

Anatomie und Gelenkwinkel des Knochens

PD Dr. med. Marc Hanschen

- 2.1 Einleitung – 12**
- 2.2 Knochentypen und funktionelle Knochenstruktur – 12**
 - 2.2.1 Knochenstruktur der langen Röhrenknochen – 12
- 2.3 Knöcherne Anatomie der unteren Extremität – 13**
 - 2.3.1 Anatomie des Femur – 13
 - 2.3.2 Anatomie der Tibia und der Fibula – 14
 - 2.3.3 Gelenkwinkel der unteren Extremität – 15
 - 2.3.4 Frontale Beinachsen – 15
 - 2.3.5 Gelenklinie – 17
 - 2.3.6 Sagittales Alignment – 17
 - 2.3.7 Patellofemorales Gelenk – 17
 - 2.3.8 Torsionsfehlstellung – 17
- Literatur – 17**

2.1 Einleitung

Das menschliche Skelett besteht in der Regel aus über 200 Knochen, ausgenommen Sesamoidknochen und Ossikel. Eine Unterteilung des Skeletts kann vorgenommen werden in

- das **axiale Skelett**
 - Kranium,
 - Wirbelsäule,
 - Rippen,
 - Sternum,
- das **appendikuläre Skelett**
 - obere und untere Extremitäten,
 - Schultergürtel,
 - Becken.

Neben der Funktion, dem Körper die Gestalt und Stabilität zu verleihen, ist es für die Lokomotion über an den Knochen ansetzende Muskulatur unerlässlich. Die Knochen des Skeletts bieten inneren Organen und dem Gehirn Schutz. Ferner ist das Skelett mit der Beherbergung des Knochenmarks an der Blutbildung beteiligt, nimmt mit der Speicherung und Hämostase von Mineralien eine wichtige Stoffwechselfunktion ein und ist Stoffwechselorgan mit der Ausschüttung von zellulären Botenstoffen [9]. Auf den Stoffwechsel des Knochens wird in ► Kap. 3 im Detail eingegangen. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Anatomie des Knochens sowie die Gelenkwinkel der lasttragenden unteren Extremität.

2.2 Knochentypen und funktionelle Knochenstruktur

Wir unterscheiden insgesamt 5 verschiedene Knochentypen (s. Übersicht).

Die 5 Knochentypen

- Die Länge der Knochen ist deutlich größer als der Durchmesser, in den mittleren Abschnitten befindet sich ein Hohlraum. Zu den **langen Knochen** gehören z. B. das Femur und die Tibia.
- Den **kurzen Knochen** fehlt im Gegensatz zu den langen Knochen der größere Hohlraum. Sie sind meist würfel- oder quaderförmig. Beispiele für kurze Knochen sind Hand- und Fußwurzelknochen.
- Durch ein besonders reiches Knochenmark sind **platte Knochen** gekennzeichnet, wie z. B. Schädel, Becken, Schulterblatt und Rippen.
- Zu den **unregelmäßigen Knochen**, die sich nach den oben genannten Strukturtypen nicht einord-

nen lassen, gehören die Wirbelkörper und Knochen des Gesichtsschädels.

- **Sesambeine** gehören schließlich zu den kleinsten Knochen des Körpers, sie sind in die Sehnen eingelagert und stellen ein Hypomochlion für die Kraftübertragung dar.

Knochen sind einem ständigen Umbau unterworfen. Dieser ständige Ab- und Aufbau sorgt für ein Remodelling, wobei insgesamt keine Knochensubstanz verloren geht. Details des Remodelling werden im folgenden ► Kap. 3 im Zusammenhang mit den Zellmechanismen des Knochens beschrieben.

Das menschliche Skelett besteht

- zu ca. 80 % aus kortikalem Knochen,
- zu ca. 20 % aus spongiösem Knochen.

Die Grundstruktur des kortikalen und spongiösen Knochens ist dabei mit den Lamellen gleich, jedoch liegen Unterschiede in der Dichte der Lamellen vor. Dichte Lamellen bilden die harte Kortikalis, aufgelockerte Lamellen die Spongiosa.

In Abhängigkeit des Knochentyps unterscheidet sich die Ratio zwischen Kortikalis und Spongiosa. Während bei Wirbelkörpern diese bei ca. 25:75 liegt, liegen bei langen Röhrenknochen, z. B. in der Diaphyse des Radius, Werte von 95:5 vor [1].

Das Remodelling des Knochens findet in den sog. „bone remodeling units“ (BRU) statt, das morphologische Korrelat nach Abschluss des lokalen Remodelling stellen die „bone structural units“ (BSU) dar. Bei der Spongiosa sprechen wir hier von „packets“ (spongiöse Osteone), bei der Kortikalis von Havers-Systemen (kortikale Osteone) [3]. Die Spongiosa folgt einem trabekulären Aufbau, entsprechend der Hauptspannungslinien der Knochenbelastung.

2.2.1 Knochenstruktur der langen Röhrenknochen

Auf die Struktur der langen Röhrenknochen soll im Folgenden näher eingegangen werden.

Lange Röhrenknochen bestehen mittig aus einem Schaft, genannt **Diaphyse**. Die Diaphyse ist vergleichbar mit einem Rohr, die Wand besteht aus kompakten Knochen (Kortikalis) mit der im Inneren befindlichen Markhöhle (**Cavitas medullaris**).

Die verdickten Enden der langen Röhrenknochen sind die **Epiphysen**. Hier liegt eine ausgedünnte Kortikalis vor bei vermehrtem Vorliegen spongiösen Knochens (■ Abb. 2.1).

Mit Ausnahme der Gelenkanteile, wo der Knochen durch das Vorliegen von Knorpel abschließt, sind lange

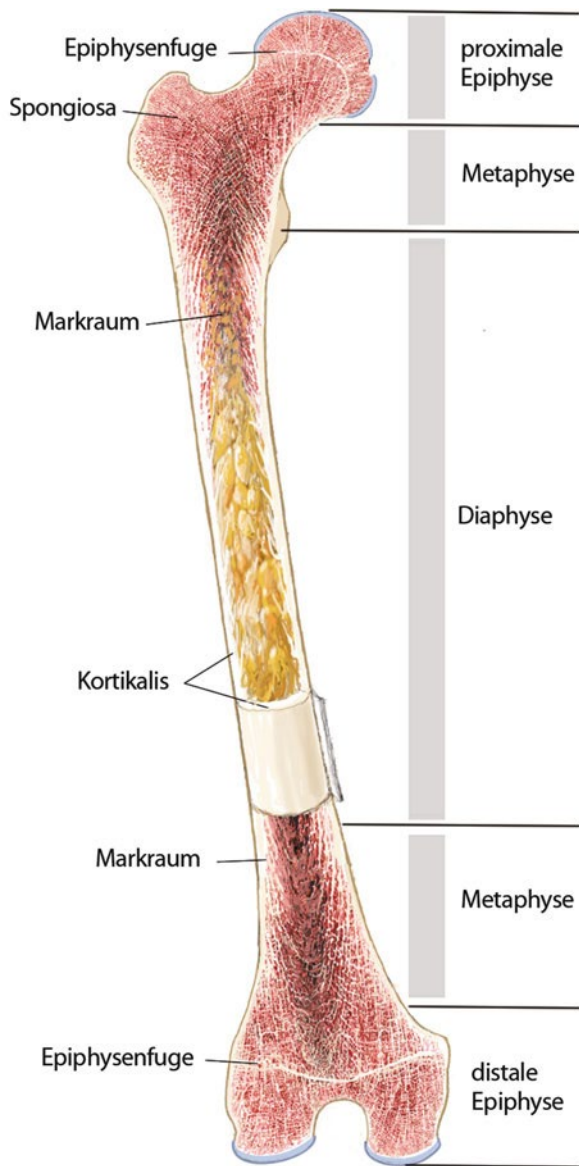


Abb. 2.1 Aufbau von Röhrenknochen. Der gelenknahe Anteil von Röhrenknochen wird als Epiphyse bezeichnet. Zwischen der Epiphyse und der Diaphyse, welche den Schaft des Röhrenknochens darstellt, befindet sich die Metaphyse. Im Wachstum ist die Metaphyse der Ort des Längenwachstums, hier befindet sich die Epiphysenfuge

Röhrenknochen von **Periost** umgeben. Das Periost stellt die Knochenhaut dar, bestehend aus 2 Schichten. Kräftige Kollagenfasern, sog. Sharpey-Fasern, stellen eine feste Verbindung zwischen dem Periost und der Kortikalis her. Das Periost enthält Blutgefäße und Nerven, mit dem Vorliegen von Osteoblasten und Osteoklasten ist das Periost an den Remodelling- und Wachstumsvorgängen des Knochens wesentlich beteiligt.

Während des Wachstums befindet sich zwischen der Diaphyse und der Epiphyse die **Metaphyse** mit der Epi-

physenfuge. Die Metaphysen sind knorpelige Wachstumszonen. Hier wandeln sich Knorpelzellen in knochenbildende Osteoblasten um.

➤ Bei der chondralen Ossifikation findet hier in den Metaphysen das Längenwachstum statt.

2.3 Knöcherne Anatomie der unteren Extremität

Die knöcherne untere Extremität setzt sich zusammen aus

- Oberschenkelknochen (Femur),
- Kniescheibe (Patella),
- Schienbein (Tibia),
- Wadenbein (Fibula),
- Fußgelenkknochen,
- Mittelfußknochen und
- Zehenknochen.

Im Folgenden wird, unter Berücksichtigung der Thematik dieses Buches, auf die Anatomie des Femur und der Tibia/Fibula im Näheren eingegangen.

2.3.1 Anatomie des Femur

Das Femur ist der längste Knochen des Körpers und artikuliert mit dem Beckenknochen im Hüftgelenk und mit der Tibia im Kniegelenk.

Die Länge des Femur bestimmt am meisten die Körperhöhe und kann entsprechend der Berechnungsformel nach Rother berechnet werden

Berechnungsformel für die Körperhöhe nach Rother

Männer:

$$\text{Femurlänge} \times 2,3 + 56,6 \text{ cm}$$

Frauen:

$$\text{Femurlänge} \times 1,1 + 102,6 \text{ cm}$$

Das Caput femoris bildet mit der kugelförmigen Gelenkfläche den femoralen Teil des Hüftgelenks. Die Fossa capitis ist zentral im Caput femoris gelegen und beherbergt das Lig. capitis femoris. Über das Collum femoris, den Schenkelhals, ist der Femurkopf mit dem -schaft verbunden.

Die Längsachse des Schenkelhals beschreibt mit der Diaphysenachse den **Collum-Diaphysen-Winkel** (CCD = Centrum-Collum-Diaphysenwinkel). In Abhängigkeit vom Alter lassen sich unterschiedliche CCD-Winkel beobachten. Mit Beginn des Laufens kommt es durch die Belastung zu einer Reduktion des CCD-Winkels. Bei Geburt

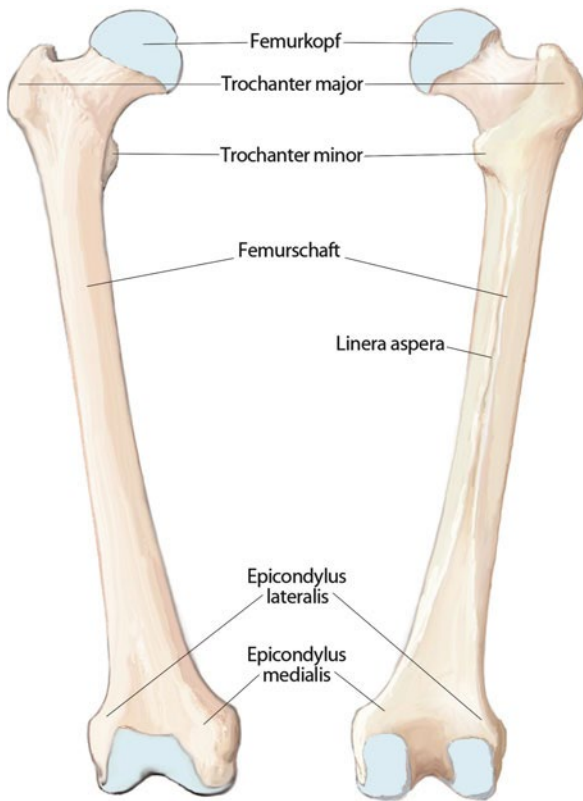


Abb. 2.2 Femur a.-p. und p.-a

werden CCD-Winkel von 150° beschrieben, beim Erwachsenen liegt der mittlere CCD-Winkel bei ca. 125° .

- Bei CCD-Winkelwerten $< 120^\circ$ liegt eine **Coxa vara** vor, bei Werten $> 130^\circ$ eine **Coxa valga**.

Der Übergang vom Femurhals zum Femurschaft ist charakterisiert durch die Apophysen **Trochanter major** und **Trochanter minor** (Abb. 2.2). Diese stellen die Ansatzstellen der hüftgelenksumgreifenden Muskulatur dar.

Entlang der dorsalen Femurdiaphyse verläuft längs die **Linea aspera**. Diese wirkt einerseits querschnittssparend, zu vergleichen mit den Leisten eines profilierten Trägers in der Technik, andererseits ist sie Ansatz der an die dorsale Diaphyse ansetzenden Muskulatur.

Die femurseitige Gelenkfläche des Kniegelenks wird durch die **Femurkondylen** gebildet (Abb. 2.2). Der Condylus medialis und der Condylus lateralis sind durch die Fossa intercondylaris voneinander getrennt. Die Kondylen sind von Gelenkknorpel überzogen, dieser setzt sich nach kranioventral in die Facies patellaris fort, der Kniescheibenrinne. Seitlich setzen sich die Kondylen in die Epikondylen fort und bilden Ansatzpunkt für Bänder und Muskulatur.

Die Femurkondylen sind nicht kreisförmig, sondern weisen eine spiralförmige Krümmung auf (Evolvente), dorsalseitig mit kleinerem Krümmungsradius, ventralseitig mit größerem Krümmungsradius. Analog zur Veränderung des CCD-Winkels kommt es im Rahmen der Entwicklung zu einer Torsion des Femurschaftes im Sinne einer Retrotorsion des distalen Femurendes.

- Physiologisch ist eine **Antetorsionsstellung des Schenkelhalses von ca. $10\text{--}15^\circ$** . Dies führt beim Laufen zu einem Ausschlagen der Fersen nach kranio-lateral und unterbindet eine gegenseitige Behinderung [2].

2.3.2 Anatomie der Tibia und der Fibula

Über das Kniegelenk ist das Femur mit der Tibia verbunden. Die **Kondylen** der Tibia (Condylus medialis et lateralis) stellen die Gelenkverbindung zu den Femurkondylen her (Abb. 2.3). Zwischen den Gelenkflächen der Kondylen befindet sich die Area intercondylaris mit der Eminentia intercondylaris.

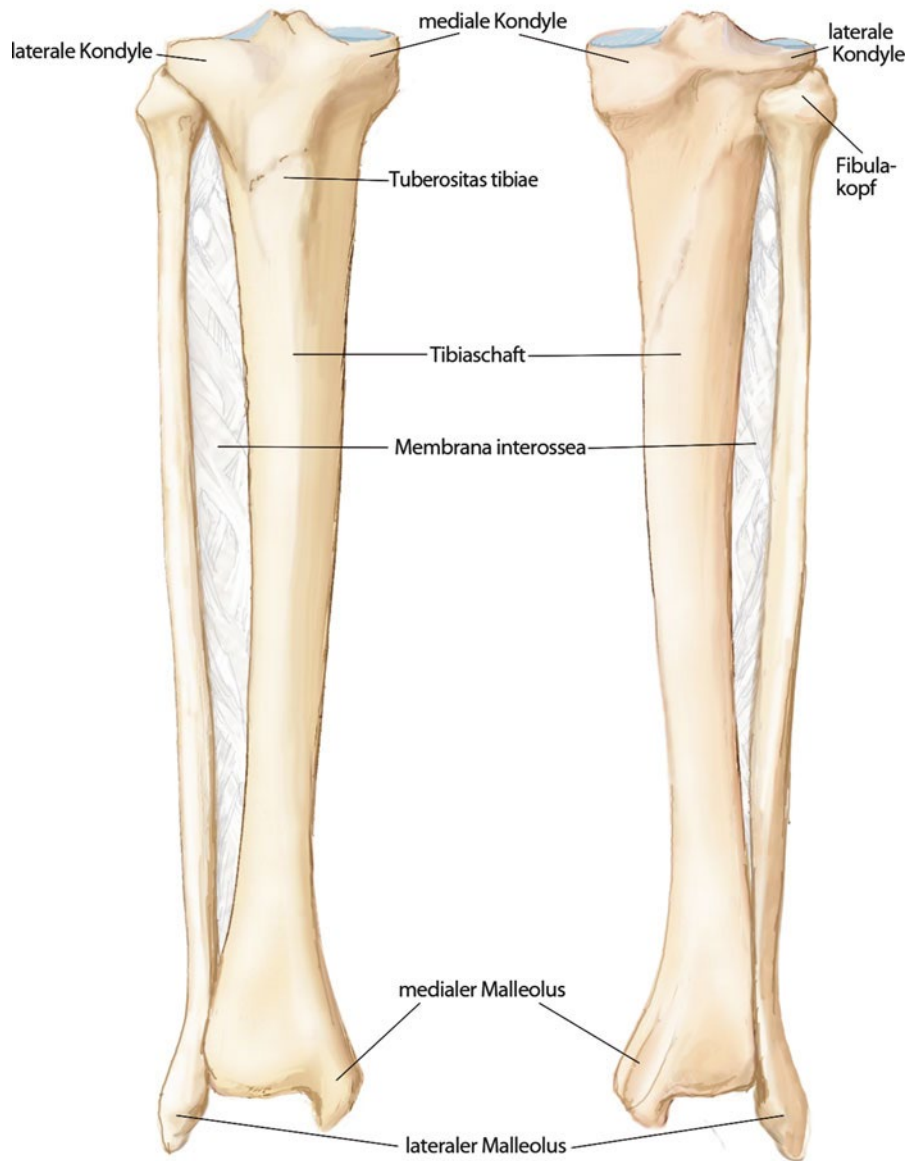
Das Tibiaplateau ist um ca. $3\text{--}7^\circ$ rückwärts geneigt (Retroversio tibiae). Ventralseitig ist mit der Tuberositas tibiae die Insertion des **Streckapparates des Kniegelenks** über das Lig. patellae gegeben.

- Das **Körpergewicht wird vom Femur fast vollständig auf die Tibia übertragen, die Fibula artikuliert nicht mit dem Femur**.

In der Articulatio tibiofibularis, einem straffen Gelenk (Amphiarthrose) sind nur geringe Gleitbewegungen nach vorn und hinten möglich. Der **Tibiaschaft** ist bei Erwachsenen dreikantig, es liegen die anatomischen Strukturen Margo anterior, Margo interosseus und Margo medialis vor.

Mit dem Innenknöchel, dem **Malleolus medialis**, schließt die Tibia nach distal ab und bildet die kraniale und mediale Gelenkfläche des oberen Sprunggelenks (Abb. 2.3). Die laterale Gelenkfläche wird durch die Facie articulares malleoli der distalen Fibula gebildet. Diese ist über die Syndesmosis tibiofibularis straff mit der Tibia verbunden.

- In der Entwicklung kommt es, analog zum Femur, zu einer **Torsion der Tibia**. Eine Torsion des distalen Endes der Tibia nach außen gleicht die Innenrotation des Femurs aus. Es resultieren **parallele Längsachsen der Füße in Ruhe**.



■ **Abb. 2.3** Tibia und Fibula
a.-p. und p.-a

2.3.3 Gelenkwinkel der unteren Extremität

Mit dem Ziel einer exakten Planung und der Durchführung einer erfolgreichen operativen Intervention ist nicht nur die Kenntnis der anatomischen Charakteristika der lasttragenden Knochens der unteren Extremität wichtig, sondern auch eine genaue Kenntnis der biomechanischen Achsen.

Komplexen Umstellungsosteotomien, insbesondere von kniegelenksnahen Fehlstellungen, sollte eine Analyse der folgenden 5 Parameter vorausgehen [4]:

- frontale Beinachsen,
- Gelenklinie,

- sagittales Alignment,
- patellofemorales Gelenk,
- Torsionsfehlstellung.

2.3.4 Frontale Beinachsen

Praxistipp

Goldstandard der Untersuchung der frontalen Beinachsen ist die Anfertigung einer Ganzbeinstandaufnahme unter Belastung [8]. Diese ist sowohl für die manuelle

konventionell zeichnerische Analyse der Beinachsen
als auch für die computerunterstützte Analyse der
Beinachsen anzufertigen.

Die Anfertigung der Ganzbeinstandaufnahme bedarf einer Standardisierung.

➤ **Insbesondere ist die Zentrierung der Patella im Kniegelenk wichtig, um Rotationsfehlstellungen zu vermeiden. Eine Aufnahme in Innenrotation kann eine Valgusfehlstellung vortäuschen, vice versa kann eine Aufnahme in Außenrotation eine Varusfehlstellung vortäuschen.**

Anhand der **mechanischen Beinachsen von Femur und Tibia** kann eine Varus- oder Valgusfehlstellung erkannt werden.

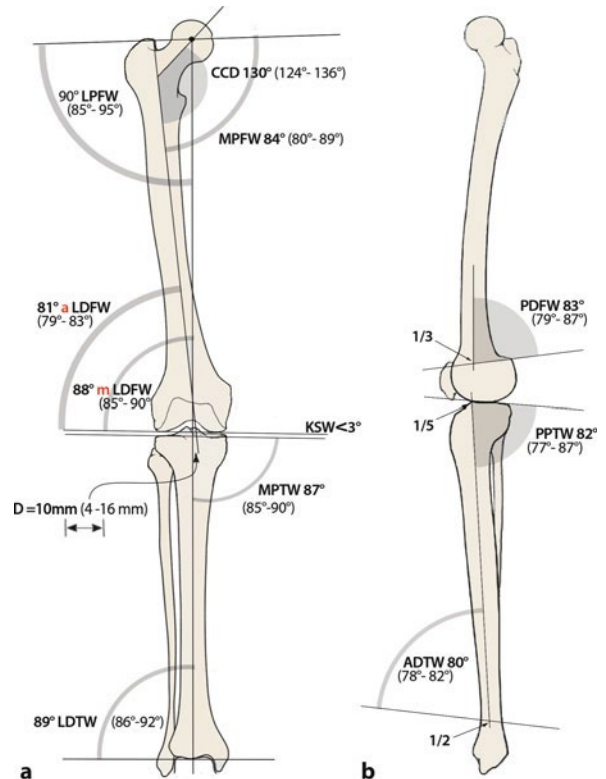
Obschon die Verbindung der Längsachsen des Ober- und Unterschenkels keine gerade Linie ergibt, sondern im Durchschnitt einen nach lateral offenen Winkel von 174° aufweist (Knieaußenwinkel), lassen sich die großen Gelenke der unteren Extremität dennoch über eine Linie verbinden. Mikulicz bezeichnete diese Linie als Direktionslinie, erst später erlangte diese Verbindungslinie des Beines den Eigenbegriff **Mikulicz-Linie** [6].

Mikulicz-Linie

Die Mikulicz-Linie ist die Verbindungslinie der Mitte des Femurkopfes und der Mitte der Knöchelachse. Die auch als Traglinie bezeichnete Achse [10] passiert das Kniegelenk nicht mittig, sondern verläuft gering medial (8 ± 7 mm).

Der Durchtrittspunkt der Mikulicz-Linie am Tibiaplateau (**Fujisawa-Punkt**) ist kennzeichnend für den Tibiaplateaustress in Prozent des gesamten Körpergewichtes. Er wird in Prozent der Tibiaplateaubreite (% TPB) angegeben (medial 0 % und lateral 100 %) [4, 5]. Weiteres Maß des Tibiaplateaustresses ist der Abstand der Mikulicz-Linie zur mechanischen Femurachse in Höhe des Kniegelenkes, die sog. „mechanical axis deviation“ (MAD).

Zur Bestimmung der Gelenkspaltweite werden die Kniegelenkslinien in der Frontalebene bestimmt. Die Kniegelenkslinie tibial wird in der Frontalebene den proximalsten Punkten des Tibiaplateaus angelegt, für das distale Femur wird sie tangential den beiden distalsten Punkten der Femurkondylen angelegt. Die Kniegelenkslinien bilden einen nach lateral offenen Winkel ($1-2^\circ$), da die laterale Knorpelschicht geringgradig dicker ist als die mediale [7].



■ **Abb. 2.4** a,b Bezeichnung der Gelenkwinkel und Normwerte für die frontale Ebene (Abkürzungen s. Text)

➤ **Ein vergrößerter Kniegelenkwinkel ist entweder Zeichen eines medialen Knorpelschadens oder einer lateralen Bandinsuffizienz.**

In Anlehnung und nach Konvention werden die **femorale und tibiale Gelenkwinkel in der Frontalebene** bestimmt (Abb. 2.4; [7]). Das Präfix (a) bezeichnet den anatomischen Gelenkwinkel, das Präfix (m) den mechanischen Gelenkwinkel.

Der **mediale proximale Femurwinkel (MPFW)** beschreibt den Winkel zwischen der anatomischen Femurachse und der Gelenkstellung der Hüfte in frontaler Ebene (Normwert $83 \pm 5^\circ$). Letztere wird durch eine Linie vom Hüftkopffzentrum zur Spitze des Trochanter major beschrieben.

Der **laterale proximale Femurwinkel (LPFW)** beschreibt den Winkel zwischen Gelenkstellung der Hüfte und mechanischer Femurachse, der Normwert ist $90 \pm 5^\circ$. Während der **mechanische laterale distale Femurwinkel (mLDFW)** $88 \pm 2^\circ$ beträgt, beschreibt der **anatomische laterale distale Femurwinkel (aLDFW)** einen Winkel von $81 \pm 2^\circ$. Mit dem mLDFW von $88 \pm 2^\circ$ steht die Kniegelenkslinie des distalen Femur in ca. 2° Valgus zur mechanischen Femurachse. Im Gegensatz dazu steht die Kniegelenkslinie der Tibia in ca. 3° Varus zur mechanischen Tibiaachse.

Der **mechanische mediale proximale Tibiawinkel (mMPTW)** beträgt $87 \pm 3^\circ$ (■ Abb. 2.4a)

2.3.5 Gelenklinie

Die Gelenklinie ist mittig zwischen der Kniegelenkslinie des Femur und der Tibia zu definieren. Die Gelenklinie steht bei einem normalen Kniegelenk zur Mikulicz-Linie in einer 3° -Varusstellung. Biomechanisch ist dies sinnvoll, da es im Rahmen der Adduktion in der Standbeinphase zu einer Ausrichtung des Kniegelenks kommt, sodass die Gelenklinie parallel verläuft.

2.3.6 Sagittales Alignment

Bei Vorliegen kniegelenksfern vorliegender Deformitäten sollte neben der streng seitlichen Aufnahme des Kniegelenks auch eine sagittale Ganzbeinaufnahme angefertigt werden [8]. Es werden der **anatomische posteriore distale Femurwinkel (aPDFW)** (Normwert $83 \pm 4^\circ$) sowie der **anatomische proximale posteriore Tibiawinkel (aPPTW)** (Normwert $81 \pm 3^\circ$) ausgemessen. Ersterer gibt Auskunft über die Flexions-Extensions-Stellung des distalen Femur zur anatomischen Femurachse [7], Letzterer gibt Auskunft über den dorsalen Abfall des Tibiaplateaus („slope“).

- **Wertigkeit erhalten die gemessenen Winkel nur in Zusammenschau mit der klinischen Untersuchung. Um die Messung interpretieren zu können, muss anhand der klinischen Untersuchung entschieden werden, ob eine Beugekontraktur oder Überstreckung des Kniegelenks, weichteilig bedingt, vorliegt oder in der Tat eine knöcherne Deformität [4].**

2.3.7 Patellofemorales Gelenk

Bei kniegelenksnahen Deformitäten und geplanten Osteotomien ist die Evaluation der Patella von Bedeutung. Biomechanisch wichtig sind die Analysen

- des Patellagleitverhaltens in der Trochlea,
- des Patellaanpressdrucks sowie
- der Kontaktfläche des Patellafemoralgelenks.

Praxistipp

Goldstandard ist die Anfertigung einer Patellatangentielaufnahme unter Belastung.

Eine bevorzugte Klassifikation oder Messmethode zur Beurteilung des patellofemorale Gleitlagers liegt zum aktuellen Zeitpunkt nicht vor [8]. Optionen sind

- der Kondylentiefenindex nach Ficat u. Bizou,
- der Sulkuswinkel nach Brattström oder
- der Kongruenzwinkel nach Merchant.

Die Patellahöhe kann in der Seitenaufnahme bei 30° Beugung z. B. durch den Blackburne-Peel-Index oder den Caton-Deschamps-Index bestimmt werden.

➤ Cave

Zu beachten ist, dass es bei geplanten Osteotomien zu einer Veränderung der Patellahöhe kommen kann. So führt eine medial öffnende Tibiaosteotomie proximal der Tuberositas zu einem relativen Tiefertreten der Patella.

2.3.8 Torsionsfehlstellung

Der Verdacht einer Torsionsfehlstellung wird im Rahmen einer gründlichen klinischen Untersuchung gestellt und sollte Anlass für eine CT- oder MRT-Vermessung sein [8]. Im Rahmen der Vermessung werden die Winkel der Hüfte, des Kniegelenks und des Sprunggelenks im Sinne einer Etagendiagnostik beurteilt.

Die Ermittlung der femoralen Antetorsion wird über Vermessung des Winkels des Schenkelhalses zur Horizontalen und des Winkels der dorsalen Kondylenachse zur Horizontalen festgestellt. Die tibiale Torsion wird durch das Verhältnis der Tibiakopfquerachse zur Intermalleolarachse bestimmt [8].

Literatur

1. Clarke B (2008) Normal bone anatomy and physiology. Clin J Am Soc Nephrol 3(Suppl 3):S131–S139. doi:10.2215/CJN.04151206
2. Drenckhahn D (1994) Untere Extremität. In: Drenckhahn D, Zenker W (Hrsg) Benninghoff Anatomie, Bd. 15. Urban & Schwarzenberg, München Wien Baltimore, S 325–404
3. Fleisch H (2000) Bone and mineral metabolism. Bisphosphonates in bone disease: from the laboratory to the patient, 4. Aufl. Academic Press, San Diego, S 1–26
4. Hofmann S, Lobenhoffer P, Staubli A, Van HR (2009) Osteotomies of the knee joint in patients with monocompartmental arthritis. Orthopade 38(8):755–769
5. Hsu RW, Himeno S, Coventry MB, Chao EY (1990) Normal axial alignment of the lower extremity and load-bearing distribution at the knee. Clin Orthop Relat Res 255:215–227
6. Mikulicz J (1878) Über individuelle Formdifferenzen am Femur und an der Tibia des Menschen. Arch Anat Physiol 1:351–404
7. Paley D, Pfeil J (2000) Principles of deformity correction around the knee. Orthopade 29(1):18–38

8. Pietsch M, Hofmann S (2006) Value of radiographic examination of the knee joint for the orthopedic surgeon. *Radiologe* 46(1):55–64
9. Taichman RS (2005) Blood and bone: two tissues whose fates are intertwined to create the hematopoietic stem-cell niche. *Blood* 105(7):2631–2639
10. Lanz T von, Wachsmuth W (1938) Bein und Statik. *Praktische Anatomie. Ein Lehr- und Hilfsbuch der anatomischen Grundlagen ärztlichen Handelns*, Bd. I/4. Springer, Berlin

Knochendefekte und Pseudarthrosen

Biberthaler, P.; van Griensven, M. (Hrsg.)

2017, XVIII, 204 S. 97 Abb. in Farbe., Hardcover

ISBN: 978-3-642-44990-1