine signifikante Steigerung der Motivation in den 2 IMI-Subskalen *Anstrengung* (P<.001) und *Nützlichkeit* (P=.02) erzielt werden. In Version 2 wurde im Vergleich zu Version 1 ein signifikanter Anstieg der täglich ausgeführten Übungen erreicht (P=.008) sowie eine signifikant höhere Motivation in der IMI-Subskala *Anstrengung* (P=.02). Insgesamt konnte eine signifikante Verbesserung (P<.001) der Daumenfunktion in der Interventionsgruppe gemessen werden. Für alle drei Versionen wurden hohe Werte beim MARS erzielt und der SUS-Wert erreichte 86,9 (V2) bzw. 85 (V3) Punkte, was beides auf eine exzellente Benutzerfreundlichkeit der Anwendung hinweist. Die iterative Entwicklung und das erhobene Nutzerfeedback aus den semistrukturierten Interviews erwies sich als wertvoll für eine patientenorientierten Verbesserung der Benutzererfahrung und der Erweiterung des spielbaren Inhalts.

Die Anzahl der gespielten Übungsstationen pro Tag konnte in den Versionen 2 & 3 im Vergleich zur jeweils vorherigen statistisch relevant gesteigert werden (V1->V2: P=.008; V2->V3: P=.026).



Fazit: Das entwickelte Virtual-Reality-Spiel StableHand VR bietet eine unterhaltsame und motivierende Möglichkeit, Hand- und Fingerübungen nach einer Verletzung durchzuführen. Durch das Spielen in einer virtuellen Umgebung wird das Training abwechslungsreicher und fördert die regelmäßige Durchführung, was für eine erfolgreiche Rehabilitation entscheidend ist. Die Ergebnisse zeigen, dass das Spiel gut angenommen wird und den Nutzern hilft, motiviert zu bleiben. Für PatientInnen bedeutet dies: Eine spielerische Rehabilitation kann nicht nur effektiv, sondern auch unterhaltsam sein.

Bei der Reha in virtuelle Welten abtauchen

Am Unfallkrankenhaus Berlin werden digitale Spiele-Apps in der Therapie schwerer Hand- und Armverletzungen eingesetzt

Andreas Abel

Medizinische Forschung findet in Berlin nicht nur an der Charité oder am Max-Delbrück-Centrum statt. Auch am Unfallkrankenhaus Berlin (ukb) in Marzahn wird intensiv geforscht, zum Beispiel an der Klinik für Hand-, Replantations- und Mikrochirurgie. Wichtige Fragestellungen betreffen etwa den Einsatz digitaler Technologien in der Therapie. Spiele-Apps helfen dabei, dass Patienten nach einer schweren Verletzung des Arms oder der Hand die Funktionsfähigkeit ihrer Gliedmaßen schneller zurückerlangen oder dass sie nach einer Amputation besser lernen, ihre Prothese zu steuern.

Wir haben darüber mit Prof. Dr. Leila Harhaus-Wähner und Dr. Cosima Prahm gesprochen. Leila Harhaus-Wähner ist seit Oktober 2024 Direktorin der Klinik für Hand-, Replantations- und Mikrochirurgie am Unfallkrankenhaus Berlin. Zudem hat sie an der Charité Universitätsmedizin die Professur für dieses Themenfeld. Cosima Prahm leitet das Zentrum für Klinische Forschung am ukb und arbeitet ebenfalls an der Klinik für Handchirurgie der Charité.

2017 gründete Prahm an der Medizinischen Universität Wien die Arbeitsgruppe „PlayBionic“. Seit 2024 setzt sie ihre Arbeit in Berlin fort. „PlayBionic“ entwickelt insbesondere Software zur Nutzung von Virtual Reality (VR) bei der Wiedererlangung motorischer oder sensorischer Fähigkeiten.

Stellen wir uns einen Mann vor, der durch einen Unfall einen Arm verloren hat. Er soll eine myoelektrische Prothese erhalten und schon vorher in der Physiotherapie lernen, wie er sie steuert. Bei diesem Prothesentyp werden über Elektroden, also Sensoren, die die Muskelaktivität am Armstumpf erfassen, elektrische Motoren aktiviert. Diese können komplexe Greif- und Drehbewegungen der Hand sowie Funktionen des Ellenbogens steuern. Solch ein High-Tech-Produkt kostet etwa 60.000 Euro.

Frage der Motivation ist zentral für den Erfolg

Beim Training spannt der Patient die Muskeln in seinem Stumpf an und verfolgt normalerweise diese Aktivität auf einem Monitor in Form feiner Linien. Das aber ist eintönig und fühlt sich entsprechend anstrengend an. Es birgt die Gefahr, dass der Patient nicht ausreichend übt. Um dieser Eintönigkeit entgegenzuwirken, hat „PlayBionic“ das Prothesentraining in zwei Spiele verpackt: MyoBeatz und MyoOsu, beides rhythmusbasierte Musik-Videospiele, bei denen die Spieler über ihre Muskelkontraktionen am Armstumpf das Spiel wie eine echte Prothese steuern. Sie müssen kleine Kreise erwischen und verschieben, die jeweils zur Musik erscheinen – von AC/DC bis Tango. Und siehe da, plötzlich macht das Training Spaß. Das Spiel schafft Herausforderungen und hält die Motivation der Patienten aufrecht. Zudem können sie es per Smartphone-App überall spielen. Patienten und Therapeuten waren an der Entwicklung beteiligt.

Die Frage der Motivation ist zentral für den Erfolg der Reha. Der Einsatz von Videospielen steigert signifikant das Engagement der Patienten, das belegen verschiedene Studienergebnisse. Vor allem virtuelle Umgebungen verstärken die positiven Effekte des Spielerischen. Kameras nehmen die Handbewegungen der Patienten auf und übertragen sie in virtuelle Welten.



Oliver Bürger ist Reha-Patient am Unfallkrankenhaus Berlin. Cosima Prahm leitet das Zentrum für Klinische Forschung am ukb. Dort werden in der Rehabilitation nach schweren Handverletzungen auch Virtual-Reality-Anwendungen eingesetzt. Hier muss Oliver Bürger auf einem virtuellen Bauernhof Äpfel pflücken.

JÖRG CARSTENSEN/FUNKE FOTO SERVICES (2)

Ein Beispiel dafür ist die Anwendung „StableHandVR“, die von Cosima Prahm in den Jahren 2020 bis 2023 bei „PlayBionic“ entwickelt wurde. Sie versetzt Patienten, die eine traumatische Verletzung der Hand erlitten haben, auf einen virtuellen Bauernhof. Die Hand wurde nicht amputiert, ist aber funktionell stark eingeschränkt, etwa durch Fingeramputation, Quetschung, schweren Bruch oder eine Sehnenverletzung.

Auf diesem Bauernhof sollen in 30 Übungen spielerisch typische Aufgaben erledigt werden, wie Hühner füttern, Gemüse anbauen, Äpfel pflücken, Traktor reparieren oder Schafe streicheln. Dazu sind unterschiedliche Greif- oder Drehbewegungen mit den Händen erforderlich.

„Für die handtraumatischen Patienten haben wir extra eine Virtual-Reality-Anwendung gewählt, weil die Patienten sich viel mehr zutrauen, wenn sie ihre eigene Hand nicht sehen“, erläutert Cosima Prahm. „Sie sehen nicht die Verletzung oder Fehlstellung der Hand, sondern sie sehen in der VR gesunde Arme und Hände. Und dann führen sie die Übungen eher bis zum Limit ihrer Bewegungsfähigkeit aus“, so Prahm. Am Unfallkrankenhaus Berlin wird der Einsatz von „StableHandVR“ fortlaufend dokumentiert und weiterentwickelt.

Oliver Bürger ist Reha-Patient am ukb, die Berliner Morgenpost durfte bei einer Therapieeinheit zuschauen. Der 51 Jahre alte Fensterbauer aus Hennickendorf (Rüdersdorf) war zuvor operiert worden. Er hatte einen Arbeitsunfall, bei dem der Daumen und Gelenke seiner rechten Hand sehr schwer verletzt wurden. Seit Beginn der zweiten Woche seiner vierwöchigen Reha trainiert er auch mit der App StableHandVR. Bei seinem virtuellen Spaziergang über den Bauernhof trifft er Hofbewohner, die Aufgaben für ihn haben. Heute soll er Äpfel für einen großen

Die App „Phantom AR“ kann jeden Raum in ein virtuelles Aquarium verwandeln. Die App verlängert den Armstumpf einer Patientin mit einem virtuellen Arm. Mit diesem kann sie in der Unterwasserwelt zum Beispiel Fische bewegen. PLAYBIONIC/COSIMA PRAHM/



Leila Harhaus-Wähner (r.) ist Direktorin der Klinik für Hand-, Replantations- und Mikrochirurgie am Unfallkrankenhaus Berlin. Cosima Prahm leitet das Zentrum für Klinische Forschung am ukb.

Kuchen pflücken. Er muss die Apfelbäume schütteln, damit Äpfel in seine offenen Hände fallen und Äpfel vom Boden einsammeln. Dabei führt er unterschiedliche Bewegungen aus, Umwendbewegungen, Faustgriff, Schlüsselgriff, Spitzgriff.

Cosima Prahm leitet ihn dabei im Rahmen einer lockeren Unterhaltung an. Sie ist zufrieden und lobt Oliver Bürgers Fortschritte: „Das klappt ja wie am Schnürchen, sehr gut.“ Und auch der Patient ist äußerst angetan von der App und dem spielerischen Training. „Das macht Spaß“, sagt er.

Im Spiel „Phantom AR“, ebenfalls von „PlayBionic“ entwickelt, erkennt die App bei einem Patienten mit amputiertem Arm automatisch den Stumpf und verlängert ihn

mit einem virtuellen Arm. Dieser kann mithilfe von Elektroden, die auf der Haut des Stumpfes angebracht sind, gesteuert werden. Der Patient nutzt dabei wieder die verbliebenen Muskeln des Stumpfes.

„Phantom AR“ kann zum Beispiel jeden Raum in der Klinik oder zu Hause in ein virtuelles Aquarium mit Fischen, Korallen und Algen verwandeln. Der Patient trägt ein Mixed-Reality-Headset. Er sieht sich selbst, seinen Stumpf, aber eben auch die virtuelle Unterwasserwelt. Und dort kann er mit seinem virtuellen Arm und auch mit seinem echten Arm etwa Fische greifen oder in eine andere Richtung lenken.

Diese App ist nicht nur eine gute Trainingsmethode, sie mindert auch

das Empfinden von Phantom-schmerz. Cosima Prahm erläutert den Effekt: „Wenn ich das Gefühl habe, da ist etwas, das zu meinem Körper gehört und das ich kontrollieren kann, wie dieser auf den Stumpf projizierte virtuelle Arm, dann reduziert das den Phantom-schmerz.“ Die Patienten bekämen das Gefühl, ihren Arm gar nicht verloren zu haben. „Die Schmerzen entstehen im Gehirn. Und wenn man das Gehirn überlistet und ihm den Anschein gibt, es ist alles gut, dann lässt die Schmerz-wahrnehmung nach“, erklärt Leila Harhaus-Wähner.

Mit Phantomempfindungen beschäftigt sich auch die digitale Anwendung C.A.L.A., die unter Federführung von Cosima Prahm entwi-

ckelt wurde. Die Abkürzung steht für Computer Assisted Limb Assessment (Computergestützte Gliedmaßenbewertung). Mit der App können Patienten das von ihnen wahrgenommene Körperbild, also auch Phantom-Gliedmaßen, direkt auf einen digitalen 3-D-Avatar zeichnen sowie ihre Schmerzen lokalisieren und quantifizieren. C.A.L.A. wird nicht nur am Unfallkrankenhaus Berlin intensiv genutzt, sondern bereits international eingesetzt, auch in Australien und den USA.

Das Unfallkrankenhaus Berlin gehört zu den BG Kliniken, dem Klinikverbund der gesetzlichen Unfallversicherung. Dort wird auch die Operationsmethode TMR (Targeted Muscle Reinnervation) angewandt. Dabei werden die Nerven, die durch eine Amputation funktionslos geworden sind, auf andere, verbleibende Muskeln umgeleitet. Ziel ist es, neue, intuitive Muskelsignale für die Steuerung myoelektrischer Prothesen zu schaffen. In der TMR-Methode sei das UKB international führend, betont Leila Harhaus-Wähner.

Die Operation ist nur ein Teil eines umfassenden Programms. „Wir nennen das Berlin Center of Bionics (Zentrum für Bionik)“, erläutert die Direktorin der Klinik für Handchirurgie. „Bereits bei der Operation denken wir an die Reha und planen den Eingriff entsprechend. Wir planen zum Beispiel den Nerventransfer per TMR, wenn wir sehen, die Hand ist nicht zu erhalten.“ Dann folgen Prothesentraining, Reha und die prothetische Versorgung.

Das Berlin Center of Bionics ist interdisziplinär organisiert: Chirurgie, Reha, Orthopädie-Technik und Wissenschaft arbeiten Hand in Hand und sind alle auf dem Klinikcampus in Marzahn ansässig. Die Charité, mit der das ukb eng verbunden ist, zählt ebenfalls zu den Partnern. Die Forschung ist in dieses Zentrum integriert.