

Schlussbericht zum Teilvorhaben der Subsequent GmbH zum KMU-innovativ Projekt SMARTGAIT

Projekttitel: SMARTGAIT - KI-basierte, interaktive Ganganalyse aus Smartphone-Videoaufnahmen zur Verstärkung der Gesundheitskompetenz in der Therapie neurologisch bedingter Gangstörungen

Förderkennzeichen: 16SV8999

Autoren: Dr. Manuel Stein (manuel.stein@subsequent.ai), Philip Zimmermann (philip.zimmermann@subsequent.ai), Dr. Daniel Seebacher (daniel.seebacher@subsequent.ai)

Kurzdarstellung

Aufgabenstellung

Ein zentrales Merkmal des autonomen Menschen ist die Fähigkeit, sich selbständig fortbewegen zu können. Das Gehen charakterisiert wesentlich den Mobilitätsstatus und ist in hohem Maße mit Lebensqualität assoziiert [PB04]. Die Ganganalyse spielt daher bei der Mobilitäts-Diagnostik eine entscheidende Rolle. Insbesondere bei neurologischen Erkrankungen wie Morbus Parkinson, Schlaganfall, Multiple Sklerose, Rückenmarkserkrankungen und Polyneuropathie sind Gangstörungen ein wichtiges Kennzeichen der Krankheitsschwere und -progression [BA17]. Das Ziel von SMARTGAIT ist die Unterstützung von Ärzt*innen, Therapeut*innen und Patient*innen (im Folgenden Anwender*innen) in der Rehabilitation neurologischer Krankheitsbilder, mithilfe einer intuitiv anwendbaren KI-basierten 3D-Skelettdatenerhebung aus einfachen Videoaufnahmen (z.B. Smartphone-Videos) und anschließender visuell-interaktiver Gang- und Bewegungsanalyse. SMARTGAIT soll über die einzigartige Kombination von innovativen Technologien zeit- und kostenintensive Arbeitsschritte auf ein Minimum reduzieren und damit Anwenderinnen erstmals valide Daten in der Breite zur Verfügung stellen, welche ein Screening und Monitoring von neurologischen Gangstörungen in der Therapie ermöglichen. Patient*innen profitieren durch das unmittelbare, objektive Feedback in ihrem Alltag, Therapeutinnen können Anpassungen ihrer Intervention schneller und gezielter vornehmen und Ärzt*innen können die Wirksamkeit der verordneten therapeutischen Maßnahmen spezifisch überprüfen und bewerten.

Vorhabenvoraussetzungen

Die Subsequent GmbH, ein innovatives und mehrfach ausgezeichnetes Start-up, konnte umfangreiche Expertise und eine nachweisliche Erfolgsbilanz in das SMARTGAIT-Projekt einbringen. Zu den Auszeichnungen der Subsequent GmbH gehören, unter anderem, die Auszeichnung als Digitales Start-up des Jahres 2023 deutschlandweit (verliehen durch das BMWK und Bundesminister Dr. Robert Habeck), den Innovationspreis Baden-Württemberg 2022 und den KfW Award Gründen 2023 als Landespreisträger Baden-Württemberg. Zudem wurde Subsequent zum KI-Champion Baden-Württemberg 2023 ernannt. Diese Auszeichnungen unterstreichen die führende Rolle von Subsequent im Bereich der Spitzentechnologie und die Fähigkeit, Innovationen in der Bewegungsanalyse und Skelettdatenextraktion voranzutreiben. Eine der Hauptstärken von Subsequent ist die Fähigkeit, Skelettdaten in Echtzeit zu extrahieren und Bewegungsanalysen aus einfachen Videoaufnahmen durchzuführen. Im Gegensatz zu traditionellen Methoden benötigen die Lösungen von Subsequent keine teuren Sensoren, die von Personen getragen werden müssen, oder komplexe Multikamera-Infrastrukturen. Dies macht die Technologie von Subsequent breit zugänglich, vielseitig einsetzbar und skalierbar für verschiedene Anwendungen. So hat Subsequent ihre Methoden bereits erfolgreich in Zusammenarbeit mit einem breit gefächerten Kundenstamm - darunter Spitzensportvereine, Kliniken, Forschungsinstitute und Unternehmen aus den Bereichen Home Fitness und Sicherheit - eingesetzt. Die Fähigkeit, qualitativ hochwertige und kosteneffiziente Lösungen für die Bewegungsanalyse anzubieten, hat Subsequent als Pionier in der markerlosen Skeletterkennung und der visuell-interaktiven Bewegungsanalyse etabliert.

Subsequent war aufgrund ihrer einzigartigen Expertise, ihres umfangreichen Forschungshintergrunds und ihres innovativen Ansatzes in der Bewegungsanalyse einzigartig positioniert, um die für das SMARTGAIT-Projekt notwendigen Technologien zu entwickeln. Aufbauend auf ihren innovativen Methoden und ihrer Erfahrung in verschiedenen Anwendungsbereichen war Subsequent optimal aufgestellt, um eine erfolgreiche Umsetzung der Projektziele zu ermöglichen.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung von SMARTGAIT spielte eine zentrale Rolle für die erfolgreiche Umsetzung. Die untenstehende Abbildung¹ zeigt den Gesamtarbeitsplan des Verbundprojekts. Zu sehen sind die Arbeitszeiträume der einzelnen Arbeitspakete, sowie die geplanten Aufwände der einzelnen Projektpartner. Zusätzlich sind die Meilensteine des SMARTGAIT Projekts angegeben.

ausreichende Grundlage für einen Einsatz in der neurologischen Routine. Ein interaktives Modul, welches die Erfassung und Auswertung der Ganganalyse im klinischen Alltag unterstützt, ist in die existierenden Systeme nicht integriert. Diese Forschungslücke wird im Rahmen dieses Projektes über eine wissenschaftlich fundierten Validierungsstudie und den Einsatz der neuen SMARTGAIT-Technologie geschlossen. SMARTGAIT bietet technische Vorteile und eine Kostensenkung um mehr als das Zehnfache im Vergleich zu existierenden Hardware-Lösungen. Damit geht das Projektvorhaben sowohl aus wissenschaftlicher, technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht wesentlich über die bestehenden Ansätze hinaus. Ein besonderer Projektfokus liegt auf der Entwicklung von Single-Camera Pose Estimation Verfahren, welche es ermöglichen, aus einer einzelnen Videoaufnahme 3D-Skelettdaten zu ermitteln. Hierfür wird keine besondere Hardware benötigt, es können bereits verfügbare Geräte wie Webcams oder Smartphones als Datenquelle genutzt werden. Im Vergleich zu Ansätzen auf Basis von Tiefenkameras sowie Multi-Kamera-Systemen ist eine höhere Flexibilität und Anpassbarkeit an den jeweiligen Use Case möglich, wodurch höhere Genauigkeit und Zuverlässigkeit erreicht wird. Beim Einsatz einer Tiefenkamera müssen Limitierungen der jeweiligen Hardware berücksichtigt werden. Dazu zählen ein sehr begrenzter Tiefenbereich (typischerweise <4m), welcher keine Analysen mit größerem Bewegungsspielraum ermöglicht. Gerade dieser Bewegungsspielraum ist jedoch essentiell für praxistaugliche Analysen. Weiterhin ist die räumliche Auflösung des Tiefensensors begrenzt und variiert mit der Distanz zur Kamera, dies begrenzt mögliche Einsatzgebiete und reduziert die Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Aufgrund von Materialeigenschaften wie Reflektivität im IR-Spektrum können zusätzlich Artefakte auftreten, welche die Genauigkeit beeinflussen. Zudem stellen hohe Anschaffungskosten eine signifikante Hürde für den massentauglichen Einsatz dar. Insbesondere bei Multi-Kamera-Systemen können enorme Kosten entstehen. Daher ist ein Ansatz auf Basis aktueller Tiefenkameras sowie Multi-Kamera-Systemen für den massentauglichen Einsatz hochgenauer Bewegungsanalyse nicht ausreichend. Obwohl das Problem der Single-Camera Pose Estimation in den letzten Jahren große Aufmerksamkeit erlangt hat, ist das genaue Schätzen von Körperhaltungen unter Realbedingungen weiterhin schwierig. Existierende Arbeiten lassen sich dabei grob anhand der Repräsentation (2D [CS17,SX19,CX20,RI19,NH17,NY16] oder 3D [GN18,BK16,KB18]) und der Einstufung als Single-Person [NH16,NY16,BK16,KB18,RM14,WR16] oder Multi-Person [CS17,SX19,CX20,RI19,GN18,PI16,PZ17, PZ18] Pose Estimation klassifizieren. Dabei sind folgende Probleme zu beobachten: (1) Bisherige Verfahren beschäftigen sich hauptsächlich mit einzelnen fokussierten Use-Cases der Pose Estimation, bisher existiert jedoch kein Ansatz, welcher 3D-Tracking, Multi-Person- und Echtzeitfähigkeit mit ausreichender Genauigkeit vereint und somit eine Grundlage für klinisch relevante Bewegungsanalysen in unterschiedlichen Situationen schafft. (2) Weiterhin werden benötigte Trainingsdaten oft in Laborumgebungen aufgezeichnet, wobei meist mit zusätzlicher Hardware wie marker- oder sensorbasierten Systemen gearbeitet wird. Dies stellt eine Limitierung dar,

da keine alltäglichen Umgebungen vorhanden sind und diverse visuelle Effekte nicht abgebildet werden. Diese Limitierung reduziert die Generalisierbarkeit von resultierenden Machine-Learning Verfahren im realen Einsatz. (3) Existierende Modelle (auch von kommerziellen Anbietern) sind nicht in der Lage, sowohl die Lauffähigkeit auf Mobilgeräten wie Smartphones als auch eine ausreichende Genauigkeit zu vereinen. Aufgrund dieser Eigenschaften sind bestehende Verfahren nicht für einen praxistauglichen Einsatz im klinischen Umfeld geeignet. Ziel des geplanten Projektes ist somit unter anderem die Entwicklung eines neuartigen Machine-Learning Verfahrens zur robusten sowie hochgenauen Schätzung von 3D-Skelettposen aus einzelnen Videoaufnahmen in Echtzeit. SMARTGAIT stellt damit eine signifikante Neuerung im Vergleich zu existierenden Verfahren dar.

Angabe bekannter Konstruktionen, sowie Verfahren und Schutzrechte

Bislang erfolgt die Erhebung aussagekräftiger biomechanischer (z.B. Ganggeschwindigkeit, Schritt-Schritt Variabilität, Gangbreite) und sensomotorischer (z.B. dynamisches Gleichgewicht) Gangparameter primär im wissenschaftlichen Kontext. Verfügbare Messsysteme (z.B. Gaitrite®, Optogait®, APDM®, Simi®, Vicon®, Qualisys®) stehen häufig in GanganalySELaboren zur Verfügung, werden jedoch aufgrund technischer Anforderungen (teure Hardware/ Software) und mangels speziell ausgebildeten Personals selten in der stationären klinischen Routine oder der poststationären Rehabilitation/Zuhause eingesetzt. Wissenschaftliche Ansätze zur Interpretation und Klassifizierung neurologischer Gangstörungen [SM19] sind daher bislang nicht in die klinische Routine integrierbar. Unter anderem, weil auch einfache und verständliche Zugänge zu solchen komplexen und großen Datensätzen fehlen. Es besteht für die neurologische Rehabilitation daher der Bedarf nach einer zugänglichen, beobachter-unabhängigen (objektiv) und einfach einsetzbaren Technologie, beispielsweise unter Verwendung von Smartphones, für eine valide und zuverlässige Quantifizierung krankheitsspezifischer Gangparameter zur Bewertung und Optimierung des Therapieverlaufs [WF21]. Ein solches System sollte sowohl von Patient*innen, Therapeut*innen als auch Ärzt*innen mit wenig Aufwand und geringem Vorwissen intuitiv anwendbar sein und valide Daten zur Beurteilung des Gangbildes liefern.

Da zudem im Rahmen des SMARTGAIT-Projekts eine KI-basierte Software entwickelt wurde und in der Europäischen Union keine Patente für Software als solche vergeben werden, mussten keine Schutzrechte im Hinblick auf die Entwicklung der Software berücksichtigt werden. Dies ermöglichte eine uneingeschränkte Fokussierung auf die technischen und funktionalen Aspekte der Entwicklung.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zur erfolgreichen Umsetzung von SMARTGAIT war die besondere Konstellation des Verbundkonsortiums notwendig, welche die komplementären Expertisen in den Bereichen (KI,

Bewegungsanalyse, Neurologie) mitbringen. Subsequent fokussierte sich auf die Entwicklung von hochgenauen, echtzeitfähigen Tracking-Systemen für Ganganalysen auf Basis markerloser Skeletterkennung sowie visuell-interaktiven Bewegungsanalysen. Die Universität Konstanz beschäftigte sich mit der biomechanischen und sensomotorischen Analyse des menschlichen Ganges, sowie die wissenschaftliche Evaluation und Validierung von SMARTGAIT. Die Universität Konstanz wurde im Rahmen eines Unterauftrags vom Lurija-Institut bei der Durchführung des integrierten Forschungsansatzes unterstützt. Zusätzlich standen die dem Forschungsprojekt die Kliniken Schmieder als assoziierter Partner zur Verfügung, wodurch ein einzigartiger Zugang zu klinischem Fachpersonal, als auch einer hohen Anzahl an Patient*innen mit verbreiteten neurologischen Krankheitsbildern möglich war.

Eingehende Darstellung

Projektergebnisse

Im Folgenden werden die wichtigsten Projektergebnisse von SMARTGAIT nach Arbeitspaket gruppiert aufgezählt.

AP 1: Anforderungsanalyse

Bearbeitungszeitraum: 01.08.2022 - 31.01.2023

Ziel von AP 1 ist eine systematische Bedarfsanalyse (AP1) zur Ganganalyse in der neurologischen Rehabilitation unter Berücksichtigung und Einbezug aller relevanter Akteure (Anwender*innen, Wissenschaftler*innen, Techniker*innen).

In SMARTGAIT wurde unter anderem eine umfangreiche Umfrage unter Physiotherapeut*innen durchgeführt, um zentrale Krankheitsbilder für das Vorhaben (Schlaganfall, Parkinson, Polyneuropathie) und Anforderungen bei deren Ganganalyse zu identifizieren. Die Ergebnisse wurden in einem **strukturierten Use-Case Katalog** zusammengefasst und in der Fachzeitschrift **pt – Zeitschrift für Physiotherapeuten** veröffentlicht [SL23], um die definierten Anwendungsfälle und Bedürfnisse der Nutzer*innen strukturiert zu dokumentieren. Aus den Umfrageergebnissen wurden **Zielkriterien für die Evaluation der Datenerhebung, Gangparameter und des Systems** abgeleitet, um festzulegen, welche Gangparameter erfasst werden sollten und welche Systemmerkmale erforderlich sind. Darauf basierend wurde eine **Architektur mit Modul-Funktionalitäten und -Schnittstellen** entwickelt, die eine einfache Nutzung und schnelle Auswertung ermöglicht. Zudem wurden **Smartphone-GUI Mock-Ups** erstellt, die als Vorlagen für den initialen Demonstrator dienen und die Nutzerinteraktionen mit dem System zeigen. Parallel dazu wurden **Maßnahmen zur späteren Zulassung als medizinisches Produkt**

ermittelt, unterstützt durch Experten und Workshops. Beispielsweise “Als KMU die MDR meistern” von Dr. Dietmar Schaffarczyk, Regulierungsexperten der ETH Zürich. Ebenfalls gab es einen intensiven Austausch mit der Leiterin des Industrieausschusses der IHK, Sunita Patel, hergestellt, um weitere Unterstützung bei dieser Aufgabe zu erhalten.

AP 2: Integrierter Forschungsansatz

Bearbeitungszeitraum: 01.11.2022 - 31.12.2023

Ziel von AP2 war die **iterative Evaluierung der Durchführbarkeit von SMARTGAIT-Demonstratoren** in den Anwendergruppen inklusive der Aspekte Benutzerfreundlichkeit, Akzeptanz, Sicherheit und Implementierung von SMARTGAIT zur Verbesserung von Gangscreening, Therapiemonitoring und Rehabilitationsmaßnahmen in der stationären und poststationären neurologischen Reha.

Für die **Erstellung von Referenzvideos** wurden verschiedene Aufnahmekonfigurationen festgelegt, einschließlich unterschiedlicher Geräte und Kamerapositionen. Vier Setups wurden definiert, um eine breite Variabilität abzubilden. Es wurden 42 Aufnahmen von gesunden Personen, 136 von Personen mit Gangauffälligkeiten und 12 Vergleichsaufnahmen in Ganganalyselaboren erstellt, die als Grundlage für die weiteren Arbeitspakete und die Analyse von Gangparametern dienen.

Der von der Subsequent GmbH entwickelte Demonstrator wurde nach mehreren Iterationen und Feedback-Einarbeitungszyklen, in denen dieser kontinuierlich verbessert und an die Bedürfnisse der Anwenderinnen und Anwender angepasst wurde, durch die Anwendung der System Usability Scale (SUS) eine **Erprobung im klinischen Umfeld** durch neun Fachpersonen der Kliniken Schmieder und des Lurija-Instituts bewertet. Die Zielvorgabe eines SUS-Scores über 68 zu erreichen, wurde mit einem SUS-Score von 89 weit übertroffen. Dieses herausragende Ergebnis unterstreicht nicht nur die Benutzerfreundlichkeit von SMARTGAIT, sondern verdeutlicht auch die erfolgreiche Umsetzung des iterativen Forschungsansatzes als kontinuierlichen Verbesserungsprozesses. Es betont außerdem das große Potenzial von SMARTGAIT und die Anwendbarkeit in klinischen Umgebungen.

AP 3: Echtzeit-3D-Skeletterkennung Smartphone

Bearbeitungszeitraum: 01.09.2022 - 31.01.2024

Der Schwerpunkt von AP 3 lag auf der Entwicklung und Optimierung von Methoden zur Erzeugung von 3D-Skelettdaten in Echtzeit aus Videoaufnahmen, die mit einer einzigen Kamera, z. B. mit Smartphones, aufgenommen wurden. Diese Arbeiten zielten darauf ab, verschiedene Aufnahmeumgebungen zu unterstützen und gleichzeitig die Genauigkeit und Performance bei nicht-optimalen Aufnahmeumgebungen zu erhalten. Die Ergebnisse dieses Arbeitspakets zeigen erhebliche Fortschritte bei der Kamerakalibrierung, der 3D-Skeletterkennung und der Ganganalyse.

In Arbeitspaket 3.1 wurde die Grundlage für eine genaue **Kamerakalibrierung** gelegt, um eine präzise Bewegungsanalyse auch bei bewegten Kameras zu ermöglichen. Es wurde eine Kalibrierungsmethode entwickelt, die eine Reihe von Geräten wie Smartphones und Tablets unterstützt, ohne dass zusätzliche Sensoren erforderlich sind. Die Kalibrierung kann über einfache Abläufe erfolgen, wie z. B. das Filmen eines druckbaren Schachbrettmusters oder die Aufnahme einer statischen Hintergrundszene. Intrinsische Kameraparameter (z. B. Brennweite und Auflösung) wurden in einem ersten Kalibrierungsschritt bestimmt und blieben gerätespezifisch. Extrinsische Parameter (z. B. Kameraausrichtung und -bewegung) wurden für jede Aufnahme dynamisch mit Hilfe von Structure-from-Motion-Verfahren abgeleitet. Diese Fortschritte führten zu einem robusten, automatischen Verfahren zur Extraktion von intrinsischen und extrinsischen Kameraparametern aus Videoaufzeichnungen, die für eine spätere Analyse verwendet werden konnten.

Arbeitspaket 3.2 konzentrierte sich auf die Entwicklung fortschrittlicher Machine-Learning-Modelle, welche speziell auf die Erfassung und Analyse von Gangbewegungen zugeschnitten sind. Die Arbeit umfasste die Entwicklung neuartiger Methoden, welche die einzigartigen Eigenschaften der menschlichen Bewegung nutzen, um **3D-Skelettbewegungsdaten** aus einer einzigen Videoaufnahme zu rekonstruieren. Diese Modelle wurden von Subsequent so entwickelt, dass sie die Herausforderungen von Einzelkamerakonfigurationen, wie z. B. Tiefenunschärfe und Verdeckungen, bewältigen und gleichzeitig eine hohe Präzision bei der Bewegungserfassung gewährleisten können. Durch innovatives algorithmisches Design und gezielte Optimierungen erreichten diese Methoden eine bemerkenswerte Präzision bei der Rekonstruktion von 3D-Skelettbewegungen und ermöglichten die Erfassung feiner Nuancen in Gangmustern [BZ24]. Durch die Integration eines neuen, äußerst robusten Personendetektormodells zeigte das System erhebliche Verbesserungen bei der Handhabung komplexer Umgebungen mit unterschiedlichen Hintergründen, Beleuchtungen und Verdeckungen. Die daraus resultierenden Fortschritte gewährleisten nicht nur die hohe Genauigkeit der Skelettverfolgung, sondern auch die notwendige Robustheit, die für verschiedene Aufnahmebedingungen im klinischen Alltag erforderlich ist.

In Arbeitspaket 3.3 wurde der Schwerpunkt auf die **Extraktion aussagekräftiger Ganganalysemerkmale** gelegt. Durchgeführte Nutzerstudien wie die im Rahmen von AP 2 durchgeführte Befragung von 9 Physiotherapeut*innen [SL23] halfen bei der Identifizierung kritischer Merkmale, wie Gelenkwinkel, Winkelgeschwindigkeiten und Schrittlängen, die für die Implementierung priorisiert wurden. Metrische Merkmale der Ganganalyse, wie Geschwindigkeiten und Winkeländerungen, wurden durch Vorverarbeitung und Normalisierung der Rohdaten des 3D-Skeletts abgeleitet. In der Folge wurden auch Techniken zur Standardisierung der Gelenkpositionen in einem globalen Koordinatensystem entwickelt, um die Vergleichbarkeit und Verwendbarkeit der Daten weiter zu verbessern.

Schließlich wurden in Arbeitspaket 3.4 umfangreiche **Leistungsoptimierungen** vorgenommen, um sicherzustellen, dass die entwickelten Methoden in Echtzeit arbeiten können. Dazu gehörten innovative Modellarchitekturen und optimierte Datenverarbeitungspipelines, die es der SMARTGAIT-Plattform ermöglichten, Echtzeitleistung bei Standard-Videoauflösungen und Bildraten zu erreichen, z.B. kann mit den resultierenden Verfahren bei einer Videoauflösung von 4k UHD (3840x2160) eine Bildwiederholrate von 30fps erreicht werden.

AP 4: Ganganalyse

Bearbeitungszeitraum: 01.11.2022 - 31.01.2024

Die Arbeiten in Arbeitspaket 4 konzentrierten sich auf die Identifizierung, Definition und Implementierung von krankheitsspezifischen Gangparametern in die SMARTGAIT-Analysepipeline. Ziel war die Entwicklung eines automatisierten Systems, das in der Lage ist, sowohl zeitliche als auch räumliche Gangparameter zu analysieren und dabei klinisches Fachwissen mit modernsten maschinellen Lerntechniken zu verbinden.

Das Arbeitspaket begann mit einer systematischen Literaturanalyse, um für klinische Anwendungen relevante Gangparameter zu ermitteln und zu definieren, insbesondere solche, die im Zusammenhang mit neurologischen Störungen stehen. Ergänzt wurden diese ersten Arbeiten durch die umfangreiche Befragung von Fachleuten in Zusammenarbeit mit der Universität Konstanz und dem Lurija Institut. Die Ergebnisse der Befragung, die wertvolle Erkenntnisse über die Anforderungen an eine technologiegestützte Ganganalyse in der Neurologie liefern, wurden im März 2023 in der Zeitschrift für Physiotherapeuten veröffentlicht [SL23]. Durch diese Zusammenarbeit wurde sichergestellt, dass die ermittelten Parameter sowohl klinisch relevant als auch praktikabel für die Integration in automatisierte Systeme sind. Aufbauend auf dieser Grundlage wurde in Zusammenarbeit mit der Universität Konstanz eine Taxonomie der Gangparameter entwickelt. Anschließend wurden die in Arbeitspaket 3 entwickelten Methoden zur Erhebung von Skelettdaten überprüft, um zu bewerten, welche Parameter zuverlässig aus den aufgezeichneten Daten extrahiert werden können. Diese Überprüfung diente der Erstellung eines umfassenden Katalogs von Gangparametern, einschließlich zeitlicher und räumlicher Metriken, sowie der Bewertung, in welchem Umfang jedes klinische Gangmuster mit dem SMARTGAIT-System analysiert werden kann.

Der nächste wichtige Schritt im SMARTGAIT-Vorhaben war die Integration dieser definierten Gangparameter in die automatische Analysepipeline. Um dies zu erreichen wurde ein neuartiges Machine-Learning-Modell entwickelt, welches in der Lage ist, verschiedene Phasen des Gangzyklus aus den gesammelten Skelettdaten zu erkennen und zu segmentieren. Das Modell wurde so konzipiert, dass es kritische Ereignisse wie Bodenkontakte, den Beginn und das Ende von Schritten und Phasen wie Stand, Schwung und Doppelstand präzise identifizieren kann. Die aus diesem Modell gewonnenen

zeitlichen Daten wurden in Kombination mit den 3D-Skelettdaten weiterverarbeitet, um räumliche Gangparameter wie zum Beispiel Schrittlänge oder Schrittweite zu extrahieren. Diese Fortschritte ermöglichten die präzise Quantifizierung von Gangmerkmalen sowohl bei typischen als auch bei pathologischen Bewegungsmustern.

Schließlich wurde die fertige Analysepipeline auf die während des AP 2.1 gesammelten Referenzvideos angewandt, um einen robusten Datensatz für die wissenschaftliche Validierung in AP 6 zu erzeugen und bereitzustellen. Auf diese Weise wurde sichergestellt, dass die Ergebnisse des Systems nicht nur genau, sondern auch klinisch aussagekräftig sind, was die Grundlage für die Anwendung in verschiedenen Bereichen der Gesundheitsversorgung und Forschung bildet.

AP 5: Visual Analytics

Bearbeitungszeitraum: 01.02.2023 - 31.03.2024

Das Ziel von AP 5 war die Entwicklung von innovativen Visual Analytics Ansätzen um die die großen heterogenen Datenmengen und abgeleiteten Ganganalyseparameter für Anwender*innen zugänglich zu machen. Zu diesem Zweck hat die Subsequent GmbH ein **modulares und adaptives System konzipiert** und in Form eines End-to-End Demonstrator auf Basis moderner Web-Technologien realisiert und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt, welches plattformunabhängig eingesetzt werden kann (Smartphone, Laptop, etc.). Der Begrüßungsbildschirm des entwickelten Demonstrators ist in **Abbildung 2** gezeigt.

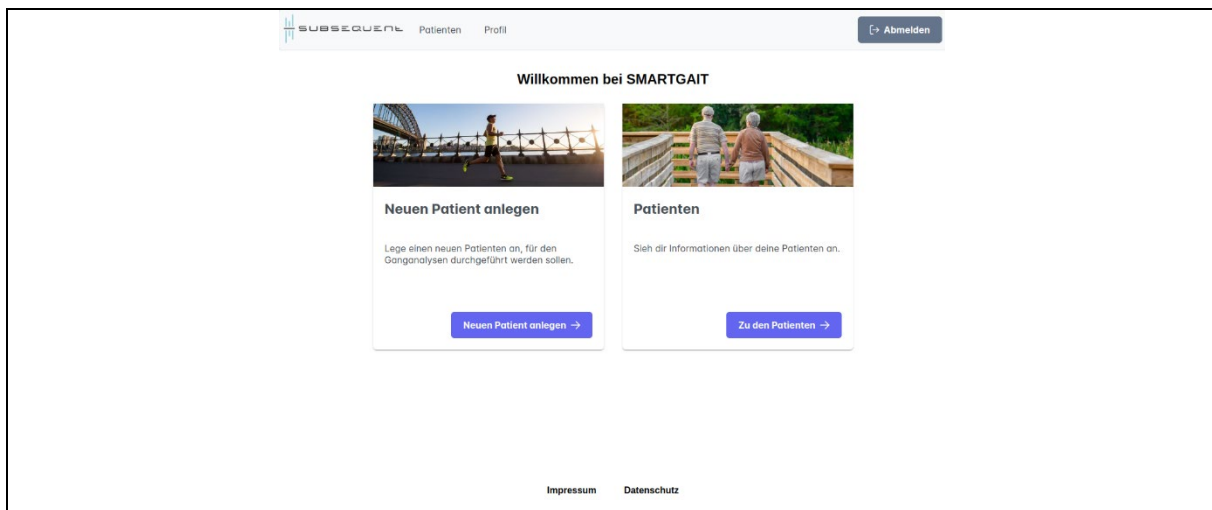
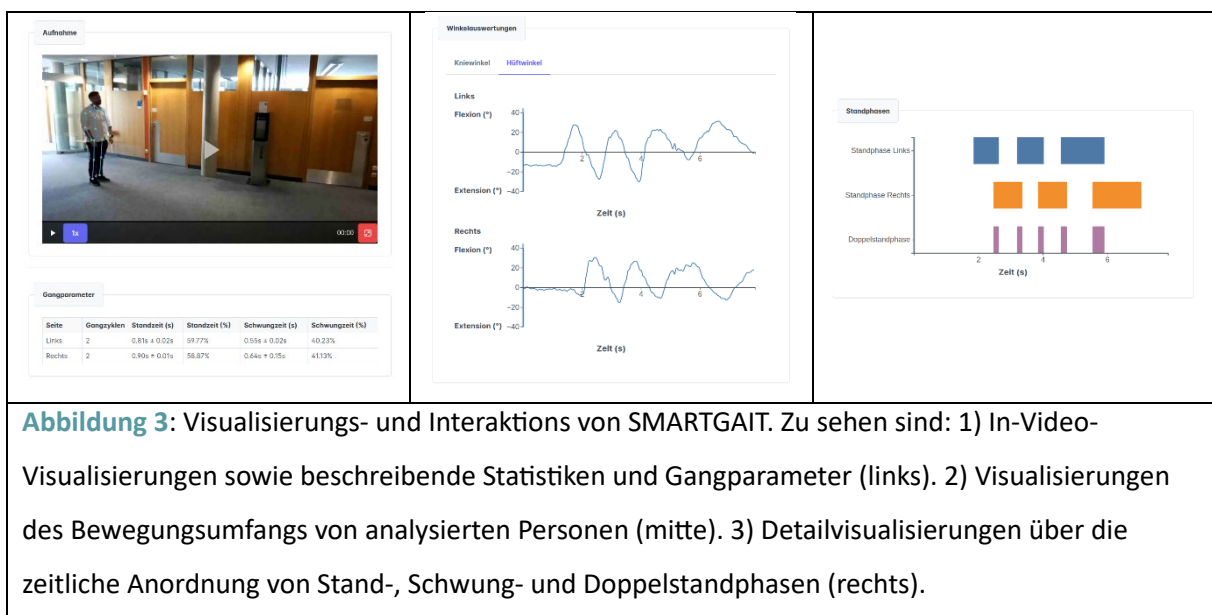


Abbildung 2: Begrüßungsbildschirm des webbasierten SMARTGAIT Demonstrators

Ein weiteres Ziel von AP 5 war die Entwicklung von **Ähnlichkeitsmaßen für heterogene Ganganalysedaten**. Für Therapeutinnen und Ärztinnen können diese Informationen bei der Validierung und Optimierung der Therapiepläne helfen. Für Patient*innen können diese Informationen beitragen die Partizipation und Motivation in der Rehabilitation zu steigern. Diese Arbeit führte unter anderem

zur Einreichung und Veröffentlichung einer Studie im Oktober 2023 im Journal Digital Biomarkers eingereicht und 2024 veröffentlicht wurde [HS24]. Ziel dieser Studie ist eine Bewertung verschiedener Techniken zur Gruppierung von Patienten mit neurologischen Störungen, um Behandlungsoptionen zu optimieren. Es fasst vielversprechende Ansätze zusammen, betont jedoch auch die Notwendigkeit von Fortschritten, insbesondere bei markerlosen optischen Tracking-Systemen.

Im Rahmen von AP 5 wurden ebenfalls verständliche **Visualisierungs- und Interaktionsdesigns** entwickelt, welche die komplexen Daten auf intuitive Art und Weise den unterschiedlichen Anwendergruppen von SMARTGAIT zur Verfügung stellen sollen. Einige ausgewählte Beispiele für die entwickelten Visualisierungen sind in **Abbildung 3** dargestellt.



AP 6: Wissenschaftliche Validierung

Bearbeitungszeitraum: 01.08.2023 - 31.03.2024

Das Ziel der Arbeiten in AP 6 war die wissenschaftliche Überprüfung der Validität sowie der praktischen Nutzbarkeit der vom SMARTGAIT erhobenen Analysen im Abgleich der SMARTGAIT-Daten mit einem System im Goldstandard (z.B. Vicon).

Für die Evaluation und das Training der KI-Verfahren wurde der notwendige Referenzdatensatz um weitere Aufnahmen erweitert. Dazu wurden Aufnahmen mit 20 Studentinnen und Studenten der Universität Konstanz durchgeführt, sowie mit 24 Patientinnen und Patienten der Kliniken Schmieder. Jeweils 8 Patienten waren Betroffene der Krankheiten Schlaganfall, Parkinson und Polyneuropathie. Es wurden jeweils 10 Aufnahmen pro Person durchgeführt, insgesamt also über 400 Aufnahmen, welche mit jeweils 4 Videokameras und gleichzeitig mit dem Referenzsystem VICON aufgezeichnet wurden. Dadurch wurde der bereits existierende Datensatz für Validierung und Training der Deep Learning

Methoden um ca. 1.800 Videoaufzeichnungen mit Referenzdaten erweitert. Eine skizzenhafte Darstellung des Aufnahmesetups ist in **Abbildung 4** dargestellt.

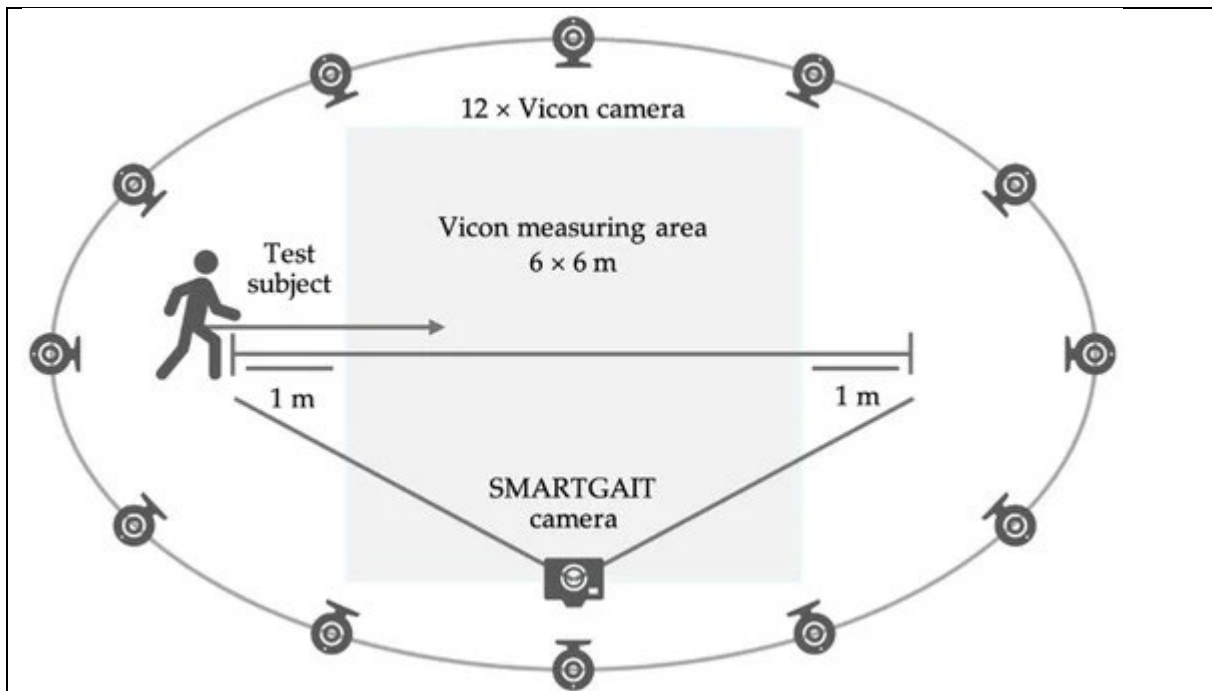


Abbildung 4: Skizzenhafte Darstellung des Versuchsaufbaus für die wissenschaftliche Validierung.

Zusätzlich gab es in Zusammenarbeit mit der Universität Konstanz eine **Definition von Validierungskriterien und –Methoden**. Für die Bewegungskinematiken wurden Korrelation zwischen SMARTGAIT und VICON, sowie der Root Mean Squared Error (RMSE) als wichtigste Kriterien definiert. Zusätzlich wurde unter Verwendung von Statistical Parametric Mapping überprüft, ob ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen SMARTGAIT und Referenzsystem bei der Datenerhebung auftritt.

Die wissenschaftliche Validierung von SMARTGAIT in AP 6 resultierte in 8 Publikationen, 2 Auszeichnungen sowie 3 Abschlussarbeiten. Eine detaillierte Übersicht der Ergebnisse ist in Kapitel "Erfolgte oder geplanten Veröffentlichung" beschrieben. Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass eine hohe Übereinstimmung mit dem Goldstandard sowie geringe Fehlerwerte (MSE, MAE) festgestellt wurden. Beispielsweise konnte gezeigt werden, dass Subsequent im Vergleich zum Goldstandard eine Genauigkeit bei der Ermittlung von Gelenkwinkelabweichungen (z.B. Knie- und Hüftbeugung) von weniger als 2° RMSE (Root Mean Square Error) erzielen konnte.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Das Teilvorhaben der Subsequent GmbH zum Verbundprojekt SMARTGAIT wurde zum 31.07.2024 abgeschlossen. Die dabei anvisierten Ziele für die qualitative als auch quantitative Evaluation wurden dabei nicht nur erreicht, sondern weitestgehend weit übertroffen. Die dabei wichtigsten zu erreichenden Kennzahlen zur Messung der Projekterfolgs sind:

1. **Positive Testung der Durchführbarkeit von SMARTGAIT seitens Anwender*innen (System Usability Scale Score > 68):** Der von der Subsequent GmbH entwickelte Demonstrator wurde nach mehreren Iterationen und Feedback-Einarbeitungszyklen, in denen dieser kontinuierlich verbessert und an die Bedürfnisse der Anwenderinnen und Anwender angepasst wurde, durch die Anwendung der System Usability Scale (SUS) durch neun Fachpersonen der Kliniken Schmieder und des Lurija-Instituts bewertet. Die Zielvorgabe eines SUS-Scores über 68 zu erreichen, wurde weit übertroffen. Es wurde ein Score von 89 ermittelt. Dieses herausragende Ergebnis unterstreicht nicht nur die Benutzerfreundlichkeit von SMARTGAIT, sondern verdeutlicht auch die erfolgreiche Umsetzung des iterativen Forschungsansatzes als kontinuierlichen Verbesserungsprozesses. Es zeigt somit das enorme Potenzial von SMARTGAIT und die Anwendbarkeit in klinischen Umgebungen.
2. **Positive Validierung von SMARTGAIT mit 30 Personen (Korrelationen zum Goldstandard ≥ 0.7):** Die für SMARTGAIT zugrundeliegenden Technologien wurden in einer aufwändigen Studie mit über 40 Personen im Vergleich zu einem Goldstandard-Referenzsystem (VICON) verglichen, evaluiert und die Ergebnisse in renommierten Zeitschriften publiziert (siehe Kapitel "Erfolgte oder geplanten Veröffentlichung"). Dabei konnte in verschiedenen Szenarien gezeigt werden — sowohl für gesunde Personen als auch für Personen, die an neurologischen Erkrankungen leiden — dass eine Korrelation im Vergleich zu Goldstandardsystemen ≥ 0.7 immer erzielt werden konnte. Dies ist durch die neuartigen SMARTGAIT-Systeme sogar bei von Schlaganfällen betroffenen Personen für Gelenkinematiken aus der Frontalperspektive möglich, selbst wenn diese nur von einer einzelnen Kamera aus der Sagittalperspektive aufgenommen wurden. Dabei konnte für alle Gelenkinematiken durchweg ein Root Mean Squared Error (RMSE) von 2° - 4° erreicht werden. Zusätzliche statistische Auswertungen, beispielsweise durch ein Statistical Parametric Mapping, zeigen, dass die von der Subsequent GmbH erzielten Ergebnisse keine statistisch signifikanten Unterschiede zum Goldstandard-Referenzsystem (VICON) aufzeigen. Diese Ergebnisse verdeutlichen das enorme Potenzial von SMARTGAIT für die Erhebung von qualitativ hochwertigen Daten auf Basis einzelner Videoaufnahmen eines Smartphones.

Die übertroffenen Kennzahlen zur Messung des Projekterfolgs zeigen das enorme Potenzial der im SMARTGAIT Projekt entwickelten Technologien und Verfahren. Es existiert von Seiten Industrie und Forschung bereits großes Interesse an der Nutzung der weiterentwickelten SMARTGAIT-Systeme nach Projektende. In der Forschung ist durch den Lehrstuhl für Evidenzbasierte physiotherapeutische Versorgung der Technischen Hochschule Ulm beispielsweise geplant, Ganganalysen von Patientinnen und Patienten beim Perturbationstraining zur Sturzprävention aktiv einzusetzen. Von Seiten der Industrie haben die Kliniken Schmieder, die als assoziierter Partner Teil des SMARTGAIT-Projekts waren,

sowie mehrere Sanitätshäuser und Sportverbände, bereits ihr Interesse an einer Nutzung der weiterentwickelten SMARTGAIT-Technologien bekundet. Die Subsequent GmbH verfolgt nach dem Projektabschluss, wie in der Vorhabenbeschreibung beschrieben, die Weiterentwicklungen der Technologien und Verfahren hin zu einem einsatzfähigen Produkt in Form einer Smartphone-App für iOS und Android.

Fortschritt des Stand der Technik während der Projektlaufzeit

In der Evaluierungsphase des SMARTGAIT-Projekts wurde die Qualität der entwickelten Verfahren mit dem Stand der Technik im Bereich der markerlosen Ganganalyse verglichen, zum Beispiel den vorgestellten Methoden von Horsak et al. Ende 2023 [HE23]. Obwohl diese Methode erst nach Abschluss der Entwicklung und während der Evaluationsphase von SMARTGAIT verfügbar war, stellt sie aufgrund ihrer Ähnlichkeit zum in SMARTGAIT betrachteten Anwendungsgebiet einen wertvollen Vergleichspunkt dar.

Das von Horsak et al. vorgestellte System verwendet zwei Smartphone-Kameras mit bekannten intrinsischen und extrinsischen Kalibrierungsparametern und basiert im Wesentlichen auf der OpenCap-Software [UF23]. Die von Horsak et al. verwendete Pipeline beginnt mit der Anwendung eines 2D-Pose-Estimation-Modells, das auf dem bekannten OpenPose-Ansatz basiert [CZ17]. Dadurch werden für jedes Frame der Videoaufnahmen jeder Kamera 2D-Skelettposen extrahiert. Die 2D-Keypoints dieser Skelette werden anschließend mit Hilfe der kalibrierten Kameraparameter in den 3D-Raum projiziert. Ein Triangulationsschema integriert dabei die 2D-Projektionen aus beiden Kameraansichten, sodass ein vollständiges 3D-Skelett für jedes Videoframe erzeugt wird. Zur Verfeinerung der rekonstruierten Skelettposen wird eine zeitliche Filterung auf Basis eines rekurrenten neuronalen Netzes (RNN) durchgeführt, wodurch Ungenauigkeiten der Skelettdaten einzelner Frames kompensiert und physikalisch unplausible Bewegungen reduziert werden. Die von Horsak et al. berichteten Evaluationsmetriken konzentrierten sich in erster Linie auf Gelenkwinkelabweichungen, Robustheit gegenüber Rauschen und zeitliche Kontinuität der rekonstruierten Gangmuster. Anhand dieser Metriken wurde das SMARTGAIT-System mit den Ergebnissen des Zwei-Kamera-Systems von Horsak et al. verglichen [BZ24]. Das SMARTGAIT-System zeigte eine überlegene Genauigkeit in Bezug auf Gelenkwinkelabweichungen in allen untersuchten Gelenken. Dies ist besonders signifikant, da SMARTGAIT nur eine einzelne Smartphone-Kamera verwendet, während die Methode von Horsak et al. ein Zwei-Kamera-System mit kalibrierten intrinsischen und extrinsischen Parametern nutzt.

Bemerkenswert ist, dass das SMARTGAIT-System diese Ergebnisse nicht nur für natürliche Gangmuster, sondern auch für atypische und pathologische Bewegungen erzielt, während der Ansatz von Horsak et al. bei atypischen Gangmustern eine geringere Genauigkeit aufweist. Diese Diskrepanz könnte auf das

rekurrente neuronale Netz (RNN) zurückzuführen sein, das für die zeitliche Filterung in der Methode von Horsak et al. verwendet wird. Möglicherweise wurde es auf Daten trainiert, die überwiegend gesunde Gangmuster repräsentieren, was zu gelernten Annahmen führt, die sich nicht gut auf atypische Bewegungen verallgemeinern lassen. SMARTGAIT zeigte außerdem eine bemerkenswerte Fähigkeit zur genauen Rekonstruktion von Gelenkwinkeln aus anderen Ebenen als der, in der die Videoaufnahme gemacht wurde. Besonders hervorzuheben ist die erfolgreiche Rekonstruktion von frontalen Gelenkwinkeln aus Aufnahmen der Sagittalebene. Dies unterstreicht die Fähigkeit des Systems, Gelenkwinkel mit fast 90 Grad Drehung außerhalb der Bildebene zu schätzen. Diese Fähigkeit bestätigt, dass SMARTGAIT im Gegensatz zu Methoden wie der von Horsak et al. im Fortschritt des Standes der Technik während der Projektlaufzeit in der Lage ist, vollständige Gangrekonstruktionen aus beliebigen Perspektiven durchzuführen, ohne dass eine zweite Kamera erforderlich ist.

Erfolgte oder geplanten Veröffentlichung

Die im SMARTGAIT Projekt erzielten Ergebnisse wurden in mehreren Publikationen in Form von Zeitschriftenartikeln, Konferenzbeiträgen, sowie Bachelor- und Masterarbeiten publiziert.

Publikationen

Im Folgenden werden die einzelnen Publikationen chronologisch sortiert aufgezählt und jeweils eine kurze Beschreibung des Inhalts der Publikation gegeben.

1. [SL23] Jana Stürner, Joachim Liepert, Manuel Stein, Markus Gruber und Michael Schwenk. **“Technologiegestützte -Ganganalyse in der Neurologie.”** pt Zeitschrift für Physiotherapeuten, 2023.

Für eine optimale sowie bedarfsorientierte Planung und Durchführung der Therapie stellt die Ganganalyse einen Bestandteil der physiotherapeutischen Arbeit dar. Um eine zielorientierte Entwicklung von SMARTGAIT zu gewährleisten, wurden eine Befragung mit mehreren Expert*innen durchgeführt, mit deren Hilfe ermittelt wurde, welche Informationen einer technologiegestützten Ganganalyse für praktizierendes Physiotherapiepersonal im Bereich der Neurorehabilitation interessant sind und welche Kriterien für die regelmäßige Nutzung dieser Art von Analyse ausschlaggebend sind.

2. [BZ23] Philipp Barzyk, Philip Zimmermann, Manuel Stein, Markus Gruber. **“AI-Smartphone Markerless Motion Capturing of Counter-Movement-Jump Kinematics.”** European College of Sports Science, 2023.

Die Bewegungen der unteren Extremitäten während eines Countermovement-Jumps wurden mit Vicon (Goldstandard) und frontal aufgenommenen Smartphone-Videos (neue Methode) erfasst. Das KI-System berechnete 23 anatomische Schlüsselpunkte und Gelenkwinkel mithilfe eines trainierten Convolutional Neural Networks, und die Ergebnisse wurden durch den Vergleich der Winkelverläufe für Hüfte, Knie und Sprunggelenk mit Vicon-Daten validiert, wobei hohe Übereinstimmung sowie geringe Fehlerwerte (MSE, MAE) festgestellt wurden.

3. [BZ24] Philipp Barzyk, Philip Zimmermann, Manuel Stein, Daniel A. Keim, und Markus Gruber. **“AI-smartphone markerless motion capturing of hip, knee, and ankle joint kinematics during countermovement jumps.”** European Journal of Sport Science, 2024.

In dieser Studie wurde ein neues, markerloses KI-Bewegungserfassungssystem, das auf Smartphone-Videos basiert, zur Analyse von Hüft-, Knie- und Sprunggelenkwinkeln während Countermovement-Jumps (CMJs) validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass das System Hüft- und Kniewinkel mit hoher Präzision erfassen kann ($r=0,96$ und $r=0,99$), während bei den Sprunggelenkwinkeln ($r=0,87$) leichte Abweichungen festgestellt wurden.

4. [BB24] Philipp Barzyk, Alina-Sophie Boden, Justin Howaldt, Jana Stürner, Philip Zimmermann, Daniel Seebacher, Joachim Liepert, Manuel Stein, Markus Gruber, and Michael Schwenk. **“Steps to Facilitate the Use of Clinical Gait Analysis in Stroke Patients: The Validation of a Single 2D RGB Smartphone Video-Based System for Gait Analysis.”** Sensors, 2024.

Die Studie validierte SMARTGAIT, ein KI-basiertes System zur Ganganalyse bei der Rehabilitation von Schlaganfallpatienten. Die Ergebnisse zeigen eine hohe Übereinstimmung mit dem Vicon-System im kosten- und zeitaufwändigen Goldstandard-System, insbesondere für kinematische Daten in der Sagittalebene ($r \geq 0,79$), und unterstreichen das Potenzial von SMARTGAIT, Ganganalysen durch die Nutzung eines einzigen Smartphones klinisch zugänglicher und praktikabler zu machen.

5. [HS24] Jonas Hummel, Michael Schwenk, Daniel Seebacher, Philipp Barzyk, Joachim Liepert, und Manuel Stein. **“Clustering approaches for gait analysis within neurological disorders: a narrative review.”**, Digital Biomarkers, 2024.

Die steigende Prävalenz neurologischer Erkrankungen unterstreicht die Bedeutung einer objektiven Ganganalyse, doch bestehende Technologien sind oft zu kostspielig, zeitaufwendig

oder unpraktisch für den klinischen Alltag. Diese Übersichtsarbeit bewertet 13 Studien zu Clustering-Methoden für Patienten mit neurologischen Erkrankungen und zeigt, dass nur wenige Ansätze eine hohe Prozessreife und klinische Anwendbarkeit erreichen, wobei Verbesserungen bei markerlosen optischen Trackingsystemen, experimentellen Designs und externer Validierung notwendig sind, um die Patientenversorgung zu optimieren.

6. [SB24] Michael Schwenk, Philipp Barzyk, Alina Boden, Daniel Seebacher, Philip Zimmermann, Manuel Stein, Markus Gruber. **“AI-based markerless single-camera motion analysis for estimating knee and hip joint kinematics during gait.”** 42nd Conference of the International Society of Biomechanics in Sports (ISBS), 2024.

In dieser Studie wurde ein markerloses Bewegungsanalysetool (SMARTGAIT) getestet, um Knie- und Hüftkinematik in der Sagittal- und Frontalebene beim Gehen von gesunden Probandinnen und Probanden zu analysieren. Die Ergebnisse zeigen, dass SMARTGAIT in der Sagittalebene ($r \geq 0,989$; $RMSE \leq 2,6^\circ$) eine sehr hohe Genauigkeit aufweist, auch in der Frontalebene ($r \geq 0,789$; $RMSE \leq 3,9^\circ$) wird durchgehend eine gute Präzision erreicht, dies ist insbesondere beachtlich, da ausschließlich aus der sagittalebene aufgenommen wurde.

7. [BS24] Philipp Barzyk, Jana Stürner, Alina Boden, Manuel Stein, Daniel Seebacher, Joachim Liepert, Markus Gruber, und Michael Schwenk. **“SMARTGAIT: KI-basierte Ganganalyse aus Smartphone-Videoaufnahmen in der Neurorehabilitation”.** neuroreha, 2024.

Neurologische Erkrankungen wie Schlaganfall oder Parkinson führen zu spezifischen Gangstörungen, die eine fundierte Ganganalyse für individuelle Therapieanpassungen erfordern. Das SMARTGAIT-Projekt entwickelt eine markerlose Bewegungserkennung auf Basis von Smartphone-Videos, die kostengünstige, mobile und präzise Ganganalysen direkt in klinischen oder alltäglichen Umgebungen ermöglicht und so Diagnostik, Therapieplanung und Verlaufsbeobachtung vereinfacht und verbessert.

8. [BB24a] Alina-Sophie Boden, Philipp Barzyk, Jana Stürner, Philip Zimmermann, Daniel Seebacher, Joachim Liepert, Manuel Stein, Markus Gruber, Michael Schwenk. **“Validation of a single 2D RGB Smartphone Video-Based Gait-Analysis-System on Stroke Patients with and without Walking Aid”**, Gemeinsame Jahrestagung der DGNR e. V. und DGNKN e. V., 2024.

Die 3D-Bewegungserfassung gilt als Goldstandard der Ganganalyse, ist jedoch in klinischen

Anwendungen aufgrund praktischer und technischer Herausforderungen schwer umsetzbar. Neue Deep-Learning-Ansätze bieten vielversprechende Lösungen, müssen jedoch noch hinsichtlich Genauigkeit, praktischer Anwendbarkeit, der Analyse pathologischer Gangmuster und der Nutzung bei externen Gehhilfen validiert werden. Eine SPM-Analyse ergab signifikante Korrelationen zwischen VICON und SMARTGAIT für alle Winkelverläufe mit Ausnahme der Kniebeugung/-streckung eines Teilnehmers, der mit Hilfsmitteln ging ($p < .14$). Von den RMSE-Werten erreichten 70 % bei Teilnehmern mit Gehhilfen und 95 % bei Teilnehmern ohne Gehhilfen den angestrebten Schwellenwert von $< 5^\circ$.

Auszeichnungen und Preise

Zu erwähnen ist, dass zwei der oben genannten SMARTGAIT-Publikationen mit renommierten Preisen ausgezeichnet worden sind. Publikation 2 [BZ23] wurde mit dem Young Investigator Award an der ECSS Paris 2023 ausgezeichnet und Publikation 8 [BB24a] wurde mit dem Kurzvortragspreis der Deutschen Gesellschaft für Neurorehabilitation (DGNR e. V.) ausgezeichnet.

Abschlussarbeiten

Zusätzlich zu den oben genannten Publikationen wurde im Verbundvorhaben SMARTGAIT auch Bachelor- und Masterarbeiten sowie Dissertationen mit relevanten Forschungs- und Validationsarbeiten durchgeführt. Dazu zählen:

1. Bianca Schröder. "Human Pose Estimation-Based Gait Analysis for Medical Application", Masterarbeit, 2023.
2. Yannick Jahn, "Gait Analysis in Patients with Neurological Diseases Based on Human Pose Estimation Data", Bachelorarbeit, 2023.
3. Alina-Sophie Boden. "Validierung eines markerlosen Ganganalysesystems für den therapieorientierten Einsatz. mit und ohne Begleitperson", Bachelorarbeit, 2023.
4. Jonas Hummel. "Novel Approaches to Assessing Gait Symmetry and Normality in Neurological Patients", Masterarbeit, 2024.
5. Philipp Barzyk. "Motor Learning in Sports and Rehabilitation: From Classical Strategies Towards Innovative Technologies". Dissertation, 2024.

Vorträge, Artikel und Interviews

Weiterhin wurde das SMARTGAIT Projekt von Subsequent im Rahmen mehrerer Veranstaltungen und Konferenzen sowie in Artikeln und Interviews öffentlichkeitswirksam vorgestellt. Insgesamt wurde das Verbundvorhaben SMARTGAIT ab 2023 auf über 20 renommierten Veranstaltungen vorgestellt und war Thema von vier Podcasts und Interviews. SMARTGAIT wurde dabei auch mehreren Ministerinnen und

Ministern sowie auch Ministerpräsident Kretschmann vorgestellt und ist dabei auf großes Interesse gestoßen. Im Folgenden wird eine Übersicht über die Veranstaltungen, Interviews und Konferenzen gegeben, in denen das SMARTGAIT Projekt und dessen Ergebnisse vorgestellt wurde.

Name	Typ	Datum
TECH-Workshop BISP	Workshop	08.03.23
BioLago Konstanzer Forum KI in der Medizin	Keynote	17.05.23
Vetter Pharma Gastvortrag	Keynote	06.06.23
Digitalgipfel Baden-Württemberg	Keynote	22.06.23
Sommerfeier Landesvertretung Baden-Württemberg (Stallwächterparty)	Keynote und Stand	06.07.23
Gastvortrag Absolventenfeier Universität Konstanz	Keynote	14.07.23
Interaktive Ganganalyse aus Smartphone-Videoaufnahmen	Artikel	16.09.23
Sichere und kosteneffiziente Analyse neurologischer Gangstörungen mit KI	Interview	13.09.23
Rethinking Smart Services: Menschen durch die Augen des Computers	Keynote	19.09.23
IHK Gesundheitswirtschaft Baden-Württemberg	Keynote	12.10.23
Innovation Forum Medizintechnik	Keynote	19.10.23
Revolution im Gesundheitswesen: Einblick in die KI-gestützte Bewegungsanalyse von Subsequent	Artikel	10.11.23
IHK Gesundheitswirtschaftsausschuss Stuttgart	Keynote	21.11.23
BMBF-Mittelstandskonferenz	Konferenz	21.11.23
Besuch Oberbürgermeister Stadt Konstanz	Meeting	28.11.23
Jahresveranstaltung Forum Gesundheitsstandort Baden-Württemberg	Stand	06.12.23
Wie Smart Services und künstliche Intelligenz KMU voranbringen	Podcast	29.11.23
BioLAGO meets Danish Life Science Cluster	Keynote	15.01.24
Landeskongress Gesundheit Baden-Württemberg	Stand	26.01.24
Hannovermesse	Stand	23.04.24

Referenzen

1. [PB04] Pearson OR, Busse ME, van Deursen RW, Wiles CM. Quantification of walking mobility in neurological disorders. *QJM*. 2004 Aug;97(8):463-75. doi: 10.1093/qjmed/hch084. PMID: 15256604.
2. [BA17] Baker JM. Gait Disorders. *Am J Med*. 2018 Jun;131(6):602-607. doi: 10.1016/j.amjmed.2017.11.051. Epub 2017 Dec 27. PMID: 29288631.
3. [SM19] Schniepp R, Möhwald K, Wuehr M. Clinical and automated gait analysis in patients with vestibular, cerebellar, and functional gait disorders: perspectives and limitations. *J Neurol*. 2019 Sep;266(Suppl 1):118-122. doi: 10.1007/s00415-019-09378-x. Epub 2019 May 27. PMID: 31134375.

4. [WF21] Watson F, Fino PC, Thornton M, Heracleous C, Loureiro R, Leong JH. Use of the margin of stability to quantify stability in pathologic gait - a qualitative systematic review. *BMC Musculoskelet Disord*. 2021 Jun 28;22(1):597. doi: 10.1186/s12891-021-04466-4. PMID: 34182955; PMCID: PMC8240253.
5. [DT21] D'Antonio E, Taborri J, Mileti I, Rossi S, Patané F. Validation of a 3D Markerless System for Gait Analysis Based on OpenPose and Two RGB Webcams. *IEEE Sensors Journal*. 2021;21(15):17064-17075. doi: 10.1109/JSEN.2021.3081188.
6. [AO20] Albert JA, Owolabi V, Gebel A, Brahms CM, Granacher U, Arrnrich B. Evaluation of the Pose Tracking Performance of the Azure Kinect and Kinect v2 for Gait Analysis in Comparison with a Gold Standard: A Pilot Study. *Sensors (Basel)*. 2020 Sep 8;20(18):5104. doi: 10.3390/s20185104. PMID: 32911651; PMCID: PMC7571213.
7. [CS17] Cao Z, Simon T, Wie S-E, Sheikh Y. Realtime multi-person 2d pose estimation using part affinity fields. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2017:7291-7299.
8. [SX19] Sun K, Xiao B, Liu D, Wang J. Deep high-resolution representation learning for human pose estimation. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2019:5693-5703.
9. [CX20] Cheng B, Xiao B, Wang J, Shi H, Huang TS, Zhang L. Higherhrnet: Scale-aware representation learning for bottom-up human pose estimation. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2020:5386-5395.
10. [RI19] Raaj Y, Idrees H, Hidalgo G., Sheikh Y. Efficient online multi-person 2d pose tracking with recurrent spatio-temporal affinity fields. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2019:4620-4628.
11. [NH17] Newell A, Huang Z, Deng J. Associative embedding: End-to-end learning for joint detection and grouping. January 2017.
12. [NY16] Newell A, Yang K, Deng J. Stacked hourglass networks for human pose estimation. In Bastian Leibe, Jiri Matas, Nicu Sebe, and Max Welling, editors, *Computer Vision – ECCV 2016*, pages 483–499. Cham, 2016.
13. [GN18] Güler RA, Neverova N, Kokkinos I. Densepose: Dense human pose estimation in the wild. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2018:7297-7306.
14. [BK16] Bogo F, Kanazawa A, Lassner C, Gehler P, Romero J, Black MJ. Keep it SMPL: Automatic estimation of 3D human pose and shape from a single image. *European conference on computer vision*. Springer, Cham, 2016:561-578.
15. [KB18] Kanazawa A, Black MJ, Jacobs DW, Malik J. End-to-end recovery of human shape and pose. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2018:7122-7131.
16. [RM14] Ramakrishna V, Munoz D, Hebert M, Bagnell AJ, Sheikh Y. Pose machines: Articulated pose estimation via inference machines. *European Conference on Computer Vision*. Springer, Cham, 2014:33-47.
17. [WR16] Wei S-E, Ramakrishna V, Kanade T, Sheikh Y. Convolutional pose machines. *Proceedings of the IEEE conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2016:4724-4732.
18. [PI16] Pishchulin L, Insafutdinov E, Tang S, Andres B, Andriluka M, Gehler PV, Schiele B. Deepcut: Joint subset partition and labeling for multi person pose estimation. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 4929–4937, 2016.
19. [PZ17] Papandreou G, Zhu T, Kanazawa N, Toshev A, Tompson J, Bregler C, Murphy K. Towards accurate multi-person pose estimation in the wild. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2017:4903-4911.
20. [PZ18] Papandreou G, Zhu T, Chen L-C, Gidaris S, Tompson J, Murphy K. Personlab: Person pose estimation and instance segmentation with a bottom-up, part-based, geometric embedding model. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*. 2018:269-286.
21. [SL23] Jana Stürner, Joachim Liepert, Manuel Stein, Markus Gruber und Michael Schwenk. "Technologiegestützte -Ganganalyse in der Neurologie." *pt Zeitschrift für Physiotherapeuten*, 2023.
22. [BZ23] Philipp Barzyk, Philip Zimmermann, Manuel Stein, Markus Gruber. "AI-Smartphone Markerless Motion Capturing of Counter-Movement-Jump Kinematics." *European College of Sports Science*, 2023.
23. [BZ24] Philipp Barzyk, Philip Zimmermann, Manuel Stein, Daniel A. Keim, und Markus Gruber. "AI-smartphone markerless motion capturing of hip, knee, and ankle joint kinematics during countermovement jumps." *European Journal of Sport Science*, 2024.
24. [BB24] Philipp Barzyk, Alina-Sophie Boden, Justin Howaldt, Jana Stürner, Philip Zimmermann, Daniel Seebacher, Joachim Liepert, Manuel Stein, Markus Gruber, and Michael Schwenk. "Steps to Facilitate the Use of Clinical Gait Analysis in Stroke Patients: The Validation of a Single 2D RGB Smartphone Video-Based System for Gait Analysis." *Sensors*, 2024.
25. [HS24] Jonas Hummel, Michael Schwenk, Daniel Seebacher, Philipp Barzyk, Joachim Liepert, und Manuel Stein. "Clustering approaches for gait analysis within neurological disorders: a narrative review.", *Digital Biomarkers*, 2024.
26. [MB24] Michael Schwenk, Philipp Barzyk, Alina Boden, Daniel Seebacher, Philip Zimmermann, Manuel Stein, Markus Gruber. "AI-based markerless single-camera motion analysis for estimating knee and hip joint kinematics during gait." *42nd Conference of the International Society of Biomechanics in Sports (ISBS)*, 2024.
27. [BS24] Philipp Barzyk, Jana Stürner, Alina Boden, Manuel Stein, Daniel Seebacher, Joachim Liepert, Markus Gruber, und Michael Schwenk. "SMARTGAIT: KI-basierte Ganganalyse aus Smartphone-Videoaufnahmen in der Neurorehabilitation". *neuroreha*, 2024.
28. [BB24] Alina-Sophie Boden, Philipp Barzyk, Jana Stürner, Philip Zimmermann, Daniel Seebacher, Joachim Liepert, Manuel Stein, Markus Gruber, Michael Schwenk. "Validation of a single 2D RGB Smartphone Video-Based Gait-

Analysis-System on Stroke Patients with and without Walking Aid", *Gemeinsame Jahrestagung der DGNR e. V. und DGNKN e. V.*, 2024.

29. [HE23] Horsak, Brian, et al. (2023). "Concurrent validity of smartphone-based markerless motion capturing to quantify lower-limb joint kinematics in healthy and pathological gait." *Journal of Biomechanics*. 159. 111801. 10.1016/j.jbiomech.2023.111801.
30. [UF23] Uhlrich, Scott D., et al. "OpenCap: Human movement dynamics from smartphone videos." *PLoS computational biology* 19.10 (2023): e1011462.
31. [CS17] Cao, Zhe, et al. "Realtime multi-person 2d pose estimation using part affinity fields." *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2017.

Kurzfassung des Schlussberichts zum Teilvorhaben der Subsequent GmbH zum KMU-innovativ Projekt SMARTGAIT

Projekttitel: SMARTGAIT - KI-basierte, interaktive Ganganalyse aus Smartphone-Videoaufnahmen zur Verstärkung der Gesundheitskompetenz in der Therapie neurologisch bedingter Gangstörungen

Förderkennzeichen: 16SV8999

Autoren: Dr. Manuel Stein (manuel.stein@subsequent.ai), Philip Zimmermann (philip.zimmermann@subsequent.ai), Dr. Daniel Seebacher (daniel.seebacher@subsequent.ai)

Ein zentrales Merkmal des autonomen Menschen ist die Fähigkeit, sich selbständig fortbewegen zu können. Das Gehen charakterisiert wesentlich den Mobilitätsstatus und ist in hohem Maße mit Lebensqualität assoziiert. Die Ganganalyse spielt daher bei der Mobilitäts-Diagnostik eine entscheidende Rolle. Insbesondere bei neurologischen Erkrankungen wie Morbus Parkinson, Schlaganfall, Multiple Sklerose, Rückenmarkserkrankungen und Polyneuropathie sind Gangstörungen ein wichtiges Kennzeichen der Krankheitsschwere und -progression. Das Ziel von SMARTGAIT ist die Unterstützung von Ärzt*innen, Therapeut*innen und Patient*innen (im Folgenden Anwender*innen) in der Rehabilitation neurologischer Krankheitsbilder, mithilfe einer intuitiv anwendbaren KI-basierten 3D-Skelettdatenerhebung aus einfachen Videoaufnahmen (z.B. Smartphone-Videos) und anschließender visuell-interaktiver Gang- und Bewegungsanalyse. SMARTGAIT soll über die einzigartige Kombination von innovativen Technologien zeit- und kostenintensive Arbeitsschritte auf ein Minimum reduzieren und damit Anwenderinnen erstmals valide Daten in der Breite zur Verfügung stellen, welche ein Screening und Monitoring von neurologischen Gangstörungen in der Therapie ermöglichen. Patient*innen profitieren durch das unmittelbare, objektive Feedback in ihrem Alltag, Therapeutinnen können Anpassungen ihrer Intervention schneller und gezielter vornehmen und Ärzt*innen können die Wirksamkeit der verordneten therapeutischen Maßnahmen spezifisch überprüfen und bewerten.

Das Teilvorhaben der Subsequent GmbH zum Verbundprojekt SMARTGAIT wurde zum 31.07.2024 erfolgreich abgeschlossen. Die dabei anvisierten Ziele für die qualitative als auch quantitative Evaluation wurden dabei nicht nur erreicht, sondern weitestgehend weit übertroffen. Die dabei wichtigsten zu erreichenden Kennzahlen zur Messung der Projekterfolgs sind:

1. **Positive Testung der Durchführbarkeit von SMARTGAIT seitens Anwender*innen (System Usability Scale Score > 68):** Der von der Subsequent GmbH entwickelte Demonstrator wurde nach mehreren Iterationen und Feedback-Einarbeitungszyklen, in denen dieser kontinuierlich verbessert und an die Bedürfnisse der Anwenderinnen und Anwender angepasst wurde, durch die Anwendung der System Usability Scale (SUS) durch neun Fachpersonen der Kliniken Schmieder und des Lurija-Instituts bewertet. Die Zielvorgabe eines SUS-Scores über 68 zu erreichen, wurde weit übertroffen. Es wurde ein Score von 89 ermittelt. Dieses herausragende

Ergebnis unterstreicht nicht nur die Benutzerfreundlichkeit von SMARTGAIT, sondern verdeutlicht auch die erfolgreiche Umsetzung des iterativen Forschungsansatzes als kontinuierlichen Verbesserungsprozesses. Es zeigt somit das enorme Potenzial von SMARTGAIT und die Anwendbarkeit in klinischen Umgebungen.

- 2. Positive Validierung von SMARTGAIT mit 30 Personen (Korrelationen zum Goldstandard ≥ 0.7):** Die für SMARTGAIT zugrundeliegenden Technologien wurden in einer aufwändigen Studie mit über 40 Personen im Vergleich zu einem Goldstandard-Referenzsystem (VICON) verglichen, evaluiert und die Ergebnisse in renommierten Zeitschriften publiziert. Dabei konnte in verschiedenen Szenarien gezeigt werden — sowohl für gesunde Personen als auch für Personen, die an neurologischen Erkrankungen leiden — dass immer eine Korrelation im Vergleich zu Goldstandardsystemen ≥ 0.7 erzielt werden konnte. Dies ist durch die neuartigen SMARTGAIT-Systeme sogar bei von Schlaganfällen betroffenen Personen für Gelenkinematiken aus der Frontalperspektive möglich, selbst wenn diese nur von einer einzelnen Kamera aus der Sagittalperspektive aufgenommen wurden. Dabei konnte für alle Gelenkinematiken durchweg ein Root Mean Squared Error (RMSE) von 2° - 4° erreicht werden. Zusätzliche statistische Auswertungen, beispielsweise durch ein Statistical Parametric Mapping, zeigen, dass die von der Subsequent GmbH erzielten Ergebnisse keine statistisch signifikanten Unterschiede zum Goldstandard-Referenzsystem (VICON) aufzeigen. Diese Ergebnisse verdeutlichen das enorme Potenzial von SMARTGAIT für die Erhebung von qualitativ hochwertigen Daten auf Basis einzelner Videoaufnahmen eines Smartphones.

Insgesamt resultierte die Arbeit und Forschung in SMARTGAIT in 8 Publikationen, wovon zwei mit Preisen ausgezeichneten wurden. Zusätzlich zu den oben genannten Publikationen wurde im Verbundvorhaben SMARTGAIT auch vier Bachelor- und Masterarbeiten sowie teilweise eine Dissertation mit relevanten Forschungs- und Validationsarbeiten durchgeführt.

Die übertroffenen Kennzahlen zur Messung des Projekterfolgs zeigen das enorme Potenzial der im SMARTGAIT Projekt entwickelten Technologien und Verfahren. Es existiert von Seiten Industrie und Forschung bereits großes Interesse an der Nutzung der weiterentwickelten SMARTGAIT-Systeme nach Projektende, auch im Transfer zu anderen Gesundheitsbereichen. So möchte beispielsweise die TH Ulm Ganganalysen auf Smartphoneaufnahmen von Patientinnen und Patienten beim Perturbationstraining zur Sturzprävention einsetzen. Von Seiten der Industrie haben die Kliniken Schmieder, die als assoziierter Partner Teil des SMARTGAIT-Projekts waren, sowie mehrere Sanitätshäuser und Sportverbände, bereits ihr Interesse an einer Nutzung der weiterentwickelten SMARTGAIT-Technologien bekundet. Die Subsequent GmbH verfolgt nach dem Projektabschluss die Weiterentwicklungen der Technologien und Verfahren hin zu einem einsatzfähigen Produkt in Form einer Smartphone-App für iOS und Android.