

Bewegungsanalyse für die Rehabilitation

Aktueller Stand und klinische Perspektiven

J. Steinhardt^{1,2}, A. Zolal¹, T. Heß³,
F. Marin³, M. Kirsch^{1,2}

Einleitung und Hintergrund

Die moderne Rehabilitation steht vor komplexen Herausforderungen: Der demografische Wandel mit einer alternenden Bevölkerung, die Zunahme neurologischer und muskuloskelettaler Erkrankungen sowie der zunehmende Fachkräftemangel verschärfen die Anforderungen an eine individualisierte, qualitativ hochwertige Patientenver-

sorgung. Besonders dynamisches Anwendungsfeld stellt die KI-gestützte Bewegungsanalyse dar, die das Potenzial besitzt, die Diagnostik, Therapieplanung und Verlaufskontrolle in der Rehabilitation grundlegend zu transformieren [1–4] (Abb. 1).

Unter KI-gestützter Bewegungsanalyse versteht man computergestützte Verfahren, die menschliche Bewegungen automatisiert erfassen, analysieren und interpretieren können. Anders

ren sind in der Lage, aus Rohdaten charakteristische Merkmale (sogenannte features) abzuleiten und diese zur Erkennung physiologischer sowie pathologischer Bewegungsmuster zu nutzen. Eine weitere Methode sind sogenannte Pose-Estimation-Algorithmen, die Körpersegmente und Gelenkpunkte rekonstruieren und daraus klinisch relevante Parameter wie Gelenkwinkel, Bewegungsamplituden oder Asymmetrien ableiten. Ergänzend zur reinen Bewegungsanalyse ermöglichen KI- und ML-

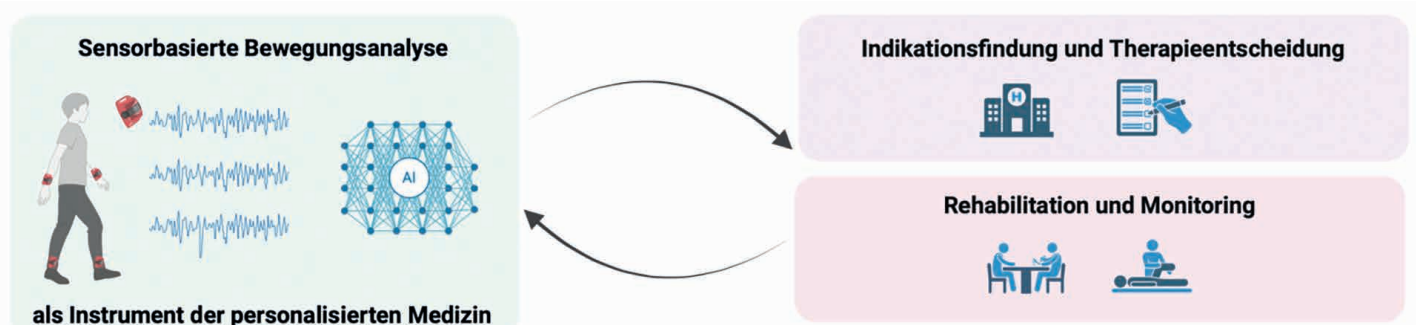


Abb. 1: Schematische Darstellung der KI-gestützten Bewegungsanalyse im klinischen Kontext

sorgung. In diesem Kontext gewinnen digitale Technologien, insbesondere Anwendungen der künstlichen Intelligenz (KI) und des maschinellen Lernens (ML), zunehmend an Bedeutung. Ein

als bei traditionellen, markerbasierten biomechanischen Analysesystemen, wie etwa der klassischen instrumentellen Ganganalyse im Labor, ermöglichen moderne KI-Verfahren eine markerlose Erfassung von Bewegungen durch RGB-Kameras oder tragbare Sensorsysteme [5]. Dazu kommen insbesondere Methoden des maschinellen Lernens und des Deep Learnings zum Einsatz, die große Mengen an Bewegungsdaten aus verschiedensten Quellen, wie beispielsweise Videosequenzen, Inertialsensoren oder Kraftmessplatten, verarbeiten können (Abb. 2).

Convolutional Neural Networks (CNNs) und andere neuronale Netzarchitekturen

ermöglichen auch die Ableitung personalisierter Therapieempfehlungen [6–8]. Durch die Analyse großer Datensätze wie etwa aus elektronischen Patientenakten, Wearables und bildgebenden Verfahren, können individuelle Risikoprofile erstellt, Therapiepläne angepasst und prädiktive Modelle für den Rehabilitationsverlauf entwickelt werden [7–9]. Ein weiterer wesentlicher Vorteil liegt in der Möglichkeit, die Bewegungsanalyse aus dem Labor in alltagsnahe Umgebungen zu verlagern und so eine kontinuierliche, ortsunabhängige Überwachung und Steuerung von Rehabilitationsprozessen zu realisieren.

¹ Klinik für Neurochirurgie, Klinikum Chemnitz, MedizinCampus Chemnitz an der Medizinischen Fakultät der Technischen Universität Dresden

² Modellstudiengang MEDiC, Medizinische Fakultät, Technische Universität Dresden

³ Institut für Angewandte Bewegungswissenschaften, Fakultät für Human- und Sozialwissenschaften, Technische Universität Chemnitz

Klinische Anwendung in der Rehabilitation

Die aktuelle wissenschaftliche Literatur, insbesondere systematische Übersichtsarbeiten und Meta-Analysen, unterstreicht das wachsende Potenzial KI-basierter Bewegungsanalysen in der Rehabilitation [10–12]. Eine Vielzahl KI-gestützter Rehabilitationssysteme, darunter kamerabasierte Analysetools und App-gestützte Heimtrainingsprogramme, sind verfügbar und getestet. Sumner et al. (2023) betonen die prinzipielle Validität dieser Systeme zur Erfassung funktioneller Veränderungen, verweisen jedoch zugleich auf methodische Schwächen vieler Studien, insbesondere kleine Fallzahlen, kurze Beobachtungszeiträume und die begrenzte Vergleichbarkeit der eingesetzten Verfahren. Weiter kann KI-gestützte Bewegungsanalyse ähnliche funktionelle Effekte erzielen wie klassische rehabilitative Interventionen, insbesondere, wenn sie ergänzend eingesetzt wird.

Trotz vieler erfolgsversprechender Kohortenstudien mangelt es bislang an robusten randomisierten kontrollierten Studien mit patientenrelevanten End-

punkten. Die Forschung befindet sich demnach aktuell in einer Übergangsphase zwischen technischer Machbarkeit und klinisch belastbarer Evidenz.

Die wichtigsten Anwendungsfelder der KI-basierten Bewegungsanalyse erstrecken sich über verschiedene Bereiche der Rehabilitation, besonders relevant scheint der Einsatz in der neurologischen und der orthopädischen Rehabilitation [13]. Bei Patientinnen und Patienten mit Schlaganfall oder Morbus Parkinson spielen Gang- und Koordinationsstörungen eine zentrale Rolle. Studien bei Morbus Parkinson belegen, dass KI-Systeme subtile Veränderungen der Gangdynamik erkennen können, lange bevor die Erkrankung klinisch diagnostiziert wurde [14, 15]. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für ein präziseres Verlaufsmonitoring und individualisierte Therapieanpassungen. Die Genauigkeit markerloser, KI-basierter Systeme erlaubt inzwischen auch ihren Einsatz bei Schlaganfallpatienten, beispielsweise zur Erkennung von Gangbildveränderungen und zur automatisierten Verlaufskontrolle.

Darüber hinaus unterstützen diese Systeme die individuelle Anpassung

von Therapieplänen, indem sie Veränderungen im Bewegungsverhalten präzise erfassen und auswerten können. In der orthopädischen Rehabilitation finden KI-gestützte Systeme insbesondere bei der funktionellen Beurteilung nach Endoprothesenimplantationen oder Bandverletzungen Anwendung. Markerlose Kamerasysteme und Bewegungssensoren ermöglichen dabei eine alltagsnahe Bewegungsanalyse, ohne dass spezialisierte Labore erforderlich sind. Erste Vergleichsstudien zeigen, dass diese Systeme in ihrer Aussagekraft mit etablierten biomechanischen Verfahren konkurrieren können [15]. In der geriatrischen Rehabilitation wiederum ist die kontinuierliche Erfassung relevanter Parameter wie Ganggeschwindigkeit oder Gleichgewicht essenziell zur Einschätzung des Sturzrisikos. KI-gestützte Systeme ermöglichen hier eine objektive Verlaufskontrolle, die frühzeitige therapeutische Interventionen erleichtert [9, 16]. Meta-Analysen deuten darauf hin, dass insbesondere technologische Interventionen im Rahmen multimodaler Therapieprogramme positive Effekte auf Mobilität und funktionelle Selbstständigkeit älterer Menschen haben

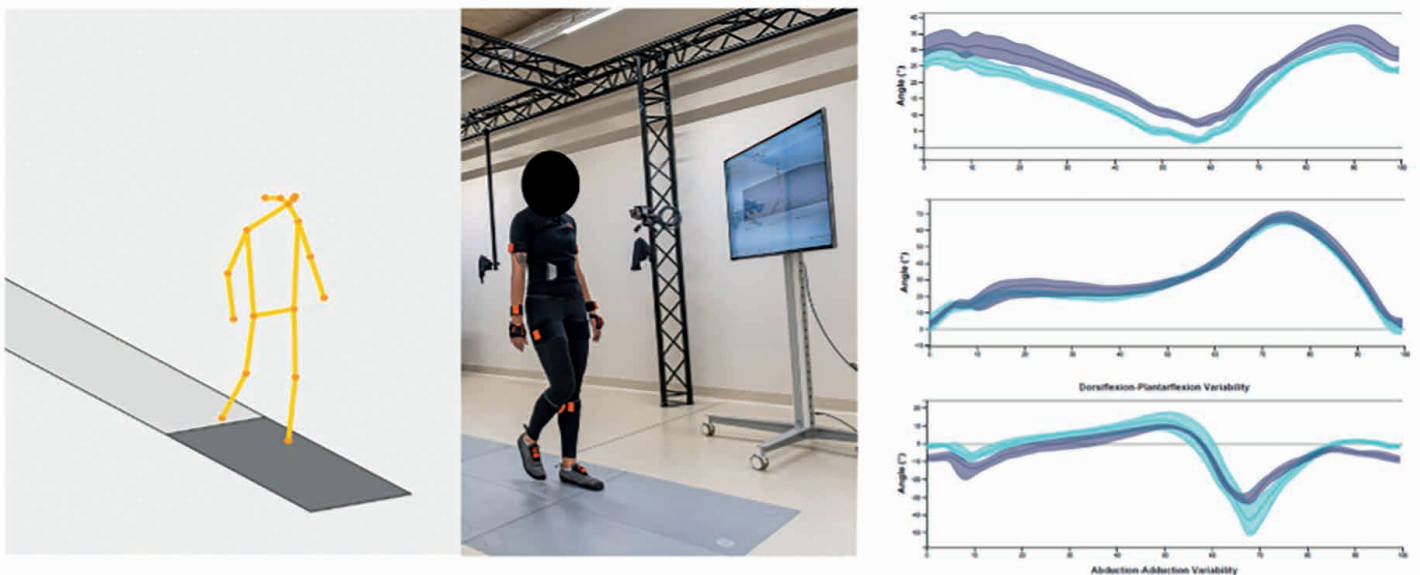


Abb. 2: Bewegungsanalyzelabor der Technischen Universität Chemnitz. Moderne Messsysteme ermöglichen die kombinierte Erfassung kinematischer, kinetischer und sensorbasierter Bewegungsparameter zur objektiven Beurteilung funktioneller Einschränkungen in der neurologischen und orthopädischen Rehabilitation.

Tabelle 1: Übersicht zentraler Analyseebenen KI-gestützter Bewegungsanalysen mit beispielhaften Messparametern, klinischer Interpretation und typischen Indikationen in der neurologischen, orthopädischen und geriatrischen Rehabilitation.

Analyseebene	Messbare Parameter	Klinische Interpretation	Typische Indikationen
Kinematik/ Gelenkbewegung	Gelenkwinkel, Bewegungsamplitude, Geschwindigkeit, Range of Motion	Objektivierung funktioneller Defizite, Verlaufskontrolle nach Interventionen	Schlaganfall, Endoprothetik, Wirbelsäulen- und Gelenkerkrankungen
Bewegungsqualität	Flüssigkeit, Koordination, Timing, Synergien, Effizienz	Differenzierung physiologischer vs. kompensatorischer Strategien	Neurorehabilitation, geriatrische Rehabilitation
Zielgerichtete Motorik	Zielgenauigkeit, Trajektorien, Fehlerkorrekturen	Rückschlüsse auf zerebelläre Integration und sensomotorische Kontrolle	Kleinhirnerkrankungen, Ataxien
Initiierung und Ablauf von Bewegung	Reaktionszeit, Start-/Stop-Parameter, Bewegungsvariabilität	Analyse basalganglionärer Funktionen, Bradykinesie, Freezing	Morbus Parkinson, Basalganglien-Störungen
Dynamik und Kraft	Beschleunigung, Impuls, Bodenreaktionskräfte (sensorbasiert), Belastungsverteilung	Abschätzung muskulärer Leistungsfähigkeit und Belastungstoleranz	Orthopädische Rehabilitation, Sporttraumatologie
Repetition und Ermüdung	Bewegungsfrequenz, Stabilität über Zeit, Variabilität	Quantifizierung von Fatigue und motorischem Lernen	neurologische Erkrankungen, Long-COVID-Rehabilitation
Kognition und motorische Planung (z. B. Dual-tasking)	Aufmerksamkeitswechsel, Entscheidungszeiten, Fehlerprofile	Hinweise auf exekutive Funktionen, Intentions- vs. Ausführungsstörungen	Demenz, Parkinson, poststroke kognitive Defizite
Neurofunktionelle Zuordnung (indirekt)	Musteranalyse spinaler Reflexanteile, zerebellärer Koordination, kortikaler Planung	Differenzierte Einordnung pathologischer Bewegungsmuster	Rückenmarksverletzungen, zerebelläre Syndrome

können. Auch in der beruflichen Rehabilitation bieten KI-Systeme Mehrwert, indem sie Bewegungsdaten am Arbeitsplatz analysieren, Belastungsprofile erstellen und ergonomische Risiken aufdecken, was die gezielte Wiedereingliederung unterstützt. Dies sind nur einige der aktuellen Anwendungsgebiete.

Ein besonders zukunftsweisendes Einsatzgebiet stellt die sogenannte home-based rehabilitation dar. KI-gestützte Apps ermöglichen es Patientinnen und Patienten, therapeutische Übungen im häuslichen Umfeld selbstständig durchzuführen, wobei KI-Algorithmen mittels Smartphone-Kamera oder integrierter Bewegungssensoren die Übungsausführung in Echtzeit analysieren und Feedback geben. Dies kann nicht nur die Therapieadhärenz erhöhen, sondern erlaubt auch eine adaptive Steuerung des Trainings in Abhängigkeit vom individuellen Fortschritt. Ein prominentes Beispiel ist die App ParkProTrain, die speziell für Menschen mit Morbus Parkinson entwickelt wurde und evidenz-

basierte Trainingsprogramme einsetzt, um die Therapie individuell anzupassen [17, 18]. Derartige Anwendungen stehen exemplarisch für das Potenzial von KI, Patienten aktiver in den Rehabilitationsprozess einzubeziehen und telemedizinische Angebote nachhaltig zu stärken.

Herausforderungen und Implementierung

Trotz der vielversprechenden Entwicklungen sind auch Herausforderungen zu beachten. Die wissenschaftliche Evidenzlage ist derzeit noch uneinheitlich. Viele Studien weisen methodische Limitationen auf. Praktische Hürden bestehen hinsichtlich der technischen Implementierung, der erforderlichen Infrastruktur sowie datenschutzrechtlicher Fragestellungen im Umgang mit sensiblen Bewegungs- und Gesundheitsdaten. Ein weiterer kritischer Erfolgsfaktor ist die Akzeptanz durch das medizinische und therapeutische Fachpersonal. Für die Entwicklung und das Training leistungsfähiger KI-Modelle

sind große und qualitativ hochwertige Datensätze erforderlich, die in der medizinischen Forschung oft schwer zu generieren sind. Zudem ist die Nachvollziehbarkeit von KI-Entscheidungen („Black-Box-Problem“) ein zentrales Thema, das die Akzeptanz bei medizinischen Fachkräften beeinflussen kann. Die Integration KI-gestützter Systeme in den klinischen Alltag erfordert gezielte Schulungs- und Fortbildungsangebote, um den sachgerechten und ethisch reflektierten Einsatz dieser Technologien zu gewährleisten. Für die ärztliche Praxis empfiehlt sich ein schrittweises Vorgehen: Erste Erfahrungen sollten im Rahmen von Pilotprojekten gesammelt und systematisch evaluiert werden, um den klinischen Nutzen und die Anwenderfreundlichkeit zu überprüfen. Eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Medizin, Informatik und Ingenieurwissenschaften ist hierbei unerlässlich [19]. Entsprechende Förderinitiativen auf Bundesebene, etwa im Rahmen der Programme zur digitalen

Innovation und smarten Sensorik des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), unterstreichen die strategische Bedeutung KI-gestützter Bewegungsanalysen und zeigen exemplarisch, wie Forschungsverbünde, beispielsweise Projekte wie AKTISmart-KI, die Entwicklung translationaler Anwendungen zwischen Grundlagenforschung und klinischer Praxis vorantreiben.

Fazit und Ausblick

Zusammenfassend bietet die KI-gestützte Bewegungsanalyse enormes Innovationspotenzial für die rehabilita-

tive Versorgung, sowohl im stationären, im ambulanten und im häuslichen Umfeld. Ihr Mehrwert liegt insbesondere in der Objektivierung klinischer Entscheidungsprozesse, der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, der Individualisierung therapeutischer Maßnahmen und der kontinuierlichen Verlaufskontrolle durch den Patienten vor Ort als auch unabhängig für den Arzt. Die Effizienzsteigerung durch automatisierte Auswertung spart Ressourcen. Für eine evidenzbasierte Integration in den klinischen Alltag sind jedoch weitere vergleichende Studien mit patientenrele-

vanten Endpunkten sowie praxisnahe Aus-, Weiter- und Fortbildungsangebote erforderlich. Gerade für die rehabilitative Versorgung im Freistaat Sachsen ergibt sich hier die Chance, digitale Innovationen gezielt und evidenzbasiert einzusetzen. ■

Literatur unter
www.slaek.de/aerzteblatt-sachsen

Dr. rer. nat. Julia Steinhardt
Klinik für Neurochirurgie
Klinikum Chemnitz gGmbH
Flemmingstraße 2, 09116 Chemnitz
E-Mail: Julia.Steinhardt@skc.de