

2 Material und Methode

2.1 Anatomische Grundlagen

2.1.1 Skelett der Hand

Man unterscheidet an der Hand drei Bereiche: Handwurzel, Mittelhand und Fingerknochen.²

Die Handwurzelknochen (Ossa carpi) bilden ein mosaikartiges Gefüge kurzer gedrungener Knochen, die die Verbindung zwischen den Unterarmknochen und der Mittelhand darstellen. Die Mittelhand (Metacarpus) besteht aus fünf langen Knochen, deren proximale Enden, die Basen, eine gelenkartige Verbindung mit der Handwurzel bilden. An das distale Ende des Mittelhandknochen, dem Caput, schließen sich die Fingerknochen (Ossa digitorum oder Phalangen) an, die ebenfalls jeweils eine Basis (konkave Krümmung) und einen Caput (konvexe Krümmung) besitzen. Von proximal nach distal werden sie als Grundphalanx, Mittelphalanx und Endphalanx bezeichnet.

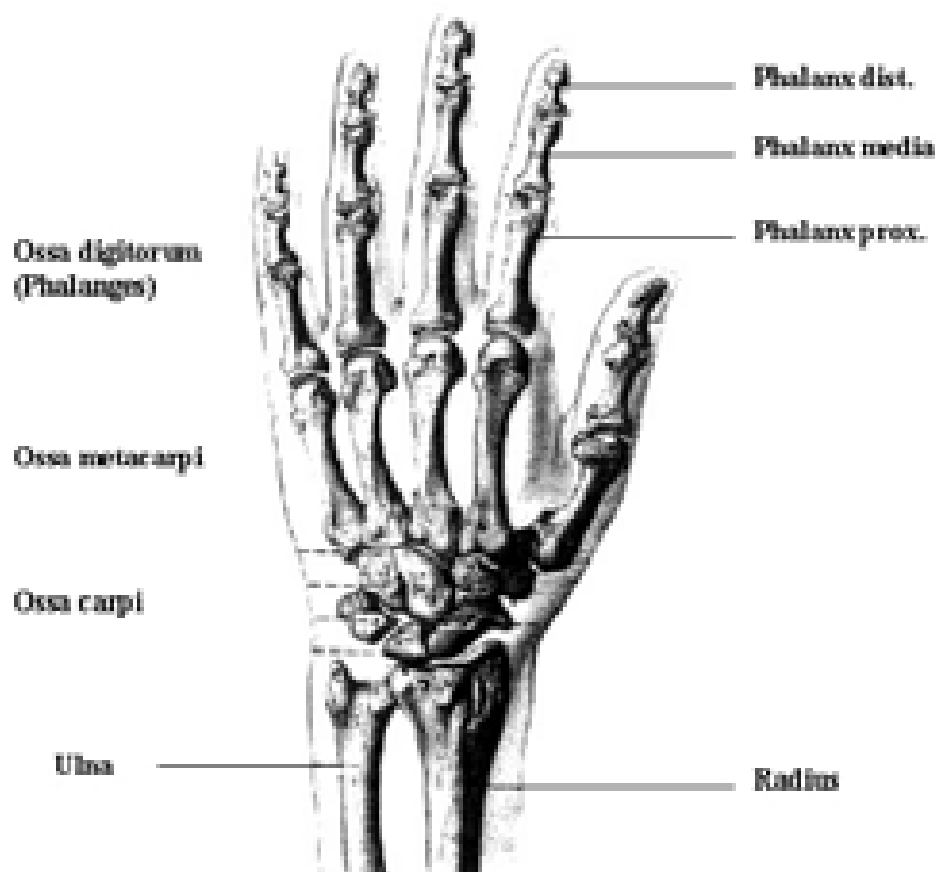


Abb. 2-1: Das Skelett der Hand (aus BENNINGHOFF 1985, in veränderter Form)

² Siehe Abb. 2-1 (S. 10).

2.1.2 Knochenverbindungen

2.1.2.1 Allgemeine Einteilung

Bei den Verbindungen zweier Skelettelemente unterscheidet man zwischen Diarthrosen und Synarthrosen:

5 Eine kontinuierliche Verbindung zweier Skelettelemente z.B. durch eine elastisch-verformbare Masse nennt man *Synarthrose* oder *unechtes Gelenk*. Als Verbindung dienen Knorpel, Bindegewebe oder Knochen. Als Beispiel für eine knorpelartige Verbindung seien die Bandscheiben oder auch die Symphysen genannt.

10 Diskontinuierliche Skelettverbindungen heißen *Diarthrosen*.³ Es gibt verschiedene Arten von Diarthrosen.⁴ Die für diese Arbeit relevante Form besteht aus einer Gelenkpfanne (Basis) und einem Gelenkkopf (Caput), die jeweils von einer hyalinen Knorpelschicht bedeckt sind.

Der Zwischenraum wird *Gelenkspalt (cavitas articularis)* genannt und ist mit einer viskosen Flüssigkeit gefüllt, der *Gelenkschmiere (Synovia)*. Ihre Aufgabe ist es, die Reibung auf den an sich schon glatten Gelenkflächen noch weiter zu vermindern und die Knorpelschicht zu ernähren. Die *Gelenkkapsel (capsula articularis)* ist eine Hülle, die das Gelenk luftdicht
15 abschließt und die Synovia beinhaltet. Sie besteht aus einer bindegewebigen Innenhülle (Membrana synovialis) und einer bindegewebigen Außenhülle (Membrana fibrosa).

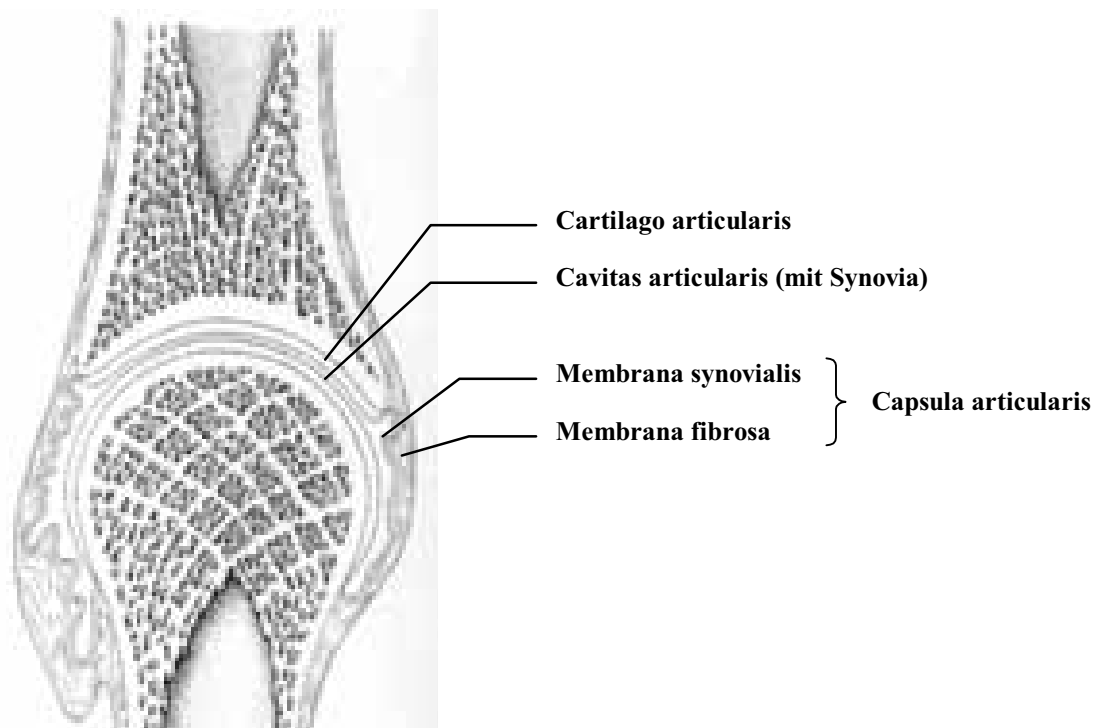


Abb. 2-2: Überblick über die Anteile eines Gelenkes (aus BENNINGHOFF 1985, in veränderter Form)

³ Siehe Abb. 2-2 (S. 11).

⁴ Vgl. z.B. NÄGERL, S. 7 ff.

2.1.2.2 Einige Begriffe aus dem Bereich der Gelenkmechanik

In Abhängigkeit von der Form der Gelenkkörper und –flächen werden die Gelenke des menschlichen Körpers in verschiedene Kategorien gegliedert. WALDEYER, MAYET (1993a) nennen folgende Gelenkarten: planes Gelenk, Radgelenk, Scharniergelenk, Kondylengelenk, Sattelgelenk, Kugelgelenk und Eigelenk. Für die in dieser Arbeit vorgenommenen Betrachtungen sind das Scharniergelenk bzw. Ketten von Scharniergelenken von besonderer Bedeutung.

2.1.2.2.1 Das Scharniergelenk

Ein Scharniergelenk besteht aus einem inneren, zylinderförmigen Gelenkkörper, der von einem äußeren Gelenkkörper konkaver Krümmung umgeben ist. Die Krümmungsradien sind nahezu identisch, so dass die Drehachse durch den gemeinsamen Mittelpunkt M der beiden Kreise verläuft. Jede Auslenkung dieses Gelenks ist durch eine Größe, nämlich den Drehwinkel um M, zu charakterisieren. Deshalb sagt man, das Gelenk besitzt einen Freiheitsgrad.

2.1.2.2.2 Die dimere Gelenkkette

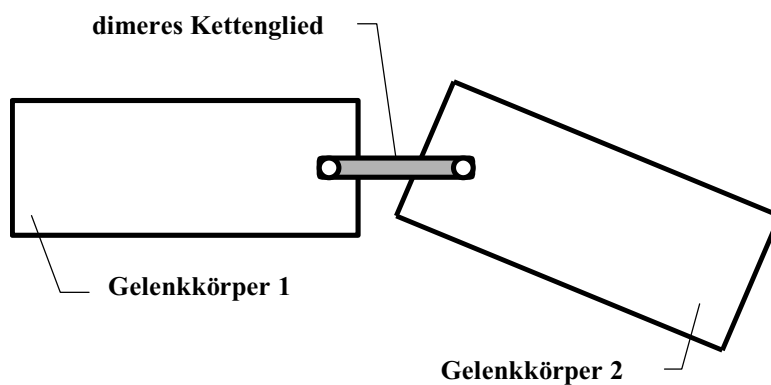
Werden zwei Gelenkkörper durch einen dritten Körper, der mit beiden jeweils durch ein Scharniergelenk verbunden ist, gekoppelt, spricht man von einer dimeren Gelenkkette. Der Verbindungskörper wird auch dimeres Kettenglied genannt. Möchte man die Lage der beiden Gelenkkörper zueinander angeben, reicht eine Größe nicht aus, man muss sowohl den Drehwinkel des einen Scharniergelenks als auch den des anderen angeben: Die dimere Gelenkkette besitzt also zwei Freiheitsgrade.

Je nach Lage des dimeren Kettenglieds unterscheidet man zwischen der gestreckten und der überschlagenden dimeren Gelenkkette. Die Bedeutung der beiden Begriffe kann man Abb. 2-3 und Abb. 2-5⁵ entnehmen. Bei beiden Arten von Gelenkketten existieren ein Punkt auf Gelenkkörper 1 und ein weiterer auf Gelenkkörper 2, die einen konstanten Abstand zueinander besitzen. In technischen Getrieben wird dieses in der Regel durch das dimere Kettenglied erreicht, einem Verbindungsstück, das an den beiden Punkten drehbar mit den Gelenkkörpern verbunden ist. An den Gelenken des menschlichen Körpers wird das Prinzip der konstanten Abstände in der Regel durch annähernd kreis- bzw. kugelförmige Gelenkflächen realisiert.⁶ Dabei ist es erforderlich, dass die Radien der beiden Gelenkflächen nicht identisch sind.

⁵ Siehe S. 13.

⁶ Siehe Abb. 2-4 (S. 13) und Abb. 2-6 (S. 14).

Möchte man die relative Position zweier Gelenkkörper einer dimeren Kette zueinander beschreiben, so kann man dazu die Maßzahlen der Drehungen um die beiden beteiligten Drehpunkte nutzen. Um die in dieser Arbeit überwiegend betrachteten Auslenkungen innerhalb der Extensions/Flexionsebene zu beschreiben, bedient man sich deshalb der Auslenkungswinkel ζ_C und ζ_B bzgl. der Mittelpunkte M_C und M_B der Kaput- und Basiskrümmung. Wenn innerhalb dieser Arbeit von der Position eines Gelenks gesprochen wird, soll damit die relative Position der angrenzenden Knochen gemeint sein, die durch die Auslenkungswinkel ζ_C und ζ_B eindeutig beschrieben wird.



10 Abb. 2-3: Gestreckte dimere Gelenkkette

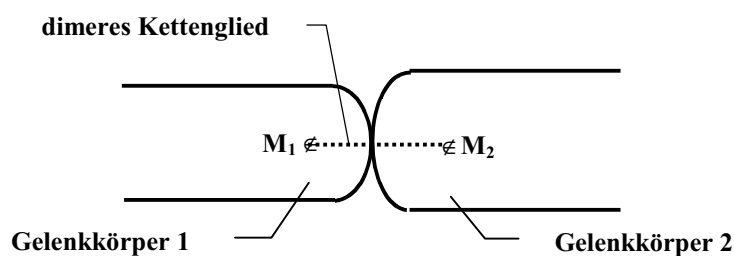


Abb. 2-4: Biomechanische Realisierung der gestreckten dimeren Gelenkkette

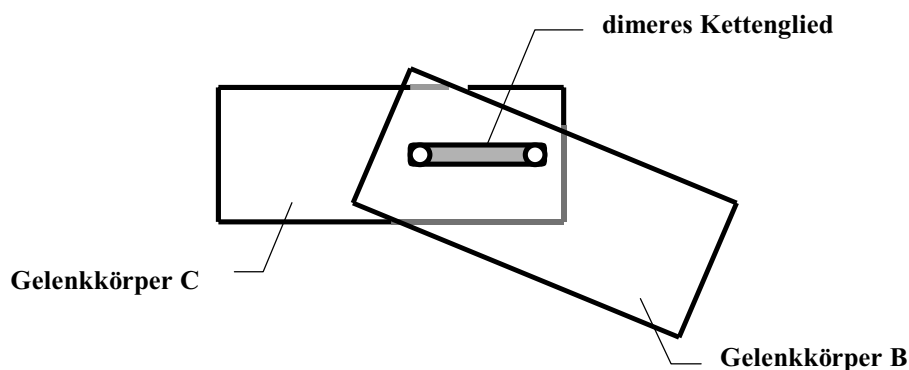


Abb. 2-5: Überschlagene dimere Gelenkkette

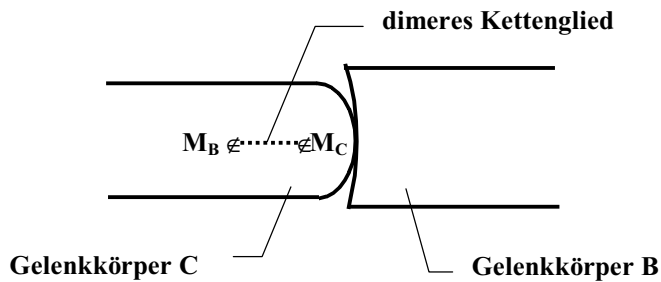


Abb. 2-6: Biomechanische Realisierung der überschlagenen dimeren Gelenkkette

2.1.2.3 Die Fingergelenke

- 5 Die Fingergelenke werden von proximal nach distal als Grund-, Mittel- und Endgelenk bezeichnet:

2.1.2.3.1 Das Fingergrundgelenk

- 10 Das Fingergrundgelenk (Articulatio metacarpophalangea, Metakarpophalangealgelenk) besteht aus einem in grober Näherung kugelförmigen Caput des Mittelhandknochens und einer zugehörigen Basis der Grundphalanx.⁷ Es erlaubt sowohl Flexion und Extension als auch Ab- und Adduktion.

- Eine Rotation des Fingers ist aktiv nicht möglich und auch passiv nur in sehr geringem Maße. Der Bewegungsumfang der Extension und Flexion beträgt ca. 100° (WALDEYER, MAYET
15 1993b). Betrachtet man den für Extension/Flexion entscheidenden medianen Schnitt, so erkennt man, dass der Caput aus Kreissegmenten mit unterschiedlichen Radien besteht: Gemäß ZIEHN (1995) besitzt die eigentliche Kontaktfläche für kleine bis mittlere Flexionswinkel einen Kaputradius R_{C1} von $6,9 \text{ mm}$ ⁸. Für größere Flexionswinkel beträgt der Kaputradius R_{C2} $5,8 \text{ mm}$.⁹ ZIEHN (1995) hat in ihrer Arbeit keine Angaben darüber gemacht,
20 ab welchem Kaput-Flexionswinkel der kleinere Kaputradius zum Tragen kommt. Den in ihrer Arbeit abgedruckten Konturbildern kann man aber entnehmen, dass dieses für einen Winkel $\mu \approx 45^\circ$ zutrifft. An der Übergangsstelle vom größeren zum kleineren Radius sollen die Kreissegmente die gleiche Tangentensteigung besitzen.¹⁰

- Für beide Bereiche gilt, dass der Caput einen deutlich kleineren Radius besitzt als die Basis.
25 Die Messungen von ZIEHN (1995) ergeben für den Basisradius R_B $10,3 \text{ mm}$.

⁷ Siehe Abb. 2-7 (S. 15).

⁸ Der Kaputradius R_{C1} gehört zu dem in Abb. 2-7 (S. 15) verzeichneten Krümmungsmittelpunkt M_{C1} .

⁹ Vgl. ZIEHN, S. 28.

¹⁰ Vgl. ZIEHN, S. 23.

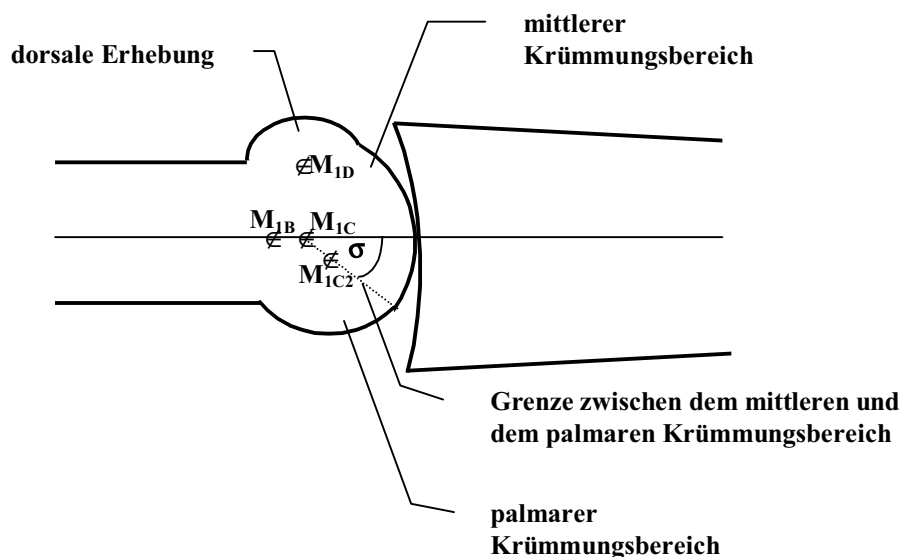
Außerdem fällt auf, dass der Caput dorsal eine Erhebung besitzt. Diese Erhebung dient als Auflagefläche und Umlenkrolle der Sehne des M. extensor digitorum und besitzt einen mittleren Radius von 3,9 mm, liegt aber gemäß ZIEHN nicht mehr im Bereich der Berührungsfläche der Gelenkkörper. Sie ist oft durch eine deutliche Inzisur von jener

5

getrennt. Auch in der zum bisher betrachteten Schnitt senkrechten Horizontalebene stellt ZIEHN eine Krümmungsinkongruenz der Gelenkflächen fest: Der Kaputradius R_{HC} beträgt dort im Mittel 7,3 mm, der Basisradius R_{HB} 8,9 mm. Das Fingergrundgelenk kann also sowohl bzgl. Extension/Flexion als auch bzgl. Abduktion/Adduktion als dimere Kette betrachtet werden

10

und besitzt somit für beide Bewegungsarten jeweils zwei Freiheitsgrade. Berücksichtigt man außerdem den Freiheitsgrad der Rotation, so ergeben sich für das Grundgelenk insgesamt fünf Freiheitsgrade.



15 Abb. 2-7: Fingergrundgelenk von lateral (schematisch)

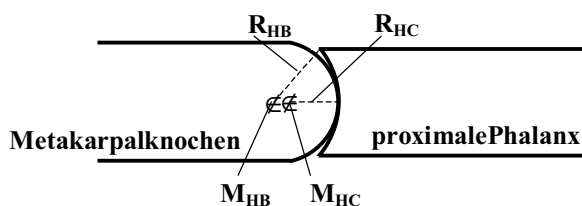


Abb. 2-8: Die horizontalen Konturen des Fingergrundgelenkes (schematisch)

2.1.2.3.2 Das Fingermittelgelenk

Im Gegensatz zum MCP besitzt das Fingermittelgelenk (Articulatio interphalangea proximalis, Proximales Interphalangealgelenk) nicht nur einen Gelenkkopf, sondern zwei nebeneinander angeordnete Köpfe.¹¹ Im Längsschnitt besitzen der ulnare und der radiale Gelenkkopf (Krümmungsmittelpunkte M_{Cu} und M_{Cr}) laut ALBUS (1997) in etwa gleiche Krümmungsradien R_{Cu} und R_{Cr} . Auch die beiden zugehörigen Gelenkpfannen sind nahezu identisch (Krümmungsmittelpunkte M_{Bu} und M_{Br}). Die mittleren Krümmungsradien des Längsschnitts der Gelenkköpfe¹² betragen für den Caput $R_{Cu} \approx R_{Cr} = \text{ca. } 4,4 \text{ mm}$ und an der Basis $R_{Bu} \approx R_{Br} = \text{ca. } 5,5 \text{ mm}$. Der Bewegungsumfang beträgt ca. 100° (WALDEYER, MAYET 1993b). Das PIP stellt bzgl. dieser Ebene somit eine dimere Gelenkkette dar und besitzt bzgl. dieser Bewegungsrichtung also zwei Freiheitsgrade.

Zwischen den beiden Gelenkpfannen befindet sich eine Erhebung¹³, die in den Bereich des Tales¹⁴ zwischen den beiden Gelenkköpfen hineinragt. An dieser Stelle besteht jedoch – wie ALBUS (2001) feststellt – kein Kontakt zwischen Basis und Caput. Laut ALBUS befinden sich die Kontaktbereiche ausschließlich auf den lateralen Gelenkköpfen und den zugehörigen Gelenkpfannen, während median ein Gelenkspalt existiert. Da die streckenden Sehnen und somit auch deren Kraftwirkungslinien durch das Tal in der Mitte der beiden Gelenkköpfe verlaufen, ist Abduktion und Adduktion des PIP aktiv nicht möglich.

Vom Standpunkt der technischen Mechanik aus betrachtet ist das PIP im Querschnitt ein zwangsläufiges Viergelenkgetriebe:¹⁵ Das fixierte Gestell I_C und die bewegliche Koppel I_B sind von ähnlicher Länge, ebenso die ulnare und die radiale Pleuelstange R_u und R_r . Deshalb stellen Drehungen, die durch Krafteinwirkung von außen auf die Mittelphalanx erreicht werden, in guter Näherung Parallelverschiebungen dar. Diese Bewegung bedeutet für das PIP einen weiteren Freiheitsgrad. Ab- und Adduktion sind unter der Annahme fester Pleuelstangenlängen R_u und R_r , die durch die Bedingung des Kraftschlusses begründet ist,¹⁶ aktiv nicht möglich.

Abb. 2-10 a) zeigt das Fingermittelgelenk in der Neutralstellung: Die Kraftwirkungslinie der aus den verschiedenen an dieses Gelenk angreifenden Muskelkräften resultierenden Gelenkkraft F verläuft durch das zwischen den beiden Gelenkköpfen liegende Tal. Diese Kraft lässt sich zerlegen in die ulnare Gelenkkraft F_{u0} und in die radiale Gelenkkraft F_{r0} , deren

¹¹ Siehe Abb. 2-10 (S. 18).

¹² Siehe Abb. 2-9 (S. 17).

¹³ Siehe Abb. 2-10 (S. 18).

¹⁴ In der Zeichnung Abb. 2-10 a) gekennzeichnet durch die Bezeichnung *gap*.

¹⁵ Siehe Abb. 2-10 (S. 18) und NÄGERL S.18.

¹⁶ Vgl. NÄGERL S. 13.

Kraftwirkungslinien in den Kontaktpunkten jeweils zu den beteiligten Basis- und Kaputoberflächen senkrecht sind. Durch den Schnittpunkt P_0 dieser beiden Kraftwirkungslinien verläuft die momentane Drehachse.

Abb. 2-10 b) beinhaltet die in Abb. 2-10 a) dargestellte Situation (gestrichelt gezeichnete Kontur, markiert mit 0) und zeigt außerdem den Fall, dass die zweite Phalanx etwas nach ulnar verschoben ist (durchgezogen gezeichnete Kontur, markiert mit 1): Dadurch wandern die Kontaktpunkte nach radial, man erhält als Schnittpunkt der Kraftwirkungslinien den Punkt P_1 , der die veränderte Lage der momentanen Drehachse kennzeichnet. Für weitere Verschiebungen der zweiten Phalanx nach ulnar oder radial erhält man weitere momentane Drehachsen, sie liegen auf der Rastpolkurve p .

Die in Abb. 2-10 b) dargestellte Verschiebung bewirkt unter Berücksichtigung der Bedingung des Kraftschlusses eine leichte Drehung der zweiten Phalanx um den Winkel $\#$ nach radial. Da die die Gelenkkraft übertragenden Sehnen proximal im Bereich der ersten und distal im Bereich der zweiten Phalanx fixiert sind, erhält man die neue Kraftwirkungslinie $f_{\#}$ aus der zur Neutralstellung gehörenden Kraftwirkungslinie f durch eine Drehung um den Winkel $\#$. Da die Kraftwirkungslinie $f_{\#}$ auf der ulnaren Seite von P_1 liegt, erhält man ein Drehmoment, das der Auslenkung um den Winkel $\#$ entgegenwirkt. Das Gelenk wird so in transversaler Neutralstellung¹⁷ stabilisiert.

Nur durch ein äußeres Drehmoment ist eine axiale Rotation möglich. Der Umfang dieser Bewegung ist aber sehr gering, da sie zum einen durch die Gelenkbänder stark eingeschränkt wird. Zum anderen verursacht eine axiale Rotation aufgrund der oben beschriebenen Form der Gelenkflächen eine Schraubung, die zu einer Längsbewegung der zweiten Phalanx nach distal führt. Da diese Bewegung den kompressiven Gelenkkraften entgegengerichtet ist, wird sie vermieden.

Das PIP besitzt also insgesamt vier Freiheitsgrade, von denen jedoch nur zwei aktiv genutzt werden können.

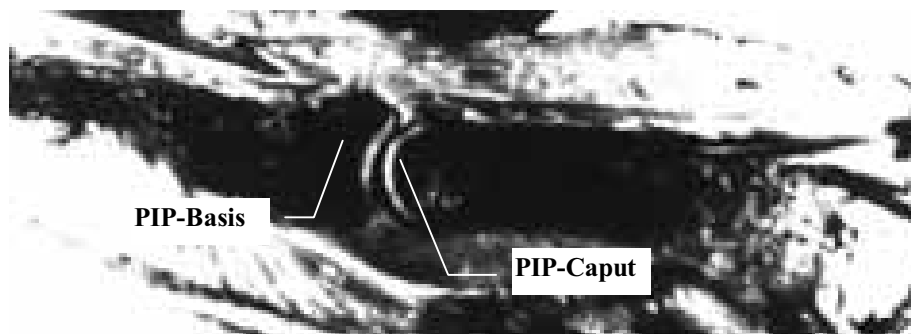


Abb. 2-9 : Medianer Schnitt durch den Finger aus Zuchschwerdt 1960

¹⁷ Siehe Abb. 2-10 a) (S. 18).