

2.1 Einleitung

Der Ellenbogen ist das gelenkige Verbindungsglied zwischen Ober- und Unterarm. Es zeichnet sich dadurch aus, dass es im Gegensatz zu anderen Gelenken drei Knochen miteinander verbindet und sich folglich aus drei Einzelgelenken, dem Humero-ulnar-, dem Humero-radial- und dem proximalen Radio-ulnar-gelenk, zusammensetzt. Die regelrechte Funktion der oberen Extremität ist maßgeblich von einem funktionierenden Ellenbogengelenk abhängig und ermöglicht in Kombination mit dem Schultergelenk einen hohen Bewegungsumfang. Darüber hinaus nimmt es wichtige lasttragende Funktionen wahr. Eine intakte Mobilität und Stabilität des Ellenbogengelenkes stellt daher die Voraussetzung nicht nur für alltägliche Bewegungsabläufe dar (Kapandji 1984). Der Funktionsverlust führt wie bei keinem anderen Gelenk unweigerlich zu einer massiven Einschränkung der individuellen Unabhängigkeit (Thomsen et al. 2001). Aufgrund der Komplexität des Gelenks sind genaue anatomische und biomechanische Kenntnisse Voraussetzung für ein besseres Verständnis der auftretenden Pathologien und der entsprechenden konservativen und operativen Behandlungskonzepte wie Gelenkrekonstruktionen bzw. endoprothetischem Gelenkersatz.

S. Seitz (✉) · W. R  ther
Klinik und Poliklinik für Orthopädie, Universitätsklinikum
Hamburg-Eppendorf, Martinistr. 52, 20246 Hamburg,
Deutschland
E-Mail: s.seitz@klinikumbb.de

W. R  ther
Klinik und Poliklinik für Orthopädie,
Universitätsklinikum Hamburg Eppendorf,
Martinistr. 52, 20246 Hamburg, Deutschland
E-Mail: ruether@uke.uni-hamburg.de

2.2 Knöcherne Strukturen

2.2.1 Distaler Humerus

Der distale Anteil des Humerus besteht aus zwei Kondylen, der Trochlea humeri und dem Capitulum humeri, die die Gelenkfläche für die Ulna bzw. den Radius bilden. Die mehr zentral als medial gelegene Trochlea hat eine hyperbolische, sanduhrförmige Oberfläche, die mit der halbmondförmigen Incisura trochlearis der Ulna artikuliert und über einen Bogen von 300   mit hyalinem Knorpel überzogen ist. Das Capitulum ist eher kugelig geformt und anterior mit einer ca. 2 mm dicken Knorpelschicht überzogen, so dass posterior das Anbringen von Osteosynthesematerial möglich ist (Abb. 2.1; Morrey 2000a). Das Caput humeri ist in der Sagittalebene um 30   nach ventral (distaler lateraler Humeruswinkel) gekippt (Abb. 2.2a) in der Transversalebene um ca. 5   einwärts rotiert (Abb. 2.2b) und in der Frontalebene 6   valgisch (humero-ulnare Gelenkachse) geneigt (Abb. 2.2c; Keats et al. 1966; Schiebler et al. 1995).

Proximal geht aus der Crista supercondylaris medialis unter Verbreiterung des Schaftendes der prominente Epicondylus medialis hervor, der als Ansatz der ulnaren Kollateralb  nder sowie der Flexor- und Pronator-muskulatur dient. An seiner Unterseite verläuft der N. ulnaris im Sulcus nervi ulnaris. Lateralseitig aus der Crista supracondylaris lateralis hervorgehend setzen die lateralen Kollateralb  nder und die Supinator-Extensoren-Muskelgruppe am Epicondylus lateralis an. Die prominente Crista supracondylaris lateralis ist dorsalseitig Ansatz des M. brachioradialis sowie des M. extensor carpi radialis und dorsalseitig des M. triceps und dient als wichtige Landmarke für alle lateralen Zugänge. Ventrolateraleitig nimmt medial die Fossa

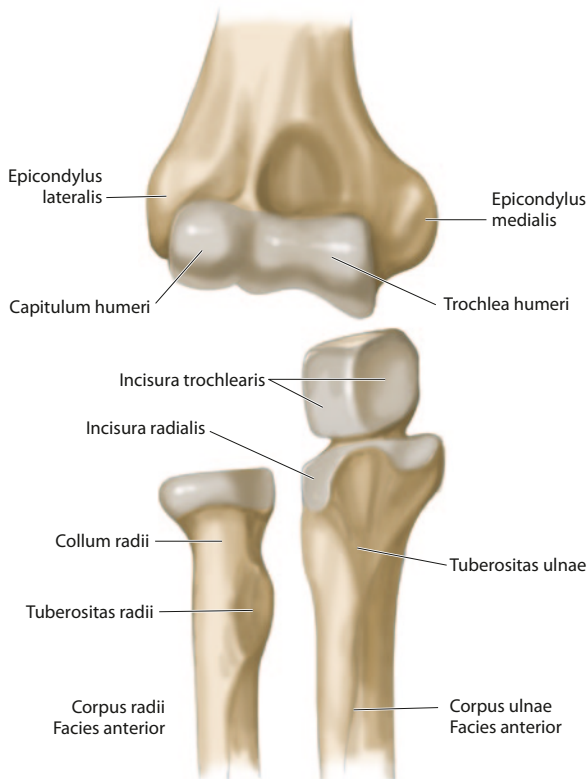


Abb. 2.1 Ellenbogengelenk von ventral: knöcherne Landmarken und Gelenkfläche

coronoidea den Processus coronoideus und lateral die Fossa radialis das Radiusköpfchen während der Beugung auf. In Streckung birgt posterior die Fossa olecrani die Spitze des Olekranons der Ulna. Sowohl die anteriore als auch die posteriore Fossae müssen zur ungestörten Beweglichkeit frei von Fremdmaterial sein.

2.2.2 Proximaler Radius

Der proximale Radius besteht aus der walzenförmigen Verbreiterung, dem Caput radii, das mit seiner seichten, mittleren Vertiefung mit dem Capitulum humeri artikuliert und mit der Circumferentia articularis in der Incisura radialis der proximalen Ulna rotiert (Abb. 2.1). Das anterolaterale Drittel der Circumferentia articularis ist nicht mit hyalinem Knorpel bedeckt und ist daher bei fehlender subchondraler Lamelle vermehrt frakturgef  hrdet (Thomas 1929). Distal schließt sich das Collum radii an, das zu der Längsachse des Radiuschaftes einen Winkel von 15   bildet (Abb. 2.3; Evans 1945). Die Tuberositas radii markiert das distale Ende des Collum radii, an das die Sehne des M. biceps brachii ansetzt und das bei Ruptur über einen dorsalen

Abb. 2.2 a In der Sagittalebene ist der distale laterale Humeruswinkel um 30   nach ventral gekippt. **b** In der Transversalebene ist die radiohumerales und ulnohumerales Gelenkfläche des distalen Humerus im Vergleich zur Epikondylenmittellinie um ca. 5   einwärts rotiert. **c** Die humeroulnare Gelenkachse ist in der Frontalebene 6   valgisch geneigt

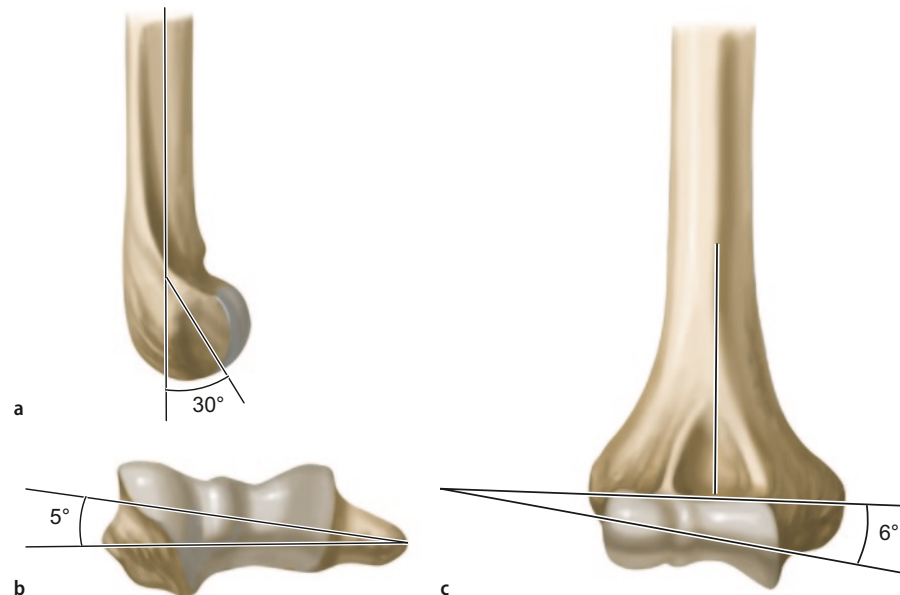


Abb. 2.3 Der Radiushals bildet mit der Radiuslängsachse einen Winkel von ca. 15°

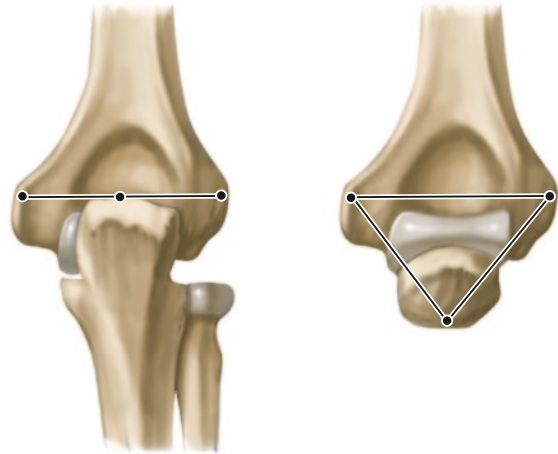


Abb. 2.5 Bei gestrecktem Ellenbogen liegt das Olekranon und die beiden Epikondylen auf einer geraden Linie liegen. In rechtwinklig gebeugtem Ellenbogen bilden die knöchernen Bezugspunkte ein inverses gleichseitiges Dreieck (Hueter-Dreieck)

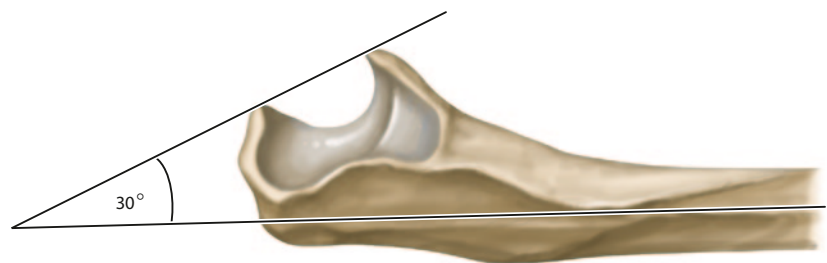
Zugang in maximaler Pronation refixiert werden kann (Klonz et al. 2003).

2.2.3 Proximale Ulna

Die proximale Ulna bildet die Hauptgelenkfläche des Ellenbogens und ist für dessen Primärstabilität im Wesentlichen verantwortlich (Morrey 2000a). Proximal artikuliert die Ulna mit dem distalen Humerus, indem die Incisura trochlearis das Kapitulum wie eine Zange mit einem elliptischen Bogen von ca. 190°

umfasst (Abb. 2.1; Sorbie et al. 1986). In der Transversalebene ist die Incisura trochlearis zur Ulnaschaftachse um 30° nach posterior (proximaler Ulnawinkel) geöffnet (Abb. 2.4), korrespondierend zu dem lateralen distalen Humeruswinkel (Keats et al. 1966). Ventral ist die sog. Ulnazange durch den Processus coronoideus und dorsal durch das Olekranon begrenzt, das als Ansatz für den M. triceps brachii dient. Während bei gestrecktem Ellenbogen das Olekranon und beide Epikondylen auf einer geraden Linie liegen, bilden sie bei rechtwinklig gebeugtem Ellenbogen ein inverses gleichschenkeliges Dreieck (Abb. 2.5). Bei dislozierten Frakturen oder Luxationen kommt es zu einer Aufhebung dieser Anordnung (Anson und Mc Vay 1971). Lateral an den Processus coronoideus schließt sich die Incisura radialis als Gelenkfläche für die Zirkumferenz des Radiusköpfchens an. In Verlängerung

Abb. 2.4 In der Transversalebene ist die Incisura trochlearis zur Ulnaschaftachse um 30° nach posterior geöffnet (proximaler Ulnawinkel) geöffnet



der Incisura radialis liegt die Crista supinatoris, die Ursprung des gleichnamigen Muskels und Ansatz der lateralen Anteile des ulnaren Kollateralbandes ist und damit das Humeroulnargelenk vor Varusstress sch  tzt (Morrey und An 1985).

2.3 Gelenkkapsel

Ventral inseriert die Kapsel oberhalb der Fossa coronoidea und Fossa radialis und distal am vorderen Rand des Processus coronoideus sowie am Lig. anulare radii. Unterhalb des Ligaments weitet sich die Kapsel auf und bildet den Recessus sacciformis. Dorsal geht die Gelenkkapsel von der Fossa olecrani aus und setzt distal am Rand der Incisura trochlearis und am Radiusansatz an. In 80   Beugung hat die Gelenkkapsel die größte Kapazität mit einem Volumen von 25–30 ml (Johansson 1962; O’Driscoll et al. 1990). Dies erklärt auch die klinische Beobachtung, dass der steife Ellenbogen vor allem zwischen 80 und 90   Beugung fixiert ist. Die relativ weite Gelenkkapsel erlaubt zwar einerseits ausgiebige Drehbewegungen des Radius, andererseits wird sie bei Beugung ventralseitig bzw. bei Streckung dorsalseitig gestaucht. Eine Einklemmung der Gelenkkapsel wird durch einstrahlende, sich kontrahierende Muskelfaserz  ge verhindert (Davies und Laird 1948). Die Gelenkkapsel wird von Ästen aller das Gelenk kreuzenden Nerven sensibel innerviert.

2.4 Bänder

2.4.1 Ligamentum collaterale mediale

Das ulnare Kollateralband setzt sich aus einer ventralen Haupt- sowie einer dorsalen und einer schwach ausgeprägten quer verlaufenden Komponente zusammen. Das Band entspringt am Unterrand des Epicondylus medialis des Humerus und verbreitert sich fächerförmig nach distal, bevor es am Proc. coronoideus in die Ulna einstrahlt. Das transversale Band, auch Cooper-Ligament genannt, hat seinen Ansatz und Ursprung am medialen Rand der Ulna. Es ist damit nicht gelenk  bergreifend und übt keine wesentliche gelenkstabilisierende Funktion aus (Abb. 2.6a). Das Ellenbogengelenk wird in maximaler Beugung oder Valgusstress durch das ventrale und posteriore Band,

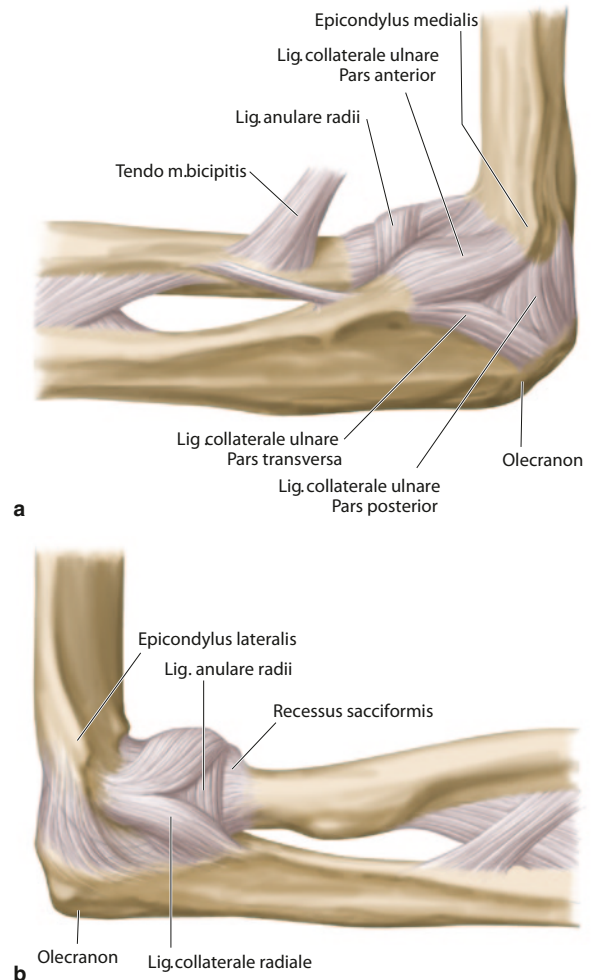


Abb. 2.6 **a** Das Lig. collaterale mediale ist ein Komplex aus 3 Bändern, das von einem ventralen, einem dorsalen und quer verlaufenden Bd. (Cooper-Ligament) gebildet wird. Der ventrale und dorsale Band entspringt am Unterrand des Epicondylus medialis des Humerus und setzt am Proc. coronoideus an. Das transversale Band ist nicht gelenk  bergreifend und hat seinen Ansatz und Ursprung am medialen Rand der Ulna. **b** Das Lig. collaterale laterale setzt sich aus dem radialen Seitenband, dem Lig. anulare sowie dem lateralen ulnaren Seitenband zusammen. Das radiale Seitenband entspringt am Epicondylus lateralis und strahlt in das Lig. anulare ein. Das Lig. anulare radii zieht von der Incisura trochlearis ringförmig um die Circumferentia articularis des Radiusköpfchens. Das laterale ulnare Seitenband entspringt am Epicondylus radialis und zieht dorsal des radialen Kollateralbandes zur Ulna

in Streckung nur durch die ventralen Anteile stabilisiert. Der ventrale Anteil ist der Hauptstabilisator gegen Valgusstress und trägt zu über 50% zur Valgusstabilit  t bei (Ball et al. 2002). Darüber hinaus ver-

ursacht die unterschiedliche Anordnung der Faserzüge einen moderaten Zug des Bandes und führt dadurch zu einer kompressiven Kraft im Gelenksystem (Thomsen et al. 2001). Bei einer Insuffizienz des ulnaren Kollateralbandes können supinatorische Übungen stabilisierend wirken, während Valgusbewegungen vermieden werden sollten. Der hintere Anteil des ulnaren Kollateralbandes bildet den Boden des Kubitaltunnels, in dem der N. ulnaris verläuft.

2.4.2 Ligamentum collaterale laterale

Das laterale Kollateralband setzt sich aus dem radialen Seitenband, dem Lig. anulare sowie dem lateralen ulnaren Seitenband zusammen. Das radiale Seitenband entspringt am Epicondylus lateralis und strahlt in das Lig. anulare radii ein, so dass Drehbewegungen des Radius ungehindert durchgeführt werden können. Das Lig. anulare radii zieht ventral von der Incisura trochlearis ringförmig um die Circumferentia articularis des Radiusköpfchens und setzt dorsal der Incisura trochlearis wieder an. Dadurch wird das Radiusköpfchen in der Incisura radialis der Ulna stabilisiert. Da das Radiusköpfchen nicht kreisrund ist, konnte nachgewiesen werden, dass die ventralen Anteile in Supination und die dorsalen Anteile in Pronation gespannt sind (Spinner und Kaplan 1970). Das laterale ulnare Seitenband entspringt am Epicondylus radialis in enger Beziehung zum M. supinator, M. anconeus und dem gemeinsamen Ansatz der Extensoren, von wo aus es dorsal des radialen Kollateralbandes zur Ulna zieht und dort nach Verbindung mit Fasern des Lig. anulare radii breitbasig inseriert (Abb. 2.6b). Das radiale Kollateralband stabilisiert das Ellenbogengelenk gegenüber Varusstress und Rotation und sollte bei Radiusköpfchenresektionen erhalten bleiben, um einer weiteren Varusinstabilität entgegenzuwirken (An et al. 1991). Bei einer Insuffizienz führt die pronatorische Positionierung des Unterarms zur einer Stabilisierung des Gelenkes.

2.5 Muskulatur

Die auf den Ellenbogen wirkende Muskulatur lässt sich in eine Flexoren- und Extensoren- sowie Supinations-/Pronationsgruppe einteilen. Die Flexorengruppe wird

im Wesentlichen von der ventralen Oberarmmuskulatur und von der radialen Muskelgruppe des Unterarms gebildet, die vom N. musculocutaneus bzw. N. radialis innerviert werden. Die Extension des Ellenbogens erfolgt hauptsächlich über die dorsale Oberarmmuskulatur, die vom N. radialis innerviert wird. Supination und Pronation können sowohl von der Gruppe der Flexoren als auch der Extensoren an Ober- und Unterarm erfolgen. Voraussetzung für die Umwendebewegung ist die Kreuzung der Pro- und Supinationsachse (Linie zwischen Caput radii und Caput ulnae) des entsprechenden Muskels. Die pronatorisch wirkende Muskelgruppe wird vom N. medianus innerviert, die Supinatoren vom N. radialis (Abb. 2.7).

2.5.1 Flexorengruppe

Musculus biceps brachii

Dieser zweiköpfige Oberarmmuskel verläuft ventralseitig und entspringt mit seinem Caput longum am Tuberculum supraglenoidale und mit seinem Caput breve am Proc. coracoideus. Im proximalen Oberarmdrittel vereinigen sich beide Köpfe, setzen gemeinsam an der Tuberositas radii an und strahlen mit der Aponeurosis bicipitalis in die Unterarmfaszie ein. Der M. biceps brachii ist der Hauptbeuger im Ellenbogengelenk und, da die Sehne bei Pronation um den Radius gewickelt wird, ein ebenso starker Supinator des Unterarms (Basmajian und Latif 1957).

Musculus brachialis

Der M. brachialis kommt unter dem M. biceps brachii zu liegen, entspringt breitflächig am distalen Humerus und der beiden Septa intermuscularia und setzt an der Tuberositas ulnae an. Einige Muskelfasern strahlen in die ventrale Gelenkkapsel ein und verhindern bei Beugung ein Einklemmen der Kapsel. Aufgrund seiner hohen Querschnittsfläche im Bereich des Ellenbogens ist er vermehrt anfällig für Verletzungen und periarthikuläre Ossifikationen bei Ellenbogenluxationen. Der eingelenkige Muskel ist aufgrund seines kurzen Hebelarms der effektivste Beuger.

Musculus brachioradialis

Der M. brachioradialis hat seinen Ursprung an der Margo lateralis des Humerus, verläuft seitlich des Radius nach distal und setzt am Proc. styloideus radii

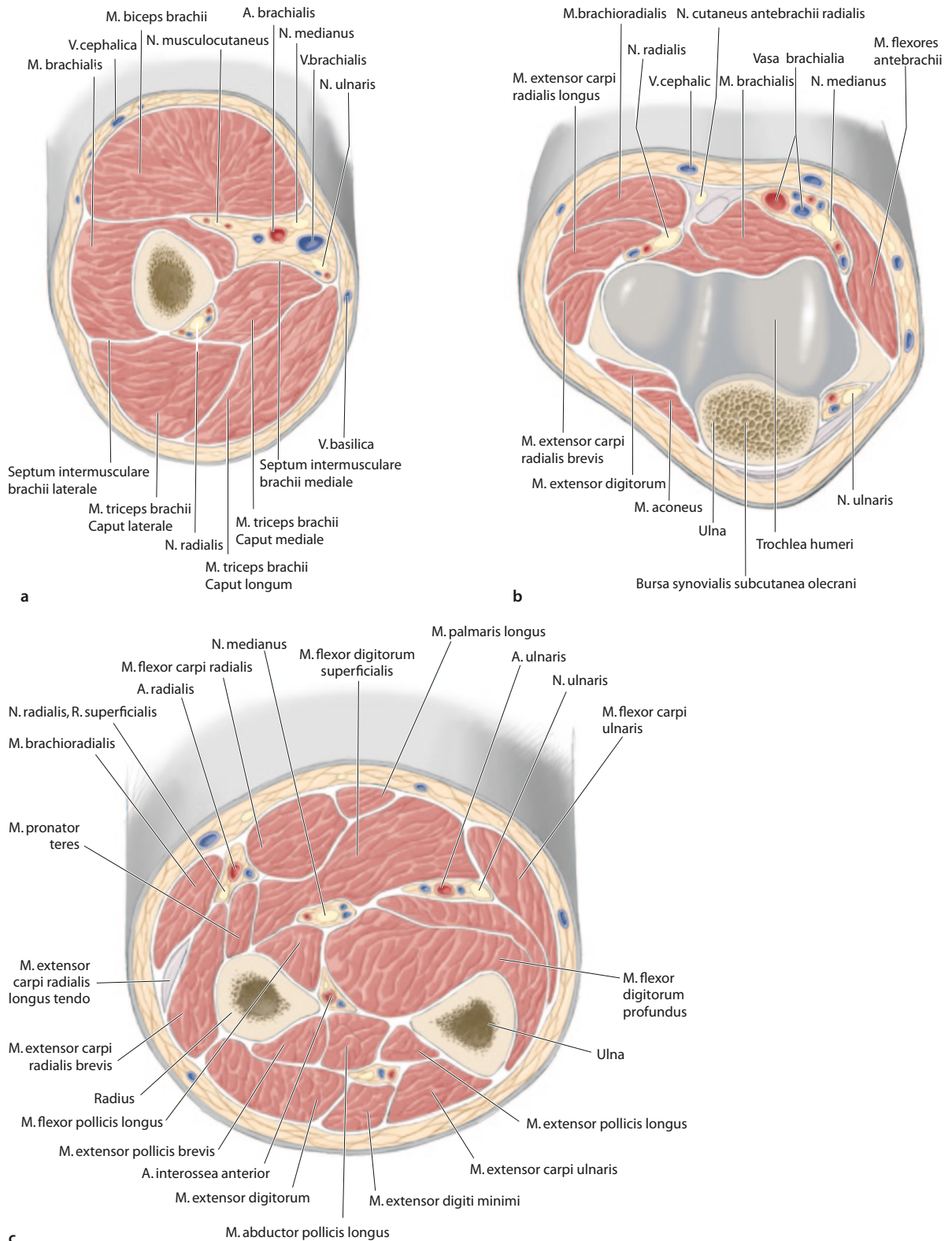


Abb. 2.7 Axialer anatomischer Schnitt proximal (**a**), auf Höhe (**b**) und distal (**c**) des Ellenbogens

an. Die Sehne separiert an ihrem Ursprung das Caput laterale des M. biceps brachii vom M. brachialis. Der M. brachioradialis ist aufgrund seines langen Hebelarms ein haltender Beuger im Ellenbogen, wobei die größte Beugekraft in Supination erreicht wird. Des Weiteren vermag er aus der Supinationsstellung des gebeugten Arms zu pronieren.

Musculus extensor carpi radialis longus

Der M. extensor carpi radialis longus gehört im Gegensatz zum M. biceps brachii und M. brachialis ebenso wie der M. brachioradialis der radialen Muskelgruppe des Unterarms an. Er entspringt an der Crista supracondylaris lateralis am Übergang zum Epikondylus und inseriert dorsal an der Basis des Os metacarpale II. Als zweigelenkiger Muskel streckt er typischerweise im Handgelenk und beugt darüber hinaus im Ellenbogengelenk. Zudem kann er, da er die Pro- und Supinationsachse kreuzt, den Unterarm aus extremer Supination pronieren. Ätiologisch ist der Ursprung der Sehne des M. extensor carpi radialis longus et brevis am Epicondylus lateralis mit der Pathologie des Tennisellenbogens eng verknüpft (Wilhelm 1989).

2.5.2 Extensorengruppe

Musculus triceps brachii

Der dreiköpfige M. triceps brachii verläuft dorsalseitig am Oberarm und bestimmt aufgrund seiner Muskelmasse das Oberflächenrelief. Er entspringt mit seinem Caput longum am Tuberculum infraglenoidale und an der Margo lateralis der Skapula sowie mit seinem Caput laterale und mediale an der dorsalen Fläche des Humerus proximal und lateral bzw. distal sowie medial vom Sulcus nervi radialis. Das Caput longum zieht zwischen M. teres minor und major nach distal, wobei es letztgenannten als Hypomochlion nutzt und dadurch seinen Hebelarm verbessern kann. Die Ursprünge des Caput laterale und mediale sind durch den Sulcus nervi radialis getrennt. Eine Schädigung des Nervens im mittleren Oberarmdrittel beeinträchtigt daher meist die Funktion der weiter proximal innervierten Caput longum und laterale nicht. Alle drei Köpfe setzen mit einer gemeinsamen Sehne am Olekranon an (Bryan und Morrey 1982). Medialseitig spalten sich Muskelfasern ab, die ihrerseits in die dorsale Kapsel strahlen und in Extension eine Einklemmung der Kapsel ver-

hindern (Schiebler et al. 1995). Der M. triceps brachii ist der einzige Strecker im Ellenbogengelenk.

Musculus anconeus

Der M. anconeus geht aus der lateralen Fortsetzung des Caput mediale hervor. Er entspringt am Epicondylus lateralis humeri und breitet sich fächerförmig auf der Streckseite des Ellenbogens nach distal aus. Die primäre Funktion des Muskels ist die Gelenkstabilisation (Basmajian und Griffin 1972). Nachdem er die lateralen Anteile des Lig. anulare radii und das Radiusköpfchen bedeckt, dient er darüber hinaus als Landmarke für laterale und posterolaterale Zugänge zum Ellenbogen. Des Weiteren kann er für rekonstruktive Verfahren verwendet werden.

2.5.3 Pronatoren- und Supinatorengruppe

Musculus pronator teres

Der M. pronator teres besteht gewöhnlich aus zwei Köpfen, wobei das Caput humerale am Epicondylus medialis und das schwächere Caput ulnare am Proc. coronoideus entspringt. Zwischen den beiden Köpfen verläuft der N. medianus, der bei Kompression zum Pronator-teres-Syndrom führen kann. Der Muskel zieht über die Längsachse des Unterarms und setzt am mittleren Drittel des Radius an der Facies lateralis an. Gemeinsam mit dem M. pronator quadratus, der distal auf der Facies anterior Radius mit Ulna verbindet, ist der M. pronator teres typischerweise ein starker Pronator des Unterarms, während seine Beugefähigkeit eher schwach ausgeprägt ist (An et al. 1981).

Musculus flexor carpi radialis

Der M. flexor carpi radialis hat seinen Ursprung ebenfalls am Epicondylus medialis und verläuft, nachdem er die Pro- und Supinationsachse überquert hat, unter dem Retinaculum flexorum im Karpaltunnel, um dann am Os metacarpale II anzusetzen. Seine Hauptfunktion ist zwar die Beugung im Handgelenk, er unterstützt jedoch zudem die Pronationsbewegung des Unterarms.

Musculus supinator

Neben dem M. biceps brachii wird die Supination durch den M. supinator ermöglicht. Er ist den tiefen Schichten der Extensoren am Unterarm zuzuordnen

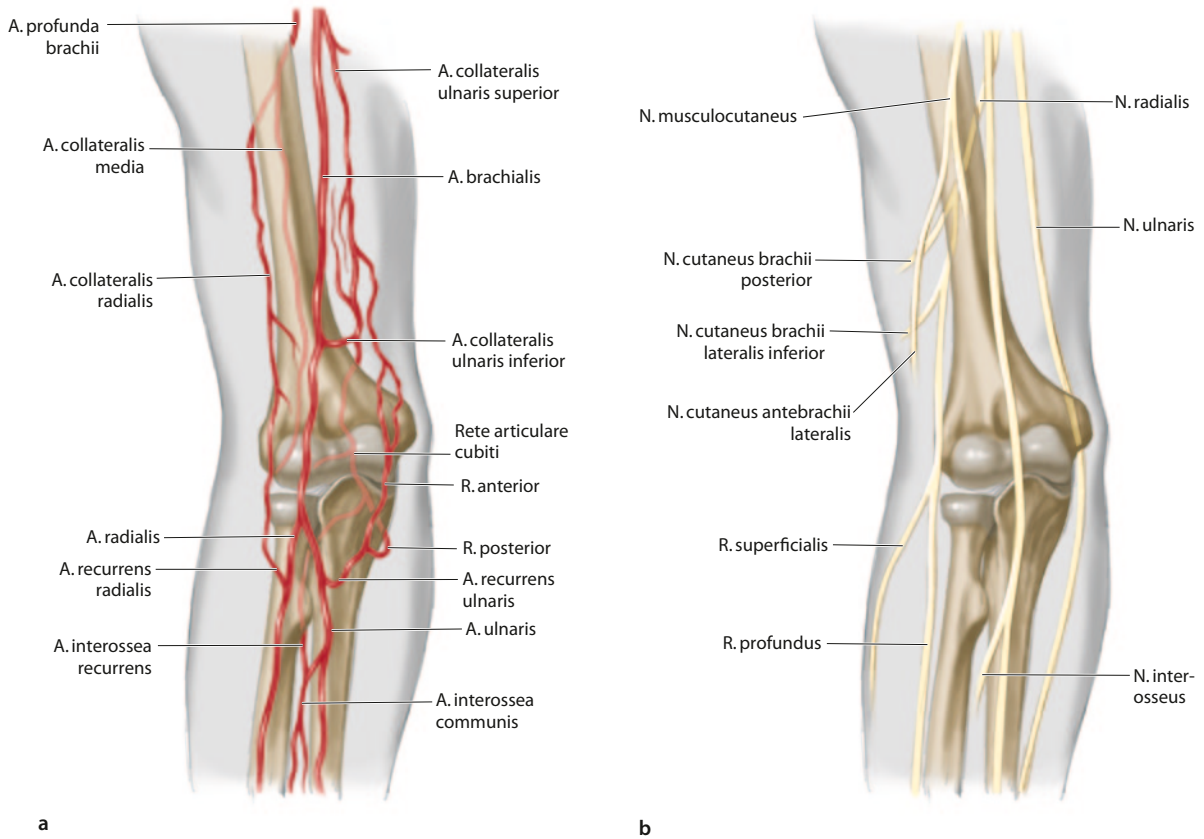


Abb. 2.8 Gefäße (a) und Nerven (b), der oberen Extremität, die durch das Ellenbogengelenk ziehen

und durch einen nahezu fehlenden sehnigen Anteil charakterisiert. Der M. supinator entspringt breitbasig proximal und distal des Ellenbogens am Epicondylus lateralis, dem Lig. collaterale radiale, dem Lig. anulare radii und an der Crista musculi supinatoris. Der flache Muskelbauch zieht von dorsal um den Radius und setzt proximal ventral und lateral am Radius an. Im Bereich der Frohse-Arkade, zwischen oberflächlichem und tiefen Kopf des M. supinator, tritt der R. profundus des N. radialis aus und kann dort komprimiert werden (Spinner und Kaplan 1970). Der M. supinator wird bei Pronation um den Radius gewickelt, so dass er bei Kontraktion zu einer Supinationsbewegung führt. Er ist zwar schwächer als der M. biceps brachii, jedoch ist seine Funktion nicht von der Beugestellung des Ellenbogens abhängig (Hollinshead 1969).

2.6 Gefäße und Nerven

Im Bereich des Ellenbogens teilt sich das Gefäß-Nerven-Bündel des Oberarms in die 5 Stränge des Unterarms auf. Aus der A. brachialis gehen unter der Aponeurosis musculi bicipitalis die A. ulnaris und die A. radialis hervor. Während die A. radialis über den M. pronator verläuft und unter dem M. brachioradialis nach distal gelangt, zieht die A. ulnaris unter dem M. pronator teres in die ulnare Gefäßnervenstraße und gelangt unter dem M. flexor carpi ulnaris nach distal. Der Ellenbogen wird über rückläufig aufsteigende Äste der A. radialis und A. ulnaris (A. recurrens radialis et ulnaris) versorgt, die untereinander und mit Kollateralarterien der A. brachialis im Rete articulare cubiti anastomosieren (Abb. 2.8a).

Der N. musculocutaneus (aus C5 und C7) durchbohrt den M. coracobrachialis und innerviert alle Flexoren des Oberarms. Ein Ausfall des Nerven führt jedoch nicht unweigerlich zur Beugeunf  hig-

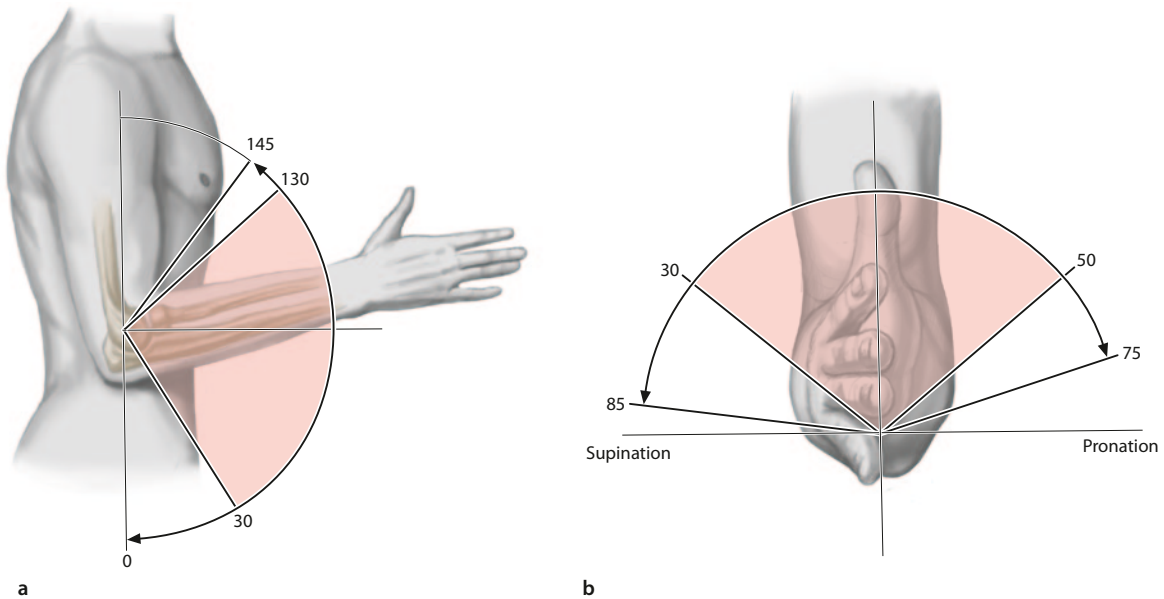


Abb. 2.9 Physiologisches Bewegungsausmaß des Ellenbogengelenks in Extension/Flexion (a) und Supination/Pronation (b)

keit im Ellenbogen, da der M. brachialis zum Teil vom N. radialis versorgt wird und einige Unterarmmuskeln im Ellenbogen beugen können. Der Endast des N. musculocutaneus ist der N. cutaneus antebrachii lateralis, der zwischen M. biceps brachii und M. brachialis lateralseitig nach distal verläuft. Dieser sensible Nerv sollte ebenso wie der direkt aus dem Armplexus entspringende N. cutaneus antebrachii medialis bei chirurgischen Zugängen zum Ellenbogen geschont werden.

Der N. medianus (aus C6–Th1) liegt zunächst medial der A. brachialis und gelangt zwischen Caput humerale und Caput ulnare in die mittlere Gefäßnervenstraße unterhalb des M. flexor digitorum superficialis.

Der N. radialis (aus C5–Th1) umschlingt den Humerus dorsal im mittleren Drittel und zieht zwischen Caput mediale und laterale des M. triceps brachii nach distal. Er gelangt zwischen M. brachioradialis und M. brachialis in die Ellenbeuge und spaltet sich vor dem Radiusköpfchen in einen oberflächlichen Ramus superficialis und einen tiefen Ramus profundus.

Der N. ulnaris (aus C8 und Th1) verläuft medialseitig am Oberarm dorsal des Septum intermusculare brachii zum Sulcus nervi ulnaris an der Unterseite des Epicondylus medialis. Er gelangt zwischen Caput humerale und Caput ulnare des M. flexor carpi ulna-

ris zur Beugeseite des Unterarms und verläuft mit der A. ulnaris in der ulnaren Gefäßnervenstraße nach distal. Bei einer Transposition des Nervens nach ventral sollte der motorische Ast des M. flexor carpi ulnaris identifiziert werden, der bereits auf Höhe des Ellenbogens abgehen kann (Abb. 2.8b; Rohen und Lütjen-Drecoll 2001).

2.7 Biomechanik und Kinematik

Das Ellenbogengelenk setzt sich aus den drei Teilgelenken Humeroulnar-, Humeroradial- und Radioulnargelenk zusammen. Die Bewegung erfolgt dabei im Wesentlichen in zwei Ebenen, wobei die Extension/Flexion im Humeroulnargelenk und die Supination/Pronation vor allem im Humeroradial- und proximalen Radioulnargelenk stattfindet (Abb. 2.9).

2.7.1 Beugung und Streckung

Funktionell bildet das knöchern eng geführte Humeroulnargelenk ein uniaxiales Scharniergelenk, obwohl biomechanische Untersuchungen zeigen konnten, dass die Scharnierbewegungen keiner festen zentralen Drehachse folgen. Auch wenn für die Biomechanik

Abb. 2.10 In der lateralen Projektion liegt das Rotationszentrum auf einer Linie, die durch die ventrale Kortikalis des distalen Humerus und das nach 30° ventral verkippte Capitulum humeri verläuft



des Ellenbogens eher von untergeordneter Bedeutung, wandert die humeroulnare Gelenkachse mit zunehmender Beugstellung bis zu 4° nach ventral. Die Rotationsachse verläuft dabei durch das Zentrum eines Bogens, der von Kapitulum und Incisura humeri gebildet wird (Ishizuki 1979; Morrey und Chao 1976). Bei Ellenbogenverletzungen bzw. endoprothetischer Versorgung ist die Rekonstruktion des Rotationszentrums essentiell für ein gutes klinisches Ergebnis und kann durch folgende Landmarke identifiziert werden. In der Sagittalebene liegt die Achse ventral der Mittellinie des Humerus auf einer Linie, die durch die ventrale Kortikalis des distalen Humerus verläuft (Abb. 2.10; O'Driscoll et al. 1992a). Alle ventral dieser Linie liegenden Muskeln führen bei Kontraktion zu einer Beugung, alle dorsal der Linie verlaufenden Muskeln strecken im Ellenbogen.

Eine weitere wichtige Rolle für eine regelrechte Funktionsfähigkeit des Ellenbogens in Flexion und Extension spielt der Tragewinkel (engl.: „carrying angle“). Er ist der Winkel zwischen der Humerus- und Ulnal  ngsachse bei extendiertem Arm und beträgt in der Regel zwischen 5° und 15°, abhängig vom Flexionsgrad (Abb. 2.11). Es konnte gezeigt werden, dass der Tragewinkel um 10–15° größer am dominanten Arm sein kann, und dass er sich beim Tragen von schweren Lasten vergrößert. Eine Zu- oder Abnahme des Tragewinkels über das physiologische Maß hinaus geht mit einer zunehmenden Instabilität einher (Paraskevas et al. 2004).



Abb. 2.11 Tragewinkel: Winkel zwischen der Humerus- und Ulnal  ngsachse bei extendiertem Arm. Physiologischer Bereich zwischen 5° und 15°

Das normale Bewegungsausmaß reicht von 0° Flexion bzw. leichter Überstreckbarkeit bis zu 150° Flexion, wobei für den alltäglichen Gebrauch ein Bewegungsausmaß zwischen 30° und 130° Flexion ausreichend ist (100°-Regel nach Morrey 2000b). Physiologisch wird das passive Bewegungsausmaß durch den knöchernen Kontakt des Radiusköpfchens in der Fossa radialis, den Proc. coronoideus in der Fossa coronoideus sowie die Gelenkkapsel und den M. triceps brachii limitiert (Johansson 1962; Martin 1958).

2.7.2 Supination und Pronation

Während das proximale Radioulnargelenk als ein Kreis-/Schraubgelenk bezeichnet werden kann, ist das Humeroradialgelenk funktionell ein auf zwei Freiheitsgrade eingeschränktes Kugelgelenk (Thomsen et al. 2001). Aufgrund des seitlichen Bandapparates fehlt jedoch die Beugung als ein weiterer Freiheitsgrad. Bei der Pronation/Supination rotiert vor allem der Radius um die Längsachse des Unterarms, die pro-

ximal durch das Radiusköpfchen und distal durch das Caput ulnae verläuft (Guttierez 1964). Dabei kommt es bei zunehmender Pronation im Sinne einer Schraubachse zu einer Proximalisierung des Radius (Morrey et al. 1988). Des Weiteren konnten biomechanische Studien belegen, dass die Ulna während der Umwende-bewegung eine nicht unerhebliche laterale Abduktion von 6–8° im Humeroulnargelenk durchführt, deren klinische Bedeutung jedoch noch nicht abschließend geklärt ist (Koebeke 1998; Weinberg et al. 2001). Eine Deformität des Radius oder der Ulna von weniger als 10° scheint keine Auswirkung auf die Umwende-bewegungen zu haben (Sarmiento et al. 1992). Aus der Neutral-Null-Stellung ist im Unterarm eine Pronation bzw. Supination von jeweils 80–90° möglich. Dabei wird der nötige funktionelle, alltäglich gebräuchliche Bewegungsumfang von ca. 100° ebenfalls um einiges übertroffen.

2.7.3 Stabilität

Das Ellenbogengelenk ist nicht nur das am meisten kongruierende Gelenk, sondern aufgrund der knöchernen Führung auch eines der stabilsten. Der Kapsel-Band-Apparat und die periartikuläre Muskulatur sind weitere Stabilisatoren bei Extrembewegungen.

Aus biomechanischer Sicht ist vor allem der ventrale Anteil des medialen Kollateralbandes in Beugung mit über 50 % der wichtigste Stabilisator bei Valgusstress (Morrey 2000b). Dabei konnte gezeigt werden, dass es bei alleiniger Ruptur des Bandes zu einer vermehrten symptomatischen medialen Aufklappbarkeit kommt (Morrey et al. 1991). Weitere, ebenso wichtige Stabilisatoren sind das Humeroulnargelenk und das Radiusköpfchen, wobei das Gelenk sowohl in Extension als auch Flexion vor allem über die proximale Incisura trochlearis stabilisiert wird (Rohlmann et al. 1986). In Extension wird die Stabilität gegen Valgusstress in gleichen Anteilen von der ventralen Gelenkkapsel inklusive der periartikulären Muskulatur, der artikulierenden Gelenkfläche sowie des medialen Bandapparates übernommen (Morrey und An 1983). Lange Zeit wurde die Bedeutung des Radiusköpfchens bei Valgusstress überschätzt. Bei intaktem medialen Kapsel-Band-Apparat führt eine Radiusköpfchenresektion oder -fraktur zu keiner weiteren Instabilität. Umgekehrt führt eine Radiusköpfchenresektion erst zu

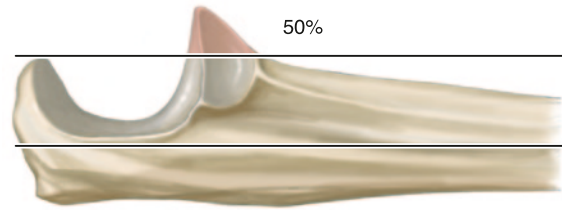


Abb. 2.12 In der Sagittalebene verläuft eine Linie durch die Spitze des Olekranons parallel zur Ulnaschaftachse durch die Mitte des Proc. coronoideus. Dadurch kann eine kritische Verletzung des Proc. coronoideus von mehr als 50 % abgeschätzt werden

einer symptomatischen Valgusinstabilität, wenn weitere Stabilisatoren wie das mediale Kollateralband und der Proc. coronoideus verletzt sind (Rohlmann et al. 1986). In diesem Fall sollte zur Aufrechterhaltung der Stabilität eine Radiusköpfchenprothese implantiert bzw. eine stabile Rekonstruktion des medialen Kollateralbandes bzw. des Proc. coronoideus durchgeführt werden.

Bei Varusstress erfolgt die Stabilisation in Flexion im Wesentlichen über den Proc. coronoideus des Humeroulnargelenks. Bei Frakturen bzw. Resektionen des Proc. coronoideus kommt es daher zu einer deutlichen Instabilität, die bei zusätzlichem Fehlen des Radiusköpfchens verstärkt wird. Biomechanische Studien konnten zeigen, dass bereits eine Resektion des Proc. coronoideus um 25 % zu einer Subluxation des Ellenbogens in 70° Beugung führt (Morrey 1998). Zur Abschätzung eines kritischen Verlusts des Proc. coronoideus von mehr als 50 % kann in der Sagittalebene eine Linie herangezogen werden, die von der Spitze des Olekranons parallel zur Ulnaschaftachse durch die Mitte des Proc. coronoideus verläuft (Abb. 2.12; Morrey 1998). In Extension sind das Humeroulnargelenk mit über 50 % und die Kapsel mit 30 % am Widerstand gegen Varusstress beteiligt und damit die wichtigsten Stabilisatoren. Die Bedeutung des lateralen Kollateralbandes bei Varusstress ist nicht abschließend geklärt. Verschiedene Studien konnten dem Lig. anulare radii unabhängig des Radiusköpfchens und dem lateralen ulnaren Seitenband eine stabilisierende Wirkung bei Rotation und Varusstress nachweisen (Olsen et al. 1996; Sojbjerg et al. 1987). Darüber hinaus konnten O'Driscoll et al. (1992b) zeigen, dass vor allem das laterale ulnare Seitenband eine wichtige Rolle bei der posterolateralen Stabilität zu spielen scheint. Bei Dis-

traktion in Extension ist die vordere Gelenkkapsel mit 70 % am Widerstand beteiligt. In Flexion wird diese Funktion überwiegend von dem medialen Kollateralband übernommen (Morrey 2000b).

2.7.4 Einwirkende Kräfte

Das Ellenbogengelenk wird schon bei der Verrichtung einfacher Arbeiten nicht unerheblich belastet. Bereits bei der Beugung ohne Widerstand wirkt das 1- bis 2fache Gewicht des Unterarms als Lagekraft auf das Ellenbogengelenk (Putz et al. 2003). Bei axialer Kompression, wie sie beispielsweise bei Liegestützen auftreten, können Kräfte bis zu 600 N/cm² auf den Ellenbogen wirken (Lou et al. 2001). Dabei wirkt die Kraft vor allem in der Sagittalebene anterior und posterior, während sie in mediolateraler Richtung mit daraus resultierendem Valgus-/Varusstress vernachlässigbar gering sind. Das spiegelt sich auch in der Verteilung der subchondralen Mineralisation wieder (Eckstein et al. 1995a, b).

In Beugung wird die Kraft gleichmäßig auf das Humeroulnar- und Humeroradialgelenk verteilt. Dagegen erfolgt die Krafteinleitung in Streckung zu 60 % über den Radius und nur zu 40 % über die Ulna. Das ist auch der Grund, warum es bei einem Sturz auf das gestreckte Handgelenk vor allem zu einer Fraktur des Radiusköpfchens kommt (Halls und Travill 1964; Walker 1977). In weiteren biomechanischen Studien an Kadavern konnte nachgewiesen werden, dass die Krafteinleitung auch entscheidend von der Valgus-/Varusstellung des Ellenbogens abhängig ist. Während in Valgusstellung nur noch 12 % der axialen Kraft über die proximale Ulna übertragen wird, sind dies in Varusstellung 93 % (Hotchkiss et al. 1989; Markolf et al. 1998).

Auch die Rotationsposition des Unterarms spielt bei der Kraftverteilung eine wichtige Rolle. Bei gebeugtem Ellenbogen führt die Pronation gegen Widerstand zu Drehkr  ften auf das mediale Kollateralband und das Radiusköpfchen, die 9/10 des Körpergewichts entsprechen können (Morrey et al. 1988). Dagegen übt die Supination gegen Widerstand keine wesentliche Kraft auf den Ellenbogen aus.

Literatur

- An KN, Hui FC, Morrey B, Linscheid RL, Chao EY (1981) Muscle across the elbow joint: a biomechanical analysis. *J Biomech* 14:659
- An KN, Browne AO, Korinek S, Tanaka S, Morrey BF (1991) Three-dimensional kinematics of glenohumeral elevation. *J Orthop Res* 9:143–149
- Anson BJ, Mc Vay CB (1971) *Surgical anatomy*. W.B. Saunders, Philadelphia
- Ball CM, Galatz LM, Yamaguchi K (2002) Elbow instability: treatment strategies and emerging concepts. *Instr Course Lect* 51:53–61
- Basmajian JV, Griffin WR Jr (1972) Function of anconeus muscle. An electromyographic study. *J Bone Joint Surg Am* 54:1712–1714
- Basmajian JV, Latif A (1957) Integrated actions and functions of the chief flexors of the elbow: a detailed electromyographic analysis. *J Bone Joint Surg Am* 39-A:1106–1118
- Bryan RS, Morrey BF (1982) Extensive posterior exposure of the elbow. A triceps-sparing approach. *Clin Orthop Relat Res* 166:188–192
- Davies F, Laird M (1948) The supinator muscle and the deep radial, posterior interosseous, nerve. *Anat Rec* 101:243–250
- Eckstein F, Lohe F, Hillebrand S, Bergmann M, Schulte E, Milz S, Putz R (1995a) Morphomechanics of the humero-ulnar joint: I. Joint space width and contact areas as a function of load and flexion angle. *Anat Rec* 243:318–326
- Eckstein F, Merz B, Muller-Gerbl M, Holzkn  cht N, Pleier M, Putz R (1995b) Morphomechanics of the humero-ulnar joint: II. Concave incongruity determines the distribution of load and subchondral mineralization. *Anat Rec* 243:327–335
- Evans EM (1945) Rotational deformity in the treatment of fractures of both bones of the forearm. *J Bone Joint Surg* 27:373
- Gutierrez LF (1964) A contribution to the study of the limiting factors of elbow flexion. *Acta Anat* 56:146–164
- Halls AA, Travill A (1964) Transmission of pressures across the elbow joint. *Anat Rec* 150:243–247
- Hollinshead WH (1969) The back and limbs. In: Hollinshead WH (Hrsg) *Anatomy for Surgeons*. Harper & Row, New York, S 379
- Hotchkiss RN, An KN, Sowa DT, Basta S, Weiland AJ (1989) An anatomic and mechanical study of the interosseous membrane of the forearm: pathomechanics of proximal migration of the radius. *J Hand Surg Am* 14:256–261
- Ishizuki M (1979) Functional anatomy of the elbow joint and three-dimensional quantitative motion analysis of the elbow joint. *J Jpn Orthop Assoc* 53:989–993
- Johansson O (1962) Capsular and ligament injuries of the elbow joint. A clinical and arthrographic study. *Acta Chir Scand Suppl* 287:1–159
- Kapandji IA (1984) *Funktionelle Anatomie der Gelenke*. Enke, Stuttgart
- Keats TE, Teeslink R, Diamond AE, Williams JH (1966) Normal axial relationships of the major joints. *Radiology* 87:904–907
- Klonz A, Loitz D, Reilmann H (2003) Proximale und distale Bizepssehnenruptur. *Unfallchirurg* 106:755–763

- Koebke J (1998) Funktionelle Anatomie und Biomechanik des Ellenbogengelenkes. In: Stahl C, Koebke J et al (Hrsg) *Klinische Arthrologie*. Ecomed, Landsberg, S 11
- Lou S, Lin CJ, Chou PH, Chou YL, Su FC (2001) Elbow load during pushup at various forearm rotations. *Clin Biomech (Bristol)* 16:408–414
- Markolf KL, Lamey D, Yang S, Meals R, Hotchkiss R (1998) Radioulnar load-sharing in the forearm. A study in cadavera. *J Bone Joint Surg Am* 80:879–888
- Martin BF (1958) The annular ligament of the superior radial ulnar joint. *J Anat* 52:473
- Morrey BF (1998) Complex instability of the elbow. *Instr Course Lect* 47:157–164
- Morrey BF (2000a) Anatomy of the elbow joint. In: Morrey B (Hrsg) *The elbow and its disorders*. W.B. Saunders, Philadelphia, S 13–42
- Morrey BF (2000b) Biomechanics of the elbow. In: Morrey B (Hrsg) *The elbow and its disorders*. W.B. Saunders, Philadelphia, S 43–60
- Morrey BF, An KN (1983) Articular and ligamentous contributions to the stability of the elbow joint. *Am J Sports Med* 11:315–319
- Morrey BF, An KN (1985) Functional anatomy of the elbow ligaments. *Clin Orthop* 201:84
- Morrey BF, Chao EY (1976) Passive motion of the elbow joint. *J Bone Joint Surg Am* 58:501–508
- Morrey BF, An KN, Stormont TJ (1988) Force transmission through the radial head. *J Bone Joint Surg Am* 70:250–256
- Morrey BF, Tanaka S, An KN (1991) Valgus stability of the elbow. A definition of primary and secondary constraints. *Clin Orthop Relat Res* 265:187–195
- O'Driscoll SW, Morrey BF, An KN (1990) Intraarticular pressure and capacity of the elbow. *Arthroscopy* 6:100–103
- O'Driscoll SW, Horii E, Morrey B, Carmichael SW (1992a) Anatomy of the ulnar part of the lateral collateral ligament of the elbow. *Clin Anat* 5:296–303
- O'Driscoll SW, Morrey BF, Korinek S, An KN (1992b) Elbow subluxation and dislocation. A spectrum of instability. *Clin Orthop Relat Res* 280:186–197
- Olsen BS, Vaesel MT, Sojbjerg JO, Helmig P, Sneppen O (1996) Lateral collateral ligament of the elbow joint: anatomy and kinematics. *J Shoulder Elbow Surg* 5:103–112
- Paraskevas G, Papadopoulos A, Papaziogas B, Spanidou S, Argiriadou H, Gigis J (2004) Study of the carrying angle of the human elbow joint in full extension: a morphometric analysis. *Surg Radiol Anat* 26:19–23
- Putz R, Milz S, Maier M, Boszczyk A (2003) Functional morphology of the elbow joint. *Orthopäde* 32:684–690
- Rohen JW, Lütjen-Drecoll E (2001) *Funktionelle Anatomie des Menschen*. Schattauer, Stuttgart
- Rohlmann A, Basli K, Bergmann G (1986) Analysis of the tension of the elbow joint before and after resection of the radius head. *Biomed Tech (Berl)* 31:230–239
- Sarmiento A, Ebramzadeh E, Brys D, Tarr R (1992) Angular deformities and forearm function. *J Orthop Res* 10:121–133
- Schiebler TH, Schmidt W, Zilles K (1995) *Anatomie*. Springer, Berlin
- Sojbjerg JO, Ovesen J, Gundorf CE (1987) The stability of the elbow following excision of the radial head and transection of the annular ligament. An experimental study. *Arch Orthop Trauma Surg* 106:248–250
- Sorbie C, Shiba R, Siu D, Saunders G, Wevers H (1986) The development of a surface arthroplasty for the elbow. *Clin Orthop Relat Res* 208:100–103
- Spinner M, Kaplan EB (1970) The quadratus ligament of the elbow: its relationship to the stability of the proximal radio-ulnar joint. *Acta Orthop Scand* 41:632
- Thomas TT (1929) A contribution to the mechanism of fractures and dislocations in the elbow region. *Ann Surg* 89:108–121
- Thomsen M, Loew M, Nägerl H (2001) Kinematik und Biomechanik des Ellenbogengelenks. *Orthopäde* 30:582–586
- Walker PS (1977) *Human joints and their artificial replacements*. Charles C. Thomas, Springfield, IL
- Weinberg AM, Pietsch IT, Krefft M, Pape HC van, Griensven M, Helm MB, Reilmann H, Tschern H (2001) Pronation and supination of the forearm. With special reference to the humero-ulnar articulation. *Unfallchirurg* 104:404–409
- Wilhelm A (1989) Therapieresistente Epicondylitis humeri radialis und Denervationsoperation. *Operat Ortho Trauma* 1:25–34

AE-Manual der Endoprothetik

Ellenbogen

Ruether, W.; Simmen, B. (Hrsg.)

2013, XVIII, 276 S. 205 Abb., 185 Abb. in Farbe.,

Hardcover

ISBN: 978-3-642-34671-2