

1 Einleitung

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, für verschiedene Arten von Körpergelenken, die sich nach Art und Ausmaß der Bewegung unterscheiden, adäquate Methoden der mechanischen Meßtechnik zuzuordnen und zu entwickeln, so daß Meßgenauigkeit und Auflösung ausreichen, die Gelenkfunktion und ihren Zusammenhang mit den anatomischen Strukturen zu beschreiben.

Die bemerkenswerten Eigenschaften menschlicher Gelenke wie das fast völlige Fehlen von Reibung, die hohe Belastbarkeit und die gleichzeitig präzise Motorik zum Durchführen filigraner Arbeiten sind im technischen Bereich der Robotik nur unvollständig umgesetzt worden. Auch im medizinischen Bereich läßt die Behebung bekannter Gelenkpathologien bisher noch zu wünschen übrig. Beispielsweise wird die Leistungsfähigkeit eines gesunden Kniegelenks durch eine endoprothetische Versorgung nicht wieder erreicht.

1.1 Struktur der Bewegung und Kraftsysteme

Bereits Fick (1910[23]) stellte zur allgemeinen Gelenkbewegung fest:

„...Bewegungen lassen sich mechanisch analysieren, wenn man zwei zusammengehörige Spuren auf den beiden gegenüberliegenden Gelenkflächen kennt und genau weiß, welche Punkte der einen Spur mit bestimmten Punkten der anderen Spur im Verlauf der Bewegung zur Deckung kommen. ... der Weg dazu ist die Ableitung der entsprechenden Drehpunktbahnen bzw. Achsenflächen.“

Nach Fick lassen sich nicht alle Bewegungsmöglichkeiten eines Gelenks auf feste Achsen reduzieren. Um dies näher zu untersuchen, ist demnach eine Analyse der Kinematik¹ der Bewegung, also eine Beschreibung sämtlicher Gelenkpositionen, mit einer Auflösung auch im kleinsten Bewegungsbereich notwendig. Dabei dürfen nicht einfach nur Anfangs- und Endlage des Gelenks verglichen werden wie bei Panjabi et al. (1981[63]), sondern es sollte jede mögliche Zwischenposition bestimmbar sein, damit der *gesamte* Bewegungsvorgang erfaßt wird. Nach dem Satz von Chasles

¹**Kinematik:** [grch.] die (Bewegungslehre), die Untersuchung und Beschreibung von Bewegungen der Körper ohne Berücksichtigung der sie verursachenden Kräfte (Brockhaus, 1998[7])

(1830, zitiert nach Beatty, 1986[3]) kann ein Körper aus einer Ausgangslage in eine beliebige Endlage durch eine Schraubung um eine Schraubachse überführt werden, die ortsfest bezüglich der Ausgangslage des Körpers ist. Diese theoretisch mögliche Bewegung gibt den „kürzesten“ Weg vor. Sie muß nicht mit der tatsächlichen Bewegung übereinstimmen. Erst wenn die beiden Lagen infinitesimal benachbart sind, so stimmt die zugehörige momentane Schraubung mit dem tatsächlichen Bewegungsvorgang überein (Goldstein, 1991[27]). Es gilt also: Auch bei Gelenken mit kleinem Bewegungsumfang wie den Wirbelbogengelenken reicht eine Achse nicht, dies ergibt sich als geometrische Trivialität. Nur durch momentane Schraubachsen kann der tatsächlichen Zusammenhang von Bewegung und anatomischen Strukturen hergestellt werden.

Bewegung als Satz von Observablen. Ebenfalls unzureichend ist eine Beschränkung auf parallele Drehachsen wie bei Haher et al. (1991[29]). Eine Diarthrose schränkt die räumliche Bewegung in den insgesamt sechs möglichen Freiheitsgraden ein und reduziert die Anzahl ihrer sechs möglichen Freiheitsgrade. Aber auch bei Einschränkung der Bewegung ist es physikalisch nicht erlaubt, wandernde Drehachsen von vornherein anzunehmen, die parallel ausgerichtet sind, und keine Schraubung zuzulassen. Um also die Struktur der Bewegung zu evaluieren, ist eine räumliche Meßsensorik für alle Freiheitsgrade unerlässlich und erst dann kann die Analyse der Meßdaten den Satz unabhängiger Bewegungsgrößen, deren Anzahl mit der Anzahl der Freiheitsgrade übereinstimmt, liefern. Nur mit einem solchen Procedere kann die Gelenkführung aufgeklärt werden.

Die Messung der Bewegung selbst findet in einem festen Bezugssystem statt, das willkürlich durch das Meßverfahren festgelegt ist. In diesem Referenzsystem sind die Sensoren in frei wählbaren Positionen fixiert. Das Referenzsystem ist bei In-vitro-Messungen der erste Knochen, der fest im Laborraum fixiert ist. Das bewegte System ist der zweite Knochen, der relativ zum ersten seine Position ändert. Bei In-vivo-Messungen wie beispielsweise am Stomathognaten System, geht dies so nicht: Hier ändern sowohl Maxilla als auch Mandibula ihre Position relativ zum Laborraum. Referenz- und Laborsystem sind verschieden voneinander, was erfordert, daß vom Laborsystem aus beide, Referenzsystem und bewegtes System, erfaßt werden müssen, wodurch es zu einem erhöhten meßtechnischem Aufwand kommt.

Die im Referenzsystem aufgezeichneten Parameter der Bewegung sind jedoch wegen der eingeschränkten Freiheitsgrade des Gelenks nicht unabhängig voneinander. Das Ziel ist dabei, diese Abhängigkeit genau darzustellen und eine kinematische Beschreibung zu finden, die vom Labor und, wenn möglich, sogar von der speziellen Anatomie

des Gelenkes unabhängig ist. Es geht somit um das Auffinden von unabhängigen Bewegungskomponenten, die als Satz von meßbaren bzw. experimentell zugänglichen Größen extrahiert werden können. Ein Beispiel dafür sind die $\mu - \alpha$ -Parameter, die bereits am Kiefergelenk bestimmt wurden (Nägerl et al. 1991[53], Schwestka-Polly 1998[72]).

Kraftsysteme als Ursache. Neben der Bewegung spielt das sie verursachende Kraftsystem eine wichtige Rolle beim Verständnis der mechanischen Gelenkfunktion. Kraft und Drehmoment sind das bewegungsbestimmende Moment (Wolf, 1931[84]). Ein räumliches Kräftesystem, das aus eine Summe von Einzelkräften und -drehmomenten besteht, kann äquivalent durch eine Kraftwirkungslinie mit einem passenden Drehmoment ersetzt werden. Dies nennt man Kraftschraube². Demzufolge kann jedem Zustand des muskulären Systems eines Gelenkes unabhängig von Anzahl und Größe der beteiligten Muskeln eine Kraftschraube zugeordnet werden. Das Gelenk bewegt sich in eine Gleichgewichtslage, in der die applizierte Kraftschraube vollständig durch Gelenkkräfte kompensiert wird. Die Messung der Gelenkposition ist somit quasistationär.

Die Kompensation der Kraftschraube durch die Gelenkkräfte bedeutet weiterhin im Fall der Diarthrosen (siehe Abschnitt 3.2), daß die verursachten Gelenkkontakte eine Funktion der Kraftschraube sind. Die kinematischen Meßgrößen sind mit der Kraft gekoppelt. Die Gesamtbewegung des Gelenkes ergibt sich aus einer zeitlichen Änderung der Kraftschraube durch Aneinanderreihung quasistationärer Gleichgewichtszustände.

Dieser direkte Zusammenhang von Ursache und Wirkung kann dazu benutzt werden, in vitro allgemeine Aussagen zur mechanischen Funktion eines Gelenks zu machen, ohne das muskuläre System im Detail zu berücksichtigen. Bei In-vivo-Versuchen hingegen kann das inverse Problem betrachtet werden, indem aus der Bewegung auf die Aktivität des muskulären Systems geschlossen wird. Die Lösung ist jedoch nicht eindeutig, da mehrere Muskelanordnungen die gleiche Kraftschraube erzeugen können. In der Regel sind mehr Muskeln vorhanden, als entsprechend der kinematischen Freiheitsgrade des Gelenkes notwendig sind.

²**Kraftschraube:** Rückführung eines räumlichen Kraftsystems auf eine resultierende Einzelkraft in einer räumlich festgelegten Angriffslinie und eines dazu parallelen Drehmoments. Ein Kraftsystem hat sechs Freiheitsgrade gemäß den drei Kraft- und den drei Drehmomentkomponenten (Wolf, 1931[84])

Die Untersuchung der Eigenschaften von Synarthrosen (siehe Abschnitt 3.2) ist ohne eine anatomische Zuordnung der Kraftschraube nicht möglich. Auch diese Verbindungen lassen sich durch quasistationäre Zustände in Gleichgewichtslagen bringen, so daß auf diese Weise Aussagen zur quasistationären Kinematik gemacht werden können. In den Abschnitten 4.2 und 2.3 wird auf Beschreibungsweisen des Zusammenhang von Kraft und Bewegung eingegangen.

1.2 Problemstellung und Anforderungen

Um die Problematik greifbar zu machen, werden folgende Fragestellungen formuliert:

1. Welche allgemeinen Aussagen können über die Kinematik von Gelenken gemacht werden?
2. Welche anatomischen Komponenten beeinflussen die Bewegung am meisten?
3. Wie verändert sich die Bewegung in verschiedenen Lastsituationen?
4. Inwiefern trägt die Form der beiden Artikulationsflächen zur Struktur der Bewegung bei?
5. Können wiederkehrende Funktionsprinzipien gefunden werden?
6. Gibt es eine minimale Anzahl generalisierter systemunabhängiger Funktionsparameter, durch die sich eine Gelenkbewegung beschreiben läßt?

Besonders die Frage 6 zielt auf eine charakteristische Quantifizierung der Bewegung ab, was ein großes Feld an diagnostischen Möglichkeiten in der Medizin eröffnen würde. Im Bereich der Fragen 1, 4 und 5 sind umfangreiche theoretische Vorarbeiten von Nägerl et al., 1990[52], 1992[54], 1995[56] geleistet worden.

Die vorliegende Arbeit soll aus experimenteller Sicht einen wichtigen Teil zur Beantwortung der Fragen beitragen. Daß dies nicht schon früher geschehen konnte, liegt sicherlich auch an den Zeichen unserer Zeit: Die technischen Möglichkeiten zur Meßdatenerfassung haben sich in den letzten Jahren und Jahrzehnten so rasant weiterentwickelt, daß mittlerweile Genauigkeiten erreicht und Datenmengen bearbeitet werden können, von denen frühe Pioniere der Biomechanik, wie Fischer, nur träumen konnten. Fischer untersuchte zu Beginn des 20. Jahrhunderts die Gelenkbewegungen des Ellenbogens mühsam durch Auswertung der Photographien von am Arm fixierten Geißler-Röhren (Fischer, 1907[24]).

Die Vergleichbarkeit von Messungen bildet den zentralen Punkt, der eine Beantwortung der Fragen möglich macht. Die Anforderungen an die Meßverfahren lassen sich demzufolge klar in fünf wichtige Punkte gliedern:

- 6D-Meßaufnahme zur Erfassung von allen sechs Freiheitsgraden
- Wahl unterschiedlicher meßtechnischer Lösungen für unterschiedliche Bewegungsumfänge der Gelenke
- freie Wahl geeigneter Koordinatensysteme
- Möglichkeit der Zuordnung von anatomischen Strukturen zu Kraftschraube und Bewegung
- Berechnung und Darstellung von Invarianten der Bewegung

Die Möglichkeiten, Zahlenwerte zu vergleichen, sie mit anatomischen Strukturen in Verbindung zu bringen und Charakteristika zu extrahieren, sind die Merkmale eines brauchbaren Meß- und Auswerteverfahrens, das Aufschlüsse zu den mechanischen Gelenkfunktionen liefert. Die Umsetzung dieser Anforderungen auf verschiedenartige Körpergelenke bedingt eine Mehrzahl der Verfahren, wie es in dieser Arbeit gezeigt wird.

Es folgen zwei Kapitel, welche die fachlichen Grundlagen zum einen aus physikalischer, zum anderen aus anatomischer Sicht darlegen. Ein weiteres Kapitel beschreibt die Grundlagen mechanischer Funktionen von Gelenken. Dem Material- und Methoden-Teil angeschlossen ist eine Übersicht zu Meßverfahren und deren Prinzipien. Weiterhin werden dann in einzelnen Kapiteln die entwickelten Verfahren erläutert und ermittelte Befunde aufgezeigt. Zum Schluß werden bisherige kinematische Untersuchungen in der Literatur diskutiert, die Verfahren miteinander verglichen und die anatomische Relevanz der Arbeit erläutert.