

Teil I: Kurzbericht zum Vorhaben "interaktionsKRAFT"

1. Aufgabenstellung

Das Verbundvorhaben "interaktionsKRAFT" (FKZ: 16SV8727) zielte auf die Entwicklung einer innovativen Haptikkomponente zur Simulation von Kräften und Kräfteinwirkungen in Mixed-Reality (MR)-Systemen ab. Kernziel war die Erweiterung bestehender MR-Systeme um physische Interaktionsmöglichkeiten, um einen interaktiven MR-Wissensraum für immersives und effektives Bewegungslernen zu schaffen. Dies sollte MR-Technologien für Anwendungsfelder wie Physiotherapie und Trainingskurse besser nutzbar machen und einen Beitrag zur digitalen Gesellschaft leisten.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme "Interaktive Systeme in virtuellen und realen Räumen – Innovative Technologien für die digitale Gesellschaft (VAR2)" realisiert. Es adressierte die Herausforderung, die oft limitierte Immersion rein visuell-akustischer MR-Systeme, insbesondere beim motorischen Lernen, signifikant zu verbessern. Die Projektlaufzeit (01.08.2021 – 31.12.2024, inkl. Verlängerung) war von externen Faktoren wie der COVID-19-Pandemie, Lieferengpässen, Gerätedefekten und längeren Zeiträumen zum Erhalt eines Ethikvotums beeinflusst, was flexible Planungsanpassungen erforderte.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung umfasste acht Arbeitspakete (AP), beginnend mit Anforderungsanalyse (AP1) und Gesamtkonzept (AP2). Technische Kernentwicklungen waren das Dosierungssystem für kinästhetische Reize via EMS (AP3) und die MR-Systemumsetzung (AP4), gefolgt von Validierung (AP5) und Felderprobung (AP6). Begleitend liefen Arbeiten zu ELSI in Kooperation mit dem Living Lab XR-Interakt (AP7) sowie Projektmanagement und Dissemination (AP8). AP1 und AP2 wurden erfolgreich abgeschlossen. Verzögerungen in AP3/AP4 führten zur Laufzeitverlängerung und zur strategischen Fokussierung auf das Single-User-Szenario unter

Aufgabe des Multi-User-Szenarios, um die Kernziele zu sichern. AP7 und AP8 verliefen planmäßig.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das Projekt "interaktionsKRAFT" knüpfte an den bestehenden wissenschaftlichen und technischen Stand in den interdisziplinären Bereichen Mixed Reality (MR), haptisches Feedback und Elektromyostimulation (EMS) an. Wie die im Projekt durchgeführte und im Journal "Multimodal Technologies and Interaction" (DOI: 10.3390/mti8020007) veröffentlichte systematische Literaturrecherche aufzeigte, existierten bereits diverse Forschungsansätze und 17 identifizierte Studien zur Nutzung von EMS für kinästhetisches Feedback in AR/VR, beispielsweise zur Simulation von Gewicht oder virtuellen Wänden. Allerdings wies diese Forschung auch deutliche Herausforderungen auf, insbesondere hinsichtlich inkonsistenter Stimulationsparameter und mangelnder Individualisierung. "interaktionsKRAFT" setzte genau hier an: Ziel war es, auf diesen Grundlagen aufzubauen, jedoch mit einem innovativen Fokus auf die Individualisierung von Stimulationsparametern und die Kalibrierung des EMS-Systems, um ein präziseres, zuverlässigeres und somit immersiveres propriozeptives Feedback durch Interozeption zu ermöglichen und so die bestehenden Limitationen zu adressieren.

5. Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Es wurden etablierte Technologien wie kommerzielle MR-Headsets (Meta Quest 3), Motion-Capture-Systeme, Standardverfahren der EMS (inkl. Geräte und Elektroden) sowie Kraftsensoren und eine Druckmessmatte genutzt. Die Softwareentwicklung erfolgte mit gängigen Programmiersprachen (z.B. Python, Matlab) und MR-Entwicklungsumgebungen. Bekannte Schutzrechte Dritter, die der Verwertung eigener Ergebnisse entgegengestanden hätten, waren nicht relevant.

6. Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Eine umfassende Recherche wissenschaftlicher Fachliteratur aus Bereichen wie Mensch-Technik-Interaktion, MR/VR, Haptik, EMS, motorisches Lernen und Physiotherapie bildete die Arbeitsgrundlage. Dafür wurden etablierte Datenbanken (IEEE Xplore, ACM Digital Library, PubMed, Scopus, Web of Science) genutzt. Die Erkenntnisse flossen in Konzeption, Studien und Publikationen ein.

7. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Als Verbundvorhaben kooperierte das Institut für Arbeitswissenschaft (IAW) der RWTH Aachen (Zuwendungsempfänger) eng mit dem Projektpartner LavaLabs GmbH (technische Entwicklung, virtuelle Umgebung), wobei für die initiale Prototypentwicklung des MR-Frameworks ein Unterauftrag an die Hochschule Düsseldorf (HSD) vergeben wurde. Eine kontinuierliche Zusammenarbeit erfolgte mit dem Living Lab XR-Interakt (Evaluation, Workshops). Darüber hinaus wurden im Hinblick auf eine praxisnahe Ausrichtung und mögliche spätere Verwertung bereits während der Projektlaufzeit Kontakte zu den assoziierten Partnern Velamed GmbH, AIXTRA GmbH (Universitätsklinikum Aachen) und MedAix GmbH & Co. KG gepflegt, um deren Expertise aus den Bereichen biomechanische Anwendungen, medizinische Simulation und Physiotherapie in die konzeptionellen Überlegungen einzubeziehen.

Teil II: Abschlussbericht zum Vorhaben "interaktionsKRAFT"

Vorhaben:	<p>interaktionsKRAFT</p> <p>Gesamtvorhaben: Wahrnehmung von Kräften und Krafteinwirkungen in interaktiven MR-Wissensräumen für immersives und effektives Bewegungslernen</p> <p>Teilvorhaben: Entwicklung der Haptikkomponente des interaktionsKRAFT-Systems und wissenschaftliche Evaluation der Mensch-Technik-Interaktion des Gesamtsystems</p>
Zuwendungsempfänger:	<p>RWTH Aachen University</p> <p>Fakultät für Maschinenwesen</p> <p>Lehrstuhl und Institut für Arbeitswissenschaft (IAW)</p> <p>Eilfschornsteinstraße 18</p> <p>52062 Aachen</p>
Förderkennzeichen:	16SV8727
Projektleiter:	Dr.-Ing. Christopher Brandl
Laufzeit des Vorhabens:	01.08.2021 bis 31.07.2024
Mittelneutrale Verlängerung:	01.08.2024 bis 31.12.2024
Autoren:	<p>Apostolos Vrontos, M.Sc.</p> <p>Dr.-Ing. Oliver Brunner</p> <p>Prof. Dr. Dr. Alexander Mertens</p> <p>Dr.-Ing. Christopher Brandl</p>

1. Erzielte Projektergebnisse

Die zentralen Ergebnisse des Forschungsvorhabens "interaktionsKRAFT" waren die erfolgreiche Entwicklung und Umsetzung einer innovativen Haptikkomponente zur Simulation von Kräften und Krafteinwirkungen in interaktiven Mixed-Reality (MR)-Umgebungen. Ziel war es, die Immersion beim Bewegungslernen durch die Integration physischer Interaktionsmöglichkeiten, basierend auf dem Prinzip der Interozeption mittels Elektromyostimulation (EMS), zu erweitern. Die erzielten Ergebnisse lassen sich entlang der durchgeführten Arbeitspakete wie folgt darstellen:

AP1: Anforderungsanalyse

Zu Beginn des Projekts wurden im Rahmen der Anforderungsanalyse durch Befragungen, Fokusgruppen-Workshops mit zukünftigen Nutzer:innen und Expert:innen sowie Literaturrecherchen die grundlegenden Anforderungen an das System aus menschlicher, organisatorischer, technischer und medizinischer Perspektive identifiziert. Hierbei wurden auch mögliche ethische, rechtliche und soziale Implikationen (ELSI) initial erhoben und Nutzungsszenarien für Einzel- und Multi-User-Anwendungen als Grundlage für die nachfolgenden Arbeitspakete erarbeitet und in einem Anforderungskatalog dokumentiert.

AP2: Gesamtkonzept interaktionsKRAFT

Aufbauend auf den Ergebnissen aus AP1 wurde in Arbeitspaket 2 ein detailliertes Gesamtkonzept für das "interaktionsKRAFT"-System entwickelt. Dieses umfasste die Erarbeitung geeigneter Interaktionsstrategien und auf ein parallel zu entwickelndes Lehr-Lern-Konzept für die definierten Nutzungsszenarien abgestimmt. Parallel dazu wurde das Technologiekonzept, einschließlich Hardwarekomponenten, Schnittstellen und Entwicklungsumgebung, festgelegt. Ein wesentliches Ergebnis dieser Phase war die Realisierung eines flexibel anpassbaren experimentellen Aufbaus. Dieser umfasste Kernkomponenten wie einen linearen Kraftsensor zur Messung von Kräften, eine programmierte Schnittstelle zur Einstellung des EMS-Systems (siehe Abbildung 1) und ein Kamerasystem für die Bewegungsanalysen. Um die Funktionsfähigkeit des Demonstrators zu gewährleisten und die

Softwareentwicklung sowie die Erprobung der entwickelten MR-Anwendungen effektiv vorantreiben zu können, wurde dieser Aufbau bedarfsgerecht erweitert, unter anderem durch Meta Quest 3 Headsets und einer Druckmessmatte für detaillierte Analysen der Körperhaltung und Druckverteilung. Das Gesamtkonzept wurde iterativ unter Einbeziehung von Probanden weiterentwickelt.

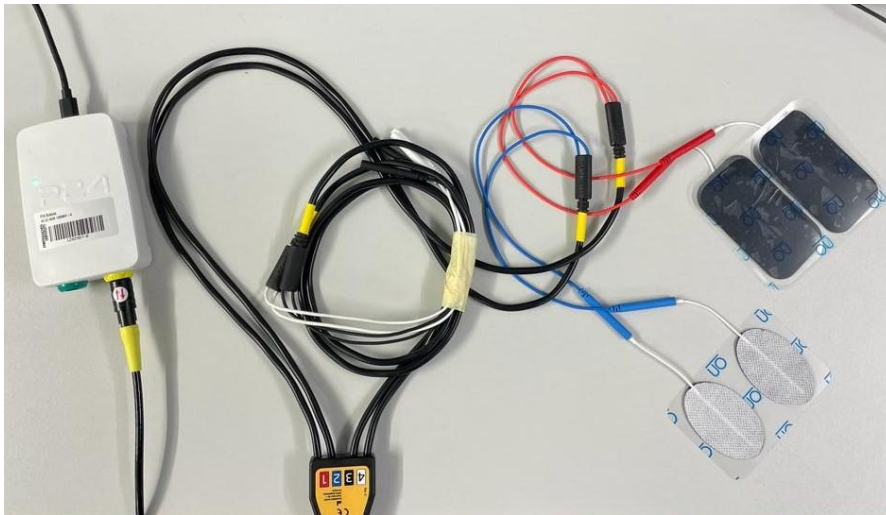


Abbildung 1: Das im Projekt interaktionsKRAFT eingesetzte programmierbare EMS-Gerät zur Erzeugung haptischen Feedbacks.

AP3: Dosierungssystem zur adaptiven Regulierung kinästhetischer Reize

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Entwicklung eines Dosierungssystems zur adaptiven Regulierung kinästhetischer Reize. Dieses System zielte darauf ab, personenbezogene EMS-basierte Impulse zu erzeugen, die abhängig vom haptischen Zielevent in der MR-Umgebung eine gezielte Stimulationsintensität erzeugt, die wiederum die Wahrnehmung des haptischen Zielevents möglichst realitätsgetreu ermöglicht. Hierfür wurde für jede Testperson eine individuelle Kalibrierung der Stimulationsparameter vorgenommen, die den Bereich von deren motorischem Schwellenwert (minimale EMS-Amplitude für eine spürbare Muskelkontraktion ohne Unbehagen) bis zur individuellen Schmerzschwelle (obere Grenze der Stimulationsstärke ohne Schmerzverursachung) abdeckte. Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden signifikante wissenschaftliche Fortschritte erzielt, darunter die

Weiterentwicklung und Integration der erforderlichen Technologien sowie die Konzeption einer Studie zur Evaluierung der Wahrnehmbarkeit von simulierten Kräfteinwirkungen. Nach Erhalt eines Ethikvotums wurde diese Studie auch durchgeführt. Diese experimentelle Untersuchungen mit einer größeren Probandenzahl (N=75) bestätigten signifikante Vorteile von Multi-Muskel-Stimulationsstrategien gegenüber Einzelmuskel-Stimulationen, sowohl hinsichtlich der Intensität als auch des wahrgenommenen Realismus bei der Simulation von Gewichtsempfindungen. Zudem konnte gezeigt werden, dass Machine-Learning-Ansätze vielversprechend sind, um die hohe interindividuelle Variabilität in der EMS-Wahrnehmung zu adressieren und eine personalisierte, präzisere Vorhersage der benötigten Stimulationsamplituden für spezifische haptische Empfindungen zu ermöglichen. Diese grundlegenden Erkenntnisse zur optimierten und individualisierten EMS-basierten Haptik bilden eine wichtige Basis für die Entwicklung überzeugender MR-Interaktionen.

Um diese potenziellen Vorteile systematisch zu quantifizieren und die Wissenslücke bezüglich synergistischer Stimulation zu schließen, wurde eine dedizierte Studie mit 75 Probanden konzipiert und durchgeführt. In einem Within-Subjects-Design wurde gezielt untersucht, wie sich die Stimulation eines einzelnen Muskels (M. triceps brachii) im Vergleich zur Stimulation von zwei Muskeln (M. triceps brachii und M. extensor carpi ulnaris) auf die Wahrnehmung auswirkt, während die Probanden ein physisches Referenzobjekt hielten. Die zentralen subjektiven Bewertungen aus dieser Untersuchung, welche die wahrgenommene Gewichtsänderung, den Realismus und die zugrundeliegenden Wahrnehmungsmechanismen beleuchten, werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.

Die subjektive Einschätzung der Probanden bezüglich der wahrgenommenen Gewichtsänderung wurde mittels einer 7-stufigen Likert-Skala erfasst, um die Effektivität der beiden Stimulationsansätze zu vergleichen. Abbildung 2 visualisiert die Verteilung der Antworten. Die Analyse der positiven Bewertungen (Skalenwerte ≥ 5) zeigt einen klaren Vorteil für die Dual-Muskel-Stimulation, die eine überwälti-

gend positive Resonanz von über 97 % erzielte. Auch die Einzel-Muskel-Stimulation wurde mit über 75 % mehrheitlich positiv bewertet, erreichte jedoch nicht das hohe Effektivitätsniveau der kombinierten Stimulation.

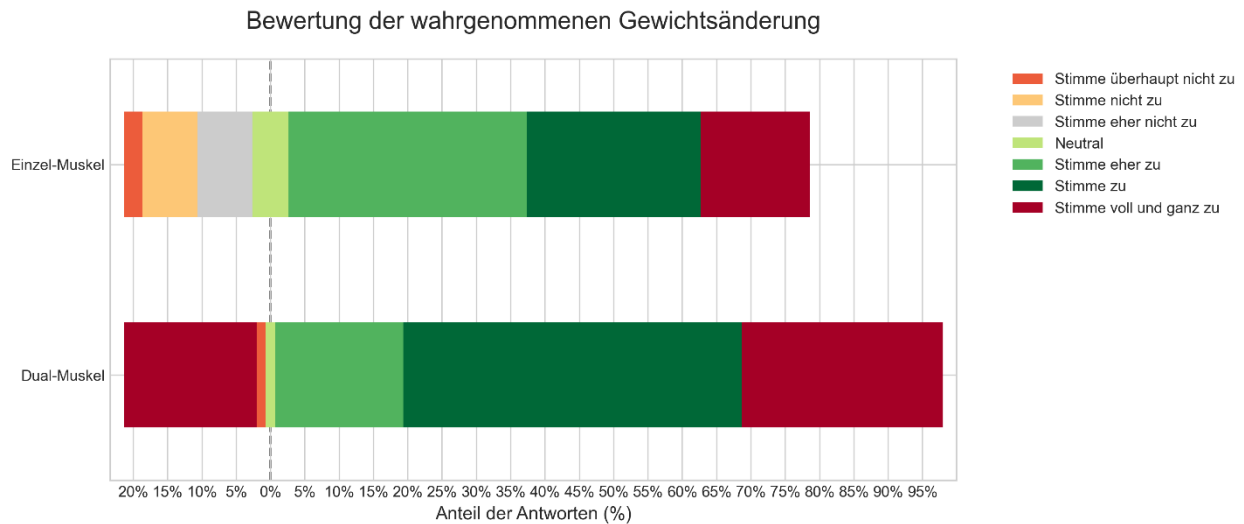


Abbildung 2: Bewertung der wahrgenommenen Gewichtsänderung. Die Verteilung der Antworten zeigt die subjektive Einschätzung der Teilnehmenden im Vergleich zwischen Einzel-Muskel- und Dual-Muskel-Stimulation.

Neben der reinen Intensität war der wahrgenommene Realismus der haptischen Simulation ein entscheidendes Kriterium für die Qualität der immersiven Erfahrung. Die Ergebnisse dieser Bewertung sind in Abbildung 3 zusammengefasst. Die Überlegenheit der Dual-Muskel-Methode wurde auch hier deutlich: Während bei diesem Ansatz knapp drei Viertel der Bewertungen positiv ausfielen, erreichte die Einzel-Muskel-Stimulation nur bei etwa der Hälfte der Teilnehmenden eine positive Resonanz. Dies deutet auf eine signifikant höhere immersive Qualität der Dual-Muskel-Strategie hin.

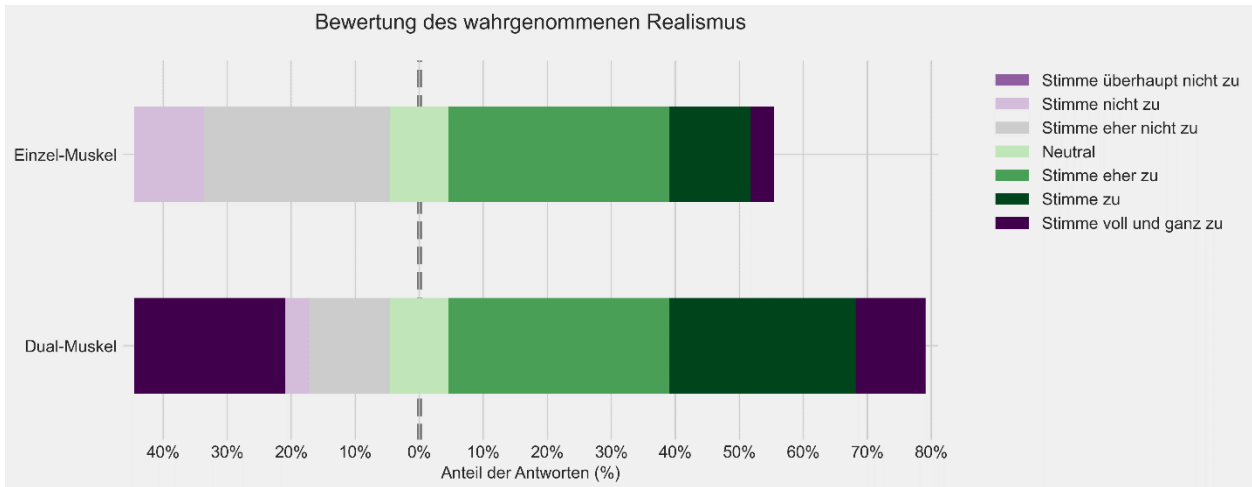


Abbildung 3: Bewertung des wahrgenommenen Realismus. Die Antworten der Teilnehmenden verdeutlichen, dass die Dual-Muskel-Stimulation als realistischer empfunden wurde als die Einzel-Muskel-Stimulation.

Um die grundlegenden Mechanismen der Wahrnehmung weiter zu analysieren, wurde ebenfalls untersucht, auf welcher Seite die Teilnehmenden das simulierte Gewicht als schwerer empfanden. Abbildung 4 stellt diese Analyse detailliert dar. Die Auswertung der Trefferquoten zeigte, dass die korrekte Identifikation der stimulierten Seite eine generelle Herausforderung darstellte. Dennoch führte die Dual-Muskel-Stimulation zu einer höheren Erkennungsrate (über einem Drittel) im Vergleich zur Einzel-Muskel-Stimulation (knapp ein Viertel). Interessanterweise offenbarte die Analyse der Konsistenz bei korrekter Erkennung (Teil A der Abbildung) kaum einen Unterschied in der Streuung der Wahrnehmung (Standardabweichung von etwa 10 für beide Bedingungen). Dies legt nahe, dass die Dual-Muskel-Methode zwar die Lokalisierung des Reizes verbessert, die wahrgenommene Intensität bei korrekter Erkennung jedoch eine vergleichbare Varianz aufweist.

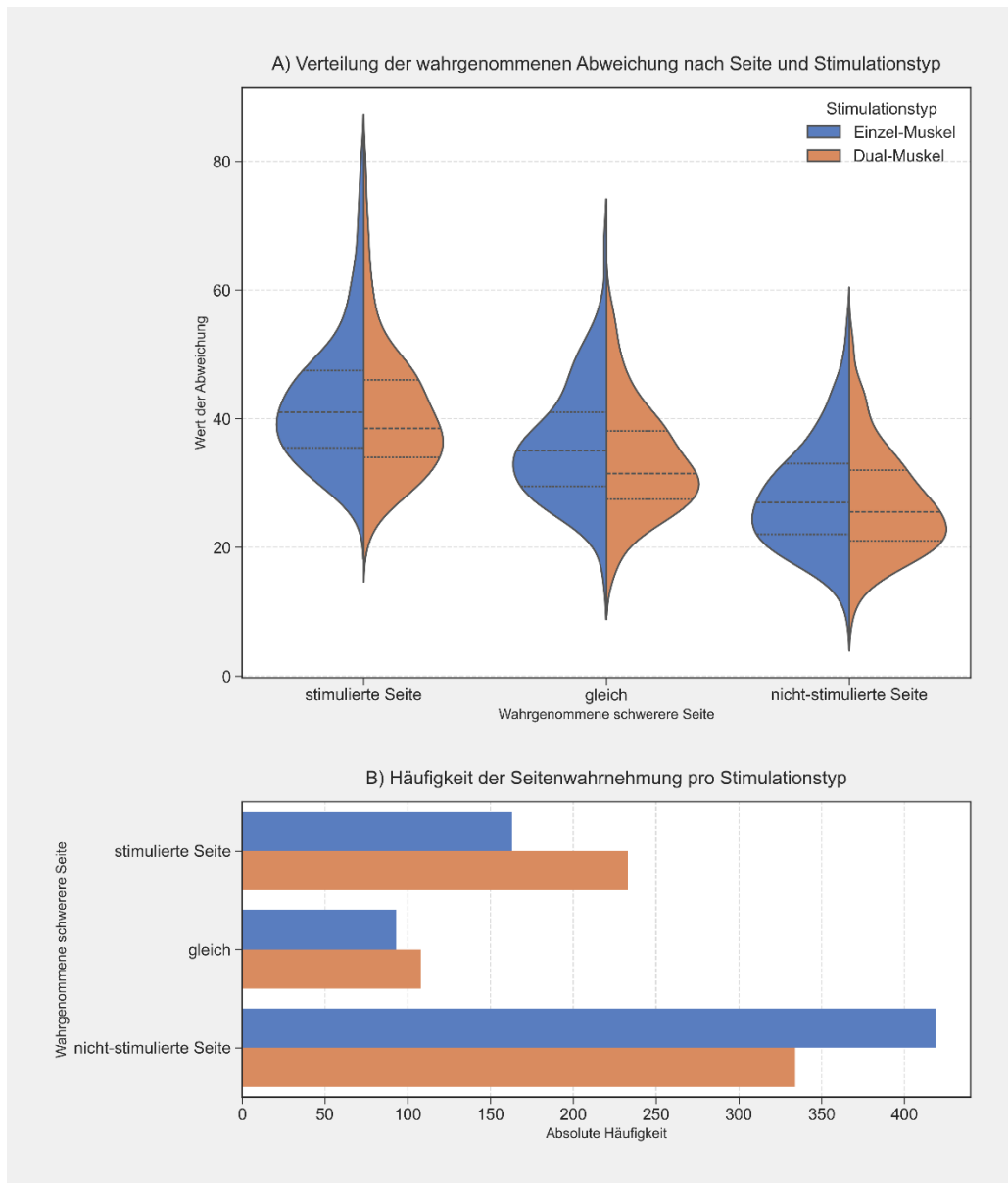


Abbildung 4: Detaillierte Analyse der Seitenwahrnehmung. (A) Verteilung der Abweichungswerte je nach wahrgenommener Seite und Stimulationstyp. (B) Absolute Häufigkeit der Nennungen für die als schwerer empfundene Seite

Zusammenfassend zeigte die erste Studie erfolgreich, dass eine Dual-Muskel-Stimulation die Wahrnehmung statischer Kräfte deutlich verbessern kann. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen zur Wahrnehmung von Reizen, widmete sich ein zweiter Untersuchungsschwerpunkt der Frage, ob EMS auch zur aktiven Beeinflussung von dynamischen Bewegungen genutzt werden kann.

Zu diesem Zweck wurde als Teil der Untersuchungen zum Einfluss von EMS auf Bewegungen eine Kniebeugestudie durchgeführt. Ziel dieser Studie war es zu ermitteln, inwieweit EMS die Ausführung von Bewegungen, exemplarisch an der freien Kniebeuge ohne Gewicht, beeinflussen kann. Die Nutzer:innen sahen in der MR-Umgebung ihre eigene, verspiegelte Bewegungsausführung sowie eine Referenzausführung als Avatar (siehe Abbildung 5). Basierend auf der Annahme, dass die maximale Kniebelastung bei etwa 90° Kniebeugung auftritt, wurde untersucht, ob EMS-Feedback eingesetzt werden kann, um den Moment höchster Belastung zu vermeiden und den optimalen Zeitpunkt für den Bewegungsumkehrpunkt zu signalisieren. Die Hypothese war, dass durch eine passende Stimulation der vorderen Oberschenkelmuskulatur der sagittale Kniewinkel beeinflusst werden könnte. Im Within-Subjects-Design führten die Teilnehmenden Kniebeugen mit und ohne EMS-Feedback durch, wobei der Kniewinkel mittels eines Motion-Capture-Systems erfasst wurde. Bei Abweichungen von der korrekten Bewegungsausführung wurde die Eigenansicht des Avatars der Nutzer:in rot eingefärbt und es erfolgte eine korrektive Unterstützung mittels EMS, während eine korrekte Ausführung grün signalisiert wurde. Dieses Feedback wurde bei Erreichen eines definierten Kniewinkels oder bei zu langem Verweilen in der unteren Position ausgelöst.



Abbildung 5: Darstellung der Nutzeransicht während der Kniebeugestudie: Links die verspiegelte Eigenansicht der Nutzer:in, rechts die Referenzausführung als Avatar. Bei Abweichungen erfolgte eine korrektive Unterstützung mittels EMS.

Die EMS wurde mit einer Impulsbreite von 120 Mikrosekunden und einer Frequenz von 40 Hz durchgeführt, wobei die Amplitude individuell angepasst wurde. Für die quantitative Auswertung der Bewegungsdaten wurde ein Python-Skript verwendet, um die Kniewinkel während der Kniebeugenzyklen zu analysieren. Abbildung 6 zeigt die resultierenden Messverläufe des Kniewinkels für jede teilnehmende Person. Diese Daten bildeten die Grundlage für die statistische Analyse der Bewegungsumkehrpunkte.

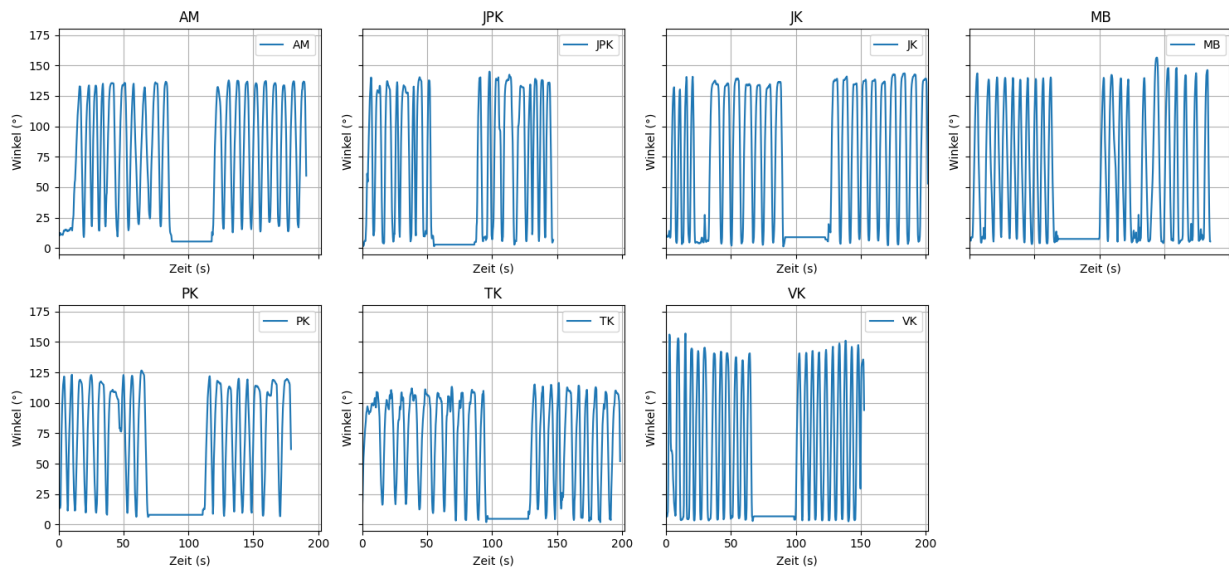


Abbildung 6: Ergebnisse der Kniebeugestudie.

Eine statistische Analyse der relevanten Peaks (maximale Kniewinkel) aus den Bewegungsdaten zeigte keine signifikanten Unterschiede im Umkehrpunkt der Kniebeuge zwischen den Bedingungen „EMS“ und „Ohne EMS“. Demnach ergab sich unter den gegebenen Versuchsbedingungen kein starker empirischer Hinweis, dass die EMS-Intervention die Ausführung der Kniebeugen, gemessen am Kniewinkel, wesentlich modifizierte. Obgleich dieser Befund einen Effekt nicht gänzlich ausschließt, spricht er gegen eine deutliche Modulation des Bewegungsverhaltens durch die hier gewählte Stimulationskonfiguration.

Mehrere Faktoren können zum Ausbleiben eines signifikanten Effekts beigetragen haben. Zum einen könnte die Stimulationsintensität unterhalb eines kritischen Schwellenwerts gelegen haben, der für eine nachweisbare Veränderung der Muskelaktivität erforderlich ist. Zum anderen wurde aus Sicherheitsgründen lediglich eine Extremität stimuliert, was die biomechanische Gesamteinwirkung der EMS reduziert haben könnte. Darüber hinaus ist nicht auszuschließen, dass die Teilnehmenden ihre Bewegungsausführung trotz Feedback sehr standardisiert durchführten, wodurch die interindividuelle Varianz zu gering für einen statistischen Nachweis ausfiel.

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass das adaptierte EMS-Protokoll im Hinblick auf die Zielgröße des Kniewinkels keinen statistisch nachweisbaren Einfluss zeigte. Die Studie lieferte dennoch wichtige methodische Erkenntnisse und verdeutlicht die Herausforderungen bei der Bewegungsbeeinflussung mittels EMS. Für zukünftige Untersuchungen könnte daher eine Anpassung der Stimulationsintensität oder eine bilaterale Applikation erwogen werden, um das Potenzial von EMS als Bewegungsfeedback umfassender zu evaluieren.

AP4: MR-Systemkonzeption und -umsetzung

In diesem Arbeitspaket wurde das Gesamtsystem "interaktionsKRAFT" konzipiert und umgesetzt. Ein entscheidender technischer Erfolg war die Entwicklung einer unabhängigen Softwarelösung, die eine Echtzeitsteuerung des Stimulationssystems über einen Windows-Host mittels Python ermöglichte. Für die Realisierung des MR-Frameworks, insbesondere für die MR-Softwareentwicklung und die Unterstützung bei der komplexen Kommunikation des Stimulators mit dem Motion-Capture-System, wurde die Hochschule Düsseldorf (HSD) im Rahmen eines Unterauftrags eingebunden. Der am IAW entwickelte Softwaredemonstrator wurde anschließend in enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner LavaLabs GmbH erfolgreich in die virtuelle Umgebung integriert. Dadurch konnten Ereignisse in der MR-Umgebung, wie beispielsweise das Berühren oder Anheben virtueller Objekte, mit präzise synchronisierten und gezielten Muskelstimulationen gekoppelt werden. Auf dieser Basis wurden für die gewählten Nutzungsszenarien auch die benötigten visuell-akustischen Materialien unter Anwendung von VR-Storytelling-Methoden erstellt, um eine ansprechende und verständliche Interaktion zu gewährleisten.

Somit konnte im Projekt "interaktionsKRAFT" ein voll funktionsfähiger Demonstrator realisiert werden, der die Kerninnovation des Vorhabens erfahrbar macht. Dieser ermöglicht es Nutzer:innen, in eine Mixed-Reality-Umgebung einzutauchen und dort mit virtuellen Objekten auf eine neuartige Weise physisch zu interagieren. Das zentrale Anwendungsszenario des Demonstrators ist das Anheben virtueller Objekte unterschiedlichen Gewichts. Durch die gezielte EMS der Antagonistenmuskulatur, insbesondere des Triceps brachii und des Extensor carpi ulnaris, wird

den Nutzer:innen unmittelbar und intuitiv ein realistisches Gefühl für das Gewicht dieser virtuellen Objekte vermittelt (siehe Abbildungen 7 und 8). Die Intensität der Stimulation wird dabei dynamisch an das simulierte Gewicht des Objekts sowie an die individuelle Kalibrierung der Nutzer:in angepasst, um eine überzeugende und gleichzeitig angenehme haptische Empfindung zu erzeugen. Diese entwickelte Lösung stellt eine neuartige Methode zur Erweiterung von MR-Systemen um propriozeptives, haptisches Feedback dar und bildet eine wichtige Grundlage für die weiterführende Forschung, die Erprobung in verschiedenen Anwendungsfeldern und die zukünftige Verwertung der Projektergebnisse.



Abbildung 7: Nutzer:in bei der Interaktion mit dem "interaktionsKRAFT"-Demonstrator – Das Anheben eines virtuellen Objekts in der MR-Umgebung wird durch EMS der Antagonistenmuskulatur haptisch als Gewichtsempfindung simuliert.



Abbildung 8: Detailansicht der Nutzerinteraktion mit dem "interaktionsKRAFT"-Demonstrator, erkennbar sind die Meta Quest 3 VR-Brille, der Controller und die applizierten EMS-Elektroden zur Gewichtssimulation.

AP5: Validierung von Gesamtkonzept interaktionsKRAFT

Im Arbeitspaket 5 wurde unter der Federführung von Velamed der Validierungsansatz für das Gesamtkonzept "interaktionsKRAFT" im Kontext des Bewegungslernens verfolgt, wobei das IAW unterstützend tätig war. Der Fokus lag hierbei auf der Erarbeitung eines Konzepts für einen messparameter- und bewegungsspezifischen Qualitätskriterienkatalog. Im Rahmen dieses methodischen Ansatzes wurden sowohl technische Limitationen, etwa der Sensormessgenauigkeit, als auch kinematische, kinetische und neuromuskuläre Aspekte betrachtet. Ergänzend hierzu wurde der Demonstrator auf Messen und Technologietagen von über 200 Personen erprobt, wodurch die Praxistauglichkeit weiter untermauert werden konnte und qualitatives Feedback erhoben wurde. Zusammenfassend wurden in diesem Arbeitspaket die konzeptionellen Grundlagen für eine zukünftige, systema-

tische Evaluation des Systems gelegt. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse, insbesondere aus der öffentlichen Erprobung, bilden eine wichtige Basis für die weitere wissenschaftliche Diskussion und zukünftige Anwendung.

AP6: Erprobung interaktionsKRAFT im Feld

Die Erprobung des Systems im Feld, unter der Hauptverantwortung von MedAix, fokussierte sich aufgrund von Zeitlimitationen und der strategischen Priorisierung primär auf das Single-User-Nutzungsszenario. Nach der Schulung von Personal wurden Probanden für Trainingskurse und physiotherapeutische Anwendungen im virtuellen Raum akquiriert. Die geplanten Anwendungen wurden mit den Studienteilnehmer:innen durchgeführt, wobei eine kontinuierliche Evaluation und iterative Anpassung des Gesamtkonzepts und des Demonstrators erfolgte. Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden Versuchsleitfäden und -unterlagen erstellt und Studien zu einfachen Kräfteeinwirkungen und Grundbewegungen sowie für das Einzel-User-Nutzungsszenario durchgeführt und ausgewertet. Die Ergebnisinterpretation führte zu Anpassungsbedarfen für Konzept- und Systemverbesserungen und mündete in der Ableitung von Handlungsleitfäden für den praktischen Einsatz. Somit konnte die Anwendbarkeit und Wirkung von "interaktionsKRAFT" im Feld für das fokussierte Szenario nachgewiesen und Limitationen aufgezeigt werden.

AP7: Projektbegleitende ELSI und Zusammenarbeit Living Lab & AP8: Projektmanagement und Dissemination

Die projektbegleitende Untersuchung ethischer, rechtlicher und sozialer Implikationen (ELSI) sowie die Zusammenarbeit mit dem Living Lab XR-Interakt erfolgten kontinuierlich und trugen maßgeblich zur verantwortungsvollen Entwicklung des "interaktionsKRAFT"-Systems bei. Im Rahmen von zwei ELSI-Analyse-Workshops wurden potenzielle Risiken und Akzeptanzhürden systematisch identifiziert und bewertet. Die Ergebnisse beider Analysen zeigten übereinstimmend, dass insbesondere Aspekte der Kostenübernahme durch Patient:innen oder Geschäftsführungen sowie der hohe initiale Raumbedarf des Systems als wesentliche Risiken für eine Ablehnung angesehen wurden. Auch die Technikskepsis, insbesondere bei älteren

Nutzer:innen, und Datenschutzbedenken bei der Nutzung im Heimbereich wurden als relevante Risikofaktoren identifiziert. Weitere genannte Aspekte umfassten die Sorge vor dem Alleinsein mit dem System, potenzielle Motion Sickness sowie den Kommunikations- und Kalibrierungsaufwand für Therapeut:innen. Diese Erkenntnisse fließen kontinuierlich in die Entwicklung und die Konzeption der Nutzungsszenarien ein, um das System möglichst anwenderfreundlich, sicher und akzeptabel zu gestalten.

AP8: Projektmanagement und Dissemination

Das Projektmanagement und die Koordination der Aktivitäten erfolgten kontinuierlich durch das IAW. Dies umfasste die Erfolgskontrolle, die Einhaltung terminlicher Ziele und die nachhaltige Einbindung der Verbundpartner. Ein wichtiger Aspekt war zudem die Gewährleistung einer einheitlichen Außendarstellung und Wissenschaftskommunikation des Vorhabens. Im Rahmen der Disseminationsaktivitäten wurden die Projektergebnisse und der entwickelte Demonstrator aktiv bei mehreren Veranstaltungen präsentiert, um einen direkten Austausch mit potenziellen Nutzer:innen, Fachexpert:innen und der wissenschaftlichen Gemeinschaft zu ermöglichen. Dazu zählten der projektübergreifende Workshop "Austausch & Evaluation" des Living Lab XR-Interakt im Oktober 2022, die Demonstrator-Erprobung und der Evaluationsworkshop auf der XR EXPO 2024 sowie die Präsentation im Rahmen von Projektblitzlichtern und einer Poster- und Demo-Session beim Abschlusstreffen der BMBF-Förderprojekte (VAR 2) im Juni 2024. Zudem wurde mit Projektbeginn eine Internetpräsenz erstellt, die über aktuelle Ergebnisse informierte, und die Vorbereitung wissenschaftlicher Publikationen vorangetrieben.

2. Voraussichtlicher Nutzen, Verwertungsperspektiven und gewonnene Erfahrungen

Der **voraussichtliche Nutzen** des Projekts "interaktionsKRAFT" und der daraus resultierenden Ergebnisse ist vielschichtig und erstreckt sich über wissenschaftliche, technologische und wirtschaftliche Bereiche. Durch die Entwicklung einer innovativen Methode zur Simulation von Kräften und Gewichten mittels Interozeption

in MR-Umgebungen wird ein signifikanter Beitrag zur Steigerung der Immersion und des Realismus interaktiver Systeme geleistet. Dieser technologische Fortschritt eröffnet neue Möglichkeiten für effektiveres Bewegungslernen, insbesondere in Anwendungsfeldern wie der Physiotherapie, der Rehabilitation, dem sportlichen Training sowie in industriellen Schulungsszenarien, wo das Erlernen komplexer motorischer Fähigkeiten essentiell ist. Anwender können von einem intuitiveren und motivierenderen Lernerlebnis profitieren, das über rein visuell-akustische Darstellungen hinausgeht.

Die **wissenschaftlichen Verwertungsperspektiven** der Projektergebnisse sind vielversprechend und zielen auf die Erweiterung des Forschungsfeldes der Mensch-Technik-Interaktion und der haptischen Technologien ab. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zum Einsatz von EMS zur Erzeugung propriozeptiven Feedbacks, die entwickelten Evaluationsmethoden und das Instrumentarium bieten eine fundierte Basis für weiterführende Forschungsarbeiten und Folgeprojekte. Die bereits erfolgte und noch geplante Verbreitung der Ergebnisse durch Publikationen in Fachzeitschriften und auf Konferenzen trägt zur wissenschaftlichen Diskussion bei und festigt das Themenfeld. Die Integration der Konzepte in die universitäre Lehre sichert zudem den Wissenstransfer an nachfolgende Generationen von Forschenden und Entwickelnden.

Auch die **wirtschaftlichen Verwertungsperspektiven** wurden als vielversprechend angesehen, bedingt durch den steigenden Bedarf an fortschrittlichen MR-Lösungen. Das entwickelte System bot durch sein kinästhetisches Feedback funktionale Vorteile. Für die Praxis zeichneten sich Anwendungsmöglichkeiten insbesondere im Bereich der Physiotherapie und für spezielle Bewegungstrainings ab, mit Potenzial für ortsunabhängige Angebote über Lernplattformen. Der Transfer der Ergebnisse in die Praxis, auch durch die beteiligten Unternehmenspartner wie LAVA Labs, Velamed, AIXTRA und MedAix, war ein wichtiger Bestandteil der Verwertungsüberlegungen.

Wichtige **gewonnene Erfahrungen** während der Projektlaufzeit erstreckten sich über prozessuale, technische und studienspezifische Aspekte. Auf prozessualer

Ebene bestätigte sich die Notwendigkeit, Studiendesigns und technische Entwicklungen flexibel an sich ändernde praktische Rahmenbedingungen und unvorhergesehene Herausforderungen – wie Lieferengpässe bei Hardware oder Verzögerungen beim Erhalt eines Ethikvotums – anzupassen.

Im technischen Bereich wurden im Kontext des Demonstrators wichtige Erfahrungen für nachhaltige Implementierung gesammelt. Es zeigte sich, dass eine präzise individuelle Kalibrierung der EMS-Parameter für jede Testperson unerlässlich war, um eine effektive und angenehme Stimulation zu gewährleisten. Dieser Kalibrierungsprozess war notwendig, um die für jede Person passende Stimulationsstärke zu finden – beginnend bei der Stärke, ab der eine erste leichte Muskelreaktion spürbar war (dem sogenannten motorischen Schwellenwert), bis hin zu einer Intensität, die gerade noch als angenehm und nicht als unangenehm empfunden wurde (der individuellen Grenze des Unwohlseins).

Eine weitere wichtige Erkenntnis betraf die präzise Erfassung der Körperhaltung, die sich als kritisch für die realistische Simulation von Kräfteempfindungen erwies. Insbesondere die genaue Erfassung von Gelenkwinkeln, die für die resultierenden simulierten Kräfte relevant waren (wie Ellbogen- und Schulterwinkel sowie die Handorientierung), erforderte den kombinierten Einsatz von Motion-Capture-Technologien, Druckmessmatten (z.B. zur Erfassung der Gewichtsverteilung bei Stand- oder Sitzhaltungen) und den Orientierungsdaten der VR-Controller. Diese Abhängigkeit von exakten Positions- und Orientierungsdaten verdeutlichte, dass die Erzeugung überzeugender haptischer Empfindungen, insbesondere bei hochdynamischen oder komplexen Bewegungen, eine besondere technische Herausforderung darstellt. Die präzise Synchronisation der erfassten Bewegungsdaten mit der Auslösung der EMS-Impulse war hierbei ebenso entscheidend wie die genaue Interpretation der Körperhaltungsdaten selbst.

Im Bereich der studienspezifischen Durchführung wurde die hohe interindividuelle Variabilität in der Wahrnehmung von EMS deutlich. Jedes Individuum empfand die Stimulation unterschiedlich, was die Notwendigkeit der bereits erwähnten individu-

ellen Kalibrierung weiter unterstrich. Auch die korrekte Elektrodenplatzierung erwies sich als nicht trivial. Für eine effektive Muskelstimulation war es notwendig, die sogenannten Motorpunkte (MPs) der jeweiligen Zielmuskulatur zu identifizieren und die Elektroden präzise zu positionieren (siehe Abbildung 9). Selbst bei korrekter Platzierung hing die qualitative Empfindung der Stimulation von einer Vielzahl weiterer physischer und demografischer Merkmale der Testpersonen ab.



Abbildung 9: Elektrodenapplikation am Ober- und Unterarm (hier: Triceps brachii und Extensor carpi ulnaris) für die experimentelle Untersuchung der Gewichtswahrnehmung mittels EMS.

Eine weitere zentrale Erkenntnis betraf die Simulation realistischer Kraftempfindungen, bei der die EMS-basierte Aktivierung lediglich einer einzelnen Muskulatur oft nicht ausreichte, da bei realen Bewegungen und Krafteinwirkungen typischerweise mehrere Muskelgruppen synergistisch agieren. Obwohl die Anwendung von EMS vielversprechend für die Erweiterung der Gewichtswahrnehmung in interaktiven Systemen ist, fehlte bisher ein klares Verständnis dafür, wie unterschiedliche

Stimulationsstrategien sowohl die Intensität als auch den Realismus der wahrgenommenen Schwere beeinflussen, insbesondere im Hinblick auf die synergistische Aktivierung mehrerer Muskeln. Eine im Projekt durchgeführte Studie adressierte diese Lücke systematisch, indem sie die Effekte von Einzelmuskel- (Triceps brachii) versus Dual-Muskel-Stimulation (Triceps brachii und Extensor carpi ulnaris) auf die subjektive Gewichtswahrnehmung untersuchte. Die wesentliche Erkenntnis und der Hauptbeitrag dieser Untersuchung war der quantitative Nachweis, dass die Dual-Muskel-EMS nicht nur eine signifikant stärkere Zunahme des wahrgenommenen Gewichts im Vergleich zur Einzelmuskel-Stimulation des Triceps hervorrief, sondern entscheidenderweise auch den wahrgenommenen Realismus der Gewichtsempfindung verbesserte. Diese Unterscheidung lieferte wichtige Belege für die Vorteile von Multi-Muskel-Stimulationsstrategien bei der Erzeugung überzeugender haptischer Erlebnisse und hat signifikante Implikationen für das Design effektiverer EMS-basierter Feedbacks in virtueller/erweiterter Realität, Rehabilitation, Teleoperation und Prothetik.

Eine zentrale Erfahrung war zudem die Bestätigung, wie wichtig die frühzeitige und kontinuierliche Berücksichtigung ethischer, rechtlicher und sozialer Implikationen (ELSI) im gesamten Entwicklungsprozess ist, um die Akzeptanz der entwickelten Technologien sicherzustellen und eine verantwortungsvolle Innovation zu fördern. Die strategische Entscheidung zur Fokussierung auf das Single-User-Szenario zeigte außerdem, wie wichtig eine klare Prioritätensetzung für den Projekterfolg sein kann.

Mit Blick auf die Zukunft eröffnen die im Projekt "interaktionsKRAFT" gewonnenen Erfahrungen und die entwickelte Technologie vielversprechende Perspektiven. Die erfolgreiche Realisierung eines Demonstrators, der die interozeptive Simulation von Kräften und Gewichten in MR-Umgebungen ermöglicht, hat das Potenzial des gewählten Ansatzes unterstrichen. Die Erkenntnisse zur Notwendigkeit einer präzisen individuellen Kalibrierung, zur Komplexität der Erfassung dynamischer Körperhaltungen und insbesondere die Bestätigung, dass Multi-Muskel-Stimulationsstrategien zu einer signifikant realistischeren Kraftwahrnehmung führen, bilden

eine solide Basis für nachfolgende Innovationen. Zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten können auf diesen Grundlagen aufbauen, um die Systeme weiter zu verfeinern, sie für komplexere Anwendungen in der Rehabilitation, im Training oder in industriellen Kontexten anzupassen und die Mensch-Technik-Interaktion durch glaubwürdiges haptisches Feedback noch immersiver und effektiver zu gestalten. Die kontinuierliche Beachtung ethischer Aspekte und die Überführung der Erkenntnisse in die Praxis durch die beteiligten Partner und die wissenschaftliche Community werden entscheidend dafür sein, das im Projekt aufgezeigte Potenzial nachhaltig zu nutzen und zu erweitern.

3. Entwicklungen im wissenschaftlich-technischen Umfeld und Abgrenzung des Vorhabens

Während der gesamten Laufzeit des Projekts "interaktionsKRAFT" wurde das wissenschaftlich-technische Umfeld in den relevanten Bereichen MR, haptisches Feedback und EMS kontinuierlich beobachtet. Zum damaligen Kenntnisstand und basierend auf regelmäßigen Informationsrecherchen wurden während der Durchführung des Vorhabens keine spezifischen F&E-Ergebnisse von dritter Seite bekannt, die eine direkte und wesentliche Relevanz für die unmittelbare Durchführung und Zielsetzung des Projekts gehabt hätten oder die den innovativen Kernansatz des Projekts maßgeblich beeinflusst oder in Frage gestellt hätten.

Das Forschungsfeld der haptischen Interaktion in MR-Systemen entwickelte sich zwar stetig weiter, wobei verschiedene Ansätze zur Erzeugung taktilen und kinästhetischen Feedbacks verfolgt wurden. Viele dieser Ansätze konzentrierten sich jedoch weiterhin auf externe mechanische Systeme (wie Exoskelette oder Force-Feedback-Geräte) oder auf vibrotaktile Stimulation.

Das Vorhaben "interaktionsKRAFT" grenzte sich hiervon durch seinen spezifischen Fokus auf die Erzeugung propriozeptiven Feedbacks mittels direkter Elektromyostimulation der Antagonistenmuskulatur (Interozeption) ab. Dieser Ansatz zur Simulation von Kräften und Gewichten wurde zum Zeitpunkt der Durchführung als besonders neuartig und mit hohem Potenzial für eine natürliche und immersive

Interaktion bewertet. Die im Rahmen des Projekts durchgeführte systematische Literaturrecherche und die daraus resultierende Publikation zum Stand der Technik der EMS für haptisches Feedback untermauerten diese Einschätzung und die Abgrenzung zu bestehenden Verfahren. Das Projekt positionierte sich somit in einer innovativen Nische mit dem Ziel, eine grundlegend neue Art der haptischen Interaktion für MR-Anwendungen zu erforschen und zu demonstrieren.

4. Veröffentlichung und Dissemination der Ergebnisse

Die Veröffentlichungs- und Disseminationsstrategie des Projekts "interaktionsKRAFT" zielte darauf ab, die gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse und technischen Entwicklungen einer breiten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen und den Transfer in potenzielle Anwendungsfelder zu fördern. Dies erfolgte durch wissenschaftliche Publikationen, Konferenzbeiträge und die Präsentation des entwickelten Demonstrators.

Ein zentraler Bestandteil der wissenschaftlichen Dissemination war die Erstellung und Veröffentlichung von Fachartikeln. Eine wichtige Grundlage wurde durch eine systematische Literaturrecherche geschaffen, die im Journal "Multimodal Technologies and Interaction" veröffentlicht wurde:

- Vrontos, A.; Nitsch, V.; Brandl, C. (2024). Electrical Muscle Stimulation for Kinesthetic Feedback in AR/VR: A Systematic Literature Review. *Multimodal Technol. Interact.*, 8(2), 7. (DOI: 10.3390/mti8020007).

Diese Arbeit, publiziert am 25. Januar 2024, analysierte 17 Studien und beleuchtete das wachsende Potenzial von EMS für kinästhetisches Feedback in AR/VR, identifizierte vielfältige Anwendungsbereiche und wies gleichzeitig auf Herausforderungen wie inkonsistente Parameterberichterstattung hin.

Darüber hinaus wurden die spezifischen Forschungsergebnisse des Projekts in weiteren Manuskripten aufgearbeitet und bei renommierten Journalen und Konferenzen eingereicht bzw. zur Veröffentlichung angenommen:

- Ein Manuskript mit dem Fokus auf den Effekt von EMS auf die subjektive Gewichtswahrnehmung (Titel: "Haptic Feedback for Interactive AR/VR Systems:

Comparing Single- vs. Dual-Muscle EMS for Weight Perception") wurde im Journal Virtual Reality eingereicht.

- Ein Paper, das einen Machine-Learning-Ansatz zur personalisierten EMS für eine präzise Gewichtswahrnehmung in VR beschreibt (Titel: "Personalized Electrical Muscle Stimulation for Precise Weight Perception in Virtual Reality: A Machine Learning Approach"), wurde für die 2025 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) eingereicht.
- Ein Beitrag mit dem Titel "Mixed Reality zum Anfassen: Innovation für virtuelle Haptik durch Gewichts- und Kraftsimulation" wird im Juli 2025 als Teil des Sammelbandes „Virtuelle Beteiligung, reale Teilhabe. Transformative Technologien für eine inklusivere Gesellschaft“ (Hg. Tröge, J. / Stepczynski, J. / Wiesner, H. / Runde, C., ISBN: 978-3-593-52131-2) veröffentlicht. Dieser Beitrag, der im Rahmen des Buchprojekts des Living Labs XR-Interakt entstand, gibt einen Überblick über die im Projekt "interaktionsKRAFT" entwickelten EMS-Anwendungen zur Simulation virtueller Haptik und stellt spezifische Nutzungsszenarien wie die VR-Gewichtssimulation und die Bewegungskorrektur in der virtuellen Physiotherapie dar.

Neben den schriftlichen Publikationen wurden die Projektergebnisse und der entwickelte Demonstrator aktiv bei mehreren Veranstaltungen präsentiert, um einen direkten Austausch mit potenziellen Nutzer:innen, Fachexpert:innen und der wissenschaftlichen Gemeinschaft zu ermöglichen. Dazu zählten der projektübergreifende Workshop "Austausch & Evaluation" des Living Lab XR-Interakt im Oktober 2022, die Demonstrator-Erprobung und der Evaluationsworkshop auf der XR EXPO 2024 sowie die Präsentation im Rahmen von Projektblitzlichtern und einer Poster- und Demo-Session beim Abschlusstreffen der BMBF-Förderprojekte (VAR 2) im Juni 2024.

Diese vielfältigen Disseminationsaktivitäten stellten sicher, dass die im Projekt "interaktionsKRAFT" erzielten Fortschritte und das Potenzial der entwickelten Technologie zur Verbesserung der Immersion in MR-Systemen durch interozeptives haptisches Feed-

back einer relevanten Zielgruppe vorgestellt wurden und als Grundlage für weiterführende Forschung und Anwendung dienen können. Es war zudem geplant, die Kommunikation an die betriebliche sowie klinische Praxis fortzusetzen.