



Faszination Bewegung

Das Heidelberg Center for Motion Research

Katja Mombaur, Alexander Schubert

Auszug aus dem Jahresbericht
„Marsilius-Kolleg 2015/2016“



Faszination Bewegung

Das Heidelberg Center for Motion Research

„Faszination Bewegung“ – so lautete der Titel einer Kunstaussstellung an der Deutschen Sporthochschule in Köln. Ausgestellt wurden Bilder der Künstlerin Edith Hultzsch, deren Werke über viele Jahre hinweg spontan am Rande von sportlichen Wettkämpfen entstanden und mit denen sie versuchte, „das, was eine Sportart ausmacht, auf das Wesentliche zu reduzieren“.

Tatsächlich sind wir bei der Betrachtung bestimmter Bewegungen, etwa wie sie von einem Balletttänzer oder einer Profisportlerin ausgeführt werden können, unwillkürlich fasziniert davon, auf welche Weisen sich ein menschlicher Körper zu bewegen vermag.

Bewegungen, die uns auf Anhieb zunächst weniger faszinieren sind solche, wie wir sie selbst tagtäglich ausführen. Wir bewegen uns fort durch Geh-, Lauf- oder Rennbewegungen, interagieren mit Objekten unserer Umwelt durch Greifbewegungen und nutzen zur nonverbalen Kommunikation mit unseren Mitmenschen Bewegungsmuster der Gestik oder der Körpersprache im weiteren Sinne. Auch diese für uns so leicht anmutenden Bewegungen sind hoch komplexe Vorgänge – eine Tatsache, die uns in der Regel erst bewusst wird, wenn durch Alter, Krankheit oder Unfälle Teile unseres Bewegungsapparates verändert oder eingeschränkt werden oder gar wegfallen.

Was genau macht menschliche Bewegung so komplex? Die Ausführung von Bewegungen ist ein vielschichtiger hierarchischer Prozess, der zahlreiche mechanische und kognitive Komponenten umfasst. Auf bewusster Ebene nehmen wir unsere Umgebung mit unseren Sinnen wahr und entscheiden dann, auf welche Art und Weise wir unseren Körper bewegen wollen. Diese Entscheidung „auf höchster Ebene“

wird sodann intuitiv umgesetzt in koordinierte Bewegungen der einzelnen Gelenke. Unbewusste Bewegungen wie emotionale Körpersprache kommen auf einer niedrigeren Hierarchiestufe hinzu. Ebenfalls unbewusst laufen zahlreiche Prozesse wie etwa die Stabilitätskontrolle des menschlichen Gehens ab.

Die Komplexität menschlicher Bewegung wird ebenfalls dadurch deutlich, dass Bewegung nicht erst seit kurzem Gegenstand verschiedener Disziplinen wie Medizin, Sportwissenschaft, Psychologie, Robotik oder Neurowissenschaft ist, und die genauen Vorgänge, die der menschlichen Bewegung zugrunde liegen, trotzdem noch nicht vollständig verstanden sind. Noch komplexer wird es, wenn man auch die grundlegende Qualität von Bewegung für die menschliche Existenz und damit für unser Selbstverständnis beachtet. Aus diesem Grund wächst auch in der Philosophie und der Theologie das Interesse an Bewegung und deren Einschränkungen. Insbesondere die Diskussion über Verkörperung als ein Paradigma der Anthropologie eröffnet Forschungsfelder, die interdisziplinäre Zusammenarbeit einfordern.

Im Sport ist ein besseres Verständnis menschlicher Bewegungen für die Verbesserung von Bewegungsabläufen und die damit verbundene Leistungssteigerung essentiell. Die medizinische und medizintechnische Forschung profitiert von präzisen Bewegungsanalysen etwa bei der Entwicklung neuartiger Prothesen, bei der Weiterentwicklung von Therapieverfahren wie der künstlichen Muskelstimulation oder bei der Förderung und Erhaltung von Beweglichkeit im hohen Alter. Schließlich lassen sich aus der Analyse menschlicher Bewegungen auch Ergebnisse ableiten, die für künstliche Systeme relevant sind. So wurden etwa im kürzlich abgeschlossenen EU-Projekt „KoroiBot“ menschliche Gehbewegungen analysiert und hierauf basierend neuartige Regelungsverfahren für humanoide Roboter entwickelt, die deren Fähigkeit zu zweibeinigem Gehen deutlich verbessert haben. Auch für Computerspiele und Zeichentrickfilme sind realistische Animationen von Bewegungen notwendig.

Ein besseres qualitatives wie quantitatives Verständnis für die mechanischen, neuromuskulären und kognitiven Vorgänge, die jeder menschlichen Bewegung zugrunde liegen, wird zahlreiche Möglichkeiten für die genannten Forschungsfelder eröffnen. Insbesondere die quantitative Beschreibung menschlicher Bewegung ist allerdings nach wie vor eine Herausforderung. Bereits im späten 19. Jahrhundert begannen Wissenschaftler damit, Bewegungssequenzen von Menschen und Tieren – etwa die verschiedenen Gangarten – zu beobachten und zu experimentellen Zwecken aufzu-



zeichnen. Berühmte Beispiele sind die „Chronophotografien“ des britischen Fotografen Eadweard Muybridge und des französischen Physiologen Étienne-Jules Marey.

Heute werden komplexe Bewegungsabläufe in klinischen und universitären Ganglaboren mit Hilfe von modernen Techniken, etwa Motion Capture Systemen, aufgezeichnet. Dabei kommen verschiedenste Messverfahren zum Einsatz: Optische Systeme nutzen Infrarotkameras, um mit hoher Frequenz die Position von zuvor am Körper des Probanden angebrachten Reflektoren aufzuzeichnen. Andere Systeme nutzen am Körper angebrachte Beschleunigungs- und Drehratensensoren und sind damit nicht ortsgebunden. Gekoppelt werden diese Messungen häufig mit Daten von Kraftmessplatten, Drucksensoren oder Elektromyographen (EMG).

Die für wissenschaftliche Fragestellungen relevanten Informationen können aus den so erhobenen Daten (Markertrajektorien, Beschleunigungsinformationen einzelner Körpersegmente, etc.) allerdings nicht direkt extrahiert werden. Hierzu sind mathematische Methoden des Wissenschaftlichen Rechnens wie Modellierung, Simulation und Optimierung notwendig, welche die gewonnenen Daten zusammenfügen und die aufgezeichnete Bewegung bestmöglich rekonstruieren. Der menschliche Bewegungsapparat wird hierfür zunächst mathematisch modelliert, d.h. die physikalischen

Eigenschaften des Körpers werden in mathematische Formeln gegossen. Wie jedes mechanische System gehorcht auch der menschliche Körper den elementaren, von Issac Newton aufgestellten Gleichungen, nur dass diese eine deutlich komplexere Gestalt annehmen als für den berühmten Apfel. Je nach Fragestellung sind verschiedene Detailgrade der Modelle möglich. So können einfache oder auch komplexere Starrkörpermodelle zum Einsatz kommen, um zu beschreiben, wie sich die Segmente des Körpers physikalisch korrekt bewegen. Für andere Fragestellungen ist es notwendig, weiter zurückzugehen und die Krafterzeugung in den Muskeln, die Ansteuerung der Muskeln durch das Nervensystem oder die

zahlreichen Regelschleifen des Körpers abzubilden. Um ein mathematisches Modell an einen speziellen Probanden anzugleichen, sind individuelle Modellparameter notwendig, die die Länge und Massenverteilungen seiner Segmente beschreiben. Im nächsten Schritt werden die experimentell gewonnenen Daten mit dem Modell im Rahmen einer Optimierungsrechnung abgeglichen. So ergibt sich diejenige Modellantwort, welche die Messdaten bestmöglich widerspiegelt. Aus der so rekonstruierten Bewegung lassen sich nun auch Größen ablesen, die einer direkten Messung nicht zugänglich sind, beispielsweise Gelenkdrehmomente.



Optimierung spielt im Zusammenhang mit Bewegungen auch noch eine andere wichtige Rolle. Es ist eine verbreitete Hypothese, dass sich viele – insbesondere alltägliche – Bewegungen von Menschen und Tieren im Laufe der Evolution und infolge individueller Entwicklung

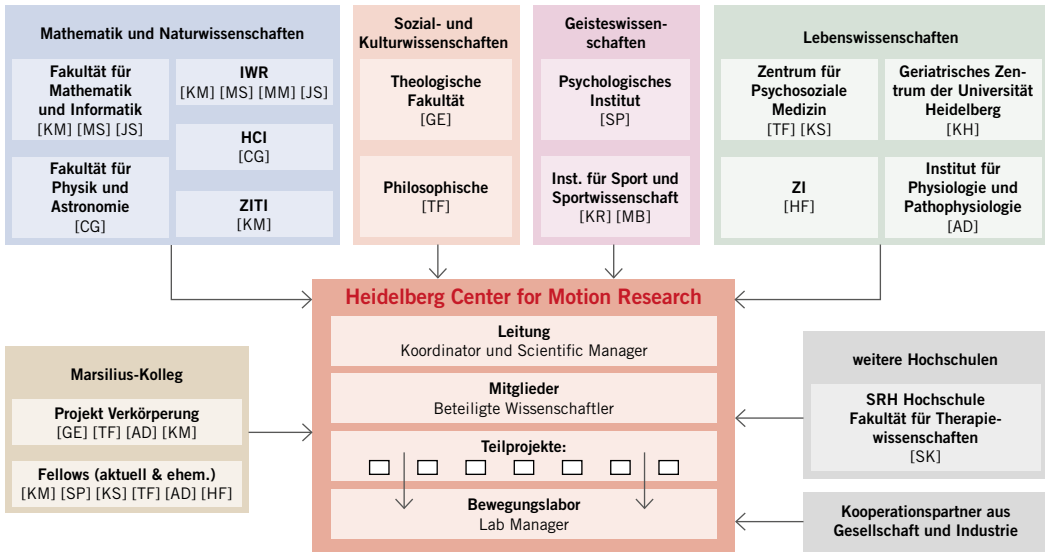
und individuellen Trainings optimal ausgeprägt haben. Die anthropomorphe Struktur ist dabei für die meisten Bewegungsaufgaben hochgradig redundant, das heißt dass eine bestimmte Aufgabe auf ganz unterschiedliche Weisen ausgeführt werden kann. Die natürlichen Bewegungen können in der Regel auf die Optimierung naheliegender mechanischer Eigenschaften des menschlichen Bewegungssystems zurückgeführt werden, beispielsweise eine Minimierung der Energie oder eine Maximierung der Effizienz. Der Mensch verbessert solche Kriterien nicht bewusst. Aber es scheint, als leite die Mechanik die Lernprozesse unbewusst in derartige Optima und trainiere das Gehirn und die neuronalen Reflexschleifen auf die entsprechenden

Kontrollsignale. Eine ähnliche Optimierung findet bei Bewegungen im Sport statt – hier mit einem klar durch die Sportart vorgegebenen Optimierungsziel. Auch pathologische Bewegungen können aus der Optimierungsperspektive betrachtet werden: Als Reaktion auf eine Krankheit oder Verletzung ergibt sich oft ein Verhalten, das die Last auf bestimmte, besonders geschwächte Bereiche des Körpers minimiert oder den Schmerz reduziert. In allen Fällen variiert das verwendete Optimierungskriterium in Abhängigkeit von der Bewegungsaufgabe und der speziellen Situation des Menschen und besteht häufig aus einer Mischung verschiedener einzelner Optimierungsziele.

Aufgrund ihrer Optimalitätseigenschaften lassen sich menschliche Bewegungen hervorragend mit mathematischen Methoden der Optimalsteuerung eines Systems untersuchen. Indem Bewegungsmodelle in Differentialgleichungen beschrieben und geeignete Optimierungszielfunktionen formuliert werden, können im Computer optimale Bewegungen erzeugt und mit der Realität verglichen werden. Diese Ansätze können und sollen jedoch nicht die Bewegungsmessungen ersetzen, sondern in der Kombination zu einem deutlichen Erkenntnisgewinn beitragen.

An der Universität Heidelberg arbeiten zahlreiche Arbeitsgruppen in verschiedensten Fachbereichen an Themen der Bewegungsforschung. Allerdings besteht an der Universität außerhalb der orthopädischen Klinik derzeit kein Labor, um eigenständige Bewegungsanalysen durchzuführen. Um hier Abhilfe zu schaffen und um eine gemeinsame Plattform für Bewegungsforschungen und den damit verbundenen wissenschaftlichen Austausch zu ermöglichen, werden Kolleginnen und Kollegen aus sechs Fakultäten und drei wissenschaftlichen Einrichtungen Anfang 2017 das „Heidelberg Center for Motion Research“ (HCMR) gründen. An diesem von der Carl-Zeiss-Stiftung mit 800.000 EUR geförderten Zentrum werden wir unter anderem ein vollständiges Bewegungslabor aufbauen, welches allen Mitgliedern die Möglichkeit bieten wird, eigenständige Bewegungsstudien durchzuführen. Aufgrund der Vielseitigkeit der geplanten Forschungsarbeiten aus verschiedenen Disziplinen wird das Labor sowohl mit optischen als auch mit beschleunigungs- und drehratenbasierten Systemen sowie mit Kraftmessplatten und Instrumenten zur Aufzeichnung elektrischer Muskelaktivität ausgestattet werden. Zum einen erlaubt die gleichzeitige Nutzung verschiedener Systeme eine präzisere Datenaufnahme durch komplementäre Messdaten. Zum anderen wird durch nicht ortsgebundene Systeme ein hohes Maß an Flexibilität bei der Durchführung der Experimente erreicht.

Die folgende Abbildung zeigt die Einbindung des Heidelberg Center for Motion Research in die Strukturen der Universität Heidelberg und die damit verbundenen Möglichkeiten zur Netzwerkbildung. Wie zu erkennen, sind am Zentrum Wissenschaftler aus den Bereichen Informatik, Mathematik, Wissenschaftliches Rechnen, Physik, Sportwissenschaften, Psychologie, Psychiatrie, Neurowissenschaften, Physiologie, Theologie, Philosophie und Geriatrie beteiligt.



Prof. Dr. Katja Mombaur (KM), Interdisziplinäres Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR), Institut für Techn. Informatik (ZITI) / **Dr. Markus Buchner (MB)**, Institut für Sport und Sportwissenschaft / **Prof. Dr. Andreas Draguhn (AD)**, Institut für Physiologie und Pathophysiologie / **Apl.Prof. Dr. Gregor Etzelmüller (GE)**, Marsilius-Kolleg & Theologie / **Prof. Dr. h.c. Herta Flor (HF)**, Institut für Neuropsychologie und Klinische Psychologie, Zentralinstitut für Seelische Gesundheit / **Prof. Dr. Dr. Thomas Fuchs (TF)**, Klinik für Allgemeine Psychiatrie, Psychosoziales Zentrum, Universitäts-

klinikum HD / **PD Dr. Christoph Garbe (CG)**, IWR, Heidelberg Collaboratory for Image Processing HCI / **Prof. Dr. Klaus Hauer (KH)**, Geriatrisches Zentrum der Universität Heidelberg / **Prof. Dr. Sabine Koch (SK)**, Tanztherapie, SRH Hochschule Heidelberg / **Dr. Matthew Millard (MM)**, IWR, ZITI / **Prof. Dr. Sabina Pauen (SP)**, Psychologisches Institut / **Prof. Dr. Klaus Roth (KR)**, Institut für Sport und Sportwissenschaft / **Dr. Johannes Schlöder (JS)**, IWR / **PD Dr. Knut Schnell (KS)**, Klinik für Allgemeine Psychiatrie / **Dr. Manish Sreenivasa (MS)**, IWR, ZITI

Wichtige kennzeichnende Merkmale aller geplanten Arbeiten sind:

- > die Interdisziplinarität der Themenstellung und der kooperierenden Forscher
- > die Interdisziplinarität und Vielfalt der methodischen Ansätze: Qualitative beschreibende Ansätze der Geistes- und Verhaltenswissenschaften werden mit quantitativen modellbasierten Ansätzen der Naturwissenschaften zusammengebracht; Experimentelle Ergebnisse des Labors werden mit Theorie und Computersimulationen verbunden
- > der innovative Charakter der Forschungsfragen sowie
- > die Relevanz der Fragestellungen für Wissenschaft, Gesellschaft und Wirtschaft

Die geplanten Forschungen im HCMR umfassen folgende Themenbereiche:

1. Mathematische und methodische Grundlagen von Bewegungsstudien

Dieser Bereich beinhaltet die Erstellung geeigneter mathematischer Modelle menschlicher Bewegungen unter Berücksichtigung von Mechanik, Muskeln und neuromechanischer Komponenten sowie die Entwicklung spezieller Methoden zur optimalen Versuchsplanung für Bewegungsstudien. Außerdem untersuchen wir elementare unbewusste Bewegungsmodi und Transitionen und geometrische Eigenschaften von Bewegungen. Wir entwickeln Ansätze für die Quantifizierung qualitativer Bewegungsmerkmale und für die Erkennung und Klassifizierung von Mustern in Bewegungen und Hirnaktivitäten.

2. Bewegungen, Psyche, Kognition & Verkörperung

Hier befassen wir uns mit den Bewegungsmustern und der Bewegungsimitation von Patienten mit verschiedenen psychischen Krankheiten und untersuchen grundlegende Prozesse der motorischen Kontrolle. Auch Prozesse der sozialen Interaktion zwischen Menschen, die emotionale Körpersprache in Bewegungen, der Zusammenhang zwischen verbalem Ausdruck und Gestik und das subjektive Empfinden von Bewegungsprofilen durch verschiedene Betrachter sind von Interesse. Außerdem möchten wir uns auf der Basis von Messungen mit theologischen und philosophischen Fragen der Verkörperung beschäftigen, wie Fragen nach den enaktiven Konzeptionen lebendiger Bewegung, dem Körperempfinden und der Körperbeherrschung amputierter Patienten. Auch das Thema Schmerz und seine Auswirkung auf Bewegungsabläufe und Körperwahrnehmung spielen eine wichtige Rolle. Bei diesen Untersuchungen setzen wir neben der Ausstattung des Zentrums auch Techniken der Virtuellen Realität ein.

3. Bewegungsstudien im Sport

Im Sport sollen biomechanische Risikofaktoren von Sportverletzungen identifiziert und die Effekte von Ermüdung auf motorische Lernprozesse und Bewegungsausführung untersucht werden. Im Bereich der Leistungssteigerung werden wir Optimierungsmethoden nutzen, um basierend auf biomechanischen Modellen und Messungen die Verbesserung von Bewegungen in Sportarten wie Laufen, Radfahren, Gewichtheben, Rudern, Turnen und Tai Chi zu analysieren. Zyklische Sportarten wie Radfahren sind hier von besonderem Interesse. Bei diesen wollen wir den Einfluss von Sitz- und Körperposition auf die Muskelaktivität sowie die

Übertragbarkeit moderner Krafttrainingsmethoden und Muskelstimulationsmethoden auf die Bewegungsausführung untersuchen. Für diese Arbeiten entwickeln wir Modelle, die auch die geschlechts- und subjektspezifischen Unterschiede der Sportler berücksichtigen, sowie Algorithmen zur Erkennung und Quantifizierung sportlicher Bewegungen.

4. Veränderung von Bewegungen im Lebenszyklus,

Bewegungen im hohen Alter

Ziel dieses Bereichs ist es, genau zu verstehen, wie sich Bewegungen im Lebenszyklus des Menschen verändern und auf dieser Basis die Mobilität bis ins hohe Alter zu steigern und zur Entwicklung geeigneter technischer Assistenzsysteme des Ambient Assisted Living (AAL) beizutragen. Hierbei soll vor allem die Übertragbarkeit und Bedeutung von Ergebnissen laborgestützter Bewegungsanalysen und von Computersimulationen auf das natürliche Bewegungsverhalten von älteren Patienten in ihrem normalen Umfeld untersucht werden. Außerdem sollen neue Ansätze für sensomotorische Therapien bei Gebrechlichkeit und Demenz im Alter entwickelt werden. In Altersgruppen-übergreifenden Studien planen wir, die Stabilität von Bewegungen und deren Entwicklung mit dem Alter (vom Kleinkind bis ins hohe Alter) zu untersuchen. Auch die im Sport durchgeführten Bewegungsanalysen werden auf geriatrische Testgruppen ausgedehnt.

5. Bewegungsstudien in den Bereichen Tanz, Tanztherapie,

Musik und gestaltende Kunst

Ähnlich zum Bereich Sport ist hier die biomechanische Analyse von Tanzbewegungen verschiedener Stile auf der Basis von Messungen und Modellrechnungen geplant. Im Fokus steht auch die Analyse von Tanzstilen als Therapie bei verschiedenen Krankheiten und zum allgemeinen Einsatz in der Tanz-, Musik-, Kunst- und Theatertherapie, sowie die Messbarkeit intermodaler Bewegungsrhythmen. Außerdem werden wir die Entstehung von bildender Kunst aus dynamischen Bewegungen im Stil der Action Art bzw. Gestural Abstraction untersuchen.

6. Bewegungen am Arbeitsplatz

Bestimmte anspruchsvolle Bewegungen oder auch das Fehlen von Bewegung führen häufig zu Problemen in verschiedensten Arbeitssituationen. In konkreten Fallstudien werden wir gemeinsam mit Partnern aus Industrie und Gesundheitswesen Bewegungen beim Tragen und Schieben großer Lasten analysieren, sowie

statische und dynamische Untersuchungen zur Ergonomie am Arbeitsplatz durchführen.

7. Bewegungsstudien für Roboter und andere technische Systeme

Im Bereich der Robotik werden wir in Kooperation mit unseren beiden Robotiklaboren anhand der dort verfügbaren humanoiden und industriellen Roboter an der Verbesserung der dynamischen Robotermodellierung und der Stabilität von Bewegungen arbeiten. Weitere Themen sind die automatische Roboterkalibration und Reglerverbesserung sowie die Implementierung einer Roboterregelung durch Echtzeitfeedback über die Motion Capture-Systeme. Im Fokus stehen außerdem allgemeine Themen der Mensch-Maschine-Interaktion, beispielsweise das Zusammenwirken des Behandlers oder Patienten mit bewegten medizintechnischen Geräten. Hier ergeben sich Synergien mit den Forschungen im Bereich AAL oder zu Assistenzsystemen am Arbeitsplatz. Zusätzlich liegt ein Schwerpunkt auf der Einbindung von State of the Art Systemen aus der Bildverarbeitung zur Kombination oder zum Vergleich mit den Messsystemen des Labors; insbesondere sollen hier Methoden der Lichtfeldbildgebung für die Aufnahme und Analyse von 3D+t Bewegungen untersucht werden.

Interdisziplinäre Bewegungsforschung in dieser Themenvielfalt und -kombination wurde bisher an keinem Standort betrieben und ist damit ein Alleinstellungsmerkmal des geplanten neuen Zentrums in Heidelberg, das langfristig zu einem führenden interdisziplinären Zentrum für Bewegungsstudien ausgebaut werden soll.

Für die geplanten Forschungsprojekte konnten als externe Partner bereits der Bund deutscher Radfahrer, der Bund deutscher Gewichtheber, die Dance Company Nanine Linning sowie diverse Firmen aus dem Bereich der mobilen Bewegungsanalyse gewonnen werden. Wir sind für weitere Kooperationspartner aus Industrie und Gesellschaft offen und würden entsprechende Anfragen sehr begrüßen.

Ein wesentlicher Impuls für die Gründung des Zentrums ging vom Marsilius-Kolleg aus, an dem viele der beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler als Kollegiaten sowie im Rahmen des Marsiliusprojekts „Verkörperung als Paradigma einer evolutionären Kulturanthropologie“ tätig waren.